

Diplomarbeit

Reduktionspotential von Baustromverbrauch unter besonderer Berücksichtigung smarter Technologien

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grads

Diplom-Ingenieur

eingereicht an der TU Wien, Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwesen

Diploma Thesis

Potential for reduction of electricity consumption using smart technologies

submitted in satisfaction of the requirements for the degree

Diplom-Ingenieur

of the TU Wien, Faculty of Civil and Environmental Engineering

Ing. **Christoph Appl**, BSc

Matr.Nr.: 01363693

Betreuung: Univ.Prof. Dr.-Ing. **Frank Lulei**

Univ.Ass. Dipl.-Ing. **Maximilian Weigert**

Univ.Ass. **Oleksandr Melnyk**, MSc

Institut für Baubetrieb und Bauwirtschaft

Forschungsbereich Baubetrieb und Bauverfahrenstechnik

Technische Universität Wien

Karlsplatz 13/235, 1040 Wien, Österreich

Wien, im November 2023

Kurzfassung

Neben steigenden Energiepreisen beschäftigen gesellschaftliche, ökologische und strengere rechtliche Rahmenbedingungen betreffend des Energieverbrauchs die Bauindustrie. Um weiterhin wettbewerbsfähig bleiben zu können, ist es unerlässlich den Energieverbrauch auf Baustellen und somit die laufenden Kosten zu reduzieren. Die vorliegende Diplomarbeit beschäftigt sich mit dem Stromverbrauch ausgewählter Baustellen und zeigt Energieeinsparpotential auf.

Zu den untersuchten Baustellen gehören zwei Gleiserneuerungsbaustellen in Wien und ein mehrgeschossiges Wohnbauprojekt in Kaltenleutgeben. Bei den Gleiserneuerungsvorhaben lag der Fokus auf dem Bauleitungscontainer. In diesem Zusammenhang fanden über die gesamte Sanierungszeit detaillierte Stromverbrauchserhebungen auf Stromkreis- bzw. Geräteebene innerhalb des Containers statt. Ein Rückgriff auf die vorliegenden Netzbetreiberrechnungen beim laufenden Wohnbauprojekt in Kaltenleutgeben ermöglichte eine Betrachtung der bisherigen Bauzeit und die Ableitung von Verbrauchsverteilungen, Leistungsspitzen und Volllaststunden. Von besonderem Vorteil war der Umstand, dass jeweils ein Zählpunkt für die Baustelleneinrichtung und für den Baubetrieb (inklusive Turmdrehkran) vorhanden war. Aus diesem Grund war erstmalig eine getrennte Auswertung der genannten Baustellenbereiche möglich. Ergänzende Messungen ermöglichten in der betrachteten Bauzeit von Ende Dezember 2022 bis Anfang März 2023 eine Differenzierung zwischen allgemeinem Baubetrieb und Turmdrehkran. Im Bereich Baustelleneinrichtung lag der Erhebungsschwerpunkt am Stromverbrauch der Beleuchtung und der Heizung.

Auf Grundlage der durchgeführten Messungen ist ein erhebliches Einsparpotential zu erkennen. Dieses Potential ist auf die richtige Dimensionierung des Baustromanschlusses, die Auslastung der angemeldeten Anschlussleistung und den Stromverbrauch zurückzuführen. Die durchgeführten Erhebungen zeigen, dass einfache Maßnahmen den Stromverbrauch um mehr als 50 % und sich die laufenden Netzkosten bei Steigerung der Volllaststunden um zirka 30 % senken lassen.

Schlagwörter: Stromverbrauch, Baustelleneinrichtung, Baubetrieb, Container, Stromverbraucher auf der Baustelle, elektrische Baugeräte, Energieeffizienz

Abstract

In addition to rising energy prices, the construction industry is facing increasingly stringent regulations and legal requirements with respect to energy consumption. In order to remain competitive, it is essential to reduce energy consumption on construction sites, and thus, running costs. This diploma thesis is concerned with the power consumption of selected construction sites and demonstrates savings potential.

The investigated construction sites includes two track renewal construction sites in Vienna and a multi-storey housing project in Kaltenleutgeben. In the track renewal projects, the focus was on the construction management container. In this context, detailed electricity consumption surveys were carried out for the first time at circuit and device level over the entire renovation period. The available network operator calculations for the ongoing residential building project in Kaltenleutgeben enabled an examination of the previous construction period and the derivation of consumption distributions, power peaks and full load hours. Of particular advantage was the fact that the network operator had set up metering points both for the construction site equipment and for the construction operation (including the tower crane), enabling for the first time a separate evaluation. Additional measurements enabled the differentiation between general construction operations and tower cranes during the considered construction period from the end of December 2022 to the beginning of March 2023. Regarding the construction site equipment, the focus of the survey was on the electricity consumption of lighting and heating.

Based on the measurements, a considerable savings potential can be identified. This is due to the correct dimensioning of the site power supply, the utilization of the registered connected load and the power consumption. Surveys show that simple measures can reduce electricity consumption by more than 50 %, and the running network costs by around 30 %, when the number of full-load hours is increased.

Keywords: Electricity consumption, construction site equipment, construction, containers, electricity consumers on the construction site, electrical construction equipment, energy efficiency

Danksagung

Zunächst gilt mein Dank Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Frank Lulei, welcher die Betreuung der vorliegenden Diplomarbeit von Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Gerald Goger im Juli 2023 übernahm. In diesem Zusammenhang sind die praxisnahen Lehrveranstaltungen am Institut für Baubetrieb und Bauwirtschaft hervorzuheben, die ausschlaggebend für die Wahl des Diplomarbeitsthemas waren. Mein Dank für die kontinuierliche Betreuung und Unterstützung während der Forschung für die Diplomarbeit gilt meinen beiden betreuenden Assistenten Herrn Dipl.-Ing. Maximilian Weigert und Herrn Oleksander Melnyk, MSc. Der fachliche Diskurs und die wissenschaftlichen Anregungen haben maßgeblich zur erfolgreichen Vollendung der Diplomarbeit beigetragen.

Die Suche nach Bauvorhaben zur Beantwortung der gewählten Forschungsfragen war eine Herausforderung und verlangte neben Überzeugungsarbeit vor allem viel Glück. Die STRABAG und die eingeteilte Bauleitungsmannschaft bei den beiden Gleiserneuerungsvorhaben am Landstraßer Gürtel und auf der Simmeringer Hauptstraße erwiesen sich dahingehend als erster verlässlicher Forschungspartner. In weiterer Folge gilt ein besonderer Dank meiner Studienkollegin Fr. Ing. Kerstin Groß, die als angestellte KalkulantIn den Kontakt zur Firma Sedlak vermittelte und so den Blick in den Zählerkasten des Hochbaus eröffnete.

Stellvertretend für das Unternehmen Sedlak danke ich Frau Mag.iur. Simone Grassauer, ihres Zeichens Nachhaltigkeitsbeauftragte, für die Unterstützung und die Anschaffung beziehungsweise Anmietung der Messausrüstung.

Ein weiterer besonderer Dank für das entgegenbrachte Vertrauen und Verständnis gilt allen beteiligten Baumannschaften – unvergessen der Gedankenaustausch in lauen Sommernächten über E-Radlader und das schöne Burgenland. Eiskalte Container und dennoch verständnisvolle Poliere bleiben mir als mahnende Erinnerung Zeitzonen richtig einzustellen und durchgeführte Softwareupdates auf Funktion zu prüfen.

Meinen Freunden und StudienkollegInnen möchte ich für die abwechslungsreiche Studienzeit danken. Ein stilles Gedenken sei jenen gesetzt, die das Ende ihres Studiums nicht erleben durften.

Carmen, Magdalena, Lisamarie und Dominik danke ich für das Lektorat der vorliegenden Diplomarbeit. Dankend blicke ich auf zahlreiche Erfahrungen, Gespräche und Vorträge auf sowie abseits der Technischen Universität Wien zurück, die den persönlichen Nährboden für die wissenschaftliche Auseinandersetzung mit dem gewählten Diplomarbeitsthema bildeten.

Abschließend gilt mein größter Dank meiner Familie, im Besonderen meinen Eltern Marianne und Johannes, die mich stets bedingungslos in meinem Leben unterstützt und mir den notwendigen Rückhalt für die Vollendung der vorliegenden Diplomarbeit gegeben haben.

Family makes the dream work ...

Zitat

„Lassen Sie uns den Begriff **Fortschritt** neu definieren, in dem Sinne, dass es nicht unbedingt notwendig ist etwas zu tun, nur weil wir in der Lage sind, auf diesem Gebiet etwas zu tun.“¹

¹Zitat aus dem Spielfilm „STAR TREK VI: Das unentdeckte Land“ - USA, 1991

Begriffserklärungen

(Energie-)Managementsysteme bezeichnen anerkannte regelgebundene Managementsysteme, welche insbesondere Energieflüsse in einem Unternehmen erfassen, abbilden und bewerten, sowie Vorschläge für Energiesparmaßnahmen beinhalten. 1, 3, 4, 33

15-Minuten-Intervall übliches Messintervall für Energieverbrauchsmessungen. 31, 36

Blindleistung [kVAr] wird zum Aufbau der notwendigen Spannung benötigt und verrichtet im Gegensatz zur Wirkleistung keine nutzbare Leistung [1]. 12

Energieaudit ist ein systematisches Verfahren zur Erlangung ausreichender Information über das bestehende Energieverbrauchsprofil. Im Hinblick auf die Ermittlung und Quantifizierung der Möglichkeiten zur kostenwirksamen Energieeinsparung sind die Ergebnisse in einem Bericht zu erfassen. 1, 34

Ferrais-Zähler ist ein elektromechanisches Zählwerk, dass zur Abrechnungserstellung manuell abzulesen ist. Vergleiche hierzu den Smart Meter. 3, XII

Gleichzeitigkeitsfaktor [-] berücksichtigt, dass in der Realität selten alle Geräte gleichzeitig betrieben werden und daher die benötigte Leistung weit geringer als die Summe der Leistung aller vorhandener Verbrauchsgeräte ist. Überschlägig ist der Gleichzeitigkeitsfaktor laut Literatur zwischen 0,50 und 0,75 anzunehmen [1]. 12

Hochtarifzeit ist die Zeit zwischen 06:00 und 22:00 Uhr [2]. 1, 3

MERIT-Order-Prinzip stellt eine Besonderheit der Preisbildung am Strommarkt dar und bildet anhand der Einsatzreihenfolge von Kraftwerken die niedrigsten Grenzkosten ab. Das letzte zugeschaltete Kraftwerk bestimmt den Preis am Energiemarkt. 5

Netzebene bezeichnet einen Teilbereich des (Strom-)Netzes, der im Wesentlichen durch die Spannungsebene bestimmt wird [2]. 6, 31

Niedertarifzeit ist die Zeit zwischen 22:00 und 06:00 Uhr des Folgetages [3]. 1, 3, 7

Nullung ist eine Schutzmaßnahme gegenüber direktem Berühren von elektrischen Leitern. Das Schutzziel wird im Allgemeinen durch Anschluss von leitfähigen und berührbaren Gehäusen am Schutzpotentialausgleich erreicht. 16

Price Forwad Curve ist eine Darstellungsform der Preiserwartung auf Terminmärkten. 5

Scheinleistung [VA] ist die Summe von Wirk- und Blindleistung [1]. 12, 14

SCHUKO ist ein Akronym für Schutz-Kontakt und bezeichnet ein System von Steckern (CEE 7/4) und Steckdosen (CEE 7/3), das vorwiegend in Europa verbreitet ist [4]. 12, 38

Smart Meter ist ein digitales Zählwerk, das den Stromverbrauch bei entsprechender Konfiguration wahlweise im 15-Minuten oder 24h-Intervall zwecks Abrechnung an den zuständigen Netzbetreiber meldet. Vergleiche hierzu den Ferrais-Zähler. 3, 4, 35, 43, 48, 49, 63, XI

Wirkleistung ist die tatsächlich zur Verfügung stehende elektrische Leistung [1]. 12, 14

Wirkungsgrad bezeichnet das Verhältnis zwischen zugeführter und abgegebener Leistung innerhalb eines Verbrauchers [1]. 12

Abkürzungsverzeichnis

AEUV Vertrag über die Arbeitsweise der europäischen Union

AP Aufputz

ASchG 1994 ArbeitnehmerInnenschutzgesetz 1994

AStV Arbeitsstättenverordnung 1998

BGL Baugeräteliste 2020

BVerG 2018 Bundesvergabegesetz 2018

CEE Commission on the Rules for the Approval of the Electrical Equipment (eng.)

CFD Computational Fluid Dynamics (eng.)

EAG 2020 Erneuerbare-Ausbau-Gesetz 2020

EEff-RefG 2023 Energieeffizienz-Reformgesetz 2023

EEffG 2014 Energieeffizienzgesetz 2014

EIWOG 2010 Elektrizitätswirtschafts- und Organisationsgesetz 2010

EnWG 2005 Energiewirtschaftsgesetz 2005

EPEX European Power Exchange (eng.)

ESV 2012 Elektroschutzverordnung 2012

ETG 1992 Elektrotechnikgesetz 1992

ETV 2020 Elektrotechnikverordnung 2020

EWG 2021 Erneuerbare-Wärme-Gesetz 2021

FCKW Fluorchlorkohlenwasserstoffe

GPRS General Packet Radio Service (eng.)

GWP Global Warming Potential (eng.)

HAWT Horizontalachsenwindturbine

ISO International Organization for Standardization (eng.)

KMU kleine und mittelständische Unternehmen

kW Kilowatt

KWEA Kleinwindenergieanlagen

LED Light Emitting Diode (eng.)

MPPT Maximum Power Point Tracking (eng.)

PDCA Plan-Do-Check-Act (eng.)

SEU Significant Energy Uses (eng.)

SNE-VO 2018 Systementgeltverordnung 2018

USV Unterbrechungsfreie Stromversorgung

VAWT Vertikalachsenwindturbine

ZAMG Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (seit 1. Jänner 2023: GeoSphere Austria)

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	2
1.2	Forschungsfragen	3
1.3	Forschungsmethode und -design	3
1.4	Forschungsabgrenzung	4
2	Analyse der Grundlagen	5
2.1	Grundlagen des Baustroms	11
2.2	Heizen, Kühlen, Lüften und Warmwasserbereitung	18
2.3	Pumpen und Motoren	22
2.4	Beleuchtung	23
2.5	Stromerzeugung auf Baustellen	24
2.6	Grundlagen des Lastmanagements	31
2.7	Grundlagen des Energiemanagements	33
3	Stromverbrauch auf Baustellen	35
3.1	Rahmenbedingungen	35
3.2	Messanlagen	35
3.3	Stromverbrauch auf urbanen Gleiserneuerungsbaustellen	37
3.3.1	Stromverbrauch der Baustelleneinrichtung Landstraßer Gürtel	39
3.3.2	Stromverbrauch der Baustelleneinrichtung Simmeringer Hauptstraße	43
3.3.3	Zusammenfassung	46
3.4	Stromverbrauch bei einem mehrgeschossigen Wohnbauprojekt	48
3.4.1	Stromverbrauch der Baustelleneinrichtung	51
3.4.2	Stromverbrauch des Baustellenbetriebs	55
3.4.3	Zusammenfassung	58
3.5	Energiemonitoring und -management auf Baustellen	60
3.5.1	Zusammenfassung	65
3.6	Energiesparpotentiale auf Baustellen	66
3.6.1	Zusammenfassung	70
4	Forschungsergebnisse	71
4.1	Diskussion der Forschungsergebnisse	71
4.2	Beantwortung der Forschungsfragen	74
4.3	Ausblick auf weiteren Forschungsbedarf	75
5	Fazit	76
6	Verzeichnisse & Anhang	77
6.1	Anhang	90

Kapitel 1

Einleitung

Die europäische Union forciert durch Verabschiedung von Richtlinien sowie Verordnungen den Ausstieg aus fossilen Energieträgern und möchte bis 2050 ein klimaneutrales Europa schaffen [5]. Der russische Angriff auf die Ukraine und der Wunsch nach Unabhängigkeit von russischen Gasimporten haben dieses Vorhaben in den Fokus gerückt. Die einhergehenden Transformationsprobleme wie Störung der Lieferketten, (Energie-)Preissteigerungen und Fachkräftemangel beschäftigen sowohl Unternehmen als auch Privatpersonen. Als Erfüllungsgehilfin zur Umsetzung der gesteckten Ziele ist die Bauindustrie gleichermaßen Gewinnerin und Leidtragende. Diese Dualität lässt sich am Entwurf zum Energieeffizienz-Reformgesetz 2023 (EEff-RefG 2023) besonders gut nachvollziehen. So steht auf der einen Seite eine verbindliche Sanierungsquote von 3 % für Bundesgebäude und auf der anderen die verpflichtende Einführung eines (Energie-)Managementsystems sowie die Abhaltung von regelmäßigen Energieaudits. [6]

Die rigorose Abkehr von fossilen Energieträgern stellt im Baubetrieb sowie in anderen Teilen der Industrie eine Zäsur dar. Der Umstieg auf rein elektrische Antriebssysteme ist kapitalintensiv und überzeugt die eingesetzten Baumannschaften im Hinblick auf Zuverlässigkeit sowie Leistungsfähigkeit (noch) nicht. Der Ministerialentwurf zum Erneuerbare-Wärme-Gesetz 2021 (EWG 2021) [7] sieht bis 2040 einen stufenweisen Phase-Out fossiler Energieträger zur Wärmebereitstellung in Gebäuden vor. Ziel ist es, das Pariser Klimaabkommen aus 2015 zu verwirklichen und bis 2050 ein klimaneutrales Österreich zu schaffen. Es ist mit einer Zunahme an privaten und gewerblichen elektrischen Verbrauchern (Wärmepumpen, E-Autos, etc.) zu rechnen. Die steigende Anzahl an elektrischen Verbrauchern und die Dezentralisierung der Stromversorgung belasten das öffentliche Stromnetz zusehends. [8]

Gesetzliche Vorgaben, wie das Erneuerbare-Ausbau-Gesetz 2020 (EAG 2020) [9], schaffen auf Versorgungsebene die Grundlagen für den erforderlichen Ausbau der Netzinfrastruktur sowie nachhaltiger Energieerzeugung. Deutschland ist im Gegensatz zu Österreich in der Gesetzgebung fortschrittlicher und konform mit den Richtlinien der Europäischen Union. Interessant ist zum Beispiel der in §14a EnWG 2005 gewählte Ansatz, der ein Anreizsystem für Verbraucher vorsieht. Bei netzorientierter Steuerung von Verbrauchseinrichtungen und Netzanschlüssen sind Betreiber von Elektrizitätsverteilernetzen verpflichtet, das Netzentgelt für Letztverbraucher zu reduzieren [10]. Zwar kennen das Elektrizitätswirtschafts- und Organisationsgesetz 2010 (EIWOG 2010) und die Systementgeltverordnung 2018 (SNE-VO 2018) unterschiedliche Tarifzonen, nämlich Hoch- und Nebentarifzeit, aber diese unterliegen einerseits zeitlich statischen Grenzen (06:00-22:00 und 22:00-06:00) und andererseits unterscheiden sich die beiden Tarifzonen nur in sechs Regionen betragslich. [11, 2]

Aufgrund mangelnder Kenntnisse dieser Zusammenhänge ist zu befürchten, dass in Österreich vor allem das kleine bis mittelständische Baugewerbe erhebliche Wettbewerbsnachteile erleidet. Grund hierfür ist, dass solche Betriebe in der Regel weder über die personellen noch zeitlichen Ressourcen verfügen, sich mit dem Thema „Energieeffizienz“ aktiv auseinanderzusetzen. Daher erscheint es lohnend, einen wissenschaftlichen Blick in die verschlossenen Verteilerkästen zu werfen, um Erkenntnisse über Stromverbrauch sowie Leistungsspitzen zu gewinnen.

1.1 Motivation

Die Errichtung einer großvolumigen Wohnhausanlage in unmittelbarer Nähe zu meinem Elternhaus hat mein Interesse für Stromverbrauch auf Baustellen geweckt. Kurz vor Beginn der Erdbauarbeiten richtete das ausführende Unternehmen die Baustelle ein und bezog das Baubüro. Das Baubüro bestand aus mehreren neben- und übereinander liegenden Containern. Eine außenliegende Holztreppe erschloss die einzelnen Stockwerke in vertikaler Richtung, in horizontaler Richtung ein Laubengang aus Metallfertigteilen. Um das sichere Begehen des Baubüros zu gewährleisten, kamen auf den Stirnseiten der Container zum Laubengang hin orientierte Lichtbalken zum Einsatz. An unzähligen Wochenenden, Nächten und Feiertagen, siehe Abbildung 1.1, brannte diese Beleuchtung ununterbrochen. Neben der allgemeinen Beleuchtung war der Sanitärcontainer ebenfalls meist hell erleuchtet. Bei genauerer Betrachtung fiel mir auf, dass es sich hierbei um energieineffiziente Leuchtstoffröhren handelte.



Abb. 1.1: Weihnachtsbeleuchtung am 24.12.2022 gegen 19:00

So schlug ich im Rahmen einer Gruppenarbeit in der Masterlehrveranstaltung „Bauprozessentwicklung 1“ vor, welches die fiktive Gründung eines Start-ups vorsah, Energiespar-Contracting für Bauunternehmen auf Baustellen anzubieten. Bei unserer Konkurrenzanalyse fiel zunächst auf, dass sich bisher kein Contracting-Unternehmen dem Kerngeschäft der Bauindustrie (Errichtung von Bauwerken) angenommen hat. Im weiteren Gedankenaustausch mit meinen StudienkollegInnen stellte sich heraus, dass der Mangel an fehlendem Energiesparbewusstsein auf Baustellen evident ist. Bisherige Praktikumszeiten und nebenberufliche Erfahrungen meiner StudienkollegInnen auf Baustellen waren von einem sehr legeren Umgang mit elektrischer Energie geprägt. Zur Entwicklung des Businessplans schätzten wir die Energieverschwendung auf Baustellen ab und kreierten ein „Energiespar-Abo“. Die Monetarisierung sah vor, dass wir einen Teil der Ersparnis als Erfolgsprämie vom Bauunternehmen vergütet bekommen. Der erfolgreiche Pitch am Ende der Lehrveranstaltung war Beginn der vorliegenden wissenschaftlichen Auseinandersetzung mit Baustrom. Mein Ziel ist es, mit vorliegender Diplomarbeit Energieverschwendung auf Baustellen zurückzudrängen und sinnvolle Potentiale zur Einsparung aufzuzeigen. Als Ausgangspunkt für dieses Unterfangen dienen zwei Gleiserneuerungsbaustellen der Wiener Linien und ein Wohnbauvorhaben der Firma Sedlak.

1.2 Forschungsfragen

Ausgehend von der vorgestellten Problematik knapper Ressourcen, rigider rechtlicher Rahmenbedingungen und dem Voranschreiten des Klimawandels ergeben sich folgende drei Forschungsfragen:

- Wie viel Strom verbrauchen Baustellen bzw. Teilbereiche davon?
- Welchen Einfluss hat laufendes Energiemonitoring und -management auf die Energieeffizienz von baubetrieblichen Abläufen?
- Wo liegen Einsparpotentiale und wie hoch sind diese zu bewerten?

1.3 Forschungsmethode und -design

Vorauszuschicken ist, dass bei der Ausarbeitung der vorliegenden Diplomarbeit neben einer umfassenden **Literaturrecherche** sowohl **qualitative als auch quantitative Forschungsmethoden** zur Anwendung kommen. Schwerpunktmäßig kommt die quantitative Methode in Form von Experimenten bei der Beantwortung der ersten beiden Forschungsfragen zum Einsatz. Die Basis zur Interpretation der Messergebnisse bilden einerseits Literaturquellen und andererseits freie Gesprächssituationen mit handelnden MitarbeiterInnen. In geringfügigem Ausmaß werden die gesammelten Verbrauchsdaten durch statistische Methoden ausgewertet und validiert [12].

Dem Kern der vorliegenden Diplomarbeit ist eine Aufarbeitung von **Grundlagen** basierend auf einer umfassenden Literatur- und Normenrecherche vorangestellt. Diese beinhaltet einen kurzen Abriss der aktuellen gesellschaftlichen, ökonomischen, ökologischen und rechtlichen Rahmenbedingungen. Dies soll darlegen, in welchem schwierigen Gesamtumfeld sich die Baubranche derzeit bewegt. Dieser Betrachtung ist unter anderem der wachsende Kostendruck auf Grund von steigenden Energiepreisen inhärent. Mit Blick auf aktuelle Terminmarktdaten wird beispielsweise für die kommenden Monate eine Kostenperspektive gezeichnet. Um die Relevanz der gestellten Forschungsfragen zu unterstreichen und die Messergebnisse interpretieren zu können, findet im Zuge der Desk Research eine Erhebung des Stands der Wissenschaft statt. Im Anschluss folgt eine Aufarbeitung der elektrotechnischen Grundlagen, die unter anderem Betrachtungen zu Elektrizität im Allgemeinen, sowie zu verschiedenen Verbrauchertypen und Energieproduktion auf der Baustelle umfasst. Die rechtlichen Vorgaben der Europäischen Union sehen ab einer bestimmten Unternehmensgröße die Verpflichtung zur Einführung von (Energie-)Managementsystemen vor. Aus diesem Grund schließt der Abschnitt Grundlagen mit einer kurzen Vorstellung anerkannter (Energie-)Managementsysteme.

Um die **erste Forschungsfrage** beantworten zu können, ist es erforderlich, ein Experiment mit dem Ziel zu konzipieren, den Stromverbrauch zu messen und die wichtigsten Verbraucher zu identifizieren. Um den wissenschaftlichen und bauunternehmerseitigen Anforderungen zu entsprechen, fällt die Wahl auf einen dualen Ansatz, bestehend aus Einsichtnahme in Netzbetreiberrechnungen und eigenen Messungen auf der Baustelle. Vorteilhaft ist, dass bis auf die Gleiserneuerungsbaustelle Landstraßer Gürtel, die zwei übrigen Baustellen über einen Smart Meter verfügen. Die verbauten Smart Meter reduzieren im Vergleich zu konventionellen Ferrais-Zählern sowohl den technischen als auch organisatorischen Erhebungsaufwand auf den Baustellen. So sind nach Abschluss des Verrechnungszeitraums wichtige Informationen, wie Gesamtstrombezug, Zeitpunkt des Strombezugs gegliedert nach Hoch- und Niedertarifzeit, sowie der maximale Leistungsbedarf der Netzbetreiberrechnung zu entnehmen. Durch netzbetreiberunabhängige Eigenmessungen ist die Informationsdichte zu erhöhen. Die Anzahl und Lage der Messpunkte sind mit den ausführenden

Unternehmen abzusprechen. Je nach Erfordernis sind Stromkreise, einzelne elektrische Abgänge in Verteilerkästen oder einzelne Steckdosen zu messen. Bei bestimmten Verbraucherkonstellationen ist es notwendig den jeweiligen Stromkreis und die verbundenen Steckdosen zu messen. Nach Abschluss der Baustelle bzw. nach Ende des Betrachtungszeitraums erfolgt eine Analyse und Zusammenfassung der zuvor gesammelten Daten.

Bei der Beantwortung zur **zweiten Forschungsfrage**, ob Energiemonitoring und -management einen Einfluss auf die Energieeffizienz von baubetrieblichen Abläufen hat, ist es weiters erforderlich ein Experiment zu konzipieren, das den Leistungsbezug der verbrauchsstärksten elektrischen Geräte regelt. Nach Normierung und Analyse der parallel erhobenen Verbrauchsdaten lässt sich mit Bezug auf die angewendete Steuerungs- und Regelungstechnik eine verlässliche Aussage über das Energiesparpotential treffen. Das durchgeführte Experiment auf der Wohnbaubaustelle „Hauptstraße 139, 2391 Kaltenleutgeben“ zeigt wie Energiemonitoring die Energieeffizienz von baubetrieblichen Abläufen steigern und der Stromverbrauch gesenkt werden kann. Wesentlich ist dabei das Benchmarking mit abgeschlossenen und noch laufenden Bauprojekten. Der umgesetzte Regelkreis kann als erster Schritt hin zur Einführung eines (Energie-)Managementsystems gesehen werden.

Die Beantwortung der **dritten Forschungsfrage** zielt auf die Erhebung von Energiesparpotentialen ab. Die Fragestellung lässt sich auf Grundlage von Literatur, eigener Berechnungen und erhobener Verbrauchsdaten quantitativ beantworten. Die technischen Datenblätter der Containerhersteller erlauben unter Berücksichtigung der Jahreszeit Aussagen über die ideale Dimension und Materialität von Containern zur Steigerung der Energieeffizienz. Ein Vergleich mit der Frachtlogistik von Tiefkühlcontainern erlaubt Rückschlüsse auf im Baubetrieb nicht erforschte Energieeinsparpotentiale, wie zum Beispiel die Verschattung von Containern.

1.4 Forschungsabgrenzung

Die vorliegende Diplomarbeit beschäftigt sich mit der Analyse des Stromverbrauchs von zwei Gleiserneuerungsbaustellen in Wien und einem Wohnbauvorhaben in Niederösterreich. Die Systemgrenze für das Forschungsvorhaben bildet jeweils der übergeordnete Smart Meter des zuständigen Netzbetreibers. Dabei werden nicht nur der reine Stromverbrauch, sondern auch weitere Aspekte wie die Energieeffizienz der eingesetzten Geräte und Auswirkungen von Umweltfaktoren wie Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Niederschlag auf den Stromverbrauch analysiert, wohingegen vorgelagerte Bauprozesse, wie zum Beispiel die Erzeugung von Fertigteilen, außer Acht gelassen werden. In diesem Zusammenhang ist anzumerken, dass dahingehend weiterer Forschungsbedarf besteht. Weiters wird der geplante Einsatz von (Energie-)Managementsystemen in Bauunternehmen und deren Auswirkungen auf den Stromverbrauch behandelt. Dabei sollen auch mögliche Hindernisse bei der Einführung solcher Systeme aufgezeigt und diskutiert werden. Diese Untersuchung zieht andere Bauunternehmensbereiche außerhalb der Baustelle, wie die Verwaltung oder den Bauhof nicht ein.

Kapitel 2

Analyse der Grundlagen

Gesellschaftliche, ökonomische, ökologische und rechtliche Rahmenbedingungen rücken den Stromverbrauch auf Baustellen in den Fokus von Auftraggeber, Auftragnehmer sowie der Wissenschaft:

Gesellschaft: Die drei größten Bauunternehmen Österreichs sehen den Aspekt „Nachhaltiges Bauen“ bzw. „Energie & Emissionen“ in ihren jeweiligen Geschäfts- bzw. Nachhaltigkeitsberichten als wesentliches Handlungsfeld in den kommenden Geschäftsjahren [13, 14, 15]. Im Sinne eines nachhaltigen Employer Branding wird dies auch notwendig sein, um weiterhin junge Menschen für einen Job in der Bauindustrie begeistern zu können. Eine Studie des Verbands österreichischer Entsorgungsbetriebe stellte fest, dass Nachhaltigkeit und Umweltschutz bei der Jobsuche an Relevanz gewonnen haben und „Green Jobs“ bei Jugendlichen begehrt sind [16]. Darüber hinaus werden staatliche Energielenkungsmaßnahmen die gesellschaftliche Aufmerksamkeit auf industrielle Energiegroßverbraucher lenken [17, 18, 19].

Ökonomie: Aus wirtschaftlicher Sicht führte der russische Angriffskrieg auf die Ukraine, die nach wie vor bestehende Abhängigkeit von russischen Gasimporten sowie das Merit-Order-Prinzip zu großen Verwerfungen auf den europäischen Energiemärkten. Zwischen Februar und Dezember 2022 hat sich der österreichische Strompreisindex versiebenfacht, siehe Abbildung 2.1.

