

Studiengang Elektro- und Informationstechnik –
Energietechnik und Erneuerbare Energien

Bachelor-Thesis

Energieeinsparungen durch Energiemonitoring anhand eines konkreten Praxisbeispiels - Analyse von Messdaten, Aufdecken von Schwachstellen und Aufzeigen von Optimierungsmöglichkeiten des vorhandenen Messsystems

von

[REDACTED]

Matrikelnummer:

[REDACTED]

Referent:

[REDACTED]

Korreferent:

[REDACTED]

Arbeitsplatz:

ENGIE Deutschland GmbH, Niederlassung Stuttgart

Betreuer am Arbeitsplatz:

[REDACTED]

Zeitraum:

01.03.2022 – 30.06.2022

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich an Eides statt und durch meine Unterschrift, dass die vorliegende Bachelor- Thesis von mir selbstständig und ohne unerlaubte Hilfestellung angefertigt worden ist. Alle benutzen Hilfsmittel sind vollständig und genau angegeben. Inhalte und Passagen, die aus fremden Quellen stammen und direkt oder indirekt übernommen worden sind, wurden als solche kenntlich gemacht.

Stuttgart, den 30.06.2022

Unterschrift:

Vorname, Nachname

Vorwort

Diese Bachelor-Thesis habe ich als Abschlussarbeit meines Studiums der Elektrotechnik in Fachrichtung Energietechnik und Erneuerbare Energien an der Hochschule Karlsruhe im Rahmen eines Pilotprojektes im Unternehmen ENGIE Deutschland GmbH verfasst.

Die Bachelor-Thesis behandelt die Fragestellungen „Führen Energiemonitoring Lösungen nachweislich zu Energieeinsparungen? Wie müssen Produkte und Dienstleistungen aufgebaut sein, um diesem Anspruch gerecht zu werden?“. Dabei wurden diese Fragestellungen anhand eines konkreten Praxisbeispiels am Klinikum ████████ untersucht.

Kurzfassung

Die Steigerung der Energieeffizienz und der dadurch sinkende Energieverbrauch ist ein wichtiger Bestandteil auf dem Weg zur Klimaneutralität. Ein Schlüssel zur Steigerung der Effizienz in Gebäuden ist die Detektion von Einsparpotentialen, welche mittels Energiemonitoringsystemen erkannt und gemessen werden können.

Mittlerweile gibt es von vielen verschiedenen Anbietern Energiemonitoringsysteme, welche oft auch unterschiedliche Funktionalitäten besitzen. Welche dieser Anforderungen ein solches Monitoringsystem besitzen muss, damit Energieeinsparpotentiale sichtbar werden, ist nicht offensichtlich. Diese Messsysteme sollen des Weiteren Energieverschwendungen erkennen und die Qualität der Messdaten sicherstellen. Wichtig dabei ist außerdem die Auswahl eines geeigneten Messkonzeptes bzw. Zählerstruktur zu entwickeln.

Bei der Analyse werden die gemessenen Daten auf Einsparpotentiale untersucht. Außerdem können Schwachstellen und Optimierungsmöglichkeiten des Energiemonitoringsystem und der Zählerstruktur aufgedeckt werden.

Abstract

Increasing energy efficiency and thus reducing energy consumption is a vital component on the road to climate neutrality. A key to increasing efficiency in buildings is the detection of potential savings, which can be detected and measured with the help of energy monitoring systems.

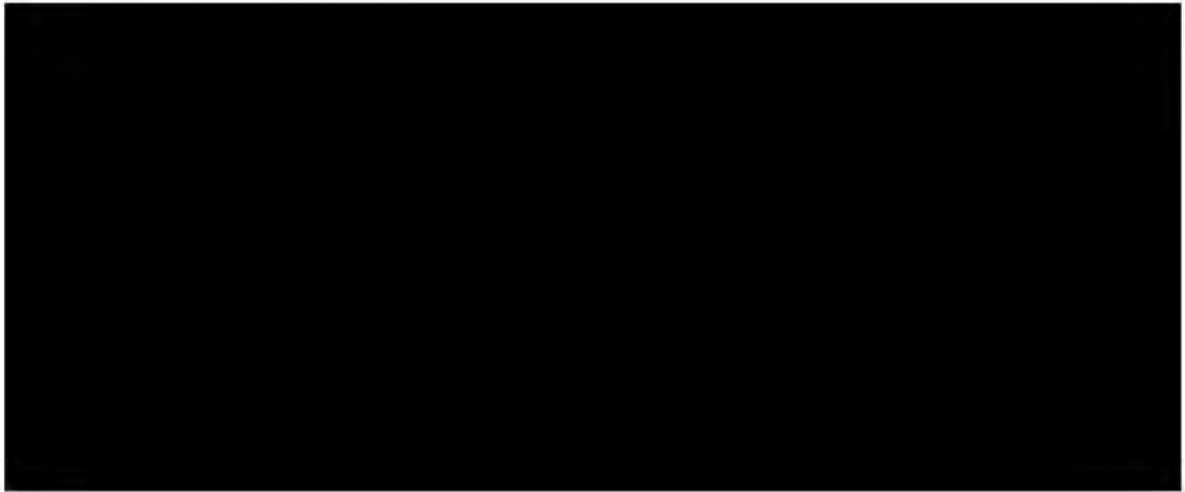
In the meantime, there are many different suppliers of energy monitoring systems, which often have different functionalities. Which of these requirements must have such a monitoring system, so that energy saving potentials become visible, is not obvious. Furthermore, these measuring systems should detect energy wastage and ensure the quality of the measured data. It is also important to develop a suitable measurement concept or meter structure.

During the analysis, the measured data is examined for potential savings. In addition, weak points and optimization possibilities of the energy monitoring system and the meter structure can be uncovered.

Danksagungen

Hiermit möchte ich mich bei all denjenigen bedanken, die mich während der Anfertigung meiner Bachelor- Thesis unterstützt haben.

Mein Dank gilt besonders:



Sperrvermerk

Die vorliegende Bachelorarbeit mit dem Titel: *„Energieeinsparungen durch Energiemonitoring anhand eines konkreten Praxisbeispiels - Analyse von Messdaten, Aufdecken von Schwachstellen und Aufzeigen von Optimierungsmöglichkeiten des vorhandenen Messsystems“* beinhaltet interne und vertrauliche Informationen des Unternehmens: ENGIE Deutschland GmbH. Eine Einsicht in diese Bachelorarbeit ist nicht gestattet. Ausgenommen davon sind die betreuenden Dozenten sowie die befugten Mitglieder des Prüfungsausschusses. Eine Veröffentlichung und Vervielfältigung der Bachelorarbeit – auch in Auszügen – ist nicht gestattet. Ausnahmen von dieser Regelung bedürfen einer Genehmigung der ENGIE Deutschland GmbH.

Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis	I
Abkürzungsverzeichnis	III
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Aufgabenstellung	2
1.3 Vorgehensweise	3
2 Energiemonitoring	5
2.1 Definition	5
2.2 Energiemonitoring, -controlling und -management	5
2.3 Energieleistungskennzahlen (EnPI)	7
2.4 Umsetzung eines Monitoringsystems	9
2.5 ENTECTIV	15
3 BAFA Pilotprojekt Energieeinsparzähler	17
4 Energiebedarf Krankenhäuser	19
4.1 Hauptverbraucher in Krankenhäusern	19
4.2 Typische Energiekennzahlen in Krankenhäusern	20
5 Energetische Analyse des Klinikums [REDACTED]	22
5.1 Monitoringsystem vor Ort	22
5.2 Analyse der Jahre 2019 – 2021	24
6 Optimierung des ENTECTIVs	52
6.1 Validierung der Rohdaten	52
6.2 Anlernen von Modellen und Bildung von Schwellwerten	54
6.3 Weitere Optimierungsmöglichkeiten	58
7 Fazit	60
8 Verzeichnisse	62
8.1 Literaturverzeichnis	62
8.2 Abbildungsverzeichnis	65
8.3 Tabellenverzeichnis	67
9 Anhang	68
9.1 Energiepreise des Klinikums [REDACTED] 2021	68
9.2 CO ₂ -Emissionsfaktoren 2021	68
9.3 Klimafaktoren KF [DWD, 2022]	68
9.4 Gebäudeübersicht	69
9.5 Abbildungen und Tabellen	70

Symbolverzeichnis

Symbol	Einheit	Bezeichnung
a_i		Anpassungsparameter
COP	%	Coefficient of Performance
E_{CO_2}	t CO ₂	CO ₂ - Emissionen
EER	%	Energy Efficient Ratio
EF	t CO ₂ /MWh	Emissionfaktor
EK	€	eingesparte Kosten
G_{15}	Kd/a	Heizgradtage im Jahr
G_{15m}	Kd	mittlere Heizgradtage
H_o	MWh/m ³	Brennwert (hier: Erdgas)
H_u	MWh/m ³	Heizwert (hier: Erdgas)
K	€	Kosten
KF	%	Klimafaktor
m	kg	Masse
n		Anzahl
P	kW	Leistung
p	€/MWh	Preis pro Energieeinheit
P_{LP}	kW _{el.}	Leistung Lösungsmittelpumpe
Q	kWh	Wärmeenergie
\dot{Q}	KW _{th.}	Wärmeleistung
\dot{Q}_0	KW _{th.}	Kälteleistung
Q_0	kWh	Kälteenergie
q_1		25%-Quartil
q_2		75%-Quartil
\dot{Q}_A	KW _{th.}	Absorptionswärme
$Q_{erz.}$	KWh	erzeugte Wärmemenge
\dot{Q}_G	KW _{th.}	Antriebswärme
$Q_{Heiz.}$	kWh	Heizenenergie
\dot{Q}_K	KW _{th.}	Kondensationswärme
$Q_{ver.}$	KWh	verbrauchte Wärmemenge
$\dot{Q}_{verluste}$	KW _{th.}	Verlustwärme
t_m	°C	mittlere Außentemperatur des Heiztages
t_R	°C	Rücklauftemperatur
t_v	°C	Vorlauftemperatur

V_{bh}	h	Vollbenutzungsstunden
v	l/kg	spezifisches Volumen
V	m^3	Volumen
\dot{V}	m^3/s	Volumenstrom
W	kWh	Arbeit / Energie
$W_{el.}$	KWh	elektrische Energie
$W_{erz.}$	KWh	erzeugte Energie
$W_{ver.}$	KWh	verbrauchte Energie
\bar{x}		Arithmetischer Mittelwert
ζ	%	Wärmeverhältnis
$\eta_{el.}$	%	elektrischer Nutzungsgrad
$\eta_{ges.}$	%	gesamt Nutzungsgrad
$\eta_{th.}$	%	thermischer Nutzungsgrad
σ	%	Standartabweichung

Abkürzungsverzeichnis

BAFA	Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle
BHKW	Blockheizkraftwerk
COP	Coefficient of Performance
CT	Computertomographie
DAkkS	Deutsche Akkreditierungsstelle
EDL-G	Energiedienstleistungsgesetz
EER	Energy Efficiency Ratio
EnPI	Energy Performance Indicators
E-Wasser	entsalztem Wasser
GLT	Gebäudeleittechnik
KMU	Klein- und Mittelständische Unternehmen
KMZ	Kältemengenzähler
KWK	Kraftwärmekopplung
KWKG	Kraft-Wärme-Kopplungs-Gesetz
MRT	Kernspintomographie
NGF	Nettogrundfläche
PDCA	Plan, Do, Check, Act,
RLT	Raumluftechnik
SEU	serial energy use
Vbh	Vollbenutzungsstunden
VE - Wasser	vollentsalztes Wasser
WMZ	Wärmemengenzähler

1 Einleitung

1.1 Motivation

Der aktuelle Bundesminister für Wirtschaft und Klimaschutz Robert Habeck hat in einer Pressekonferenz am 11.01.2022 die Ziele der Bundesregierung vorgestellt, die Energiewende als treibende Kraft für Energieeffizienz, Modernisierung, Innovation und Digitalisierung bei der Strom- und Wärmeversorgung zu nutzen. Dabei ist nicht die alleinige Lösung die Energie „grüner“ zu produzieren, sondern diese auch einzusparen. Dies gelingt allerdings nur, wenn die Energie effizienter genutzt wird [BMWK, 2022]. Ein weiterer Grund für die effizientere Nutzung von Energie sind die rasant ansteigenden Energiepreise. Diese Preisentwicklung ist in Abbildung 1 für die Energieträger Erdgas und Strom von 2008 bis 2021 in halbjährlichen Schritten aufgetragen. Die Steigerung des Erdgaspreises betrug zwischen den 2. Halbjahren der Jahre 2020 und 2021 65%. Der Strompreis hingegen stieg im gleichen Zeitraum um 7% an [Destatis, 2022].

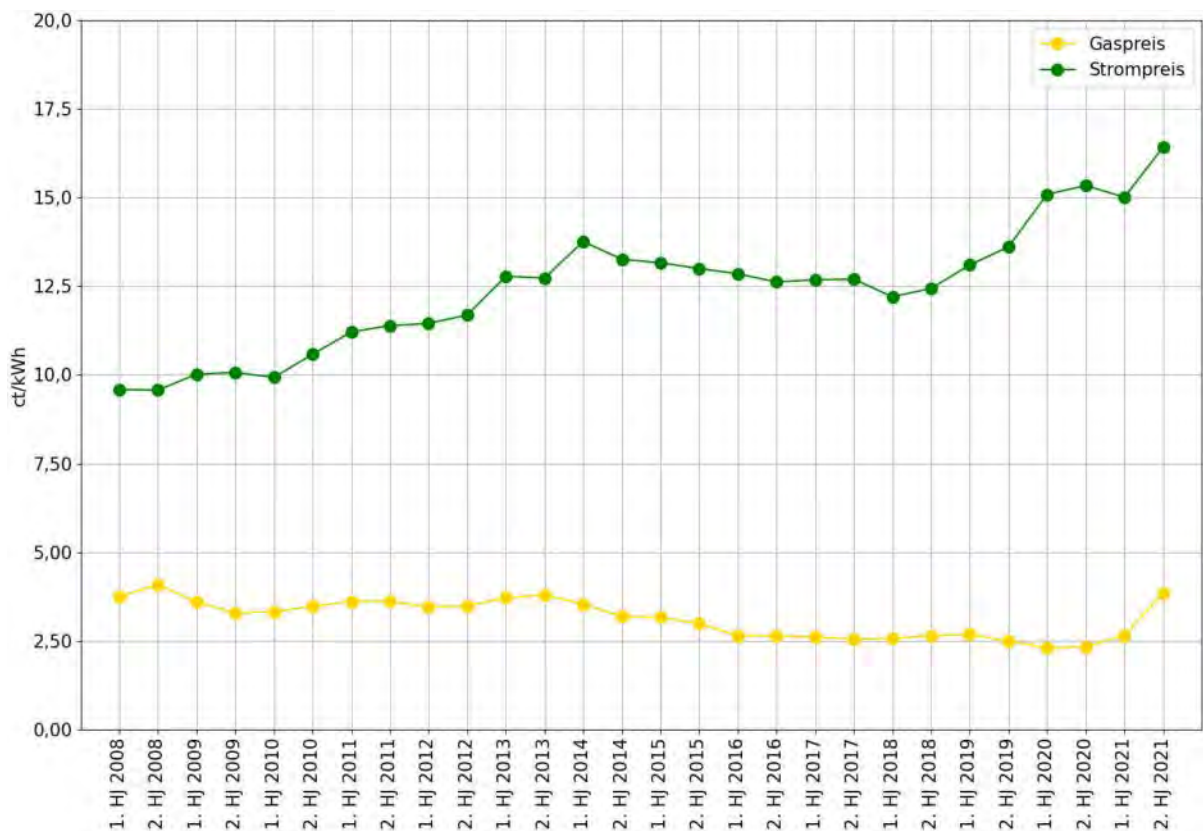


Abbildung 1: Entwicklung des Gas- und Strompreises von 2008 bis 2021, halbjährliche Auflösung (Quelle: [Destatis, 2022], eigene Darstellung)

Durch den Ukraine Krieg und die damit verbunden Versorgungsunsicherheiten stiegen die Preise noch weiter an. Insbesondere durch die Ausrufung der Gasalarmstufe am 23.06.2022, aufgrund der verminderten russischen Gaslieferung, rechnen Regierungsberatern in naher Zukunft mit einer Vervierfachung bis Versechsfachung der Endkundenpreise für Erdgas [Holewik/Kloft, 2022]. Daher ist es von enormer Bedeutung zukünftig Energie deutlich effizienter zu nutzen als zuvor, um den Energieverbrauch deutlich zu reduzieren. Damit man die Effizienz im Gebäudesektor, welche rund 35% der gesamten Endenergie beträgt, verbessern kann, müssen Einsparpotentiale aufgedeckt und Maßnahmen zur besseren Nutzung von Energie umgesetzt werden. Da die Energieverbräuche auf einzelner Gebäude- oder Nutzerebene ohne messtechnische Hilfsmittel nur schwer zuordbar sind, können daher

auch keine Energieeinsparpotentiale gefunden werden. Daher ist der Einsatz eines geeigneten Messkonzepts, sowie ein effektives Energiemonitoringsystems bei der Detektion von Einsparpotentialen eine enorme Hilfe [BMWK, 2022].

Das Ziel der Abteilung Energy Solutions des Unternehmens ENGIE Deutschland GmbH ist es, die Energieeffizienz der Kunden im Geschäftsmodell des Contractings zu verbessern. Dabei wird die Planung von Effizienzmaßnahmen, bis zur Umsetzung dieser Maßnahmen von der Abteilung übernommen. Darüber hinaus möchte man dem Kunden die Möglichkeit bieten, diesen über seine energetischen Verbräuche zu informieren und diesen auf mögliche Effizienzpotentiale aufmerksam zu machen. Dabei bietet sich ein Energiemonitoringsystem an, mit welchem die Verbräuche dem Kunden transparent präsentiert werden können. Außerdem bietet ein solches Monitoringsystem eine gute Grundlage, mögliche Potentiale sichtbar zu machen, aus welchen neue Maßnahmen generiert werden können, um die energetische Effizienz des Kunden weiter zu verbessern. Daher wurde von der Abteilung Energy Solutions ein eigenes Energiemonitoringsystem entwickelt, mit welchem man dem Kunden diese Dienstleistung anbieten kann.

Heutzutage gibt es noch viele weitere Anbieter von Energiemonitoringsystemen. Im Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) sind bisher 318 Softwares zertifiziert, welche als unterstützendes Werkzeug für ein Energiemanagementsystem zählen. Die meisten dieser Produkte sind unterschiedlich aufgebaut und besitzen oft individuelle Funktionen, mitwelchen die jeweiligen Unternehmen das Monitoring Programm bewerben. Welche dieser Funktionen eines Monitoringsystems essenziell beim Detektieren von Energieeinsparungen sind, ist oft nicht immer eindeutig klar [BAFA, 2022].

1.2 Aufgabenstellung

Hintergrund:

Die ENGIE Deutschland GmbH hat im Rahmen eines vom BAFA geförderten „Pilotprojekt Einsparzähler“ am Klinikum [REDACTED] in 19 Gebäuden ein detailliertes Messkonzept geplant und umgesetzt. Dabei wurden von den Zählern die Medien Erdgas, Strom, Wärme und Frischwasser in drei Gebäudeebenen gemessen. Alle Zähler wurden auf das ENGIE interne Energiemonitoringsystem ENTECTIV aufgeschaltet. Ziel dieses Projektes war es, das Monitoringsystem in einer großen komplexen Liegenschaft, wie in einem Krankenhaus, auf deren fehlerfreien Funktionalität zu prüfen und dieses auf Marktreife weiterzuentwickeln. Das beschriebene Messkonzept ist seit 2017 im Energiemonitoringsystem ENTECTIV im Klinikum [REDACTED] in Betrieb. Da man bisher nur wenig Zeit investiert hatte, die Qualität der Datenerfassung und die Funktionalität des ENTECTIVs zu überprüfen, hat man bisher nur wenige Kenntnisse für eine Weiterentwicklung bzw. um eventuelle Schwachstellen aufzudecken. Um dies nachzuholen, soll diese Thematik in dieser wissenschaftlichen Arbeit näher beleuchtet werden. Außerdem soll diese Thesis auch als Öffentlichkeitsarbeit innerhalb des Förderprogrammes dienen.

Aufgabenstellung:

Ziel dieser Arbeit ist es herauszufinden welche Anforderungen ein Energiemonitoringsystem besitzen muss, damit anhand der gemessenen Daten Einsparpotentiale erkannt werden können. Dabei soll herausgefunden werden, wie Messdaten aufbereitet werden müssen, sodass deren Qualität gewährleistet werden kann. Dabei ist die Wahl einer geeigneten Zählerstruktur und deren Einbindung in das Energiemonitoring von zentraler Bedeutung. Außerdem soll überprüft werden, wie Energieverschwendungen aufgespürt werden können. Eine weitere Fragestellung ist, welcher organisatorische und kommunikative Aufwand ein Dienstleister im Zusammenspiel mit dem Kunden erbringen muss, damit bekannte Schwachstellen und Fehler im Monitoringsystem behoben werden können. Auch bei der Detektion von Einsparpotentialen und den daraus ableitbaren Maßnahmen, muss die Kommunikation zwischen Dienstleister und Kunde stimmen.

Diese Aufgabenstellung soll anhand des Beispielprojektes am Klinikum [REDACTED] beantwortet werden. Dabei sollen die Messdaten der einzelnen Medien aus den Jahren 2019 bis 2021 in einer detaillierten

Analyse auf mögliche Einsparpotentiale überprüft werden. Zusätzlich sollen die gemessenen Verbräuche anhand branchentypischer Kennzahlen des Krankenhauses bewertet werden. Auch die Überprüfung des installierten Monitoringsystems ENTECTIV und der implementierten Zählerstruktur muss auf Schwachstellen inspiziert werden. Des Weiteren sollen angemessene Optimierungsmöglichkeiten vorgeschlagen werden, damit mögliche Potentiale messbar gemacht werden.

1.3 Vorgehensweise

Zum Beginn dieser Arbeit wird zunächst definiert, was ein Energiemonitoringsystem ist und in welchem Bezug dieses zum Energiemanagement bzw. zum -controlling steht. Außerdem wird erklärt, welchen Stellenwert Energieleistungskennzahlen bei der Bewertung von energetischen Verbräuchen hat. Dabei werden deren verschiedene Anwendungsmöglichkeiten beleuchtet. So können diese sowohl sinnvoll zur Analyse von Messergebnissen als auch zur Steuerung von einem Monitoringsystem verwendet werden. Um Schwachstellen in einem bestehenden Energiemonitoringsystem zu finden, muss zunächst beschrieben werden, was bei der Umsetzung eines solchen Messsystems beachtet werden muss, was in einem weiteren Unterkapitel beschrieben wird. In diesem wird zunächst näher auf Motive und Zielsetzungen eines Unternehmens eingegangen. Im anschließenden Messkonzept wird beschrieben, welche Vorüberlegungen getroffen werden müssen, damit eine transparente Zählerstruktur entsteht. Des Weiteren wird beschrieben, welche finanziellen Überlegungen bei der Anzahl der Messstellen und der Art der Messung getroffen werden müssen. Auch bei der Auswahl der Messtechnik und bei der Datenverarbeitung müssen einige Kriterien für ein erfolgreiches Monitoringsystem erfüllt werden. Danach werden die Anforderungen an den Betrieb und an die Messdatenaufbereitung eines Energiemonitoringsystems beschrieben. Nachfolgend wird das ENGIE interne Monitoringsystem ENTECTIV vorgestellt. In einem weiteren Grundlagenkapitel wird erläutert, wie das damalige BAFA „Pilotprojekt Energieeinsparzähler“ aufgebaut war, mit welchem das Messsystem im Klinikum ██████ gefördert wurde. Im Anschluss wird auf die typischen Hauptverbraucher in einem Krankenhaus eingegangen. Zusätzlich werden die typischen Energiekennzahlen aus einer Benchmarking Studie erklärt.

In der darauffolgenden Analyse werden die gemessenen Verbräuche der einzelnen Medien am Klinikum ██████ in den Jahre 2019 bis 2021 detailliert inspiziert. Dabei wird zunächst auf den Gasverbrauch und die Eigenerzeugung durch das Blockheizkraftwerk eingegangen, wessen Betriebsweise betrachtet und dessen Effizienz bewertet wird. Im Anschluss werden die Verbräuche der einzelnen Medien Strom, Wärme und Frischwasser analysiert. Dabei werden die typischen Energiekennzahlen gebildet und mit denen aus der Benchmarking Studie verglichen. Des Weiteren werden die einzelnen Häuser auf deren flächenspezifischen Verbrauch verglichen und die Gebäude mit den höchsten Verbräuchen näher betrachtet. Dabei werden einige Schwachstellen aufgedeckt und Optimierungslösungen genannt. Bei der Analyse des Wärmeverbrauchs werden außerdem Möglichkeiten erklärt, wie dieser witterungsabhängige Verbrauch bereinigt werden kann. In einem weiteren Analysekapitel, wird ein Gebäude mit den höchsten spezifischen Verbräuchen sowohl wärme- als auch stromseitig detailliert inspiziert betrachtet, da der hohe Verbrauch keinen bestimmten Verbrauchern zugeordnet werden kann. In dem letzten Analysekapitel wird anhand eines Beispiels erklärt, wie mit Lastprofilen aus einer bestimmten Nutzungszone, Einsparpotentiale erkannt werden können. Zudem wird erklärt, wie diese in einem Benchmarking zum Vergleich mit anderen Krankenhäusern verwendet werden können.

Im letzten Kapitel wird auf die Schwachstellen des installierten Monitoringsystem ENTECTIVs eingegangen, welche bei der Analyse erkannt werden. Dabei wird zunächst auf die grundlegende Funktion der Validierung der Rohdaten eingegangen, damit die Qualität der Messwerte sichergestellt werden können. Im Anschluss wird eine Optimierungsmöglichkeit genannt, bei welcher man aus historischen Messdaten in verschiedenen abhängigen Modellen Baselines erstellen kann, mit welchen gemessene Verbräuche bewertet werden. Aus diesen Modellen lassen sich auch Schwellwerte generieren, mit

welchen Energieverwendungen aufgedeckt werden können. Des Weiteren werden anhand eines anderen Monitoringsystems weitere nützliche Funktionen genannt, welche die Qualität des Betriebs dieser Messsysteme verbessert und die Detektion von Potenzialen erleichtert.

In einem abschließenden Fazit wird anhand der gewonnenen Erkenntnisse die Aufgabenstellung beantwortet. Zusätzlich werden Empfehlungen und Möglichkeiten genannt, wie der Betrieb des ENTEC-TIVS erfolgreicher gestaltet werden sollte, damit Mehrverbrauch erkannt werden und Einsparpotentiale sichtbar werden können.

2 Energiemonitoring

Trotz der heutigen Zeit, welche von Informationsüberfluss geprägt ist, wissen viele Unternehmen und öffentliche Einrichtungen nicht über deren Energieverbrauch Bescheid. Desweiteren ist ihnen oft nicht bewusst, welche Faktoren im Zusammenhang mit den täglichen, monatlichen und jährlichen Verbräuchen stehen. Dabei sind diese Daten aus allen Bereichen einer Unternehmung oder Einrichtung essenziell, um energetische Einsparungen und Verbesserungen in der Energiebilanz zu erhalten. Mithilfe von Monitoringsystemen, können solche Energieverbräuche transparent dargestellt werden, was in diesem Kapitel näher erläutert wird.

2.1 Definition

Das kontinuierliche Erfassen und Speichern von Messdaten wird als Monitoring bezeichnet. Dabei wird das Ziel verfolgt, kontinuierlich zu prüfen, ob Systeme deren jeweiliges Soll einhalten. Damit dies gelingt, werden erfasste Messdaten mit Grenzwerten verglichen und in Tabellen, Diagrammen oder in Grafiken visualisiert [VDI, 2007, S. 27]. Das Energiemonitoringsystem ist eine zentrale, softwaretechnische Einrichtung, welches in der Lage ist, mit Messeinrichtungen und mit bereits vorhandenen Systemen im Betrieb zu kommunizieren und mit diesen Daten auszutauschen. So können nicht nur Energieverbräuche dargestellt werden, sondern für die jeweiligen Kunden und deren Ansprüche aufbereitet werden. Zu implementierbaren Systemen gehören beispielsweise Prozessleitsysteme, Produktionsplanungssysteme, Kostenabrechnungen und Lastgangmanagementsysteme [VDI, 2013, S. 19].

Diese Überwachung und Darstellung von energetischen Messwerten sind nicht prinzipiell neu. Bereits im Jahre 1977 wurde ein Signalgerät getestet, welches dem Nutzer seinen Stromverbrauch darstellen konnte. In dieser Studie wurden mehrere Einfamilienhäuser in einer Stadt in North Carolina (USA) über 11 Monate betrachtet. Bei einem Viertel der Häuser, bei welchen der Verbrauch auf einem Monitor dargestellt wurde, konnte man eine durchschnittliche Einsparung von 12% des Strombedarfs gegenüber den anderen Häusern beobachten. Die Studie kam zu dem Ergebnis, dass die Bewohner durch die Monitore sensibilisiert wurden, welche elektrischen Geräte viel Strom benötigen [McClelland/Cook, 1979].

In der heutigen Zeit ist das Überwachen des Energieverbrauches immer wichtiger geworden. Um dem Klimawandel entgegenzuwirken, wurden vom Gesetzgeber (EU, Staat, Bundesland) immer mehr Anforderungen an Unternehmen und öffentliche Einrichtungen zur Ressource Energie gestellt. Um diese einhalten zu können, kann ein modernes Energiemonitoring System Abhilfe schaffen, indem der Kunde transparent über seinen Energiebedarf informiert wird, Einsparpotentiale aufgezeigt werden und Alarmer bei Grenzwertüberschreitung ausgegeben werden, um den daraus resultierenden Mehrverbrauch zu verhindern. Des Weiteren kann der Erfolg von ausgeführten Maßnahmen überprüft, Energiekosten bzw. Emissionen überwacht und der Nachweis von Einsparung für ein Einspar- Contracting erbracht werden. Letzteres ist eines der Hauptgeschäftsfelder der Firma ENGIE [Knut Grabowski, 2015, S. 3].

2.2 Energiemonitoring, -controlling und -management

In der VDI-Norm 4602 Blatt 1 aus dem Jahre 2007 werden viele Begrifflichkeiten rund um das Thema Management von Energie beschrieben. Doch wo die Unterschiede zwischen den einzelnen Begriffen liegen, ist oft nicht sofort verständlich. Deshalb werden die Begriffe wie Energiemanagement und -controlling in Bezug auf das Energiemonitoring im Folgenden näher erklärt [VDI, 2007, S. 14 ff.].

Zur Steigerung der Energieeffizienz wurde 2010 das Energiedienstleistungsgesetz (EDL-G) gegründet. Dieses verlangt, dass alle Unternehmen in Deutschland alle 4 Jahre (Stand ab 2015) ein Energieaudit nach DIN EN 16247-1 durchführen oder ein Energiemanagement nach ISO 50001 einführen. Davon

ausgeschlossen sind kleine und mittlere Unternehmen (KMU) [BAFA, 2010, S. 1 ff.]. Bei dem Energiemanagementsystem wird das Ziel verfolgt ein Unternehmen energetisch kontinuierlich zu verbessern. Dabei werden Energieströme transparent von der Bereitstellung, über die Verteilung bis hin zur Anwendung der Energie beim Endverbraucher beleuchtet. Ein Managementsystem ist keine Software, sondern eine organisatorische Verankerung eines Prozesses, um Energieeffizienzmaßnahmen und Strategien, welche sich aus unternehmerischen und umweltpolitischen Zielen ergeben, im Unternehmen umzusetzen, sowie diese permanent zu überwachen und zu verbessern. Daraus resultieren nicht nur eine Verbesserung des Energieverbrauchs, sondern auch die Minimierung der Energiekosten und CO₂-Emissionen. Ein weiterer Vorteil der Einführung eines Energiemanagementsystems ist die Verbesserung des Images des Betriebs durch Erhaltung eines Prüfsertifikates und das Erlangen von steuerlichen Entlastungen, wie der Spitzenausgleich gemäß Energie- und Stromsteuergesetz. Der Ablauf eines Managementsystem basiert auf dem Plan-Do-Check-Act-Zyklus nach Deming, welcher in Abbildung 2 dargestellt ist [Deutsches Institut für Normung, 12.2018, S. 8 ff.].

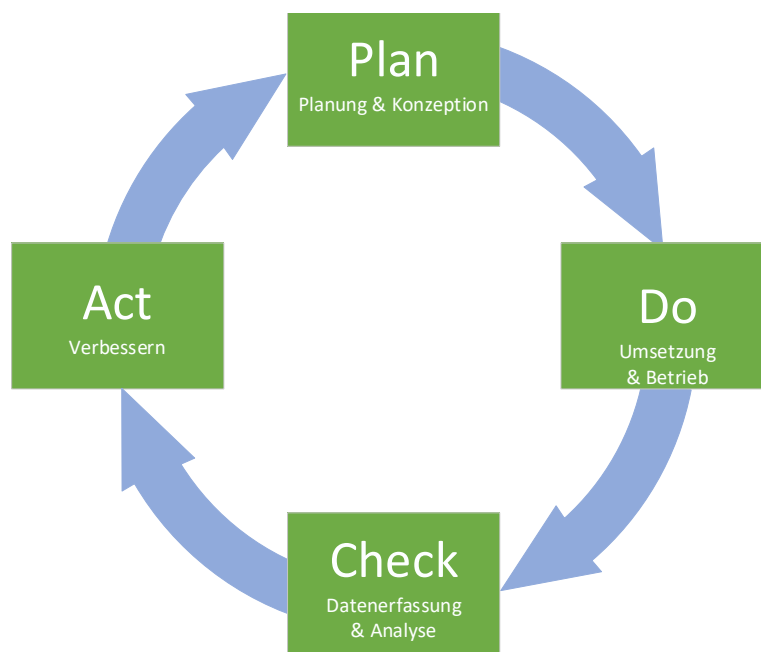


Abbildung 2: PDCA-Zyklus eines Energiemanagementsystems nach der ISO 50001 (Quellen: [Bränzel u. a., 2019, S. 315][Deutsches Institut für Normung, 12.2018, S. 8], eigene Darstellung)

- **Plan:**
Unter der Berücksichtigung der Energiepolitik der Organisation, werden Ziele, Energiekennzahlen und Aktionspläne mit Maßnahmen gebildet, welche auf Grundlage der energetischen Ausgangsbasis beruhen.
- **Do:**
Verwirklichung des Managementsystem und Umsetzung der Maßnahmen aus den Aktionsplänen.
- **Check:**
Erfassung von Energie- und Ressourceneinsatz, Energiekosten, Klimadaten und Produktionsdaten und die anschließende Analyse. Bei der Analyse wird ein Vergleich zu den festgelegten Zielen (Soll-Ist-Vergleich, Zielwerterreichung, Zielwertabweichungen) und den Kennzahlen gezogen.

- **Act:**
Durch die Analyse im vorherigen Schritt werden neue Maßnahmen formuliert, welche auf der Grundlage der Nichterfüllung von gestellten Zielen oder aufgrund des Wunsches nach stetiger Verbesserung beruhen.

Nach dem Durchlauf aller 4 Schritte beginnt der Zyklus erneut. Wenn dieser Kreislauf, welcher nach stetiger Verbesserung des Energieverbrauchs strebt, reibungslos funktioniert, zeichnet dies ein gutes Energiemanagementsystem aus [Deutsches Institut für Normung, 12.2018].

Innerhalb dieses PDCA-Zyklus spielt das Energiecontrolling eine zentrale Rolle. Durch dieses werden alle Phasen des Kreislaufes und somit das Managementsystem im Bereich der Analyse und der Kontrolle des Energieverbrauchs unterstützt. Dabei bekommt das Controlling die Aufgaben der Energieverbrauchs- und Kostenerfassung, die Bildung von Kennzahlen, die Durchführung einer Analyse und der Einsatz eines kontinuierlichen Monitorings auf. Aufgrund des beschriebenen Zusammenhangs des Managements, des Controlling und das Monitoring, wird schlussgefolgert, dass diese Begriffe in einem Normativen Rahmen (aufeinander aufbauend) zueinanderstehen. So ist das Energiemonitoring ein essenzieller Teil des Energiemanagements nach ISO 50001 und des Energiecontrolling mit der Aufgabe des permanenten Erfassens und Visualisieren des Energieverbrauchs und weiteren Einflussgrößen wie Temperaturen, Witterung und weiteren Bezugsgrößen und diese an den Control-Zyklus weiterzugeben. Ein Energiemonitoringsystem muss nicht nur als unterstützende Software verwendet werden, sondern findet auch als eigenständiges Produkt Anwendung. Wie ein solches System aufgebaut sein muss und welche Anforderungen ein solches System erfüllen soll, um einen Mehrverbrauch zu verhindern und erfolgreich in der Analyse Energiepotentiale zu erkennen, wird in dieser Arbeit näher beleuchtet [Schellong, 2016, S. 247 ff.].

2.3 Energieleistungskennzahlen (EnPI)

Ein unerlässliches Werkzeug bei dem Betrieb und der Analyse eines Energiemonitoringsystems ist die Bildung von energiebezogenen Kennzahlen. Allgemein sind Kennzahlen quantitative Maßgrößen, welche Auskunft über einen zahlenbasierten Sachverhalt liefern. Dabei wird zwischen absoluten und relativen Kennzahlen unterschieden. Unter absolute Kennzahlen versteht man feste Mengen- und Wertgrößen wie Summen, Differenzen und Mittelwerte. Relative Kennzahlen hingegen stellen das Verhältnis zweier zueinander bezogenen absoluten Kennzahlen dar. Dabei können Kennwerte gebildet werden, auch wenn die absoluten Grunddaten nicht veröffentlicht werden dürfen [Küting/Weber, 2006, S. 51 ff.].

Die für das Energiemonitoring relevanten Kennzahlen werden nach der ISO 50001 als Energieleistungskennzahlen („Energy Performance Indicator“) bezeichnet. Im Allgemeinen wird bei der Verwendung der Begriffe Energiekennzahlen und Energieleistungskennzahlen kein Unterschied gemacht. Aus diesem Grund werden auch in dieser Arbeit die beiden Bedeutungen äquivalent behandelt [Deutsches Institut für Normung, 12.2018, S. 14].

Bei der Bildung von Kennzahlen sollte zunächst sicher sein, welche Stoff- und Energieströme bilanziert werden sollen. Aus diesen Informationen können daraus System- und Bilanzgrenzen gebildet werden, welche für die Belastbarkeit der Energiekennzahl unerlässlich sind. Eine Energiekennzahl ist belastbar, wenn diese der Gegebenheit der Realität entspricht. Die Systemgrenze beschreibt die physikalische Abgrenzung des untersuchenden Systems, welches auch aus mehreren Anlagen bestehen kann, zu seiner Umgebung. Das System wird hierbei als „Black-Box“ betrachtet, welches bei einem bestimmten Aufwand einen gewissen Nutzen erzeugt. Dabei als Aufwand, die in das System einfließende Energieströme und als Nutzen, die Änderungen der Eigenschaften an einer Anlage oder die Erbringung von Leistungen bezeichnet. So ist im System „Heizkessel“ der zu verbrenne Brennstoff, wie z.B. Erdgas der Aufwand, wohingegen die erzeugte Wärme den Nutzen beschreibt. Bei der Bilanzgrenze hingegen wird einen Rahmen für die Bilanzierung erstellt, welche sich oft auf Standorte, Gebäude und Anlagentypen (Bilanzräume) aufteilt. Die Bilanzgrenze kann gleich, größer oder auch kleiner als die Systemgrenze

sein. Um Kennzahlen miteinander vergleichen zu können, ist es essenziell diese in derselben System- und Bilanzgrenze zu definieren. Des Weiteren sind für die Erstellung von Kennwerten gemessene spezifische Verbrauchswerte, gegenüber berechneten Werten vorzuziehen, da diese den real vorliegenden Zustand besser beschreiben. Eine aussagekräftige Energiekennzahl z.B. pro Anlage kann daher nur gebildet werden, wenn der exakte Energiebedarf über die entsprechenden Messeinrichtungen gemessen wird. In den verschiedenen Ebenen eines Unternehmens gibt es meist unterschiedliche Anforderungen an die Art und Aussage von Energiekennzahlen. So haben technische und prozesstechnische Kennzahlen für die Unternehmensführung einen recht geringen Nutzen. Dagegen nutzen im operativen Management, welche für die Koordinierung der eingesetzten Energie zuständig sind, allumfassende Energiekennzahlen nicht, um Effizienzpotentiale aufzudecken. Darum müssen Energiekennzahlen so gewählt werden, sodass diese dem jeweiligen Empfänger nutzen und dieser daraus Rückschlüsse ziehen kann [VDI, 02.2015, S. 5 ff.].

Wie in Abbildung 3 dargestellt, sind die Anwendungsmöglichkeiten von Energiekennzahlen in einem Monitoringsystem sehr vielfältig. So sind diese ein Grundbestandteil bei der Analyse der Ergebnisse, indem Kennwerte verglichen werden. Beim Zeitvergleich wird der Verlauf einer Kennzahl in einem bestimmten zeitlichen Verlauf (z.B. Wochenverlauf) betrachtet. Wenn beispielsweise der spezifische Stromverbrauch eines Gebäudes (kWh/m²) im Vergleich zu einer früheren Periode stark abweicht, kann dies auf eventuelle Veränderungen in der Betriebsweise, Auslastung oder auf Betriebsstörungen aufmerksam machen. Beim Querschnittsvergleich werden Energiekennzahlen von gleichwertigen Maschinen, Anlagen und Gebäuden in einem festen Zeitraum oder Zeitpunkt verglichen. Allgemein muss beim Vergleich von Kennzahlen genauestens geprüft werden, dass die Objekte miteinander vergleichbar sind oder ob diese gegebenenfalls noch bereinigt werden müssen. Ein Beispiel hierfür ist die Witterungsberichtigung, welche bei einem Zeitvergleich von wärmeabhängigen Kennzahlen durchgeführt werden muss. Auch bei der Steuerung eines Monitoringsystems spielen Energiekennzahlen eine immense wichtige Rolle. So werden bei der Kontrolle vorgegebene Soll-Werte (Baseline) mit den eigentlichen Ist-Werten verglichen. Hierbei kann kontrolliert werden, ob vorgegebene Ziele z.B. Einsparungen nach Umsetzung von Effizienzmaßnahmen erreicht wurden. Weitere Planungskennzahlen sind die Vorgabe von Zielwerten, welche sich aus der Grundlagenanalyse ergeben. So können verbesserte Kennzahlen für die kommenden Zeitperioden definiert werden [VDI, 08.2014, S. 34 ff.].

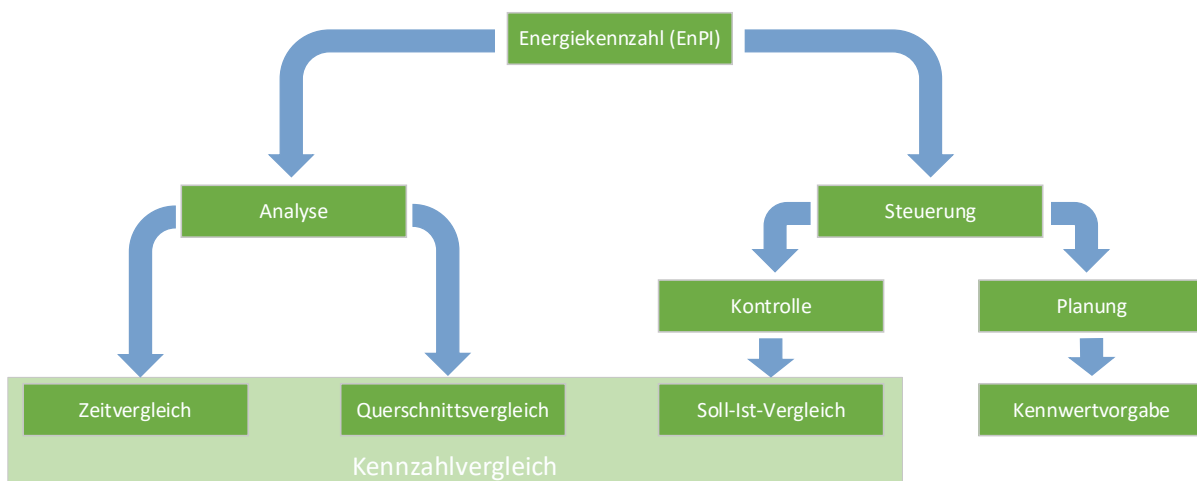


Abbildung 3: Anwendungsmöglichkeiten von Energiekennzahlen (EnPI) in einem Energiemonitoringsystem (Quelle:[Bauer, 1988; VDI, 08.2014, S. 34], eigene Darstellung)

Der Vergleich von Kennzahlen kann in verschiedenen Bilanzräumen erfolgen. Daher wird meist zwischen dem Verfahrens-, Anlagen- und dem Betriebsvergleich unterschieden. Beim Verfahrensvergleich werden verschiedene betriebliche Verfahren mit vergleichbarem Output verglichen. Ein Beispiel für einen solchen Vergleich wäre die Auswahl einer Kompressions- oder Absorptionskältemaschine auf Grundlage des Energieeinsatzes. Beim Anlagenvergleich wird der spezifische Energiebedarf von vergleichba-

ren Produktionsanlagen oder Querschnittstechnologien (Technologien, welche in mehreren Wirtschaftszweigen genutzt werden), wie z.B. Kältemaschinen miteinander verglichen. Es werden oft auch Richtwerte z.B. die Kälteleistung einer Kompressionskältemaschine einzelner Anlagen, zur Bewertung der Kennwerte verwendet. Diese Richtwerte beschreiben den aktuell machbaren Energiebedarf der Anlagen. Im Betriebsvergleich werden Unternehmen mit ähnlichem Aufbau, z.B. aus derselben Branche, verglichen werden. Hier werden meist spezifische Energiekennwerte, wie z.B. den Energieverbrauch pro Nutzfläche betrachtet. Weicht die eigene Kennzahl stark von dem branchenüblichen ab, so bedarf es einer genaueren Analyse [VDI, 08.2014, S. 36 f.].

Außerdem können Energiekennzahlen effizient im Benchmarking eingesetzt werden, bei welchem gezielte Prozesse, Dienstleistungen und Produkte mit anderen „stärkeren“ Mitbewerben verglichen werden. Dabei wird das Ziel verfolgt von den anderen Unternehmen zu lernen, um die eigenen Positionen zu verbessern und Schwachstellen zu beseitigen, damit man den „Best-in-class-Standard“ erreicht. Des Weiteren kann Benchmarking auch unternehmensintern stattfinden, bei welchem z.B. gleiche Prozesse in verschiedenen Standorten betrachtet werden [Tippkötter/Schüwer, 2010, S. 12 f.].

Der Einsatz von verschiedenen Energiekennzahlen, sowie das Benchmarking wird im Kapitel 0 näher ausgeführt. In diesem wird die Analyse des vom Monitoringssystem gesammelten Messdaten im Beispielprojekt Klinikum ████████ behandelt.

2.4 Umsetzung eines Monitoringsystems

In diesem Kapitel werden die einzelnen Schritte erläutert, welche bei der Planung und Erstellung eines Energiemonitoringsystems durchlaufen werden. Zudem wird erklärt, welche Voraussetzungen erfüllt werden müssen, damit dieses Messsystem erfolgreich umgesetzt werden kann und zusätzlich die Bedürfnisse der jeweiligen Unternehmen erfüllt. Dabei steht immer die Einsparung von Energie im Fokus.

2.4.1 Motive

Die Motive für die Umsetzung von Energiemonitoring Lösungen sind vielfältig. Neben dem Energiemanagements gemäß DIN EN ISO 50001, bei welchem das Monitoring (siehe Kapitel 2.2) ein unverzichtbarer Bestandteil ist, spielen oft simple finanzielle Aspekte, wie die Einsparung von Energie bzw. der Energiekosten eine Rolle. Zusätzlich kann das Energiemonitoringsystem auch zur Prozessüberwachung verwendet werden. So kann beispielweise eine plötzliche erhebliche Veränderung im Verbrauch auf eine Störung einer Maschine oder ein Fehler im System hinweisen. Ein weiteres Motiv ist die Einsparung von Steuern. So können, durch die messtechnische Erfassung des Strombedarf und die dadurch resultierende Nachweisführung, bestimmte Betriebe von der Stromsteuer befreit oder Entlastungen gewährt werden. Energieintensive Betriebe (Strombedarf > 1.000 MWh/a) konnten sich bisher zusätzlich auch nahezu komplett von der EEG-Umlage (fällt zum 01.07.2022 komplett weg) befreien lassen, wenn die verbrauchten Strommengen über ein Monitoringsystem in einem rechtskonformen Nachweis erfasst werden. Ein weiteres Motiv für die Verwendung eines Monitoringsystems ist Transparenz der Energieströme im Unternehmen, was meist auch in der Belegschaft positiv aufgenommen wird, da viele Mitarbeiter zunehmend einen nachhaltigeren Umgang mit Ressourcen fordern. Durch den Einsatz eines Monitoringsystems wird zusätzlich auch die Digitalisierung im Unternehmen gefördert [Bernard u. a., 2020, S. 7].

2.4.2 Zieldefinition

Um ein erfolgreiches Monitoringsystem aufzubauen, sollten zunächst übergeordnete Ziele definiert werden, die mit dem System erreicht werden sollen. Die Zieldefinition sollte auf den Entscheidungen der Führungsebene basieren, damit diese sich mit dem Konzept identifizieren können und ein erfolgreiches, auf die Liegenschaft zugeschnittenes, Monitoring entsteht. Beim Festlegen der Ziele ist darauf zu achten, dass der Umfang des Monitoringsystems nicht zu groß ist. Dieser sollte an das Unternehmen angepasst sein, um unnötige Kosten bei der Datenerfassung zu verhindern. Dabei ist hauptsächlich die

Größe des Betriebes, die Komplexität der Verbraucherstruktur, die finanziellen sowie die personellen Ressourcen und der Bestand von vorhandenen Zählern, welche in das Monitoring implementiert werden können, entscheidend. Bei einem KMU-Betrieb mit Energiekosten weniger als 50.000€, wäre ein umfassendes Monitoring einzusetzen, nicht wirtschaftlich sinnvoll. Dagegen wäre die Messung von Hauptverbrauchern oder die temporäre Überwachung von beispielsweise einer Produktionsmaschine zur Überprüfung der Wirksamkeit von Maßnahmen angemessen. Bei der Umsetzung eines Energiemanagements nach ISO 50001 sind temporäre Messungen bei relevanten Verbrauchern mit statischem Verbrauchsverhalten notwendig. Jedoch ist eine kontinuierliche Messung bei fluktuierenden Verbrauchern notwendig, um den Energieverbrauch genau ermitteln zu können und so den Anforderungen der Norm gerecht zu werden. Bei der Überwachung einer Anlage für ein Lastmanagement, bei welchem jede Überschreitung des maximalen Lastprofils erkannt werden soll, ist es notwendig, stationäre Messtechnik mit hochfrequenter Datenerfassung (Sekundentakt) zu verwenden [Bernard u. a., 2020, S. 7 ff.].

2.4.3 Messkonzept erstellen

Nachdem die Ziele für das Monitoringsystem definiert sind und eine IST-Analyse der vorhandenen Messinfrastruktur durchgeführt wurde, kann mit der Konzeptionierung der Datenerfassung begonnen werden. Da bei der Analyse der Messergebnisse des Monitoringsystems die Energieleistungskennzahlen (EnPI) eine unverzichtbare Rolle spielen, ist es auch äußerst sinnvoll, bei der Erstellung des Messkonzepts zunächst für die Branche oder den Bereich typischen Kennzahlen zu bilden. Im Anschluss können diese mit passenden Normwerten oder einer Benchmarking Studie zu vergleichen. Dabei bekommt man einen ersten Einblick über die energetische Lage des Unternehmens in Bezug auf andere, welche sich in derselben Sparte befinden. In Kapitel 2.3 werden die Energiekennzahlen nochmals detaillierter beschrieben.

Des Weiteren sollte man einen Überblick über die wesentlichen, energieverbrauchenden Anlagen und Systemen verschaffen, damit erkannt werden kann, wo es notwendig ist, Messstellen zu platzieren. In der Regel werden dabei Anteile von mehr als 5% des Gesamtverbrauchs betrachtet, welche nach der ISO 50001 als „serial energy use“ (SEU) bezeichnet werden. Um diese herauszufinden ist es sinnvoll den einzelnen Verbrauchern in einer Energiebilanz zusammen zu tragen. In dieser werden die Jahresverbräuche wie folgt hochgerechnet und in Oberkategorien oder Querschnittstechnologien und jeweils nach Energieträger sortiert.

$$\text{Leistung [kW]} * j. \text{Nutzungsdauer [h]} * \text{durchschnittliche Auslastung [\%]} = j. V. [kWh] \quad (2-1)$$

$$\text{Beispiel Ventilator Lüftungsanlage:} \quad 3,5 \text{ kW}_{el} * 2920 \text{ h} * 80\% = 8.176 \text{ kWh}$$

Am Ende der Bilanzierung sollten dann noch die Summen der errechneten Jahresbilanzen mit den eigentlichen Werten verglichen werden, wobei die Nutzung von eigenerzeugtem Strom bzw. Wärme zu beachten ist. Durch die Bilanzierung können nicht nur die energieintensivsten Verbraucher herausgefunden werden, sondern auch abgeschätzt werden, wo mögliche Einsparpotentiale liegen. So kann man die Messstellen gezielt auswählen, damit diese Potentiale über das Monitoring gemessen und analysiert werden.

Ein weiterer Schritt ist es zu entscheiden, ob die Messstellen mobil, temporäre oder stationär, kontinuierliche Messungen durchführen sollen. Bei der Erhebung einer detaillierten Datenbasis für die Auswahl an Messstellen, bieten sich mobile Messungen an. Diese Messungen bieten eine optimale Bewertungsgrundlage für die zu erstellende Energiebilanz. Mobil, temporäre Messungen zeichnen sich durch niedrigen Installationsaufwand und hoher Flexibilität aus. Doch aufgrund des miteinhergehenden Betriebsaufwandes erfordert es geschultes Personal, um eine erfolgreiche Messung durchzuführen. Die stationäre, kontinuierliche Messung dagegen ist für langfristige Anlagenüberwachung, also für den Betrieb eines kontinuierlichen Energiemonitoringsystems geeignet [Helfert/Schraml, 2022, S. 14 f.]. Die Deutsche Akkreditierungsstelle (DAkkS) schlägt des Weiteren vor, dass die Energiekosten eines Unternehmens als ausschlaggebender Faktor für die Art der Messung ist. So wird vorgeschlagen, dass bei jährlichen Energiekosten < 100.000€ nur mobile Messungen zur Verifizierung des Verbrauchs und

ggf. einzelne stationäre Zähler nachgerüstet werden. Bei Energiekosten von jährlich über 1 Million Euro ist es notwendig eine kontinuierliche Messinfrastruktur aufzubauen, welche automatisch Daten erfasst und auswertet. Die vollständige Tabelle befindet sich im Anhang [DAkKS, 2014, S. 5].

Wie in der Zieldefinition bereits erwähnt, ist bei der Auswahl der Messstellen außerdem darauf zu achten, dass das Monitoringsystem wirtschaftlich sinnvoll aufgebaut wird. Da zu den Kosten der Messpunkte die eigentliche Sensorik, deren Installation und die Verkabelung gehört, und somit ein wesentlicher Teil der Gesamtkosten beinhaltet ist, ist es wichtig nur die relevanten Messstellen auszuwählen. Laut dem „Leitfaden: Monitoring von Energieeffizienzmaßnahmen“ ist eine Messstelle an einem Verbraucher sinnvoll, welcher mehr als 3% zu den jährlichen Energiekosten beiträgt [Helfert/Schraml, 2022, S. 14]. Die durchschnittlichen Kosten für einem Messpunkt betragen zwischen 200 – 1.000 €, wobei die Kosten stark von der Komplexität der Messstelle abhängen. Aufgrund dessen, ist eine Abwägung zwischen Kosten und Nutzen bei jedem Messpunkt notwendig. Zusätzlich sollte geprüft werden, ob bestehende Messpunkte in das geplante Messkonzept technisch integriert werden können [Bernard u. a., 2020, S. 13 ff.].

Darüber hinaus ist es wichtig, die Messstellen in einem geeigneten Aufbau anzuordnen und diese in verschiedene Bilanzräume, wie Gebäude, Anlagentypen usw. zu unterteilen. Dabei muss darauf geachtet werden, dass die angestrebten Energiekennzahlen in den einzelnen Bilanzräumen bestimmt werden können. Geeignete Planungsansätze aus dem Projektmanagement, wie Top-down- und Bottom-up-Ansatz lassen sich für die Bildung und Anordnung dieser Bilanzräume gut anwenden. In Abbildung 4 sind zwei Ansätze dargestellt, welche sich für die Aufteilung der Bilanzräume eignen.

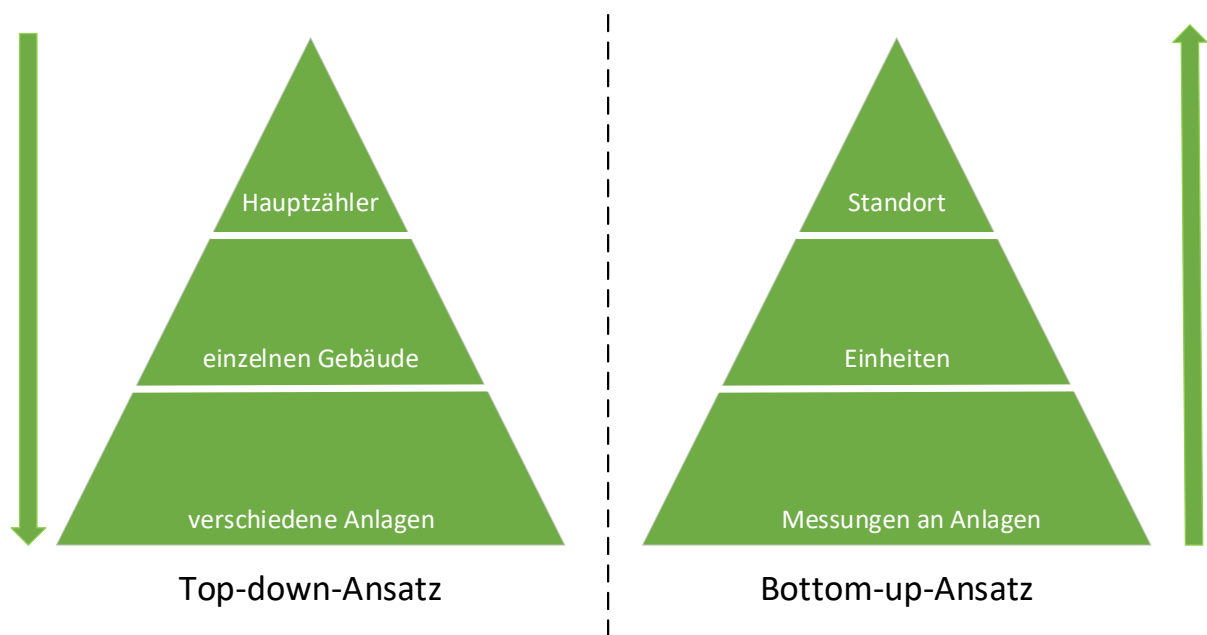


Abbildung 4: Bildung und Aufteilung von Bilanzräumen nach dem Top-down- (links) und dem Bottom-up-Ansatz (rechts) (Quelle: [Helfert/Schraml, 2022, S. 13], eigene Darstellung)

Beim dem Top-down Ansatz (links in der Abbildung), wird vom „Groben“ z.B. von den Hauptzähler des Unternehmens über die einzelnen Zähler der Gebäude ins „Feine“ zu den einzelnen Messstellen der Anlagen betrachtet. Dabei werden in einer übersichtlichen Struktur die Verbräuche stufenweise umgelegt und Einflüsse von außen sind gut erkennbar, da diese meist schon an den Hauptzählern erkannt werden. Dagegen kann die Abhängigkeit zwischen Mess- und Organisationsstruktur zum Nachteil werden, wenn z.B. gleiche Anlagentypen in verschiedenen Gebäuden installiert sind und so schlechter miteinander vergleichbar sind. Beim Bottom-up (rechts im Bild) wird hingegen aus den Messdaten der einzelnen Anlagen übergreifende Aussagen getroffen und anhand dessen übergeordnete Einheiten gebildet. Dies hat den Vorteil der direkten Zuordnung der Verbraucher und außerdem sind Einsparpo-

tentiale verschiedener technischer Systeme leichter abzuschätzen. Dies kann sich jedoch bei sehr vielen erfassten Verbrauchern als wenig effektiv erweisen. Welcher Ansatz sich am besten für das Monitoringsystem eignet, sollte bei jedem Unternehmen individuell und mit dem Ziel erfolgen, die Verteilung und Höhe der Energiebedarfe am transparentesten darzustellen [Helfert/Schraml, 2022, S. 12 f.].

Abschließend muss nun, dass eigentliche Messkonzept mit allen Messstellen dokumentieren werden. In der Norm DIN ISO 50015 wird das Vorgehen zur Planung und Umsetzung von Maßnahmen zur Optimierung des Energiebedarfs beschrieben. Der, in der Norm beschriebene, Datenerfassungsplan gibt Aufschluss, welche Kriterien bei der Auswahl von Messtechnik und Messstellen beachtet werden müssen. Ein solcher Plan ist in Tabelle 1 mit den nötigsten Kriterien aufgeführt [Deutsches Institut für Normung, 04.2018, S. 9].

Tabelle 1: Beispiel eines Datenerfassungsplans anhand zwei verschiedener Messstellen (Quelle: [Deutsches Institut für Normung, 04.2018, S. 18 f.], eigene Darstellung)

Variablenname	Art der Messung	Messintervall	Messgenauigkeit	Einheit	Standort	Gerätebezeichnung	Messmethode	Zuständigkeit	Fördergegenstand
Strom_Haus 1_RLT_01	stationär	15min	0,3%	Strom in kWh	Lüftungsanlage 01, Haus 1	ABB A44 213-100	Wandler	Energiemonitoringsystem	Nein
Wärme_Haus 4_Behandlungsb.	stationär	15min	0,2%	Wärme in kWh	Bahandlungsbau, Haus 4	Aquametro, Rubin WPDH + CALEC ST	Wärmemengen.	Energiemonitoringsystem	Ja

Der Datenerfassungsplan ist außerdem ein notwendiger Teil, wenn die Messtechnik über das BAFA Förderprogramm „Modul 3: MSR, Sensorik und Energiemanagement-Software“ gefördert werden soll [Chmella, 2021, S. 5 ff.].

2.4.4 Auswahl der Messtechnik

Nach der Planung der Messstellen kann nun mit Hilfe der Kriterien des Datenerfassungsplans die passende Messtechnik ausgewählt werden. Die Messtechnikhardware besteht dabei im Wesentlichen aus verschiedenen Sensoren. Bei der Auswahl der Sensorik sollten folgende Faktoren betrachtet werden.

- **Energieträger:**

Essenziell bei der Auswahl der Sensoren sind die zu messenden Energieträger. Die relevantesten sind dabei der elektrische Strom, Wärme, Gas und Trinkwasser. Zusätzlich werden auch öfters Temperaturen gemessen, welche für die Kennzahlbildung verschiedener Anlagen, wie z.B. von RLT-Anlagen essenziell sind.

- **Messgröße:**

Abhängig von dem Energieträger sollte bestimmt werden, welche physikalische Größe gemessen werden soll, um energetische Leistungen und Verbräuche zu erhalten. Typische Messgrößen sind z.B. beim elektrischen Strom die Stromstärke I und die Spannung U .

- **Messbereich:**

Jeder Sensor besitzt einen Messbereich, in welchem dieser in der angegebenen Genauigkeit messen kann. Wird ein Sensor außerhalb seines Messbereiches betrieben, kann es zu Messfehlern bis hin zur vollständigen Zerstörung des Sensors führen. So gibt es beispielsweise Stromwandler, mit einem Messbereich von 0,02 bis 50 A.

- **Auflösung:**
Ein wichtiger Faktor für eine quantitative Messung ist die Auflösung. „Die Auflösung (Resolution) einer Messeinrichtung ist die kleinste darstellbare, bzw. ausgebbare Änderung der Ausgangsgröße“ [Mühl, 2014, S. 42]. Dabei bezieht sich diese sowohl auf die Messgröße als auch auf die zeitliche Dimension. Die Auflösung sollte dabei auf die, zu messende Aufgabe gerichtet werden. So wird beispielsweise für die Bewertung von Lastspitzen eine Auflösung im Sekunden-takt benötigt. Bei der Aufnahme von Verbrauchswerten reicht in der Regel die Erfassung von Messdaten im 1-15 Minutentakt.
- **Messgenauigkeit:**
Die Genauigkeit einer Messeinrichtung gibt die Abweichung zwischen dem gemessenen und dem angezeigten Wert an. Es ist zu beachten, dass die Messgenauigkeit nicht mit der Auflösung gleichzusetzen ist. Daher wird auch oft von der Messunsicherheit oder der Messabweichung gesprochen. Bei zunehmender Genauigkeit steigen die Kosten für die Messsysteme. Daher sollte auch hier die Genauigkeit der Messeinrichtung entsprechend an die Messaufgabe angepasst werden. Bei der Energieverteilung kann meist auf einfache Messsysteme zurückgegriffen werden.

Ein weiterer wichtiger Punkt bei der Auswahl der Messtechnik ist die Kompatibilität mit den Schnittstellen der Dateninfrastruktur. Dies ist wichtig, falls neue Zähler in ein vorhandenes Messkonzept integriert werden sollen. Im nächsten Teilkapitel wird näher auf mögliche Infrastrukturmöglichkeiten zwischen der Messtechnik und dem Monitoringsystem eingegangen [Helfert/Schraml, 2022, S. 16 f.].

2.4.5 Datenverarbeitung und Inbetriebnahme

Nachdem die passende Messtechnik ausgewählt ist, muss nun eine passende Kommunikationsinfrastruktur zwischen den Sensoren, Aktoren und der Auswerteeinheit geschaffen werden. Für diese Verbindung existieren die verschiedensten Feldbusse wie z.B. M-Bus, Modbus, BACnet, Profibus. Des Weiteren kommen auch Ethernet basierte Protokolle zum Einsatz, welche meistens Werte aus den Datenlogger, in welchem sich mehrere Sensoren unterschiedlichster Hersteller bündeln lassen, in einem übergeordneten IP-Netzwerk einbinden. Dabei ist darauf zu achten, dass die Datenlogger die Protokolle der Sensoren unterstützen. Falls dies nicht der Fall ist, werden Gateways benötigt, welche das vorliegende Signal in das gewünschte Format übersetzt. Da diese Infrastruktur auch sehr kostenintensiv ist, sollte auch hier drauf geachtet werden, vorhandene Kommunikationshardware zu übernehmen. In der Energiemonitoringsoftware müssen alle gewünschten Messgrößen als Datenpunkt angelegt werden. So können pro Messpunkt auch mehrere Datenpunkte anfallen. Bei einem Wärmemengenzähler beispielweise können die Vorlauftemperatur, der Volumenstrom und die berechnete Wärmemenge über einen bestimmten Zeitraum als Datenpunkt angelegt werden. Alle Daten der einzelnen Datenpunkte werden in einem Datenbanksystem abgelegt. Um Speicherplatz zu begrenzen ist es sinnvoll die Ablagerate der Anwendung anzupassen. Um die richtigen Intervalle für die Ablegung von Daten bestimmen zu können, sind zwei Grundsatzfragen entscheidend. Diese Überlegung sollte bereits beim Messkonzept im Datenerfassungsplan gemacht werden (siehe Tabelle 1).

- **Wofür werden die erhobenen Daten verwendet?**
Sollen die Daten für Prognosen genutzt werden, so empfiehlt es sich in kleinen Intervallen (sekündlich) Daten zu erfassen. Bei der Erfassung von Energiemengen können auch Intervalle im 15min-Takt ausreichen.
- **Was für ein Energieträger wird gemessen?**
Aufgrund der thermischen Massen sind die Systeme wie bspw. Kühlkreisläufe meist träge. Aufgrund dessen, reichen meist Intervalle im Minutenbereich. Elektrische Systeme sind dagegen sehr dynamisch und sollten meist in kleineren Intervallen aufgezeichnet werden.

Zusätzlich können ältere Daten (älter als 12 Monate) gemittelt werden, um so die Auflösung zu verringern, um damit Speicherplatz zu reduzieren [Helfert/Schraml, 2022, S. 17 ff.].

2.4.6 Betrieb und Anforderungen an das Monitoringsystems

Nach der abgeschlossenen Inbetriebnahme wird nun beschrieben, was beim Betrieb eines Energiemonitoringsystems zu beachten ist, damit die Anforderungen an das System erfüllt werden können. Dabei ist die grundsätzliche Aufgabe des Monitorings mittels der Analyse von Verbrauchswerten und mittels Energiekennzahlen Energieverschwendungen aufzudecken und Maßnahmen zur Optimierung des Energiebedarfs abzuleiten. Um dies erfüllen zu können, muss die Software des Monitoringsystems zunächst die gespeicherten Messdaten aufbereiten. Mit folgenden Funktionalitäten können die Daten für nachfolgende Analyseschritte aufbereitet werden.

- **Datenaggregation:**
Bei der Aggregation von Zählerdaten werden Verbrauchswerte für das ausgewählte Intervall gebildet. Typische Intervalle, in welchen Verbräuche angezeigt werden, sind Stunden-, Tages-, Wochen-, Monats- und Jahreswerte. Zusätzlich sind Intervalle zur Ausgabe von Mittel-, Minimal- und Maximalwerten oft sehr sinnvoll. So schafft man auch die Vergleichbarkeit von Messwerten, welche in unterschiedlichen zeitlichen Takten aufgezeichnet werden.
- **Validierung der Rohdaten:**
Dabei sollen Fehler in den Messdaten erkannt werden, um diese Werte bei der späteren Analyse zu zensieren. Eine andere Möglichkeit wäre die Anpassung des Mittelwertes durch Extrapolation.
- **Erstellen Virtueller Messstellen:**
Zur Bestimmung physikalischer Größen von Anlagen, welche nicht von den Sensoren erfasst werden, können diese durch Berechnungen in virtuellen Messstellen rechnerisch ermittelt werden. So könnte die Wärmeleistung \dot{Q} eines Heizkreises aus Vorlauf- und Rücklauftemperatur (t_V, t_R) sowie dem Volumenstrom \dot{V} berechnet werden.

$$\dot{Q} = \dot{V} \cdot (t_V - t_R) \quad (2-2)$$

Zusätzlich können auch fehlende übergeordnete Messstellen durch Zusammenfassung von mehreren Unterzählern erstellt oder Energiekennzahlen (EnPI) gebildet werden.

- **Selektion nach bestimmten Kriterien:**
Messdaten anhand bestimmter Kriterien herauszufiltern. Beispielweise Messdaten, welche einem gewissen Zeitpunkt aktiv sind oder einen gewissen Wert unter- bzw. überschreiten.
- **Anlernen von Modellen:**
Aus historischen Messdaten werden Modelle angelernt, damit aktuelle Verbräuche plausibilisiert und bewertet werden können. In einfachen Modellen werden z.B. aus historischen Messdaten Mittelwerte gebildet, um so die Abweichung zum Aktuellen betrachten zu können. Manche Softwarelösungen können auch durch maschinelles Lernen komplexe Modelle erstellen, wie den Verbrauch in Abhängigkeit des Wochentages oder der Außentemperatur. So können individuelle Anforderungen an einzelnen Anlagen oder ganzen Liegenschaften besser kontrolliert werden.

Durch die aufbereiteten Messdaten können nun mithilfe von Visualisierungen wie Dashboards oder einzelnen verschiedenen Diagrammen, transparent Analysen durchgeführt werden, um den zu hohen Verbrauch zu detektieren und Potentiale für Energieeffizienzmaßnahmen zu generieren [Bernard u. a., 2020, S. 19 f.].

Eine weitere Aufgabe des Energiemonitorings ist die Betriebsüberwachung des Systems. Dazu sollten zu den einzelnen Messwerten Schwellenwerte (meist oberer und unterer Schwellwert) definiert werden. So sollten Alarmer oder Benachrichtigungen ausgeführt werden, wenn dieser Wert über- bzw. unterschritten wird. Der Mitarbeiter, welcher für das Monitoring zuständig ist, sollte daraufhin im Verhältnis stehende Maßnahmen zur Erklärung dieser Überschreitung einleiten. So können äußere Einflüsse, eine Änderung der Betriebsführung der Anlage, ein Fehler an der Messeinrichtung oder Leckagen in Leitungen der Grund für die Alarmierung sein. Bei einer längeren Betriebsführung kann, aufgrund von historischen Messdaten Feinjustierungen der Schwellenwerte vorgenommen werden, was zu einer Optimierung des Monitoringsystems führt. Desweiteren ist die regelmäßige Wartung und Pflege des Systems durch einen betreuenden Mitarbeiter äußerst wichtig, um die Güte der Datenerfassung aufrechtzuerhalten. Daher sollte das Verhalten aktueller Messungen, Kennwerte und Schwellenwerte überprüft werden, um jegliche Abweichungen von der normalen Betriebsweise hinterfragen zu können. Um Fehler vorzubeugen, sollten vorgenommene Änderungen oder Erweiterungen an Anlagen in der Software und im Datenerfassungsplan ausführlich dokumentiert werden. Wenn alle diese Anforderungen im Energiemonitoringsystem erfüllt werden, kann Mehrverbrauch vermieden werden und in Analysen mithilfe von Energiekennzahlen Einsparpotentiale detektiert werden [Bernard u. a., 2020, S. 24].

In Kapitel 0 wird eine detaillierte Analyse der Messwerte am Praxisbeispiel Klinikum [REDACTED] der Jahren 2019 – 2021 durchgeführt. Dabei werden unter anderem auch Schwachstellen und Optimierungsmöglichkeiten des dortigen Energiemonitoringsystems bei der Messdatenaufbereitung und im Betrieb aufgedeckt. Auf diese Verbesserungsmöglichkeiten wird in Kapitel 6 näher eingegangen.

2.5 ENTECTIV

Auf Grundlage der, in Kapitel 2.4 beschriebenen „Umsetzung eines Monitoringsystem“, wird im Folgenden der Aufbau und die Funktionsweise des Energiemonitoringsystems ENTECTIV der Firma ENGIE Deutschland beschrieben. 2017 wurde das System von der BAFA hinsichtlich Erfassung, Analyse, Visualisierung und Überwachung nach der Norm ISO 50001 zertifiziert.

Im Rahmen einer Masterarbeit aus dem Jahre 2015 wurde dieses Monitoringsystem entwickelt, mit dem Ziel den Kunden eine Dienstleistung anzubieten, in welcher deren Energiebedarf überwacht und in einem Energieportal transparent in Diagrammen dargestellt wird. Außerdem bekommen die Kunden dort auch einen Überblick über deren Liegenschaft typischen Energiekennzahlen (EnPI). Ein weiterer Service für den Kunden sind die Energieberichte, welche automatisch monatlich erstellt und per Mail als PDF versendet werden. In diesem bekommt man nochmals einen schnellen Überblick über den Verbrauch der einzelnen Energieträger, welche im Verlauf eines Jahres dargestellt werden.

Der typische Systemaufbau (vgl. Abbildung 5) erfolgt nach dem Vorgehen, welches in der „Datenverarbeitung und Inbetriebnahme“ beschrieben wurde. Die Messstellen pro Gebäude werden über Feldbusse in einem Datenlogger gebündelt, welcher aus den jeweiligen Messwerten pro Tag eine CSV (comma-separate values) -Datei erstellt. Diese Dateien werden dann im Anschluss an einen zentralen Server übertragen und gespeichert. Zusätzlich können auch CSV-Dateien aus anderen externen Datenbanken wie z.B. aus der Gebäudeleittechnik übertragen werden. Die eigentliche Software basiert auf einer SQL-Datenbank, welche täglich die Daten des Vortages aus dem Server ins ENTECTIV in den jeweiligen Datenpunkte integriert. Zusätzlich werden die Daten über eine Webschnittstelle ins Energieportal übertragen [Larissa Labenski, 2016, S. 27 ff.].

Zur Aufbereitung von Messdaten gibt es im ENTECTIV verschiedene Funktionen. So können virtuelle Datenpunkte mit Hilfe von Pascal-Code erstellt, fehlerhafte Daten manuell korrigiert und Werte einzelner Datenpunkte in verschiedenen Zeitintervallen aggregiert in Diagrammen dargestellt werden. Desweiteren können beim Import von Daten Filter zur Selektierung angelegt werden. Außerdem besteht die Möglichkeit die Qualität der Messdaten zu Validieren. Mit dieser Funktion werden Fehler in den Messdaten gelöscht und durch Werte, welche durch Extrapolation gewonnen werden, ersetzt.

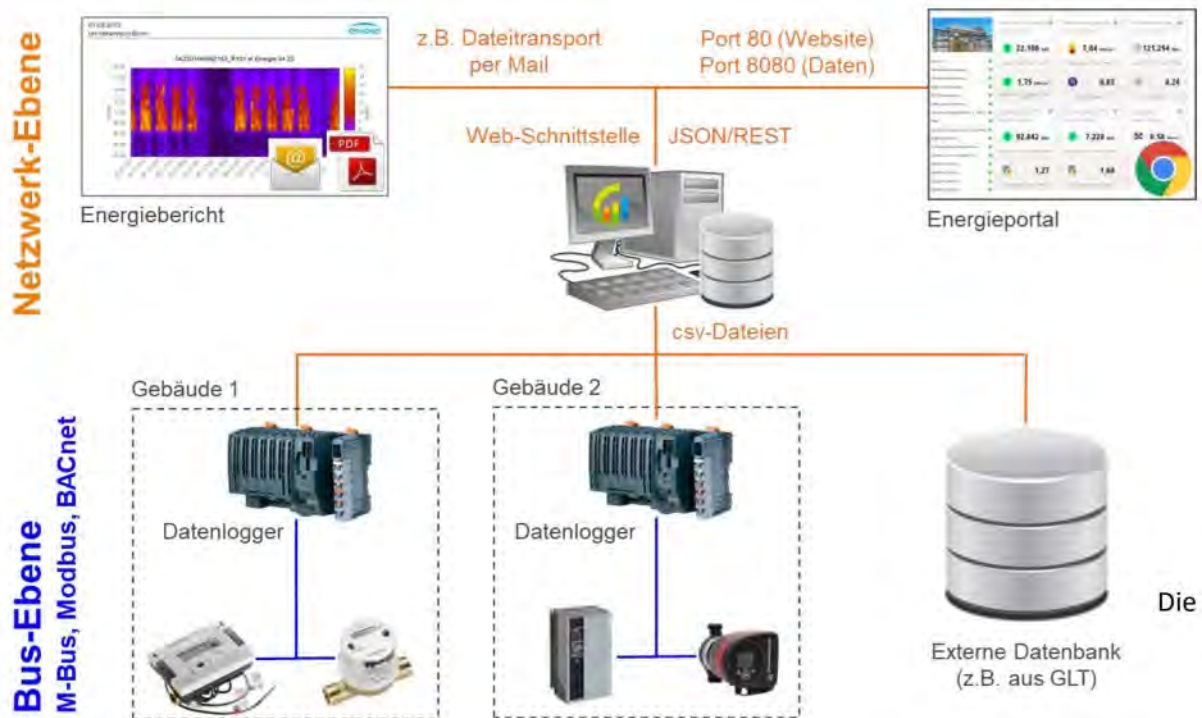


Abbildung 5: Typischer Systemaufbau bei der Verwendung des Energiemonitoringsystems ENTECTIV (Quelle: [ENGIE Deutschland GmbH, 20.11.2017, S. 14])

Überwachung des Betriebs kann anhand statischen Schwellenwerten (Min/Max) gelöst werden. Beim Überschreiten dieser festen Grenzwerte, wird eine Alarmierung per Mail an den jeweiligen Betreuer des Projektes gesendet [ENGIE Deutschland GmbH, 2016, S. 12 f.].

In Kapitel 6 werden die Schwachstellen und Optimierungsmöglichkeiten dieser Funktionalitäten anhand des aufgeschalteten ENTECTIVs am Klinikum [REDACTED] detailliert erläutert.

3 BAFA Pilotprojekt Energieeinsparzähler

In diesem Kapitel werden die wichtigsten Einzelheiten des BAFA Förderprogramms „Pilotprojektes Energiesparzähler“, welches auch am Beispielprojekt des Klinikums [REDACTED] mit dem Produkt des EN-TECTIV angewandt wurde, näher betrachtet. Die Förderung wurde Ende Juni 2021 eingestellt.

Im Rahmen des Förderprogrammes wurden digitale Messsysteme gefördert, um diese bei einem Endkunden in der Praxis zu erproben. Dabei musste es sich bei dem verwendeten Messsystemen um eine Neu- oder eine signifikante Weiterentwicklung handeln. Ziel der Förderung war es, Unternehmen zu unterstützen innovative Lösungen zur Energieeffizienz zu entwickeln und diese auf Marktreife zu überprüfen. Um eine Förderung über einen Zeitraum von 5 Jahren zu erhalten, mussten folgende Voraussetzungen erfüllt werden.

- **Baseline und Bereinigung:**
Definition der energetischen Ausgangslage (Baseline) und Bereinigung von sich ändernden Einflussgrößen (Wetter, Belegungszahl, usw.) in den jeweiligen Systemen. Die Bestimmung der Baseline muss in einem ausreichend langem Zeitraum gewählt werden, damit alle möglichen Betriebszustände und saisonale Effekte abgedeckt werden.
- **Systemgrenze:**
Eine klare Definition eines Systems und deren Grenze. So können die einzelnen Bilanzräume (wie in Kapitel 2.4.3 beschrieben) jeweils ein System darstellen.
- **Messkonzept:**
Auswahl von geeigneter Messtechnik zur Erfassung von allen relevanten Energieströmen, welche in das System „hinein“ und „heraus“ gehen. Zusätzlich sollte die Erzeugung von Energie im System gemessen werden.
- **Geräterkennung:**
Ein gewisser Anteil des Jahresgesamtenenergieverbrauchs der jeweiligen Energieträger muss bestimmten Endverbrauchern zugeordnet werden. Der Anteil, der zugeordnet werden muss, steigt von 20% im 1. Projektjahr auf 40% im 5. Projektjahr an.
- **Nutzerinformationen:**
Darstellung der gemessenen Verbräuche und Einsparungen in einem gewählten Referenzzeitraum auf einem Monitor. Diese Ergebnisse müssen dem Endkunden mindestens einmal im Monat bereitgestellt werden (Energiebericht).
- **IT-Sicherheit und Datenschutz:**
Der Antragsteller muss einen Überblick über die Verwendung und Weitergabe der erhobenen Daten angeben. Außerdem muss beschrieben sein, wie die Daten verschlüsselt sind und wo diese gespeichert werden.

Die Umsetzung dieser Fördervoraussetzungen mussten bei der Antragstellung in einer Projektskizze spezifisch auf das Messsystem beschrieben werden. Zusätzlich waren eine Vorkalkulation und ein Geschäfts- und Skalierungsplan beim Antrag verpflichtend beizufügen. Nach der Antragstellung wurde diese von der BAFA kontrolliert. Wenn dieser den Förderansprüchen genügte, bekam man einen Zuwendungsbescheid. Danach hat man ein Zeitraum von 5 Jahren Zeit, um die Förderung in dem geplanten Projekt umzusetzen und die benötigte eingesetzte Geldsumme in einem Verwendungsnachweis zu

dokumentieren. Dieser wird dann im Nachgang von einem Wirtschaftsprüfer kontrolliert [Becker, 2019, S. 4 ff.].