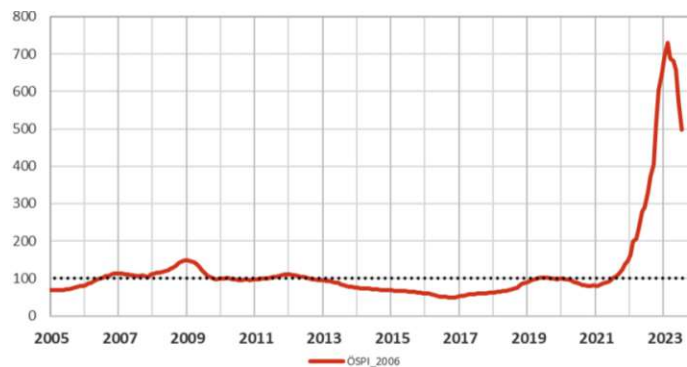


Abb. 2.1: Entwicklung des österreichischen Strompreisindex [20]

Die vergangene Großhandelspreisentwicklung schlug sich im zweiten Halbjahr 2022 in Form von Preisanpassungen bei laufenden Energieversorgungsverträgen und in hohen Arbeitspreisen bei Neuabschlüssen von Verträgen nieder [21, 22]. Seit Mitte Dezember 2022 weisen Großhandelspreise in Österreich und Deutschland eine fallende Tendenz auf [23]. Bereits im Februar 2023, siehe Abbildung 2.2a, zeigte sich an den Terminmärkten, dass die Großhandelspreise weiter sinken [24, 25]. Wie Abbildung 2.2b zu entnehmen ist, setzte sich dieser positive Trend im August 2023 weiter fort. Die Großhandelspreisentwicklungen sind als „Price Forward Curves“ für Jahreskontrakte in Abbildung 2.2 dargestellt.

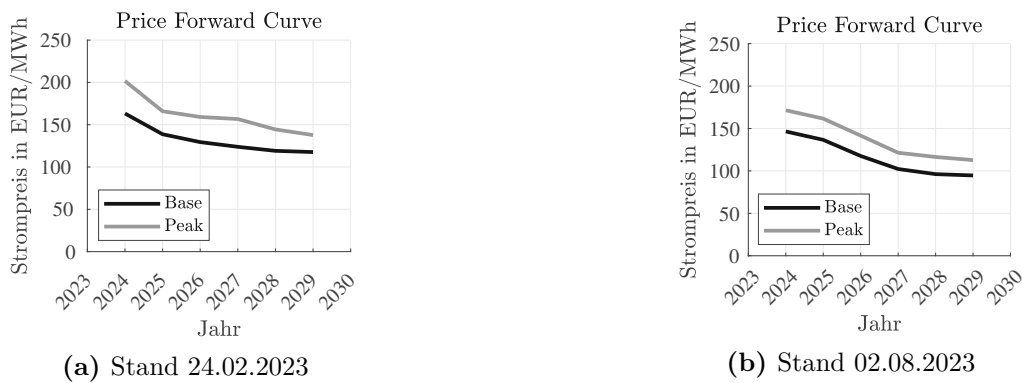


Abb. 2.2: Price Forward Curves [25]

Neben dem Arbeitspreis mit 62,79 % bilden Netzkosten mit 15,65 % und öffentliche Abgaben mit 21,56 % (Gebrauchsabgabe, Elektrizitätsabgabe und Umsatzsteuer) einen wesentlichen Preisbestandteil [26]. Zu beachten ist, dass rege Investitionstätigkeiten in das österreichische Stromnetz und erhöhte Beschaffungskosten für den Ausgleich von Netzverlusten die Kosten für die Netzbereitstellung im Vergleich zum Vorjahr im österreichweiten Durchschnitt um 9,13 % steigen ließen. [2, 27]. In Tabelle 2.1 ist ersichtlich, wie sich die Netzkosten in der für die Baubranche wichtigen Netzebene 7 mit gemessener Leistung unter der Annahme von 3.000 Benützungstunden künftig darstellen [2, 28].

Tab. 2.1: NE7 (gemessen) – Netznutzungs- & Netzverlustentgelt in Cent/kWh ab März 2023 [2]

Netzbereich	2022			2023			↗
	Netz-entgelt	Netz-verlust	Σ	Netz-entgelt	Netz-verlust	Σ	%
Vorarlberg	5,40	0,40	5,80	5,70	0,60	6,40	9,13
Linz	6,00	0,50	6,50	6,00	0,80	6,80	4,34
Salzburg	5,00	0,40	5,30	5,40	0,80	6,20	14,18
Tirol	4,90	0,30	5,20	5,40	0,60	6,00	13,07
Niederösterreich	5,00	0,40	5,40	5,10	0,90	6,00	10,99
Oberösterreich	3,10	0,30	3,40	3,50	0,60	4,10	16,01
Klagenfurt	3,90	0,30	4,20	4,60	0,40	5,00	16,99
Wien	5,50	0,40	5,90	5,90	0,70	6,60	11,14
Burgenland	5,10	0,40	5,50	5,40	1,10	6,60	15,56
Innsbruck	3,70	0,40	4,10	4,20	1,00	5,20	21,33
Steiermark	5,00	0,40	5,40	5,70	1,00	6,60	18,35
Graz	3,10	0,40	3,50	3,20	0,90	4,00	14,33
Kärnten	4,30	0,50	4,80	4,90	1,00	5,90	18,49
Kleinwalsertal	10,60	0,30	10,90	11,40	0,90	12,20	10,86
Durchschnitt	5,00	0,40	5,40	5,40	0,80	6,20	13,44

Ökologie: Die Bauwirtschaft zeichnet sich durch einen hohen Ressourcenverbrauch aus und ist in Österreich unter anderem für rund zwei Drittel des Abfallaufkommens verantwortlich [29]. Den Nachhaltigkeitsberichten der drei größten österreichischen Unternehmen ist zu entnehmen, dass fossile Energieträger am Bau nach wie vor zu den wichtigsten Rohstoffen zur Energiegewinnung zählen [13, 14, 15]. Aufgrund der zunehmenden Elektrifizierung von Baugeräten wird die Bedeutung von Baustrom in Zukunft jedoch deutlich steigen [30].

Recht: Das bisher gültige EEffG 2014 sah unter anderem vor, die Effizienz der Energienutzung durch Unternehmen in Österreich bis 2020 kosteneffizient zu steigern sowie eine Vorbildwirkung des Bundes zu etablieren. Der Umstieg auf eine energieeffizientere Wirtschaft sollte die Wettbewerbsfähigkeit der österreichischen Industrie durch den sinkenden Energieverbrauch vorantreiben. Zur Erreichung dieses Ziels waren die großen Unternehmen zur Implementierung von Energiebeziehungswise von gleichwertigen Managementsystemen verpflichtet. Kleine bis mittlere Unternehmen (KMU) sollten alle vier Jahre eine Energieberatung in Anspruch nehmen sowie das Ergebnis dokumentieren und der Energieeffizienz-Monitoringstelle melden [31]. Das EEffG 2014 ist inzwischen ausgelaufen und damit sind, bis auf wenige Übergangsbestimmungen, gesetzliche Vorgaben gefallen. Österreich ist mit der Umsetzung der Energieeffizienzrichtlinie der Europäischen Union säumig, weshalb die Kommission ein Vertragsverletzungsverfahren gemäß Art. 258 AEUV im Jahr 2022 eingeleitet hat [32, 33]. Der seit 22.12.2022 vorliegende Ministerialentwurf des EEff-RefG 2023 sieht vor, das Prinzip „Energieeffizienz an erster Stelle“ zu stärken und die Vorreiterrolle des Bundes auszubauen. Bezugnehmend auf die Grundsätze des Vergabeverfahrens gemäß §193 Abs 5 BVerG 2018 könnte dies dazu führen, dass die Energieeffizienz während der Leistungserbringung zum Zuschlagskriterium wird [34, 6]. Kleine und mittlere Unternehmen werden im Ministerialentwurf zum EEff-RefG 2023 hinsichtlich Energiemanagement/-Beratung ausgeklammert [6]. Daher ist zu befürchten, dass kleine bis mittlere Unternehmen (KMU) Wettbewerbsnachteile erleiden [35].

Wissenschaft: Baubetriebsuntersuchungen haben bisher schwerpunktmäßig fossile Energieträger wie zum Beispiel Diesel, Heizöl und Kohle betrachtet. Diese haben im Schnitt mit rund 60 % einen größeren Anteil am Energiemix eines Bauunternehmens als Strom mit zirka 9 % [13, 14, 15]. Folgende wissenschaftliche Ausarbeitungen beschäftigen sich mit dem Stromverbrauch auf Baustellen: Nisancioglu [36] beschäftigt sich im Rahmen seiner Dissertation „Grundlagen für ein Energiemanagement im Baubetrieb“ an der Bergischen Universität Wuppertal aus dem Jahr 2016 mit der Implementierung und Umsetzung eines Energiemanagementsystems nach DIN EN ISO 50001 im Baubetrieb. Die Analyse des vorgestellten Hochbauvorhabens „Neues Thier Areal Dortmund“ mit einer Gesamtfläche von 37.800 m², bestehend auf 33.000 m² Verkaufsfläche und 4.800 m² Bürofläche [37] und einem Gesamtstromverbrauch von zirka 1.126.793 kWh, hat folgende Erkenntnisse ergeben: Der durchschnittliche Stromverbrauch über zwei Jahre Bauzeit betrug 62.600 kWh pro Monat. Mit sinkender Lufttemperatur steigt der Stromverbrauch, siehe Abbildung 2.3. Die zu Grunde liegende Bauphase hat einen Einfluss auf den Stromverbrauch. So ist zu beachten, dass für die Verarbeitung von hydraulischen Bindemitteln eine Mindestverarbeitungstemperatur einzuhalten ist. Grundlasten wie Beleuchtung und Klimatisierung außerhalb der Kernarbeitszeit führen dazu, dass rund 30 % der Energie in der Niedertarifzeit verbraucht werden. In seinem Fazit führt Nisancioglu [36] aus, dass die Baustelleneinrichtung zum überwiegenden Teil für den Stromverbrauch auf Baustellen verantwortlich ist. Nach Ansicht von Nisancioglu [36] ist das vorhandene Einsparpotential als vielversprechend zu beurteilen. Als Hauptverbraucher werden Heizung, Kühlung und Beleuchtung der Baustellencontainer identifiziert. Der Stromverbrauch von Kleingeräten in der Ausbauphase ist vergleichsweise gering. Neben diesen gerätespezifischen Faktoren spielt die fehlende Sensibilität gegenüber Stromverbrauch auf der Baustelle eine große Rolle. Durch Verbesserung der Organisation und Schulung von MitarbeiterInnen besteht Optimierungspotential. Nisancioglu empfiehlt, das Berufsbild des Energie- und Umweltmanagers auf Baustellen zu etablieren [36].

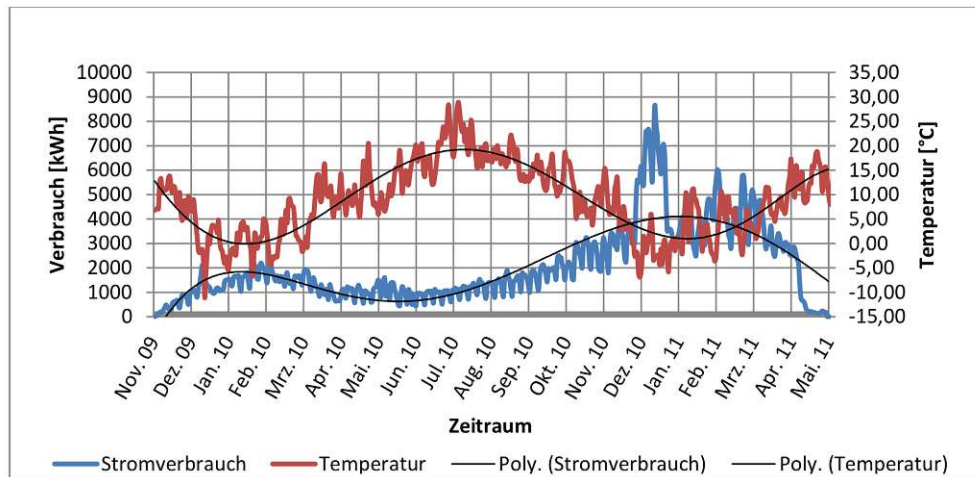
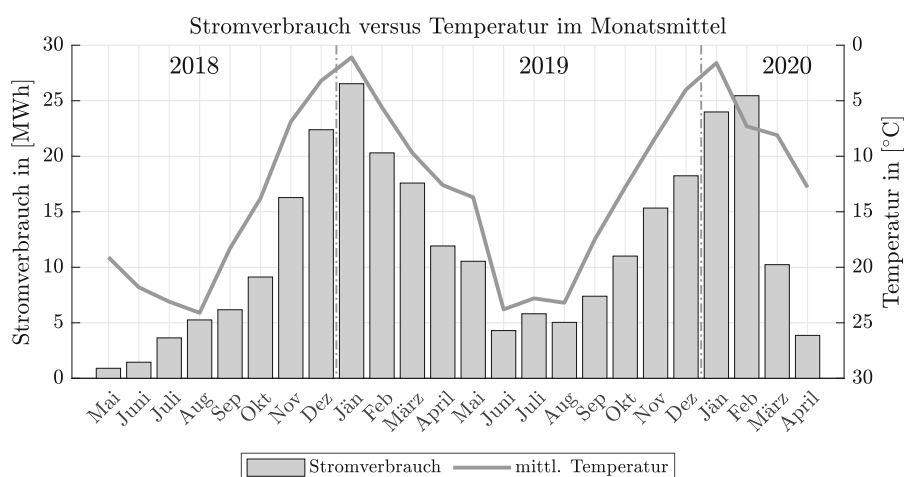


Abb. 2.3: Abhängigkeit von Stromverbrauch und Temperatur von der Jahreszeit [36]

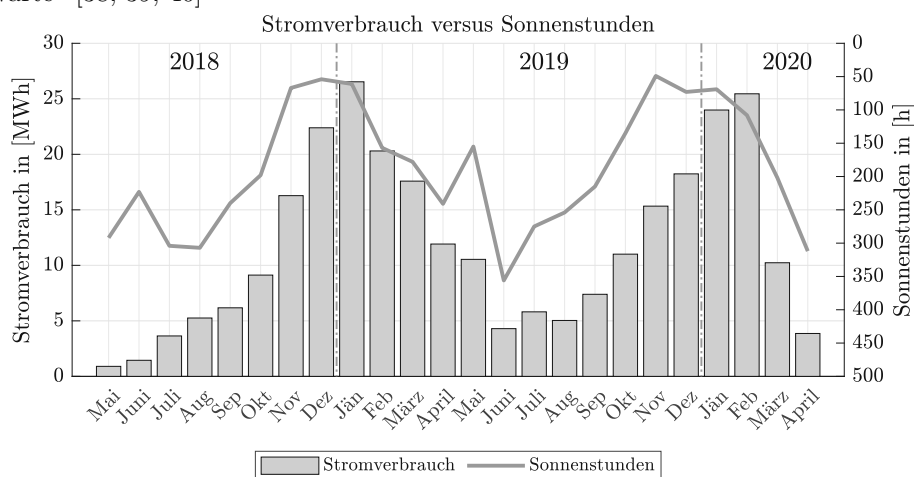
Piatek [38] analysiert in seiner 2021 erschienenen Diplomarbeit zum Thema „Die CO₂ neutrale Baustelle – Chancen & Herausforderungen“ folgende drei Baustelltypen im Hinblick auf die zu erwartenden Treibhausgasemissionen: den Neubau eines städtischen Wohngebäudes, die thermische Sanierung eines städtischen Wohngebäudes und den urbanen Straßenbau (Asphalteinbau). Von besonderem Interesse ist der Neubau eines städtischen Wohngebäudes mit 192 Wohneinheiten mit einer Bruttogeschossfläche von zirka 17.000 m², da Stromverbrauchsdaten über die gesamte Bauzeit vorliegen. Der Gesamtstromverbrauch der betrachteten Baustelle belief sich auf 282.754 kWh. Über die zweijährige Bauzeit entspricht das einem durchschnittlichen Verbrauch von 11.781 kWh pro Monat. In seinen Ausführungen vermutet Piatek einen Zusammenhang zwischen den Jahreszeiten und dem Stromverbrauch. Diese Vermutung lässt sich, wie in der Dissertation von Nisancioglu [36] vorgestellt, durch Gegenüberstellung der mittleren monatlichen Außenlufttemperatur und dem Stromverbrauch plausibilisieren.

Da im Zuge der Diplomarbeit von Piatek [38] keine Erhebung von lokalen Wetterdaten erfolgten, sind stellvertretend für den Großraum Wien historische Aufzeichnungen der Wetterstation „Hohen Warte“ heranzuziehen [39, 40]. In der vorliegenden Diplomarbeit werden im nachfolgenden Analyseschritt erstmalig die Stromverbrauchsdaten Piateks [38] mit den Messdaten der ZAMG [39] graphisch verschnitten. In der nachstehenden Abbildung 2.4a ist der Stromverbrauch der mittleren monatlichen Außenlufttemperatur, die auf der Messstation „Hohen Warte“ aufgezeichnet wurden, gegenübergestellt. Der invertierte Temperaturverlauf stellt einen qualitativen Verlauf des Stromverbrauchs dar. Ein ähnlicher Zusammenhang besteht bei der Anzahl der Sonnenstunden, welche die Dauer der Tageslichtphasen repräsentieren. Abbildung 2.4b zeigt, dass der Stromverbrauch mit Abnahme der Sonnenstunden in den Wintermonaten von November bis Februar ansteigt. Der invertierte Verlauf der Sonnenstundenanzahl stellt ebenfalls einen qualitativen Verlauf des Stromverbrauchs dar.

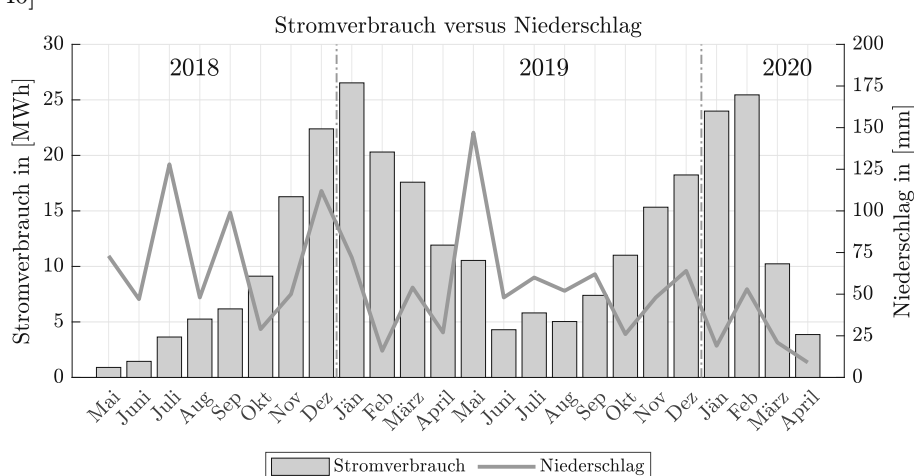
Gestützt durch die Beobachtungen von Budiyanto et al. [41] ist bei der Gegenüberstellung von Niederschlag und Stromverbrauch zu vermuten, dass sich niederschlagsreiche Sommermonate in Form von Verdunstungskälte und Bewölkung positiv auf den Kühlbedarf und somit auf den Energieverbrauch von Klimageräten auswirken. So zeigt sich in Abbildung 2.4c, dass im niederschlagsreichen September 2018 rund 20% weniger Strom als im Vergleichsmonat 2019 verbraucht wurden. Ähnliches ist im Juli 2018 zu beobachten. Bei doppelt so viel Niederschlag wie im darauffolgenden Jahr 2019 ist der Stromverbrauch beinahe um 60% niedriger.



(a) Monatlicher Strombezug gegenüber der durchschnittlichen Lufttemperatur gemessen an der Messstation „Hohe Warte“ [38, 39, 40]



(b) Monatlicher Stromverbrauch gegenüber der Sonnenstunden gemessen an der Messstation „Hohe Warte“ [38, 39, 40]



(c) Monatlicher Stromverbrauch gegenüber mittlerem Niederschlag auf der Messstation „Hohe Warte“ [38, 39, 40]

Abb. 2.4: Gegenüberstellung des Stromverbrauchs mit Umweltfaktoren

Die vorliegende Diplomarbeit zeigt durch Rückrechnung Piateks [38] gesammelter Netzkosten auf die monatlichen Leistungsspitzen, dass diese, wie Abbildung 2.5 zu entnehmen ist, ebenfalls jahreszeitlichen und bauphasenspezifischen Schwankungen unterliegen. Am Bauanfang ist der Verlauf der monatlich durch den Netzanbieter ermittelten Leistungsspitzen flacher als gegen Ende der Bauzeit. Dies lässt sich auf den höheren Beschäftigungsgrad und den steigenden Einsatz von elektrischen Baugeräten im Endausbau zurückführen. Für Erdaushub- und Tiefbauarbeiten sind in erster Linie dieselbetriebene Baugeräte im Einsatz und die luft- bzw. winddichte Bauwerkshülle gegen Ende des Bauvorhabens führt rasch zu Einsparungen bei der erforderlichen Heizenergie. Die mittlere Spitzenleistung über die gesamte Bauzeit beträgt 57 kW und die Standardabweichung 18,58 kW. Piatek [38] führt den Stromverbrauchsrückgang im zweiten Quartal 2019 auf den Abbau der beiden Kräne zurück. Wie dem Kapitel 3.4.2 zu entnehmen ist, kann dieser These entgegengehalten werden, dass der tatsächliche Stromverbrauch von Kränen geringer ist als von Piatek [38] angenommen. In seinen Berechnungen überschätzt Piatek [38] die Bedeutung der Anschlussleistung für den Stromverbrauch des Krans. Die maximale Anschlussleistung fällt zum Zeitpunkt des Motoranlaufs an und schlägt sich kaum im abgerechneten Stromverbrauch nieder, da die Leistungsaufnahme nach Motoranlauf des Krans anschließend rasch abfällt [42]. Wie in der vorliegenden Diplomarbeit gezeigt wird, sind die Heizgewohnheiten des Gerätebedieners entscheidender als die Anschlussleistung des Krans.

In Abbildung 2.5 fällt auf, dass mit zunehmendem Stromverbrauch die Leistungsspitzen ansteigen. Zwischen Mai und November 2018, sowie August 2019 und Jänner 2020 steigt der Spitzenleistungsbedarf kontinuierlich auf über 75 kW an. Wohingegen zwischen Jänner und Juni 2019 der Spitzenleistungsbedarf von über 75 kW sukzessiv auf unter 50 kW sinkt. Gegen Ende der Bauzeit stellt sich die Veränderung stärker da. Hier sinkt der Spitzenleistungsbedarf binnen drei Monaten zwischen Jänner und April 2020 von zirka 75 kW auf unter 25 kW.

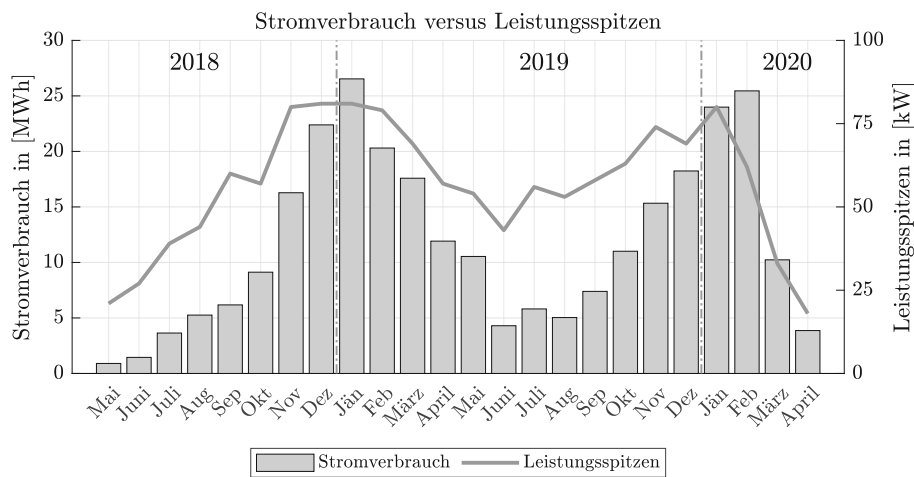


Abb. 2.5: Stromverbrauch gegenüber der vom Netzbetreiber gemessenen Leistungsspitzen [38, 39, 40]

Der Anteil der Volllaststunden, mehr hierzu in Kapitel 2.6, bei Piateks [38] untersuchter Baustelle beträgt im Durchschnitt 27,81 %. Bezugnehmend auf die mittlere Spitzenleistung lässt sich in Verbindung mit den Volllaststunden der Stromverbrauch für die Bauzeit schätzen. Aus der Multiplikation von 4.604 Volllaststunden mit der mittleren Spitzenleistung von zirka 57 kW ergibt sich ein geschätzter Stromverbrauch von 260.503 kWh. Der geschätzte Stromverbrauch liegt nur zirka 7,9 % unter dem tatsächlichen Stromverbrauch. Wie in Kapitel 3.4 gezeigt wird, lässt sich die Genauigkeit durch Differenzierung zwischen Baubetrieb und Containeranlage weiter steigern.

2.1 Grundlagen des Baustroms

Vor Einrichtung der Baustelle sind dem Netzbetreiber der Umfang der geplanten Netznutzung (Anschlussleistung) und die maximale Nennleistung der eingesetzten Großgeräte schriftlich mitzuteilen. Aufgrund der hohen Anlaufströme spielen insbesondere Kräne und Pumpen sowie elektrische Heizlüfter eine wichtige Rolle. Die angemeldete Anschlussleistung sollte Reserven berücksichtigen [1]. Sofern die Anschlussdauer unter fünf Jahre beträgt, zählen Baustellen zu temporären Anlagen [43]. Mit diesem Status ist der Vorteil verbunden zu Baubeginn für den Baustellenanschluss kein Netzbereitstellungsentgelt entrichten zu müssen [44, 2].

Die anfallenden Netzkosten richten sich maßgeblich danach, ob der Netzbetreiber den tatsächlichen Leistungsbezug misst [2]. In Wien wird Anlagen ohne Leistungsmessung ein pauschales jährliches Netznutzungsentgelt in der Höhe von 36,00 € vorgeschrieben. Anlagen mit Leistungsmessung wird ein jährliches Nutzungsentgelt in der Höhe von 59,16 € je Kilowatt verrechnet [3]. Da die Kosten mit jedem bezogenen Kilowatt Leistung unabhängig von der Bezugsdauer steigen, wird in diesem Zusammenhang auf das Kapitel 2.6 verwiesen.

Die Verpflichtung, für die späteren stationären Anschlüsse ein Netzbereitstellungsentgelt zu entrichten, bleibt hiervon unberührt [2]. Das Netzbereitstellungsentgelt ist in der SNE-VO 2018 geregelt und beträgt, wie der Tabelle 2.2 zu entnehmen ist, seit 1. März 2023 für Wien 235,47 € je Kilowatt [2]. Es wird empfohlen, keine zu hohe Anschlussleistung anzumelden, da der Netzbetreiber die zu viel bezahlte Netzbereitstellungsgebühr nur auf Antrag, bei Unterschreitung der vertraglich vereinbarten Anschlussleistung über einen Zeitraum von drei Jahren und ohne Verzinsung zurückerstattet [45]. Durch klare Verantwortlichkeiten ist sicherzustellen, dass die Kostenposition „Netzbereitstellung“ von allen Projektbeteiligten hinreichend in der Kalkulation und im späteren Betrieb berücksichtigt wird.

Tab. 2.2: Netzbereitstellungsgebühr für Netzebene 7 je Netzbereich [2]

Netzbereich	Netzbereitstellungsgebühr EUR / kWh
Burgenland	238,00
Kärnten	239,15
Klagenfurt	265,33
Niederösterreich	210,65
Oberösterreich	208,00
Linz	226,63
Salzburg	293,63
Steiermark	198,90
Graz	202,40
Tirol	193,00
Innsbruck	176,42
Vorarlberg	167,00
Wien	235,47
Kleinwalsertal	166,74

Für die Dimensionierung des Baustellenanschlusses ist zu berücksichtigen, dass in der Elektrotechnik zwischen ohmschen und induktiven Verbrauchern unterschieden wird. Zu den ohmschen Verbrauchern zählen die Beleuchtung und — simplifiziert formuliert — all jene elektrischen Baugeräte, die an einer SCHUKO- oder 3-poligen CEE-Steckdose angesteckt werden können. Die Stromversorgung erfolgt über einphasigen Wechselstrom mit einer Betriebsspannung U von 230 V. Die Beleuchtung ist ein typischer Vertreter, weshalb diese Art von Stromversorgung auch als „Lichtstrom“ bezeichnet wird [1]. Bei ohmschen Verbrauchern ist die Scheinleistung S äquivalent zur Wirkleistung P [1]:

$$S = P = U * I. \quad (2.1)$$

All jene elektrischen Baugeräte, die an einer 5-poligen CEE-Steckdose anzustecken sind, zählen zu den induktiven Verbrauchern. Die Stromversorgung erfolgt über alle drei Phasen mit einer Betriebsspannung von 400 V. Kennzeichen von typischen induktiven Verbrauchern sind hohe Motorleistungen, siehe Tabelle 2.3. Diese Art von Stromversorgung wird gerne als „Kraftstrom“ bezeichnet [1]. Bei induktiven Verbrauchern ergeben die Wirkleistung P ,

$$P = U * I * \cos(\phi), \quad (2.2)$$

und die Blindleistung Q ,

$$Q = U * I * \sin(\phi), \quad (2.3)$$

im Sinne des Pythagoreischen Lehrsatzes, siehe Abbildung 2.6, die Scheinleistung S [1]:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{(U * I * \cos(\phi))^2 + (U * I * \sin(\phi))^2}. \quad (2.4)$$

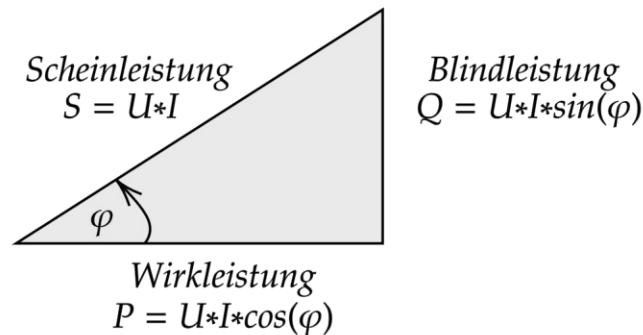


Abb. 2.6: Ermittlung der Anschlussleistung [46]

In der Regel verteilt sich der Betrieb der Baugeräte über den Arbeitstag und reale Leistungsspitzen fallen niedriger aus als die Summe der elektrischen Leistung aller zum Einsatz gebrachten Geräte zusammen. Gleichzeitigkeitsfaktoren a_L bzw. a_M , siehe Tabelle 2.4, tragen diesem Umstand Rechnung und berücksichtigen die statistische Verteilung der Leistungsentnahme über den Arbeitstag. Zusätzlich fließt der Wirkungsgrad η der elektrischen Verbraucher in die Berechnung der Anschlussleistung ein. Der Wirkungsgrad η liegt in der Regel zwischen 0,60 und 0,90 [1]. Nachstehender Tabelle 2.3 sind Motorleistungen gängiger Baugeräte zu entnehmen.