Ein Teil der Förderung erhielt man für die förderfähigen Kosten, welche beim Pilotprojekt investiert wurden. Förderfähige Kosten sind unter anderem Personalkosten, wie Forschende und Techniker, welche das Messsystem in Betrieb nehmen. Des Weiteren gehören Kosten für Messinstrumente und -ausrüstung, sowie Kosten für Forschende, welche vom Fördernehmer beauftragt wurden. Dabei wurden diese Kosten zu 25 % gefördert. Ist der Antragsteller ein KMU-Betrieb, so erhöhte sich die Förderung um 10 Prozentpunkte. Zusätzlich konnte man auch eine Erhöhung des Fördersatzes um 15 % erhalten, indem man die Zusatzoption Open Source bzw. Open Data wählte. Diese Option konnte gewählt werden, indem man während dem Förderzeitraum Ergebnisse des Messsystems veröffentlicht hat. Am Beispielprojekt am Klinikum [REDACTED] wurde von der Firma ENGIE die Open Source Variante gewählt, mit dem Ziel zu untersuchen, welche Funktionen ein Energiemonitoringsystem besitzen muss, damit es Einsparpotentiale aufzeigt und Mehrverbrauch verhindert. So werden auch Schwächen des ENTECTIV im Vergleich zu anderen Monitoringsystemen aufgezeigt, damit Optimierungspotentiale sichtbar werden. Diese Thematik wird in dieser wissenschaftlichen Arbeit behandelt und nach Absprache mit dem Klinikum in einer abgeänderten Form veröffentlicht [Herdan, 2019, S. 3 ff.].

Eine weitere Förderung konnte man durch die eine leistungsabhängige Komponente erhalten. Dabei erhielt man 15 ct/kWh für messtechnisch nachgewiesene Einsparungen. Außerdem konnte man auch bei dem Wechsel von Energieträger zur Bereitstellung von Wärme, für die erzielten Einsparungen eine Vergütung erhalten. Dabei musste der neue Energieträger regenerativ sein. Die Höhe dieser Fördergelder richtete sich nach der Differenz zwischen dem Erwartungswert des Primärenergieverbrauchs, welcher sich nach der Baseline (energetische Ausgangslage) beruht und dem tatsächlichen Verbrauch der einzelnen Primärenergieträger. Dies entspricht der Energieeinsparung, welche mit den Primärenergiefaktoren multipliziert werden musste, um die Vergütung für die Einsparung zu erhalten. Diese Faktoren beschreiben den nicht erneuerbaren Anteil, welcher bei netzbezogenem Strom den Faktor 1,8 und bei Erdgas 1,1 besitzt [Becker, 2019, S. 9 f.].

4 Energiebedarf Krankenhäuser

Der Energiebedarf in Kliniken ist immens hoch. Gründe dafür sind, dass einige Bereiche permanent in Benutzung sind, hohe Luftwechselraten, sowie der damit verbundene Klimatisierungsbedarf benötigt wird und viele energieintensive medizinische Geräte im Einsatz sind. Zusätzlich wird in den Bereichen der Sterilisation, Wäscherei und Küche durchgängig viel Energie benötigt. Die Stiftung viamedica erwähnt in der „klinergie 2020“, dass der durchschnittliche jährliche Energiebedarf (Strom und Wärme) pro Planbett in Deutschland ca. dem Bedarf von zwei neueren Einfamilienhäusern entspricht. Laut der Krankenhausstatistik des Statistischen Bundesamtes sind Planbetten „*Betten in Krankenhäusern, die in den Krankenhausplan eines Landes aufgenommen sind.*“ [Statistisches Bundesamtes, 2022]. Dabei werden alle Betten aufgeführt, für welche das Krankenhaus Fördermittel erhält. Zu diesen Betten gehören außer den stationären Betten auch Intensivbetten, Säuglingsbetten etc. Sogar die Betten für das Personal werden im Planbettenbestand eines Krankenhauses mit aufgenommen. Die Energiekosten betragen in deutschen Krankenhäusern ca. eine halbe Millionen Euro, was sich auf rund 3% der Gesamtkosten beläuft. Die Stiftung nennt je nach Alter und Größe der Krankenhäuser ein Einsparpotential bei Strom von ca. 40% und bei Wärme von 32%, was auf den Betrieb von alten und überdimensionierten Anlagen zurückzuführen ist. Deshalb ist es äußerst sinnvoll, die Verbräuche energieintensiver Anlagen zu monitoren, um Einsparpotentiale zu detektieren und geeignete Effizienzmaßnahmen umzusetzen [Droste u. a., 2020, S. 5; Hu u. a., 2004, S. 11; Statistisches Bundesamtes, 2022].

4.1 Hauptverbraucher in Krankenhäusern

In Abbildung 6 ist die typische Aufteilung der Energieflüsse der beiden Energieträger Strom und Wärme und deren Bereitstellung in Krankenhäusern in einem Sankey-Diagramm übersichtlich dargestellt. Dabei nimmt die Wärme meist bis zu 70% der Gesamtenergie ein. Diese wird aus den Primärenergieträgern wie Erdgas und Heizöl oder durch einen Fernwärmeanschluss gewonnen.

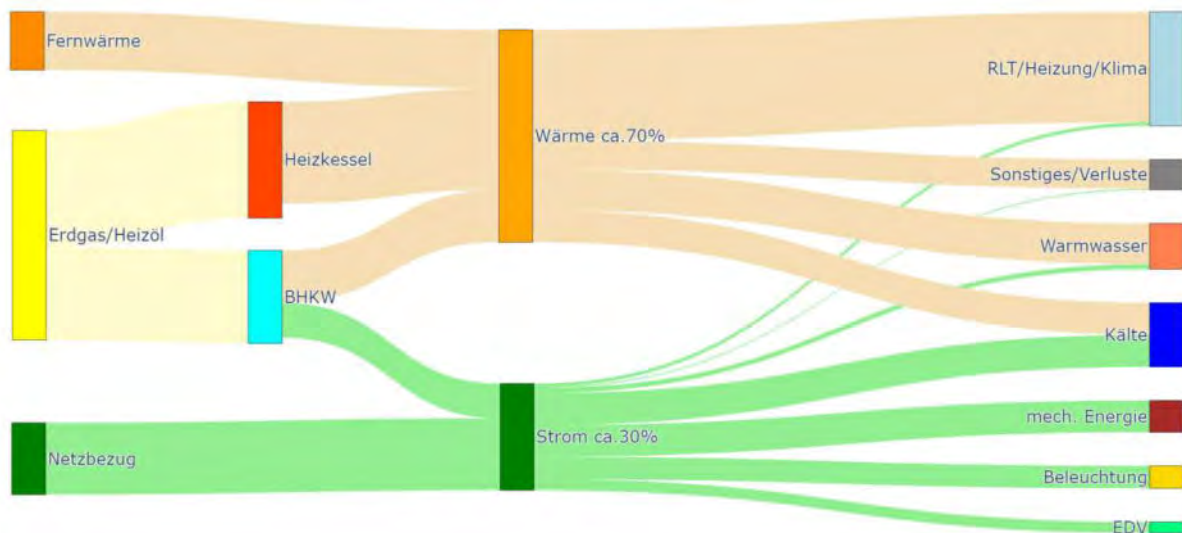


Abbildung 6: Typischer Energiefluss in Krankenhäusern. Vom Energiebezug bis zum Verbrauch in den einzelnen Querschnittstechnologien (Quelle: [viamedica UG, 2016, S. 5; Tippkötter/Schüwer, 2010, S. 32 ff.], eigene Darstellung)

Der Gesamtwärmebedarf teilt sich typischerweise in Raumwärme, Warmwasser und in einen Bedarf für die Erzeugung von Dampf, welcher über spezielle Dampfkessel erzeugt wird, auf. Meist ist jedoch der Anteil für die Dampferzeugung, mit dem Betten und OP-Besteck sterilisiert werden und in der Wäscherei eingesetzt werden, recht gering. Die benötigte Wärme für die raumluftechnischen Anlagen (Klima und Lüftung), Heizungen und das Warmwasser wird meist über gas- oder ölbefeuerte Heizkessel

bereitgestellt. Zusätzlich kommen in Krankenhäusern Blockheizkraftwerke (BHKW) zum Einsatz, welche außer Wärme zusätzlich Strom erzeugen und einen Wirkungsgrad bis zu 90% besitzt. Diese effiziente Kraftwärmekopplung (KWK) verbrennt meist Erdgas in einem Motor und wandelt die entstandene mechanische Energie in einem Generator zu Strom um. Aus diesem Grund eignet sich ein separates BHKW auch als Notstromerzeuger, da dessen Betrieb unabhängig vom Stromnetz ist. Aus Gründen der Versorgungssicherheit, ist dies seit dem Beginn des Ukraine Krieges jedoch nicht mehr für eine unbestimmte Zeit hundertprozentig gewährleistet. Die meisten Krankenhäuser setzten bei der Notstromversorgung jedoch auf Dieselmotoren. Im BHKW kann über einen Wärmetauscher die entstandene Abwärme aus Motorkühlung und Verbrennungswärme genutzt werden und liefert einen großen Teil des Wärmebedarfs [ASUE, 2010, S. 3 ff.]. Außerdem werden BHKWs auch öfters im Zusammenhang mit Absorptionskältemaschinen eingesetzt, welche unter anderem durch die Abwärme des KWK-Prozesses betrieben werden. Des Weiteren benötigen diese Kältemaschinen weniger Strom als Kompressionskältemaschinen. Diese beiden Kältemaschinenarten werden in Krankenhäusern verwendet, um den ganzjährigen Kältebedarf zu decken. Dieser wird für Raumklimatisierung, sowie für die Kühlungen für die Pathologie, Lebensmittellager und medizintechnischer Geräte verwendet. Zusätzlich werden vereinzelt kleine dezentrale Splitgeräte eingesetzt. Der benötigte Strombedarf teilt sich in mechanische Antriebe (Motoren, Pumpen, etc.) für Lüftung und Heizungen, Beleuchtung, Küchengeräte, EDV und sonstige Geräte auf. Dieser wird über den Netzbezug und durch die Eigenstromerzeugung (z.B. BHKW, Photovoltaik) gedeckt [Tippkötter/Schüwer, 2010, S. 32 ff.].

4.2 Typische Energiekennzahlen in Krankenhäusern

Wie in Kapitel 2.3 beschrieben kann über dem Vergleich von spezifischer Energiekennzahlen (EnPI) von Unternehmen aus derselben Branche der Energiebedarf quantifiziert werden (Betriebsvergleich). So gibt es neben dem Vergleich von flächenbezogenen Kennzahlen auch meist zusätzlich Gebäudegruppen typische spezifische Kennzahlen. Da in einem Krankenhaus die Behandlung von Patienten im Fokus steht, ist der Energiebedarf / Planbett die zentrale Kennzahl bei der Bewertung der Energieeffizienz eines Krankenhauses. In der VDI 3807 Blatt 2 und im Zuge einer Studie zum „Energetischen Benchmarking für Krankenhäuser“ aus dem Jahre 2008 wurden diese Kennzahlen pro Bett erhoben [VDI 3807 Blatt 2 inTippkötter/Schüwer, 2010, S. 25].

Bei dieser Benchmarking Studie wurden im Rahmen einer Fragebogenaktion deutsche Krankenhäuser gebeten, deren Stammdaten wie die Zahl der Krankbetten, Fallzahl, Nettogrundfläche (NGF) sowie die Gesamtkosten und die Energieverbräuche der einzelnen Energieträger anzugeben. Des Weiteren sollten zusätzlich Angaben zu der erzeugten Energie z.B. von einem BHKW und zur Erzeugung von Wärme bzw. Kälte gemacht werden, sodass Kennzahlen der jeweiligen Krankenhäuser gebildet werden konnten. Aus mehr als 400 verschiedenen Krankenhäusern, wurden bis 2008 die jeweiligen Energiekennzahlen in einem Benchmarking miteinander verglichen und ausgewertet, sodass man in fünf Stufen (I-V) eingeteilte Referenzkennzahlen erhält. Diese fünf Bereiche ergeben sich aus den Versorgungsstufen, was ein Begriff aus der Krankenhausplanung eines Landes ist. So dient ein Krankenhaus bis zu 250 Betten für die Grundversorgung (Stufe I), welche bedarfsgerecht für stationäre Behandlungen dienen. Krankenhäuser mit mehr als 650 Betten (Stufe IV) hingegen besitzen ein umfassendes Dienstleistungsangebot, welche auch ambulante Operationen durchführen und auch Hochschulkliniken mit modernen medizintechnischen Einrichtungen sind. Aufgrund dieser Unterschiede, welche sich auch energetisch immens unterscheiden und deshalb nicht vergleichbar sind, wurde auch von der VDI diese Einteilung der Energiekennzahlen in genannten Stufen vorgenommen. In der Spannweite der fünf Referenzkennzahlen, gibt es jeweils zwei Werte, an welche die Bewertung der Krankenhäuser durchgeführt werden.

- **Mittelwert:**

Dieser gilt als Orientierungswert, wie sich die Kennzahl des betrachteten Objekts in Bezug auf die Verteilung der Referenzkennzahl verhält. In der Richtlinie nach der VDI 3807 wird als Mittelwert nicht das arithmetische Mittel verwendet, sondern der Modalwert. Dieser repräsentiert der in Spannweite der Kennzahlen den am häufigsten vorkommenden Wert. Aufgrund

der schiefen Häufigkeitsverteilung (nicht symmetrisch) der Verbrauchskennwerte führt laut VDI der arithmetische Mittelwert zu überhöhten Orientierungswerten.

- **Richtwert:**

Wie in Kapitel 2.3 erwähnt beschreibt dieser den möglichen bzw. nach der Durchführung von Effizienzmaßnahmen anzustrebende Kennzahl. Dieser ist nach der VDI-Richtlinie der arithmetische Mittelwert der unteren 25% der aufsteigend sortierten Kennwerte und wird deshalb auch „25%-Quartil“ genannt. Dieser Wert ist außerdem in der Verteilung belegt, d.h. es existieren Krankenhäuser, welche diese Kennzahlen besitzen. Das ist der Grund, warum es sinnvoll ist, diesen Wert als angestrebte Orientierungsgröße zu wählen.

In Tabelle 2 sind die Energiekennzahlen (EnPI) aus der Studie „Energetischen Benchmarking für Krankenhäuser“ für den für den jährlichen Wärme und Strombedarf in Bezug auf die Planbettenzahl berechnet und nach den einzelnen Versorgungsstufen eingeteilt. Zusätzlich wird auch diese Kennzahl für den Trinkwasserverbrauch gebildet, da dieser Verbrauch in den Kostennachweisen von Krankenhäusern zusammen mit Energiekosten aufgeführt ist. Der Wärmebedarf wurde für die Berechnung der Kennzahlen in der Studie für jedes Krankenhaus witterungsbereinigt, sodass alle gemeinsam gebenchmarkt werden konnten. So konnte sichergestellt werden, dass keine Temperaturabhängigkeiten in den Ergebnissen enthalten sind. Des Weiteren wurden bei allen Medien der Verbrauch der Wäscherei nicht betrachtet, da viele Krankenhäuser über keine eigene Wäscherei mehr verfügen [Tippkötter/Schüwer, 2010, S. 25 ff.].

Tabelle 2: Energiekennzahlen pro Planbett aus Studie „Energetischen Benchmarking für Krankenhäuser“ (Quelle: [Tippkötter/Schüwer, 2010, S. 108], eigene Darstellung)

Versorgungsstufe	Planbetten	Wärmeverbrauch [kWh _{th} /Planbett]		Stromverbrauch [kWh _{el} /Planbett]		Trinkwasserverbrauch [m ³ /Planbett]	
		Richtwert (25%-Q.)	Mittelwert (Modalwert)	Richtwert (25%-Q.)	Mittelwert (Modalwert)	Richtwert (25%-Q.)	Mittelwert (Modalwert)
I	0 - 250	19.241	21.750	7.450	9.897	88,2	117
II	250 - 450	17.563	23.044	8.162	11.340	85,0	107
III	450 - 650	17.798	24.585	10.322	13.129	97,4	121
IV	650 - 1000	21.812	21.514	8.730	11.305	73,9	108
V	über 1000	26.843	27.887	11.775	15.438	77,6	142

Die Kennzahlen normiert auf die Nettogrundfläche und den jährlichen stationären Fallzahlen, werden im Anhang dargestellt. Zu diesen Kennzahlen gingen aus der Studie lediglich Mittelwerte (Modalwerte) hervor.

- **Nettogrundfläche (NGF):**

Unter der Nettogrundfläche versteht man alle begehbaren Flächen in einem Gebäude. Nach der DIN 277 gehören dazu die Nutzflächen, wie z.B. Bettenzimmer oder Büros, Verkehrsflächen wie Flure und die Funktionsflächen zu welchen Technikräume zählen. Addiert man der Nettogrundfläche die Konstruktionsfläche (innere und äußere Wände) hinzu, so erhält man die Bruttogrundfläche (BGF)

Wie die Energiekennzahlen aus der Studie zu bewerten sind und in welchem Bereich sich die Kennzahlen des Klinikums [REDACTED] in Bezug auf Richt- und Mittelwert zu bewerten sind, wird in Kapitel 5.2 näher behandelt [DIN 277 in Tippkötter/Schüwer, 2010, S. 80].

5 Energetische Analyse des Klinikums

In diesem Kapitel wird die energetische Analyse der Messdaten des Klinikums [REDACTED] durchgeführt. Diese Daten wurden, über die von der Firma ENGIE installierte, Messinfrastruktur erfasst und im Energiemonitoringsystem ENTECTIV eingelesen. Für die Analyse werden Daten aus den Jahren 2019 bis 2021 verwendet, da ab diesem Zeitraum ein lückenloser Betrieb aller relevanten Zähler gewährleistet ist. Das Ziel der Analyse von Messdaten eines Monitoringsystems ist, Energieverschwendungen in Form von schlechter Effektivität, falscher Betriebsführung von Anlagen und schlechtem Nutzerverhalten auftreten zu finden. Für diese Einsparpotentiale können Effizienzmaßnahmen abgeleitet werden, mit welche den energetischen Verbrauch nachhaltig optimiert werden kann. In diesem Kapitel wird außerdem beschrieben, woran es liegt, dass man die Einsparpotentiale nicht genau messen kann oder warum diese aus den gesammelten Messdaten nicht direkt abgeleitet werden können.

Das Klinikum [REDACTED] ist ein modern ausgestattetes Krankenhaus mit einer 155-jährigen Geschichte. Es deckt in den 19 Gebäuden verschiedene medizinische Dienstleistungsbereiche ab, in welchem die Patienten sowohl ambulant (jährlich 105.000 Patienten) als auch stationär (jährlich 28.000 Patienten in 662 Planbetten) behandelt werden. Des Weiteren ist das Klinikum ein Lehrkrankenhaus der Universität Tübingen und bietet daher aktuelle klinisch wissenschaftliche Erkenntnisse, um die Patienten fachübergreifend zu versorgen. Neben der herkömmlichen Patientenversorgung bietet das Klinikum auch gesundheitliche Aufklärung, Rehabilitation und Patientenschulungen an. Im Klinikum werden die einzelnen Gebäude als Häuser durchnummeriert (Haus 1, Haus 2, etc.). Diese Bezeichnungen werden in dieser Arbeit auch verwendet [Klinikum [REDACTED] 2022].

5.1 Monitoringsystem vor Ort

Im Rahmen des „Pilotprojektes Einsparzähler“ (siehe Kapitel 3) der BAFA hat im Jahr 2017 die Firma ENGIE im Klinikum [REDACTED] ein Messkonzept aufgebaut, mit dem Ziel, Verbrauchsinformationen auf Gebäude- und Nutzerebene für die Medien Strom, Gas, Wärme und Trinkwasser zu analysieren und bewerten zu können. Um dies erfolgreich zu gestalten und Einsparpotentiale erkennen zu können, ist ein auf den Anwender zugeschnittenes Energiemonitoring die richtige Lösung. Daher wurde im Rahmen dieses Projektes für das Klinikum das ENGIE interne ENTECTIV verwendet.

Die umgesetzte Zählerstruktur wurde in drei verschiedenen Bilanzgrenzen bzw. Ebenen nach dem Top-Down Ansatz (siehe Kapitel 2.4.3) unterteilt und in Abbildung 7 exemplarisch dargestellt. In der obersten Bilanzgrenze befinden sich die Hauptzähler der einzelnen Medien. So sind dort die Gaszähler für das BHKW bzw. für den Schnelldampferzeuger, der Wärmemengenzähler der Fernwärmeeinspeisung, die Zähler für die Trinkwassereinspeisung und die Zähler für den Strombezug aus dem Netz sowie der BHKW Erzeugung angesiedelt. Die Übertragung von der Übergabestation bzw. von der BHKW Einspeisung zu den einzelnen Niederspannungshauptverteilungen (NSHV), welche sich in vier Häusern befinden, ist über ein klinikinternes Ringnetz in der Mittelspannungsebene umgesetzt. Daher befinden sich die NSHVs und die darauffolgenden Zähler der Gebäudehauptverteilungen (GHV) der einzelnen Häuser in der zweiten Ebene (Gebäudeebene). Die Verteilung der Wärme vom BHKW und der Nahwärmeeinspeisung erfolgt über ein internes Nahwärmenetz und das Trinkwasser wird über eine Hauptringleitung in die einzelnen Häuser verteilt. Die Wärmemengenzähler in der zweiten Bilanzgrenze befinden sich in den Verteilern der einzelnen Häuser, wobei nicht jedes Haus einen Verteiler besitzt. So wird z.B. am Verteiler im Haus 1 zusätzlich noch der Wärmebedarf in Haus 2 und 4 gemessen. Um diese Häuser extra bilanzieren zu können, wurden im ENTECTIV virtuelle Zähler erstellt, mitwelchen man den benötigten Wert über die vorhandenen Zähler berechnen kann. Die Trinkwasserzähler der zweiten Ebene sind nach der gleichen Vorgehensweise umgesetzt. In der dritten Bilanzgrenze teilt sich der Wärmebedarf in unterschiedliche Heizkreise der statischen und der dynamischen Wärme und in die Warmwasserbereitung auf. Zur statischen Heizung zählen alle Arten von Heizkörpern sowie Flächenheizungen.

Wird ein Raum über raumlufttechnische (RLT) Anlagen beheizt, zählt dies zur dynamischen Heizung. Da viele Wärmemengenzähler nach Bereichen, wie z.B. „Bettenhaus Nord“ benannt sind, kann oft nicht abgegrenzt werden, welche Art der Wärmenutzung vorliegt. Bei den Stromzählern der dritten Ebene (innerhalb der Häuser), handelt es sich zum größten Teil um externe Zähler, mit welchen der Stromverbrauch der einzelnen Mieter genau abgerechnet werden kann. Dies ist wichtig da, das Krankenhaus aufgrund der Eigenerzeugung von Strom durch das BHKW von einer reduzierten EEG-Umlage auf den Eigenverbrauch profitiert. Für die Mieter wie Pathologie, Neurologie, usw. gilt dies nicht und daher ist es für das Klinikum erforderlich, sich von den Drittverbrauchern klar abzugrenzen und deren Verbräuche messtechnisch zu bestimmen. Zum 01.07.2022 tritt die EEG-Umlage außer Kraft. Weitere Stromzähler der dritten Bilanzgrenze messen die Strommengen in einzelnen Stockwerken oder Nutzungszonen, wie z.B. Technikräume oder die Verwaltung. Nur im Haus 9 sind vereinzelte Großverbraucher, wie z.B. die beiden Kompressionskältemaschinen mit Stromzählern ausgestattet [Bundesnetzagentur, 2020, S. 11 ff.].



Abbildung 7: Umgesetzte Zählerstruktur im Klinikum. Aufteilung in drei Bilanzgrenzen nach dem Top-Down Ansatz.

Die Zähler für die Großverbraucher wurden damals gezielt im Haus 9 angebracht, damit Energieeffizienzpotentiale in den SEU, im Gebäude mit einem der höchsten jährlichen Strombedarfe (absoluter Wert), gemessen und inspiziert werden. So konnte man nachfolgend Maßnahmen planen und diese in einem Contracting-Modell der Firma ENGIE umzusetzen. Zu Beginn des Jahres 2022 wurde begonnen, ein Großteil der Analgentechnik, wie Kältemaschinen und die Lüftungsanlagen im Haus 9 auszutauschen oder zu modernisieren. Deshalb wird in der Analyse dieser Arbeit dieses Gebäude nicht näher betrachtet.

Wie im Kapitel 2.5 beschrieben, bekommt der Kunde mit dem ENTECTIV die Serviceleistung der monatlichen Energieberichte, welche Aufschluss über den monatlichen Verbrauch der einzelnen Medien im Vergleich auf die vorherigen Monate gibt. Zusätzlich erhält das Klinikum auch einen jährlichen Energiebericht, in welchem von einem Projektingenieur eine Analyse des jährlichen Energiebedarfes durchgeführt wird. Dort werden Verbrauchsentwicklungen der gemessenen Medien und Anlagen beschrieben und in aufbereiteten Diagrammen dargestellt. Des Weiteren wird auch die Entwicklung von Kosten sowie CO₂-Emissionen eingegangen, typische Kennzahlen der VDI 3807 Blatt 2 beschrieben und Empfehlungen zur Verbesserung des Energiebedarfs gegeben. Über diese Analyse hinaus wird im nächsten Kapitel eine genauere, detaillierte Untersuchung des energetischen Verhaltens

des Klinikums durchgeführt, Energiepotentiale aufgedeckt und Schwachstellen in der Zählerstruktur sowie im ENTECTIV aufgezeigt.

5.2 Analyse der Jahre 2019 – 2021

In diesem Kapitel werden die Messdaten aus den Jahren 2019 bis 2021, welche im ENTECTIV bzw. im SQL-Server gesammelt wurden, genauer inspiziert. Zunächst wurden die Jahresenergieberichte zur Hand genommen, um sich ein erstes Bild der energetischen Lage vor Ort zu verschaffen. In verschiedenen Literaturen konnte man darüber hinaus Ideen gewinnen, wie man bei den Analysen vorgeht und welche Methodiken es gibt, um Einsparungspotentiale zu erkennen.

Bei der Durchführung der Analyse wird zunächst das ganze Krankenhaus energetisch betrachtet und anhand der krankenhaustypischen Energiekennzahlen der Studie bewertet. Des Weiteren wird die Eigenenergieerzeugung des BHKWs näher analysiert und der Verbrauch der einzelnen Häuser normiert auf die Nettogrundfläche miteinander verglichen. Im Anschluss wird das Haus, welches den größten spezifischen Stromverbrauch und Wärmebedarf (normiert auf die NGF besitzt), näher untersucht. Dieses Haus fällt außerdem auf, da es den höchsten Wärmebedarf im Sommer hat. Ein weiterer Analyseschritt ist es zu überprüfen, ob sich in Häusern, die der gleichen Nutzungszone angehören, ein gleiches bzw. ähnliches Lastprofil erkennen lässt. Des Weiteren wird inspiziert, ob die Häuser ein gleichbleibendes oder sich änderndes Profil besitzen.

Bei den Berechnungen von Energieeinsparungen in diesem Kapitel wird angenommen, dass der Verbrauchsanteil der Primärenergieträger reduziert werden kann. Daher wird mit Energiepreisen und CO₂-Emissionsfaktoren aus dem Strom- bzw. Fernwärmenetz gerechnet. Die Energiepreise werden vom Klinikum bereitgestellt und sind in Tabellen im Anhang für das Jahr 2021 aufgeführt. Bei den CO₂-Emissionen werden die deutschlandweit gültigen BAFA-Faktoren verwendet, welche ebenfalls in einer Tabelle im Anhang zu finden sind. Für die Fernwärme werden die Faktoren der Stadtwerke angewendet.

5.2.1 Programmierung mit Python

Die Analyse wurde mit Hilfe von mehreren Python-Skripten (Programmen) durchgeführt. Es wurde dabei hauptsächlich mit dem Package (Programm-Bibliothek) Pandas gearbeitet. Dieses eignet sich besonders für die Analyse und die Verarbeitung von Daten, welche in tabellarischer Form zur Verfügung stehen. So kann man beispielweise Wertetabellen aus einer Excel-Datei (xlsx), welche aus einer Spalte mit dem jeweiligen Zeitpunkt (01.01.2021 00:15) und aus einer oder mehreren Datenspalten besteht, einlesen. Im Anschluss können diese Daten bearbeitet und als Diagramm angezeigt bzw. als Foto Datei (png) abgespeichert werden. Weitere verwendete Packages sind NumPy, welche für Berechnungen mit Listen verwendet wurden und Matplotlib zum Erstellen von komplexen Diagrammen. Für die Erstellung der Grafiken wurde für die jeweiligen Anforderungen die Verbrauchsdaten in der benötigten zeitlichen Auflösung (15 min-, Stunden- oder Tageswerte) als CSV-Dateien aus dem SQL-Server des ENTECTIV ausgegeben. Diese wurde dann anschließend in den Python Skripten über die Pandas Funktion „pd.read_csv“ eingelesen. Das erhaltene DataFrame (Tabelle in Pandas) konnte nun in wenigen Berechnungen so bearbeitet werden, dass man das gewünschte Diagramm erhalten hat. Die verschiedenen Typen von Diagrammen und wofür diese am besten geeignet sind, wird in den jeweiligen Analyseschritten näher beschrieben. Im Anschluss an diese wissenschaftliche Arbeit besteht die Möglichkeit, diese Programme zu erweitern, sodass diese in einem bestimmten Zeitintervall sich die gewünschten Daten direkt aus dem SQL-Server entnehmen und automatisch die folgenden Analysegrafiken erstellen. Während dieser Arbeit wurde dies nicht umgesetzt, da sich das ENTECTIV inklusive SQL-Server auf einem zentralen Server im Klinikum befindet. So hatte man nur über Ferneinwahl mit „TeamViewer“ Zugriff [Wes McKinney, 2022, S. 3 ff.].

5.2.2 Analyse des Gasverbrauches und der Eigenerzeugung durch das BHKW

Wie in Kapitel 5.1 beschrieben, sind Gaszähler nur in der ersten Bilanzgrenze zu finden, welche den Bedarf für das BHKW und für den Schnelldampferzeuger messen. Der Verbrauch an Erdgas stieg von 1.688.800 m³ im Jahre 2019 auf 1.873.600 m³ im Jahr 2021 an. Dieser Anstieg von 11% lässt sich auf den Bedarf für das BHKW zurückführen, welcher im gleichen Maße angestiegen ist. Aufgrund dessen blieb der Anteil des BHKWs am Gesamtgasbedarf bei rund 93% stabil. Der restliche Anteil wird von dem 2018 neu installierten Schnelldampferzeuger verbraucht, welcher in dieser Arbeit nicht näher analysiert wird. Der Grund dafür ist, dass die erzeugte Dampfmenge nicht genau erfasst wurde. Der Dampf wird im Klinikum für die Sterilisation, Reinigung und Desinfektion und für eine Containerwaschanlage verwendet. Es wäre sinnvoll zu prüfen, ob überschüssiger Dampf produziert wird, welcher nicht genutzt wird. In der Fachzeitschrift „EuroHeat&Power“ wird beschrieben, wie in einem österreichischen Krankenhaus Dampf, welcher nicht genutzt werden kann, verwendet wird, um über einen Dampfumformer 80°C heißes Wasser zu gewinnen. Dieses kann dann den statischen Heizkreisen zugeführt werden. Des Weiteren kann der überschüssige Dampf auch in Form von Kondensat zum Dampferzeuger zurückgeführt werden [Bälz/Kilpper-Bälz, 2018, S. 30 f.].

Bei dem vorhandenen BHKW, in welchem ein großer Teil des benötigten Stroms und Wärme produziert wird, wurde sowohl der Energieeintrag (Erdgas) als auch die beiden gewonnenen Energieträger gemessen und im Monitoringsystem gespeichert. Daher können die Kennzahlen der jeweiligen Nutzungsgraden (elektrisch, thermisch und gesamt) dauerhaft gebildet werden, um die Effizienz und Ausfalligkeiten des BHKWs zu überwachen. Dieses besitzt eine Output-Leistung von 910 kW_{th} und 892 kW_{el} und wurde im Jahre 2016 in Betrieb genommen. In Abbildung 8 ist der Jahresverlauf der elektrischen Leistung des erzeugten Stroms für das Jahr 2021 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass das BHKW näherungsweise stabil bei 100% der Leistung betrieben wird. Nur in den Sommermonaten (Juni – September), wird diese Leistung aufgrund des nicht benötigten Wärmebedarfs geringfügig reduziert. Ganz besonders erkennt man dies am heißen September 2021 (Durchschnittstemperatur 16,1°C), welcher im Vergleich zum langjährigen Mittel, um 2°C wärmer war [Bauer, 2022]. Des Weiteren erkennt man noch einzelne kurze Zeiträume, an welchen Störungen aufgetreten sind. Schaut man sich die tägliche Grundlast des Gesamtstromverbrauchs (siehe Abbildung 9) an, beträgt diese ca. 850 kW_{el} nach welcher das BHKW stromseitig ausgelegt wurde. Die thermische Auslegung erfolgt in der Regel nach der Jahresdauerlinie des Wärmeverbrauchs, sodass man möglichst viele Betriebsstunden bei 100% der Leistung erreicht. Anhand der Betriebsführung des BHKWs am Klinikum [REDACTED] kann man erkennen, dass dieses nach ähnlichen Kriterien ausgelegt wurde [ASUE, 2010, S. 19].

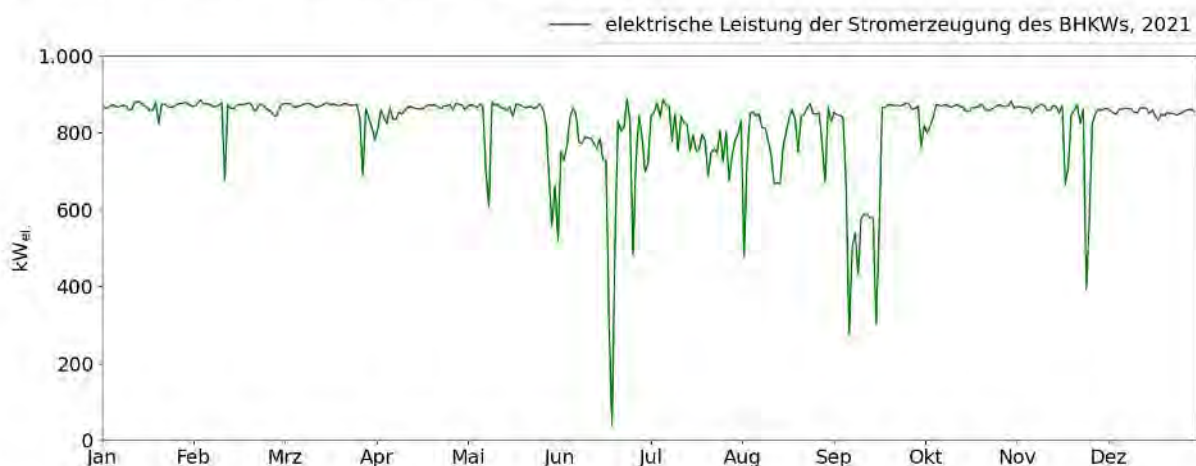


Abbildung 8: Elektrische Leistung des erzeugten Stroms durch das BHKW im Jahr 2021

Mit höheren jährlichen Vollbenutzungsstunden (Vbh) verbessert sich die Wirtschaftlichkeit und das BHKW amortisiert sich schneller. Dies begründet sich daraus, dass man durch eine höhere jährliche Eigenerzeugung mehr Kosten der Energieträger Strom und Wärme einsparen kann. Die Einsparungen der Energieträger sind in Tabelle 3 aufgetragen. Diese berechnen sich aus der Erzeugungsmenge von

Strom und Fernwärme aus dem Jahr 2021, multipliziert mit deren Energiepreis. Die Kosten des Erdgasverbrauchs für das BHKW werden diesen Einsparungen gegenübergestellt.

Tabelle 3: Einsparung der Kosten der jeweiligen Energieträger durch den Einsatz des BHKWs im Jahr 2021

Kosten für Erdgasverbrauch:	$K_{Erdgas} = W_{ver.,Gas} * p_{Erdgas}$	- 945.977 €
Einsparung an Stromkosten:	$EK_{Strom} = W_{erz.,el.} * p_{Strom}$	1.617.726 €
Einsparung an Fernwärmekosten:	$EK_{Fernwärme} = Q_{erz.,th.} * p_{Fernwärme}$	721.335 €
Einsparungen:	$EK = K_{Erdgas} + EK_{Strom} + EK_{Fernwärme}$	1.393.084 €

Für eine Wirtschaftlichkeitsberechnung des BHKWs kommen noch einige betriebsgebundene Kosten, wie Wartungs-, Personal- sowie Verwaltungskosten und kapitalgebundene Kosten, welche die Investitionen bis zur fertigen Inbetriebnahme des BHKW-Moduls umfassen. Betrachtet man dabei das ganze Krankenhaus müssten noch Kosten, für die nicht eigenerzeugte Strom und Wärme mit bilanziert werden. Außerdem kommen noch positive Aspekte, wie Steuer- und Stromvergütungen dazu. Zu diesen gehört auch die Förderung nach dem Kraft-Wärmekopplungs-Gesetz (KWKG). Die Höhe der Förderung richtet sich dabei nach der elektrischen Nettoleistung und den jährlichen Vollbenutzungsstunden, welche mit einem Vergütungssatz multipliziert werden. Die Förderung bekommt man bis zum Erreichen von 30.000 Vbh. So konnte man die komplette Förderung innerhalb von 4,3 Jahren mit jährlich 7.000 Vbh erhalten. So kann man mit hohen jährlichen Vollbenutzungsstunden über diese Förderung erreichen, dass die finanziellen Einsparungen in den Anfangsjahren verbessert werden, um dadurch die Amortisation des BHKW schneller zu erreichen [ASUE, 2010, S. 21 ff.]. Diese Vollbenutzungsstunden werden aus dem Quotienten der erzeugten Energie bezogen und auf die Leistung berechnet. Die elektrischen Vollbenutzungsstunden, welche bei der KWK-Förderung betrachtet werden, ergeben sich für das Jahr 2021 wie folgt [Brautsch/Lechner, 2013, S. 24].

$$Vbh_{el.} = \frac{W_{el.}}{P_{el.}} = \frac{7.158,1 \text{ MWh}}{892 \text{ kW}_{el.}} = 8.025 \text{ h} \quad (5-1)$$

Da das BHKW permanent im selben Leistungsverhältnis (elektrische zur thermischen Leistung) betrieben wird, weichen die thermischen Vollbenutzungsstunden kaum von den elektrischen ab. 2021 dürfte die Förderung für das BHKW, wenn dieses nach jährlichen 7.000 Vbh gefördert wurde, bereits ausgelaufen sein. Die KWK-Förderung wird nach einem Beschluss des Bundestages vom 03.07.2020 für Neuanlagen geändert, sodass man bis 2025 jährlich nur noch 3.500 Vbh gefördert bekommt [B.KWK, 2020].

Durch das BHKW können nicht nur langfristig Energiekosten gesenkt werden, sondern auch CO₂-Emissionen eingespart werden. In der nachfolgenden Rechnung wird die Einsparung an Tonnen CO₂ für das Jahr 2021 berechnet. Es werden dabei die eingesparten Emissionen der Strom- und Wärmeerzeugung dem Ausstoß an CO₂ bei der Erdgasverbrennung gegenübergestellt. Die CO₂-Emissionsfaktoren (EF) befinden sich im Anhang. Für die Wärmeerzeugung wird der Emissionsfaktor der Fernwärme verwendet und beim Erdgas, welches in t CO₂/MWh angegeben, bezieht sich der Faktor auf den Heizwert der Energieträger.

$$E_{CO_2} = W_{el.} * EF_{el.} + Q_{th.} * EF_{th.} - W_{Gas} * EF_{Gas} \quad (5-2)$$

$$7.158 \text{ MWh}_{el.} * 0,366 \frac{tCO_2}{\text{MWh}_{el.}} + 7.475 \text{ MWh}_{th.} * 0,16 \frac{tCO_2}{\text{MWh}_{th.}} - 18.062 \text{ MWh}_{Gas.} * 0,21 \frac{tCO_2}{\text{MWh}_{Gas.}} = 200 \text{ tCO}_2$$

Diese jährliche Menge an eingespartem CO₂ durch den Einsatz eines BHKWs entspricht dem CO₂-Fußabdruck von 26 Personen (pro Person jährlich 7,7 t CO₂ in Deutschland) [European Commission, 2020]

Um eine schnelle Beurteilung der Effizienz des BHKWs treffen zu können, können wie bereits erwähnt, die einzelnen Nutzungsgraden, als Kennzahlen gebildet werden. Der Nutzungsgrad gibt das Verhältnis der tatsächlich nutzbaren Energie zur eingesetzten Energie an. Beim BHKW betrachtet man ein System mit einem „Aufwand“ (Erdgasverbrauch) und zwei resultierenden „Nutzen“, wie Strom und Wärme.