Tab. 2.3: Motorleistung gängiger Geräte auf der Baustelle gemäß Baugeräteliste 2020 (BGL)[1, 47]

Beschreibung	BGL.-Nr.	Kenngroße	Motorleistung
Hebezeug			
Schnellmontagekran mit Laufkatzausleger	C.0.03	17–125 tm	6–28 kW
Turmdrehkran mit Laufkatzausleger	C.0.10	50–1.250 tm	16–110 kW
Schrägaufzug	C.5.04	Tragfähigkeit 200–250 kg	1,0–1,3 kW
Geräte für Bodenverdichtung			
Vibrostampfer mit Elektromotor	[-]	12–100 kg	0,2–3,0 kW
Geräte zur Betonherstellung			
Zweiwellen-Trogmischer	B.4.11	Nenninhalt 0,5–6,0 m ³	15–200 kW
Trommelmischer	B.4.32	Trockenfüllmenge: 400–750 L	2,9–7,5 kW
Handrührwerk	B.4.44	1 oder 2 Rührwerkzeuge	0,72–1,30 kW
Betonpumpe	B.7.10	Höchstwert Volumenstrom Betondruck 550–12.000 m ³ /(h bar)	30–432 kW
Ramm- und Injektionstechnik			
Vibrationsbär (elektrisch)	J.3.00	80–2.000 kN	8–292 kW
Verpresspumpe	J.6.02	Motorleistung	1–40 kW
Hochdruck-Injektionsanlage	J.6.11	Motorleistung	110–390 kW
Druckluftgeräte			
Druckluftstation (2-3,5 bar)	Q.1.30	16–57 m ³ /min	175–250 kW
Kolbenkompressor (7 bar)	Q.2.11	8–18 m ³ /min	45–90 kW
Werkstattkompressor (10 bar)	Q.3.02	0,10–2,03 m ³ /min	11,5–18,5 kW
Pumpen			
Kreiselpumpe	T.0.00	Druckstutzen DN 25–300 mm	1,1–70,0 kW
Schmutzwasserpumpe, leichte Bauart	T.0.31	Motorleistung	1,1–30,0 kW
Membranpumpe, langsamlaufend	T.2.00	Volumenstrom 5 m ³ /h bis 90 m ³ /h	0,4–3,4 kW
Fortsetzung auf der nachfolgenden Seite			

Fortsetzung von vorheriger Seite			
Beschreibung	BGL.-Nr.	KenngroÙe	Motorleistung
Vakuumanlage für Grundwasserabsenkung	T.5.00	Motorleistung	5,0–50,0 kW
Maschinen und Geräte für den Werkstattbetrieb			
Tischkreissäge	W.4.21	Sägeblattdurchmesser 315–500 mm	3,00–6,00 kW
Rundbiegemaschine	W.1.03	Blechstärke 1,5–16,0 mm	0,75–15,00 kW
Elektrohammer, schlagbohrend	W.7.01	Gewicht 2,5–9,5 kg	0,65–1,80 kW
Heizgeräte			
Lufterhitzer für Atemluft	R.7.32	Gewicht 6–29 kg	2–18 kW
Baustellenbeleuchtung			
LED-Beleuchtung	[-]	Lichtstrom 3.600–150.000 lm	50 W bis 1 kW

Tab. 2.4: Gleichzeitigkeitsfaktor für induktive und ohmsche Verbraucher [1]

	Induktive Verbraucher	Ohmsche Verbraucher
Kleine Baustelle	0,65-0,80	0,80-1,00
MittelgroÙe Baustelle	0,50-0,65	
GroÙbaustelle	0,20-0,50	

Die Wirkleistung P_{wM} der induktiven Verbraucher ergibt sich zu [1]:

$$P_{wM} = \frac{P_M * a_M}{\eta}. \quad (2.5)$$

Die Scheinleistung P_{sM} der induktiven Verbraucher ergibt sich zu [1]:

$$P_{sM} = \frac{P_{wM}}{\cos(\phi)}. \quad (2.6)$$

Die Wirkleistung P_{wL} der ohmschen Verbraucher ergibt sich zu [1]:

$$P_{wL} = P_L * a_L. \quad (2.7)$$

Die Anschlussleistung P_A der Baustelle ergibt sich zu [1]:

$$P_A = \sqrt{(P_{wM} * \cos(\phi) + P_{wL})^2 + (P_{sM} * \sin(\phi))^2}, \quad (2.8)$$

wobei auf ganze kW aufzurunden ist.

Nach Bemessung der Anschlussleistung ist die Stromleitung zwischen öffentlichen Bezugspunkt und Anschlusschrank zu dimensionieren. Der Anschlusschrank dient zur Stromabnahme aus dem öffentlichen Netz und muss über eine Anlagenerdung (zum Beispiel einen Tiefenerder), Sicherungen, Zählertafeln und Anschlussklemmen verfügen. Die Größe des erforderlichen Leitungsquerschnittes hängt von verschiedenen Faktoren, wie der benötigten Leitungslänge, der notwendigen Scheinleistung, der Betriebsspannung, der Leitfähigkeit und der thermischen Belastbarkeit des Kabels ab [1]. Der Leitungsquerschnitt A in mm^2 ergibt sich zu [1]:

$$A = \frac{l * I * \cos(\phi)}{\kappa * \Delta U}. \quad (2.9)$$

In der Formel 2.9 beschreibt κ die Leitfähigkeit des Kabels. Für Kupferadern ist ein Wert von $57 \frac{\text{m}}{\text{mm}^2 \Omega}$ und für Aluminiumadern ein Wert von $35 \frac{\text{m}}{\text{mm}^2 \Omega}$ anzusetzen. Bei Begrenzung des Spannungsabfalls ΔU zwischen Abgang und Verbraucher auf maximal 6% der Betriebsspannung sind bei Kraftstrom (400 V) 13,86 V und bei Lichtstrom (230 V) 6,90 V für ΔU anzunehmen [1]. Ausgehend vom Anschlusschrank erfolgt die Stromversorgung auf Baustellen kaskadenartig über Verbindungsleitungen, Verteilerschränke und Steckdosenverteiler. Die Verteilerschränke sind erforderlich, um verschiedene Speisepunkte für elektrische Energie innerhalb der Baustelle einzurichten. Diese sind mit Schutzkontaktsteckern und CEE-Drehstromsteckdosen ausgestattet. Es gibt verschiedene Arten von Verteilerschränken, darunter Gruppen-, Haupt- und Unterverteilerschränke sowie Steckdosenverteiler. Für kleine Baustellen, zum Beispiel Einfamilienhausbau, bietet sich die Verwendung eines Anschlussverteilerschranks an, der eine Kombination aus Anschlusschrank und Verteilerschrank ist und mit bis zu 250 A belastet werden kann. Im Falle von elektrischen Großbaugeräten, wie zum Beispiel Kränen, empfiehlt es sich, diese separat von anderen Geräten anzuschließen und an spezielle (Kran-)Verteilerschränke mit CEE-Drehstromsteckdosen von 63 A und 125 A anzuschließen. Der Fehlerstromschutzschalter (FI) ist auf die Motorsteuerung des Krans abzustimmen [1].

Bei größeren Bauvorhaben empfiehlt es sich, die Stromversorgung der Baustelle mittels Strangschema zu dokumentieren und eine Lastflussberechnung durchzuführen. Die Lastflussberechnung ermittelt Strom- und Spannungsverhältnisse sowie Leistungsflüsse über einzelne Verteilerschränke bei angenommenen Verbrauchssituationen, um kritische Lastsituationen zu erkennen und zu entschärfen [48]. Die Ferdinand Walther Werke GmbH, ein namhafter deutscher Hersteller von Baustromstromverteilern, bietet hierfür das branchenspezifische digitale Onlineplanungstool IPD an [49].

Die Inbetriebnahme und Nutzung von Anschluss- und Verteilerschränken auf Baustellen unterliegt gesetzlichen und normativen Vorgaben. Auszugsweise sind folgende Gesetze, Normen und Anschlussbedingungen zu nennen:

- Elektroschutzverordnung 2012 (ESV 2012) [50]
- Elektrotechnikgesetz 1992 (ETG 1992) [51]
- Elektrotechnikverordnung 2020 (ETV 2020) [52]
- OVE EN IEC 61439-1:2021 11 01 Niederspannungs-Schaltgerätekombinationen — Teil 1: Allgemeine Festlegungen [53]
- OVE EN IEC 61439-2:2021 11 01 Niederspannungs-Schaltgerätekombinationen — Teil 2: Energie-Schaltgerätekombinationen [54]
- OVE/ÖNORM EN 61439-3:2013 06 01 Niederspannungs-Schaltgerätekombinationen — Teil 3: Installationsverteiler für die Bedienung durch Laien [55]

- OVE E 8101:2019-01-01 Elektrische Niederspannungsanlagen [56]
- Technische Ausführungsbestimmungen für den Netzanschluss in Netzebene 6 & 7 der Netz Niederösterreich GmbH (Ausgabe 2021; Aktualisierung 1. Oktober 2022) [57]
- Technische Ausführungsbestimmungen für den Netzanschluss an das Niederspannungsverteilernetz der Wiener Netze GmbH (Ausgabe Jänner 2020) [58]

Die ESV 2012 gilt in Arbeitsstätten, auf Baustellen und auf auswärtigen Arbeitsstellen im Sinne des ArbeitnehmerInnenschutzgesetzes 1994 ASchG 1994 und beinhaltet gesetzliche Vorgaben zu den Themen Schutz vor den Gefahren, die von elektrischem Strom ausgehen, Prüfpflichten, Arbeiten an oder in der Nähe von elektrischen Anlagen und Blitzschutz [50, 59]. Hinsichtlich ETG 1992 ist für Bauunternehmen von Bedeutung, dass es die Begriffe elektrische Betriebsmittel von elektrischen Anlagen sowie die Neuherstellung von der Erweiterung abgrenzt. Mit Verweis auf die ETV 2020 findet eine Festlegung der rechtlich bindenden Normen statt. [51, 52]. Die technischen Anschlussbedingungen der Netzanbieter, wie beispielsweise jene der Wiener Netze GmbH [58] oder der Netz Niederösterreich GmbH [57], umfassen folgende wesentlichen Anforderungen für Baustellen:

- Baustellen gelten in der Regel als Kurzzeitanlagen, da die Betriebsdauer weniger als 5 Jahre beträgt. Es handelt sich daher stets um Neuanlagen. Folglich sind die aktuell geltenden Bestimmungen und Vorschriften einzuhalten.
- Der Zutritt zur Messanlage muss für den Netzanbieter jederzeit gegeben sein.
- Es sind Baustromverteiler gemäß ÖVE/ÖNORM EN 61439 zu verwenden [53, 54, 55].
- Bei hohen mechanischen Beanspruchungen, beispielsweise durch Überfahren, ist die Anschlussleitung geschützt zu verlegen, siehe ÖVE/ÖNORM E 8001-4-704 [60].
- Jede Baustromanlage benötigt bei Verwendung der Schutzmaßnahme „Nullung“ eine geeignete dauerhafte Anlagenerdung.
- Das Umstürzen des Anschlussverteilerkastens ist durch geeignete Maßnahmen zu verhindern.
- Die lotrechte Aufhängung des Zählers ist zu gewährleisten.
- Die maximale Vorzählerleitung beträgt maximal 20 m. Seitens des Netzversorgers wird in der Regel keine Instandhaltung für Anschlussleitungen zu Baustellen und Provisorien übernommen.

Die Verbindungselemente der Baustromversorgung werden in Abhängigkeit von Bauart, Verwendungszweck und übertragener Spannung entweder Kabel oder Leitung genannt. Im Allgemeinen lässt sich Schach [1] folgend festhalten, dass Kabel stärker isoliert und thermisch belastbarer sind als Leitungen. Kabel müssen immer fest verlegt werden, während Leitungen nicht dauerhaft in der Erde verlegt werden dürfen. Um Beschädigung zu vermeiden, ist die Kabel- bzw. Leitungsführung auf der Baustelle kenntlich zu machen. Falls es sich um einen beweglichen Baustromverteiler handelt, ist bei der Baustromversorgung darauf zu achten, dass die Kabel an den Verteileranschlüssen beweglich sind. Andernfalls können Schäden und Störungen auftreten. Sind die Baustromverteiler fest verankert, können auch starre Kabel verwendet werden [1]. Leitungen für Baustromversorgung unterscheiden sich in der Anzahl der Leiter, dem Material der Adern und Ummantelung sowie der Verlegungsart und Beanspruchung. Kleinspannungskabel haben in der Regel zwei Adern, Niederspannungskabel drei (Phase, Neutralleiter und Schutzleiter), während Kraftstromkabel fünf Adern haben (drei Phasen, Neutralleiter und Schutzleiter).

Die Adern bestehen aus Kupfer oder Aluminium mit niedrigem spezifischen Widerstand. Als Isolierung kommt Gummi oder Silikongummi zum Einsatz, während für die Ummantelung meist Gummi Verwendung findet. Auf Baustellen sollten nur Gummischlauchleitungen vom Typ H07 RN-F oder gleichwertige Leitungen verwendet werden. Für häufig bewegte oder mechanisch belastete Leitungen sind wetterfeste, ölfeste und schwer entflammbare Leitungen zu bevorzugen. Gummischlauchleitungen vom Typ H05 RN-F können für Elektrowerkzeuge und Beleuchtungsanlagen verwendet werden. Gummischlauchleitungen sind nicht im Erdreich oder auf Wegen zu verlegen. Es ist eine Zugentlastung vorzusehen und im Bedarfsfall ist die Gummischlauchleitung abzudecken. Zur Vermeidung von Unfällen sind die Ummantelungen gegen Verdrehen und Abstreifen zu sichern. Im Erdreich sind die Kabel mindestens 70 cm tief zu verlegen und mittels Ziegel oder Kabelformsteine vor unabsichtlichem Durchtrennen, zum Beispiel während Erdarbeiten, zu schützen. Die Grabensohle muss fest, glatt und steinfrei sein, und an Abzweigungsstellen sind die Kabel hochzuführen und in einem Verteilerkasten abzuzweigen. Um Überhitzung zu vermeiden, ist für ausreichende Umlüftung der Kabel Sorge zu tragen. Für die Baustromversorgung müssen Kabelrollen mit Hammersymbol und Zertifizierung nach GS-ET-35 verwendet werden [61]. Trage- und Kurbelgriff sowie Trommelgehäuse müssen isoliert sein, um gefährliche Berührungsspannungen zu verhindern. Leitungsroller müssen schutzisoliert, spritzwassergeschützt und mit einem Überhitzungsschutzschalter ausgestattet sein. Bei einer Leistung von über 1 kVA müssen die Leitungen vor Inbetriebnahme vollständig abgerollt werden, um Temperaturschäden zu vermeiden [1].

Eine sichere Baustromversorgung ist auch für die **Vermeidung von Produktivitätsverlusten** zufolge Stromausfällen von zentraler Bedeutung. Ausgenommen von dieser Betrachtung sind durch menschliches Versagen herbeigeführte Ausfälle, wie zum Beispiel das Durchtrennen von E-Zuleitungen im Zuge von Aushubarbeiten, oder Feuchtigkeitseinwirkung, wie durch Spritzwassereinwirkung auf Steckdosen. Die Überlastung einer oder mehrerer Phasen lässt sich durch Berücksichtigung der Leistungsaufnahme und Art des Verbrauchers durch folgende Maßnahmen vermeiden:

- Aufgrund der hohen Anlaufströme empfiehlt es sich, mit Ausnahme der Beleuchtung für Nacharbeiten, keine weiteren elektrischen Baugeräte an den Kranabgang zu stecken.
- In den Wintermonaten ist vor Inbetriebnahme der Estrichpumpe, unter Einhaltung der Verarbeitungstemperaturen, ein Teil der Heizstrahler abzuschalten. Andernfalls können hohe Anlaufströme in Verbindung mit einer entsprechenden Grundlast zu Ausfällen führen.
- Je Stromkreis stehen in einem Container maximal 3,68 kW Leistung zur Verfügung. Das Betreiben mehrere Heizgeräte zum Beispiel mit 2 kW elektrischer Leistung an derselben Steckdose mittels Steckdosenverteiler oder am selben Stromkreis ist daher zu vermeiden.
- (Anschluss-)Verteilerschränke sollten an gut belüfteten und/oder schattigen Plätzen stehen, um eine Überhitzung der Sicherungselement während der Sommermonate zu vermeiden.

Selbst kurzzeitige Stromausfälle können nach Ansicht von befragten Bauleitern zu Produktivitätsverlusten führen, wie am Beispiel von Estricharbeiten erklärt werden kann. Estrich ist ein hydraulisches Bindemittel, das nach Wasserbeimengung pumpbar und verarbeitbar ist, aber relativ schnell erstarrt und aushärtet. Der Stillstand der Estrichpumpe, hervorgerufen durch einen Stromausfall, führt zu einer Verstopfung der (Pumpen-)Leitung. Die manuelle Behebung nimmt nach Angaben der befragten Bauleiter üblicherweise zirka eine Partiestunde in Anspruch. Neben diesem Aufwand ist die Stillstandszeit der Estrichpumpe und der mögliche Zeitverzug sonstiger Arbeiten zu berücksichtigen. Der Zeitverlust von einer Stunde lässt sich an einem Arbeitstag nicht einarbeiten. Die Auswirkungen auf die darauf folgenden Arbeitstage ist evident.

2.2 Heizen, Kühlen, Lüften und Warmwasserbereitung

Um angenehme Arbeitsbedingungen zu schaffen, sind bestimmte Baustellencontainer zu heizen, zu kühlen sowie zu be- und entlüften. Je nach Erfordernis des Bauvorhabens ist gewerblichem und angestelltem Personal die Möglichkeit zu geben, der persönlichen Hygiene mit warmen Wasser nachzukommen. Ausschlaggebend für die Rahmenbedingungen sind gesetzliche Vorgaben, welche sich unter anderem aus der Arbeitsstättenverordnung 1998 (AStV) ableiten lassen [62]. Gemäß §28 iVm §46 AStV sind in Gebäuden auf Baustellen, in denen ständige Arbeitsplätze eingerichtet sind, in Abhängigkeit der körperlichen Tätigkeit bestimmte **Lufttemperaturen** einzuhalten [62]. In diesen Arbeitsräumen ist Sorge zu tragen, dass die Lufttemperatur

- bei geringer körperlicher Belastung zwischen 19 und 25 °C,
- bei normaler körperlicher Belastung zwischen 18 und 24 °C und
- bei hoher körperlicher Belastung mindestens 12 °C

beträgt. In Waschräumen gemäß §34 Abs 9 AStV ist sicherzustellen, dass die Raumtemperatur 21 °C ohne Duschen und 24 °C mit Duschen beträgt. In Umkleieräumen sowie Aufenthalts- und Bereitschaftsräumen ist ebenfalls eine Raumtemperatur von 21 °C sicherzustellen.

Ausgehend für den gesetzlichen Vorgaben sind Fenster für die **Be- und Entlüftung** der Bürocontainer ausreichend [62]. Bei Vorhandensein einer mechanischen Lüftungsanlage sieht die Arbeitsstättenverordnung vor, in Abhängigkeit der körperlichen Belastung, pro anwesende Person und Stunde, dem Container folgende Mengen an Außenluftvolumen zuzuführen:

- 35 m³ bei Arbeiten mit geringer körperlicher Belastung,
- 50 m³ bei Arbeiten mit normaler körperlicher Belastung und
- 70 m³ bei Arbeiten mit hoher körperlicher Belastung.

Klima- und Lüftungsanlagen sind in einem hygienisch einwandfreien Zustand zu halten. Bei Verwendung einer Klimaanlage muss die relative Luftfeuchtigkeit zwischen 40 % und 70 % liegen [62]. Die gesetzlichen Vorgaben zu erreichen ist herausfordernd, da die eingesetzten Container hinsichtlich Dämmung, Luft- bzw. Winddichtigkeit und speicherwirksamer Masse nicht die Standards konventioneller Betriebsgebäude erreichen. Zudem sind Baustellencontainer, abgesehen von großen Containerburgen bei Bauvorhaben mit mehrjähriger Bauzeit, hinsichtlich ihrer HKL-Ausstattung einfach gehalten. Üblicherweise verfügt ein Bürocontainer über einen E-Konvektor, eine Kompaktklimaanlage und Fenster zum manuellen Lüften. Ein Sanitärcontainer verfügt ergänzend hierzu über eine mechanisch Be-/Entlüftung und je nach Ausstattung über einen Warmwasserboiler oder mehrere Durchlauferhitzer [63].

Im nachfolgenden Abschnitt wird auf die einzelnen Elemente der technischen Containerausstattung näher eingegangen. Zunächst ist auszuführen, dass ein dezentrales elektrisches Raumheizungssystem geradezu für die Baustelleneinrichtung prädestiniert ist. Vorteilhaft sind die einfache Bedienung, die Wartungsfreiheit, der Entfall von Abgaseinrichtungen und die einfache Abrechnung über die Stromrechnung. Nachteilig wirkt sich aus, dass laut befragten Elektrikern die einphasig gespeisten Heizungssysteme bei gleichzeitiger Benutzung leicht den gemeinsamen Anschluss überlasten können, die Wirtschaftlichkeit vom NutzerInnenverhalten abhängt und die Möglichkeit zur zentralen Steuerung eingeschränkt ist [64]. In Baustellencontainern sind meist Konvektionsheizgeräte mit einer Anschlussleistung von zirka 2 kW, welche zur Gruppe der Direktheizgeräte gehören, anzutreffen.

Konvektionsheizgeräte lassen sich laut OVE EN 60675 [65] dadurch beschreiben, dass mindestens ein nicht sichtbarer, aber in Berührung zur zirkulierenden Luft stehender Teil die Wärme abgibt. Dank natürlicher Konvektion erfolgt die Wärmeabgabe in Folge dessen über eine oder mehrere Austrittsöffnungen. Abbildung 2.7a, entnommen aus der OVE EN 60675 [65], stellt dies schemenhaft dar. Im Gegensatz dazu erwärmen Strahlungsheizgeräte, welche ebenfalls zur Gruppe der Direktheizgeräte zählen, die umgebende Luft mit einem sichtbaren Bauteil, siehe Abbildung 2.7b [65]. Das typische Anwendungsgebiet von Direktheizgeräten ist das rasche Aufheizen von Räumlichkeiten, wie zum Beispiel von Containern.

Mit der Ökodesign-Richtlinie (2009/125/EG) [66] forciert die Europäische Union die umweltgerechte Gestaltung von energieverbrauchsrelevanten Produkten. Nach Schätzungen der Europäischen Union waren Einzelraumheizgeräte, wie zum Beispiel Direktheizgeräte, im Jahr 2010 für einen jährlichen Energieverbrauch von zirka 1.673 PJ und einen CO₂-Ausstoß von 75,3 Mio t verantwortlich [67]. Um die Umweltauswirkungen von Einzelraumheizgeräten zu reduzieren, legte die Europäische Union in der Verordnung 2015/1188 [67] Anforderungen für die umweltgerechte Gestaltung dieser Geräte fest. Bei nicht Erreichen des geforderten Raumheizungs-Jahresnutzungsgrades darf der Hersteller das Heizgerät in der Europäischen Union nicht in Verkehr bringen. Zur Erreichung sieht die gegenständliche Verordnung eine Art Bonus-Malus-System vor, dass Hersteller motivieren soll unter anderem folgende Energiesparfunktionen in ihren Heizgeräten zu implementieren [67]:

- elektronische Raumtemperaturkontrolle mit Tages- oder Wochenprogramm
- Raumtemperaturkontrolle mit Präsenzerkennung
- Raumtemperaturkontrolle mit Erkennung offener Fenster
- Fernbedienung
- adaptive Regelung des Heizbeginns
- Betriebszeitbegrenzung.

Da Bauunternehmen ihre Baustellencontainer üblicherweise über mehrere Jahre verwenden sind oftmals ältere Konvektionsheizgeräte im Einsatz, die über jene Energiesparfunktionen nicht verfügen. Wie in Kapitel 3.6 aufgezeigt, lässt sich durch Modifikationen am AP-Verteiler und Anbringung von Sensorik dennoch Strom sparen.

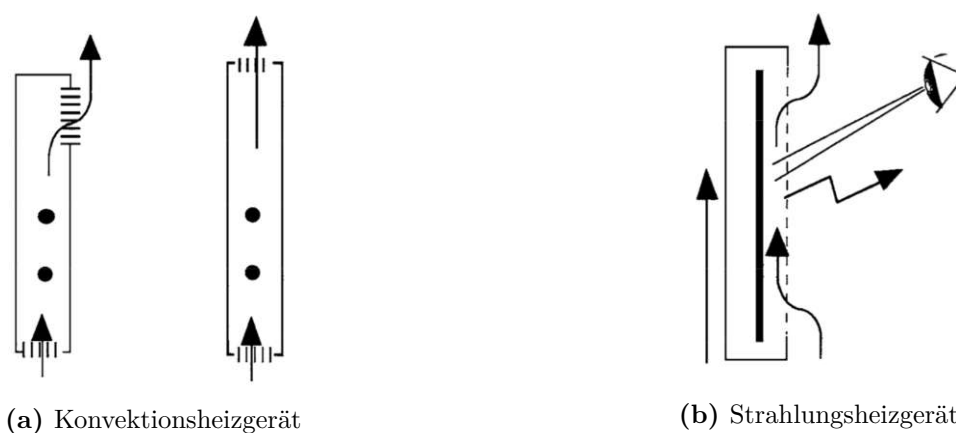


Abb. 2.7: Direktheizungsgeräte im Sinne der OVE EN 60675 [65]

Als Teil der Baustelleneinrichtung spielen Wärmepumpen zur Bereitstellung von Raumwärme derzeit keine Rolle. Zur Anwendung gelangt sie derzeit in ihrer artverwandten Form als Klimagerät. Dennoch gelten Wärmepumpen, sofern der Strom aus erneuerbaren Energiequellen stammt, als umweltfreundliche Zukunftstechnologie zur Bereitstellung von Raumwärme. Die wichtigsten mechanischen Komponenten einer Wärmepumpe sind der Verdampfer, der Verdichter, der Verflüssiger und das Expansionsventil. Die Funktionsweise beruht auf dem Prinzip der Kompressionswärme. Das Arbeitsmedium zirkuliert in einem geschlossenen Kreislauf und verdampft zunächst in einem Wärmetauscher, dem Verdampfer. Durch die Zufuhr von frei verfügbarer Umweltenergie, zum Beispiel mittels Luft, verdampft es. Im nächsten Schritt verdichtet der Verdichter das nun gasförmige Arbeitsmedium und hebt damit das Temperaturniveau an. Anschließend wird das erwärmte flüssige Arbeitsmedium über einen Wärmetauscher (Verflüssiger) an das Heizsystem abgegeben. Ein Expansionsventil entspannt schließlich das Arbeitsmedium, so dass es wieder dem Verdampfer zugeführt werden kann.

Wärmepumpen sind deshalb so energieeffizient, weil —vereinfacht beschrieben— der Verdichter die einzige Komponente im dargestellten Kreislauf ist, dem elektrische Energie zuzuführen ist. Das beschriebene Arbeitsmedium sind FCKW-freie Kältemittel mit extrem niedrigem Siedepunkt. FCKW-haltige Kältemittel sind in der Europäischen Union seit 1995 verboten [68]. Nach dem Verbot haben sich fluorierte Kohlenwasserstoffe als Kältemittel durchgesetzt. Diese sind im Gegensatz zu den Fluorchlorkohlenwasserstoffen nicht ozonschädigend, haben aber ein um ein Vielfaches höheres Treibhauspotential. Die Industrie bemüht sich seit Jahrzehnten, verbesserte Kältemittel auf den Markt zu bringen. In der Umsetzung erweist sich dieses Vorhaben als schwierig. Die Anforderungen, dass ein Kältemittel eine hohe volumetrische Kälteleistung, kein Ozonabbaupotential, ein geringes Treibhausgaspotential, eine geringe Toxizität und Nichtbrennbarkeit aufweisen muss, wurden bisher von keinem Produkt kumulativ erfüllt. Mit dem Ziel die industriellen Emissionen 2030 um 70 % gegenüber 1990 zu reduzieren drängt die Europäische Union seit 1. Jänner 2015 mit Hilfe der F-Gas-Verordnung die FKWs zurück. Die zunehmende mengenmäßige Beschränkung (phase down) von FKWs auf europäischen Märkten ist hier als wichtigste Vorschrift zu nennen [69, 67]. Die Tabelle 6.1 in Kapitel 6.1 stellt eine Übersicht der gängigsten Kältemittel dar.

Grundsätzlich können Wärmepumpen aus unterschiedlichen Quellen, wie Erdreich, Wasser oder Umgebungsluft, die notwendige Umweltwärme beziehen. Da Containeranlagen einer Baustelle, wie eingangs beschrieben, flexibel sein müssen, erscheint die Außenluft als Wärmebezugsquelle am sinnvollsten. Wärmequellen wie das Erdreich oder Wasser setzen umfangreiche Installations- und laufende Wartungsarbeiten voraus [69]. Ausgehend vom Gebäudebestand, wo Umrüstungen auf ein zentrales Heizsystem meist schwer umsetzbar sind, haben Hersteller den Bedarf nach dezentralen Wärmepumpensystemen erkannt. Im Gegensatz zu zentralen Heizsystemen erfolgt die Nutzung der bereitgestellten Wärme nicht über Wasser, welches in Fußböden oder Radiatoren zirkuliert, sondern über die Luft. Ventilatoren erzwingen die notwendige Konvektion und lassen die erwärmte Luft gezielt aus dem Gerät entweichen. Die gegenständlichen Geräte sehen konventionellen Konvektionsheizgeräten ähnlich und bieten Vorteile wie mehr Heizleistung bei geringerem elektrischen Leistungsbezug und die Zusammenführung der Funktionen Heizen und Kühlen in einem Gerät, sowie die Zufuhr von Frischluft. Nachteilig ist, dass Nettoanschaffungskosten (ohne Installation) von zirka 2580 € gegenüber jenen von Konvektionsheizgeräten und Kompaktklimagerät in Summe von zirka 1470 € stehen.

Bei einer kalkulatorischen Nutzungsdauer von drei Jahren entspricht das Mehrkosten von rund 31 € pro Monat. Die Annahme der kurzen kalkulatorischen Nutzungsdauer lässt sich mit der hohen Belastung im Baubetrieb begründen. Bei einem Gesamtstrompreis von zirka 0,40 € je Kilowattstunde müsste das Luft-Luft-Wärmepumpensystem zirka 78 kWh Strom pro Monat einsparen.

Nur bei hohen Strompreisen und langer Nutzungsdauer lässt sich ein derartiges System wirtschaftlich betreiben. Der Komfortgewinn durch Verbesserung der Raumluft lässt sich monetär kaum bewerten, jedoch hat sich während COVID-19 gezeigt, dass regelmäßige Belüftung essentiell für die Vermeidung von Ansteckungen ist [70]. Möglicherweise verkürzt eine ordentliche Be- und Entlüftung die Krankenstandstage auch auf Baustellen [71].

Zur Klimatisierung von Baustellencontainern kommen oftmals Kompaktklimageräte zum Einsatz, die in dafür vorgesehene Laibungsöffnungen eingesetzt werden können. Diese Geräte zeichnen sich vor allem durch einfache Montage aus. Da sich der gesamte Kältemittelkreislauf innerhalb eines Gehäuses befindet, bedarf es zur Installation keinen Kältetechniker. Um einen effizienten Betrieb zu gewährleisten ist es erforderlich, das Kompaktklimagerät im Sommer vor direkter Sonneneinstrahlung zu schützen. Nachteilig ist, dass vor allem in älteren Geräten das Kältemittel R410A zum Einsatz kommt. Wie Tabelle 6.1 in Kapitel 6.1 zu entnehmen ist, weist das Kältemittel R410a gegenüber R32, welches in neueren Geräten zum Einsatz kommt, ein ungefähr 2,5-faches Erderwärmungspotential (GWP) auf, siehe Tabelle 6.1 in Kapitel 6.1. Einige Hersteller bieten Kompaktklimageräte mit Heizfunktion an. In Gesprächen gaben Klimatechniker an, dass bei feuchten Wetterlagen zum Beispiel während Nebel, bei Verstopfung des Kondensatabflusses und gleichzeitig tiefen Temperaturen die Gefahr besteht, dass der Verdampfer einfriert. Zu den in Österreich gängigen Marken zählen RED-RING, GREE, Sinclair und Aermec.

Die Warmwasserbereitung in Sanitär- bzw. WC-Containern orientiert sich an der Ausstattung. Bei Vorhandensein von Duschen ist ein Warmwasserspeicher vorzusehen, andernfalls sind Untertischspeicher oder Durchlauferhitzer für Handwaschbecken sinnvoller, da weniger Wasser warm zu halten ist. Die Größe des Warmwasserspeichers richtet sich nach der Anzahl der Duschen und NutzerInnenverhalten. Laut Austria Email benötigt ein Duschvorgang bei 60 °C Speichertemperatur zwischen 16 und 26 L Speicherwasser. Die gängigsten Speichergrößen auf Baustellen sind 80, 150 und 300 L [63].

2.3 Pumpen und Motoren

Im Baubetrieb stellen elektrische Antriebe aufgrund ihres Leistungsbedarfs, siehe Tabelle 2.3 in Kapitel 2.1, eine wichtige Einflussgröße auf den Stromverbrauch dar. Sie kommen überall dort zum Einsatz, wo mechanische Energie erforderlich ist oder dieselbetriebene Geräte an ihre Emissionsgrenzen gelangen. Zu den typischen Anwendungsgebieten in der Bauindustrie zählen Pumpen, Kompressoren und Maschinenantriebe, wie zum Beispiel jene von Turmdrehkränen [72]. Am Markt sind eine Vielzahl an unterschiedlichen Motorenarten für Gleich- und Wechselstrom erhältlich. Nähere Ausführungen hierzu würden den Rahmen des vorliegenden Grundlagenkapitels sprengen. Neben den Abmessungen lassen sich Elektromotoren über folgende Eigenschaften beschreiben [72]:

- Anschlussleistung [kW] — die maximale elektrische Leistungsaufnahme
- Nennleistung [kW] bei Drehzahl [1/min] — die mechanische Leistungsabgabe
- Drehmoment [Nm] bei Drehzahl [1/min]
- Drehzahlband [1/s], [1/min] oder [rad/s]
- Anlaufstrom [A]
- Phasenwinkel $\cos(\phi)$
- Wirkungsgrad
- Effizienz- oder Wirkungsgradklasse.

Aus Gründen der Energieeffizienz sind im Betrieb von Motoren folgende Aspekte zu beachten [72]: In der Praxis sind häufig überdimensionierte Motoren anzutreffen. Beginnend beim Motordesign wird zu Gunsten einer längeren Lebensdauer oftmals ein stärkerer Motor verbaut. Bei Auswahl der Geräte für die jeweilige Bauaufgabe wird aus Sicherheitsüberlegungen die nächst höhere Geräteklasse gewählt. Das führt dazu, dass Motoren bei einem energetisch unvorteilhaften Betriebspunkt betrieben werden. In Folge dessen sinkt der Wirkungsgrad. Aus diesem Grund ist es sinnvoll, die Herstellerangaben zu berücksichtigen. Vom Hersteller ermittelte Kennlinien stellen bei verschiedenen Drehzahlen das Drehmoment, die Leistung und den Wirkungsgrad des Motors dar [72].

Für Motoren, die über Schalter, Relais oder Schütze gesteuert werden, spiegeln die beiden Zustände „AN“ oder „AUS“ nicht immer die Leistungsanforderung wider. Es empfiehlt sich Pumpen, Kompressoren und Antriebe im Teillastbetrieb mittels Frequenzumrichters zu steuern, um nur die erforderliche Teilleistung zu erbringen. Diese Vorgehensweise reduziert den Verschleiß mechanischer Bauteile [72].

Einsparpotential liegt bei Motoren auch im Getriebe. Schnecken- und Stirnradschraubgetriebe können unter ungünstigen Umständen den Wirkungsgrad auf unter 20% senken. Aus diesem Grund ist es oftmals sinnvoller, den Motor über die Steuerung zu drosseln, als ein Untersetzungsgetriebe zu verwenden [72].

2.4 Beleuchtung

Die Beleuchtungssituation ist entscheidend für die Arbeitsleistung, Konzentration und die Sicherheit auf der Baustelle. Besondere Bedeutung hat die Beleuchtung in den Wintermonaten und bei Arbeiten in den Morgen-, Abend- und Nachtstunden. Zu den wichtigsten Parametern zählen die Beleuchtungsstärke [Lx], der Lichtstrom [Lumen] und die Farbtemperatur [Kelvin]. Die Beleuchtungsstärke gibt an, wie viel Licht auf eine Fläche einfällt. Der Lichtstrom gibt die abgegebene Lichtmenge des Leuchtmittels an und die Farbtemperatur beschreibt die Lichtfarbe, zum Beispiel Tageslichtweiß (5.000 K bis 7.000 K) [1]. Die für die Beleuchtung verwendeten Lampen können in drei Hauptgruppen unterteilt werden [1]:

- **Thermische Strahler** stellen die einfachste Art und Weise der Baustellenbeleuchtung dar. Das Funktionsprinzip beruht darauf, dass ein dünner Draht durch elektrischen Strom zum Glühen gebracht wird. Gängige Beispiele hierfür sind Glühlampen und Halogenglühlampen [1]. Es gilt zu beachten, dass die Europäische Union den Einsatz derartiger Leuchtmittel seit 2009 erfolgreich zurückgedrängt hat [73].
- Unter **Nicht-thermische Strahler/Entladungslampen** versteht man jene Leuchtmittel bei denen elektrischer Strom Gase oder Metaldämpfe anregt. Es gilt zwischen Hochdrucklampen (Halogen-Metallampfen, Quecksilberampfen, Natriumampfen) und Niederdrucklampen (Leuchtstofflampen, Kompaktleuchtstofflampen, Natriumampfen-Niederdrucklampen, Induktionslampen) zu unterscheiden [1]. Die Effizienz derartiger Lampen ist vom verwendeten Vorschaltgerät abhängig [72].
- Bei **LED-Lampen** erzeugt ein Halbleiterkristall, welcher in einer Reflektorwanne sitzt, bei Stromdurchfluss Licht. Aufgrund des niedrigen Energieverbrauchs, der hohen Leuchtstärke, Unempfindlichkeit gegenüber Stößen und ihrer Langlebigkeit im Vergleich zu herkömmlichen thermischen Strahlern oder Entladungslampen, nimmt ihre Bedeutung im Baubetrieb zu [1]. Die Haltbarkeit variiert je nach Herstellerangaben zwischen 5.000 und 50.000 Stunden [72].

Für eine ausreichende Beleuchtung von Arbeitsstätten auf Baustellen sollten Leuchten für Allgemeinflächen gleichmäßig angeordnet werden. Es gibt mehrere Möglichkeiten um dieses Ziel zu erreichen. Eine Hochmastbeleuchtung mit wenigen leistungsstarken Leuchten in großer Höhe über dem Baufeld kann mehr Bewegungsfreiheit schaffen und Installationsaufwand reduzieren. Leuchten werden oft an Krantürmen befestigt, aber bei separaten Masten beträgt die günstigste Höhe für eine Fläche mit 20 lx auszuleuchten ist zwischen 15 m und 30 m. Für die Beleuchtung von Baustellen empfiehlt sich eine Kombination aus leistungsstarken Leuchten an Hochmasten für den inneren Teil des Baufeldes und ein konventionelles System für die Randgebiete. Die Einrichtung der Leuchten sollte Blendung, Helligkeitsunterschiede und Schattenbildung vermeiden. Gefahrenquellen müssen stärker beleuchtet werden als benachbarte Flächen. Ein 200 W-Flutlichtstrahler beleuchtet demnach eine 30 m x 16 m große Fläche mit 25 lx, wenn er 20 m entfernt von einer senkrecht zur Strahlrichtung angeordneten Wand steht. Transportable Flutlichtstrahler-Einheiten werden typischerweise für die Einzelplatz- und Allgemeinflächenbeleuchtung auf Baustellen eingesetzt [1]. Für spezielle Tätigkeitsbereiche auf Baustellen, wie die Montage von Lüftungskanälen in dunklen Räumen, muss eine Einzelplatzbeleuchtung eingerichtet werden. Die geforderten mittleren Beleuchtungsstärken richten sich nach der Art der Arbeit und können mit LED-Baustrahlern erreicht werden, die auch als Akku-Baustrahler erhältlich sind [1].

2.5 Stromerzeugung auf Baustellen

Baustellen können nicht immer ausschließlich aus dem öffentlichen Netz mit Strom versorgt werden, weshalb Stromerzeugungsaggregate eingesetzt werden [1]. Es gibt zwei Arten der Eigenstromversorgung [1]: gänzliche Eigenstromerzeugung und die unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV).

Wenn der Netzbetreiber einer Baustelle nicht genug Leistung bereitstellen kann oder die Entfernung zum Versorgungsnetz zu groß ist, muss die Baustelle mittels **Eigenstromerzeugung** versorgt werden. Die stationäre oder mobile Stromversorgungsanlage besteht aus Maschinensätzen, die aus Generator und Dieselmotor bestehen, sowie der zugehörigen Steuerung und Schaltanlage. Eine ausreichend dimensionierte Tankanlage zur Lagerung des benötigten Kraftstoffes wird ebenfalls benötigt. Der Standort der Stromversorgungsanlage sollte das Zentrum des Energiebedarfs sein, um lange Versorgungsleitungen zu vermeiden [1].

Eine **USV** oder Notstromversorgung ist auf Baustellen mit Wasserhaltung, Druckluftarbeiten, umfangreichen Betonierarbeiten oder zur Sicherstellung der Sicherheitsbeleuchtung erforderlich, um Schäden am Bauwerk, Geräten oder Personen zu vermeiden. Um Kosten zu sparen ist die Notstromversorgung nur für relevante Baugeräte und Anlagen auszulegen. Der Aufstellort oder die Beschaffenheit des Gehäuses des Ersatzstromerzeugers müssen vor sicherheitsgefährdenden Einwirkungen durch Fremdkörper, Wasser oder Feuchtigkeit geschützt sein. Um für die uneingeschränkte Nutzung im Freien geeignet zu sein, muss ein Ersatzstromerzeuger mindestens der Schutzart IP 54 entsprechen und für die Verwendung in Gebäuden mindestens der Schutzart IP 43 entsprechen. Werden Geräte geringerer Schutzart verwendet, müssen weitere Schutzmaßnahmen getroffen werden. Um einen sicheren Baustellenbetrieb zu gewährleisten, müssen bei der Ersatzstromversorgungsanlage spezielle, auf das vorhandene Netz abgestimmte Schutzmaßnahmen wirksam werden. Wenn nicht sichergestellt ist, dass die im dauerhaften Netz vorhandenen Schutzeinrichtungen auch nach einem Stromausfall wirksam sind, dürfen folgende Schutzmaßnahmen angewendet werden: Schutz durch Abschaltung der Stromversorgung, Schutztrennung, Schutzkleinspannung (vor allem für Handleuchten) und Schutzisolierung (vor allem für den Einsatz von ortsveränderlichen Ersatzstromerzeugern und ortsveränderlichen elektrischen Betriebsmitteln) [1].

Die Nutzung **erneuerbarer Energiequellen zur Eigenstromversorgung**, wie zum Beispiel Wind- und Solarenergie, zur Energieerzeugung auf Baustellen ist zur Zeit nicht weit verbreitet. Einige Test- und Forschungsvorhaben etablierter Bauunternehmen zeigen wie ein flächendeckender Einsatz im Baubetrieb aussehen könnte. Wie Abbildung 2.8 zu entnehmen ist, ergänzen sich die beiden Energiequellen hinsichtlich ihres saisonalen Erzeugerprofils.

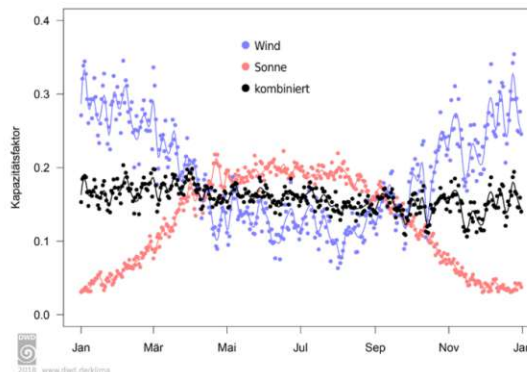


Abb. 2.8: Mittlerer Jahresgang der Kapazitätsfaktoren über Deutschland (Mittelwert 1995 bis 2015) [74]

Grundvoraussetzung für die erfolgreiche Nutzung ist ein auf die Energieerzeugungsanlage abgestimmter Wechselrichter, der die Gleichspannung in netzkonforme Wechselspannung umwandelt. Bei der Auswahl ist zu berücksichtigen, dass Wind- und Solarenergie eine unterschiedliche Betriebscharakteristik haben. So muss der Wechselrichter einer Windenergieanlage mit Böen und häufig einhergehenden Lastwechseln arbeiten können, wohingegen eine Abstimmung auf die beständigere solare Einstrahlung einfacher ist. Nachstehend folgt eine detaillierte Darstellung von Photovoltaik- und Kleinwindenergieanlagen:

Photovoltaikanlagen

Wie der im Mai 2023 erschienene Bericht „Innovative Energietechnologien in Österreich — Marktentwicklung 2022“ nahelegt, erfreuen sich Photovoltaikanlagen großer Beliebtheit. Im Jahr 2022 konnte im Vergleich zum Vorjahr die installierte Photovoltaikgesamtnennleistung um 36,30% auf 1.009,1 MW_{peak} gesteigert werden. Dies führt zu einer kumulierten Photovoltaikgesamtnennleistung in Österreich von 3.791,7 MW_{peak} Ende 2022 [75]. Wie Abbildung 2.9 zeigt, unterliegt das solare Einstrahlungspotential in Österreich einer Bandbreite von zirka 800 bis 1.390 W/m². Die Multiplikation der installierten Photovoltaikgesamtnennleistung mit dem solaren Einstrahlungspotential liefert den voraussichtlichen Energieertrag. Ohne Zuhilfenahme eines Photovoltaikpotentialkataster ist das solare Einstrahlungspotential in Mitteleuropa mit 1.000 W/m² abzuschätzen [76]. Diesem Ansatz folgend kann in Mitteleuropa davon ausgegangen werden, dass eine 10,0 kW_{peak} Photovoltaikanlage einen Jahresertrag von zirka 10.000 kWh Strom liefert. Zur Beurteilung von Photovoltaikanlagen ist die Performance Ratio heranzuziehen, die ein Verhältnis von realen und idealen Ertrag darstellt [77], siehe Tabelle 2.5.

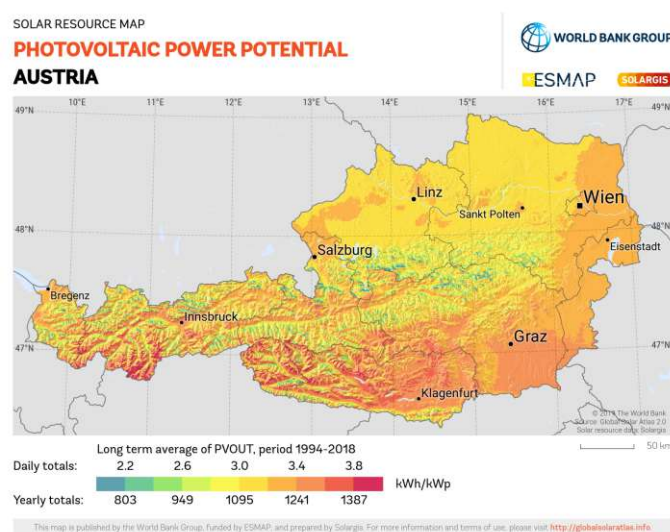


Abb. 2.9: Photovoltaikpotential für Österreich [78]

Tab. 2.5: PR — Performance Ratio einer Photovoltaikanlage [77]

Anlagenperformance	Performance Ratio
	[%]
Sehr gut	> 80
Durchschnittlich	75
Schlecht	< 60

Das Einsatzgebiet von Photovoltaikanlagen zur Eigenstromerzeugung im Baubetrieb erstreckt sich von einzelnen Baustellencontainern, siehe Abbildung 2.10a, bis hin zu ganzen Containeranlagen, siehe Abbildung 2.10b. Das österreichische Bauunternehmen PORR konnte während dem Autobahnprojekt S3 in Polen im Tunnelbau erste Erfahrungen mit Photovoltaikanlagen sammeln. Bei dem gegenständlichen Bauvorhaben stattete die PORR vier Mannschaftscontainer mit jeweils einem FABER Solar Frame aus [14]. Im Wesentlichen handelt es sich bei dem zum Einsatz gebrachte System um einen massiven Stahlrahmen mit innenliegenden Photovoltaikmodulen (zirka $2,3 \text{ kW}_{\text{peak}}$ -Leistung) der mittels Stapler oder Kran auf das Containerdach gesetzt wird. Neben den bereits vormontierten Photovoltaikmodulen verfügt der Rahmen über einen eigenen Wechselrichter und ist im Sinne des Plug-and-Play-Prinzips mittels CEE-Steckdose an die vorhandene Baustellenstromversorgung anzustecken [79].

Einen ähnlichen Ansatz verfolgt die Wildbach- und Lawinenverbauung mit ihrem Kooperationspartner Hilber-Solar beim Sanierungsvorhaben des Lawinenauffangdamms Allerheiligen. Die installierte Gesamtleistung der Photovoltaikmodule ist mit $3,0 \text{ kW}_{\text{peak}}$ höher als bei jenen der FABER Infrastructure GmbH. Zusätzlich verfügt der gegenständliche Baustellencontainer über eine Batterie, die überschüssige Sonnenenergie zwischenspeichert [80]. Je nach Modulleistung, Ausrichtung, örtlicher Verschattungssituation und unter Berücksichtigung des Einstrahlungspotentials, siehe Abbildung 2.9, kann eine Photovoltaikanlage am Dach eines einzelnen Baustellencontainers pro Jahr voraussichtlich zwischen 2.300 kWh und 3.600 kWh Strom produzieren.

Im Gegensatz zu den beiden zuvor genannten Beispielen bringt die STRABAG in ihrem Testvorhaben die Photovoltaikanlage großflächig am Dach der Containeranlage an. Die Gesamtleistung der Photovoltaikanlage am Areal des ehemaligen Nordbahnhofs hat eine Gesamtleistung von zirka $46,0 \text{ kW}_{\text{peak}}$ [81]. Unter Berücksichtigung des Einstrahlungspotentials, siehe Abbildung 2.9 ist mit einer jährlichen Stromproduktion von zirka 46.000 kWh zu rechnen. Nachteilig ist, dass das Erzeugerprofil einer Photovoltaikanlage nicht dem Lastprofil einer Hochbaubaustelle entspricht, wonach üblicherweise in den Wintermonaten am meisten Strom verbraucht wird [36, 38].



(a) FABER Solar Frame [79]



(b) PV-Anlage auf Containerburg [81]

Abb. 2.10: Photovoltaikanlagen im Baustellenbetrieb

Kleinwindkraftanlagen

Zu den den Kleinwindenergieanlagen (KWEA) zählen laut OVE/ÖNORM EN 61400-2 jene Windenergieanlagen, die eine Spannung unter 1.000 V Wechselspannung oder 1.500 V Gleichspannung erzeugen und deren vom Rotor überstrichene Fläche kleiner als 200 m^2 sind [82]. Kleinwindenergieanlagen sind in Planung, Umsetzung und Betrieb aufwändig und führen im gewerblichen als auch privaten Bereich ein Nischendasein. Leonhartsberger et al. [83] zeigt in seinem Kleinwindkraftreport 2015, dass Ende 2015 327 Kleinwindenergieanlagen mit einer Gesamtleistung von $1,5 \text{ MW}_{\text{peak}}$ einer Photovoltaiknennleistung von $937,0 \text{ MW}_{\text{peak}}$ gegenüberstehen.

Als Gründe hierfür führt Leonhartsberger et al. [83] unter anderem die vorteilhaftere Entwicklung der Anschaffungskosten einer Photovoltaikanlage, die attraktivere Förderlandschaft für Photovoltaikanlagen und das fehlende Wissen der Bevölkerung über Kleinwindenergieanlagen ins Treffen [83]. Ergänzend hierzu ist anzumerken, dass aufgrund fehlender mechanisch beweglicher Bauteile Photovoltaikanlagen hinsichtlich Montage, Betrieb und Wartung anwenderfreundlicher sind. Es ist zwischen folgenden beiden Arten von Kleinwindenergieanlagen zu unterscheiden [84]:

- **Horizontalachsenwindturbine (HAWT)** zeichnet sich durch die horizontal liegende Nabe und einen hohen Wirkungsgrad aus. Für einen optimalen Ertrag ist eine Windnachführung erforderlich. Häufig wechselnde Windverhältnisse reduzieren den Wirkungsgrad [84].
- **Vertikalachsenwindturbine (VAWT)** bieten Vorteile hinsichtlich Schattenwurf und Geräuschentwicklung. Bauartbedingt verfügen Windenergieanlagen mit vertikal liegender Nabe über einen geringeren Wirkungsgrad und sind anfälliger für windinduzierte Schwingungen [84].

Um einen wirtschaftlichen Betrieb sicherzustellen ist die richtige Standortwahl von großer Bedeutung. Im Gegensatz zu Photovoltaikanlagen liefern Rückgriffe auf Windpotentialkataster nur erste Anhaltspunkte, da Windverhältnisse erheblichen lokalen Schwankungen unterliegen. Aus diesem Grund empfiehlt es sich, die Windgeschwindigkeiten am Projektstandort über einen Zeitraum von einem Jahr zu messen und eine Windklassenverteilung zu erstellen. Die Windklassenverteilung ist anschließend mit der Anlagenkennlinie der geplanten Kleinwindenergieanlage zu verschneiden. Anhand dieser Berechnung lässt sich der voraussichtliche Ertrag der Windenergieanlage abschätzen. Den Tabellen 2.6 und 2.7 sind Kennwerte zur Beurteilung der Standort- und Anlagenwahl von Windenergieanlagen zu entnehmen.

Tab. 2.6: Erzielbare Volllaststunden [h/Jahr] von Windkraftanlagen [84]

Standortwahl	Volllaststunden / Jahr
	[h / Jahr]
Ausgezeichneter Standort	> 1.200
Guter Standort	800 - 1.200
Mittelmäßiger Standort	500 - 800
Schlechter Standort	< 500
Vergleiche Großwindkraftanlagen > 2.000	

Tab. 2.7: Spezifischer Flächenertrag von Windkraftanlagen je m² Rotorfläche [kWh/m²][84]

Standortwahl	spezifischer Flächenertrag
	[kWh/m ²]
Ausgezeichneter Standort	> 250
Guter Standort	150 - 250
Mittelmäßiger Standort	140
Schlechter Standort	< 100
Vergleiche Großwindkraftanlagen > 900	

Nachstehend folgt eine Analyse zweier für den Baubetrieb relevanter Kleinwindenergieanlagenprojekte. Seit Mai 2021 betreibt die Marktgemeinde Tübing im Tullnerfeld neben einer $30,0 \text{ kW}_{\text{peak}}$ -Photovoltaikanlage eine Kleinwindkraftanlage mit 1 kW Nennleistung am Dach der Brunnenanlage Katzelsdorf. Die Anschaffungskosten für die Kleinwindkraftanlage beliefen sich laut regionalen Medienberichten auf zirka 4750 € (netto) [85]. Um die Photovoltaikanlage nicht zu verschatten, befindet sich das Windrad am nordwestlichen Rand des Pultdaches, siehe Abbildung 2.11a. Wie die Abbildung 2.11b zeigt, liegt die horizontal liegende Nabe des Windrades zirka 5 m oberhalb der natürlichen Geländeoberkante. Die bauliche Situation vor Ort lässt sich somit mit einer eingeschossigen Containerburg vergleichen. Das Windenergiepotential in 70 m Höhe beträgt laut dem Forschungsvorhaben BEAUVORT der ZAMG zwischen 150 und 250 W/m^2 [86]. Wie dem österreichischen Windatlas zu entnehmen ist, liegt die mittlere Windgeschwindigkeit in 50 m Höhe bei bei zirka $5,4 \text{ m/s}$ [87].



(a) Lagebild



(b) Kleinwindkraftwerk am Dach

Abb. 2.11: Energieerzeugung am Dach der Brunnenanlage Katzelsdorf

Aufgrund der bodennahen Aufstellung kann sich die Kleinwindkraftanlage dem negativen Einfluss von Vegetation und Bebauung in Form von Reibungskräften, welche der Windkraft entgegen wirken, nicht entziehen. Das Windenergiepotential und die Windgeschwindigkeit sind entsprechend herabgesetzt. Wie der Tabelle 2.8 zu entnehmen ist, bestätigen der niedrige Energieertrag von zirka 65 kWh und die deckungsgleiche geringe Anzahl an Volllaststunden von zirka 65 h innerhalb des Betrachtungszeitraums zwischen Mai 2021 und November 2021, dass derartige Aufstellbedingungen trotz der gestiegenen Energiepreise keinen wirtschaftlichen Betrieb gewährleisten. Der Flächenenertrag von jeweils 65 h bzw. kWh/m^2 Rotorfläche lassen bei Vergleich mit Tabelle 2.6 ebenfalls den Schluss zu, dass es sich um einen „schlechten“ Standort bzw. die Aufstellbedingungen nicht optimal sind.

Das Beispiel der Brunnenanlage Katzelsdorf verdeutlicht die Bedeutung der Standortwahl und der Aufstellbedingungen für Kleinwindenergieanlagen auf Containerdächern. In diesem Zusammenhang ist vorzubringen, dass sich die Performance der gegenständlichen Kleinwindenergieanlage unter Berücksichtigung der Erkenntnisse von Wang et al. [88] steigern ließe. Um den Einfluss von Ablöseblasen und Turbulenzen zu reduzieren empfiehlt Wang et al. [88] auf Grundlage von durchgeführten CFD-Simulationen im urbanen Umfeld, dass die Höhenlage von Kleinwindenergieanlagen jedenfalls $1,51$ bis $1,79$ mal höher als das darunterliegende Gebäude sein sollte. Der ideale Aufstellungsort liegt mittig an jener Gebäudefront, die am nächsten zur Hauptwindrichtung verläuft. Im vorliegenden Fall würde dieser Aufstellungsort zu einer Verschattung der Photovoltaikanlage in den Nachmittags- bis Abendstunden führen. Da sich die Erzeugerprofile von Wind und Photovoltaik ergänzen wäre dieser Verlust vermutlich vernachlässigbar. Die Photovoltaikmodule sind ohnehin parallel zum Pultdach in Richtung Süden ausgerichtet [84].

Tab. 2.8: Stromerzeugung laut Marktgemeinde Tulbing am Standort Wasserwerk Katzelsdorf

Monat	Stromerzeugung = Volllaststunden [kWh] bzw. [h]	Ausnutzungsgrad [%]
Mai	3,85	0,52
Juni	4,21	0,58
Juli	5,81	0,78
August	3,507	0,47
September	2,76	0,38
November	24,37	3,38
Σ	65,35	

Dennoch ist der Einsatz von Kleinwindkraftanlagen auf Baustellen denkbar. Voraussetzung hierfür ist das Vorhandensein eines Turmdrehkrans oder anderer mastähnlicher Strukturen, die zum Betrieb der Baustelle vorzuhalten sind. In diesen Fällen gewährleistet der bereits vorhandene Mast ausreichend Abstand zwischen Windrad und Boden. Bauherren, wie zum Beispiel die SÜBA, haben das vorhandene Potential erkannt und setzen teilweise Kleinwindkraftanlagen von MOWEA im Hochbau ein. Das Bauvorhaben mit dem klingenden Projektname „Das Koloman“ ist ein derartiges Testvorhaben und befindet sich im Zentrum der niederösterreichischen Stadt Stockerau [89]. Das Windenergiepotential in 70 m Höhe beträgt laut dem Forschungsvorhaben BEAUVORT der ZAMG zwischen 200 und 250 W/m² [86]. Wie dem österreichischen Windatlas zu entnehmen ist, liegt die mittlere Windgeschwindigkeit in 50 m Höhe bei bei zirka 4,8 m/s [87]. Die Windturbinen sind zirka 10 m unterhalb der Kranführerkabine angeordnet, siehe Abbildung 2.12.

**Abb. 2.12:** Windräder auf Turmdrehkran [89]

Die Windturbinen weisen einen horizontalen Abstand zum aufgehenden Gittermast auf, da Strömungsturbulenzen im Nahbereich des Mastes die Leistungsfähigkeit negativ beeinflussen [90]. Die 16 Turbinen verfügen in Summe über eine Gesamtnennleistung von 8 kW und produzieren laut Presseaussendung pro Jahr zirka 16.000 kWh Strom [89, 91]. Das entspricht 2.000 Volllaststunden. Der kolportierte jährliche Ertrag von 16.000 kWh ist in Zweifel zu ziehen, da typischerweise nur große Windkraftanlagen eine Ausnutzung von zirka 2.000 Volllaststunden erreichen, siehe Tabelle 2.6. Ausgehend von einem guten Standort laut Tabelle 2.6 ist mit einer Stromproduktion zwischen 6.400 kWh und 9.600 kWh oder weniger zu rechnen. Die Energieerzeugung lässt sich durch Montage der Kleinwindenergieanlage an der Spitze des Turmdrehkrans steigern, da die Windgeschwindigkeit mit der Höhe über Grund steigt [92].

Unter Berücksichtigung der mittleren Windgeschwindigkeit in 50 m Höhe und unter Annahme einer Weibull-Verteilung mit Formbeiwert von 2,0 fällt beim Vergleich der beiden untersuchten Standorte auf, dass der Energieertrag in Katzelsdorf zirka 3,50 % besser ist als in Stockerau, siehe Abbildung 2.13. Der Warwick Wind Trials Report [93] stellt in seinen Untersuchungen fest, dass in der Regel nur bei mehrstöckigen Gebäuden ein Formbeiwert von mehr als 2,0 zu erreichen ist. Die im gegenständlichen Report [93] vorgeschlagene Reduktion des Formbeiwerts auf unter 1,6 führt zu einer Verschiebung der Dichtefunktion nach links. Bei der Auswahl der Kleinwindenergieanlage ist deshalb auf niedrige Einschaltgeschwindigkeiten zu achten.

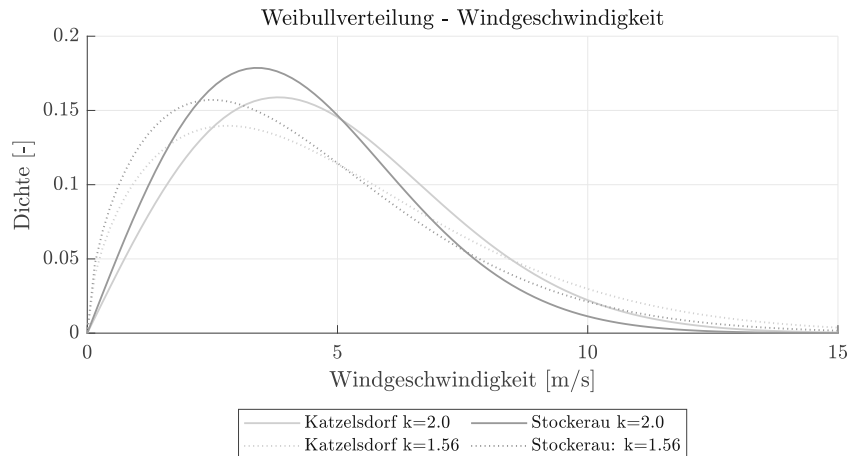


Abb. 2.13: Standortvergleich der Windgeschwindigkeitsverteilung: Stockerau und Katzelsdorf

Neben den zuvor beschriebenen Turmdrehkränen bieten sich Beleuchtungsmaste mit energiesparenden LED-Leuchtmittel als Träger für Kleinwindenergieanlagen an. Das portugiesische Unternehmen Omniflow bietet in diesem Zusammenhang eine hybride Lösung bestehend aus Rotor mit vertikal liegender Nabe, kleinen Photovoltaikzellen an der Oberseite und LED-Paneele an der Unterseite an [94], siehe Abbildung 2.14. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass sich vorbehaltlich einer kostengünstigen Montage und Energiepreisen auf konstant hohem Niveau ein wirtschaftlicher Betrieb von Kleinwindenergieanlagen auf Baustellen realisieren lässt. Die Ertragsprognose spielt in diesem Zusammenhang eine entscheidende Rolle. Im Baubetrieb, insbesondere im Hochbau, ist es unpraktikabel vor Inbetriebnahme einer Kleinwindenergieanlage umfangreiche Windgeschwindigkeitsmessungen durchzuführen. Es empfiehlt sich nach Vorbild des Warwick Wind Trials Report [93] umgesetzte Kleinwindenergieanlagen auf Baustellen in einem Katalog zusammenzufassen und auf einen kontinuierlichen Verbesserungsprozess hinsichtlich Aufstellbedingungen zu achten.