Um die Kennzahl bilden zu können, muss zunächst der Erdgasverbrauch in m^3 in dieselbe Einheit, wie die beiden Nutzen also in Energieeinheit MWh umgerechnet werden. Dazu benötigt man den Brennwert H_0 für das eingesetzte Erdgas, welcher laut den Stadtwerken bei $11,4 \text{ kWh/m}^3$ liegt. Da ein BHKW das Erdgas in einem Verbrennungsmotor verbrennt und nicht über eine Brennwertnutzung verfügt, muss dieser Brennwert H_0 in Heizwert (auch unterer Heizwert genannt) H_U umgerechnet werden. Dieser gibt die Menge an Wärme, welche bei einer vollständigen Verbrennung eines Brennstoffes frei wird, an. Bei einem BHKW mit Brennwertnutzung kann man zusätzlich noch die Energie des, bei der Verbrennung entstanden, Wasserdampfes nutzen. Mit dem Kehrwert des Umrechnungsfaktors $H_0/H_U = 1,1$ erhält man den für das BHKW nutzbaren Erdgasbedarf in MWh. Die folgende Berechnung wird für das Jahr 2021 ausgeführt [Recknagel u. a., 2020, S. 243].

$$W_{\text{Gas}, \text{MWh}} = W_{\text{Gas}, \text{m}^3} * H_0 * \frac{H_U}{H_0} = 1.741.091 \text{ m}^3 * 11,4 * 10^{-3} \frac{\text{MWh}}{\text{m}^3} * 0,9 = 18.062 \text{ MWh} \quad (5-3)$$

Nun kann der elektrische, thermische und der Gesamtnutzungsgrade bestimmt werden [Brautsch/Lechner, 2013, S. 24].

$$\text{elektrischer Nutzungsgrad: } \bar{\eta}_{el.} = \frac{W_{el.}}{W_{\text{Gas}}} = \frac{7.158 \text{ MWh}}{18.062 \text{ MWh}} = 39,6 \% \quad (5-4)$$

$$\text{thermischer Nutzungsgrad: } \bar{\eta}_{th.} = \frac{W_{th.}}{W_{\text{Gas}}} = \frac{7.475 \text{ MWh}}{18.062 \text{ MWh}} = 41,2 \%$$

$$\text{gesamter Nutzungsgrad: } \bar{\eta}_{ges.} = \frac{W_{el.} + W_{th.}}{W_{\text{Gas}}} = \frac{14.633 \text{ MWh}}{18.062 \text{ MWh}} = 81,0 \%$$

Vergleicht man die einzelne Nutzungsgrade mit den Wirkungsgraden aus Datenblatt und Mittelwerte von anderen BHKWs, welche sich in einem Leistungsbereich von 800 - 1.000 $\text{kW}_{el.}$ befinden, so sind diese um ca. 2-5% besser. Anders als bei den Nutzungsgraden, wird beim Wirkungsgrade Verluste wie, Abstrahlung von Wärme bei schlecht gedämmten Rohrleitungen, Verluste durch unvollständige Verbrennung, etc. nicht berücksichtigt, da diese im optimalen Betriebspunkt gemessen werden. Daher kann man das BHKW anhand den errechneten Nutzungsgraden als akzeptabel bewerten [Recknagel u. a., 2020, S. 1003 ff.]. Es wäre aber durchaus sinnvoll, die Kennzahlen im Energiemonitoring dauerhaft zu bilden und Schwellenwerte zu bilden, um den Nutzungsgrad und dadurch auch die Effizienz des BHKWs zu überwachen. Diese Schwellwertbildung könnte wie in Kapitel 6.2 beschreiben gebildet werden, indem man die Gesamtnutzungsgrade der einzelnen Tage aus den Jahren 2019 -2021 verwendet, um diese mit der Boxplot-Methode auszuwerten. So kann die Verringerung der Effizienz erkannt und durch die energetische Alarmierung ein Betreuer des Monitoringsystem informiert werden. [SWE, 2022].

5.2.3 Analyse des Stromverbrauchs

Wie bereits in Kapitel 5.2 beschrieben wird der Strombedarf im Klinikum durch das BHKW und durch den Netzbezug bereitgestellt. Der Anteil durch das BHKW stieg von 2019 mit rund 70% auf 79% im Jahr 2021 an. Dagegen sank der gesamte Stromverbrauch von 9.392 MWh (2019) auf 9.047 MWh (2021). Das Jahr 2020 liegt in beiden Fällen zwischen den beiden Werten aus den Jahren 2019 und 2021. Durch die Betrachtung des Gesamtstromverbrauchs kann man keinen Mehrverbrauch, in Folge der Corona-Pandemie, in den Jahren 2020 und 2021 erkennen, sondern entgegen den Erwartungen gibt es einen Rückgang des Verbrauchs. Betrachtet man einen Stromlastgang einer Winter- und einer Sommerwoche (vgl. Abbildung 9) so erkennt man, dass sich das Leistungsprofil an Werktagen und am Wochenende deutlich unterscheiden. Dabei ist die Grundlast in der Winterwoche Kalenderwoche 2 (KW2) an allen Wochentagen identisch bei $0,8 \text{ MW}_{el.}$, jedoch ist die Spitzenlast am Wochenende um $0,4 \text{ MW}_{el.}$ geringer als an Wochentagen. Der Lastverlauf in einer Sommerwoche (KW26) ist näherungsweise identisch zu der Winterwoche. An heißeren Tagen mit einer Außendurchschnittstemperatur von über 15°C verschiebt sich der Lastverlauf leicht nach oben. In der Abbildung kann man

anhand des Montags der Sommerwoche, mit einer Tagesdurchschnittstemperatur von 21,7°C, diese Verschiebung gut erkennen.

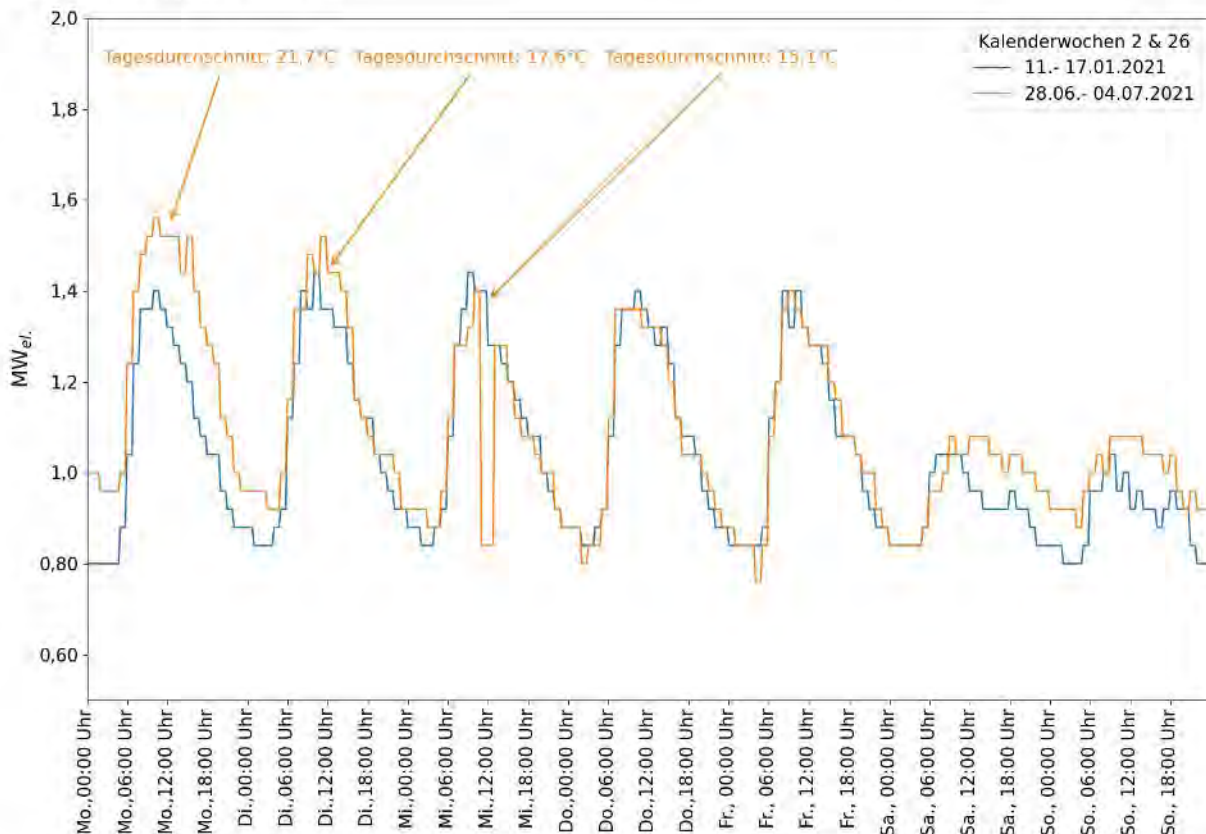


Abbildung 9: Vergleich der Stromlastgänge des gesamten Klinikums der Kalenderwochen 2 und 26 im Jahr 2021

Energiekennzahlen:

Um den jährlichen Stromverbrauch in Bezug auf andere Krankenhäuser bewerten zu können, werden für das Klinikum die Energiekennzahlen (EnPI), wie in der Benchmarking Studie aus Kapitel 4.2, berechnet. Dabei wird der Verbrauch der Wäscherei (im Jahr 2021 12,635 MWh), wie in der Studie, vom Gesamtverbrauch abgezogen. In Abbildung 10 sind die EnPIs „Jahresstromverbrauch pro Planbett“ der einzelnen Jahre anhand des Mittelwerts (Modalwert) und des Richtwertes der Studie bewertet dargestellt. Aufgrund der Anzahl von 662 Betten werden die Werte aus der Versorgungsstufe IV (siehe Tabelle 2) für die Bewertung verwendet. Die Anzahl der Planbetten können aus der Gebäudeübersicht im Anhang entnommen werden.

Die Kennzahlen des Klinikums, welche mit einem Kreuz in der Abbildung dargestellt sind, sind in allen drei Jahren deutlich höher als der Mittelwert (gestrichelt dargestellt) der Studie. Da der Richtwert wie in Kapitel 4.2 beschrieben, den durch Effizienzmaßnahmen möglichen, Wert charakterisiert und der Mittelwert als Orientierungsgröße dient, ist für die Bewertung dieser Energiekennzahlen eine Ampelbewertung hinzugezogen worden. So leuchtet die Ampel rot, wenn die Kennzahl über dem Mittelwert liegt und gelb, falls diese im Zwischenbereich der beiden Werte steht. Wenn eine bessere EnPI als der Richtwert erreicht wird, leuchtet die Ampel grün. Diese Darstellung gibt eine schnelle Übersicht, wie die aktuellen Kennzahlen zu bewerten sind. In einem Energiebericht oder in einem Dashboard eines Monitoringsystems, kann sich der Kunde z.B. eine Führungskraft, ohne sich mit technischen Details zu beschäftigen, einen schnellen Überblick über die Energiekennzahlen seines Unternehmens bekommen. Der blaue Pfeil zeigt hier das mögliche Potential an, wie viel Strom pro Planbett jährlich eingespart werden könnte, falls der Richtwert erreicht werden würde.

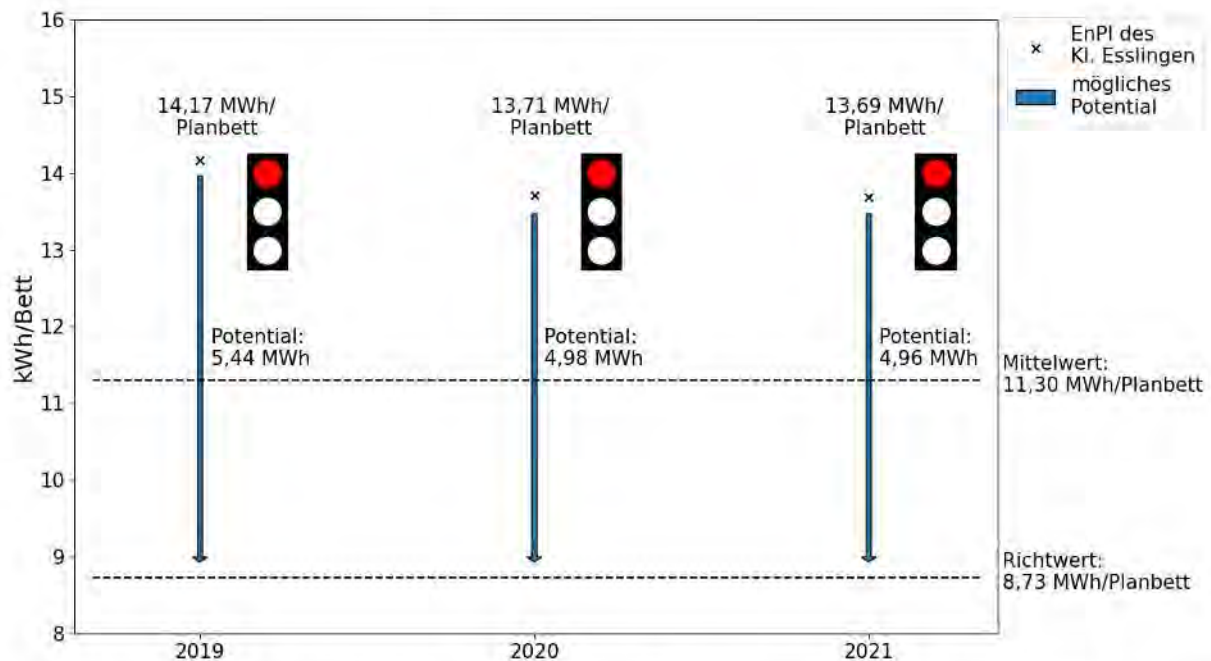


Abbildung 10: Jahresstromverbrauch pro Planbett (EnPI) der Jahre 2019-2021 des Klinikums bewertet (Ampelbewertung) nach dem Mittelwert und Richtwert der Studie „Energetischen Benchmarking für Krankenhäuser“, Versorgungstufe IV (Quelle: [Tippkötter/Schüwer, 2010, S. 98], eigene Darstellung)

Für das Jahre 2021 könnten durch dieses Potential folgende Kosten und Emission eingespart werden. Die Energiepreise und die Emissionsfaktoren wurden aus den Tabellen im Anhang entnommen.

$$4,96 \frac{\text{MWh}}{\text{Planbett}} * 662 \text{ Betten} * 226 \frac{\text{€}}{\text{MWh}} = 742.075 \text{ €} \quad (5-5)$$

$$4,96 \frac{\text{MWh}}{\text{Planbett}} * 662 \text{ Betten} * 0,366 \frac{\text{t}}{\text{MWh}} = 1.202 \text{ t CO}_2$$

Um die Bedeutung der Kennzahl des Jahresstromverbrauchs bezogen auf die Planbettzahl besser gewichten zu können, werden noch weitere Energiekennzahlen gebildet. In Tabelle 4 werden noch zusätzlich die Kennzahlen normiert auf die Nettogrundfläche (NGF) und die stationären Fallzahlen dargestellt. Um auch diese Kennzahlen in Bezug zur Studie einstufen zu können, sind jeweils die Mittelwerte der Versorgungstufe IV (siehe Tabelle im Anhang) aufgeführt.

Tabelle 4: Energiekennzahlen normiert auf Planbett, NGF und stationäre Fallzahlen mit dem jeweiligen Mittelwert aus der „Energetischen Benchmarking für Krankenhäuser“, Versorgungstufe IV (Quelle: [Tippkötter/Schüwer, 2010, S. 97 f.], eigene Darstellung)

	EnPI: pro Planbett [MWh/Bett]	EnPI: pro Nettogrundfläche [kWh/m²NGF]	EnPI: pro Fallzahl [kWh/Patient]	
Mittelwert	11,30	127,0	671,0	ca. 13.100 Patienten
2019	14,17	112,2	335,0	ca. 28.000 Patienten
2020	13,71	108,5	324,1	
2021	13,69	108,4	323,8	

Wie in Abbildung 10 schon dargestellt, befinden sich die jeweiligen EnPI bezogen auf die Planbettenzahl deutlich über dem Mittelwert der Studie und zeigt hohe Einsparpotentiale auf. Vergleicht man jetzt aber die Energiekennzahl bezogen auf die Nettogrundfläche, so erkennt man, dass in allen 3 Jahren die Kennzahlen besser als der Mittelwert waren. Da das Klinikum möglicherweise mehr ambulante und andere Dienstleistungen anbietet als die Krankenhäuser in der Studie, zeigt dass die EnPI pro NGF die energetische Lage des Krankenhauses besser widerspiegelt. Die Planbettenzahl, gibt

keine Auskunft über das komplette Leistungssegment des Krankenhauses. So würde sich die Kennzahl nur für die Bewertung von Bettenhäusern eignen, welche in Kapitel 5.2.7 gebildet werden. Dasselbe gilt für die Energiekennzahl pro stationäre Fallzahl, da diese nur Auskunft über die jährlichen Patienten geben. So werden in der Studie durchschnittlich, weniger als die Hälfte der Patienten, als im Klinikum [REDACTED], behandelt. Dies könnte mit der Bettenauslastung und Verweildauer der Patienten zusammenhängen. Außerdem sollte die genaue jährliche Anzahl der stationären Patienten verwendet werden, um diese Kennzahl belastbar darzustellen. Abschließend zeigt sich, dass für die energetische Betrachtung die Kennzahl normiert auf die Nettogrundfläche die belastbarste Kennzahl ist. Um mögliche Potentiale zu erkennen, ist es sinnvoll, diese noch mit einem Richtwert zu vergleichen. Außerdem ist es hilfreich, aktuelle Studienwerte zu verwenden [Tippkötter/Schüwer, 2010, S. 97 f.].

Eine Studie des Deutschen Krankenhausinstitut aus dem Jahre 2013 nennt einen durchschnittlichen Jahresstromverbrauch normiert auf die NGF bei einer Bettenzahl > 600 von 123 kWh/m² NGF. Dieser ist beinahe identisch zum Wert aus der Studie, was die Belastbarkeit dieses Mittelwertes noch einmal bestärkt [Deutsches Krankenhausinstitut, 2014, S. 4].

Vergleich des spezifischen Stromverbrauchs der einzelnen Häuser:

Vergleicht man den jährlichen Verbrauch der einzelnen Häuser (siehe Abbildung im Anhang), so kann man erkennen, dass die Verbräuche der einzelnen Jahre in den jeweiligen Häuser nicht stark voneinander abweichen. In Häusern mit den größten Verbräuchen, ist der Verbrauch sogar jeweils leicht zurück gegangen. Im Haus 7, in welchem sich mitunter auch die Intensivstationen befinden, kann kein Anstieg des Stromverbrauchs durch die, im Jahr 2020 einsetzende Corona-Pandemie, erkannt werden. Nach allen Erwartungen sinkt sogar der Verbrauch. Der höchste spezifischen Verbrauch pro m² hat das Haus 4, in welchem viele externe Dienstleister Behandlungen durchführen. So sind dort die Computertomographie (CT), Kernspintomographie (MRT), Mammographie und viele weitere moderne medizintechnische Dienstleistungen untergebracht. Außerdem müssen in diesen Räumlichkeiten immer dieselben Raumtemperaturen herrschen, was zu einem hohen Klimatisierungs- bzw. Kältebedarf führt. Der Behandlungsbau, welcher zu dem noch den größten spezifischen Wärmebedarf besitzt, wird im Kapitel 5.2.6 näher analysiert. Im Haus 13 fällt ein weiterer hoher Verbrauch in den einzelnen Jahren an. In diesem Gebäude befindet sich die Küche für die Mahlzeiten der Patienten, sowie der Mitarbeiter und die Wäscherei. Das Lastprofil des Hauses speziell der Küche wird in einem späteren Kapitel genauer unter die näher betrachtet. In vielen Häusern, zudem auch das Haus 1 mit einem hohen spezifischen Verbrauch gehört, folgen nach dem Gebäudezähler meist nur wenige Unterzähler. Diese Mietzähler wurden nur aus Gründen der Abgrenzung vom Klinikum installiert. Mit nur 5,7% des gesamten Verbrauchs im Haus 1, finden sich im verbauten Mietzähler die Cafeteria wieder. Da das Kosten-Nutzen-Verhältnis beim Installieren neuer Zähler nicht immer gegeben ist, sollte man die Großverbraucher (SEU) der einzelnen Gebäude herausfinden und dokumentieren. Dies ist wichtig um bei plötzlichen Veränderungen am Verbrauch des Gebäudezähler, schnell Ursachen der Veränderung bestimmen zu können. Die Alarmierung im Monitoringsystem erfolgt beim Überschreiten von Schwellwerten. Für die Dokumentation der SEU von einzelnen Gebäuden, könnten Sankey-Diagramme verwendet werden. Diese werden bei der Analyse des Hauses 4, näher erläutert.

5.2.4 Analyse des Wärmeverbrauchs

Der benötigte Wärmebedarf wird aus der Erzeugung des 910 kW_{th} BHKW und der Fernwärmeeinspeisung der Stadtwerke [REDACTED] gedeckt. Dabei beläuft sich der Anteil, welches durch das BHKW bereitgestellt wurde, zwischen 63,6% (2019) und 67,2% (2020). Der absolute Wärmebedarf beträgt im Jahre 2019 10.506 MWh, sinkt im Jahre 2020 um 1,2% ab und steigt im Jahre 2021 um 1.200 MWh an. An diesen Zahlen lässt sich die Temperaturabhängigkeit gut erkennen, da 2021 das kälteste der drei Jahren war. Diese Witterungsabhängigkeit wird in diesem Kapitel noch näher beleuchtet, und erklärt, wie diese bereinigt werden können. Anders als beim Strombedarf lässt sich kein Wochenprofil erkennen, welches näherungsweise ähnlich ist. Des Weiteren lässt sich kein Unterschied zwischen einem Werktag und einem Wochenende erkennen. In diesem Wärmeverbrauch ist die Dampfwärme nicht beinhaltet.

Diese wird über einen Erdgasbefeuernden Schnelldampferzeuger erzeugt. Um die Effizienz der erzeugten Dampfwärme beurteilen zu können, muss ein Wärmemengenzähler angebracht werden. Dieser ist in der Gebäudeleittechnik, welche von einer anderen externen Firma betrieben wird, vorhanden. Daher sollte überprüft werden, ob dieser in ENTECTIV implementiert werden kann.

Witterungsbereinigung:

Um Wärmeverbräuche vergleichen zu können oder bevor Energiekennzahlen gebildet werden können, muss eine Witterungsbereinigung durchgeführt werden. Durch diese Bereinigung wird die Temperaturabhängigkeit der Kennzahlen gelöst, sodass einzelne Häuser oder auch Bilanzjahre des Klinikums vergleichbar sind. Daher muss zunächst der Heizwärmeverbrauch ermittelt werden. Diesen erhält man, indem man alle nicht temperaturabhängigen Wärmeverbräuche vom Gesamtwärmebedarf abzieht. Für das Klinikum [REDACTED] wird dieser wie folgt berechnet.

$$Q_{\text{Heiz}} = Q_{\text{Wärme, ges.}} - Q_{\text{Warmwasser}} - Q_{\text{Küche}} - Q_{\text{Absorptionskältemaschine}} \quad (5-6)$$

Der Wärmebedarf der Sterilisation und Wäscherei, welcher vom Schnelldampferzeuger bereitgestellt wird und daher nicht im Gesamtwärmebedarf enthalten ist, müsste zusätzlich abgezogen werden. Die Wärmeerzeugung des BHKW, welche an heißen Tagen nicht verbraucht wird, kann von der Absorptionskältemaschine verwendet werden, um daraus Kälte zu gewinnen. Durch die fehlende Zählerstruktur ist es nicht möglich den Warmwasserbedarf und die Wärme für die Absorptionskältemaschine zu bestimmen. Im späteren Kapitel 5.2.6 wird beschrieben, wie der Wärmeverbrauch für die Kältemaschine bestimmt wird. Dieser wird vom Jahresverlauf des Tageswärmeverbrauchs abgezogen, da die Absorptionswärme kein eigentlicher Wärmeverbrauch ist, sondern zur Produktion von Kälte, bzw. für die Klimatisierung verwendet wird. Daher tritt der Verbrauch nur im Sommer und vereinzelt im Frühling sowie Herbst auf. Der korrigierte Verbrauchsverlauf ist in Abbildung 11 am Beispiel des Jahres 2021 abgebildet.

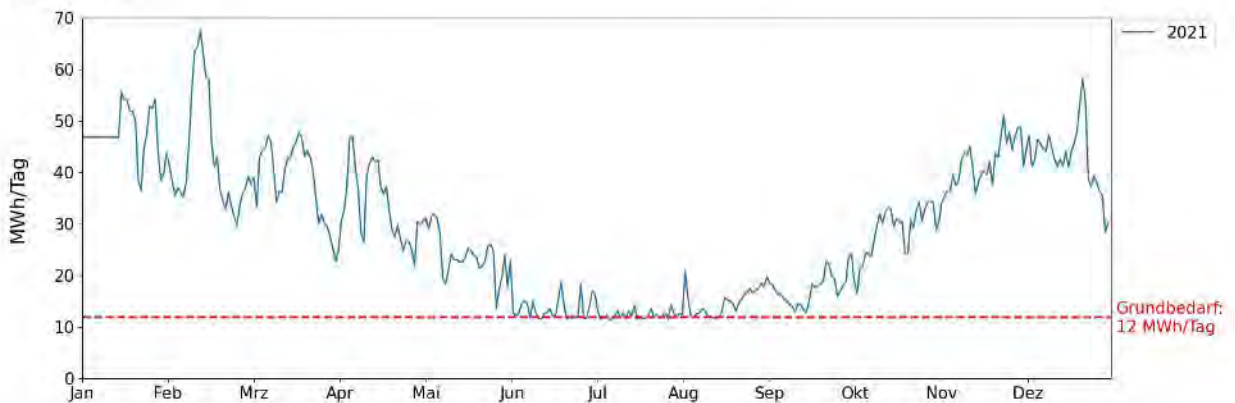


Abbildung 11: Jahresverlauf des Gesamtwärmeverbrauchs pro Tag abzüglich dem Wärmebedarf für die Absorptionskältemaschine zur Bestimmung des Grundbedarfs für Warmwasser und Küche

Da im Sommer näherungsweise keine Heizenergie $Q_{\text{Heiz}} = 0$ benötigt wird, kann nun, wie in der Abbildung durch die rote gestrichelte Linie dargestellt, der Grundverbrauch von 12 MWh/Tag bestimmt werden. Der Grundbedarf setzt aus dem Warmwasserverbrauch und aus der Wärme für die Küche zusammen. Nun folgt die zu bereinigende Heizenergie Q_{Heiz} exemplarisch für das Jahr 2021. Der Jahreswärmebedarf der Absorptionskältemaschine beträgt 667 MWh.

$$Q_{\text{Heiz}} = 11.529 \text{ MWh} - 365 \text{ Tage} * 12 \frac{\text{MWh}}{\text{Tag}} - 667 \text{ MWh} = 6.482 \text{ MWh} \quad (5-7)$$

Um die Heizenergie bereinigen zu können, müssen im nächsten Schritt die Klimafaktoren der jeweiligen Jahre bestimmt werden. Zur Bestimmung dieser Faktoren werden die Heizgradtage benötigt, welche laut VDI 3807 Blatt 1 „die Summe der täglichen Differenzen zwischen der Heizgrenztemperatur von

15°C und der mittleren Außentemperatur, sofern diese unter 15°C liegt“ [VDI 3807 Blatt 1 in Küting/Weber, 2006, S. 83]. Es wird jeweils über ein Jahr aufsummiert.

$$G_{15} = \sum_{n=1}^z (15^{\circ}\text{C} - t_{m,n}) \quad (5-8)$$

G_{15} : Heizgradtage im Jahr

t_m : mittlere Außentemperatur des Heiztages [°C]

z : Anzahl der Heiztage im Jahr

Nun kann der zeitliche Klimafaktor (KF_{zeitlich}) berechnet werden, indem man den Quotienten des mittleren Heizgradtages am Klinikum, welcher sich aus dem arithmetischen Mittelwert aus historischen Heizgradtagen z.B. aus den letzten 10 Jahre zusammensetzt, und dem Heizgradtag aus dem betrachteten Jahr bildet.

$$KF_{\text{zeitlich}} = \frac{G_{15m, \text{Klinikum}}}{G_{15, \text{Klinikum}}} \quad (5-9)$$

Damit das Klinikum auch mit anderen Krankenhäusern in Deutschland vergleichbar ist muss zusätzlich noch ein lokaler Bereinigungsfaktor (KF_{lokal}) berechnet werden. Dieser wird über das langjährige Mittel (Testreferenzjahre) der Heizgradtage eines Referenzstandortes (seit 2014) bezogen auf das langjährige Mittel am Klinikum gebildet.

$$KF_{\text{lokal}} = \frac{G_{15m, \text{Referenzstandort}}}{G_{15m, \text{Klinikum}}} \quad (5-10)$$

Multipliziert man die beiden Faktoren, so erhält man die Klimafaktoren, mit welchen das Klinikum, sowohl über einen Zeitraum als auch überregional vergleichbar ist.

$$KF = KF_{\text{zeitlich}} * KF_{\text{lokal}} = \frac{G_{15m, \text{Referenzstandort}}}{G_{15, \text{Klinikum}}} \quad (5-11)$$

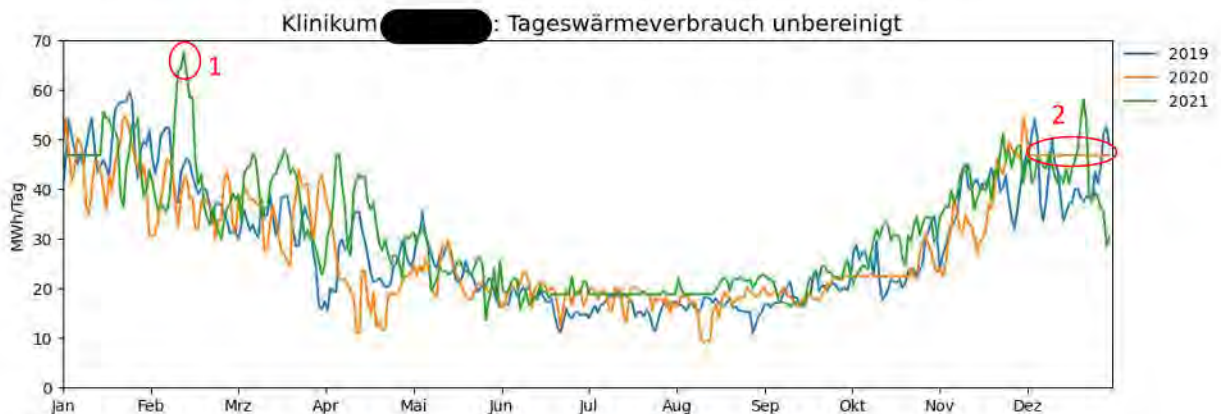
Da am Klinikum keine historischen Temperaturdaten aufgezeichnet wurden, kann für eine Berechnung die Temperaturen von der nächstgelegenen Wetterstation, hier Leinfelden (Stuttgart Flughafen) verwendet werden. Aufgrund des Höhenunterschiedes zwischen dem Flughafen und dem Klinikum von ca. 110 m könnte es geringen Temperaturabweichungen kommen. Die Daten der Wetterstation sind beim Deutschen Wetterdienst erhältlich. Dort findet man außerdem Klimafaktoren in monatlicher und jährlicher Auflösung für jede Postleitzahl. In diesen Faktoren werden bereits die zeitliche und die lokale Komponente berücksichtigt (wie in Formel 5-7) [DWD, 2022a]. Für das Jahr 2021 ergibt sich nach dem lokalen Klimafaktor für $KF_{2021} = 0,95$ folgende bereinigte Heizenergie und den jährlichen Wärmeverbrauch. Die Klimafaktoren der einzelnen Jahre befinden sich im Anhang.

$$Q_{\text{Heiz,bereinigt}} = Q_{\text{Heiz}} * KF_{\text{lokal,2021}} = 6.482 \text{ MWh} * 0,95 = 6.157,9 \text{ MWh} \quad (5-12)$$

$$\begin{aligned} Q_{\text{Wärme ges.,bereinigt}} &= Q_{\text{Heiz,bereinigt}} + Q_{\text{Grundbedarf/Tag}} * 365 \text{ Tage} + Q_{\text{Absorptionsk.}} \\ &= 6.157,9 \text{ MWh} + 365 \text{ Tage} * 12 \frac{\text{MWh}}{\text{Tag}} + 667 \text{ MWh} = 11.204,9 \text{ MWh} \end{aligned}$$

Da das Jahr 2021 insgesamt milder als die Testreferenzjahre war, ist der bereinigte Verbrauch um ca. 325 MWh geringer. Um die Energiekennzahlen der Studie bilden zu können, wurden die jährlichen Wärmeverbräuche der Jahre 2019 und 2020, nach demselben Vorgehen witterungsbereinigt. Um die Qualität der Witterungsbereinigung zu steigern, ist es sinnvoll, fehlende Zähler anzubringen, um den genauen Warmwasserbedarf bestimmen zu können. Dabei ist allerdings zu prüfen, ob die Kosten im Einklang mit dem Nutzen stehen. Des Weiteren sollte der vorhandene Wärmemengenzähler, um den Wärmebedarf der Absorptionskälte genau zu bestimmen ins ENTECTIV aufgenommen werden. Wenn dieser Wärmebedarf nicht wie in Abbildung 11 abgezogen wird, ist der Grundbedarf um 7 MWh pro Tag höher und dadurch wird die Bereinigung weniger stark gewichtet. Dieser Fehler wurde bereits in den einzelnen Energieberichten gemacht [Tippkötter/Schüwer, 2010, S. 81 ff.].

Um die Witterungsbereinigung nicht nur für Jahres und Monatsbereinigung durchführen zu können, wird im Folgenden eine Variante erklärt, bei welchem die jeweiligen Jahresverläufe der Tageswärmeverbräuche bereinigt werden. Für die Bereinigung wurden Temperaturwerte der Wetterstation Leinfelden (Stuttgart Flughafen) des Deutschen Wetterdienstes verwendet. Dazu wurde an jedem Tag in den einzelnen Jahren überprüft, ob es sich um einen Heizgradtag handelt (mittlere Außentemperatur $\leq 15^\circ\text{C}$) und im Anschluss wurden diese Temperaturwerte wie in Formel (5-8) von 15°C abgezogen. Diese werden nicht auf das ganze Jahr summiert, sondern für jeden Heizgradtag gebildet. Nun werden an den gleichen Tagen die Heizgradtage der arithmetischen Mittelwerte aus den historischen Temperaturdaten (2010-2021) nach demselben Vorgehen gebildet. Im Anschluss können die zeitlichen Klimafaktoren für den Standort Klinikum aus Formel (5-9) für die jeweiligen Heizgradtage gebildet werden. Da bei diesem Vergleich nur die einzelnen Jahre am selben Standort verglichen werden, genügt eine zeitliche Bereinigung. Um zu extreme Klimafaktoren zu verhindern, wird ein Maximalfaktor von 2 eingeführt. Damit die Bereinigung durchgeführt werden kann, wird in Abbildung 8 aus den jeweiligen Jahresverläufen, den Wärmebedarf der Absorptionskältemaschine abgezogen, den Grundbedarf bestimmt, um diesen ebenfalls abzuziehen. So erhält man die Heizenergieverläufe für die einzelnen Jahre, welche an den Tagen im Jahr, an welchem es sich um ein Heizgradtag handelt, mit den jeweiligen Klimafaktoren bereinigt werden. Im Anschluss wird der abgezogene Wärmeverbrauch wieder dazu addiert und man erhält die witterungsbereinigten Jahresverläufe der einzelnen Tageswärmeverbräuche für die Jahre 2019, 2020 und 2021. In Abbildung 12 sind Verbrauchsverläufe witterungsbereinigte und unbereinigt dargestellt. Bei dem Vergleich der Tagesverbräuche kann man gut erkennen, wie wichtig eine Witterungsbereinigung ist. So bemerkt man, dass sich die drei Jahre kaum voneinander unterscheiden und bis auf ein paar Zeitbereiche denselben Verlauf besitzen. Außerdem erkennt man auch den Zeitraum (Juni- Mitte September), an welchem keine Heizgradtage waren und daher der Verbrauch identisch geblieben ist. Des Weiteren bemerkt man, dass der hohe Verbrauch Mitte Februar 2021 (im unbereinigten Verlauf Nr.1) aufgrund sehr kühler Außentemperaturen zu Stande kam. In der Witterungsbereinigung wurde dieser hohe Verbrauch angepasst. Ende Dezember 2020 (Nr.2) erkennt man im unbereinigten Verlauf einen Fehler beim Messen oder beim Übertragen der Rohdaten, da der Verlauf eines ganzen Monats demselben Wert entspricht. Nach der Witterungsbereinigung erhält man einen großen Verbrauchs-Peak, da dieser Zeitraum milder als die vergangenen Jahre war. Solche Fehler sollten vom Monitoringsystem bei der Validierung der Messwerte erkannt werden. Diese Werte sollten automatisch angepasst oder ein Betreuer benachrichtigt werden, welcher dies übernimmt. Dies wird näher in Kapitel 6.1 behandelt. Abschließend lässt sich zusammenfassen, dass sich Wärmeverbräuche bzw. wärmeabhängige Kennzahlen nur vergleichen lassen, wenn diese witterungsbereinigt wurden. Daher wäre es außerdem sinnvoll, diese Bereinigung in das Monitoringsystem zu implementieren, damit man bei der Bedienung des Systems bereits witterungsbereinigte Verbräuche oder Kennzahlen in bestimmten Zeiträumen (Jahre, Monate und Wochen) vergleichen kann [DWD, 2022b].



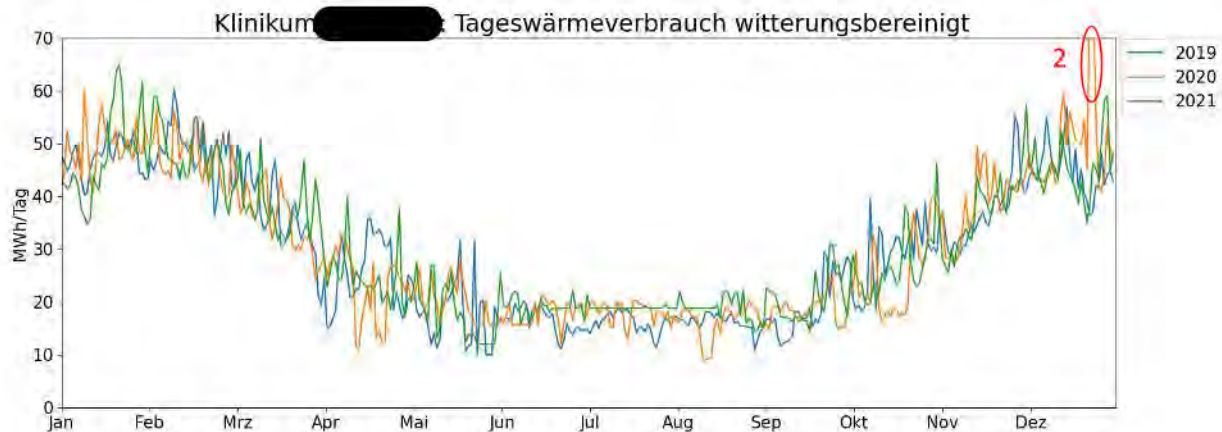


Abbildung 12: Tageswärmeverbräuche unbereinigt und witterungsbereinigt aufgetragen über die Jahre 2019, 2020 und 2021.

Energiekennzahlen:

Wie beim Stromverbrauch werden für die Bewertung der verbrauchten Wärme des Klinikums [redacted] die krankenhaustypischen Kennzahlen aus Kapitel 4.2 berechnet. Wie auf den Seiten 28 -29 beschrieben, wurde zunächst der witterungsbereinigte Jahreswärmeverbrauch berechnet, um im Anschluss die Kennzahlen zu bestimmen. Der Verbrauch der Wäscherei, wird vom Schnelldampferzeuger generiert und muss deshalb nicht betrachtet werden. Die Energiekennzahl des Jahreswärmeverbrauchs je Planbett wird auch über eine „Ampelbewertung“ in Bezug auf die Benchmarking Studie eingestuft (Abbildung im Anhang). Die Werte für Richt- und Mittelwert (Modalwert) sind aus der Versorgungsstufe IV gewählt worden. In dieser Stufe ist der Richtwert höher als der Modalwert, sodass in der Werteverteilung der, am häufigsten auftretende Wert unterhalb des arithmetischen Mittelwertes der unteren 25% der Werte liegt. Das bedeutet es gab in der Studie wenige Kliniken mit deutlich höheren Kennzahlen aber viele mit niedrigeren. Betrachtet man nun den Wärmeverbrauch pro Planbett, so erkennt man, dass die Kennzahlen des Klinikums [redacted] in allen Jahren mindestens 4,5 MWh/Planbett besser sind als der Mittelwert der Studie. Auch die Kennzahl normiert auf die Nettogrundfläche ist deutlich besser, was die aktuelle Belastbarkeit der Wärmekennwerte der Benchmarking Studie aus 2008 in Frage stellt. Dabei ist noch der fehlende Dampfverbrauch zu berücksichtigen, welcher von der Menge aber nicht stark ins Gewicht fällt. Dass es Energieeinsparpotentiale beim Wärmeverbrauch gibt, lässt sich damit begründen, dass im Haus 9 bereits zu Beginn 2022 damit begonnen wurde, Maßnahmen umzusetzen welche, den Verbrauch senken. Des Weiteren werden im folgenden Kapitel weitere Potentiale aufgedeckt, welche, durch die Umsetzung von Effizienzmaßnahmen, zusätzlich den Verbrauch reduzieren können. Daher wäre es hilfreich neue Studienkennzahlen für den Jahreswärmeverbrauch normiert auf die Nettogrundfläche zu erhalten, um das Klinikum [redacted] besser bewerten zu können.