Abb. 2.14: Omniflow: Ansicht von unten

2.6 Grundlagen des Lastmanagements

Neben der Menge der bezogenen Energie beeinflusst auch die in einem bestimmten Zeitraum maximal abgerufene Leistung die Energiekosten. Im Versorgungsgebiet der Wiener Netze wird die Höchstleistung in der Netzebene 7 ab einem prognostizierten Jahresstromverbrauch von 25.000 kWh gemessen [45]. Zur Ermittlung der Höchstleistung wird das arithmetische Mittel der höchsten Viertelstundendurchschnittslast innerhalb einer Abrechnungsperiode gebildet. Auf der Rechnung des Netzbetreibers wird die gemessene maximale durchschnittliche Leistung für die jeweilige Abrechnungsperiode und die angemeldete Anschlussleistung ausgewiesen [45]. Anhand der gemessenen höchsten Viertelstundendurchschnittslast in Verbindung mit dem jeweiligen Stromverbrauch lassen sich die Volllaststunden innerhalb der Abrechnungsperiode berechnen. Die Berechnung der Volllaststunden erfolgt nach Formel 2.10, wonach der Stromverbrauch im betrachteten Zeitraum durch die höchste gemessene Viertelstundendurchschnittslast zu dividieren ist. Theoretisch sind innerhalb eines Jahres 8.760 Volllaststunden (=365 Tage x 24 h) und innerhalb eines Monats zwischen 672 und 744 Volllaststunden zu erreichen. In Abbildung 2.15 sind die Netzbereitstellungskosten in ausgewählten Netzbereichen der Netzebene 7 in Abhängigkeit zu den Volllaststunden dargestellt. Der regressive Kostencharakter der Netzbereitstellungskosten lässt den Schluss zu, dass mit zunehmender Anzahl der Volllaststunden der Grundpreis für die Netzbereitstellung je Kilowattstunde sinkt.

$$\text{Volllaststunden [h]} = \frac{\text{Stromverbrauch [kWh]}}{\text{Viertelstundendurchschnittslast [kW]}} \quad (2.10)$$

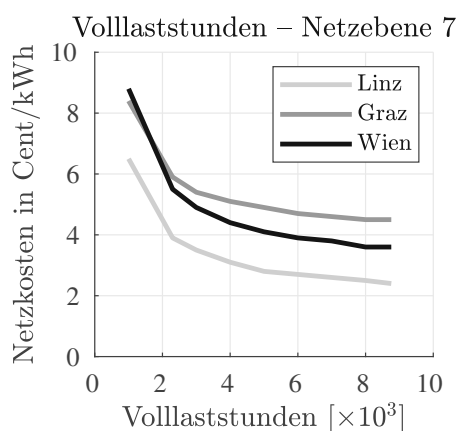


Abb. 2.15: Netzbereitstellungskosten für 2023 in der Netzebene 7 (gemessen) [2]

Piateks Diplomarbeit [38] trifft im Hinblick auf die Volllaststunden der ausgewählten Musterbaustelle keine Aussage, weshalb die vorliegende Diplomarbeit die aggregierten Informationen dahingehend einer genaueren Untersuchung unterzieht. Wie in Abbildung 2.16 dargestellt, fällt die ineffiziente Nutzung der zur Verfügung gestellten Leistung auf. In den Monaten Mai, Juni, Juli, August, September und Oktober liegt der Anteil der Volllaststunden unter 25 %. In den winterlichen Monaten (von November bis Februar) steigt der Anteil der Volllaststunden an und liegt im November 2018 und 2019 bei über 75 %. Die genauen Ursachen für die beiden Spitzenwerte lassen sich auf Grundlage von Piateks Ausführungen [38] im Nachhinein nicht rekonstruieren. Die analysierte Musterbaustelle [38] erzielte in der 24-monatigen Bauzeit im Schnitt 2.300 (zirka 26 %) Volllaststunden pro Jahr. Bei einer Steigerung der Volllaststunden auf 7.000 Stunden ließen sich bei Betrachtung der Netzbereitstellungsgebühren der drei größten österreichischen Städte die Kosten im Schnitt um 30 % senken, siehe Abbildung 2.15.

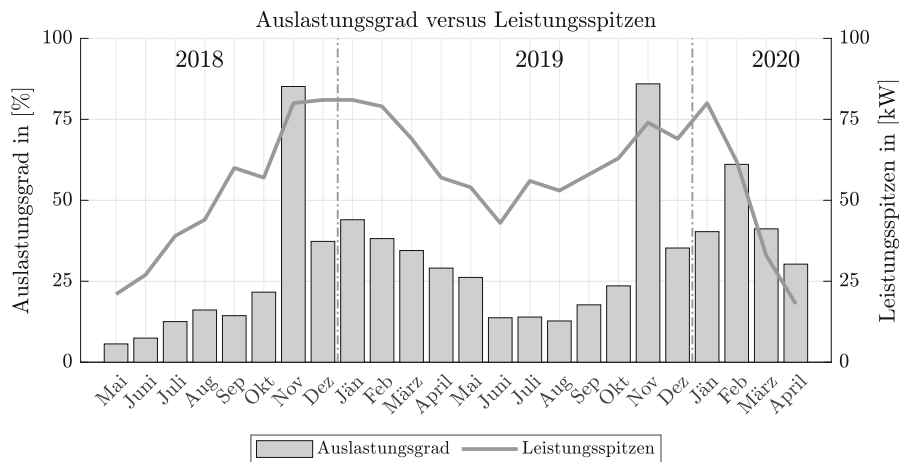


Abb. 2.16: Leistungsspitzen laut Netzanbieter gegenüber Vollausslastungsgrad

Um die zuvor genannte Kostenersparnis zu erreichen, ist es erforderlich die Viertelstundendurchschnittslast zu reduzieren. Dieses Ziel ist unter anderem durch Einführung eines Lastmanagements zu erreichen. Ein Lastmanagement umfasst organisatorische Maßnahmen, den Einsatz technischer Lösungen oder eine Kombination aus beidem. Eine mögliche organisatorische Maßnahme wäre beispielsweise, den Bauablauf so zu planen, dass die benötigte Leistung gleichmäßig über die Bauzeit verteilt wird. Auch der Einsatz technischer Lösungen wie Lastwächter oder Lastmanager, die eine Überschreitung der vertraglich vereinbarten Netzbezugsleistung verhindern, kann sinnvoll sein. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Überprüfung der Anschlussleistung. Eine zu geringe Anschlussleistung kann zu Überlastungen führen oder dazu, dass das Bauunternehmen nicht in der Lage ist, alle elektrischen Baugeräte gleichzeitig zu betreiben. Geräte wie der bereits erwähnte Lastwächter begrenzen die Einschaltströme und verhindern so, dass die Baugeräte nicht zu viel Strom ziehen. Lastmanager sind leistungsstarken Baugeräten vorgeschaltet und verhindern knapp vor Erreichen des Leistungsmaximums das Einschalten zusätzlicher Verbraucher [72]. Umgelegt auf den Baubetrieb, kann das heißen, dass sich während dem Betrieb einer elektrischen Betonpumpe ein zusätzlicher Heizlüfter nicht einschalten lässt. Bei der Auswahl der Methoden ist es wichtig, die individuellen Gegebenheiten der Baustelle zu berücksichtigen. Deshalb sollten Bauunternehmen den Lastverlauf in Abhängigkeit der Bauphase analysieren, bevor sie ein Lastmanagementsystem einsetzen.

Neben der Senkung der Netzbereitstellungskosten bietet Lastmanagement weitere Vorteile. Durch die Reduzierung der maximal abgerufenen Leistung kann Lastmanagement dazu beitragen, Überlastungen und Stromausfälle zu vermeiden. Daran anknüpfend ist festzuhalten, dass neben kalkulatorischen Aspekten eine unzureichend verfügbare öffentliche Anschlussleistung Lastmanagementmaßnahmen ebenfalls erforderlich machen kann. In diesem Fall wird der öffentliche Anschlusspunkt voll ausgeschöpft und die Differenz zum tatsächlichen Leistungsbedarf mittels Batterien oder Dieselgeneratoren gedeckt. Als Alternative zu fossilen Kraftstoffen wird der Einsatz von Wasserstoff auf Baustellen zur Bereitstellung von Elektrizität erprobt [95, 96]. Im Falle von Batterien ist anzumerken, dass diese in Zeiten mit geringem Leistungsbezug über das öffentliche Stromnetz geladen werden um zeitversetzt während Spitzenzeiten den Leistungsbedarf decken zu können. Sowohl Diesel- als auch Wasserstoffgeneratoren sind im Gegensatz dazu auf Anlieferung von Treibstoff und eine umfangreichere Logistik angewiesen. Abschließend ist anzumerken, dass Lastmanagement keine Energieeffizienzmaßnahme im eigentlichen Sinn darstellt, da lediglich der Zeitpunkt des Energiebezugs verschoben wird [72].

2.7 Grundlagen des Energiemanagements

Zur Einführung eines Managementsystems zur Verbesserung der Energieeffizienz sind folgende Normen international anerkannt

- Energiemanagementsysteme nach EN ISO 50001 [97]
- Umweltmanagementsysteme nach EN ISO 14001 [98].

Die Abschnittsreihenfolge beider Normen stimmt mit der ISO-Grundstruktur für Managementsysteme („High Level Structure“) überein. Beide ISO-Normen beruhen auf dem Prinzip des Deming-Kreises (PDCA-Zyklus) [99]. Schwerpunktmäßig wird hier das Energiemanagementsystem nach EN ISO 50001 vorgestellt. Die ersten vier Abschnitte der EN ISO 50001 umfassen allgemeine Ausführungen wie den vorgesehenen Anwendungsbereich, normative Verweise, Begriffserklärungen, Kontext der Organisation und Führung. Bei Einführung eines Energiemanagementsystems ist es von grundlegender Bedeutung, das Spannungsfeld zwischen internen und externen Einflüssen auf die Zielerreichung zu analysieren. Es gilt, Erwartungen und Erfordernisse von Stakeholdern innerhalb und außerhalb des Unternehmens zu berücksichtigen. Zur Gruppe interessierter Parteien können sowohl MitarbeiterInnen, KundInnen, LieferantInnen als auch Interessensverbände aus den unterschiedlichsten Bereichen zählen. Das rechtliche Umfeld ist abzustecken. Jedes Unternehmen muss Kenntnis über seine (eigenen) Verpflichtungen haben und diese sind laufend auf Aktualität zu prüfen. Das betriebliche Energiemanagement muss klaren Anwendungsgrenzen unterliegen. Diese können sich an Prozesse, Orte oder (Teil-)Organisationen orientieren. Ausschlaggebend für den Erfolg eines Energiemanagementsystems ist die Übernahme von Verantwortung auf Führungsebene. Auch diese ist normativ geregelt. Die Abschnitte 6 bis 11 der Norm bilden, wie Abbildung 2.17 zu entnehmen ist, den PDCA-Zyklus, bestehend aus den Elementen Planung (Plan), Umsetzung (Do), Prüfung (Check) und Korrekturen (Act), ab.

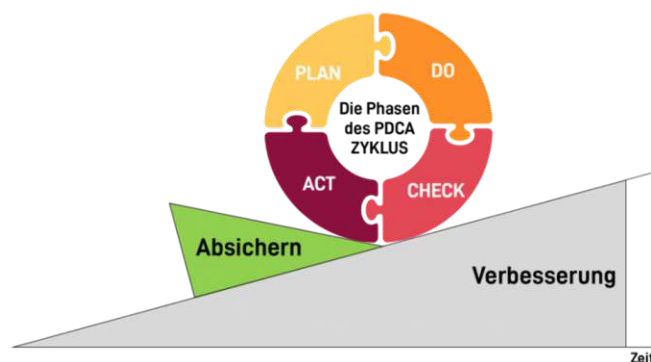


Abb. 2.17: PDCA-Zyklus [100]

Die Planung umfasst eine strategische und taktische Ebene, siehe Abbildung 2.18. Die Strategie behandelt Tätigkeiten und Prozesse der Organisation sowie deren Auswirkung auf die energiebezogene Leistung. Es ist ein kontinuierlicher Verbesserungsprozess zu betreiben, der im Einklang mit der Energiepolitik des Unternehmens steht. In diesem Zusammenhang sind Chancen sowie Risiken zu identifizieren und entsprechende Maßnahmen zu ergreifen. Unerlässlich sind die Festlegung und Aufrechterhaltung von Aktionsplänen, die folgende Fragen beantworten sollen:

- Was wird getan?
- Welche Ressourcen sind erforderlich?

- Wer ist verantwortlich?
- Wann wird es abgeschlossen?
- Nach welchen Verfahren wird das Ergebnis bewertet?

Die taktische Ebene setzt eine Stufe darunter an und beschäftigt sich mit der energetischen Bewertung. Es sind signifikante Energieverbraucher (= Significant Energy Uses (SEU)) zu ermitteln und entsprechende Verbesserungspotentiale abzuleiten. Zur Beurteilung des Energieverbrauchs sind eine energetische Basis und darauf aufbauende Energieleistungskennzahlen zu bilden.

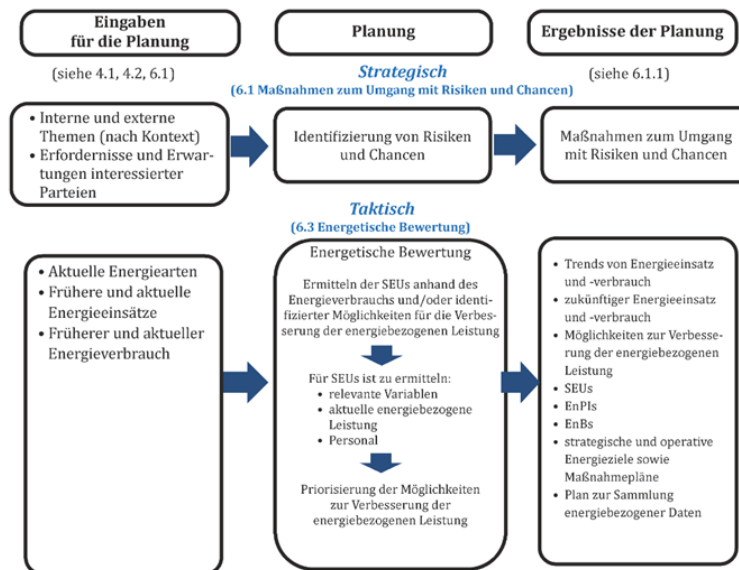


Abb. 2.18: Energieplanungsprozess [97]

Die Umsetzung erfolgt im Betrieb durch Berücksichtigung der in der Planung festgelegten Ziele. Für energierelevante Prozesse und Tätigkeiten im Unternehmen sind klare Rahmenbedingungen zu schaffen. Die Kriterien und Vorgaben sind in Verfahrensanweisungen zu dokumentieren. Die Prüfung geschieht im Rahmen laufender Überwachung und Kontrolle der energiebezogenen Leistung. Zu Vergleichszwecken können die Energieleistungskennzahlen herangezogen werden. In diesem Zusammenhang sind unter anderem interne und externe Energieaudits vorgesehen. Für die Durchführung von Energieaudits ist die DIN EN 16247 anzuwenden [101].

Korrekturen haben im Zuge des aktiven Energiemanagements nach Feststellung von sogenannten Nichtkonformitäten zu erfolgen. Nach Erhebung der Ursachen sind erforderliche Maßnahmen zu treffen. Für kleine- und mittlere Unternehmen besteht keine gesetzliche Verpflichtung zur Einführung eines Energie- bzw. Umweltmanagementsystems oder zur Durchführung regelmäßiger Energieaudits. Im Gegensatz zum EEffG 2014 ist es auch nicht mehr vorgesehen, dass regelmäßig Energieberatungen in Anspruch zu nehmen sind. Dieser Bürokratieabbau könnte in den kommenden Jahren dazu führen, dass klein- und mittelständische Unternehmen (KMU) gegenüber Großunternehmen an Wettbewerbsfähigkeit einbüßen. Das Umweltministerium hat dies erkannt und bietet KMUs für die Einführung eines Energie- bzw. Umweltmanagementsystems eine großzügige Förderung von bis zu 50 % der Investitionskosten an, mit einer maximalen Förderhöhe von 50000 € [102]. Im Jahr 2022 haben österreichische Unternehmen den zur Verfügung stehenden Fördertopf zu 98 % ausgeschöpft [103].

Kapitel 3

Stromverbrauch auf Baustellen

3.1 Rahmenbedingungen

Zwei unterschiedliche Baustellentypen waren Gegenstand der Untersuchungen. Erhebungen fanden auf zwei Gleiserneuerungsvorhaben zwischen Juli 2022 und Mitte Dezember 2022 sowie während der Errichtung eines Wohnbaus zwischen Ende Dezember 2022 und April 2023 statt. Die Bauvorhaben unterschieden sich durch:

- Saisonbedingte Witterungseinflüsse (Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Tageslichtphasen etc.)
- Baustellengröße
- Größe der Baustelleneinrichtung
- Bauzeit
- Geräteeinsatz
- Personaleinsatz
- Lage der Arbeitszeit (Gleiserneuerung in der Nacht versus Hochbau am Tag)
- Art des Auftragnehmers (Konzern versus mittelständisches Unternehmen).

Die anfängliche Skepsis auf der Baustelle gegenüber der Stromverbrauchserfassung war in beiden Fällen erheblich. Nach zahlreichen Gesprächen und ersten erfolgsversprechenden Empfehlungen herrschte auf allen drei Baustellen Einvernehmen.

3.2 Messanlagen

Ausgangspunkt für das vorliegende Forschungsvorhaben waren die seitens der ausführenden Unternehmen vorgelegten Netzbetreiberrechnungen bzw. zusammenfassende tabellarische Aufstellungen. Da der Auftraggeber beim Gleiserneuerungsvorhaben am Landstraßer Gürtel den Stromanschluss bereitstellte, verfügte dieses Bauvorhaben über keinen Smart Meter. Der verantwortliche Bauleiter schätzte den Gesamtstromverbrauch der Gleiserneuerungsbaustelle „Landstraßer Gürtel“ ab. Die anderen Baustellen waren über die Netzebene 7 an das öffentliche Stromnetz angebunden. Der bezogene Strom wurde über einen Smart Meter, der sich im jeweiligen Anschlussverteilerkasten befand, abgerechnet. Vorteilhaft ist, wie in Abbildung 3.1 ersichtlich, dass die Rechnungen der Wiener Netze GmbH übersichtlich sind und den Stromverbrauch, die Leistungsspitze sowie den Blindstromverbrauch ausweisen. Eine Differenzierung nach Hoch- und Niedertarifzone lässt zudem Rückschlüsse auf den Zeitpunkt der Netznutzung zu. Die angegebene Leistungsspitze ermöglicht einen Vergleich mit der angemeldeten Leistung und die Berechnung der Volllaststunden im Abrechnungszeitraum.

Detailblatt zur Rechnung - Strom
 Netzebene: 7
 Lastprofil: G1
 Angemeldete Leistung: 24 kW

Zählerstände und Verbrauch:
 Die folgenden Ablesewerte wurden mit dem Zähler Nr. 3950053 ermittelt.

Messung	Zeitraum	Zählerstand alt	Zählerstand neu	Differenz	Gesamt
Verbrauch (HT)	01.09.2022 bis 30.09.2022	114.226,0	116.335,0	2.109,0	2.109 kWh
Verbrauch (NT)	01.09.2022 bis 30.09.2022	47.687,0	48.754,0	1.067,0	1.067 kWh
Leistungsspitze	01.09.2022 bis 30.09.2022				15,290 kW
Blindstrom	01.09.2022 bis 30.09.2022	27.491,0	27.869,0	378,0	378 kWh

■ ... Zählerablesung durch die Wiener Netze
■ ... Selbstablesung durch die Kundin/den Kunden
■ ... rechnerische Ermittlung des Zählerstandes auf Basis der Vorwerte

Abb. 3.1: Rechnungsausschnitt Wiener Netze; mit der freundlichen Erlaubnis zur Veröffentlichung in der vorliegenden Diplomarbeit durch die Firma Sedlak

Der Blindstromverbrauch ist nicht Teil der vorliegenden Stromverbrauchsanalyse, da er 48 % des Wirkverbrauchs nicht überschritten hat und somit nicht abrechnungsrelevant war [45]. Um den Stromverbrauch beim Bauvorhaben „Hauptstraße 139, 2391 Kaltenleutgeben“ getrennt nach Turmdrehkran und Baubetrieb ermitteln zu können, war es erforderlich, einen geeigneten Datenlogger im Anschlussverteilerschrank unterzubringen. Die Wahl fiel auf das österreichische Produkt „Metering-to-go“ des Unternehmens LeP. Vorteilhaft war die unterbrechungsfreie Montage dank ringförmiger Messwandler-Klemmen mit teilbarem Kern und das kompakte Format [104]. Der Datenlogger erfasste in 15-min Intervallen lückenlos Leistung, Ströme und Leistungsfaktoren an den beiden Abgängen und übertrug mittels GPRS-Verbindung die gemessenen Werte an die LeP-Cloudplattform. Die LeP-Cloudplattform bot umfangreiche Visualisierungs- und Auswertungsmöglichkeiten [105].



Abb. 3.2: „Metering-to-go“ der Firma LeP Lehotzki electronic Products GmbH

In den Baustellencontainern verfolgte das gegenständliche Forschungsvorhaben einen „Smart Home“-Ansatz. Hardwareseitig kam als Server ein Raspberry Pi vom Typ „400“ auf den Gleiserneuerungsbaustellen und Typ „B“ auf der Wohnbaubaustelle zum Einsatz. Ein 4 GB Arbeitsspeicher und eine 32 GB Speicherkarte waren ausreichend für die gestellten Softwareanforderungen [106]. Zur Messung auf Stromkreis- bzw. Geräteebene und Steuerung fanden Relais und Smart-Plugs des amerikanischen Unternehmens Shelly Verwendung. Zu den eingesetzten Geräten zählten Shelly H&T, Shelly Plug S, Shelly Pro 4PM und Shelly Pro 1PM [107]. Softwareseitig waren Home Assistant als quelloffenes „Smart Home“-Betriebssystem [108], InfluxDB als Datenbank [109] und Grafana zur Visualisierung [110] installiert. Im Vorfeld zu den Erhebungen auf der Baustelle fand ein Testlauf aller Geräte an der TU Wien statt.

3.3 Stromverbrauch auf urbanen Gleiserneuerungsbaustellen

Vor Beginn des Monitorings galt es sämtlichen elektrischen Verbrauch innerhalb des Bauleitungscontainers zu erfassen. Wie Tabelle 3.1 zu entnehmen ist, brachte die Bauleitung folgende Geräte im Container zum Einsatz:

Tab. 3.1: Geräteliste inklusive elektrischer Leistungsaufnahme laut Herstellerangaben

Beschreibung	Stromkreis	Leistungsaufnahme in Watt
2 Beleuchtungskörper mit je 2 Leuchtstoffröhren (insgesamt 4 Leuchtstoffröhren)	1	144
2 E-Konvektoren (nur einer angeschlossen) vom Typ „STIEBEL ELTON CNS 200 S“	4	2.000
1 Klimaanlage vom Typ „RED RING CR-09“ Kälteleistung 2,5 kW	2	920
1 Multifunktionsdrucker vom Typ „Konica-Minolta bizhub C364“	3	1.580
1 GORENJE Kühlschrank	3	90
1 Kaffeemaschine vom Typ „JURA E6“ samt passendem Milchschaumer	2	1.450
1 Baustellenradio vom Typ „MAKITA DMR107“	3	[-]
1 WLAN-Router vom Typ „HUAWEI 4G Router 3 Pro“	3	12
2 LENOVO Monitore	2 & 3	10
1 LENOVO Dockingstation	2 & 3	90
2 LENOVO Laptops jeweils für Bauleiter und Polier	2 & 3	90
Diverse Kleingeräte wie Handyladegeräte, Laminiergerät, etc.	2 & 3	[-]

Neben der Erfassung der elektrischen Verbraucher galt es die Beschaffenheit des E-Verteilers zu eruieren. Wie die nachstehende Abbildung 3.3a zeigt, verfügt der gegenständliche Bauleitungscontainer über einen Fehlerstromschutzschalter und vier separate Stromkreise. Der Fehlerstromschutzschalter Modell „EATON PFIM-40/4/003-XA“ ist vom Typ A, gedacht für einen Bemessungsstrom I_n von 40 A und löst bei einem Bemessungsfehlerstrom von $I_{\Delta n}$ von 0,03 A aus. In weiterer Folge teilen sich die drei zur Verfügung stehenden Phasen und der Nullleiter auf die vier einzeln abgesicherten Stromkreise auf. Der Stromkreis „1“ für die Beleuchtung ist mit dem zweipoligen Modell „EATON PLSM-C10/2“ mit einem Bemessungsstrom von 10 A im Vergleich zu den übrigen Stromkreisen am schwächsten abgesichert. Die Stromkreise „2“ und „3“ für die Steckdosen sowie der Stromkreis „4“ für die E-Konvektoren sind mit dem zweipoligen Modell „EATON PLSM-C13/2“ mit einem Bemessungsstrom von 13 A abgesichert.

Zur Stromverbrauchsmessung brachte eine Elektrikerpartie im Auftrag des ausführenden Unternehmens rechts neben dem Bestandsverteiler den beigestellten Verteiler mit den verbauten Messeinrichtungen an und verband diese mit zwei fünfpoligen Kabeln. Der „Smart Home“-Server und der Router wurden in unmittelbarer Nähe zu den Verteilern in einem Serverschrank platziert, siehe Abbildung 3.3b.

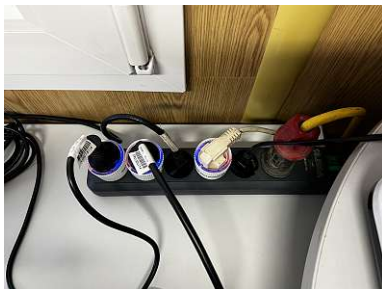
Zwei SCHUKO-Stecker im beige gestellten Verteiler stellten die Stromversorgung für Router und „Smart Home“-Server sicher. Eine Verbrauchsmessung dieser Geräte fand im Rahmen der vorliegenden Diplomarbeit nicht statt. Vor Inbetriebnahme der Messeinrichtung im beige gestellten Verteiler testete der Elektriker die Funktionsfähigkeit der elektrischen Sicherungseinrichtungen (manuelle Auslösung des FI-Schalters). Wie in Abbildung 3.3c ersichtlich, waren auf Geräteniveau zwischen Steckdose und Gerät laienbedienbare WLAN-Schalt-/Messstecker verbaut. Wie Abbildung 3.3d zeigt, fügt sich die Sensorik nahtlos in den Baustellencontainer ein. Nach Abschluss der Einrichtung folgte das „Handover-to-Operation“ des vernetzten Containers für die beiden Gleiserneuerungsvorhaben an die Bauleitung. Die übrigen eingesetzten Container, insbesondere jene für die Mannschaft und die Sanitäreinrichtungen, waren nicht Teil des Energiemonitorings. Ziel der Gleiserneuerungsvorhaben war der Tausch des gesamten Gleiskörpers, siehe Abbildung 3.4.



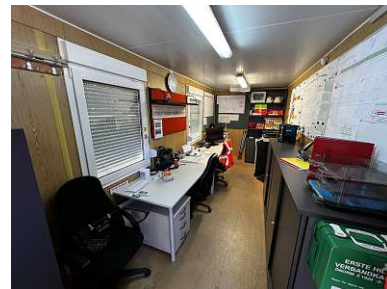
(a) AP-Verteiler des Bauleitungscontainers



(b) V.l.n.r AP, Verteiler (Bestand), Messverteiler, Serverschrank



(c) WLAN-Schalt-/Messstecker in Mehrfachsteckdose



(d) Bauleitungscontainer nach Einbau der Sensorik

Abb. 3.3: Messeinrichtung im Bauleitungscontainer**Abb. 3.4:** Beispielhafte Gleiserneuerung auf der Baustelle Simmeringer Hauptstraße

3.3.1 Stromverbrauch der Baustelleneinrichtung Landstraßer Gürtel

Aus organisatorischen Gründen richtete das ausführende Unternehmen die Containersiedlung, bestehend aus Bauleitungs-, Mannschafts-, Sanitär- sowie Magazincontainern, und das außenliegende Materiallager einige hundert Meter entfernt von der Baustelle im Bereich der Straßenbahnwendeschleife „Schweizer Garten“ ein, siehe Abbildung 3.5a. Die Baustelleneinrichtung war zwischen Juli 2022 und Anfang September 2022 auf der Baustelle vorzuhalten. Der betrachtete Bauleitungscontainer befand sich während dem Gleiserneuerungsvorhaben „Landstraßer Gürtel“ südlich der Straßenbahnwendeschleife, siehe Abbildung 3.5b. Das gegenständliche Sanierungsvorhaben war auftraggeberseitig als „CO₂-neutrale Baustelle“ ausgeschrieben und brachte für die Bauleitung neue projektspezifische Herausforderungen mit sich, wie zum Beispiel den Einsatz rein elektrisch betriebener Baumaschinen [111, 112].



(a) Lageplan der Baustelleneinrichtung für das Gleiserneuerungsvorhaben „Landstraßer Gürtel“



(b) Bauleitungscontainer für das Gleiserneuerungsvorhaben „Landstraßer Gürtel“

Abb. 3.5: Lage der Baustelleneinrichtung für das Gleiserneuerungsvorhaben Landstraßer Gürtel

Bei Projektanfang sah sich die Bauleitung, trotz bauseitig zur Verfügung gestellter Stromversorgung, siehe Abbildung 3.6a, gezwungen für Strombedarfsspitzen verursacht durch das Laden der elektrischen Baugeräte ein Dieselaggregat vorzuhalten. Parallel hierzu prüfte die Bauleitung nachhaltige Alternativen und ersetzte so rasch wie möglich das Dieselaggregat durch eine Batterielösung von MobilHybrid [113] mit einer Speicherkapazität von 36 kWh, siehe Abbildung 3.6b. Die gegenständliche Batterie lud sich über das öffentliche Stromnetz auf und sorgte bei Bedarfsspitzen für eine sichere und unterbrechungsfreie Stromversorgung der Baustelle. Vorteilhaft war, dass dies im Gegensatz zum bisher verwendeten Dieselaggregat lärm- und geruchsfrei stattfand. Der verbaute MPPT-Tracker stellt bei gleichzeitiger Anbringung von Photovoltaikerelementen ein nützliches Zusatzfeature zur Erzeugung von erneuerbarer Energie auf der Baustelle dar.



(a) Baustromanschluss



(b) Batterie mit 36 kWh Speicherkapazität

Abb. 3.6: Stromversorgung während dem Gleiserneuerungsvorhaben

Das ausführende Unternehmen erbrachte den überwiegenden Anteil der Arbeiten am Straßenbahngleis werktags in den Nachtstunden. Um die Auftragnehmeranforderungen hinsichtlich einer „CO₂-neutralen Baustelle“ zu erfüllen, kamen für die Leistungserstellung neben handgeführten Akkupacks von Instagrid [114] mit zirka 2,1 kWh Speicherkapazität, siehe Abbildung 3.7b, als Ersatz für konventionelle Dieselgeneratoren unter anderem auch ein E-Radlader sowie ein E-Bagger, siehe Abbildung 3.7a, zum Einsatz.



(a) E-Bagger Huppenkothen TB260E und der E-Radlader Wacker-Neuson WL20e



(b) 2,1 kWh Akkupacks für kabelgebundene Geräte

Abb. 3.7: Maschinen- und Geräteeinsatz während des Gleiserneuerungsvorhabens

Da der Auftraggeber den Strom für diese Baustelle zur Verfügung gestellt hat, verfügt der Auftragnehmer über keinerlei Aufzeichnungen. Die Stromverbrauchsschätzung der Bauleitung ist Tabelle 3.2 zu entnehmen. Hinsichtlich den elektrischen Baugeräte nahm der Bauleiter an, dass diese einmal täglich aufgeladen wurden. Bei 65 Einsatztagen und einer Batterienennkapazität von 14,1 kWh für den E-Radlader vom Typ Wacker Neuson WL20e [115] ergibt sich ein Stromverbrauch von zirka 917 kWh. Ergänzend dazu ergeben 18 Einsatztage in Verbindung mit einer Batterienennkapazität von 44 kWh für den E-Bagger vom Typ Takeuchi TB260E [116] einen Stromverbrauch von zirka 792 kWh.

Tab. 3.2: Stromverbrauch je Abrechnungszeitraum

Zeiträume	Verbrauch
	kWh
29.06. – 31.07.2022	800
01.08. – 31.08.2022	800
01.09. – 07.09.2022	200
E-Radlader 14,1 kWh	917
E-Bagger 44 kWh	792
Σ	3.509

Wie der nachstehenden Tabelle 3.3 zu entnehmen ist, belief sich der Stromverbrauch des Bauleitungscontainers während der gesamten Bauausführungsphase von zirka 8,5 Wochen inklusive Klimatisierung auf rund 278 kWh. Das entspricht unter den gegebenen Bedingungen einem monatlichen Strombedarf von zirka 131 kWh. Der Stromkreis 3 war mit ungefähr 128 kWh, gefolgt von Stromkreis 2 mit zirka 105 kWh, der verbrauchsstärkste Stromkreis. Der Stromkreis 1 „Beleuchtung“ liegt mit zirka 44 kWh weit niedriger und hat am Gesamtstromverbrauch lediglich einen Anteil von knapp 16 %.

Unter Berücksichtigung, dass das ausführende Unternehmen in den Kalenderwochen 28 und 36 die Baustelleneinrichtung auf- bzw. abgebaut hat, ergibt sich unter den gegebenen Rahmenbedingungen ein durchschnittlicher Stromverbrauch von zirka 33 kWh/Kalenderwoche. Die Klimaanlage ist mit einem Gesamtstromverbrauch von zirka 102 kWh der größte Einzelverbraucher innerhalb des Containers, siehe Tabelle 3.4. Ohne Berücksichtigung der Klimaanlage betrug der Stromverbrauch für die gesamte Ausführungszeit zirka 176 kWh und über den Monat gerechnet zirka 83 kWh. Die Kalenderwochen 29, 30 und 31 überschreiten das Kalenderwochenmittel im Schnitt um zirka 42 %. Da die gesammelten Daten korrespondieren, lässt sich der überdurchschnittliche Stromverbrauch in diesen Wochen vermutlich auf die hohen Temperaturen inner- und außerhalb des Containers zurückführen, siehe Abbildung 3.8. Es zeigt sich, dass sich der Baustellencontainer über das Wochenende (23.07.-24.07.2022) überdurchschnittlich aufheizte und die Innenraumtemperatur in den Nachtstunden zwischen 5 °C und 8 °C über der Außenlufttemperatur lag.

Tab. 3.3: Stromverbrauch des Bauleitungscontainers inklusive Klimatisierung während der Ausführungsphase je Kalenderwoche

Gleiserneuerungsvorhaben Landstraßer Gürtel				
KW	Gesamtverbrauch	Stromkreis 1 „Beleuchtung“	Stromkreis 2	Stromkreis 3
	kWh	kWh	kWh	kWh
28	13,91	1,94	8,20	3,77
29	46,31	4,66	25,27	16,38
30	44,28	6,76	16,53	20,99
31	58,83	7,37	31,42	20,04
32	20,25	3,91	0,97	15,37
33	31,85	3,81	13,91	14,13
34	25,81	5,39	3,99	15,80
35	16,69	3,80	0,85	12,04
36	19,89	6,48	3,45	9,96
∑	277,82	44,12	104,59	128,48

Die Bauleitung betrat am 25.07. gegen 12:45 den Container. Aufgrund der fortgeschrittenen Zeit und der hohen Außentemperatur war es nicht möglich effizient zu lüften und infolgedessen wurde die Klimaanlage eingeschaltet, siehe Abbildung 3.8. Ein unmittelbar positiver Effekt auf den Kühlbedarf, zum Beispiel durch Verdunstungskälte in Folge von Niederschlagsereignissen, lässt sich aus den gesammelten Daten in diesem Zeitraum nicht oder nur geringfügig ableiten.

In den Kalenderwochen 35 und 36 lag der Stromverbrauch zirka 48 % unter dem zuvor ermittelten Kalenderwochenmittel. Im Vergleich zu den Kalenderwochen 29, 30 und 31 lagen wetterbedingt besonders günstige Temperaturbedingungen vor. Der zuvor als negativ beschriebene Effekt, wonach sich Baustellencontainer überdurchschnittlich aufheizen und bei fehlendem Luftwechsel die Temperatur auch halten, hat sich am ersten Septemberwochenende positiv ausgewirkt. Die Innenraumtemperaturen blieben nahezu im optimalen Temperaturbereich zwischen 20 °C und 25 °C. Gegen Bauzeitende an den Tagen 06.09. und 07.09. nahm die Bauleitung die Klimaanlage noch jeweils zirka 2 h in Betrieb. Auffallend bei der Betrachtung der Leistungsaufnahme der Geräte im Bauleitungscontainer war der Multifunktionsdrucker. Der Multifunktionsdrucker verbrauchte im Standby-Modus zirka 35 W pro Stunde. So summierte sich beispielsweise der Stromverbrauch im Ruhezustand allein über ein einziges arbeitsfreies Wochenende auf über 1,5 kWh.

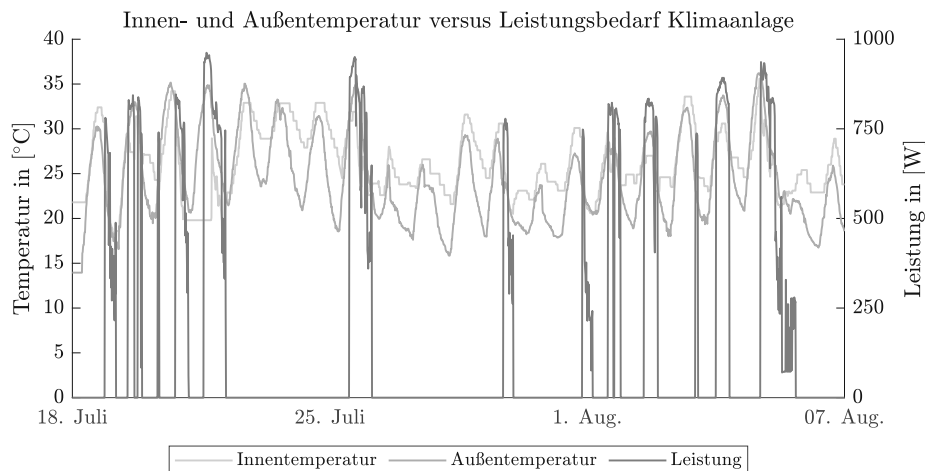


Abb. 3.8: Innen- und Außentemperatur versus Leistungsaufnahme der Klimaanlage in den Kalenderwochen 29, 30 und 31

Der wöchentliche Stromverbrauch liegt zirka 105 % über dem im Herstellerdatenblatt ausgewiesenen durchschnittlichen Wochenverbrauch laut „Energy Star“-Vorgaben (=2,50 kWh), siehe Tabelle 3.4. Hinsichtlich des Kühlschranks ist anzumerken, dass sich der Kompressor aus unbekanntem Gründen an gewissen Tagen über mehrere Stunden hinweg im (Dauer-)Betrieb befand. Ursächlich könnte das Nutzerverhalten (offene Tür, warme Speisen/Getränke, etc.) in Verbindung mit den Einsatzbedingungen (hohe Innenraumtemperaturen $>25^{\circ}\text{C}$ über mehrere Stunden) sein. Als Leuchtmittel kamen in den beiden Lichtbalken jeweils zwei Leuchtstoffröhren mit einer Leistungsaufnahme von je 38 Watt zum Einsatz. In Summe benötigte die Beleuchtung sohin rechnerisch 152 W pro Stunde Leistung. Der Stromverbrauch der Beleuchtung belief sich über die gesamte Bauzeit auf zirka 44 kWh. Im Sinne des Paretoprinzips bilden die vier zuvor genannten Verbraucher über 80 % des gesamten Stromverbrauchs des Bauleitungscontainers ab. Wie Tabelle 3.4 zu entnehmen ist, spielen die Einzelverbraucher, sohin die Dockingstation, der Monitor und die Kaffeemaschine, mit einem Stromverbrauch zwischen 2,94 – 4,15 kWh auf die gesamte Bauzeit gesehen nur eine untergeordnete Rolle. Im Vergleich dazu verbraucht ein durchschnittlicher österreichischer Einpersonenhaushalt laut Regulierungsbehörde E-Control zirka 158 kWh pro Monat bzw. 39,60 kWh pro Woche [117].

Tab. 3.4: Stromverbrauch des Bauleitungscontainers inklusive Klimatisierung während der Ausführungsphase je Kalenderwoche

Stromverbrauch der Geräte in kWh je Kalenderwoche										
Gerät	Kalenderwoche									
	28	29	30	31	32	33	34	35	36	Σ
Multif.-drucker	1,37	5,84	6,36	6,30	5,61	5,46	5,93	5,48	3,52	45,87
Klimaanlage	8,28	25,43	15,79	32,10	0,00	14,33	2,99	0,00	2,81	101,73
Kühlschrank	0,71	3,77	5,58	4,67	3,73	3,48	2,83	2,57	1,59	28,93
Docking Station	0,19	0,59	1,33	0,83	0,00	0,00	0,34	0,28	0,59	4,15
Kaffeemaschine	0,27	0,80	1,17	0,86	0,45	0,32	0,90	0,43	0,54	5,74
Monitor	0,16	0,44	1,03	0,66	0,00	0,00	0,20	0,13	0,32	2,94
Σ										189,36

3.3.2 Stromverbrauch der Baustelleneinrichtung Simmeringer Hauptstraße

Im Gegensatz zur vorherigen Gleiserneuerungsbaustelle war es dem ausführenden Unternehmen hier möglich, die Containersiedlung bestehend aus Bauleitungs-, Mannschafts-, Sanitär- sowie Magazincontainern und das außenliegende Materiallager nahe an der Baustelle einzurichten – siehe Abbildung 3.9. Die aufgestellten Baustellencontainer nahmen an der nordöstlichen Seite der Grillgasse zwischen Sedlitzkygasse und bis annähernd zur Simmeringer Hauptstraße Platz in Anspruch. Einen Teil des außenliegenden Materiallagers richtete das ausführende Unternehmen am Beginn der Sedlitzkygasse auf beiden Seiten ein. Die Baustelleneinrichtung war zwischen September 2022 und Anfang Dezember 2022 auf der Baustelle vorzuhalten.



(a) Lageplan der Baustelleneinrichtung



(b) Bauleitungscontainer

Abb. 3.9: Lage der Baustelleneinrichtung für das Gleiserneuerungsprojekt „Simmeringer Hauptstraße“

Wie das Gleiserneuerungsprojekt „Landstraßer Gürtel“ in Kapitel 3.3.1 war das gegenständliche Sanierungsprojekt auf der Simmeringer Hauptstraße ebenfalls als „CO₂-neutrale Baustelle“ ausgeschrieben. Vorteilhaft war, dass diesem Sanierungsprojekt eine wesentlich zuverlässigere Stromversorgung über den Hausanschlusskasten eines Mehrparteienhauses zur Verfügung stand, siehe Abbildung 3.10a. Die Wiener Netze GmbH bezeichnen einen derartigen Anschluss an das öffentliche Stromnetz auch als Huckepackanschluss [58]. Im Anschlussverteilerkasten, siehe Abbildung 3.10b, waren der Smart Meter zur Abrechnung des Strombedarfs sowie alle für die Baustelle wesentlichen Sicherungen untergebracht. Im gesamten Verlauf der Sanierungsphase kam es laut Bauleitung zu keinem anschlussbedingten Stromausfall. Somit musste die Bauleitung zur Deckung von Strombedarfsspitzen kein Dieselaggregat und/oder Batterie zum Einsatz bringen.



(a) Huckepackhausanschluss für die Baustelle



(b) Anschlussverteilerkasten

Abb. 3.10: Stromversorgung des Gleiserneuerungsprojekts „Simmeringer Hauptstraße“

Nichtdestotrotz wollte die Bauleitung den zwischenzeitlich durch das ausführende Unternehmen angekauften Batteriespeicher Mobilhybrid MH-36 weiterhin auf der Baustelle vorhalten, zumal dieser über einen MPPT-Anschluss für eine Photovoltaikanlage verfügt. Der Verlauf der Grillgasse parallel zur „Südwest-Nordost“-Achse, siehe Abbildung 3.9, und die Straßenbreite von zirka 24 m in Verbindung mit der umgebenden Bebauung hätte für eine Photovoltaikanlage am Dach des Bauleitungscontainers mit südöstlicher Ausrichtung gesprochen. Aus zwei Gründen scheiterte dieses Vorhaben der Bauleitung. Der Polier beobachtete, dass Kinder vom benachbarten Wohnbau zum Ärgernis der Bauarbeiter regelmäßig Steine oder Ähnliches vom Balkon auf die Container warfen. In weiterer Folge fürchtete er, dass es zur Beschädigung der teuren Photovoltaikpaneele kommen könnte.

Der Batteriespeicher war nach Angaben des Bauleiters unmittelbar nach Einrichtung der Baustelle in der Grillgasse defekt und wurde zur Reparatur nach Deutschland verbracht. Er kam im weiteren Verlauf der Sanierung nicht mehr zum Einsatz. Wie bereits bei der vorherigen Gleiserneuerungsbaustelle erbrachte das ausführende Unternehmen den überwiegenden Teil der Bauleistungen in der Nacht. Auf Grund der mangelnden Performance bei der vorherigen Baustelle und nach Rücksprache mit dem Auftraggeber brachte die Bauleitung den E-Radlader von Wacker-Neuson nicht neuerlich zum Einsatz. Infolgedessen kam ein konventioneller dieseltreibender Lieberherr Radlader und ein Wacker-Neuson E-Minibagger zum Einsatz, siehe Abbildung 3.11.



(a) Lieberherr Radlader 509



(b) Wacker-Neuson Zero Tail Kettenbagger EZ17e

Abb. 3.11: Maschineneinsatz beim Gleiserneuerungsvorhaben „Simmeringer Hauptstraße“

Nach Durchsicht der Rechnungen von Wien Energie teilte die Bauleitung mit, dass sich der Stromverbrauch über die Bauzeit für die gesamte Baustelleneinrichtung wie in Tabelle 3.5 aufgeschlüsselt darstellt. Der Verbrauchsmessung des Bauleitungscontainers ist voranzustellen, dass krankheitsbedingt und aufgrund des Mangels an verfügbaren Elektrikern der Stromkreis „Heizung“ nicht mit einer Messeinrichtung ausgestattet werden konnte.

Tab. 3.5: Gesamtverbrauch (Baucontainer inkl. Akkugeräte); *keine Rechnung vorhanden

Zeiträume	Verbrauch
	kWh
08.09. – 30.09.2022	702
01.10. – 31.10.2022	847
01.11. – 30.11.2022	2.142
01.12. – 21.12.2022*	1.500
Σ	5.191

Auf Grundlage der Außen- bzw. Innentemperatur kann jedoch auf das Heizverhalten geschlossen werden, siehe Abbildung 3.12. Trotz sinkender Außentemperaturen im Dezember herrschten im Bauleitungscontainer Temperaturen weit über 25 °C. Dieses Phänomen ist vor allem an arbeitsfreien Tagen zu beobachten und deutet darauf hin, dass sich die Heizung im Dauerbetrieb befand. Die tiefen Temperaturen unter 15 °C nach den Wochenenden sind vermutlich mit dem Weglüften der überschüssigen Heizwärme oder durch Heizungsausfälle zu erklären.

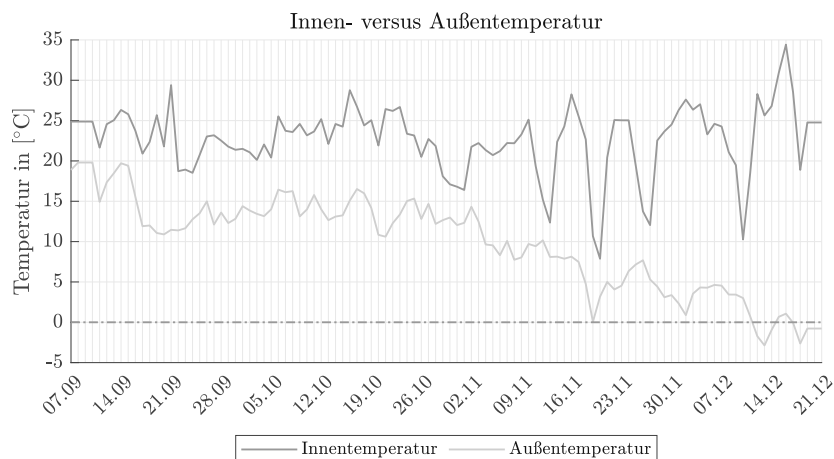


Abb. 3.12: Temperaturverlauf innerhalb des Baustellencontainers

Wie der nachstehenden Tabelle 3.6 zu entnehmen ist, belief sich der Stromverbrauch des Bauleitungscontainers während der gesamten Bauausführungsphase von zirka 14,5 Wochen auf rund 341 kWh (inklusive Klimatisierung; exklusive Heizung). Das entspricht unter den gegebenen Bedingungen einem monatlichen Strombedarf von zirka 94 kWh. Der Stromkreis 3 war mit zirka 222 kWh, gefolgt vom Stromkreis 1 „Beleuchtung“ mit zirka 102 kWh, der verbrauchsstärkste Stromkreis. Der Stromkreis 2 liegt mit zirka 17 kWh weit abgeschlagen und hat am Gesamtstromverbrauch lediglich einen Anteil von zirka 5%. Im Rahmen der Ausarbeitung der Diplomarbeit wurde zwischenzeitig die Empfehlung ausgesprochen, die bestehende Beleuchtung, siehe Abbildung 3.3d, durch zwei LED-Lichtbalken, siehe Abbildung 3.13b, zu ersetzen. Am 17.11.2022, respektive in der Kalenderwoche 46, baute der Polier die Beleuchtung um. Der Tausch der Beleuchtungskörper sparte zirka 14% Strom ein.



(a) Vorher



(b) Nachher

Abb. 3.13: Vergleich der Beleuchtungssituation im Bauleitungscontainer

Tab. 3.6: Stromverbrauch inklusive Klimatisierung des Bauleitungscontainers während der Ausführungsphase je Kalenderwoche

Gleiserneuerungsvorhaben Simmeringer Hauptstraße				
KW	Gesamtverbrauch	Stromkreis 1 „Beleuchtung“	Stromkreis 2	Stromkreis 3
	kWh	kWh	kWh	kWh
36	0,49	0,15	0,00	0,34
37	25,59	8,37	0,86	16,36
38	20,90	5,56	1,02	14,32
39	33,03	15,23	1,74	16,06
40	21,79	6,42	1,17	14,20
41	26,22	8,39	1,30	16,53
42	24,77	7,98	0,90	15,89
43	23,80	8,22	0,71	14,87
44	18,52	4,47	0,94	13,11
45	20,93	7,31	0,89	12,73
46	21,60	4,95	1,28	15,37
47	22,04	4,76	1,41	15,87
48	26,88	6,40	1,55	18,93
49	24,38	5,62	1,39	17,37
50	25,24	6,38	1,43	17,43
51	5,03	1,76	0,32	2,95
Σ	341,21	101,97	16,91	222,33

3.3.3 Zusammenfassung

Die Stromverbrauchsmessungen ergaben, dass der betrachtete Bauleitungscontainer ohne Heizung und Klimatisierung durchschnittlich zwischen 20 kWh (Landstraßer Gürtel) und 24 kWh (Simmeringer Hauptstraße) Strom pro Kalenderwoche bezieht. Der Unterschied von 20 % zwischen den beiden Gleiserneuerungsprojekten ist vermutlich auf die Sommerferien, die kürzeren Tageslichtphasen im Herbst/Winter und den Standort des Bauleitungscontainers zurückzuführen. Um sich vor neugierigen Blicken zu schützen, waren die Rollläden während der Bauarbeiten auf der Simmeringer Hauptstraße die meiste Zeit heruntergelassen. Während der Gleiserneuerung am Landstraßer Gürtel verbrauchte die Klimaanlage des Bauleitungscontainers durchschnittlich 11 kWh Strom pro Kalenderwoche. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die Klimaanlage in den Kalenderwochen 32 und 35 keinen Verbrauch aufwies.

Auffällig ist die Leistungsaufnahme des Multifunktionsdruckers im Standby-Modus von durchschnittlich zirka 35 W. Der Stromverbrauch lässt sich durch das Alter des Gerätes erklären. Neuere Drucker sind wesentlich effizienter und verbrauchen im Standby-Modus praktisch keinen Strom. Durch das Abschalten des Druckers am Wochenende könnten zirka 1,5 kWh pro Kalenderwoche eingespart werden. Durch den Austausch der bestehenden Leuchtstoffröhren gegen moderne LED-Beleuchtung im Zuge der Gleiserneuerung „Simmeringer Hauptstraße“ konnte die Leistungsaufnahme der Beleuchtung von 152 W auf 90 W reduziert werden. [118]. Durch den Austausch der Beleuchtung konnte der durchschnittliche Energieverbrauch pro Kalenderwoche um zirka 14 % gesenkt werden. Die Bauleitung hat im persönlichen Gespräch angemerkt, dass die neue Beleuchtung zu einem angenehmeren und konzentrierteren Arbeitsumfeld beiträgt.

Im Sommer befand sich der Kühlschrank über mehrere Stunden im Dauerbetrieb. Das lässt den Schluss zu, dass entweder die Aufstellbedingungen (hohe Innenraumtemperaturen — siehe Abbildung 3.8) nicht ideal waren und/oder die NutzerInnen Anwendungsfehler begangen haben. Klimaanlage, Kühlschrank, Multifunktionsdrucker und Beleuchtung bilden mit über 80 % die größte Verbrauchsgruppe in Baucontainern.

Wie Gespräche mit dem Polier gezeigt haben, ist die Stromerzeugung auf innerstädtischen Baustellen als problematisch anzusehen. Eine Photovoltaikanlage auf einem tief liegenden Baustellencontainer im dicht bebauten Gebiet könnte rasch Vandalismus zum Opfer fallen. Geeignete transparente Netze aus dem Bereich der Hagelabwehr sind vermutlich ein geeigneter Ansatz, um Photovoltaikanlagen auf Dächern von Baustellencontainern vor Beschädigungen zu schützen [119]. Da die Baustellencontainer niedriger als die umgebende Bebauung sind, ist der Einsatz von Windturbinen mit horizontal liegender Nabe nicht denkbar. Im Gegensatz dazu könnten mastähnliche Strukturen, wie zum Beispiel temporäre Lichtmaste, für Windturbinen mit vertikal liegender Nabe angedacht werden, siehe Abbildung 2.14.

Der Stromverbrauch der Heizung konnte in den Wintermonaten aus Ermangelung an Fachpersonal und krankheitsbedingten Ausfällen leider nicht gemessen werden. Wie die Untersuchungen dennoch gezeigt haben, können in der Wintersaison Temperaturen von über 30 °C im Containerinneren erreicht werden, siehe Abbildung 3.12. Die Bauteams schätzen für die kurzen Arbeitspausen ein überdurchschnittlich warmes Raumklima im Container. Das Vorhalten dieser überdurchschnittlich warmen Baustellencontainer ist aus Sicht der Energieeffizienz abzulehnen. Als Alternative sind Infrarotpaneele in Betracht zu ziehen, da die abgegebene Strahlungswärme rasch als angenehm empfunden wird.

Wie Abbildung 3.14 zeigt, lässt sich für das gegenständliche Gleiserneuerungsprojekt „Landstrasser Gürtel“ sagen, dass die zunehmende Elektrifizierung der Baugeräte den Stromverbrauch der Baustelleneinrichtung anteilmäßig zurückdrängt. Der Baustellencontainer hat nur einen Anteil von 8,00 % am geschätzten Gesamtstromverbrauch der Baustelle. Die beiden elektrisch betriebenen Baugeräte haben gesamt einen Anteil von 66 % und die restlichen Verbraucher (weitere Container, Heizung, Kleingeräte, Beleuchtung etc.) 26,00 %. Wie Abbildung 3.14 zeigt, hat der Bauleitungscontainer einen Anteil von 7,00 % am Gesamtstromverbrauch der Gleiserneuerungsbaustelle „Simmeringer Hauptstraße“. Im Vergleich dazu hat der E-Bagger einen Anteil von zirka 17,00 %. Der restliche Anteil von 77 % entfällt auf die Heizung, weitere Container, Kleingeräte und die Außenbeleuchtung der Baustelle.

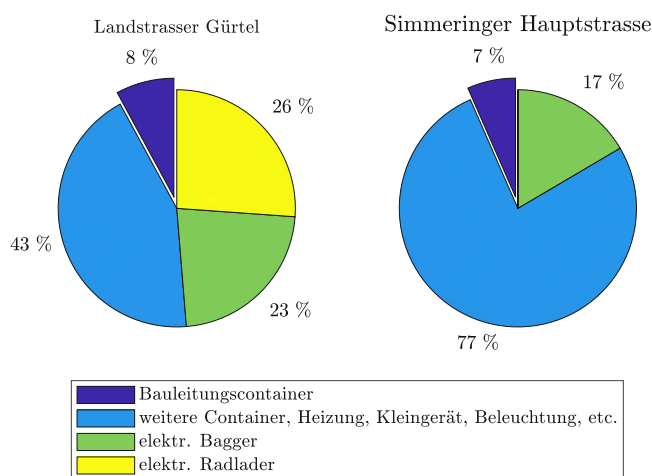


Abb. 3.14: Vergleich vom Stromverbrauch der beiden Gleiserneuerungsbaustellen

3.4 Stromverbrauch bei einem mehrgeschossigen Wohnbauprojekt

Das mittelständische Bauunternehmen Sedlak errichtet südlich der Kaltenleutgebener Hauptstraße eine Wohnhausanlage bestehend aus 39 freifinanzierten Wohnobjekten, siehe Abbildung 3.15. Die Größe der einzelnen Wohnobjekte liegt zwischen zirka 50 m^2 und 109 m^2 [120]. Die Wohnnutzfläche (inklusive zugeordnete Freiflächen und Einlagerungsräume) von zirka 5.407 m^2 gemeinsam mit der Nebennutzfläche von zirka 2.810 m^2 ergeben eine Gesamtnutzfläche von zirka 8.217 m^2 . Mit dem Bau der Wohnhausanlage wurde Ende 2021 begonnen. Die Fertigstellung erfolgt voraussichtlich im Frühjahr 2024. Das gegenständliche Bauvorhaben wird als „Eigenprojekt“ geführt, da die eigene Immobilienentwicklungstochter Auftraggeberin ist. Dieser Sonderprojektstatus und das Bestreben des Bauunternehmens Sedlak, als nachhaltiger Auftragnehmer aufzutreten, waren ausschlaggebend für die Implementierung des Energieverbrauchsmonitorings.



(a) Das laufende Wohnbauvorhaben



(b) Lage des Bauprojekts

Abb. 3.15: Bauprojekt „Hauptstraße 139, 2391 Kaltenleutgeben“

Das Bauvorhaben verfügt aufgrund der räumlichen Trennung von Baustelle und Containeranlage über zwei Anschlüsse an das öffentliche Stromnetz. Die beiden Anschlüsse bildeten zwei getrennte Verrechnungskreise und die Bauleitung erhielt somit jeweils eine Rechnung für die Containereinrichtung und für die Baustelle. Im Einfahrtsbereich der zu errichtenden Tiefgarage befindet sich ein Anschlussverteilerschrank, Abbildung 3.16a, mit einem Zugang zur Stromversorgung der Baustelle über das öffentliche Stromnetz, zwei Abgängen sowie einem Smart Meter. Ein Abgang speist einen weiteren Verteilerschrank, siehe Abbildung 3.16b, der zur Versorgung des allgemeinen Baubetriebs dient. Der zweite Abgang versorgt direkt den Turmdrehkran. Der zuvor beschriebene Verteilerschrank (139 kVA) verfügt über 9 CEE-Abgänge (16-125 A; FI-Typ B) und 6 SCHUKO-Stecker (16 A, FI-Typ A). In der Regel sind alle Abgänge bis auf den 125 A CEE-Abgang besetzt. Die weitere Verteilung innerhalb der Baustelle geschieht über Steckerleisten. Die Stromverbrauchsmessung erfolgt über Messwandler-Klemmen zugehörig zum in Kapitel 3.2 vorgestellten Datenlogger, welche an den beiden Abgängen montiert sind.



(a) Anschlussverteilerkasten



(b) Verteilerkasten

Abb. 3.16: Stromverteilung für den Baubetrieb

Die Containereinrichtung verfügt über einen eigenen Anschlussverteilerkasten, siehe Abbildung 3.17, mit insgesamt zwölf Anschlussmöglichkeiten, elf Leitungsschutzschaltern, zwei Fehlerstromschutzschalter sowie einem Smart Meter. Der einfach vorhandene 63 A CEE-Anschluss dient zur Versorgung der gesamten Containeranlage und wird durch einen eigenen umrichterfesten Fehlerstromschutzschalter (Bemessungsstrom $I_n=100$ A; Bemessungsfehlerstrom von $I_{\Delta n}$ von 0,03 A) abgesichert. Die übrigen Anschlüsse sind unbesetzt, siehe Abbildung 3.17.



Abb. 3.17: Anschlussverteilerkasten der Baustelleneinrichtung

Auf Grundlage des Messkonzepts für die Gleiserneuerungsbaustellen entschied die Geschäftsführung gemeinsam mit dem „ausführenden“ Diplomanden unter Berücksichtigung der Rahmenbedingungen im Wohnbau dieses mit Blick auf die Leistungserstellung sinnvoll zu erweitern und im Bereich der Containereinrichtungen auf die größten Verbraucher (Heizung, Warmwasserbereitung, Drucker und Beleuchtung) einzugrenzen. Weiters hat die Bauleitung die Rechnungen der Wiener Netze für den Zeitraum zwischen Jänner 2022 und April 2023 zur Verfügung gestellt. Bezugnehmend auf die eingangs erwähnte räumliche Trennung bildeten Baustelle und Containereinrichtung zwei unabhängige Verrechnungskreise. Aus diesem Grund erfolgte die konzeptionelle Trennung zwischen Baubetrieb und Containerburg. In diesem Zusammenhang ist darauf hinzuweisen, dass der Turmdrehkran (POTAIN MDT 219 J10 [121]) dem öffentlichen Anschluss Baubetrieb zuzuordnen ist.

Die Container für Baubüro und Mannschaft konnten aufgrund der vorherrschenden Platzverhältnisse überwiegend ebenerdig platziert werden, siehe Abbildung 3.18a. Da es sich um Mietcontainer unterschiedlicher Provenienz und Baujahre handelt, weist die Elektroinstallation in nahezu jedem Container eine unterschiedliche Ausführung aus. Die nachstehend beschriebenen Detailunterschiede der Elektroinstallation haben die praktische Implementierung des Monitoringsystems wesentlich verkompliziert und den Zeitaufwand zur Installation erhöht:

- Einbau sowohl von ein- als auch allpoligen Leitungsschutzschaltern
- AP-Verteilern mit und ohne Abdeckung, siehe Abbildung 3.18b.
- Anzahl von Stromkreisen, siehe Abbildung 3.18b und 3.18d
- Sowohl ortsfeste, siehe Abbildung 3.18c, als auch nicht ortsfeste Heizungselektroinstallationen
- (fehlende) Beschriftung der AP-Verteiler.

Sofern möglich nutzte der beauftragte Elektriker den übrigen Platz in den bereits vorhandenen Aufputzverteilern oder montierte an der Containerdeckenuntersicht einen weiteren Verteiler. Die Stromverbrauchsmessung der ausgewählten Stromkreise erfolgt über die in Kapitel 3.2 vorgestellten Relais. Das Monitoring ist in fünf ausgewählten Containern vorhanden. Drei zusammenhängende Container bilden das Baubüro, wobei die längsseitigen Trennwände entfernt wurden. Jeder einzelne Baubürocontainer verfügt über einen eigenen Aufputzverteiler, welcher an der Deckenuntersicht montiert ist. Die Erfassung des Strombezugs umfasst die beiden Stromkreise für E-Konvektoren und Beleuchtung.

Zwei, abermals ohne Trennwand, zusammenhängende Container sind der Sitzungsort für die Lean Management Besprechungen. Eine Besonderheit besteht darin, dass zirka ein Drittel der Fläche eines Containers als einfache Küche für das Personal ausgebaut ist. In den beiden Containern werden ebenfalls die jeweiligen Verbräuche der Stromkreise für E-Konvektoren und Beleuchtung erfasst. Der vor Ort befindliche Sanitärcontainer verfügt über mehrere WCs, Pissoirs, Duschen und über ein höherwertiges WC für Gäste, Damen und den Bauleiter. Der Aufputzverteiler befindet sich im Sanitärcontainer im hinteren Teil gegenüber der Duschen an der Wand des Containers. Im Sanitärcontainer sind die Verbräuche der Stromkreise für E-Konvektoren, Beleuchtung und Wasserboiler zu erfassen.