Vergleich des spezifischen Wärmeverbrauchs der einzelnen Häuser:

Wie auch schon beim Stromverbrauch ist es sinnvoll den Wärmeverbrauch der jeweiligen Häuser zu betrachten. Durch die Bildung der spezifischen jährlichen Wärmekennzahl der einzelnen Häuser können diese gegenübergestellt und nach deren Größe verglichen werden. Zuvor muss jedoch der Verbrauch der einzelnen Häuser witterungsbedingt bereinigt werden, um die einzelnen Jahre und die jeweiligen Häuser qualitativ verglichen zu können. Für die Bereinigung der Wärmeverbräuche der einzelnen Häuser werden, wie in analog Abbildung 11, werden die Jahresverläufe der einzelnen Tageswärmeverbräuche der jeweiligen Gebäude untersucht und deren Grundbedarf bestimmt. Zu diesem Grundbedarf gehört, wie bereits erwähnt der Warmwasserverbrauch und der Verbrauch Küche, welcher von den jeweiligen Verbräuchen der Häuser abgezogen wird. Da der Verbrauch der Küche sich witterungsabhängig verhält wird dieser Verbrauch auch witterungsbereinigt. Im Haus 4 wird zusätzlich der Verbrauch für die Absorptionskälte abgezogen. Im Anschluss können die Heizwärmeverbräuche

mit den Klimafaktoren aus dem Anhang multipliziert werden. Die abgezogenen Verbräuche werden dann wieder auf die bereinigten Heizwärmeverbräuche dazu addiert und man erhält die bereinigten Jahreswärmeverbräuche, welche normiert auf die Nettogrundfläche in Abbildung 13 dargestellt, sind.

Auf den ersten Blick erkennt man, dass sich die einzelnen Häuser in der Verbrauchsentwicklung unterschiedlich verhalten. So steigt in manchen Gebäuden der Verbrauch über die Jahre an und in anderen sinkt dieser. In einigen Häusern ist auch der Verbrauch im Jahre 2020 am höchsten. Dies könnte unter anderem und speziell im Haus 7, in welchem sich die Intensivstation befindet, mit dem Höhepunkt der Hospitalisierungsinzidenz infolge der Corona-Pandemie Ende 2020 zusammenhängen. Wie auch beim spezifischen Stromverbrauch, besitzt der Behandlungsbau (Haus 4) den eindeutig höchsten Wärmeverbrauch in Bezug auf die NGF. Auch vom absoluten Verbrauch ausgehend, besitzt das Haus 4 in allen Jahren den zweit höchsten Verbrauch. Deutlich zu erkennen ist außerdem, dass der spezifische Verbrauch zwischen den Jahren 2019 und 2020 um ca. 50 kWh/m² angestiegen ist.

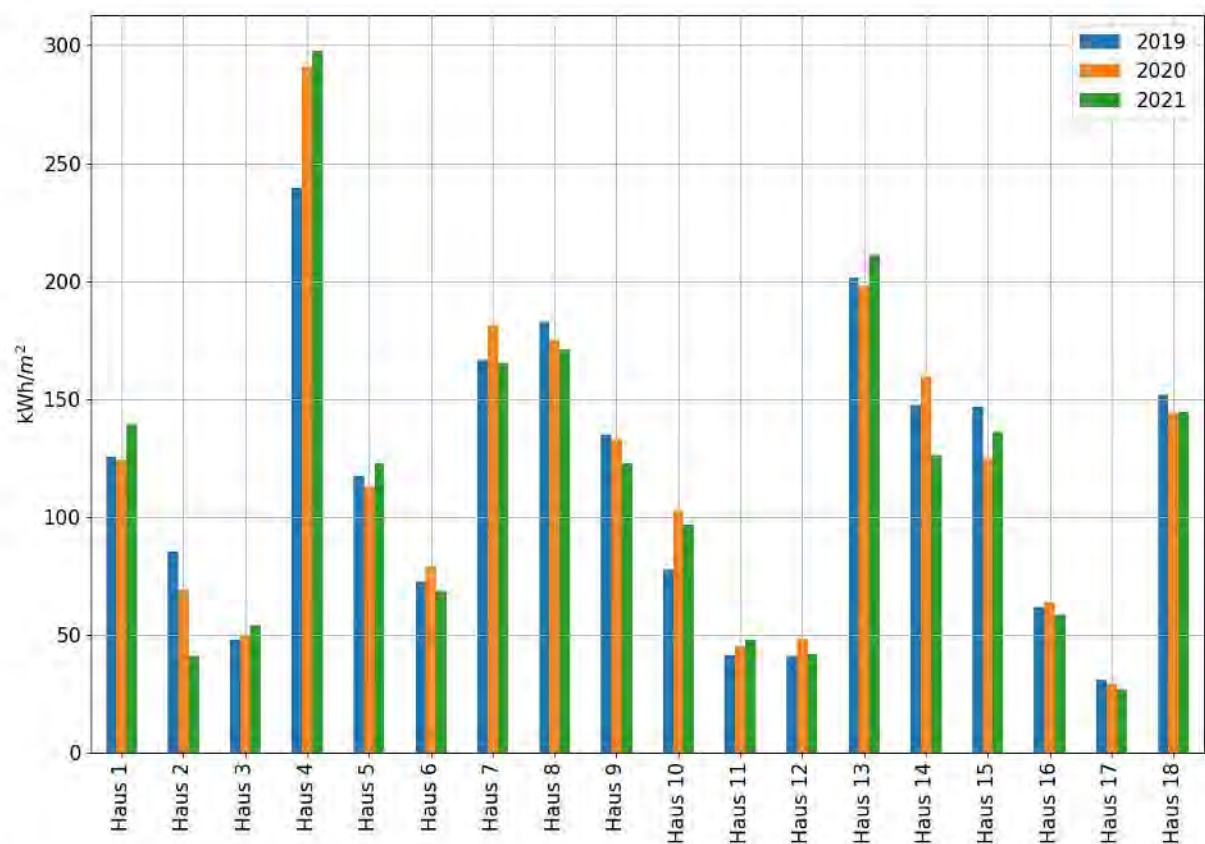


Abbildung 13: Vergleich der Kennzahlen des witterungsbereinigtem Jahreswärmeverbräuche normiert auf die Nettogrundfläche der einzelnen Häuser des Klinikums

Nach der Überprüfung der Zählerdaten ist aufgefallen, dass ungefähr das halbe Jahr 2019 die Verbrauchsaufzeichnung des Zählers, welcher für die statische Wärme misst, keine Daten gemessen hat. Solche Fehler sollten direkt vom Energiemonitoringsystem bei der Validierung der Rohdaten erkannt werden. Dies wird in Kapitel 0 näher erläutert. Der zweit höchste Energieverbrauch pro m² fällt auf das Haus 13. Laut dem Namen des Zählers im ENTECTIV, ist der komplette Wärmeverbrauch der Küche zuzuschreiben. Anhand des stark witterungsabhängigen Verbrauchsprofil, lässt sich schließen, dass der Hauptverbrauch auf die Beheizung der Küche zurückzuführen. Es sollte geprüft werden, ob die Höhe des spezifischen Verbrauchs zu hoch ist. In Küchen gibt es außerdem hohe Abwärme der Küchengeräte welche außerdem die Räume mitbeheizt. Für eine Einordnung des Heizwärmeverbrauchs in einer Küche könnte daher auch eine Kennzahl pro Mahlzeit erstellt werden. Dem Verbundprojekt „NAHGAST“ des Bundesministerium für Bildung und Forschung zufolge

verbraucht eine typische Großküche 1,17 kWh/Mahlzeit an Heizenergie. Wie bei den Energiekennzahlen beschrieben, wird vermutet, dass in den meisten Häusern Einsparpotentiale vorhanden sind. Dies wird deutlich, wenn man den Wärmeverbrauch pro Fläche des energieintensivsten Gebäudes, dem Haus 9, betrachtet. In dieser spezifischen Betrachtung befindet sich das Haus, in dem zu Beginn 2022 Einsparmaßnahmen umgesetzt wurden, im Mittelfeld. Dies lässt darauf schließen, dass sich auch in anderen Häusern Einsparpotentiale befinden. In dieser Arbeit werden im nachfolgenden Kapitel mögliche Potentiale aufgedeckt, mit welchen Wärmeeinsparungen durch Umsetzung von Maßnahmen erzielt werden können. Ein Grund, warum die Witterungsreinigung so entscheidend für die Bewertung von Wärmeverbräuchen ist, kann man gut am Haus 8 erkennen. Vor der Bereinigung war der Verbrauch im Jahre 2021 am höchsten. Da das Jahr 2021 den kleinsten Klimafaktor (siehe Anhang) besitzt, also über das Jahr gesehen das kälteste Jahr war, hat es nach der Bereinigung den geringsten Verbrauch gehabt [RKI, 2022, S. 14].

5.2.5 Analyse des Trinkwasserverbrauchs

Der Trinkwasserbedarf ist, im eigentlichen Sinne kein Energieträger, wird aber wie bereits im Kapitel 4.2 erwähnt, in den Kostennachweisen der Krankenhäuser zusammen mit den Energieträger Strom, Gas und Wärme aufgeführt. Das Trinkwasser wird im Klinikum in allen Bereichen benötigt. Sei es beim Waschen, Sterilisieren und auch für die Heiz- und Kühlkreisläufe ist Trinkwasser unverzichtbar. Der jährliche Verbrauch an Trinkwasser im Klinikum ist vom Jahr 2019 mit 72.612 m³ auf 61.579 m³ im Jahr 2021 gesunken. Auf vermeintliche Gründe den kontinuierlichen Rückgang wird zu einem späteren Zeitpunkt in diesem Kapitel eingegangen. Durch den Verbrauchsrückgang sind auch die Kosten für das Trinkwasser gesunken, welche sich aus Kosten für den Trinkwasserbezug, für das Abwasser und aus Bereitstellungskosten, welche monatlich zu zahlen sind, zusammensetzt. Die Kosten für das Jahr 2021 betrugen ca. 273.000 €, was 14% der Gesamtenergiekosten des Klinikums beträgt. Im Abbildung 14 wird das Wochenprofil der Trinkwasserverbräuche von jeweils einer Stunde der Kalenderwochen 3 und 26 aus dem Jahr 2021 dargestellt. In diesem lässt sich feststellen, dass die Verbrauchsverläufe der beiden Wochen näherungsweise identisch sind. Wie auch im Wochenverlauf der elektrischen

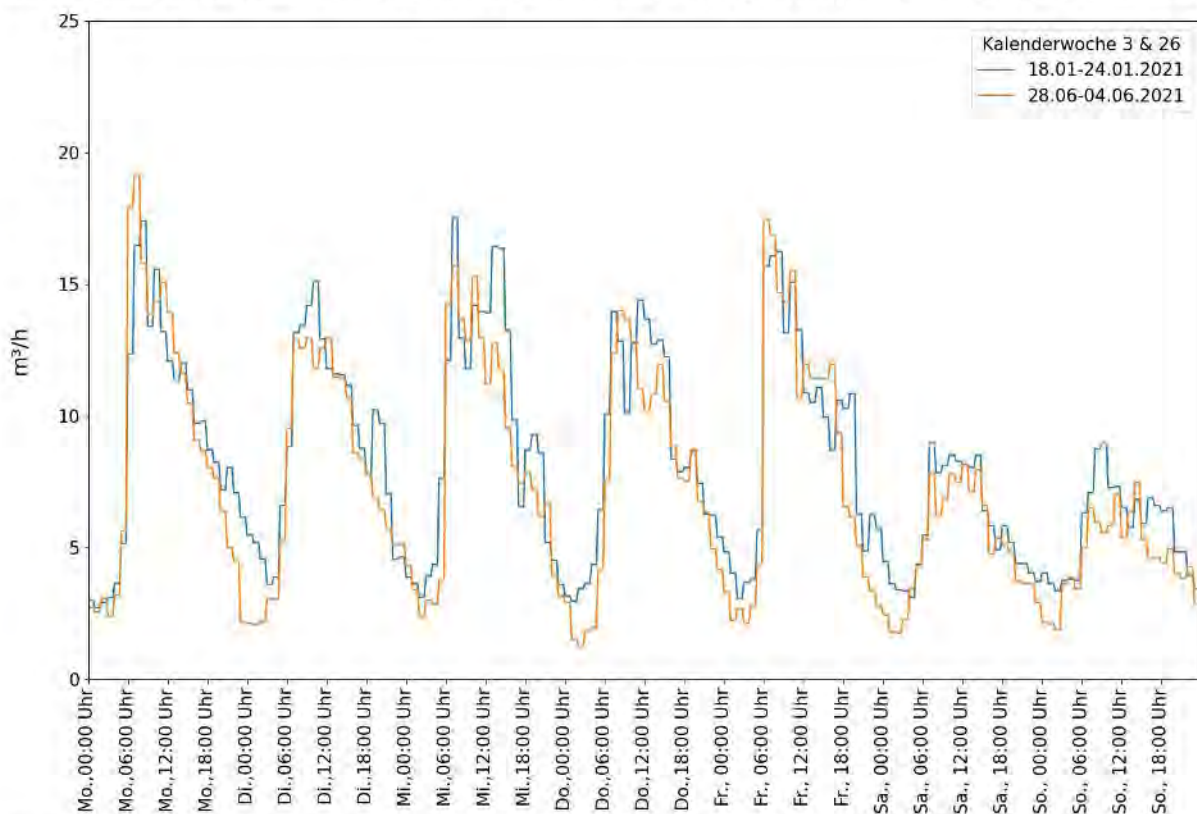


Abbildung 14: Vergleich des Trinkwasserverbrauchs pro Stunde des gesamten Klinikums der Kalenderwochen 3 und 26 im Jahr 2021

Leistung, unterscheiden sich die Wochenenden von den Wochentagen. So liegt der Verbrauch an den Wochentagen um 2 bis 3 m³ höher als an Wochenenden und Feiertagen. Unter den Wochentagen schwankt der Tagesmaximalverbrauch zwischen 3,2 und 4,8 m³/15min. Betrachte man den Grundbedarf, so erkennt man, dass der Grundbedarf im Sommer niedriger ist.

Energiekennzahlen:

Um den Jahrestrinkwasserbedarf in Bezug auf die Benchmarking Studie aus Kapitel 4.2 bewerten zu können, wird auch für dieses Medium die Kennzahl in Bezug auf die Planbettenzahl gebildet. Laut der Studie muss der Trinkwasserbedarf vom gesamten Verbrauch abgezogen werden. Da dieser nicht über Zähler bestimmt werden kann, wird der Trinkwasserverbrauch der Wäscherei über Kennwerte des Deutschen Textilreinigungs-Verbandes bestimmt. So nennt der Verband einen durchschnittlichen Wasserverbrauch von 7,36 Liter pro kg Krankenhauswäsche. Um die jährliche Wäschemenge zu bestimmen, wird der gemessene Strombedarf der Wäscherei durch den spezifischen elektrischen Energiebedarf von 0,13 kWh/kg, welcher auch vom Textilreinigungs-Verband genannt wird, geteilt. Im Anschluss kann auch der jährliche Wasserverbrauch berechnet werden [Tokos/Hilburger, 2016, S. 250].

$$m_{\text{Wäsche}} = \frac{W_{\text{el., Wäscherei}}}{w_{\text{el. pro Wäsche}}} = \frac{12.635 \text{ kWh}}{0,13 \frac{\text{kWh}}{\text{Kg}}} = 97.192 \text{ Kg} \quad (5-13)$$

$$V_{\text{Wasser}} = v_{\text{Wasser pro Wäsche}} * m_{\text{Wäsche}} = 7,36 \frac{\text{l}}{\text{kg}} * 97.192 \text{ Kg} = 715 \text{ m}^3$$

Falls diese Kennzahlen auch in Zukunft gebildet werden sollen, wäre es sinnvoll, einen separaten Wasserzähler für die Wäscherei anzubringen, um Ungenauigkeiten in der Rechnung zu beseitigen. Nun können die Energiekennzahlen der drei Jahre gebildet werden.

In Abbildung 15 sind diese EnPI über die Ampelbewertung, welche die Kennzahlen anhand des Mittel- und Richtwertes der Benchmarking Studie in der Versorgungsstufe IV bewertet, dargestellt.

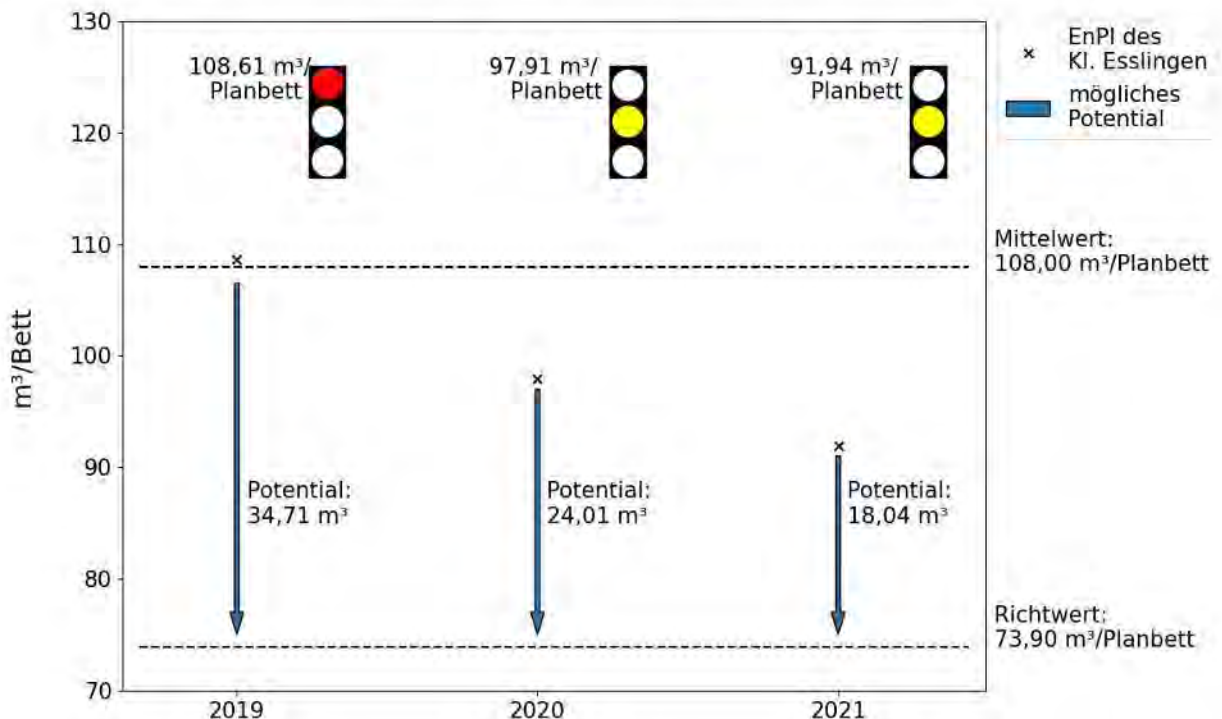


Abbildung 15: Wasserverbrauch pro Planbett (EnPI) der Jahre 2019-2021 des Klinikums bewertet (Ampelbewertung) nach dem Mittelwert und Richtwert der Studie „Energetischen Benchmarking für Krankenhäuser“, Versorgungsstufe IV (Quelle: [Tippkötter/Schüwer, 2010, S. 98], eigene Darstellung)

Anders als bei den Energieträgern Strom und Wärme, befinden sich nicht alle Kennzahlen in einem Bewertungsbereich. So ist der Trinkwasserverbrauch pro Planbett im Jahre 2019 knapp über den Mittelwert (Modalwert) der Studie. Durch den sinkenden Verbrauch wurde auch das möglichst zu erreichende Potential über die Jahre geringer. Durch die Tendenz der jährlichen Minderung des Wasserverbrauchs könnte man sich in ein paar Jahren im „grünen Bereich“ befinden. Die Studienwerte der Energiekennzahl pro Planbetten sind beim Trinkwasserverbrauch belastbarer als bei den anderen beiden Medien. Dies begründet sich darin, dass die Dienstleistungen und Bereiche, wie Küche, Cafeteria, Sterilisation, usw. in welchen der größte Wasserverbrauch herrscht, meist auch schon in der ersten Versorgungsstufe vorhanden sind. Des Weiteren dürften die wenigsten durchgeführten Effizienzmaßnahmen Einfluss auf den Trinkwasserverbrauch haben. Daher sind die recht alten Studienwerte aus dem Jahr 2008 noch verwendbar. Auch die Energiekennzahl, normiert auf die Nettogrundfläche (siehe Tabelle im Anhang), passen gut mit dem Mittelwert der Studie überein. So liegen die Kennzahlen des Klinikums in den Jahren 2019 und 2020 nur leicht über und 2021 genau auf diesem Orientierungswert. Ähnlich wie bei Strom und Wärme, sind die Kennzahlen bezogen auf die stationären Patientenzahl nur ungefähr halb so groß wie der Mittelwert. Dies ist aber auf die stark unterschiedliche Patientenzahl der Studie und des Klinikums zurückzuführen.

Vergleich des spezifischen Trinkwasserverbrauchs der einzelnen Häuser:

Um den Grund für den jährlichen Rückgang des Trinkwasserverbrauchs herauszufinden, wäre es hilfreich sich die Verbräuche der einzelnen Häuser genauer zu betrachten. Um die Verbräuche der Häuser vergleichen zu können, werden diese als Energiekennzahlen normiert auf die Nettogrundfläche in Abbildung 16 dargestellt.

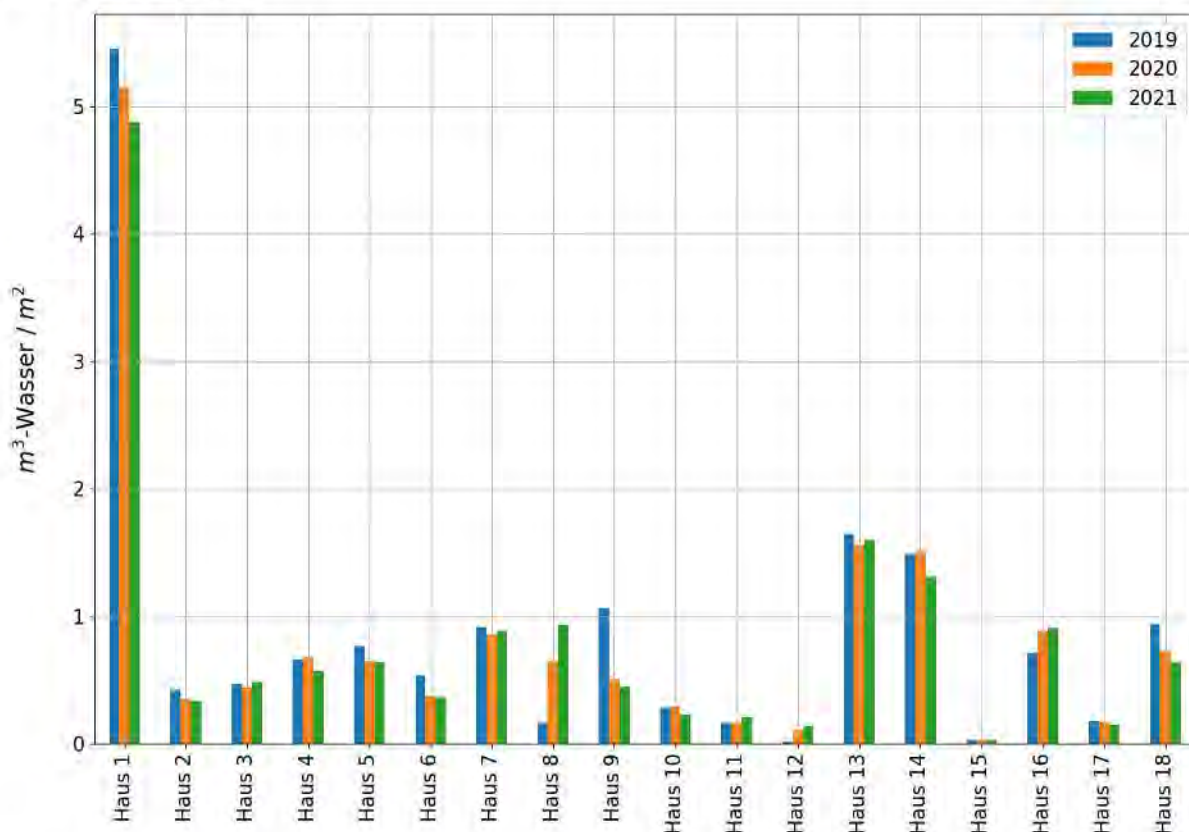


Abbildung 16: Vergleich der Kennzahlen der Jahrestrinkwasserverbräuche normiert auf die Nettogrundfläche der einzelnen Häuser des Klinikums

Der mit Abstand der größte Verbrauch pro m² ist im Haus 1. Dieses Gebäude besitzt rund 24% des Gesamtverbrauchs und besitzt mehr als den doppelten Wert als das Haus, welches den zweit höchsten Wert besitzt. Weder die letzten Energieberichte noch die vorhandene Zählerstruktur der Wasserzähler geben einen Aufschluss darüber, welche Verbraucher für diese hohen Kennzahlen verantwortlich sind.

Es ist lediglich ein Wasserzähler für die dortige Cafeteria verbaut, welcher mit nur jährlich $217,9\text{m}^3$ (Wert aus 2019) Wasserverbrauch und bezogen auf die NGF $0,07\text{m}^3\text{-W.}/\text{m}^2$ nur wenig Einfluss hat. Bei einer Begehung vor Ort konnte man einen Einblick in die dortige Gebäudeleittechnik (GLT) einer externen Firma bekommen, in welcher der Verbrauch von vollentsalztem (VE) und entsalztem (E) Wasser dokumentiert ist. Dabei muss beim VE-Wasser die elektrische Leitfähigkeit kleiner als $0,2\text{ }\mu\text{S}/\text{cm}$ sein, wohin die elektrische Leitfähigkeit des E-Wasser sich in einem großen Bereich ($0,2 \dots 1000\text{ }\mu\text{S}/\text{cm}$) liegen kann [EWT, 2018]. In der GLT sind nur Verbrauchswerte vorhanden, welche über die Jahre aufsummiert werden, weshalb der Verbrauch nicht genau zu bestimmen ist. In Abbildung 17 ist der Trinkwasserverbrauch des Hauses 1 in einem Sankey-Diagramm dargestellt. Demnach wird der Anteil für das VE-Wasser, welches über eine Osmoseanlage gewonnen wird, im Klinikum zur Sterilisation, in der Küche und für andere medizinische Dienstleistungen benötigt. Das E-Wasser wird in einer Umkehrosmoseanlage gewonnen, welches in der Cafeteria und deren Küche, Sterilisation, und in der Absorptionskältemaschine Anwendung findet. Der Anteil für die Absorptionskälte wird in Kapitel 5.2.6 anhand eines Richtwertes aus der Literatur berechnet. Ein weiterer Anteil des Trinkwasserverbrauchs in Haus 1 wird bei der Frischwasserstation zur Warmwasserherstellung benötigt.

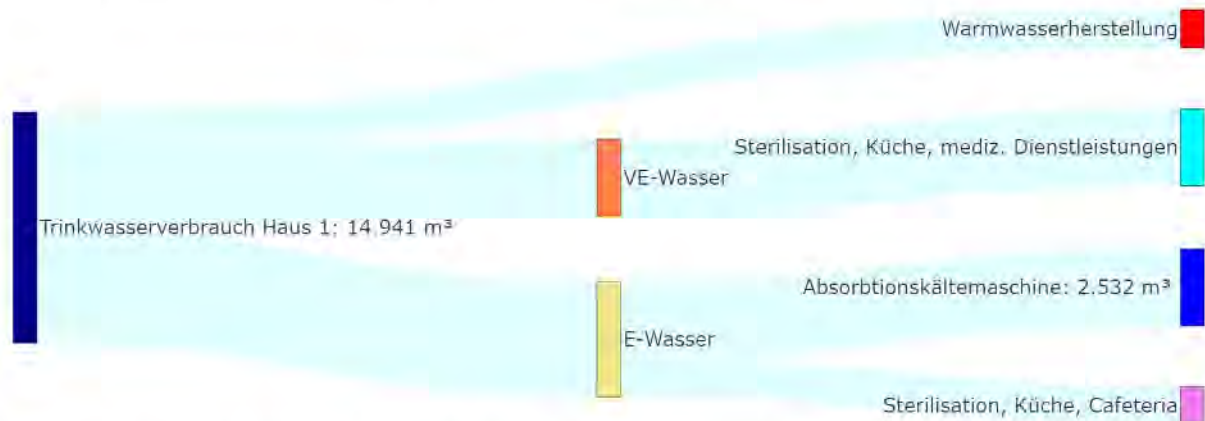


Abbildung 17: Sankey-Diagramm: Aufteilung des Trinkwasserverbrauchs des Haus 1 in verschiedenen Bereichen. Die Größen der einzelnen Anteile sind nicht belegt und wurden abgeschätzt.

Es wird empfohlen zu überprüfen, ob es möglich ist, die Zähler, welche in der GLT integriert sind, auch ins Energiemonitoring zu übertragen. So wäre es möglich, den Kaltwasserverbrauch im Haus 1 genauer zu bilanzieren, um dadurch eventuell Schwachstellen und Einsparpotentiale zu detektieren. Falls diese Zähler nicht integrierbar sind und die finanziellen Mittel für eine Nachrüstung nicht gewährt werden kann, so sollten die Verbräuche der einzelnen Wasserverbraucher im Haus 1 bilanziert und im Nachgang dokumentiert werden, damit die Verbräuche dem Kunden transparent dargestellt werden können. Es sollte außerdem dokumentiert sein, dass ein großer Teil des Wassers nicht im Haus 1 verbraucht wird, sondern als VE- und E-Wasser in anderen Gebäuden verbraucht wird. Nicht nur im Haus 1 ist der spezifische Jahrestrinkwasserverbrauch pro Fläche deutlich zurückgegangen, sondern auch im Haus 18 und im Haus 9. Bei letzterem fällt der extreme Rückgang nach dem Jahr 2019 auf. Schaut man sich den absoluten Verbrauch an, so erkennt man einen Rückgang von mehr als 9.000 m^3 zwischen den Jahren 2019 und 2020. Im Energiebericht von 2019 wird gezeigt, dass schon im Jahr 2018 der Wert nahezu so hoch war, wie im nachfolgenden Jahr. Betrachtet man den Jahresverlauf des Gebädezählers des ENTECTIV, so erkennt man, dass der Verbrauch in einem Sommerzeitraum um das Dreifache in den beiden Jahren angestiegen ist. In den darauffolgenden Jahren ist dies nicht der Fall gewesen, was den extremen Rückgang des Verbrauches erklärt. Im Energiebericht wurden keine Gründe, für den extremen Mehrverbrauch in den Jahren 2018 und 2019 genannt. Um ein Energiemonitoringsystem erfolgreich betreiben zu können, sollte, wie in Kapitel 2.4.6 bereits erwähnt jede Abweichung vom normalen Betriebsverhalten hinterfragt werden. Dazu sollten Schwellwerte zur Alarmierung im Monitoringsystem der einzelnen Zähler eingeführt werden. So können diese Abweichungen vom Betrieb erkannt werden. Ein Beispiel von Abweichungen, welche bei Wasserzähler sofort erkannt werden sollten, wäre ein Rohrbruch, bei welchem man einen plötzlichen Mehrverbrauch erkennen müsste. Wie

diese Schwellwerte gebildet werden, wird im späteren Kapitel 6.2 erläutert. Der Trinkwasserverbrauch wird in dieser Arbeit nicht tiefer analysiert, trotzdem wäre es sinnvoll für ein transparentes Energiemonitoringsystem die großen Verbraucher der einzelnen Zähler zu bilanzieren. So kann eingeschätzt werden, ob die Höhe des Verbrauchs angemessen ist, oder ob es gewisse Schwachstellen gibt.

5.2.6 Analyse des Gebäudes „Haus 4“

Wie bereits in den vorhergehenden Kapiteln erwähnt, besitzt das Haus 4 in allen Jahren den höchsten spezifischen Strom- und Wärmeverbrauch normiert auf die Nettogrundfläche. Desweiteren verbraucht das Haus im Jahre 2021 knapp 30 % des absoluten jährlichen Strom- und 18% des Wärmeverbrauchs. Trotz des signifikanten Verbrauchsanteils gibt es in der dritten Bilanzgrenze lediglich wenige Mieterstromzähler, welche nur wegen der Abrechnung der EEG-Umlage angebracht wurden. Die Wärme des Hauses wird in eine statische und eine dynamische Wärme unterteilt, welche jeweils einen Gebäudezähler besitzen. Beim Haus 4 handelt es sich um den Behandlungsbau, in welchem viele medizintechnische Dienstleistungen, wie MRT, CT, etc. untergebracht sind. Diese Bereiche besitzen viele medizintechnische Geräte, welche hohe elektrische Leistungen besitzen. Zudem werden dort auch hohe klimatische Ansprüche an die jeweiligen Räumlichkeiten gestellt, weshalb auch hohe Verbräuche zu erwarten sind. Um die tatsächlichen hohen Verbräuche des Hauses besser einordnen zu können und außerdem die Verbraucher zu detektieren, welche den größten Anteil am Gesamtverbrauches besitzen, wird in diesem Kapitel das Haus 4 energetisch unter die Lupe genommen.

Wärmeverbrauch:

Wie in Abbildung 13 bereits dargestellt, wird ein signifikanter Anstieg des jährlichen spezifischen Wärmeverbrauchs zwischen den Jahren 2019 und 2020 festgestellt. Dieser geringere Verbrauch im Jahre 2019, lässt sich wie bereits in Kapitel 5.2.4 auf einen Fehler bei der Datenerfassung des Zählers der statischen Wärme zurückführen. Für eine nähere Betrachtung des Wärmeverbrauchs des Hauses 4, bietet sich an, die einzelnen Jahre in einer Spektralanalyse zu untersuchen. Dabei werden alle aufgenommenen Verbrauchswerte (Auflösung von einer Stunde) in einem Jahr, nach deren Höhe farblich bewertet und in einer zeitlichen Reihenfolge in einer sogenannten Heatmap zusammengetragen. Die Daten eines Tages werden dabei vertikal von 0 – 24 Uhr, unten beginnend angeordnet. Die darauffolgenden Tage werden dann horizontal rechts davon abgebildet. So kann man den Verbrauch, sowohl abhängig nach einem bestimmten Datum, als auch nach einer bestimmten Uhrzeit betrachten. Der Vorteil dieser Darstellungsform ist, dass man einen schnellen Überblick über den Verbrauchsverlauf und gleichzeitig tages- und saisonale Auffälligkeiten erkennen kann. So erkennt man z.B., wenn eine Heizung auch nachts bei 100% der Gesamtleistung betrieben wird oder wie groß der Unterschied eines Verbrauches im Sommer zum Winter ist. Jedoch kann in dieser Darstellungsform keine genaue Höhe des jeweiligen Verbrauchs bestimmt werden. Im Energieportal des ENTECTIVs ist dies jedoch möglich und es könne gewisse Bereiche der Heatmap vergrößert darstellen werden, um diese genauer untersuchen zu können. In Abbildung 18 ist die Heatmap aus dem ENTECTIV für den kompletten Wärmeverbrauch (statischer und dynamischer Zähler) des Hauses 4 für das Jahr 2021 dargestellt.

Betrachtet man diese Heatmap so stellt man unmittelbar fest, dass der größte Verbrauch im Sommer anfällt. Außerdem erkennt man an den gelb und hellorangenen Farbpixeln, dass im Sommer teilweise sogar nachts hohe Wärmeverbräuche aufgetreten sind. Betrachtet man die anderen Jahre so unterscheiden sich diese grundsätzlich nur von der Höhe des Spitzenverbrauchs. Diese lässt sich 2019 durch den Zählerfehler des statischen Wärmebedarfs erklären. Bei der Heatmap kann man auch von Spitzenleistung sprechen, da jeder Verbrauchspixel in einer zeitlichen Auflösung von einer Stunde dargestellt wird. So liegt im Jahr 2021 die Spitzenleistung bei 606kW_{th} , und im Jahr 2019 bei 453kW_{th} . Bei der Betrachtung der Heatmap des statischen Zählers im Jahre 2021 kann man feststellen, dass dieser einen nahezu typischen Verlauf aufweist. So verteilt sich der Verbrauch auf die Heizgradtage, also im Winter und in Teilen des Frühjahrs und Herbst. Zusätzlich kann man die Tage erkennen, an welchen tagsüber vermeintlich über 15°C Außentemperatur herrschte und die Heizungen ausgeschaltet waren. Zu manchen dieser Zeiträume ging die Temperatur auf die Grundlast von ca. 17kW_{th} zurück. Diese Grundlast

lässt sich auf den Wärmeverbrauch für die Warmwasserbereitung zurückführen, welches man bei der Vor- Ort-Begehung für dieses Haus in einem Strangschemata erkennen konnte.

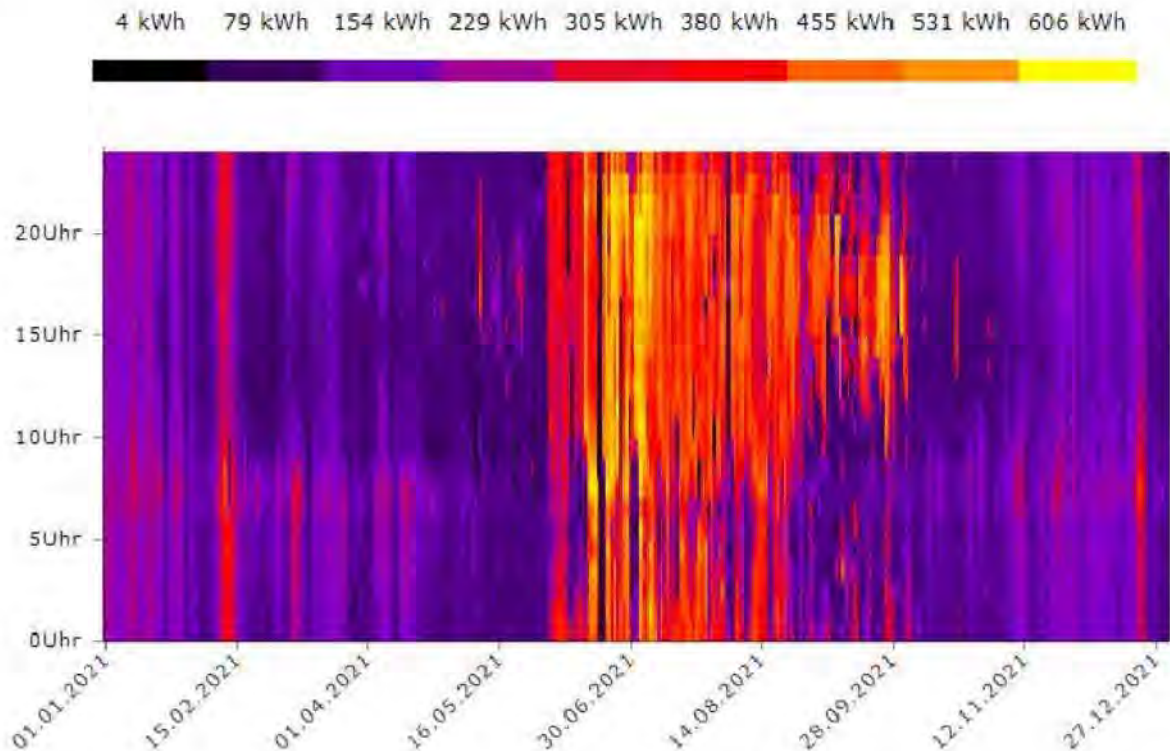


Abbildung 18: Heatmap des gesamten Wärmeverbrauchs des Hauses 4 für das Jahr 2021, stündliche Auflösung der jeweiligen Pixel (Quelle: [ENGIE Deutschland GmbH, 20.11.2017])

Da sich der hohe Verbrauch im Sommer nicht auf den Zähler der statischen Heizung zuordnen lässt und außerdem dieser auch untypisch für eine raumlufthtechnische Heizung ist, wurden die Vermutungen bei der Vor-Ort-Begehung bestätigt, dass der Wärmebedarf für zwei Absorptionskältemaschinen im Zähler „dynamische Wärme“ enthalten ist. Diese Kältemaschine wird in diesem Haus eingesetzt, um aus nicht genutzter Wärme, welche vom BHKW produziert wird, Kälte für die Klimatisierung zu erzeugen. So muss das BHKW im Sommer die Leistung nur bedingt zurückfahren und kommt daher auf eine hohe Vollbenutzungsstundenzahl, welche in Kapitel 5.2.2 beschrieben wurde.

Die beiden verwendeten Absorptionskältemaschinen des Hersteller Yazaki mit einer Kältenennleistung von 105 kW, funktionieren in einem Kältemittelkreislauf, welcher in vier Bereichen der Kältemaschine stattfindet. Dieser wird im nachfolgenden anhand den wesentlichen Funktionsschritten in Abbildung 19, in welcher der Kreislauf sowohl schematisch als auch in einem Phasendiagramm dargestellt ist, erklärt.

- **Verdampfer:**

Aufgrund des, durch den Absorber ausgeübten Einflusses, ist der Druck p_0 deutlich niedriger als der im Kondensator und Austreiber p_1 . Dadurch siedet die Kältemittelflüssigkeit, sobald diese in den Verdampfer eintritt und absorbiert dabei an den Rohrschlangen die Wärme \dot{Q}_0 (Kälteleistung am Verdampfer) bei Temperatur T_0 . In diesen Rohren befindet sich das zu kühlende Wasser, in welchen durch den Verdampfungsprozess die erzeugte Kälte der Kältemaschine entsteht. Der bei der Absorption entstandene Kältemitteldampf strömt in den Absorber.

- **Absorber:**

Im Absorber wird der Kältemitteldampf von einer hygroskopischen Salzlösung, eine Lösung die gerne Feuchtigkeit aus der Umgebung bindet (hier Lithiumbromid -Lösung), bei einer Temperatur T_1 absorbiert. Dabei kommt diese starke Salzlösung aus dem Generator (Austreiber). Die

absorbierte, mit Kältemittel verdünnte schwache Lösung, wird über eine Lösungsmittelpumpe zum Austreiber gepumpt. Zudem wird die schwache Lösung, bevor diese an den Austreiber gelangt, in einem Wärmetauscher vorgewärmt. Die im Absorber freigewordene Wärme \dot{Q}_A wird über das Kühlwasser entzogen. Dieses befindet sich in einen Rückkühlkreislauf, in welchem die Wärme an die Umgebung abgegeben wird.