(a) Containereinrichtung



(b) AP-Verteiler Deckenuntersicht



(c) Ortsfeste Heizung



(d) AP-Verteiler im Sanitärcontainer

Abb. 3.18: Problembereiche bei der Installation des Monitorings

3.4.1 Stromverbrauch der Baustelleneinrichtung

Den zur Verfügung gestellten Rechnungen der Wiener Netze GmbH im Zeitraum zwischen Jänner 2022 und April 2023 ist zu entnehmen, dass sich der Stromverbrauch je Monat nach Haupt- und Nebentarif gliedert, siehe Abbildung 3.1 in Kapitel 3.2. Wie der Abbildung 3.19 zu entnehmen ist, erreicht der Stromverbrauch sowohl in der Hochtarif- als auch in der Niedertarifzone in den Wintermonaten ein Maximum. Am Anfang des Betrachtungszeitraums im Februar 2022 ist dieses lokale Maximum mit 3.743 kWh in der Hochtarifzone und 1.963 kWh in der Niedertarifzone weniger stark ausgeprägt als in der darauffolgenden Wintersaison 2022/23. Das zweite lokale Maximum wird im Jänner 2023 mit 6.771 kWh in der Hochtarifzone und 3.286 kWh in der Niedertarifzone erreicht. Dieser wellenförmige Verlauf wird von einem absoluten Verbrauchsminimum im Juni 2022 mit 585 kWh in der Hochtarifzone und 129 kWh in der Niedertarifzone weiter charakterisiert. Jener Juni zeichnet sich bei einer mittleren Monatstemperatur von 21,90 °C mit dem niedrigsten Niederverbrauchsanteil von 18,07 % aus. Im März 2022 bei einer mittleren Monatstemperatur von 6,70 °C wird mit 38,53 % der höchste Niederverbrauchsanteil erzielt. Über den Betrachtungszeitraum hinweg liegt der Niederverbrauchsanteil bei 33,30 %. Der Gesamtstromverbrauch zwischen Jänner 2022 und April 2023 beträgt 55.158 kWh und gliedert sich zu 36.860 kWh in der Hochtarifzone und zu 18.298 kWh in der Niedertarifzone. Dass rund ein Drittel des Stroms in der Niedertarifzone, respektive zwischen 22:00 und 6:00 verbraucht wird, ist darauf zurückzuführen, dass einerseits die Baumannschaft in den Wintermonaten nach Beendigung der Arbeit selten die Heizung abdreht bzw. Frostfreiheit gewährleistet werden muss. Andererseits gibt es Geräte, die sich im Standby-Modus befinden, wie zum Beispiel Computer, oder die aufgrund ihrer Funktion weiterhin Strom verbrauchen, wie zum Beispiel der Kühlschrank.

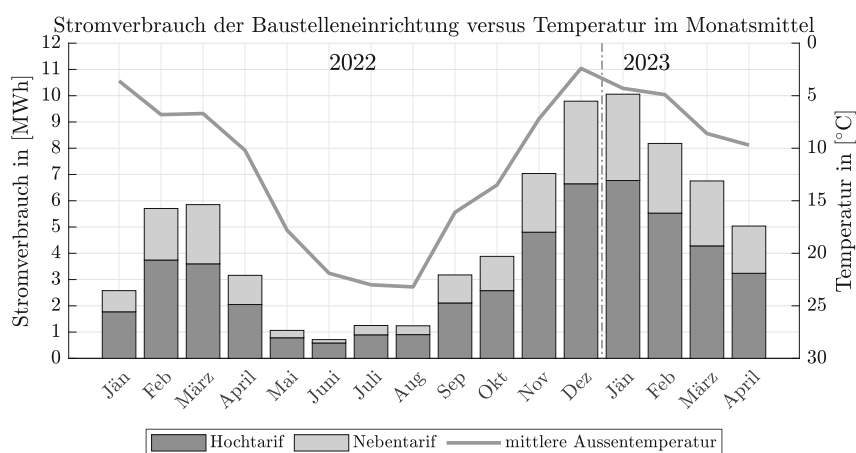


Abb. 3.19: Baustelleneinrichtung: Stromverbrauch gegenüber Temperaturverlauf

Mit steigendem Stromverbrauch über den saisonalen Verlauf nimmt, wie der Abbildung 3.20 zu entnehmen ist, der Leistungsbedarf der Baustelleneinrichtung zu. Wie bereits der Stromverbrauchsverlauf, siehe Abbildung 3.19, zeichnet sich der wellenförmige Verlauf der Leistungsbedarfsspitzen durch zwei Wellenkämme aus. Am Anfang des Betrachtungszeitraums ist der Wellenkamm zwischen Jänner und April 2022 mit Spitzenleistungen zwischen 15 und 19 kW weniger stark ausgeprägt als zwischen Oktober 2022 und April 2023 mit Werten zwischen 18 und 29 kW. Unerwarteterweise wird das absolute Minimum nicht im Juni 2022, sondern im August 2022 mit 10 kW Spitzenleistungsbedarf erreicht. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass bei der gegenständlichen Containeranlagen im betrachteten Zeitraum der Leistungsbedarf zwischen 10 und 29 kW schwankt. Der mittlere Leistungsbedarf beläuft sich auf 19 kW und liegt zirka 21 % unter der angemeldeten Anschlussleistung von 24 kW.

Beachtenswert ist, dass im Dezember 2022 die maximale Leistungsbedarfsspitze zirka 17% über der angemeldeten Anschlussleistung liegt. Bezugnehmend auf die referierten Leistungsspitzenwerte ist festzuhalten, dass der öffentliche Anschluss hinsichtlich der elektrischen Leistung suboptimal ausgenutzt wird. Zur besseren Beurteilung stellt Abbildung 3.20 die errechneten Ausnutzungsgrade auf Basis von Volllaststunden der angemeldeten Anschlussleistung und dem tatsächlich gemessenen Spitzenleistungsbedarf gegenüber. Es ist ersichtlich, dass der Ausnutzungsgrad der angemeldeten Anschlussleistung in den Monaten Jänner bis Oktober 2022 zwischen 4% und 36% liegt. Der Ausnutzungsgrad der gemessenen Leistungsbedarfsspitze liegt im genannten Zeitraum mit Werten zwischen zirka 8% und 48% darüber. Im darauffolgenden Zeitraum zwischen November 2022 und März 2023 ist das Gegenteil der Fall.

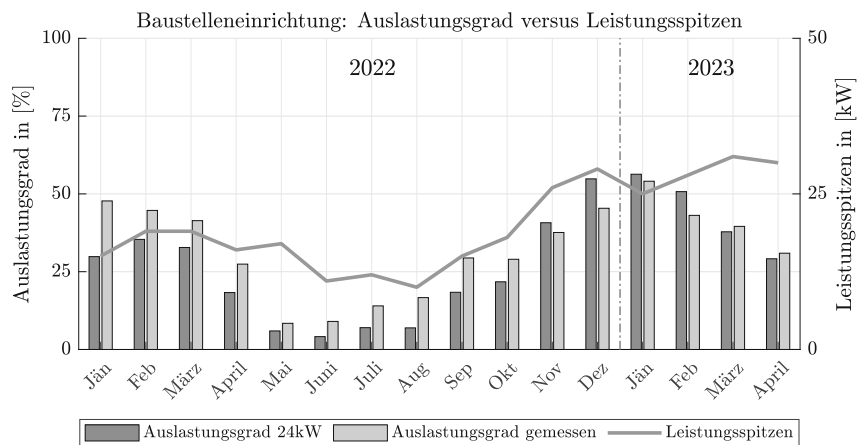


Abb. 3.20: Baustelleneinrichtung: Auslastungsgrad gegenüber Leistungsspitzen

Zwischen Kalenderwoche 2 und 10 haben die E-Konvektoren, wie Tabelle 3.7 zeigt, im Baubüro in Summe zirka 2.652 kWh Strom verbraucht. Das entspricht einem durchschnittlichen Stromverbrauch pro Woche von zirka 295 kWh. Im Gegensatz dazu hat der Lean Container, wie 3.8 zu entnehmen ist, mit 1.405 kWh zirka 47% weniger Strom verbraucht. Im Schnitt ist es einem wöchentlichen Stromverbrauch von zirka 156 kWh gleichzusetzen.

Tab. 3.7: Stromverbrauch der Heizung im Baubüro

Container Baubüro				
KW	Gesamtverbrauch	C1-Heizung	C2-Heizung	C3-Heizung
	kWh	kWh	kWh	kWh
2	176,92	16,88	93,39	66,65
3	377,97	94,19	205,92	77,86
4	415,09	105,32	124,66	185,11
5	399,04	134,55	109,58	154,91
6	445,48	138,95	148,38	158,15
7	276,92	64,45	139,86	72,61
8	136,85	35,41	90,00	11,44
9	250,80	60,52	69,88	120,40
10	173,54	36,62	63,49	73,43
Σ	2.652,61	686,89	1.045,16	920,56

Tab. 3.8: Stromverbrauch der Heizung im Lean Container

Container Leanmanagement			
KW	Gesamtverbrauch	C1-Heizung	C2-Heizung
	kWh	kWh	kWh
2	115,46	107,67	7,79
3	226,18	201,75	24,43
4	185,08	170,58	14,50
5	101,96	92,35	9,61
6	273,69	180,14	93,55
7	132,99	121,29	11,70
8	58,90	57,87	1,03
9	190,29	160,05	30,24
10	120,26	76,30	43,96
Σ	1.404,81	1.168,00	236,81

Ein Großteil der Beleuchtung ist bereits auf hocheffiziente LED-Technik umgerüstet. Der Unterschied lässt sich an den Containern für das Baubüro und Leanmanagement nachvollziehen. Das Baubüro ist bereits mit LED-Röhren ausgestattet und während der regulären Arbeitszeit durchgehend besetzt, wohingegen der Leanmanagementcontainer mit Leuchtstoffröhren nur für Besprechungen und die wöchentlichen Lastplannersitzungen vorgesehen ist. Im letzteren Container verbraucht die Beleuchtung im Schnitt nur 3kWh pro Woche weniger Strom - siehe Tabelle 3.9 und 3.10.

Tab. 3.9: Stromverbrauch der Beleuchtung im Baubüro

Container Baubüro				
KW	Gesamtverbrauch	C1-Beleuchtung	C2-Beleuchtung	C3-Beleuchtung
	kWh	kWh	kWh	kWh
2	4,52	1,35	3,17	0,00
3	14,10	3,40	7,40	3,30
4	11,80	3,10	7,10	1,60
5	14,86	3,94	7,62	3,30
6	9,95	3,26	4,76	1,93
7	10,80	3,50	6,40	0,90
8	10,70	3,00	4,70	3,00
9	11,40	3,31	6,25	1,84
10	11,50	3,40	6,20	1,90
Σ	99,63	28,26	53,60	17,77

Das Messrelais zum Monitoring der Warmwasserbereitung im Sanitärcontainer fiel aufgrund eines technischen Defekts in der fünften Kalenderwoche aus. In den ersten fünf Kalenderwochen wurden zirka 120 kWh Strom für die Warmwasseraufbereitung aufgewendet. Das entspricht einem durchschnittlichen wöchentlichen Stromverbrauch von zirka 24 kWh, siehe Tabelle 3.11. In diesem Zusammenhang ist auszuführen, dass der Stromverbrauch in den Kalenderwochen 3 und 4 mit zirka 43 bzw. 36 kWh deutlich über dem Durchschnitt lag.

Tab. 3.10: Stromverbrauch der Beleuchtung im Lean Container

Container Leanmanagement			
KW	Gesamtverbrauch	C1-Beleuchtung	C2-Beleuchtung
	kWh	kWh	kWh
2	1,46	0,30	1,16
3	9,10	0,70	8,40
4	9,40	1,20	8,20
5	12,81	3,20	9,61
6	11,02	2,00	9,02
7	9,50	0,00	9,50
8	3,40	0,00	3,40
9	5,65	0,00	5,65
10	8,30	0,90	7,40
Σ	70,64	8,30	62,34

Austria Email gibt im Produktdatenblatt des Warmwasserboilers einen Jahresstromverbrauch von 2.791 kWh an. Das entspricht einem wöchentlichen Stromverbrauch von zirka 54 kWh [122]. Gleichzeitig mit dem Messrelais für die Warmwasserbereitung fiel jenes für die Beleuchtung aus. Der Stromverbrauch innerhalb der ersten fünf Kalenderwochen belief sich auf zirka 24 kWh, siehe Tabelle 3.11. Im Schnitt hat die Beleuchtung in den vier Wochen pro Woche zirka 6 kWh Strom verbraucht. Auffallend ist der Stromverbrauch der Beleuchtung in den Kalenderwochen 3 und 4. Da der Schalter für die Beleuchtung geschützt vor Feuchtigkeit unter einer transparenten Abdeckung liegt, war zu beobachten und zu messen, dass die Beleuchtung im Sanitärcontainer oftmals stundenlang brannte. Die Heizungen für den allgemeinen Sanitärbereich und das Polier-WC verbrauchten gemeinsam zirka 1.697 kWh Strom. Das entspricht einem wöchentlichen Durchschnitt von zirka 189 kWh. Die Rahmenbedingungen für einen effizienten Betrieb der Heizung können als suboptimal beschrieben werden, da einerseits aufgrund von Gerüchen und andererseits zwecks Leitungsführung die Fenster ständig gekippt waren.

Tab. 3.11: Stromverbrauch im Sanitärcontainer

Sanitärcontainer					
KW	Gesamtverbrauch	Beleuchtung	Warmwasser	Heizung	PolierWC
	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh
2	155,05	2,91	16,60	96,29	39,21
3	282,90	10,60	42,71	167,26	62,33
4	276,64	6,85	36,15	158,18	75,46
5	343,34	4,03	24,51	250,20	64,60
6	265,05	0,00	0,00	199,04	66,01
7	168,03	0,00	0,00	138,92	29,11
8	80,53	0,00	0,00	67,23	13,30
9	145,93	0,00	0,00	123,27	22,66
10	123,67	0,00	0,00	98,11	25,56
Σ	1.841,14	24,39	120,01	1.298,50	398,24

3.4.2 Stromverbrauch des Baustellenbetriebs

Wie bereits in den Kapiteln 2 und 3.4.1 erklärt, unterwirft sich der Stromverbrauch im Baubetrieb ebenfalls den Temperaturschwankungen, siehe Abbildung 3.21. Wie bereits Nisancioglu [36] dargelegt hat, muss der Bauunternehmer, respektive der beauftragte Subunternehmer, unter anderem die notwendige Verarbeitungstemperatur für die hydraulischen Bindemittel gewährleisten. Der Betrachtungszeitraum zwischen Baustelleneinrichtung und Baubetrieb differiert, da der Elektriker erst nach Abschluss der Erdbauarbeiten den Anschluss für die Baustelle einrichtete. Diesem Umstand folgend liegt der Betrachtungszeitraum zwischen Juni 2022 und April 2023. Wie bereits im Falle der Baustelleneinrichtung erreicht der Baubetrieb im Jänner 2023 ein absolutes Verbrauchsmaximum von 9.968 kWh in der Hochtarifzone und 3.976 kWh in der Niedertarifzone. Zuvor stieg der Stromverbrauch zwischen Juni 2022 und November 2022 kontinuierlich an. Auffallend ist der Sprung des Stromverbrauchs von November auf Dezember 2022. Während im November in der Hochtarifzone der Baubetrieb 2.536 kWh Strom verbraucht hat, waren es im Dezember bereits 7.096 kWh. In der Niedertarifzone sprang der Stromverbrauch von 872 kWh auf 3.080 kWh. Der Anteil der Niedertarifzone am Gesamtstromverbrauch ist im Februar 2023 mit 28,80 % am höchsten und im Juli 2022 mit 7,30 % am geringsten. Im Zeitraum zwischen Juni 2022 und April 2023 beträgt der Anteil der Niedertarifzone am Gesamtstromverbrauch zirka 26 %. Der Gesamtstromverbrauch im Betrachtungszeitraum beträgt 57.400 kWh und gliedert sich zu 42.400 kWh in der Hochtarifzone und zu 15.000 kWh in der Niedertarifzone.

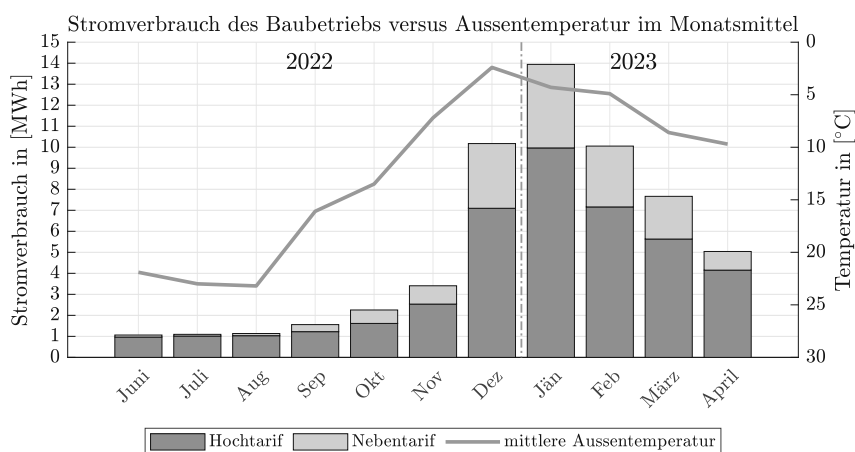


Abb. 3.21: Baustellenbetrieb: Stromverbrauch gegenüber Temperaturverlauf

Auffallend in Abbildung 3.22 sind die geringen Ausnutzungsgrade der tatsächlichen Leistungsbedarfsspitzen und der angemeldeten Anschlussleistung von 155 kW. Im Jänner 2023 findet der maximale Leistungsbezug statt und dennoch wird die angemeldete Anschlussleistung nur zur 12,09 % und die bezogene Leistungsspitze zu 32,57 % ausgenutzt. In den übrigen Monaten liegt der Ausnutzungsgrad der angemeldeten Anschlussleistung unter 10 %. Hinsichtlich der Ausnutzung der bezogenen Leistungsspitze findet sich mit 42,76 % ein Maximum. Im Oktober 2022 war der Leistungsbedarf mit 10 kW am geringsten im Jänner 2023 mit 55 kW am höchsten. Der durchschnittliche Leistungsbezug im Zeitraum Juni 2022 und April 2023 betrug 27 kW. Der neuerliche Anstieg des Leistungsbedarfs im April 2023 lässt sich durch den Bauablauf erklären, da neuerlich Estrich in das Gebäude gepumpt werden musste. Es ist zu ergänzen, dass diese Analyse auch den Turmdrehkran beinhaltet.

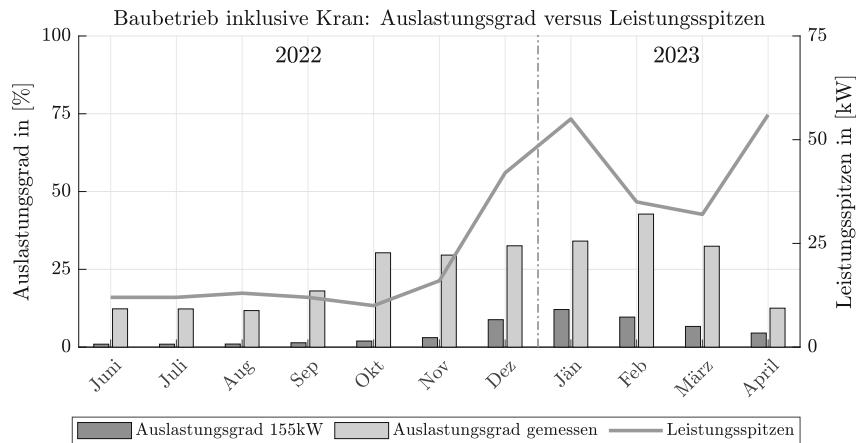


Abb. 3.22: Baustellenbetrieb: Auslastungsgrad gegenüber Leistungsspitzen

Der Datenlogger im Anschlussverteilerschrank erfasst Leistung, Energie, Leistungsfaktoren, Spannungen und Ströme an den beiden Abgängen „Baubetrieb“ sowie „Turmdrehkran“. Für die vorliegende Diplomarbeit sind die gemessenen Ströme, die bezogene Leistung und der daraus resultierende Energieverbrauch von Relevanz. Die Aufzeichnung begann am 17.12.2022 gegen 12:00 und endete am 06.03.2023 gegen 10:15. In den weiteren Ausführungen bleiben die Kalenderwochen 50 und 10 unberücksichtigt, da für diese beiden Wochen keine vollständigen Aufzeichnungen von Montag bis Sonntag vorliegen. Aus organisatorischer Sicht ist zu berücksichtigen, dass sich das ausführende Bauunternehmen in den Kalenderwochen 52 von 2022 und 1 von 2023 im Winterbetriebsurlaub befand.

Im Betriebsurlaub hat der Baubetrieb zirka 630 kWh Strom verbraucht, wobei rund ein Drittel mit zirka 235 kWh auf den Turmdrehkran entfallen. Wie Abbildung 3.23 zeigt, hat der Turmdrehkran über den Betrachtungszeitraum Kalenderwoche 51 in 2022 und die Kalenderwochen 2 bis 9 in 2023 mit 14 % bzw. 3.872 kWh als Einzelgerät betrachtet einen verhältnismäßig großen Anteil am Gesamtstromverbrauch von 26.861 kWh des Baubetriebs. Der Stromverbrauch des Turmdrehkrans schwankt im Betrachtungszeitraum zwischen 360 und 506 kWh. Der Betrieb des Turmdrehkrans hat in den Kalenderwochen 2 bis 9 im Schnitt einen Stromverbrauch von zirka 430 kWh pro Woche verursacht. Der Stromverbrauch exklusive Turmdrehkran betrug zwischen 1.047 und 4.381 kWh je Kalenderwoche. Im Mittel entspricht das einem Verbrauch von 2.554 kWh.

Wie bereits Nisancioglu [36] und Piatek [38] ausführen, bedarf es bei der Verwendung von hydraulischen Bindemitteln bestimmten Verarbeitungstemperaturen, die nicht unterschritten werden dürfen. Die verwendeten elektrischen Heizlüfter führten, wie erwartet, in dieser Bauphase zu einer erheblichen Grundlast von zirka 20 kW außerhalb der Arbeitszeit, siehe Abbildungen 6.1 und 6.2 in Kapitel 6.1. In der Regel verfügen Heizlüfter über Thermostate. Thermostatgesteuerte Geräte schalten sich bei Erreichen der gewünschten Temperatur ab. In diesem Zusammenhang lassen die Abbildungen in Kapitel 6.1 weiters vermuten, dass die Aufstellbedingungen für die elektrischen Heizlüfter nicht ideal waren. Der konstante Verlauf des Leistungsbedarfs außerhalb der Arbeitszeiten von 07:30 und 17:00 deutet darauf hin.

Die Heizlüfter befanden sich in derart luftundichten Bereichen der Baustelle, dass der Einfluss der kalten Außenluft überwogen hat. Wie der Abbildung 3.24 zu entnehmen ist, steigt in der Kalenderwoche 3 der Leistungsbedarf der Baustelle von der Grundlast auf Spitzenlastwerte von über 35 kW an. Am Montag, den 23.01.2023, wird mit zirka 55 kW die Höchstlast erzielt.

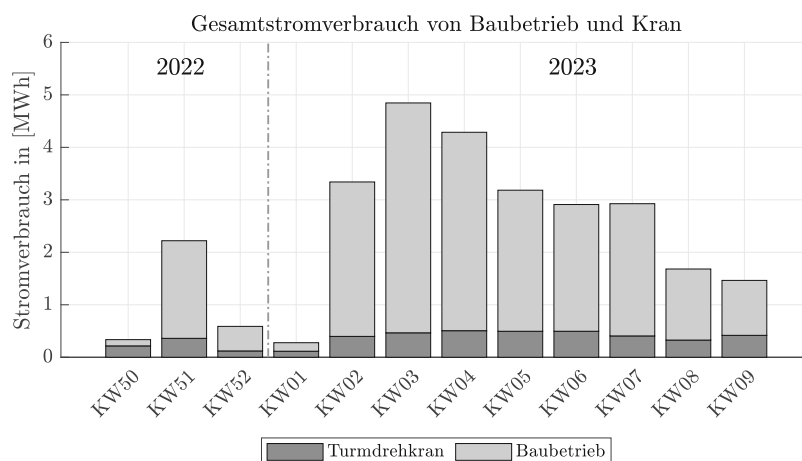


Abb. 3.23: Gesamtstromverbrauch von Baubetrieb und Turmdrehkran zwischen KW50'22 und KW09'23

Ein Vergleich mit den ebenfalls gemessenen Strömen I zeigt, dass die zusätzliche Last von zirka 35 kW auf einen dreiphasigen Verbraucher hindeutet. Es ist deshalb ein dreiphasiger Verbraucher anzunehmen, da die Stromaufnahme der drei Phasen nahezu parallel verläuft. Der Versatz zwischen den Kurven lässt sich durch einzelne einphasige Verbraucher erklären. Der Polier bestätigte den Einsatz einer Estrichpumpe am genannten Arbeitstag. Im Gegensatz zum Baubetrieb stellt sich der Stromverbrauch des Turmdrehkrans im Vergleich der Kalenderwochen gleichmäßiger dar. Der Betriebsurlaub führte wie beim Baubetrieb zu einem spürbaren Rückgang des Energieverbrauchs in den Kalenderwochen 52 und 1, da der Geräteführer in dieser Zeit die Heizung abschaltete. Im Betriebsurlaub hat sich gezeigt, dass der Turmdrehkran ohne Betrieb der Heizung im Schnitt 17,20 kWh/Tag Strom verbraucht, siehe Kapitel 6.1. Vor den arbeitsfreien Wochenenden schaltet der Geräteführer die Heizung in der Kabine nicht ab. Dies führt zu einem durchschnittlichen Stromverbrauch von 54,36 kWh/Tag an arbeitsfreien Wochenendtagen. Demnach hat der verbaute Heizlüfter wie beim Baubetrieb Einfluss auf die Grundlast, siehe Abbildungen 6.1 und 6.2 in Kapitel 6.1. Den Ausführungen von Piatek [38], wonach ein einzelner Kran (Motorleistung zwischen 49 bis zirka 60 kW) pro Monat mehr als 3.000 kWh verbrauchen kann, ist entgegenzuhalten, dass die in den technischen Datenblättern angegebene Motorleistung nur sehr kurzfristig während der Motoranlaufphase bezogen wird [42]. Im gegenständlichen Fall verbraucht der Turmdrehkran etwa 1.700 kWh pro Monat. Wie der Abbildung 3.25 zu entnehmen ist, erreicht der Turmdrehkran in der Kalenderwoche 4 mit über 9 kW Leistungsbedarf ein Maximum.

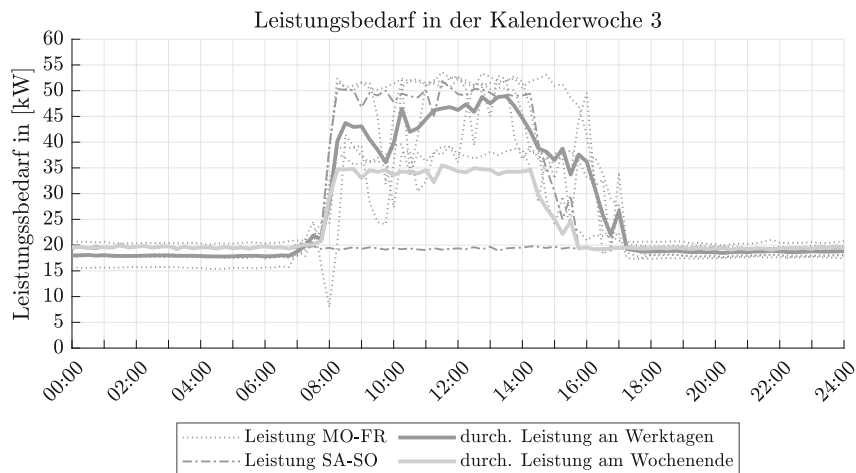


Abb. 3.24: Im Baubetrieb: Leistungsbedarfsganglinien je Wochentag in der Kalenderwoche 3

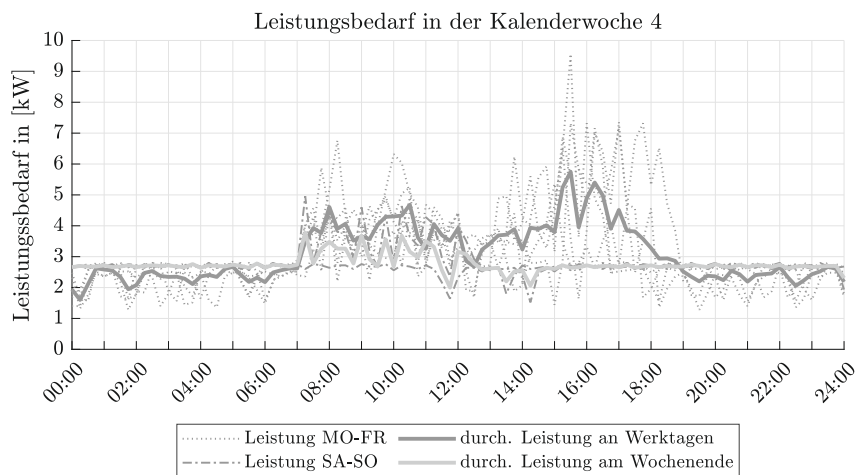


Abb. 3.25: Turmdrehkran: Leistungsbedarfsganglinien je Wochentag in der Kalenderwoche 2

3.4.3 Zusammenfassung

Die Stromverbrauchsmessungen ergaben, dass die betrachteten Baubüro-Container für das Heizen im Schnitt 295 kWh und für die Beleuchtung 11 kWh Strom je Kalenderwoche verbraucht haben. Der Sanitärcontainer hat zur Deckung des Heizwärmebedarfs im Schnitt 189 kWh, für die Beleuchtung 9 kWh und für die Warmwasserbereitung 40 kWh Strom je Kalenderwoche bezogen. Die Container für die Leanmanagementbesprechungen waren die sparsamsten und haben für die Heizung im Schnitt 156 kWh und für die Beleuchtung 8 kWh Strom je Kalenderwoche verbraucht. Rund ein Drittel der elektrischen Energie wurde innerhalb der Nebentarifzone (22:00 – 06:00), also außerhalb der regulären Arbeitszeit, verbraucht. Dies deutet darauf hin, dass durch Energiemonitoring und -management außerhalb der Arbeitszeiten der Stromverbrauch um bis zu 30 % reduziert werden könnte. Das genannte Einsparungspotential wird durch „Zwangsverbraucher“, wie zum Beispiel die Sicherheitsbeleuchtung, eingeschränkt. Auf Grundlage der vorgelegten Rechnungen war zu ermitteln, dass der Anteil der Volllaststunden bei einer Baustelle dieser Größenordnung und bei gesamtheitlicher Betrachtung aller Teilbereiche (Baustelleneinrichtung & Baubetrieb) zwischen 8,41 % und 47,74 % liegt. Die mittlere Spitzenleistung belief sich auf zirka 27 kW im Baubetrieb und auf 19 kW bei der Baustelleneinrichtung.

Das ausführende Unternehmen hat den Baubetrieb zirka fünf Monate nach der Baustelleneinrichtung an das öffentliche Stromnetz angeschlossen. Aus diesem Grund ergibt sich für die mittlere Spitzenleistung und den Volllaststundenanteil eine Gewichtung zu Gunsten der „leistungsschwächeren“ Baustelleneinrichtung. Die mittlere Spitzenleistung der gesamten Baustelle beträgt 38 kW und die Volllaststunden erreichen einen Anteil von 28,64 %. Wie bereits in Kapitel 2 angekündigt, lässt sich der Stromverbrauch durch diese Differenzierung und Aufrunden des ermittelten Volllaststundenanteils auf 30 % schätzen. Das Aufrunden des Volllaststundenanteils auf 30 % hat sich sowohl bei der Analyse Piateks [38] Musterbaustelle in Kapitel 2 als auch bei der vorliegenden Baustelle als Verbesserung der Abschätzung erwiesen.

Bei maximal 8.016 Stunden im Zeitraum zwischen Juni 2022 und April 2023 ergeben sich 2.405 Volllaststunden und ein geschätzter Stromverbrauch von 64.422 kWh für den Baubetrieb. Bei maximal 11.256 Stunden im Zeitraum von Jänner 2022 bis April 2023 ergeben sich 3.145 Volllaststunden und ein geschätzter Stromverbrauch von 64.541 kWh für die Baustelleneinrichtung. In Summe ergibt die Schätzung einen Stromverbrauch von 128.964 kWh und liegt somit nur zirka 3,0 % unter dem tatsächlichen Stromverbrauch über die bisherige Bauzeit. Abschließend ist über eine alternative Beschaffungsmethode für Strom nachzudenken. Die gemessenen Lastprofile legen nahe, dass börsennotierte Tarife [123] mit stündlich aktualisierten Preisen günstiger sind als ein fixer Tarif, siehe Abbildung 3.26. Eine umfassende Gegenüberstellung der EPEX-Spotpreise und den gemessenen Lastprofilen ist den Abbildungen 6.3 und 6.4 in Kapitel 6.1 zu entnehmen.