- **Austreiber (Generator):**

Über das Heizwasser (Antriebswärme \dot{Q}_G), welches den Wärmeverbrauch der Absorptionskältemaschine darstellt, erhitzt sich die in dem Austreiber ankommende schwache Lösung bis auf den Siedepunkt, bei einer Temperatur T_2 und Druck p_1 des Kältemittels. Der Anteil der starken Salzlösung siedet aufgrund des höheren Siedepunktes nicht und wird daher vom Klärmittel getrennt. Die starke Lösung kehrt zum Absorber zurück und wird am Wärmetauscher vorgekühlt. Der Kältemitteldampf gelangt nun in den Kondensator.

- **Kondensator:**

Der Kältemitteldampf kondensiert an den Kühlkreisschlangen, dabei wird dem Kältemittel die Wärme bei einer Temperatur T_1 entzogen, welche über dem gleichen Rückkühlkreislauf wie bei dem Absorber die Kondensationswärme \dot{Q}_K an die Umgebung abgibt. Die Kälteflüssigkeit gelangt nun wieder durch eine Öffnung zum Verdampfer und der Kältekreislauf ist dadurch geschlossen.

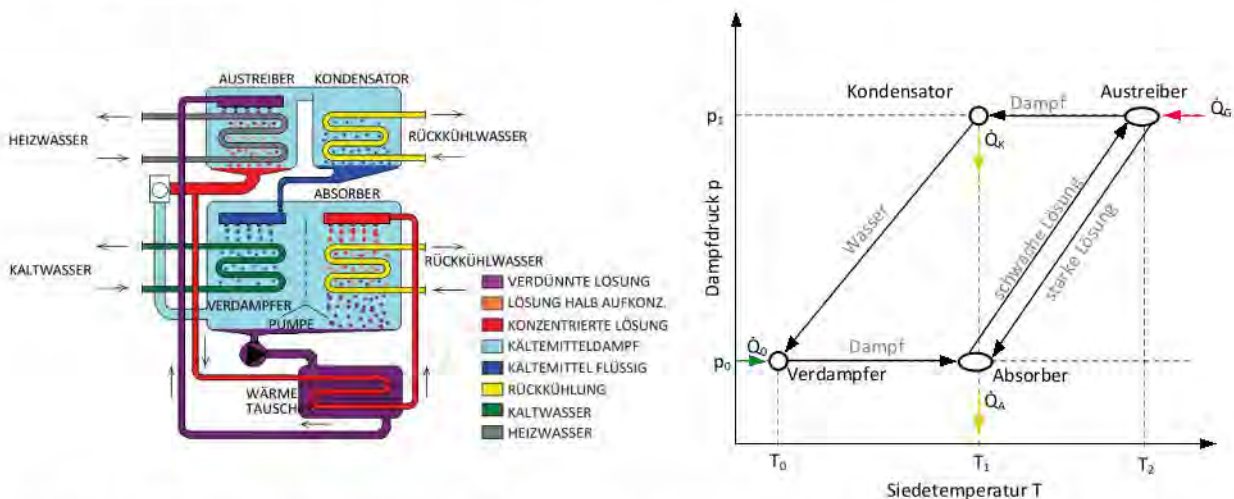


Abbildung 19: Absorptionskältekreislauf in einer YAZAKI-Kältemaschine (links) (Quelle: [Maya, 2020, S. 3]), p-T-Phasendiagramm des Absorptionskältekreislaufs untergliedert in die jeweiligen Bereiche. (Quelle: [Plura, 2008, S. 23], eigene Darstellung)

Laut dem Datenblatt des Herstellers sind folgende nominale Temperaturwerte angegeben: $T_0 = 7^\circ\text{C}$, $T_1 = 31^\circ\text{C}$, $T_2 = 88^\circ\text{C}$. In den Datenblätter dieser Kältemaschinen ist immer zusätzlich zur Kälte- und Antriebsleistung die Rückkühlleistung aufgeführt, welche beschreibt, wie viel Wärmeenergie pro Zeiteinheit im Rückkühlkreislauf an die Umgebung abgeführt wird. Da in einem geschlossenen Kreislauf die Wärme, welche eingebracht wird, auch wieder abgeführt werden muss ergibt sich folgende Energiebilanz [Plura, 2008, S. 21 ff.].

$$\dot{Q}_G + \dot{Q}_0 + P_{LP} = \dot{Q}_K + \dot{Q}_A + \dot{Q}_{\text{Verluste}} \quad (5-14)$$

P_{LP} ist die elektrische Leistung der Lösungsmittelpumpe, welche mit $0,31 \text{ kW}_{\text{el}}$ vernachlässigbar gering ist. Die Rückkühlleistung entspricht daher der Kondensationswärme im Kondensator \dot{Q}_K und Absorber \dot{Q}_A [Maya, 2020, S. 3 ff.].

Bei der Begehung konnte herausgefunden werden, dass Wärme- und Kältemengenzähler (WMZ und KMZ) vorhanden sind, welche in der GLT einer externen Firma integriert sind. Von einem Mitarbeiter des Klinikums konnte man so gezielt die monatlichen Verbräuche der betrachteten Jahre für diesen

Zähler anfragen. Allerdings beinhaltet der KMZ die ganze erzeugte Kälte, welche auch die der Kompressionskältemaschinen umfasst. Um die in Kapitel 5.2.4 beschriebene Witterungsbereinigung durchführen zu können, muss die über den WMZ gemessene jährliche Wärmemenge für die Absorptionskältemaschine auf die jährlichen Betriebszeitpunkte verteilt werden. So kann dieser Jahresverlauf des Gesamtwärmeverbrauchs abgezogen werden. Die Betriebszeiten konnten mit dem vorhandenen Stromzähler, der den Verbrauch der Lösungsmittelpumpe im ENTECTIV erfasst, bestimmt werden. Dieser ist ein Mieterzähler, welcher wegen der Abrechnung der EEG-Umlage angebracht wurde. Mit der jeweiligen Heizleistung der beiden baugleichen Kältemaschinen (je $\dot{Q}_G = \dot{Q}_{\text{Heiz}} = 151,2 \text{ kW}_{\text{th}}$) wurde so der Jahresverlauf der Wärme für Absorptionskältemaschine näherungsweise bestimmt. Damit auch die monatlichen Verbräuche mit denen des Wärmemengenzählers übereinstimmt, wurden diese abgeglichen. In Abbildung 20 wird der Wärmeverbrauch pro Tag des Zählers „dynamische Wärme Haus 4“ aufgeteilt in die Heizenergie für die Absorptionskälte (blau) und Wärme für die eigentliche dynamische Wärme (orange) für das Jahr 2021 dargestellt.

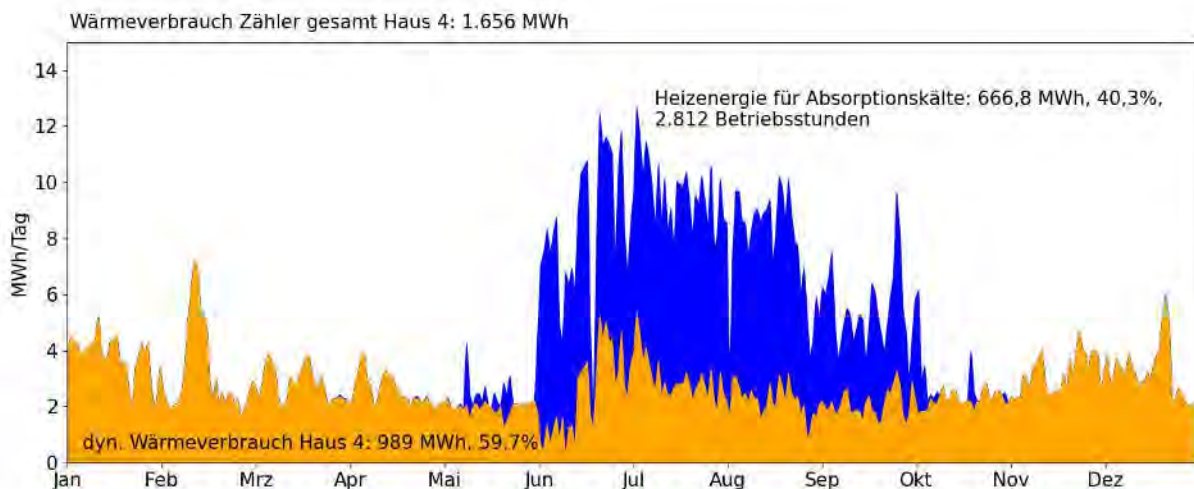


Abbildung 20: Jahresverlauf des Wärmeverbrauchs pro Tag [MWh/Tag] des Zählers „dynamische Wärme Haus 4“ (blau + orange) aufgeteilt in Heizenergie für die Absorptionskälte (blau) und dynamische Wärme (orange) für das Jahr 2021

Anhand der Aufteilung der beiden Wärmeverbräuche kann man erkennen, dass sich die hohen Peaks, welche in der Heatmap (Abbildung 18) an gelb und hellorange Pixel erkennbar sind, sich auf die Wärme für die Absorptionskältemaschine zurückführen lassen. Betrachtet man nur die dynamische Wärme so ist zu erkennen, dass sich trotz des Abzugs der Heizenergie für die Absorptionskälte, ein gleichbleibender Verbrauchsverlauf des Jahres 2021 für die Beheizung der Räumlichkeiten über raumlufttechnischen Anlagen abzeichnet. Auch hier wäre, analog zur statischen Heizung zu erwarten gewesen, dass in den Sommermonaten nahezu kein Verbrauch vorliegt. Bei der Vor-Ort-Begehung konnte man sich einen Einblick über das Lüftungsschema verschaffen, in welchem außer den beiden großen Hauptgeräten, welche jeweils eine Zu- und Abluftanlage umfassen, außerdem noch acht Nachbehandlungseinrichtungen enthält. In vier von diesen Einrichtungen handelt es sich um Dampfluftbefeuchter, welche VE-Wasser bei 100°C verdampfen. Bei dieser Art der Luftbefeuchtung handelt es sich um die hygienischste Art der Luftbefeuchtung, was in einigen Bereichen der Behandlungen im Krankenhaus äußerst wichtig ist [NOVA]. Im Bereich MRT benötigt man im Untersuchungsbereich eine Luftfeuchtigkeit über 50%, damit keine elektrostatischen Felder mit anschließender Entladung entstehen, welche Artefakte zu Folgen haben. Artefakte sind Fehler bei den MRT-Aufnahmen, welche nicht der Realität entsprechen. In weiteren Nachbehandlungseinheiten sind noch Heizgeräte verbaut, welche ebenfalls Wärme benötigen [Nitz, 2012, S. 134].

Ob diese Nachbereitungsanlagen den hohen Verbrauch im Sommer vollständig erklären, sollte geprüft werden. Desweiteren sollte versucht werden, den Wärmemengenzähler in das ENTECTIV zu übernehmen, sodass die Wärme für die Absorptionskältemaschine genau zu jedem Zeitpunkt zu bestimmen ist. Dadurch ist es außerdem möglich, die dynamische Wärme losgelöst von dem Wärmeverbrauch zu betrachten. Außerdem wäre es sinnvoll die Kältemenge zu bestimmen, um so die tatsächlichen COP

(Coefficient of Performance) und somit auch die Effizienz der Kältemaschine bestimmen zu können. In der Literatur wird anders als im Datenblatt, die Effizienz von Absorptionskältemaschinen durch das Wärmeverhältnis ζ angeben. Aufgrund der unterschiedlichen Energieformen, welche ungleiche Wertigkeiten besitzen, macht ein Vergleich der Effizienz einer Kompressionskältemaschine nur wenig Sinn. Die Effizienzkennzahl dieser Kältemaschinen, bei welchen der Aufwand die elektrische Leistung ist, wird über den EER (Energy Efficiency Ratio) angegeben [Schmidt u. a., 2020, S. 5].

$$\zeta_{\text{Absorptionk.}} = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Aufwand}} = \frac{\text{Nutzkälte}}{\text{Antreibswärme}} = \frac{\dot{Q}_0}{\dot{Q}_G} \quad (5-15)$$

$$\text{EER}_{\text{Kompressionsk.}} = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Aufwand}} = \frac{\text{Nutzkälte}}{\text{elektrische Leistung}} = \frac{\dot{Q}_0}{P_{el}}$$

Die beiden Kältemaschinenarten könnten jedoch wirtschaftlich gegenübergestellt werden. Dabei werden jeweils die Energiekosten der Energieträger, welche den energetischen Aufwand darstellen und die jährlichen Wartungskosten gegenübergestellt. Bei der Absorptionskältemaschine ist der Hauptenergieinput die Wärme und zusätzlich wird für den Betrieb des Absorbers noch elektrische Energie benötigt. Bei der Kompressionskältemaschine ist der Energieträger Strom. Bei den Kosten ist zu berücksichtigen, dass die Wärme für die Absorptionskälte vollständig und der Strom mindestens in gewissen Anteilen vom BHKW zur Verfügung gestellt wurde. Ein weiterer Kostenpunkt, welcher bei der Absorptionskältemaschine hinzukommt, ist der Verbrauch von entsalztem Wasser, welcher für den Rückkühlkreislauf benötigt wird [EAW, 2014]. Dieser spezielle Wasserbedarf wird im Haus 1 durch eine Umkehrosmoseanlage bereitgestellt (vgl. Abbildung 17). Im Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik wird pro 1 kW Kälteleistung einen Frischwasserbedarf von 6 kg/h genannt, welcher dem Rückkühlkreislauf zugeführt werden muss. Dieser Bedarf setzt sich aus dem verdunsteten Wasser, den Spritzwasserverlusten und den Verlust zur Verhinderung einer Salzanreicherung im Kühlturm, zusammen [Recknagel u. a., 2020, S. 2405]. Für die Absorptionskältemaschine würden sich für das Jahr 2021 folgende Wasserkosten ergeben. Dichte des Wassers wird als $\rho_w = 1.000 \text{ kg/m}^3$ angenommen und der Frischwasserbedarf bezieht sich auf die thermischen Vollbenutzungsstunden, welche sich aus dem Quotienten aus der benötigten Antriebswärme und der Heizleistung der beiden Absorptionskältemaschinen zusammensetzt. Die Kosten für Frisch- und Abwasser wurden aus der Tabelle im Anhang entnommen.

$$\text{Vollbenutzungsstunden Absorptionskälte: } Vbh_{th} = \frac{Q_G}{\dot{Q}_G} = \frac{666,8 \text{ MWh}}{2 * 151,2 \text{ kW}} = 2006 \text{ h} \quad (5-16)$$

$$Q_{FW, ges. 2021} = \frac{\dot{m}_{FW}}{\rho_{FW}} * \dot{Q}_0 * Vbh_{th} = \frac{6 \frac{\text{kg}}{\text{h}}}{1.000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} * 2 * 105,2 \text{ kW} * 2006 \text{ h} = 2.532 \text{ m}^3$$

$$K_{FW, gesamt} = Q_{FW, ges. 2021} * \frac{K_{FW} + K_{AW}}{m_{FW}} = 2.532 \text{ m}^3 * \left(2,15 \frac{\text{€}}{\text{m}^3} + 2,19 \frac{\text{€}}{\text{m}^3} \right) = 10.990 \text{ €}$$

Bei dieser Rechnung wurden die Stromkosten für die Aufbereitung des E-Wassers und die anteiligen Wasserbereitstellungskosten nicht berücksichtigt. Diese berechneten Wasserkosten fallen bei einer Kompressionskältemaschine nicht an. Daher ist es wichtig diese Kosten bei einer Gegenüberstellung der beiden Kältemaschinen mit einzukalkulieren.

Abschließend kann man anmerken, dass sich der höchste spezifische Wärmeverbrauch im Klinikum auf einer Seite aufgrund der hohen medizinischen Anforderungen, wie Nachbereitungsanlagen der Raumluftechnik, erklären lässt. Auf der anderen Seite gehört der Wärmeverbrauch für die Absorptionskältemaschine nicht zum Wärmebedarf des Klinikums, sondern nutzt nur überschüssige Wärme, um daraus Kälte zu generieren, was in der Regel mit hohen energetischen Verlusten zusammenhängt. Zieht man diesen Verbrauch von dem Gesamtwärmeverbrauch ab, so ist der spezifische Verbrauch im Jahre 2021 leicht geringer als der in Haus 13 (siehe Abbildung im Anhang). Wie auch in anderen Häusern lässt die Zählerstruktur keine genaue Betrachtung der Großverbraucher zu. So konnten keine Anlagenkennzahlen gebildet werden und dadurch sind mögliche Einsparpotentiale nicht

messbar. Nach aktuellem Stand können wärmeseitig im Haus 4, nur durch eine örtliche Begehung und durch die genaue Inspektion der jeweiligen versorgungstechnischen Anlagen, Potentiale für Energieeinsparmaßnahmen gefunden werden.

Um bei gemessenen Mehrverbräuchen Ursachen eingrenzen zu können, ist es sinnvoll die jeweiligen Großverbraucher in einem Sankey-Diagramm darzustellen. In diesem erhält man einen schnellen Überblick über die Energieflüsse und deren prozentualen Anteil am Gesamtverbrauch, was man an der Breite der jeweiligen Flüsse erkennen kann. In Abbildung 21 ist ein solches Diagramm für den Jahreswärmeverbrauch des Jahres 2021 für das Haus 4 dargestellt. Der jährliche Verbrauch für das Warmwasser wurde nach der oben genannten Grundlast von 17 kW_{th} bestimmt. Das Diagramm könnte auch noch erweitert werden, indem man den Anteiligen Verbrauch der Zu- und Abluft sowie der Nachbereitungseinrichtungen bestimmt und in das Diagramm integriert. Ein Drittel des Wärmeverbrauchs lässt sich auf die Heizenergie für die Absorptionskältemaschine zurückführen, was das Argument eines separaten Zählers für die Kältenutzung im ENTECTIV einzubinden, nochmals verstärkt.

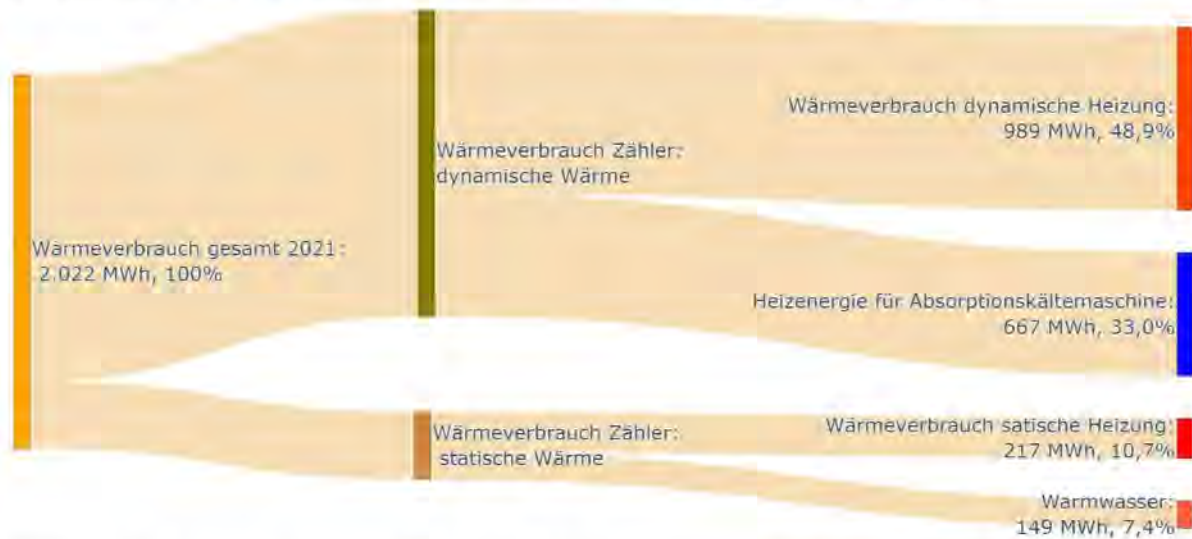


Abbildung 21: Sankey-Diagramm: Aufteilung des Jahreswärmeverbrauchs des Haus 4 für das Jahr 2021

In das Sankey-Diagramm, welches im Python Package Plotly erstellt wurde, könnte man die beiden vorhandenen Zähler und ggf. der WMZ der Absorptionskälte, über den SQL-Server des ENTECTIVS einbinden. So könnte dies dauerhaft abgerufen werden und den Verbrauch in verschiedenen zeitlichen Auflösungen anzeigen. Wärmeverbräuche, welche keinen Zähler besitzen, muss man über die gemessenen Verbrauchswerte vorhandener Zähler berechnet werden.

Stromverbrauch:

Wie bereits bei der Analyse des Gesamtstromverbrauchs des Klinikums beschrieben, besitzt das Haus 4 den höchsten spezifischen Stromverbrauch, welcher um ca. 100 kWh/m² höher ist, als das Haus mit dem nächstgrößten spezifischen Verbrauch. Die vorhandenen Zähler der dritten Bilanzgrenze, wie für MRT und CT sind Mietzähler, welche wegen der EEG-Umlage installiert wurden. Bei den beiden Mietzählern wird nur der Verbrauch, der in den Bereichen gemessen wird, gezählt. Die beiden Zähler inklusive der Messeinrichtung, welche den Stromverbrauch für die Absorptionskältemaschine misst, betragen im Jahr 2021 nur 7,5% des gesamten Stromverbrauchs des Gebäudes. Daher kann man keine Aussagen über die Effizienz des Hauses treffen. Jedoch lassen sich erste Aussagen bei dem Blick auf die Heatmap des Stromverbrauchs treffen, welche in Abbildung 22 dargestellt ist. Um diesen Verbrauch zuordnen zu können, wurde bei einer Vor-Ort-Begehung die SEU aufgenommen.

Die elektrische Grundlast des Hauses ist außer wenigen Ausnahmen ganzjährig gleich bei ca. 154 kW_{el}. Zu der Grundlast wird voraussichtlich der Stromverbrauch von den Lüftungsanlagen, welche be-

reits bei der Analyse der Wärme beschrieben wurde, in einer geringen Auslastung dazugezählt. Außerdem kann man aus dem Kältemengenzähler (misst die gesamte erzeugte Kälte) erkennen, dass die vier Kompressionskältemaschinen mit jeweils 36 kW_{el.} bereits im Januar 43,3 MWh Kälte erzeugt haben. Dieser Verbrauch ist in allen Wintermonaten der drei Jahre näherungsweise identisch. Dies kann genau bestimmt werden, da im Januar die Absorptionskältemaschinen keine Betriebszeiten hatten. Laut Typenschild besitzen die Kompressionskältemaschinen eine Kälteleistung von jeweils 100 kW, was nach Formel (5-15) einen optimalen $EER_{\text{Kompressionsk.}} = 2,78$ ergibt. Dadurch kann der elektrische Verbrauch im Januar berechnet werden.

$$W = \frac{Q_0}{EER_{\text{Kompressionsk.}}} = \frac{43,3 \text{ MWh}}{2,78} = 17,7 \text{ MWh} \quad (5-17)$$

Dieser Kältebedarf im Januar lässt sich auf die Kühlung des Magnetresonanztomographen zurückführen. In dieser medizintechnischen Anlage werden starke Magnetfelder, welche eine Flussdichte von bis zu 3 Tesla besitzen, erzeugt. Im Vergleich: das Erdmagnetfeld besitzt ca. 20 μT. Um ein solch hohes Magnetfeld zu erzeugen, muss der hohe Strom widerstandsfrei fließen können. Dieser benötigte Supraleiter lässt sich nur bei besonders niedrigen Temperaturen, über verflüssigtes Helium (ca. -268°C) entstehen. Damit das Helium, welches die Wärme der Spulen aufnimmt, nicht siedet, wird diese thermische Energie von der Kältemaschine aufgenommen. Daher ist die Kältemaschine für den sicheren Betrieb des MRTs unverzichtbar. Auch bei den CT-Anlagen wird eine Kühlung ähnlich wie beim MRT benötigt. Aufgrund der Versorgungssicherheit, wurden voraussichtlich vier separate Kältemaschinen installiert, damit beim Ausfall einer Kältemaschine das Helium der MRT-Anlage nicht siedet [Bode, 2021].

In der Heatmap (vgl. Abbildung 22) kann man sehr gut die einzelnen Wochen erkennen (siehe grüner Bereich). Wie auch schon beim Stromverbrauch des gesamten Klinikums, erkennt man Unterschiede zwischen den Werktagen und den Wochenenden. So beginnt ein Wochentag um ca. 06:00 Uhr auf die tägliche Leistung anzusteigen und geht um ca. 21:00 Uhr auf die Grundlast zurück. Anhand diesem strikt gleichbleibenden Tagesverlaufs kann man die Zeitsteuerung durch die GLT gut erkennen, welche die Auslastung von den Ventilatoren der Lüftungsanlagen (jeweils zwei Zu- und Abluftanlagen, sowie die Nachbehandlungseinheiten) steuern. An Wochenenden und Feiertagen haben die medizinischen

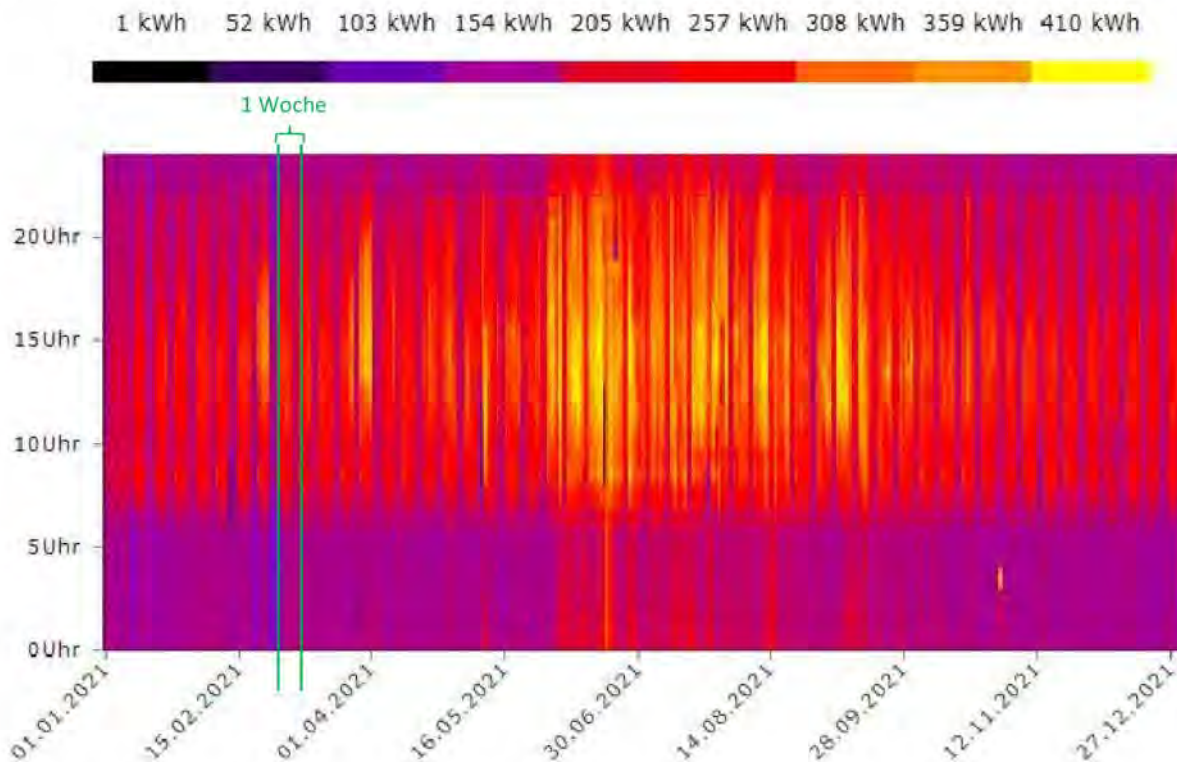


Abbildung 22: Heatmap des gesamten Stromverbrauchs des Hauses 4 für das Jahr 2021, stündliche Auflösung der jeweiligen Pixel (Quelle: [ENGIE Deutschland GmbH, 20.11.2017])

Dienstleistungen nicht geöffnet. An diesen Tagen entspricht der Stromverbrauch näherungsweise der Grundlast, da die Lüftungsanlagen aufgrund der Zeitsteuerung nicht hochfahren. In den heißeren Tagen erkennt man, dass die Kältemaschinen nicht nur zur Kühlung der medizinischen Geräte, sondern zur Klimatisierung des Hauses 4 verwendet werden. Dies kann man an den hellroten Bereichen nachts und an den vereinzelt gelben Pixeln nachts erkennen. Die beschriebenen Aussagen spiegeln jedoch nur den vermuteten Verbrauchsverlauf wider und sollten außerdem die Aussagekraft dieser Heatmaps zeigen. Aber es gibt noch weitere elektrischen Verbraucher, wie z.B. Beleuchtung, mehrere medizintechnische Geräte, etc., welche zu der jährlich verbrauchten Strommenge beitragen. Um den Verbrauch daher quantifiziert zu betrachten und Einsparpotentiale finden zu können, müssten Zähler an den Großverbraucher, wie den Lüftungsanlagen und den vier Kältemaschinen nachgerüstet werden. Speziell die Kältemaschinen, welche im Jahr 1997 gebaut wurden und dadurch schon ca. 25 Jahre in Betrieb sind, sollten nach deren Effizienz überprüft werden. Dabei sollte die erzeugte Kältemenge und der Stromverbrauch gemessen und der tatsächlichen EER der Kompressionskälte als Kennzahl zur Effizienz gebildet werden. Bei der Messung der Kältemaschine würde sich eine mobile, nicht permanente Messmethode anbieten. So müssen an den Anlagen, welche ausgetauscht werden müssen, keine neuen kostspieligen Zähler installiert werden.

5.2.7 Analyse von Lastprofilen unterschiedlicher Nutzungszonen

Als Lastprofil bezeichnet man in der Energieversorgung den zeitlichen Verlauf einer energetischen Leistung in einem bestimmten Intervall. Typischerweise werden die Lastprofile tages-, wochen- sowie jahresweise betrachtet. Meist besitzen diese Profile tageszeitliche Schwankungen, welche oftmals vom Wochentag oder von saisonalen Effekten abhängen. Solche Lastverläufe werden zum Beispiel auch bei der Stromnetzplanung benötigt. So müssen bei auftretenden Lastspitzen, flexible Kraftwerke zur Spitzenlastabdeckung, welche in wenigen Minuten betriebsbereit sind, zugeschaltet werden. Aber auch bei modernen Energiemonitoringsystemen finden Lastprofile Anwendung [Schellong, 2016, S. 375].

Wie in den vorherigen Kapiteln bereits öfters beschrieben, gibt es in der dritten Bilanzgrenze oft nur wenig Zähler. Nur im Haus 9 besitzen Großverbraucher, wie Lüftungs- und Kälteanlagen separate Zähler, mit welchen die Effizienz der Anlagen überprüft werden können. Jedoch können bei der Untersuchung von Lastprofilen mehrerer Zähler der gleichen Nutzungszone, Abweichungen erkannt werden, aus denen Einsparpotentiale resultieren können. Aber auch durch die Betrachtung einzelner Profile kann man Auffälligkeiten, z.B. beim Vergleich verschiedener Tagesprofile detektieren. Anhand diesen gewonnen Erkenntnissen, kann man anschließend bei einer Vor-Ort-Analyse, die Ineffizienzen in diesen Bereichen herausfinden, welchen man durch Effizienzmaßnahmen beheben kann. Lastprofile können auch genutzt werden, um diese in anderen Liegenschaften derselben Branche zu bilden, damit diese miteinander verglichen werden können. So könnte bei mehreren Lastprofilen derselben Nutzungszonen, welche in unterschiedlichen Krankenhäusern erstellt werden, in einem Benchmarking zusammengetragen werden. Dabei kann auch der „Best-in-class-Standard“ herausgefunden und Lastprofile anderer Liegenschaften nach auf deren Effizienz überprüft werden. Wie Lastprofile untersucht werden, und wie Einsparpotentiale in diesen zeitlichen Verläufen entdeckt werden, wird in diesem Kapitel am Beispiel des Stromlastgangs der Bettenhäuser im Klinikum erklärt. Weitere typische Nutzungszonen eines Krankenhauses sind Intensivstation, Verwaltungsbau, Küche, etc.

Stromlastprofil Bettenhaus:

Bettenhäuser sind die Nutzungszone, in welchen sich die stationären Krankenbetten befinden. Diese sind im Klinikum meist in 2- und 3-Bett-Zimmern aufgeteilt, in welchen sich jeweils eine Nasszelle (Toilette und Dusche) befindet. Des Weiteren gehören zu dieser Zone Aufenthaltsräume, sowie Büros für Mitarbeiter und Ärzte, kleine Behandlungsräume, weitere Sanitärräume und Technikräume. Im Klinikum gibt es 5 Häuser in welchen, diese Nutzungszone eines Bettenhauses vorhanden ist. Schaut man sich die spezifischen Verbräuche pro Nettogrundfläche eines Bettenhauses an, so erkennt man am Beispiel des Hauses 5 (reines Bettenhaus), dass diese Häuser einen recht geringen Stromverbrauch besitzen. Trotzdem kann man daraus nicht schlussfolgern, dass keine Einsparpotentiale vorhanden

sind. Außerdem ist das Bettenhaus die zentrale Nutzungszone, welche in allen Versorgungsstufen in Krankenhäusern vorhanden ist. Das Haus 3, in welchem sich ebenfalls stationäre Betten befinden, kann bei der Bildung des Lastprofils nicht mitbetrachtet werden. In diesem Gebäude liegt eine Mischnutzung vor. So gibt es mehrere medizinische Dienstleistungen mit Mieterzähler, welche vom Gesamtverbrauch abgrenzbar sind. Aber der Verbrauch der raumluft-, und die kältetechnischen Anlagen ist in diesen Zählern nicht enthalten. Anders ist dies bei Haus 7, dessen Bettenhaus (Haus 7.1- Pavillion) einen separaten Gebäudezähler besitzt.

Zu Beginn wurden die einzelnen Stromlastprofile der Bettenhäuser nach einem bestimmten, wiederkehrenden Muster im Jahr untersucht. Dabei konnte man feststellen, dass alle Bettenhäuser ein näherungsweise gleichbleibendes Wochenlastprofil besitzen. So ist die Grundlast, welche jeweils in allen Bettenhäusern nachts auftritt, gleich ist. Die Tagesspitzen der einzelnen Wochentage sich grundsätzlich an Wochentagen und Wochenenden (inklusive Feiertage) unterschiedlich. Daher hat man sich für die Betrachtung eines Stromlastprofils während einer Woche entschieden. Um die Lastprofile der ausgewählten Bettenhäuser vergleichen zu können, müssen die Leistungen, welche in einer zeitlichen Auflösung von 15 Minuten aufgetragen wurden, spezifisch betrachtet werden. Beim Stromverbrauch des gesamten Klinikums hat man als aussagekräftigste Kennzahl, den Verbrauch normiert auf die Nettogrundfläche festgelegt. Da in der Nutzungszone Bettenhäuser das vorrangige Ziel ist, die medizinische Versorgung und Betreuung von stationären Patienten zu gewährleisten, bietet es sich an, die spezifische Kennzahl normiert auf die Planbetten- oder Patientenzahl zu bilden. Da es keine genaue Aufzeichnung der durchschnittlich stationären Patienten gibt, werden die Lastprofile der einzelnen Häuser normiert auf die Planbettenzahl verglichen. In Abbildung 23 sind die einzelnen bettspezifischen Lastprofile, der jeweiligen Bettenhäuser in der Kalenderwoche 26 im Jahr 2021 (28.06.-04.07.2021) aufgetragen. Die jeweilige Planbettenzahl der einzelnen Häuser wird aus der Gebäudeübersicht im Anhang entnommen. Man erkennt, dass die spezifischen Lastprofile der Bettenhäuser West, Ost und das Pavillon sehr nahe beieinander liegen. Der Pavillon fällt trotzdem mit seinen hohen Peaks auf, welche direkt nach der Nachtabenkung auftreten. Bei dieser Absenkung wird die Leistung der Ventilatoren, welche in der Lüftungsanlagen verbaut sind, zurückgefahren. Dieser Peak nach der Nachtabenkung, lässt sich

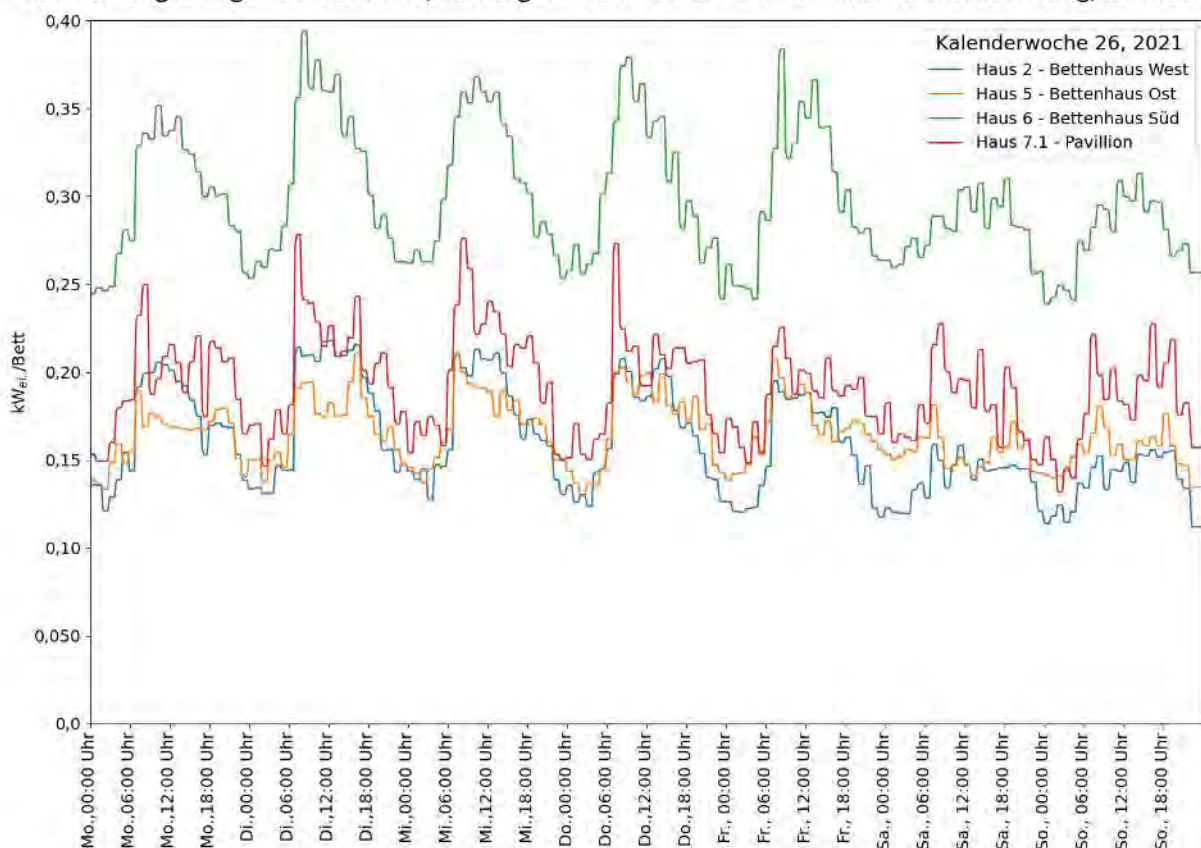


Abbildung 23: Stromlastprofil der einzelnen Bettenhäuser in der Kalenderwoche 26 des Jahres 2021

daher vermutlich auf einen plötzlichen starken Anstieg der Ventilatorleistung zurückführen. Dabei werden die Räume mit neuer Frischluft versorgt. Mit dem Blick auf den Lastverlauf der anderen Bettenhäuser sollte geprüft werden, ob es nötig ist, die Zuluftanlage des Hauses 7.1 sofort nach der Nacht mit wahrscheinlich maximaler Leistung zu betreiben. Zur Grundlast der Bettenhäuser, welche in den Häusern 2 und 6 ca. 60% der Spitzenleistung beträgt, wird vermutlich die Beleuchtung in den Fluren und in den Personalräumen gehören. Wenn diese Bereiche kein Tageslichteintrag besitzen, müssen diese nach der DIN 5035-3 das komplette Jahr über dauerhaft beleuchtet werden. Ein weiterer Grundlastverbraucher wird die Abluftanlage sein, welche die Nasszellen (Duschen und Toiletten) der Bettenzimmer und des Personals bzw. der Besucher dauerhaft entlüftet. Zusätzlich werden medizinische Geräte dauerhaft in Betrieb sein, welche den Gesundheitszustand der Patienten überwacht und diese medizinisch versorgt [Deutsches Institut für Normung, 06.2006, S. 8].

Ähnlich wie die anderen Bettenhäuser besitzt auch das Bettenhaus Süd im Haus 6 einen recht ähnlichen Lastverlauf. Jedoch ist in diesem Bettenhaus die spezifische Grundlast pro Bett um ungefähr 0,1 kW/Bett höher als in den anderen Bettenhäusern. Daher sollte bei einer Vor-Ort-Begehung analysiert werden, ob sich diese höhere Grundlast auf spezielle, zusätzliche medizintechnische Anlagen zurückführen lässt, oder ob es sich um einen Mehrverbrauch in den versorgungstechnischen Anlagen handelt. Wäre dies der Fall, so würde sich folgendes Einsparpotential für das Haus 6 ergeben.

$$W_{\text{Einsparp.}} = P_{\text{Einsparp.}} * n_{\text{Betten, Haus 6}} * \frac{h}{a} = 0,1 \frac{\text{kW}}{\text{Bett}} * 51 \text{ Betten} * 8760 \frac{h}{a} \quad (5-18)$$

$$= 44,676 \text{ MWh}$$

Dies wäre rund 33% des Verbrauchs des Hauses 6 im Jahre 2021. Außerdem hätte man in diesem Jahr ca. 10.097 € an Stromkosten einsparen können und die CO₂-Emissionen könnte man jährlich um 16,35 Tonnen senken. Aus diesem Grund ist eine genauere Inspektion der energetischen Situation im Bettenhaus Süd sehr zu empfehlen auch, wenn sich nicht die gesamten 0,1 kW/Bett sich als Energieeinsparpotential herausstellen.

Um ein mittleres Lastprofil für die Bettenhäuser erstellen zu können, wird die höhere spezifische Grundlast im Haus 6, von dessen Lastprofil angezogen. Wie in Abbildung 24 dargestellt erhält man nun vier Lastprofile der jeweiligen Häuser, welche alle einen sehr ähnlichen Verlauf besitzen. Allerdings sind trotzdem leichte Unterschiede in den Lastspitzen und in der Grundlast zu erkennen. Um herauszufinden, wie groß diese Unterschiede der einzelnen Lastprofile zu den jeweiligen Zeitpunkten in der Woche sind, wird die Standardabweichung σ für diese Profile in der jeweiligen zeitlichen Auflösung (15 min) der Kalenderwoche berechnet. Diese statistische Abweichung ist als rotgepunkteter Verlauf in Prozent in der Abbildung eingezeichnet. Die Standardabweichung gibt an, wie sehr die einzelnen spezifischen Leistungen von deren arithmetischen Mittelwert abweichen. Daher ist die Standardabweichung σ ein Maß für die Breite der Verteilung der einzelnen Leistungen pro Bett und wird wie folgt definiert.

$$\text{arithmetischer Mittelwert: } \bar{x} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (5-19)$$

$$\text{Standardabweichung: } \sigma = \sqrt{\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (5-20)$$

Dabei beschreibt x_i die jeweiligen Leistungen. Die größte Standardabweichung der einzelnen Lastverläufe der Häuser beträgt 4,5 % und die kleinste liegt bei 0,7 %. Dies zeigt, dass die einzelnen spezifischen Leistungen der Bettenhäuser sehr nah beieinander liegen. Durch die Bildung des arithmetischen

Mittelwertes zu jedem Zeitpunkt der Woche, kann so ein aussagekräftiges, mittleres Lastprofil für die Bettenhäuser des Klinikums erstellt werden [DATAtab, 2022b].

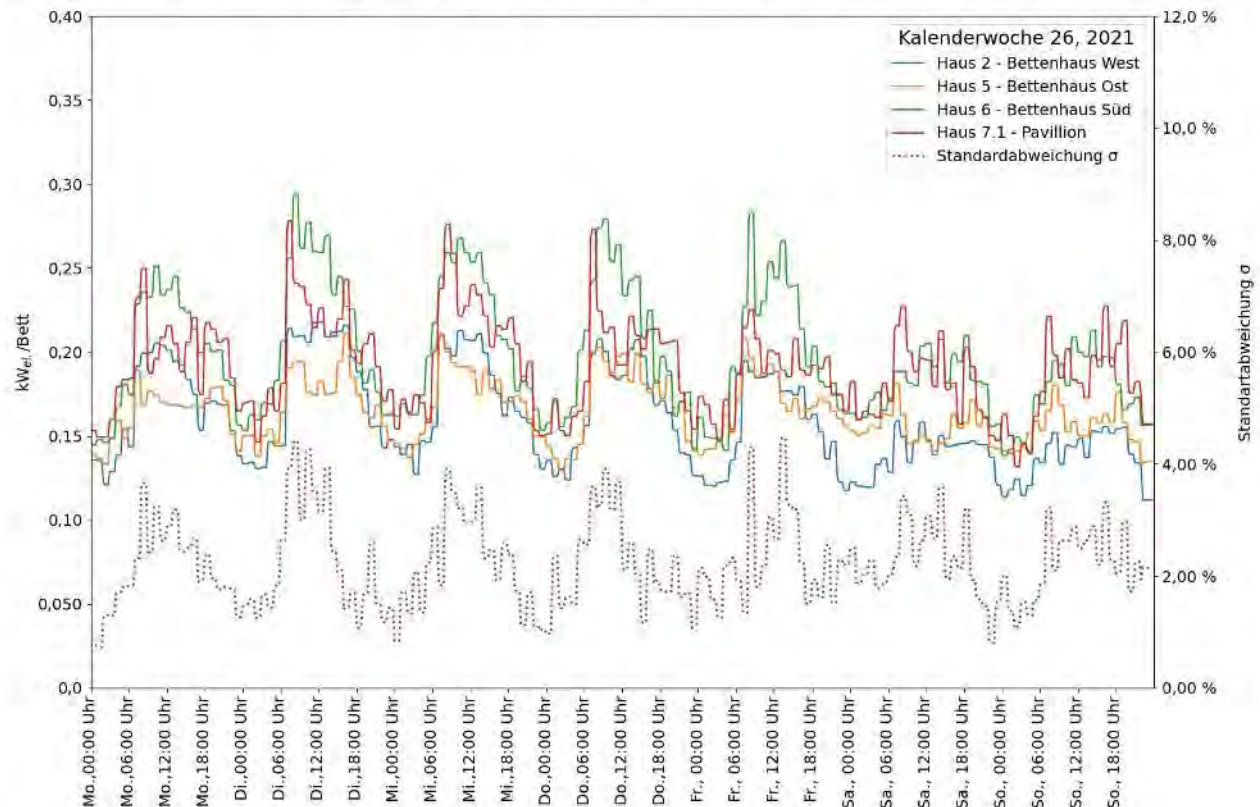


Abbildung 24: Stromlastprofil der einzelnen Bettenhäuser in der Kalenderwoche 26 des Jahres 2021 zuzüglich der Standardabweichung zum jeweiligen Zeitpunkt. Das Lastprofil von Haus 6 ist um 1 $\text{kW}_{el.}/\text{Bett}$ nach unten verschoben.

Bildet man dieses mittlere Lastprofil über das ganze Jahr, so erhält man eine Baseline für die einzelnen Häuser. Diese Baseline kann als Ziellastgang in Monitoringsysteme eingelesen werden. Dadurch können Abweichungen zu den aktuellen spezifischen Leistungen, erkannt werden. Wenn diese in einem extremen Maß zu groß sind, also die Schwellwerte übersteigen oder ein untypisches Profil besitzen, können Meldungen an einen Betreuer ausgehen. So können extreme Mehrverbräuche oder mögliche Fehler, bevor diese akut werden, erkannt werden. Dies kann mit einem Frühwarnsystem in einem Monitoring umgesetzt werden. Diese finden meistens, bei der Effizienzüberwachung von versorgungs- oder produktionstechnischen Anlagen, Anwendung. Wird ein zunehmender Einbruch der Effizienz in einer gewissen Zeit beobachtet, so schlägt dieser Alarm. So können Ursachen für den Einbruch gesucht werden, bevor dieser akut wird. In Kapitel 6.2 werden weitere Möglichkeiten zu Bildung einer Baseline, sowie deren Schwellwerte, genannt.

Mit diesem mittleren Lastprofil der Bettenhäuser besteht außerdem die Möglichkeit, dass dieses zum Vergleich mit Bettenhäuser von anderen Krankenhäusern verwendet werden kann. Dabei wird bei jedem neuen Krankenhaus die Datenlage verbessert. So kann das Lastprofil des Klinikums qualitativ bewertet werden und so können außerdem, wie anfangs bereits erwähnt, die Lastprofile vieler Krankenhäuser in ein Benchmarking zusammentragen werden. Solche Benchmarking Standardlastprofile lassen sich auch in Nutzungszonen unterschiedlicher Liegenschaften, wie Wohnhäuser, Schulen, etc. bilden. Um dabei gute Ergebnisse zu erzielen, benötigt man eine typische liegenschaftsübergreifende Kennzahl, bei denen sich die jeweiligen Lastprofile qualitativ gut vergleichen lassen. Außerdem kann man diese Benchmarking Profile in modernen Energiemonitoringsysteme einbinden. Dabei können Abweichungen der, im Monitoring gemessenen Werte zum Standardlastprofil, dargestellt und so Einsparpotentiale gefunden werden.

Weitere Lastprofile:

Im Rahmen der Analyse wurden noch andere Lastprofile anderer Nutzungszonen, sowohl elektrisch, als auch wärmeseitig überprüft. So konnte man in der Verwaltung einen sehr hohen elektrischen Grundlastverbrauch erkennen, welcher zwischen 55 und 70% der Spitzenlast beträgt. Daher sollte bei einer Begehung überprüft werden, welche Verbraucher außer der Kühlung des Servers für die hohe Grundlast von ca. 20 kW_{el.} verantwortlich sind und ob Einsparpotentiale vorhanden sind. Die Minderung von 1 kW_{el.} hätte im Jahr 2021 im Klinikum folgende Einsparungen erbracht.

$$\text{Stromkosten: } K_{\text{Strom}} = P_{\text{el.}} \cdot \frac{h}{a} \cdot p_{\text{Strom}} = 1 \text{ kW}_{\text{el.}} \cdot 8760 \frac{h}{a} \cdot 0,226 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 1.980 \text{ €} \quad (5-21)$$

$$\text{Emissionen: } E_{\text{CO}_2} = P_{\text{el.}} \cdot \frac{h}{a} \cdot EF_{\text{Strom}} = 1 \text{ kW}_{\text{el.}} \cdot 8760 \frac{h}{a} \cdot 0,366 \cdot 10^{-3} \frac{\text{t}_{\text{CO}_2}}{\text{kWh}} = 3,2 \text{ t}_{\text{CO}_2}$$

Auch wärmeseitig gibt es in den Gebäuden Leistungen, welche eingespart werden können. So besitzen einige Nutzungszonen hohe Tageslastspitzen, welche sich auf die plötzliche hohe Regelung der Lüftungsanlagen zurückführen lässt. Dabei nimmt diese Anlage viel Wärme auf, um die Räumlichkeiten zu beheizen. Daher könnten bei einer minimaleren Regelung der Ventilatoren diese Lastspitzen reduziert werden. In der Küche sollte überprüft werden, ob die Nachtabenkung nicht schon vor 21 Uhr gestartet werden kann, da die letzten Abendessen um 17 Uhr zubereitet werden. So könnte man einiges an Heizenergie einspart werden.

6 Optimierung des ENTECTIVs

Bei der Analyse in Kapitel 0 wurden Schwachstellen im Zusammenhang mit der Zählerstruktur und dessen Transparenz benannt. So konnten in vielen Bereichen aus den erfassten Messdaten der Jahre 2019-2021 am Klinikum [REDACTED] keine Erkenntnisse auf mögliche Einsparpotentiale getroffen werden. In diesem Kapitel wird näher auf etwaige Optimierungsmöglichkeiten des ENGIE internen Energiemonitoringsystem ENTECTIV eingegangen. Dabei wird in diesem Kapitel auf Schwachstellen bei der Messdatenaufbereitung und der Betriebsführung des Monitoringsystems eingegangen. Auf wichtige Funktionalitäten, welche ein Monitoringsystem besitzen sollte, wurde bereits in Kapitel 2.4.6 eingegangen. Beim ENTECTIV werden viele Funktionen der Messdatenaufbereitung genutzt. Zu diesen gehören die Aggregation, die Erstellung von virtuellen Zählern und die Selektion gewisser Messdaten nach bestimmten Kriterien. Doch es gibt noch weitere Funktionen, welche andere Monitoringsysteme besitzen, um die Qualität der Messdaten zu verbessern und außerdem den Nutzer vor Mehrverbräuchen warnen. Abschließend wird in diesem Kapitel noch ein Monitoringsystem vorgestellt, welches sich durch übersichtliche Dashboards und Generierung von tagesaktuellen Zielwerten durch maschinelles Lernen, auszeichnet.

6.1 Validierung der Rohdaten

Ein essenzieller Punkt bei der Datenaufbereitung, ist die Überprüfung der Qualität von gemessenen Daten. In der betrieblichen Praxis ist es keineswegs sicher, dass ein installiertes Messsystem, dauerhaft korrekte Daten liefert. Bei der Feldbusübertragung der Messwerte von der jeweiligen Messtechnik zu den einzelnen Datenlogger oder auch bei der Erstellung der CSV-Dateien, kann es immer wieder zu leeren oder falschen Messwerten kommen. Des Weiteren können auch bei der Übertragung der CSV-Dateien oder bei der Einbindung in den SQL-Server des ENTECTIVs Fehlerquellenaufkommen, welche zu falschen Messwerten führen. Während der Analyse in Kapitel 0, konnte man ein paar dieser Fehler in den Daten des ENTECTIVs entdecken. Ein Beispiel ist in Abbildung 25 dargestellt.

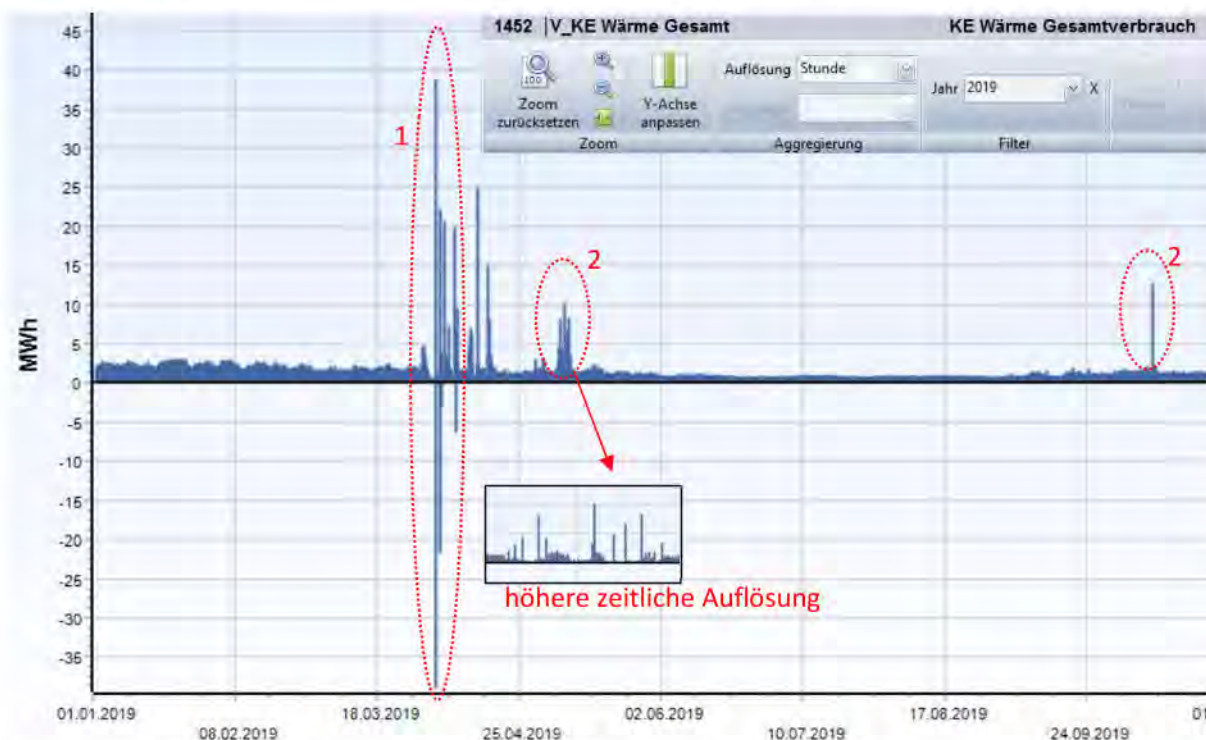


Abbildung 25: Verschiedene Fehler in den Messdaten am Beispiel des Gesamtwärmeverbrauchs des Klinikum [REDACTED] aufgetragen in einer stündlichen Auflösung

Beim Fehler 1, wurde zunächst ein hoher negativer Wert aufgetragen und darauffolgend im gleichen Maße ein hoher Wert im Monitoring dargestellt. Bei den anderen beiden Fehlern (Nr.2), werden zunächst mehreren Stunden kein Wert aufgetragen (Lücken) und in den darauffolgenden Stunden werden diese Lücken wieder ausgeglichen. Dabei handelt es sich nicht um den Ausfall eines Zählers, sondern um einen Übertragungsfehler. Bei einer Betrachtung in einem größeren zeitlichen Intervall, kann daher dieser fehlerhafte Wert nicht erkannt werden, da sich die Werte in Summe ausgleichen. Trotzdem sollten diese Fehler erkannt und verbessert werden, da es bei einer Analyse durchaus sinnvoll ist, wie z.B. bei Lastprofilen, Messwerte in einer zeitlichen Auflösung von 15 min zu betrachten. Desweiteren passen sich die Achsen der Darstellung des ENTECTIVs (vgl. Abbildung) diesen falschen Werten an. Somit kann man keine qualitativen Unterschiede der „richtigen Messwerte“ im jährlichen Verlauf erkennen. Ein weiterer Fehler, welcher bei der Analyse aufgetreten ist, ist der Ausfall des Wärmezählers des Hauses 4. Wie bereits in Kapitel 5.2.4 beschrieben, hat dieser Zähler fast die Hälfte des Jahres keine Daten gemessen. Dabei handelte es sich vermutlich um einen Zählerausfall. Da dieser Fehler offensichtlich zu spät erkannt wurde, ist eine große Lücke im Verbrauch entstanden. Um diese Fehler frühzeitig zu erkennen oder diese automatisch zu beheben, wird eine Validierung der eingelesenen Daten benötigt. Dabei gibt es grundsätzlich zwei Validierungsarten.

- **Konsistenzprüfung:**

Dabei werden alle Zähler anhand deren Statuskennzeichen überprüft, um problematische Status zu erkennen. Dabei muss für jede zu prüfende Messgröße einen passenden Arbeitsablauf definiert werden, welcher den Status aller Daten der Messgröße in einem Prüfzeitraum prüft. Werden dabei auffällige Status gefunden, so können verschiedene Meldungsarten ausgegeben werden. Die Status können anhand der Art des Fehlers in verschiedene Kategorien aufgeteilt werden. So bekommt ein Zähler z.B. den Status 3, wenn ein Geräteeustart oder eine Wartung vorliegt. Liegt bei einer kontinuierlichen Messung eine Lücke vor, so würde diese den Status 4 erhalten. Diese Lücke wird dann automatisch extrapoliert und erhält dann den Status 1 („Wert in Ordnung“) [visualenergy, 2018, S. 39 f.]. Beim Extrapolieren wird ein Messwert anhand der vorherigen und nachfolgenden Werte näherungsweise bestimmt [Dodge/Yadollah, 2008, S. 195].

- **Absolute Validierung:**

Bei dieser Art der Validierung wird die Über- und Unterschreitung eines festen Grenzwertes (minimaler und maximaler Grenzwert) in einem bestimmten Zeitintervall behandelt. Diese können auch durch gewisse Kalendertage spezifiziert werden, sodass z.B. bei einer medizinischen Dienstleistung an einem Nichtarbeitstag die obere Grenze geringer ist als an einem Werktag. Beim Überschreiten dieser festen Grenzwerte ist es nicht sinnvoll jedes Mal eine Alarmierung auszugeben. Es genügt, wenn unplausible Messwerte gelöscht werden und die entstandenen Lücken extrapoliert. Um daher keine richtigen Messwerte zu löschen, müssen die Grenzwerte dementsprechend gewählt werden. Die Überschreitung der Grenzwerte sollte dennoch gezählt werden, damit z.B. nach zehn Überschreitungen am Tag eine Alarmierung ausgelöst wird. Dieses Budget an Überschreitungen sollte je nach Zähler individuell ausgewählt werden.

Betrachtet man die Validierungsarten, so erfüllen beide die Anforderungen falsche Werte herauszufiltern und diese anzupassen. Jedoch kann die absolute Validierung rein softwaretechnisch im Monitoringsystem umgesetzt werden, was daher keine speziellen Zähler erfordert. Das ENTECTIV hat bereits eine absolute Validierung integriert. Diese löscht alle falsch importierten Werte und diese werden in der Datenbank als gelöscht markiert, welche bei einer späteren Auswertung ignoriert werden. Desweiteren kann man bei Fehlern in den Messwerten Kriterien für eine Alarmierung bestimmen. So können dort nicht nur Alarmierungskriterien für eine zulässige Anzahl an Fehlern am Tag gegeben werden, sondern außerdem ein zulässiger Zeitraum an permanenten Lücken und ein erlaubter Zeitraum angegeben werden, in welchem sich derselbe Wert befindet. Bei einer Alarmierung wird eine Mail an einen Betreuer des Monitoringsystems ausgegeben. Diese Alarmierungsmethode ist sehr sinnvoll, da so die

Fehler bereinigt werden und bei einer gewissen Häufigkeit zwischen drei verschiedenen Fehlerursachen unterschieden werden kann. So kann meist auch die Fehlerursache gefunden werden. Allerdings wurden diese Funktionen im Energiemonitoringsystem für das Klinikum [REDACTED] nicht eingerichtet und so konnten solche Fehler entstehen. Wie stark diese Auswirkungen auf die Qualität der Messdaten sind, kann man in Abbildung 25 gut erkennen [ENGIE Deutschland GmbH, 2016, S. 12 f.].

Ein zusätzlicher Grund, warum die Validierung der Daten unerlässlich ist, dass man durch das „Pilotprojekt Einsparzähler“ verpflichtet wurde, die gemessenen Daten auf ihre Konsistenz zu prüfen. Falls dies nicht erfüllt wird kann die BAFA den Förderbescheid zurücknehmen und das ausgezahlte Fördergeld zurück verlangen [Becker, 2019, S. 13].

6.2 Anlernen von Modellen und Bildung von Schwellwerten

Ein weiterer Punkt, mit welchem Messdaten aufbereitet werden können, ist das Anlernen von Modellen mithilfe von historischen Messdaten. Dadurch können Verbräuche anhand einer Baseline, welche aus vergangenen Messdaten gebildet werden, bewertet werden. Außerdem können diese Modelle auch Aufschluss über mögliche Schwellwerte geben, welche für die Einhaltung des Verbrauchs zwischen zwei gewissen Grenzwerten verantwortlich sind. Bei einer Überschreitung wird ein energetischer Alarm ausgelöst, damit Mehrverbräuche vermieden werden. Wie in der Analyse bereits mehrmals angesprochen, sind solche Alarmierungen, welche durch die Verletzung der Schwellwerte hervorgerufen werden, für einen qualitativen Betrieb eines Energiemonitoringsystems unverzichtbar. Dabei können diese sowohl für absolute Verbräuche als auch für spezifische Verbrauchskennzahlen gebildet werden. In einer Produktionsanlage werden oft auch Grenzwerte für finanzielle Kennzahlen bestimmt, um somit die Kosten eines Produktes zu überwachen. Die Bildung von Schwellwerten kann durch Expertenwissen, welches durch eine Analyse vergleichbarer Systeme gewonnen wird, oder durch statische Methoden wie der Mittelwertbildung erfolgen. Bei komplexeren Verbräuchen müssen diese jedoch über die modellabhängigen Methoden wie Regression bestimmt werden. Des Weiteren können diese Schwellwerte vom Nutzer angepasst werden. Diese Anpassung sollte jedoch nur vorgenommen werden, wenn diese einen Nutzen bringt, um z.B. damit Fehler zu finden. Bei der Bestimmung der Grenzen von Schwellenwerten sollten ein Kompromiss zwischen der Sensitivität bei der Erkennung und der Anzahl der Ausreißer getroffen werden. Als Ausreißer werden in der Statistik Messwerte genannt, welche nicht in dem erwarteten Streubereich der Messwerte liegen. Bei statischen Schwellwerten mit einem gleichbleibenden maximalen und minimalen Grenzwert, können nichtlineare Effekte nicht berücksichtigt werden. Daher bietet es sich an, anhand angelernter Modelle die Schwellwerte zu bilden, um alle Einflussfaktoren zu berücksichtigen. Durch maschinelles Lernen können auch außerdem komplexe Modelle erstellt werden. So können Verbräuche in Abhängigkeit eines bestimmten Wochentages, einer Uhrzeit und der Außentemperatur angelernt werden [Sewe, 2018, S. 33 f.].

Tagesabhängiges Modell:

Wie bereits bei der Analyse beschrieben, ist der Stromverbrauch wochentags abhängig. So ist der Verbrauch an Werktagen höher als an den Wochenenden. Daher bietet es sich an auch die Baseline nach einem wochentags abhängigen Modell zu bestimmen. In diesem Berechnungsbeispiel wird der gesamte Stromverbrauch des Klinikums [REDACTED] betrachtet. Zu Beginn wurden die Tagesverbräuche aus den Jahren 2019-2021 nach deren jeweiligem Wochentag sortiert. Dabei wurden außerdem die Feiertage dieser Jahre bestimmt, sodass deren Verbräuche in die Berechnung der Baseline für Sonntage miteinfließen. Die Baseline der jeweiligen Tage kann nun durch das arithmetische Mittelwert, nach Formel (5-19), der jeweiligen Wochentage berechnet werden. Dabei wird der Mittelwert der einzelnen Werktage aus jeweils ungefähr 150 und die Sonn- und Feiertage aus 188 Werten gebildet. Diese daraus resultierende Baseline ist in Abbildung 26 zur Bewertung der Stromverbräuche der jeweiligen Tage im Januar 2022 dargestellt. Die roten Quadrate geben dabei die jeweiligen Mittelwerte der einzelnen Tage an. Man erkennt, dass alle Tagesverbräuche besser sind als an deren Baseline Werte. Des Weiteren

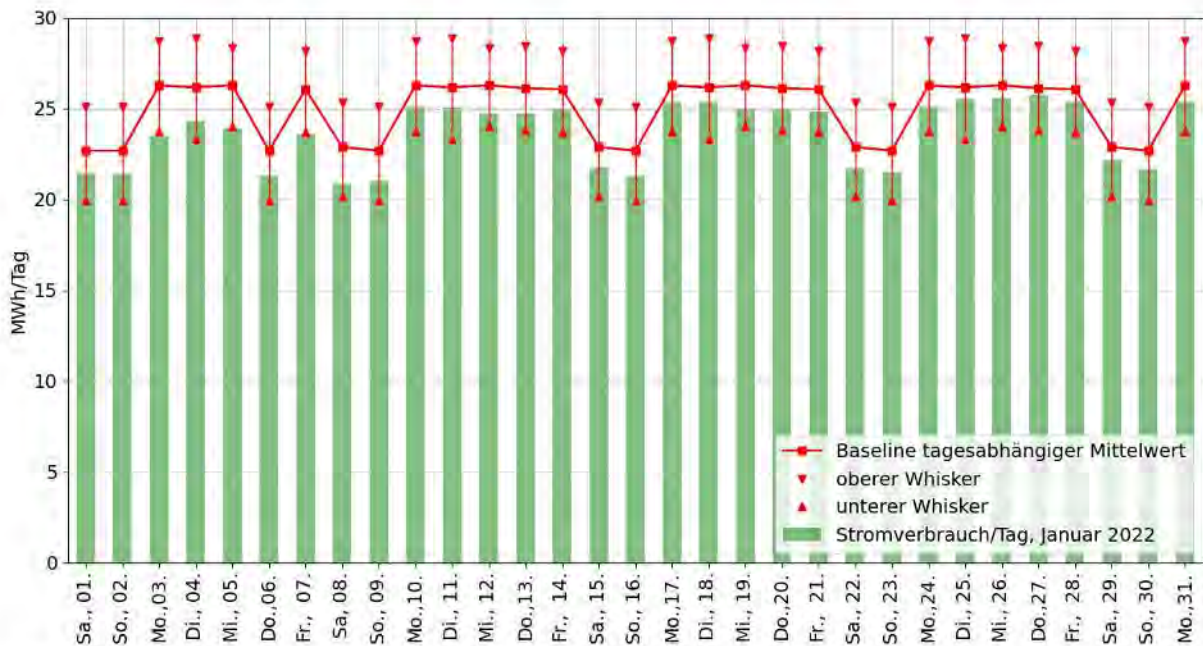


Abbildung 26: Baseline des tagesabhängigen arithmetischen Mittelwertes des Stromverbrauches des Klinikums zur Bewertung der Tagesverbräuche des Januars 2022

erkennt man auch, dass am Feiertag (06.01), der Verbrauch auf einen Sonntagswert zurückgeht. Dies zeigt, dass bei der Berechnung der Baseline die richtigen wochentags spezifischen Annahmen getroffen wurden. Die beiden Dreiecke geben den oberen und unteren Whisker an. Dies ist ein statistischer Wert, welcher die beiden Grenzwerte angibt, zwischen welchen die Verbrauchswerte laut den historischen Messdaten liegen sollen. Anhand des oberen sowie des unteren Whiskers und dem Mittelwert, kann so der Verbrauch anhand einer Ampelbewertung bewertet werden. Befindet sich der Wert zwischen dem oberen Whisker und dem Mittelwert, so wird dieser als zu hoch eingestuft und damit mit „gelb“ bewertet. Zwischen dem unteren Whisker und dem Mittelwert, wird dieser als gut („grün“) und außerhalb als Ausreißer, welche mit rot bewertet werden, eingestuft. In der ersten Januarwoche erkennt man, dass sich die Wochentage an der unteren Grenze befinden. Dies hängt vermutlich damit zusammen, dass einige Bereiche, der nicht stationären Versorgung wegen Urlaub geschlossen waren. Dies sollte an der Baseline im Monitoringsystem angepasst werden. Um zu belegen, dass sich die Whisker in Abbildung 26 als Grenzwerte zur Bewertung des Verbrauches und sogar als Schwellwerte eignen, wird im Folgenden die Berechnung dieser Werte nach der Boxplot-Variante näher erläutert.

Ein Boxplot wird in der Statistik zur Darstellung grafischer Kennwerte verwendet. Der zentrale Wert dabei ist der Median, welcher genau in der Mitte einer sortierten, aufsteigenden Verteilung liegt. Ist die Anzahl der Werte in der Verteilung gerade, so wird der Mittelwert aus den beiden Werten der Mitte gebildet. Der Median teilt die Verteilung in zwei Hälften, in welchen jeweils in der Mitte die beiden Quartilswerte (25% und 75%) liegen. Diese bilden die Länge der Box, bzw. den Interquartilsabstand. In dieser Box befinden sich genau 50% der mittleren Daten. Das 25%-Quartil wurde bereits in dieser Arbeit als Richtwert in der Benchmarking Studie in Kapitel 4.2 verwendet. Nun können die beiden Whisker bestimmt werden, in dem die Länge der Box mit 1,5 multipliziert wird und im Anschluss auf das 75%-Quartil dazu addiert wird. Für den unteren Whisker muss von der multiplizierten Länge das 25%-Quartil abgezogen werden.

$$\text{unterer Wisker} = q_1 - (q_3 - q_1) * 1,5 \quad (6-1)$$

$$\text{oberer Wisker} = q_3 + (q_3 - q_1) * 1,5$$

$$q_1: 25\% - \text{Quartil}, \quad q_2: 75\% - \text{Quartil}$$

Die Boxplots, welche ebenfalls für den Tagesstromverbrauch des gesamten Klinikums erstellt sind, werden in Abbildung 27 dargestellt. Auch hier wurden die historischen Daten aus den Jahren 2019-2021 verwendet. Dabei wird nur zwischen Wochentagen und Wochenenden (Samstag, Sonntag und Feiertage) unterschieden, da an den Mittelwerten der oberen Abbildung erkennen kann, dass die jeweiligen zusammengehörenden Werten näherungsweise dieselben Werte besitzen. Vergleicht man

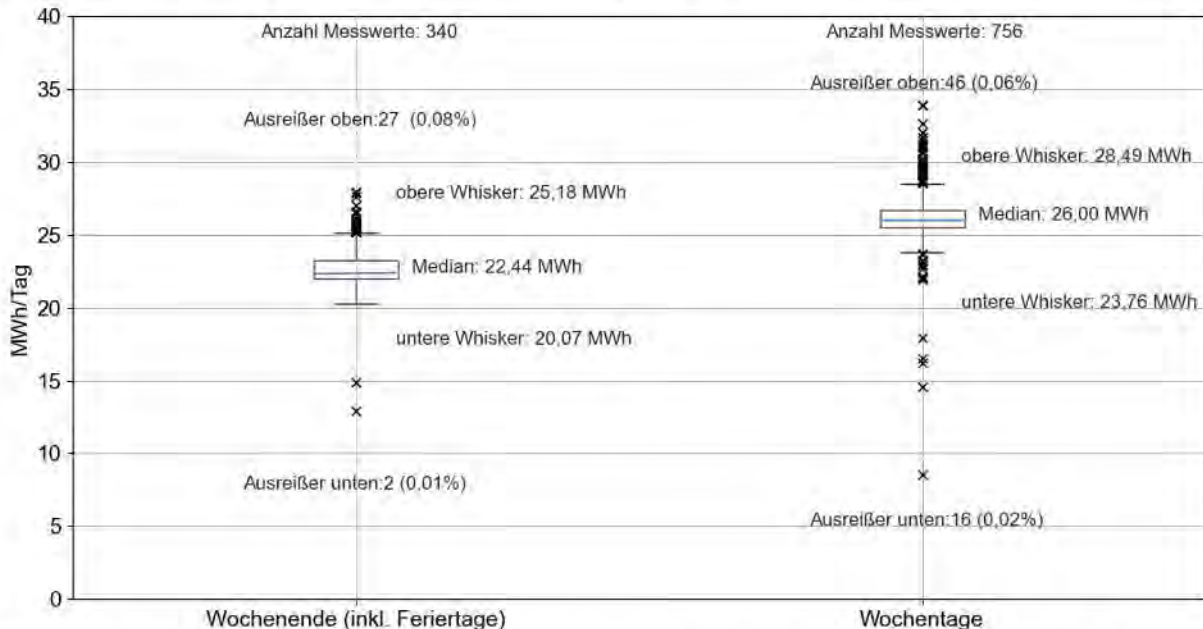


Abbildung 27: Darstellung der Tagesstromverbräuche der Jahre 2019-2021 des Klinikums nach der Boxplot-Methode. Es wird zwischen Verbräuche an Wochenenden (inkl. Feiertagen) und Wochentagen unterschieden.

die Anzahl der jeweiligen Messwerte, denen der Ausreißer, welche nicht mal 1% betragen, so kann man schlussfolgern, dass sich die jeweiligen oberen und unteren Whisker als Baseline-Schwellwerte eignen. Vermutlich lassen sich die unteren Ausreiser auf Fehler in den Messdaten zurückverfolgen, welche bei einer erfolgreichen Validierung der Rohdaten verbessert würden. Der Vorteil dieser Boxplot-Variante, ist die einfache Erstellung und die übersichtliche Darstellung der Messdaten. So können auch große Datenmengen und deren Datenverteilung strukturiert betrachtet werden. Für das Klinikum kann daher ausgesagt werden, dass sich alle Werte in einem Bereich ca. 5 MWh und 50 % der Werte in einem Bereich 2 MWh befinden [DATAtab, 2022a].

Wenn sich die Verbräuche des Januars über das Jahr weiterführen und die Werte dauerhaft unterhalb des Mittelwertes liegen, so sollte die Baseline am Ende des Jahres angepasst werden. Des Weiteren könnte durch das Maschinelle Lernen die Baseline automatisch angepasst werden, wenn z.B. nach jedem Monat diese Tagesverbräuche miteinbezogen werden würden. Die Schwellwerte, welche Alarmierungen ausgeben, sollte man jedoch für einen längeren Zeitraum unverändert lassen. Hat dieser nach einem Jahr keine energetischen Alarmierungen gemeldet, so kann geprüft werden, ob es sinnvoll ist, diese näher zusammen zu rücken. Dabei sollte immer die Notwendigkeit hinterfragt werden. Nach dem vollständigen Umbau im Haus 9, wird ein verbesserter Verbrauch erwartet, welcher sowohl bei der Baseline als auch bei deren Schwellwerten berücksichtigt werden sollte.

Temperaturabhängiges Modell:

In temperaturabhängigen Modellen ist es schwer dieses in verschiedene Bereiche zu unterteilen, da die Verbräuche durch eine nichtlineare Funktion von der Temperatur abhängen. Daher ist die Boxplot-Methode hier nicht zielführend. Hier ist die Anwendung von Regressionsmodellen sinnvoll, weil mit diesen funktionellen Abhängigkeiten zwischen Systemvariablen ermittelt werden können. Das Modell stellt eine vereinfachte Darstellung eines realen Systems dar, welches anhand einer mathematischen

Funktion beschrieben werden kann. In diesem Input-Output-Modell können Zusammenhänge quantitativ beschrieben werden und außerdem Werte der abhängigen Variablen prognostiziert werden. Für die Bestimmung eines Regressionsmodells gibt es verschiedene mathematische Ansätze, welche je nach System individuell gewählt werden sollten. Bei dem linearen Ansatz wird über eine Geradenfunktion, mit Steigung und y-Achsenabschnitt, der funktionelle Zusammenhang zwischen den beiden Messwertgrößen (x und y), dargestellt. Des Weiteren gibt es auch Modelle bei denen dieser Zusammenhang der Größen x und y in einem exponentiellen und in einem multiplen, nichtlinearen Ansatz angegeben sind. Letzteres wird meist durch Polynome n-ter Ordnung beschrieben [Schellong, 2016, S. 173 ff.].

Wie bereits in der Analyse mehrmals beschrieben, muss der Wärmeverbrauch, welcher für die Beheizung der Räume benötigt wird, temperaturabhängig betrachtet werden. Wie bereits in Kapitel 5.2.4 gezeigt, besitzt die Küche einen deutlich witterungsabhängigen Wärmeverbrauch. Dieser Verbrauch pro Tag der Jahre 2019-2021 ist in einem Streudiagramm, bzw. Scatter Plot, in Abbildung 28, bezogen auf dessen Außentemperatur, dargestellt (orange Punkte). Wie bereits erwähnt, wurden hierbei die Temperaturdaten der Wetterstation Leinfelden bzw. des Flughafens Stuttgart verwendet. Diese liegen dort in einer stündlichen Auflösung vor. Für das Diagramm wurde daher die gemittelte Tagesaußentemperatur gebildet. In den Scatter Plots lassen sich gut die Beziehungen zwischen zwei oder drei numerischen voneinander abhängigen Variablen darstellen. Außerdem kann die Verteilung dieser Daten und auch mögliche Ausreißer gut ersichtlich abgebildet werden. Beim Betrachten der temperaturabhängigen Tagesverbräuche wird auf dem ersten Blick ersichtlich, dass der Großteil der Werte eng beieinander liegen. Der Verlauf der einzelnen Datenpunkte ist sehr typisch für den Tageswärmebedarf eines Gebäudes und verhält sich ähnlich wie in der Literatur „Analyse und Optimierung von Energieverbundsystemen“ [Schellong, 2016, S. 364]. Im Bereich bis zu 15°C, bzw. im Bereich der Heizgradtage, verhält sich der Wärmeverbrauch sehr linear und so konnte daher die gemittelte Baseline mit dem linearen Regressionsansatz erstellt werden. Die Funktion dieser Regressionslinie lautet wie folgt. Die Geradenfunktion wurde dabei mit der Python Scipy-Funktion „`scipy.stats.linregress()`“ bestimmt.

$$\frac{Q_{\text{Verbrauch,Küche}}}{d} = -0,134 \frac{\text{MWh}}{^{\circ}\text{C}} * t_A + 2,45 \text{ MWh} \quad (6-2)$$

Um jedoch den kompletten Wärmeverbrauch abbilden zu können, muss eine nicht lineare Regression durchgeführt werden. Hier wurde mit der Python Scipy-Funktion „`scipy.optimize.curve_fit()`“ erstellt. Diese nutzt die Kleinste-Quadrate-Methode, um die besten Anpassungsparameter (a_0, a_1, \dots, a_i) der Funktion n-ter Ordnung ($f(x) = a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2 + \dots + a_i \cdot x^i$), für das angestrebte Modell zu finden. Zur Bestimmung der besten Funktion, wird zunächst mit einer kleinen Ordnung (3-ter) begonnen, um so anhand der Sichtkontrolle im Plot-Fenster die Regression qualitativ zu betrachten. Passt diese noch nicht ausreichend gut so wird die Regression eine Ordnung höher betrachtet [DelftStack, 2021]. Die Regressionskurve in Abbildung 28 ist eine Funktion 5 n-ter Ordnung und wird im Folgenden als Funktion von x angegeben.

$$f(x) = -0,10323 x - 0,0026 x^2 - 0,28 * 10^{-3} x^3 + 0,03 * 10^{-3} x^4 - 0,7 * 10^{-3} x^5 + 2,34075 \quad (6-3)$$

In diesem Modell ist x die Außentemperatur t_A und $f(x)$ der Wärmeverbrauch pro Tag für die Küche. Mit dieser Regressionsfunktion hat man nun eine temperaturabhängige Wärme-Baseline bestimmen. Setzt man die aktuelle mittlere Außentemperatur in die Funktion ein so kann der an diesem Tag herrschende Wärmeverbrauch, bewertet werden. Dazu wäre es hilfreich einen Außentemperaturfühler am Klinikum anzubringen. So kann dieser Wärmeverbrauch täglich und automatisch bewertet werden. Eine weitere Möglichkeit ist ein Jahresabonnement vom Deutschen Wetterdienst abzuschließen, bei welchem man außer den aktuellen mittleren Temperaturen auch Prognosen für die kommende Tage erhält. Mit diesen kann der zu erwartende Wärmeverbrauch vorhergesagt werden. Mit den aktuellen Temperaturdaten kann nicht nur der Verbrauch bewertet werden, sondern auch eine Alarmierung über die Schwellwerte ausgeführt werden [DWD, 2017]. Zur Bestimmung dieser Werte wurden dieselbe Funktion aus (6-3) verwendet und diese durch Änderung des y-Achsenabschnittes verschoben. So ist der obere Schwellwert um 0,4 MWh/Tag nach oben und der untere Schwellwert um den gleichen Wert von der Baseline aus nach unten verschoben worden. Da der untere Schwellwert bei aufsteigen-

der Außentemperatur negativ wird (bei ca. 15°C), wurde diese Grenze auf 0 MWh/Tag angepasst, so dass beim Auftreten von negativen Werten ein energetischer Alarm gemeldet wird. An der geringen prozentualen Anzahl an Ausreißer, welche in der Abbildung genannt sind, kann man beurteilen, dass die Anzahl der Alarmierungen und die Sensibilität gut abgewogen ist. Zumal es sich bei einigen Ausreißern um Fehler handeln kann.

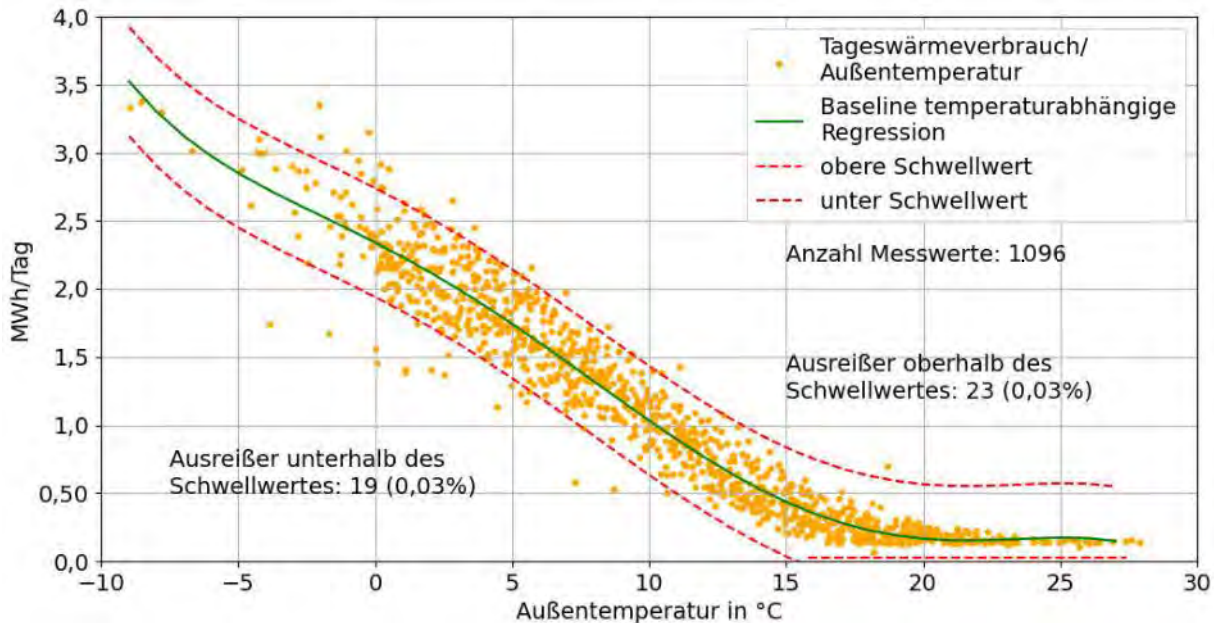


Abbildung 28: Darstellung der Tageswärmeverbräuche der Küche für die Jahre 2019 – 2021 und Bestimmung der Baseline sowie des oberen und unteren Schwellwerts nach der multiplen, nichtlinearen Regressionsmethode.

Diese temperaturabhängigen Modelle sind eine gute Variante witterungsbedingte Verbräuche zu bewerten und zu überwachen, um so Mehrverbräuche zu vermeiden. Daher ist es auch sinnvoll, dies für alle energetischen Zähler zu erstellen. Für die Einbindung in das ENTECTIV müsste jede Regressionsfunktion mit einem Virtuellen Zähler programmiert werden, um so jeweils eine Baseline zu erhalten. Um diese Baseline mit neueren Daten automatisch zu aktualisieren, müsste ein machine learning Algorithmus ins ENTECTIV integriert werden. Mit diesem könnten auch Überschreitungen der Schwellwerte festgestellt werden. Im aktuellen ENTECTIV können diese dynamischen Schwellwerte nicht integriert werden, da dort nur ein maximaler und minimaler Wert angegeben werden kann.

Würde man für den Wärmeverbrauch die Baseline in einer stündlichen oder viertelstündlichen Auflösung betrachten, so hätte man ein 3-dimensionales Problem. Der Verbrauch würde sowohl von der Außentemperatur als auch von den tageszeitlichen Effekten, wie Nachtabsenkung, Peaks am Morgen, etc. abhängen. Für das ENTECTIV genügt die Betrachtung von Tagesverbräuchen, da die Messwerte nur täglich in dem SQL-Server eingelesen werden.

6.3 Weitere Optimierungsmöglichkeiten

Die wesentlichen Punkte, welche ein Energiemonitoringsystem besitzen muss, um Einsparpotentiale aufzudecken und Mehrverbräuche zu verhindern, wurden bereits Eingangs des Kapitels näher beschrieben. In einem technisch modernen Monitoringsystem, welches meist von einem großen Entwicklerteam erstellt worden ist, gibt es viele weitere nützliche Funktionen. Ein Beispiel für so ein Monitoringsystem ist das ENGIE interne C3NTINEL. Dieses bietet ein Live-Dashboard, auf welchem man sich schnell über die tagesaktuellen Entwicklungen der Energieverbräuche, -kosten und CO₂-Emissionen, informieren kann. Außerdem kann man sich dieses Board individuell mit übersichtlichen Diagrammen zusammenstellen lassen. So können z.B. die wöchentlichen Verbrauchsverläufe, der Jahresvergleich der monatlichen Verbrauchswerte, Vergleich von Tag und Nachtverbräuchen, etc. angebracht werden. Auch die wichtigen Energiekennzahlen könnten auf diesem Dashboard, nach der Ampelbewertung,

dargestellt werden. Der Vorteil an diesem Dashboard ist, dass der Kunde auf einer Seite alle für ihn relevante Zahlen dargestellt bekommt. Dabei werden wichtige Zahlen, wie eingesparte Energie bzw. Kosten, markant und prozentual hervorgehoben. Im Onlineportal des ENTECTIV werden bereits Verbräuche und Kennzahlen der jeweiligen Medien übersichtlich dargestellt. Ein zusätzliches, für den Kunden angepasstes Dashboard, mit individuellen Grafiken und mit ebenso angezeigten zusätzlichen Kosten, könnte das Produkt für den Kunden nochmals als benutzerfreundlicher aufgewertet werden. In Abbildung 29 ist ein mögliches Dashboard, welches im C3NTINEL erstellt werden kann, dargestellt.



Abbildung 29: Beispiel Dashboard mit individuellen Grafiken aus dem Energiemonitoringsystem C3NTINEL (Quelle: [ENGIE - UK & Ireland, 2020, S. 2])

Eine weitere, sinnvolle Funktion des C3NTINELs, ist der Portfolio Manager. Bei diesem können verschiedene Filialen eines Kunden, anhand derer spezifischer Kennzahl verglichen werden. Bei diesem Benchmarking kann man beispielsweise die Filiale bestimmen, welchen den größten Verbrauch pro Nettogrundfläche besitzt. So könnten auch die Lastprofile der Bettenhäuser, welche in Kapitel 6.3 beschrieben sind, im Portfoliomanager zusammengetragen werden. Des Weiteren werden beim C3NTINEL durch maschinelles Lernen automatisch eine Baseline generiert und es können außerdem bestimmte Nutzungsmuster erkannt werden [ENGIE - UK & Ireland, 2020, S. 2 ff.].

7 Fazit

Ziel jedes erfolgreichen Energiemonitoringsystems ist es, anhand der gemessenen Daten Einsparpotentiale zu erkennen. Wenn dies nicht der Fall ist, dient ein Monitoringsystem zumindest der Archivierung und Visualisierung der Verbrauchsdaten des Kunden. Ein erfolgreiches Unternehmen strebt, wie bereits im PDCA-Zyklus beschrieben, nach stetiger Verbesserung. Dabei sollen hauptsächlich Kosten, zu welchen die Energiekosten einen großen Teil beitragen, minimiert werden. Die Senkung der Energiekosten gewinnt bei den immens ansteigenden Energiekosten immer mehr an Bedeutung. Außerdem kann das Unternehmen dadurch seinen Teil für eine erfolgreiche Energiewende beisteuern. Daher ist die zentrale Aufgabe eines solchen Monitoringsystems Einsparpotentiale aufzudecken und keinen „Datenfriedhof“ aus ungenutzten Messdaten zu produzieren.

Dabei ist die Mindestanforderung an ein solches Messsystem verlässliche Messdaten auszuwerten, fehlerhafte Daten zu löschen und beispielsweise durch eine Extrapolation zu verbessern. Ein Beispiel, weshalb dies so wichtig ist, erkennt man an Abbildung 13. Dort kann man feststellen, dass der flächenspezifischen Wärmeverbrauch des Hauses 4 im Klinikum [REDACTED] zwischen dem Jahr 2019 und 2021 um ca. 25 % angestiegen ist. Bei der tieferen Analyse, warum dieser Anstieg so immens ist, wurde bemerkt, dass dies auf einen Ausfall der Messdaten über einen längeren Zeitraum zurückzuführen ist. Treten Fehler mehrmals in einem zeitlichen Intervall auf, so sollte der Verantwortliche, welcher für das Monitoringsystem zuständig ist, passende Maßnahmen treffen, um diese Fehler zeitnah zu beheben. Bei der Alarmierung ist es wichtig, eine angemessene Häufigkeit von Messfehlern in einer zeitlichen Periode zu bestimmen. Wird der Betreuer von jedem Fehler informiert, so verliert dieser bei zahlreichen Zählern in einer Liegenschaft schnell den Überblick. Jedoch sollte die erlaubte Anzahl an Fehler in einem bestimmten Zeitbereich nicht zu groß gewählt werden, sodass die Fehler qualitativ verbessert werden können. Das ENTECTIV besitzt eine sinnvolle Funktion zum Validieren der Messdaten, welche jedoch angewendet werden, sollten.

Ein transparentes Messkonzept ist ein weiterer Faktor, welcher zu einem erfolgreichen Betrieb eines Energiemonitoringsystems beiträgt. Der umgesetzte Aufbau im Klinikum [REDACTED] bei welchem die Messstellen nach dem Top-Down Ansatz in drei Bilanzgrenzen unterteilt sind, ist sehr sinnvoll. Jedoch wäre es von Vorteil Großverbraucher, welche mehr als 3 % zu den gesamten Energiekosten beitragen, mit Zählern zu versehen. Im Beispielprojekt am Klinikum [REDACTED] sind dies überwiegend versorgungstechnische Anlagen, wie Lüftungs- und Kälteanlagen. Da diese meist seit einer längeren Zeit nicht erneuert wurden, können in aller Regel in diesen Anlagen Maßnahmen zu Optimierung der Effizienz detektiert werden. Ein Beispiel dafür sind die Kompressionskältemaschinen, welche im Haus 4 seit 25 Jahren nahezu dauerhaft in Betrieb sind. Wenn das Kosten-Nutzen-Verhältnis für eine Installation zusätzlicher Zähler nicht gegeben ist oder der Kunde nicht bereit ist, weitere Investitionen zu tätigen, ist es sinnvoll, die Großverbraucher der jeweiligen Gebäude in Energieflussdiagrammen (Sankey-Diagramm) zu bilanzieren. In Abbildung 17 wird anhand solch einem Diagramm Transparenz in den Trinkwasserverbrauch des Gebäudezählers im Haus 1 geschaffen. Dort erkennt man, dass nur ein Teil des verbrauchten Wassers im Gebäude benötigt wird. Aus dem restlichen Wasser wird E- bzw. VE-Wasser gewonnen, welches im ganzen Klinikum benötigt wird. Des Weiteren sollte überprüft werden, ob vorhandene Zähler, wie der Wärme- und Kältemengenzähler der Absorptionskältemaschinen in das Monitoringsystem integriert werden kann. Durch die Bestimmung des Heizenergieverbrauchs kann so die Absorptionskältemaschine vom kompletten Wärmeverbrauch des Gebäudes abgegrenzt werden.

Um im Betrieb eines Monitoringsystems Energieverschwendungen zu vermeiden, müssen Schwellwerte eingeführt werden. Hierdurch können bei Übersteigen der jeweiligen Grenzwerte mögliche Ineffizienzen ersichtlich gemacht werden. Dabei ist die Mindestvoraussetzung, wie im ENTECTIV möglich, das Einrichten von statischen Schwellwerten. Jedoch ist es meist schwierig bei dynamischen Verbräuchen, wie z.B. den Wärmeverbrauch, einen minimalen und maximalen Schwellwert zu bestimmen. Deshalb wäre sinnvoll anhand Regressionsverfahren diese Schwellwerte zu bestimmen, damit Abhängigkeiten wie z.B. die Außentemperatur berücksichtigt werden können. Über dieses Verfahren kann

zusätzlich auch eine Baseline gebildet werden, mit welcher die jeweiligen aktuellen Verbräuche bewertet werden kann. Außerdem kann anhand Trends, wie eine anhaltende Steigerung des Verbrauchs, mithilfe dieser Baselines erkannt und durch ein Frühwarnsystem eine Alarmierung ausgegeben werden.

Ein weiterer wichtiger Aspekt damit ein Energiemonitoringsystem erfolgreich geführt werden kann, ist die organisatorische und kommunikative Aufwand, welcher zwischen dem Dienstleister geführt werden muss. Es sollte klar geregelt sein, welcher Mitarbeiter welche Zuständigkeit erfüllen muss. Registriert das Monitoringsystem ein Mehrverbrauch und alarmiert den zuständigen Betreuer, so muss dieser dafür Sorge tragen, dass der Fehler behoben wird. Auch wäre es sinnvoll beim detektierten von Einsparpotentialen den Kunden mit berechneten Effizienzmaßnahmen aufzuklären. So können diesem die möglichen jährlichen Kostenersparnisse und die Amortisation der ausgeführten Maßnahmen präsentiert werden. So kann erfolgreich der PDCA-Zyklus nach dem Energiemanagement ISO 50001 gelingen. Des Weiteren sollte dem Kunden eine Plattform geboten werden, auf welchem dieser seine Verbräuche, Energiekennzahlen transparent und kundenspezifisch zur Verfügung gestellt werden. Dies kann anhand übersichtlichen Dashboards umgesetzt werden.

Das im Klinikum [REDACTED] installierte ENTECTIV besitzt, wie bereits beschrieben, die grundlegenden Funktionalitäten, welche ein Energiemonitoringsystem besitzen muss. Trotzdem gibt es weitere Möglichkeiten, wie Einsparpotenziale in solch komplexen Liegenschaften, wie in einem Krankenhaus erkannt werden können. Anhand eines Standardlastprofiles, welches wie in dieser Arbeit aus den Bettenhäusern gewonnen werden, kann man eine Baseline vorgeben, mit welchem verschiedene Nutzungszonen bewertet werden können. Für das Unternehmen ENGIE Deutschland wäre es auch sinnvoll, diese Lastprofile in mehreren Krankenhäusern zu bilden und in einem Benchmarking zusammenzutragen, um auf diese Weise die Datenlage zu verbessern und das Best in Class Profil herauszufinden. Solch ein Benchmarking könnte auch in Zusammenarbeit mit dem Krankenhausinstitut erstellt werden. Außerdem könnte man auf diese Weise auch neue Energiekennzahlen für die Bewertung einzelner Krankenhäuser gewinnen.

Abschließend kann festgehalten werden, dass es viele verschiedene nützliche Funktionalitäten gibt, welche ein Energiemonitoringsystem besitzen kann. Zentral dabei ist, Mehrverbrauch zu verhindern, Einsparpotentiale aufzudecken und diese dem Kunden transparent zu präsentieren.

8 Verzeichnisse

8.1 Literaturverzeichnis

ASUE (2010): Blockheizkraftwerke in Krankenhäusern. Kostensenkung durch effiziente Strom- und Wärmeerzeugung, S. 1–36.

B.KWK (2020): Neue Festlegung für Vollbenutzungsstunden im KWKG. Zukünftige Auslegung von KWK als Zukünftige Auslegung von KWK als stromerzeugende Heizung in der Wohnungswirtschaft, URL: www.bkwk.de.

Bälz, Uwe/Kilpper-Bälz, Renate (2018): Nachhaltiger Einsatz von Dampf. Übergabestation nutzt überschüssigen Dampf, in: EuroHeat&Power, Nr. 10, S. 30–31.

Bauer, Stefan (2022): Die Witterung im Jahr 2021. Meteorologischer Jahresbericht für Stuttgart Hohenheim, URL: www.stadtklima-stuttgart.de.

Bauer, U. (1988): Kennzahlensystem im betrieblichen Energiemanagement. Dissertation. Technischen Universität, Graz.

Becker, Maximilian (2019): Technisches Merkblatt. Bundesförderung für das Pilotprogramm Einsparzähler, Eschborn.

Bernard, Thomas u. a. (2020): Leitfaden Effizientes Monitoring von Energiedaten im Bereich des Facilitymanagements. Praxisnaher Leitfaden zu Design, Aufbau und -Betrieb eines Energiemonitoring-Workflows – mit Ergebnissen aus 5 Demonstrator--Liegenschaften., 06.2020. Jg.

Bode, Marc (2021): MRT kühlen: Kältemaschine und Helium, URL: [www.https://www.deutsche-thermo.de/wiki/mrt-kuehlen-kaeltemaschine-und-helium](https://www.deutsche-thermo.de/wiki/mrt-kuehlen-kaeltemaschine-und-helium).

Bränzel, Juliane u. a. (2019): Energiemanagement. Praxisbuch für Fachkräfte, Berater und Manager, 2. Aufl., Wiesbaden.

Brautsch, Markus/Lechner, Raphael (2013): Effizienzsteigerung durch Modellkonfiguration in BHKW-Anlagen. Abschlussbericht. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung, Stuttgart.

Bundesnetzagentur (2020): Leitfaden. zum Messen und Schätzen bei EEG-Umlagepflichten, in: Leitfaden, S. 1–85.

Chmella, Tim (2021): Modul 3 - MSR, Sensorik und Energiemanagement-Software. Anlage zum Merkblatt Bundesförderung für Energie- und Ressourceneffizienz in der Wirtschaft – Zuschuss, 11.2021. Jg.

DAkKS, Deutsche Akkreditierungsstelle (2014): DAkKS- Anwendungshinweise DIN EN ISO 50001. Erfassung wesentlicher Energieverbräuche und Überwachung, 05.2014. Jg.

DATAtab (2022a): Boxplot, URL: www.datatab.net.

DATAtab (2022b): Was ist die Standardabweichung?, URL: www.datatab.net.

DelftStack (2021): Scipy `scipy.optimize.curve_fit` Method, URL: www.delftstack.com/api/scipy/scipy-scipy.optimize.curve_fit-method.

Deutsches Institut für Normung (DIN) (06.2006): DIN 5035-3 - 2006. Beleuchtung mit künstlichem Licht – Teil 3: Beleuchtung im Gesundheitswesen, DIN 5035-3:2006, 10772 Berlin.

Deutsches Institut für Normung (DIN) (04.2018): DIN EN ISO 50015 - 2018, ISO 50015:2014, 10772 Berlin.

Deutsches Institut für Normung (DIN) (12.2018): DIN EN ISO 50001 - 2018, ISO 50001:2018, 10772 Berlin.

Deutsches Krankenhausinstitut (2014): Durchschnittlicher Energieverbrauch pro m² Nettogrundfläche deutscher Krankenhäusern nach Krankenhausgröße im Jahr 2013. Krankenhäuser - Durchschnittlicher Energieverbrauch nach Krankenhausgröße 2013, S. 1–4.

Dodge/Yadolah (2008): The Concise Encyclopedia of Statistics. With 247 Tables, Berlin.

Droste, Andrea/Loh, Markus/Bergheim, Marlies (2020): Erneuerbare Energien und Energieeffizienz in deutschen Kliniken. Energieeffizienz in deutschen Kliniken, in: klinergie 2020, 2020. Jg., S. 1–40.

DWD (2017): agrowetter Prognose, Jahresabo, URL: <https://www.dwd-shop.de/>.

DWD (2022a): Klimafaktoren (KF) für Energieverbrauchsangabe, URL: www.opendata.dwd.de.

DWD (2022b): Open Data Bereich des Climate Data Center, URL: www.opendata.dwd.de.

EAW (2014): Vergleich einer Absorptionskältemaschine mit herkömmlicher Kompressionstechnik, URL: www.eaw-energieanlagenbau.de.

EDL-G (2010): Energiedienstleistungsgesetz in der Fassung vom Nichtamtliche Lesefassung, in: Bundesamt für Wirtschaft und Klimaschutz.

ENGIE - UK & Ireland (2020): C3NTINEL.

ENGIE Deutschland GmbH (2016): Anleitung für das Energiedatenmanagementsystem Entectiv, S. 1–27.

European Commission (2020): EDGAR. Emissions Database for Global Atmospheric Research, URL: www.edgar.jrc.ec.europa.eu.

EWT (2018): Vollentsalztes und Entsalztes Wasser in der Kesselspeisewasseraufbereitung. Gegenüberstellung von Ionenaustausch- und Membranverfahren, URL: <http://www.ewt-wasser.de/de/wissen/vollentsalztes-wasser>.

Helfert, Mark/Schraml, Philipp (2022): Leitfaden Energiemonitoring, in: ETA-Solutions Energiesystemplanung, S. 1–26.

Herdan, Thorsten (2019): Förderbekanntmachung „Pilotprogramm Einsparzähler“, Berlin.

Hu, S. C./Chen, J. D./Chuah, Y. K. (2004): Energy Cost and Consumption in a Large Acute Hospital, in: International Journal on Architectural Science, Nr. 5, S. 1–9.

Klinikum [REDACTED] (2022): ÜBER UNS. Kompetenz und Engagement für Ihre Gesundheit, URL: [www.\[REDACTED\].de](http://www.[REDACTED].de).

Knut Grabowski (2015): 5-Kennzahlmethodik-Methodik-OeKOTEC-Energiemanagement-GmbH, in: BMUB - Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit.

Küting, Karlheinz/Weber, Claus-Peter (2006): Die Bilanzanalyse, 10. Aufl., Stuttgart.

Larissa Labenski (2016): Entwicklung eines anwendungsorientierten Energiedatenmanagementsystems für Energieeinspar-Projekte. Masterarbeit. Universität Stuttgart, Masterarbeit.

Maya (2020): Heisswasser - Absorptionskältemaschinen. Serie WFC und M.

McClelland, Lou/Cook, Stuart W. (1979): Energy Conservation Effects of Continuous In-Home Feedback in All-Electric Homes, University of Colorado, Boulder.

- Mühl, Thomas (2014):** Einführung in die elektrische Messtechnik. Grundlagen, Messverfahren, Anwendungen, 4. Aufl., Wiesbaden.
- Nitz, Wolfgang R. (2012):** MRT-Guide für MTRA/RT, Stuttgart.
- NOVA (o.J.):** Luftbefeuchtung, URL: www.kampmann.de/nova/rlt-geraet/luftbefeuchtung, Stand: 17. Juni 2022.
- Plura, Stefan (2008):** Entwicklung einer zweistufigen Absorptionskältemaschine zur effizienten Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung. Dissertation. TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN, München.
- Recknagel/Sprenger/Albers (2020):** Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik, einschließlich Trinkwasser- und Kältetechnik sowie Energiekonzepte, 80. Aufl., Kleinauflagen.
- RKI (2022):** Wöchentlicher Lagebericht des RKI zur Coronavirus-Krankheit-2019. 02.06.2022 – Aktueller Stand für Deutschland, Berlin.
- Schellong, Wolfgang (2016):** Analyse und Optimierung von Energieverbundsystemen, Berlin, Heidelberg.
- Schmidt, D./Goetschkes, C./Pollerberg, C. (2020):** Kältetechnik in Deutschland. Steckbriefe zu Kältetechnologien, Oberhausen.
- Sewe, Erik (2018):** Automatisierte Fehlererkennung in Heizungsanlagen. Dissertation. Technische Universität Dresden, Dresden.
- Statistischen Bundesamtes (2022):** Planbetten, URL: www.gbe-bund.de/gbe.
- SWE (2022):** Abrechnungsbrennwerte der Stadtwerke [REDACTED] S. 1–4.
- Tippkötter, Reiner/Schüwer, Dietmar (2010):** Leitfaden Energieeffizienz für Krankenhäuser, S. 1–159.
- Tokos, Michael/Hilburger, Gottfried (2016):** Ganzheitliche Betrachtung von Wäschereien hinsichtlich Wäschelogistik, Maschinentechnik und Aufbereitungsverfahren zur prozessintegrierten Steigerung der Energieeffizienz von Wäschereien. Gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt.
- VDI (2007):** VDI 4602 Blatt 1 Energiemanagement Begriffe, 10772 Berlin.
- VDI (2013):** VDI 4602 Blatt 2 Energiemanagement, 10772 Berlin.
- VDI (08.2014):** VDI 4661 Energiekenngrößen, 10772 Berlin.
- VDI (02.2015):** VDI 4662 Bildung, Implementierung und Nutzung von Energiekennwerten, 10772 Berlin.
- viamedica UG (2016):** Energiesparfiebel. Krankenhausmitarbeiter schützen das Klima.
- visualenergy (2018):** visualenergy5-Missions Handbuch, Nr. 2.10.
- Wes McKinney (2022):** pandas: powerful Python data analysis toolkit, URL: www.pandas.pydata.org.

8.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Entwicklung des Gas- und Strompreises von 2008 bis 2021, halbjährliche Auflösung	1
Abbildung 2: PDCA-Zyklus eines Energiemanagementsystems nach der ISO 50001.....	6
Abbildung 3: Anwendungsmöglichkeiten von Energiekennzahlen (EnPI) in einem Energiemonitoringsystem (Quelle:[Bauer, 1988; VDI, 08.2014, S. 34], eigene Darstellung).....	8
Abbildung 4: Bildung und Aufteilung von Bilanzräumen nach dem Top-down- und dem Button-up-Ansatz.....	11
Abbildung 5: typischer Systemaufbau bei der Verwendung des Energiemonitoringsystems ENTECTIV	16
Abbildung 6: Typischer Energiefluss in Krankenhäusern. Vom Energiebezug bis zum Verbrauch in den einzelnen Querschnittstechnologien	19
Abbildung 7: Umgesetzte Zählerstruktur im Klinikum [REDACTED] Aufteilung in drei Bilanzgrenzen nach dem Top-Down Ansatz.	23
Abbildung 8: Elektrische Leistung des erzeugten Stroms durch das BHKW im Jahr 2021	25
Abbildung 9: Vergleich der Stromlastgänge des gesamten Klinikums [REDACTED] der Kalenderwochen 2 und 26 im Jahr 2021	28
Abbildung 10: Jahresstromverbrauch pro Planbett (EnPI) der Jahre 2019-2021 des Klinikums [REDACTED] bewertet (Ampelbewertung) nach dem Mittelwert und Richtwert der Studie „Energetischen Benchmarking für Krankenhäuser“, Versorgungstufe IV	29
Abbildung 11: Jahresverlauf des Gesamtwärmeverbrauchs pro Tag abzüglich dem Wärmebedarf für die Absorptionskältemaschine zur Bestimmung des Grundbedarfs für Warmwasser und Küche	31
Abbildung 12: Tageswärmeverbräuche unbereinigt und witterungsbereinigt aufgetragen über die Jahre 2019, 2020 und 2021.	34
Abbildung 13: Vergleich der Kennzahlen des witterungsbereinigtem Jahreswärmeverbräuche normiert auf die Nettogrundfläche der einzelnen Häuser des Klinikums [REDACTED]	35
Abbildung 14: Vergleich des Trinkwasserverbrauchs pro Stunde des gesamten Klinikums [REDACTED] der Kalenderwochen 3 und 26 im Jahr 2021	36
Abbildung 15: Wasserverbrauch pro Planbett (EnPI) der Jahre 2019-2021 des Klinikums [REDACTED] bewertet (Ampelbewertung) nach dem Mittelwert und Richtwert der Studie „Energetischen Benchmarking für Krankenhäuser“, Versorgungstufe IV	37
Abbildung 16: Vergleich der Kennzahlen der Jahrestrinkwasserverbräuche normiert auf die Nettogrundfläche der einzelnen Häuser des Klinikums [REDACTED]	38
Abbildung 17: Sankey-Diagramm: Aufteilung des Trinkwasserverbrauchs des Haus 1 in verschiedenen Bereichen. Die Größen der einzelnen Anteile sind nicht belegt und wurden abgeschätzt.	39
Abbildung 18: Heatmap des gesamten Wärmeverbrauchs des Hauses 4 für das Jahr 2021, stündliche Auflösung der jeweiligen Pixel	41

Abbildung 19: Absorptionskältekreislauf in einer YAZAKI-Kältemaschine, p-T-Phasendiagramm des Absorptionskältekreislaufs untergliedert in die jeweiligen Bereiche.....	42
Abbildung 20: Jahresverlauf des Wärmeverbrauch pro Tag [MWh/Tag] des Zählers „dynamische Wärme Haus 4“ (blau + orange) aufgeteilt in Heizenergie für die Absorptionskälte (blau) und dynamische Wärme (orange) für das Jahr 2021.....	43
Abbildung 21: Sankey-Diagramm: Aufteilung des Jahreswärmeverbrauchs des Haus 4 für das Jahres 2021.....	45
Abbildung 22: Heatmap des gesamten Stromverbrauchs des Hauses 4 für das Jahr 2021, stündliche Auflösung der jeweiligen Pixel.....	46
Abbildung 23: Stromlastprofil der einzelnen Bettenhäuser in der Kalenderwoche 26 des Jahres 2021	48
Abbildung 24: Stromlastprofil der einzelnen Bettenhäuser in der Kalenderwoche 26 des Jahres 2021 zuzugliche der Standartabweichung zum jeweiligen Zeitpunkt. Das Lastprofil von Haus 6 ist um 1 kW _{el} /Bett nach unten verschoben.....	50
Abbildung 25: Verschiedene Fehler in den Messdaten am Beispiel des Gesamtwärmeverbrauchs des Klinikum [REDACTED] aufgetragen in einer stündlichen Auflösung.....	52
Abbildung 26: Baseline des tagesabhängigen arithmetischen Mittelwertes des Stromverbrauches des Klinikum [REDACTED] zur Bewertung der Tagesverbräuche des Januars 2022	55
Abbildung 27: Darstellung der Tagesstromverbräuche der Jahre 2019-2021 des Klinikums [REDACTED] nach der Boxplot-Methode. Es wird zwischen Verbräuche an Wochenenden (inkl. Feiertagen) und Wochentagen unterschieden.	56
Abbildung 28: Darstellung der Tageswärmeverbräuche der Küche für die Jahre 2019 – 2021 und Bestimmung der Baseline sowie des oberen und unteren Schwellwerts nach der multiplen, nichtlinearen Regressionsmethode.....	58
Abbildung 29: Beispiel Dashboard mit individuellen Grafiken aus dem Energiemonitoringsystem C3NTINEL	59

8.3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Beispiel eines Datenerfassungsplans anhand zwei verschiedener Messstellen	12
Tabelle2: Energiekennzahlen pro Planbett aus Studie „Energetischen Benchmarking für Krankenhäuser“	21
Tabelle 3: Einsparung der Kosten der jeweiligen Energieträger durch den Einsatz des BHKWs im Jahr 2021.....	26
Tabelle 4: Energiekennzahlen normiert auf Planbett, NGF und stationäre Fallzahlen mit dem jeweiligen Mittelwert aus der „Energetischen Benchmarking für Krankenhäuser“, V. IV	29

9 Anhang

9.1 Energiepreise des Klinikums [REDACTED] 2021

Strom:	226,00 €/MWh
Fernwärme:	96,50 €/MWh
Erdgas:	47,66 €/MWh
Wasser (netto):	2,15 €/m ³
Abwasser (netto):	2,19 €/m ³
Bereitstellungskosten Trinkwasser:	464,00 €/Monat

9.2 CO₂-Emissionsfaktoren 2021

Strommix:	0,366 t/MWh	[BAFA, 2021, S. 6]
Fernwärme:	0,162 t/MWh	[SWE, 2016]
Erdgas (bezogen auf Heizwert):	0,201 t/MWh	[BAFA, 2021, S. 6]

9.3 Klimafaktoren KF [DWD, 2022]

2019:	1,13
2020:	1,18
2021:	0,95

9.4 Gebäudeübersicht

	Verwendung	Nettogrundfläche NGF	Anzahl Planbetten
Haus 1	Verbindungsbau	3.060,6 m ²	0
Haus 2	Bettenhaus West	8.258,2 m ²	162
Haus 3	Bettenhaus Nord	13.728,5 m ²	114
Haus 4	Behandlungsbau	6.584,2 m ²	0
Haus 5	Bettenhaus Ost	4.903, m ²	105
Haus 6	Bettenhaus Süd	2.790,4 m ²	51
Haus 7	Funktionsbau	4.692,9 m ²	13
Haus 7.1	Pavillion-Station	1.138,4 m ²	41
Haus 8	Psychosomatik	993,6 m ²	25
Haus 9	Kinderklinik	16.690,8 m ²	95
Haus 10	Casino	1.413,8 m ²	0
Haus 11	Verwaltung	3.310,5 m ²	0
Haus 12	Technische Abt.	2.458,8 m ²	0
Haus 13	Küche + Reinigung	1.971,8 m ²	0
Haus 14	Personalwohnheim	1.711, m ²	26
Haus 15	Forum	443,2 m ²	0
Haus 16	Personalwohnheim	2.451,1 m ²	6
Haus 17	Schule für Pflegegeber.	3.339,6 m ²	0
Haus 18	Personalwohn.	3.695,7 m ²	24
Gesamt:	Klinikum [REDACTED]	83.636,2 m ²	662

9.5 Abbildungen und Tabellen

Angemessenheit der Energiemessung nach der DakKS (Deutsche Akkreditierungsstelle) (Quelle: [DAkKS, 2014])

Summe der jährlichen Energiekosten	Art der Datenerfassung
bis 10.000 €	Ggf. Nutzung der Registrierenden Leistungsmessung, theoretische Abschätzung
10.000 – 100.000 €	Nutzung der Registrierenden Leistungsmessung, theoretische Abschätzung, Verifizierung durch mobile Messung, ggf. Nachrüstung einzelner stationärer Zähler
100.000 – 1.000.000 €	Nutzung der Registrierenden Leistungsmessung, theoretische Abschätzung, Verifizierung durch mobile Messung, kontinuierliche Messung der Unterverteilungen
über 1.000.000 €	Nutzung der Registrierenden Leistungsmessung, theoretische Abschätzung, Verifizierung durch mobile Messung, kontinuierliche Messung der Unterverteilungen, automatische Datenerfassung und Auswertung

Energiekennzahlen pro Nettogrundfläche und stationären Fallzahlen aus Studie „Energetischen Benchmarking für Krankenhäuser“ (Quelle: [Tippkötter/Schüwer, 2010, S. 108], eigene Darstellung)

Versorgungsstufe	Planbetten	Wärmeverbrauch		Stromverbrauch		Trinkwasserverbrauch	
		[kWh/m ² (NGF)]	[kWh/Fallzahl]	[kWh/m ² (NGF)]	[kWh/Fallzahl]	[m ³ -W./m ² (NGF)]	[m ³ -W./Fallzahl]
I	0 - 250	231	1.092	106	376	1,3	5,8
II	250 - 450	240	724	117	352	1,2	3,4
III	450 - 650	250	876	138	441	1,2	4,4
IV	650 - 1000	238	1.081	127	671	1,2	5,9
V	über 1000	229	619	118	331	0,9	3,0

Vergleich der Kennzahlen der Jahresstromverbräuche normiert auf die Nettogrundfläche der einzelnen Häuser des Klinikums

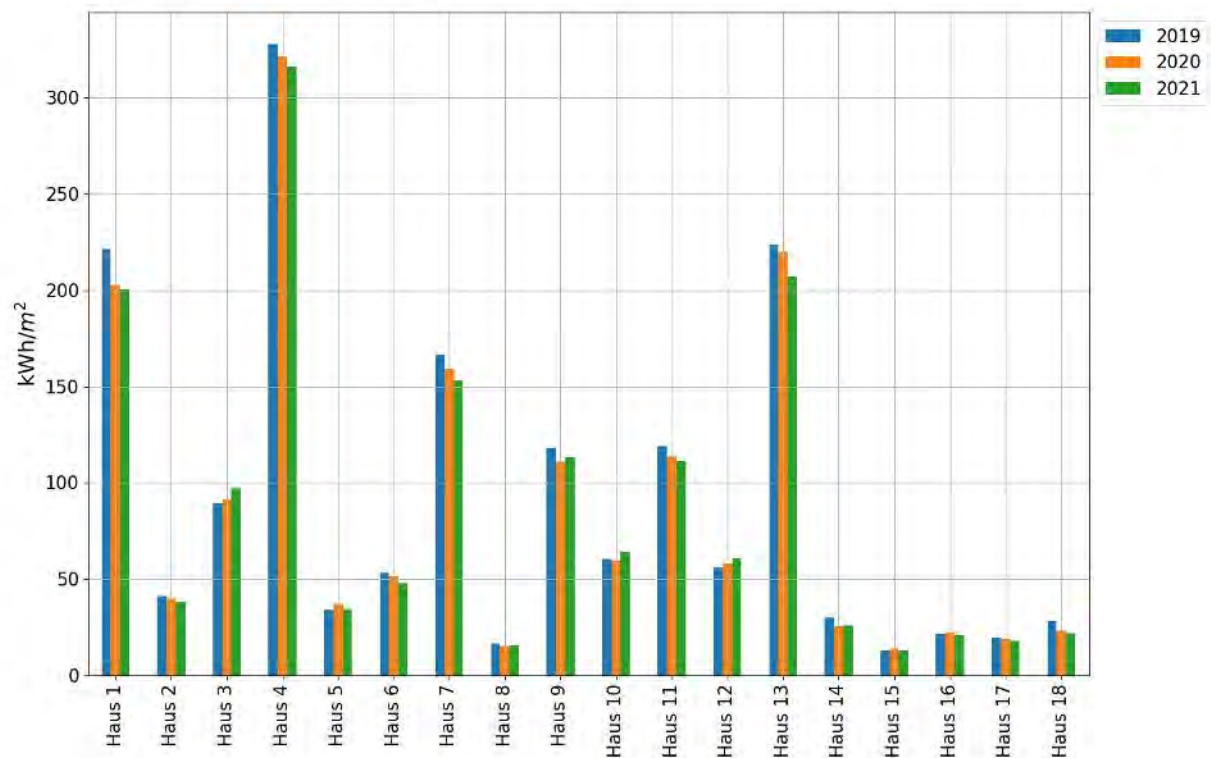
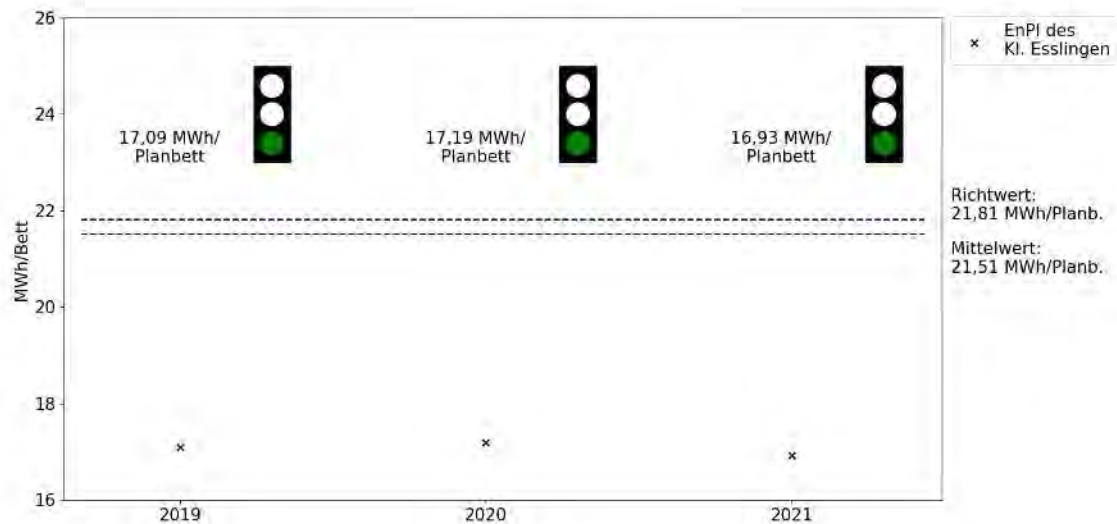


Abbildung: Jahreswärmeverbrauch pro Planbett (EnPI) der einzelnen Jahre des Klinikums [REDACTED] bewertet (Ampelbewertung) nach dem Mittelwert und Richtwert der Studie „Energetischen Benchmarking für Krankenhäuser“, Versorgungstufe IV (Quelle: [Tippkötter/Schüwer, 2010, S. 98])

Tabelle: Jahreswärmeverbrauch normiert auf Nettogrundfläche und stationäre Fallzahlen (Quelle: [Tippkötter/Schüwer, 2010, S. 98])



	EnPI: pro Planbett [MWh/Bett]	EnPI: pro Nettogrundfläche [kWh/m ² NGF]	EnPI: pro Fallzahl [kWh/Patient]	
Mittelwert	21,51	238,0	1081,0	13.100 Pat.
2019	17,09	135,3	404,0	28.000 Pat.
2020	17,19	136,1	406,4	
2021	16,93	134,0	400,2	

Jahreswasserverbrauch normiert auf die Nettogrundfläche und stationäre Fallzahlen nach dem Mittelwert und Richtwert der Studie „Energetischen Benchmarking für Krankenhäuser“, Versorgungstufe IV (Quelle: [Tippkötter/Schüwer, 2010, S. 98])

	EnPI: pro Planbett [m³/Bett]	EnPI: pro Nettogrundfläche [m³-W./m²NGF]	EnPI: pro Fallzahl [m³/Patient]
Mittelwert	108,00	1,2	5,9
2019	108,61	1,4	2,6
2020	97,91	1,3	2,3
2021	91,94	1,2	2,2

ca. 13.100 Patienten
28.000 Patienten

Vergleich der Kennzahlen des spezifischen witterungsbedingtem Jahreswärmeverbräuche normiert auf die Nettogrundfläche der einzelnen Häuser des Klinikums [REDACTED] Im Haus 4 ist der Verbrauch für der Heizenergie für die beiden Absorptionskältemaschinen abgezogen worden.