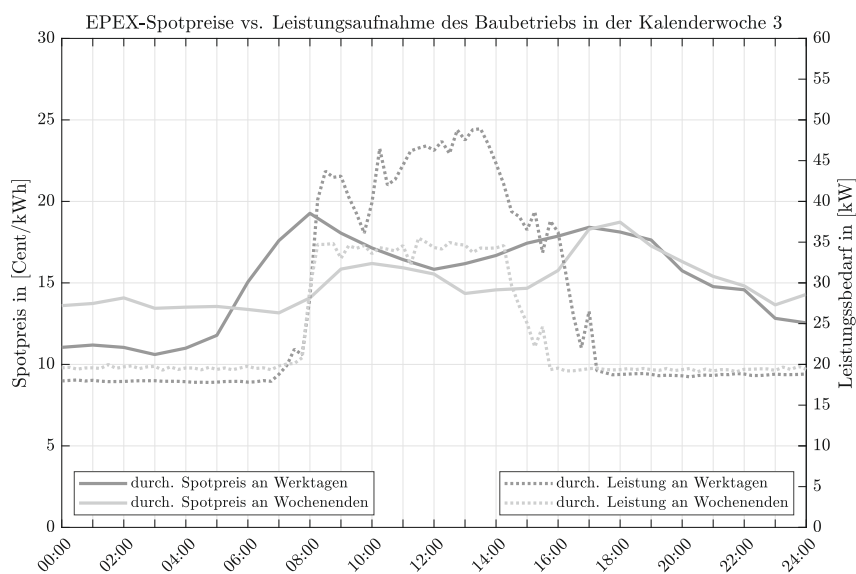


Abb. 3.26: EPEX-Spotpreis [123] vs. Leistungsaufnahme in der Kalenderwoche 3

3.5 Energiemonitoring und -management auf Baustellen

Unabhängig von Managementnormen, siehe Kapitel 2.7, gewinnt Energiemonitoring für Unternehmen jeder Größe an Relevanz. Dies ist einerseits auf die gestiegenen Energiepreise und andererseits auf nachhaltigkeitsorientierte Energieeffizienzkriterien in Ausschreibungen zurückzuführen. Die Durchsicht der österreichischen Transparenzdatenbank hinsichtlich der staatlichen Energiekostenzuschüsse im Zeitraum zwischen 2022 und 2023 lässt vermuten, dass die Bedeutung von Energiemonitoring zunächst im Tiefbau steigen wird [103]. So beantragten im Vergleichszeitraum 2022 bis 2023 mehr als doppelt so viele Tiefbauunternehmen (Anzahl: 56) als Hochbauunternehmen (Anzahl: 27) den staatlichen Energiekostenzuschuss. Dies ist vermutlich auf den höheren Maschinen- und Geräteeinsatz im Tiefbau zurückzuführen.

Ein Blick in die Geschäftsberichte der drei größten österreichischen Bauunternehmen zeigt, dass sich der Hochbau als Teil des Geschäftsergebnisses den hohen Energiekosten nicht entziehen kann. Geringe EBIT-Margen zwischen 1,80 % und 4,20 % verdeutlichen, dass eine stagnierende Umsatzentwicklung bei steigenden Energiekosten die Bedrohung, Wettbewerbsfähigkeit einzubüßen, wachsen lässt. Branchenstudien zum Thema Energiekostenanteil am Umsatz, wie jene der KfW [124, 125] oder der Bank Austria [126] untermauern diesen Umstand. In diesem Zusammenhang erscheint es verwunderlich, dass nur 83 Bauunternehmen aus den Geschäftszweigen Hoch- und Tiefbau den Energiekostenzuschuss (2022-2023) in Anspruch genommen haben [103].

Die Geschäftsführung des mittelständischen Bauunternehmens Dipl.-Ing. Wilhelm Sedlak GmbH hat erkannt, dass es für den weiteren Geschäftserfolg unabdingbar ist, kurz- bis mittelfristig die Energieeffizienz von Bauprozessen steigern. Zum gegenständlichen Bauunternehmen lässt sich ausführen, dass die Kernkompetenzen in den Bereichen Wohnbau, Büro- und Sonderbau sowie Sanierung und Instandhaltung liegen und 275 MitarbeiterInnen pro Jahr rund 200 Millionen Euro umsetzen [127]. In Abstimmung mit der Geschäftsführung und den beteiligten Bauleitern fand vor bzw. parallel zur Detailmessung auf der Baustelle „Hauptstraße 139, 2391 Kaltenleutgeben“ eine Erhebung bei abgeschlossenen Bauvorhaben statt. Die sind Tabelle 3.12 zu entnehmen und sind aufsteigend nach ihrer jeweiligen Bruttogeschossfläche geordnet. Diese Erhebung umfasste eine Aufarbeitung der vorliegenden Netzbetreiberrechnungen und dient als Grundlage zur Beurteilung der realisierten Ersparnis. Ein weiteres noch in Bau befindliches Bauvorhaben (Gesundheitszentrum Aspern) wird bei der Beurteilung hinzugezogen.

Tab. 3.12: Ausgewählte Bauvorhaben der Firma Sedlak

Bauvorhaben	BGF	NGF	BRI	Anzahl der UG	Anzahl der OG (inkl. EG)
	m ²	m ²	m ³	[-]	[-]
Oberlaaer Straße	520	[-]	1.865	1	3
Van der Nüll Gasse	10.270	8.643	31.500	2	7
Lannesstraße	12.984	8.095	30.238	1	6
Hermann-Glück-Weg	16.114	14.790	54.794	1	8
ARGE Pogrelzstraße	31.652	23.342	101.541	1	10

Der Strombezugsverlauf der betrachteten Baustellen, siehe Tabelle 3.12, deckt sich mit den bereits gewonnenen Erkenntnissen aus den Kapiteln 2 und 3.4. Wie zu erwarten war, unterliegt der Stromverbrauch im Hochbau saisonalen Schwankungen, die sich in den betrachteten Fällen dadurch auszeichnen, dass in den Monaten zwischen Oktober und April über 80 % des Gesamtstromverbrauchs anfallen, siehe Abbildung 3.27a.

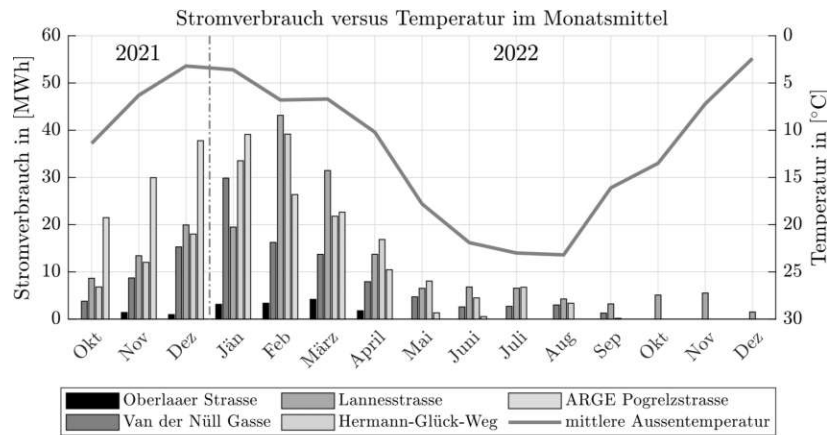
Unter Berücksichtigung der invertierten Ordinate, spiegelt die Kurve der monatlichen Durchschnittstemperatur den qualitativen Verlauf des Stromverbrauchs wider. Wie der Abbildung 3.27a in Verbindung mit Tabelle 3.12 zu entnehmen ist, steigt mit Zunahme der Bruttogeschossfläche des Bauvorhabens der absolute Stromverbrauch an. Auffallend war der Stromverbrauch in der Van-der-Nüll-Gasse im Monat Jänner (29.853 kWh), in der Lannesstraße in den Monaten Februar (43.155 kWh) sowie März (31.466 kWh) und am Hermann-Glück-Weg in den Monaten Jänner (33.537 kWh) sowie Februar (39.177 kWh).

Zur weiteren Beurteilung der 5 Bauvorhaben wird die Kennzahl „Stromverbrauch je m²-BGF“ gebildet. Hierzu wird für jede Baustelle der erfasste Stromverbrauch summiert und durch die jeweilige Bruttogeschossfläche dividiert. Wie der Abbildung 3.27c zu entnehmen ist, nimmt der Stromverbrauch je m²-BGF mit zunehmender Größe des Bauvorhabens ab. Es ist davon auszugehen, dass Bauvorhaben ab einer bestimmten Bruttogeschossfläche aus technischen und organisatorischen Kapazitätsgründen ein „fixes“ Energieverbrauchsniveau erreichen. Als Beispiel sind Container für Baubüro, Mannschaft und Sanitäräumlichkeiten zu nennen, die auf Grund örtlicher Platzverhältnisse und baubetrieblicher Anforderungen ein natürliches Maximum erreichen. Analog zur Kostenrechnung lässt sich dieser Effekt unter dem Begriff „Fixenergieverbrauchsdegression“ subsumieren.

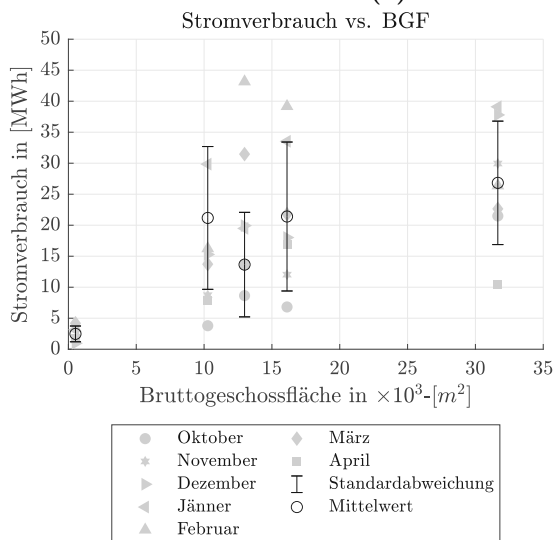
Die Darstellung der Heizsaison von Oktober 2021 bis April 2022 in einem Streupunktogramm, siehe Abbildung 3.27b, dient dazu den Stromverbrauch der Baustellen in den jeweiligen Wintermonaten besser vergleichen zu können. Der optische Eindruck in Abbildung 3.27b, wonach das kleinste Bauvorhaben „Oberlaaer Straße“ mit einer Bruttogeschossfläche von 520,00 m² eine verhältnismäßig geringe Standardabweichung aufweist, trägt. In der Heizsaison liegt der monatliche Durchschnittsverbrauch der Baustelle „Oberlaaer Straße“ bei zirka 2.474 kWh und die Standardabweichung σ bei zirka 1.271 kWh. Die verhältnismäßig geringste Standardabweichung σ 8.429 kWh bei einem monatlichen Durchschnittsverbrauch von zirka 13.648 kWh ist beim Bauvorhaben „Lannesstraße“ zu beobachten. Die Bauvorhaben Van der Nüll Gasse, Hermann-Glück-Weg und ARGE Pogrelzstraße stellen sich in Abbildung 3.27b ähnlich dar. Die vorliegende Beobachtung einer verhältnismäßig großen Streuung legt nahe, dass die Angabe eines mittleren Stromverbrauchs für die Heizsaison die Realität unzureichend beschreibt.

Neben der eingangs erwähnten Saisonalität des Stromverbrauchs, ist die zeitliche Lage des Verbrauchs untertags von Interesse. Die Analyse der zuvor genannten Bauvorhaben der Firma Sedlak deckt sich mit dem Ergebnis der Literaturrecherche 2, wonach über die Bauzeit im Schnitt zirka ein Drittel des Stromverbrauchs in der Niedertarifzone zwischen 22:00 und 06:00 liegt.

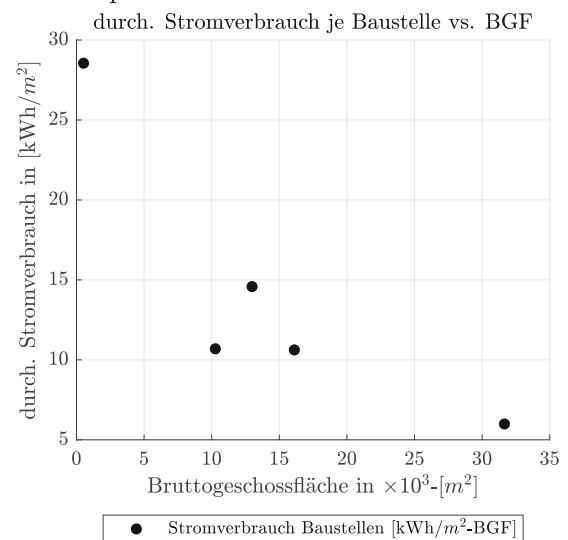
Nach Vorlage der gesammelten Informationen und nach Rücksprache mit der Geschäftsführung entschied man sich beim Bauvorhaben „Hauptstraße 139, 2391 Kaltenleutgeben“ den Versuch zu starten, den Stromverbrauch der Containerburg zu senken. Im Anschluss daran führte ein kooperatives Gespräch zwischen Bauleiter, Polier und Diplomand zur Ausarbeitung eines passenden Regelungskonzepts. Aufbauend auf den zuvor referierten Erkenntnissen der abgeschlossenen Baustellen berücksichtigte das Regelungskonzept darüber hinaus die Kernarbeitszeit, Wiederaufheizzeiten und NutzerInnenfeedback. Die Implementierung des Algorithmus am „Smart Home“-Server fand im laufenden Betrieb statt. Im Wesentlichen wurden im Versuchsaufbau die E-Konvektoren gezielt ein- und ausgeschaltet. Aus unternehmerischen Gründen wird in der vorliegenden Diplomarbeit nicht näher auf das Regelungskonzept eingegangen.



(a) Stromverbrauch versus Temperatur



(b) Stromverbrauch versus Bruttogeschossfläche



(c) Durch. Stromverbrauch versus Bruttogeschossfläche

Abb. 3.27: Baustellen im Vergleich

Zur Beurteilung der Ersparnis sind die gemessenen Ergebnisse um den Einfluss der Außentemperatur zu bereinigen. Zur Normierung des gemessenen Stromverbrauchs fand ein Rückgriff auf Heizgradtage statt. Bei dieser Form der Datenbereinigung ist es zunächst erforderlich, Heiztage zu ermitteln. Als Heiztage zählen jene Tage, die eine tiefere Durchschnittstemperatur als 12°C aufweisen. Als Datengrundlage für die Außentemperatur ist auf die Messstation „Hohe Warte“ der ZAMG zu verweisen. Im betrachteten Zeitraum zwischen 02.01. und 23.04.2023 sind 96 derartige Tage zu finden, siehe Tabelle 3.13. Im Anschluss daran, sofern ein Heiztag vorliegt, ermittelt sich der jeweilige Heizgradtag aus der Differenz zwischen der durchschnittlichen Tagesaußentemperatur und der gewünschten Innenraumtemperatur, andernfalls wird dieser Tag mit 0 Heizgradtagen bewertet, siehe Tabelle 3.13. Als Innenraumtemperatur wurde 20°C angesetzt.

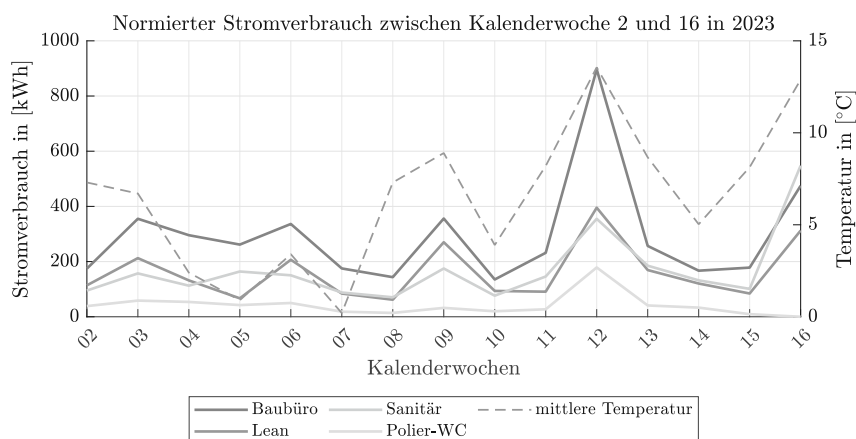
Tab. 3.13: Ermittlung der Heizgradtage

Datum	Durchschnittstemperatur	Heiztage	Heizgradtage
[Datum]	[°C]	[-]	[-]
02.01.2023	5,70	1	14,30
⋮	⋮	⋮	⋮
18.02.2023	14,80	0	0,00
19.02.2023	11,60	1	8,40
⋮	⋮	⋮	⋮
23.04.2023	15,50	0	0,00
Σ		96	

Wie in Tabelle 6.2 in Kapitel 6.1 zusammengefasst, sind die Heizgradtage für die jeweilige Kalenderwoche zu summieren. Aus den Teilergebnissen der einzelnen Kalenderwochen ist ein Mittelwert über alle Kalenderwochen zu bilden. Abschließend ist unter Verwendung der Formel 3.1 der normierte Stromverbrauch zu berechnen.

$$\text{Verbrauch}_{\text{KW.bereinigt}} = \frac{\text{Verbrauch}_{\text{jeweilige KW}}}{\text{HGT}_{\text{KW.Mittelwert}}} * \text{HGT}_{\text{jeweilige KW}} \quad (3.1)$$

Wie Abbildung 3.28 zu entnehmen ist, zeigen sich zwei Aspekte. Einerseits ist die programmierte Regelung bei Außentemperaturen um die 5 °C in der Lage den Energieverbrauch um zirka 60 % zu senken. Andererseits erschließt sich aus Abbildung 3.28, dass weitere Parameter außer der Außentemperatur den Energieverbrauch negativ beeinflussen. Der hohe normierte Stromverbrauch bei mittleren Außentemperaturen von über 10 °C in den Kalenderwochen 9, 12 und 16 ist vermutlich auf die (veralteten) E-Konvektoren und NutzerInnenverhalten zurückzuführen.

**Abb. 3.28:** Normierter Stromverbrauch, siehe Tabelle 6.2

Die Bauvorhaben „Gesundheitszentrum Aspern“ und „Hauptstraße 139, 2391 Kaltenleutgeben“ sind nahezu gleichzeitig in Bau befindlich. Die Projekte sind dahingehend vergleichbar, insofern beide Containeranlagen über einen eigenen Stromanschluss bzw. Smart Meter verfügen. Aus diesem Grund wird die Containeranlage „Gesundheitszentrum Aspern“ als Referenz herangezogen. In diesem Zusammenhang sind die unterschiedlichen Rahmenbedingungen der jeweiligen Bauvorhaben zu beachten. Kaltenleutgeben ist eine in einem Taleinschnitt gelegene Wienerwaldgemeinde

und liegt auf zirka 357 m Seehöhe. In den 1950er Jahren erlangte Kaltenleutgeben als „Skidorf der Wiener“ Berühmtheit und bot bis in das Jahr 2011 auf der Norwegerwiese einen Schlepplift [128]. Im Gegensatz dazu liegt die Seestadt östlich der Donau auf einer Seehöhe von zirka 157 m. Trotz der räumlichen Nähe von 25 km befinden sich die beiden Orte in zwei unterschiedlichen Klimaten. Die Seestadt ist dem pannonischen Klimaraum zuzuordnen, der sich durch häufige Trockenperioden, auffallende Niederschlagsarmut und nahezu ständiger Windbewegung auszeichnet. Im Gegensatz dazu befindet sich Kaltenleutgeben am östlichen Rand des inneralpiner Klimaraums, der sich durch höhere Niederschläge und tiefere Temperaturen im Jahresmittel auszeichnet [129]. Neben der geographischen Lage unterscheiden sich die Baustelleneinrichtungsplätze in ihrer räumlichen Anordnung. Wie Abbildung 3.29 dargestellt, lässt sich hinsichtlich der räumlichen Konfiguration festhalten, dass die Container in der Seestadt kompakter zueinander stehen als jene in Kaltenleutgeben.



(a) Baustelleneinrichtung in Kaltenleutgeben



(b) Baustelleneinrichtung in der Seestadt

Abb. 3.29: Baustelleneinrichtung im Vergleich

Da die Ausgangsbedingungen gegensätzlich sind, bedarf es im Betrachtungszeitraum zwischen Oktober 2022 und April 2023 einer Auseinandersetzung mit den absoluten Stromverbräuchen, siehe Tabelle 3.14. Der Gesamtstromverbrauch lag in Kaltenleutgeben mit 50.742 kWh rund PRO3 unter jedem in der Seestadt (52.233 kWh). Unter Berücksichtigung der Heizgradtage reduziert sich die relative Differenz auf 1,40 %. In der Niedertarifzone zwischen 22:00 und 06:00 haben beiden Containeranlagen nahezu gleich viel Strom verbraucht. Interessant ist, dass in der Haupttarifzone zwischen 06:00 und 22:00 in Kaltenleutgeben der Stromverbrauch um zirka 5 % niedriger ist als in der Seestadt. Dieser Umstand lässt sich mit hoher Wahrscheinlichkeit mit der gezielten Regelung der E-Konvektoren am Wochenende erklären.

Tab. 3.14: Vergleich Hauptstraße 139, 2391 Kaltenleutgeben und Gesundheitszentrum Aspern

BVH	Hochtarifzone	Nebentarifzone	Gesamtverbrauch
	[kWh]	[kWh]	[kWh]
Hauptstraße 139	33.847	16.895	50.742
Gesundheitszentrum Aspern	35.614	16.719	52.333

Bezugnehmend auf die räumliche Konfiguration lässt sich beim Vergleich der Containeranlagen festhalten, dass in Kaltenleutgeben zwar weniger Container geheizt werden müssen, aber ein größerer Anteil der Containeroberfläche exponiert zur Außenluft steht. Diese Exposition begünstigt Heizwärmeverluste. Weiters ist zu berücksichtigen, dass sich die Baustelle in einem Taleinschnitt befindet und die solaren Gewinne reduziert sind. Zusätzlich ist die Wasserleitung in Kaltenleutgeben zwischen Containeranlage und Baustelle mit einer Begleitheizung versehen.

Analog zum zuvor vorgestellten Streupunktdiagramm, siehe Abbildung 3.27b, der abgeschlossenen Baustellen lässt sich das Bauvorhaben „Hauptstraße 139, 2391 Kaltenleutgeben“ in der Heizsaison 2022-2023 mit einem mittleren Stromverbrauch von 14.755 kWh und einer Standardabweichung von 5.850 kWh beschreiben. Der Stromverbrauch bezogen auf die Nutzfläche beträgt im Vergleichszeitraum Oktober 2022 bis April 2023 durchschnittlich zirka 6,20 kWh/m². Bei einem Mehrfamilienhaus mit mehr als 20 Wohneinheiten beträgt der Anteil der Nutzfläche an der Bruttogeschossfläche zirka 70 % [130]. Aus diesem Verhältnis ergibt sich bezogen auf die Bruttogeschossfläche (11.740 m²) ein Stromverbrauch von durchschnittlich zirka 4,30 kWh/m². Das Bauvorhaben „Gesundheitszentrum Aspern“ ist mit einer Bruttogeschossfläche von 13.630 m² zirka 14 % größer und verbraucht im Vergleichszeitraum mit 3,80 kWh/m² zirka 11 % weniger als das Projekt „Hauptstraße 139, 2391 Kaltenleutgeben“.

3.5.1 Zusammenfassung

Nach den gewonnenen Erkenntnissen bei den abgeschlossenen Bauvorhaben der Firma Sedlak ist unbestritten, dass Energiemonitoring für Bauunternehmen relevant ist. Vorteilhaft ist, dass es zunächst keiner teuren Software- oder Hardwarelösung bedarf. In einem ersten Schritt empfiehlt es sich im Zuge der Rechnungsfreigabe wichtige Informationen, wie die monatliche Leistungsspitze, Stromverbrauch in der Hochtarifzone, Stromverbrauch in der Niedertarifzone und den Blindstromverbrauch, in einem Tabellenkalkulationsprogramm zu erfassen. Je nach Energieliefervertrag sind die angesprochenen Informationen entweder der Netzbetreiberrechnung oder der Energielieferantenrechnung zu entnehmen. Auf Grundlage der gesammelten Daten können wichtige Kennzahlen, wie Anteil des Niedertarifverbrauchs am Gesamtstromverbrauch oder die Anzahl der Volllaststunden gewonnen werden. Ein hoher Anteil des Niedertarifverbrauchs indiziert beispielsweise Standby-Verbräuche. Auf der anderen Seite spiegelt eine geringe Anzahl an Volllaststunden eine schlechte Ausnutzung der angemeldeten elektrischen Leistung wider.

Problematisch ist, dass die Rechnungen teilweise erst zwei bis drei Monate nach dem Leistungszeitraum versandt werden. Durch das zeitliche Auseinanderfallen von Leistungszeitraum und Rechnungslegung wird der Handlungsspielraum der Bauleitung eingeschränkt. In einem weiteren Schritt empfiehlt es sich daher die Smart Meter Portale der Netzbetreiber zu nutzen. Nach Herstellung der Kommunikationsfähigkeit zwischen Smart Meter und Netzbetreiber sowie Erteilung entsprechender Freigaben ist die Bauleitung in der Lage, tagesaktuell das Energieverbrauchsprofil der Baustelle zu überprüfen. In dieser Konstellation beträgt die Auflösung der Daten 15 Minuten und lässt sich durch Hinzuschalten der Kundenschnittstelle am Smart Meter auf 1 Minute hochskalieren. Die Verwendung der Kundenschnittstelle bedingt die Nutzung von zusätzlicher Hard- und Software [131].

Ergänzt durch tabellarische und grafische Visualisierungen kann Energiemonitoring in Verbindung mit „Smart Home“-Technologien den Energieverbrauch von Containerburgen effektiv senken. Im Fall des Bauvorhabens „Hauptstraße 139, 2391 Kaltenleutgeben“ konnten Einsparungen von zirka 60 % erzielt werden. Bei energieintensiven Gewerken wie dem Estricheinbau erscheint es sinnvoll vertraglich zu vereinbaren, dass der Subunternehmer die Energiekosten zu tragen hat. Als technische Voraussetzung sind hierfür Subunternehmerverteilerschranke [132] zu nennen, so kann jedem Gewerk oder Mannschaft ein individueller Zählpunkt zugewiesen werden.

Jedes Bauvorhaben hat seine speziellen Randbedingungen, die es zu erfassen und zu vergleichen gilt, weshalb der direkte energetische Vergleich von laufenden Baustellen mitunter schwierig ist. Das vorgestellte Streupunktdiagramm, siehe Abbildung 3.27c, in Verbindung mit dem Kennwert „Stromverbrauch je m²-Bruttogeschossfläche“ erscheint im Hochbau als sinnvolle Möglichkeit zum Vergleich von Stromverbräuchen und zum Festsetzen von realistischen Zielwerten.

3.6 Energiesparpotentiale auf Baustellen

Den nachstehenden Ausführungen ist vorzuschicken, dass es sinnvoll ist Mitarbeiter im Umgang mit Energie zu schulen und Achtsamkeit aufzubauen. Durch Verhaltensänderung gelang es der japanischen Gesellschaft nach dem Reaktorunfall in Fukushima im darauffolgenden Juli/August die Lasten um 19 % und den Verbrauch um 14 % zu reduzieren [133]. Wie den Ausführungen in den Kapiteln 2 und 3 zu entnehmen ist, lässt sich sowohl im Baubetrieb als auch bei der Baustelleneinrichtung ein Großteil des Strombedarfs auf die Heizung zurückführen. Hinsichtlich Wärmebereitstellung für die Sicherstellung der notwendigen Verarbeitungstemperaturen im Baubetrieb besteht weiterer Forschungsbedarf. Die Berechnung der Heizlast eines Baustellencontainers kann in Anlehnung an die ÖNORM H 7500-1 „Heizungsanlagen in Gebäuden – Verfahren zur Berechnung der Heizlast“ [134] erfolgen. Die Heizlast stellt sich als Summe von Transmissionswärmeverlusten (Verluste über die Bauteile der Gebäudehülle), Wärmeverlusten über die Lüftung (Lüftungsvolumenstrom, Undichtheiten und hygienischer bedingter Mindestluftwechsel) und Zusatz-Aufheizleistung dar. Die Heizlast der Baustelleneinrichtung lässt sich unter Berücksichtigung der oben genannten Berechnungselemente durch folgende Maßnahmen verbessern:

Auswahl der Wärmedämmung: Namhafte Hersteller bzw. Händler wie CONTAINEX, CHV, Mobilbox etc. bieten üblicherweise Dach-, Wand- und Bodenaufbauten mit Mineralwollämmung sowie einer Schichtdicke von 6 bis 10 cm als Basisvariante ihrer Containersysteme an [135], [136], [137]. Wie nachstehender Tabelle 3.15 zu entnehmen ist, können Wandaufbauten bei gleicher Schichtdicke in Verbindung mit einem geringeren U-Wert die Transmissionswärmeverluste über die Containerwände um bis zu zirka 33 % senken. Bei Anwendung höherer Schichtdicken, respektive bei Verzicht auf Containernutzfläche, lassen sich die Verluste über die Wände um weitere 32 % reduzieren. Dieser Logik folgend ließen sich weitere Transmissionsverluste über Dach und Boden zwischen 44 und 58 % vermeiden, siehe Tabellen 3.15 und 3.16.

Tab. 3.15: Wärmedämmvarianten für das Containerdach und die Containerwand [135]

Dachdämmung			Wanddämmung		
Dämmmaterial	Dicke [mm]	U-Wert [W/m ² K]	Dämmmaterial	Dicke [mm]	U-Wert [W/m ² K]
Mineralwolle	100	0,36	Mineralwolle	60	0,57
	140	0,23		100	0,35
Polyurethan	100	0,20	Polyurethan	60	0,38
	140	0,15	Polyisocyanurate	110	0,20
			Steinwolle	60	0,65
				110	0,35

Tab. 3.16: Wärmedämmvarianten für den Containerboden [135]

Bodendämmung		
Dämmmaterial	Dicke [mm]	U-Wert [W/m ² K]
Mineralwolle	60	0,55
	100	0,36
Polyurethan	100	0,20

Auswahl der Containergröße: Die Abmessungen von Baustellencontainern basieren auf der international anerkannten Norm ISO 668 [138], welche Ihren Ursprung in der maritimen Frachtschifffahrt hat. In Tabelle 3.17 sind die gängigsten Größen für Baustellencontainer aufgelistet. Weiters ist der nachstehenden Tabelle 3.17 zu entnehmen, dass sich bei zunehmender Längsausdehnung der Container das Verhältnis zwischen Außenfläche und Volumen verringert. Da weniger Oberfläche zur Wärmeabgabe zur Verfügung steht, reduzieren sich, bezogen auf die in Anspruch genommene Containergrundfläche, die Transmissionswärmeverluste bei einer Temperaturdifferenz zwischen innen und außen von 20 K um bis zu 22 %.

Tab. 3.17: Außenabmessungen gängiger Containergrößen laut CHV-Katalog [136]

Typ	Außenabmessungen			Außenfläche [m ²]	Volumen [m ³]	A/V-Verhältnis [-]	Transmissionswärmeverluste [W/m ² BF]
	Länge [mm]	Breite [mm]	Höhe [mm]				
10 ft	2.991	2.438	2.791	44,98	20,35	2,21	57,63
16 ft	4.886	2.438	2.791	64,71	33,25	1,95	49,94
20 ft	6.058	2.438	2.791	76,96	41,22	1,87	48,11
24 ft	7.334	2.438	2.791	90,31	49,90	1,81	46,09
30 ft	9.120	2.438	2.791	108,99	62,06	1,76	44,99

Wahl der Innenraumtemperatur: Gemäß §28 iVm §46 AStV sind in Gebäuden auf Baustellen, in denen ständige Arbeitsplätze eingerichtet sind, in Abhängigkeit der körperlichen Tätigkeit bestimmte Lufttemperaturen einzuhalten. In diesen Arbeitsräumen ist Sorge zu tragen, dass die Lufttemperatur bei geringer körperlicher Belastung zwischen 19 und 25 °C, bei normaler körperlicher Belastung zwischen 18 und 24 °C und bei hoher körperlicher Belastung mindestens 12 °C beträgt. In Waschräumen gemäß §34 Abs 9 AStV ist sicherzustellen, dass die Raumtemperatur 21 °C ohne Duschen und 24 °C mit Duschen beträgt. Die gesetzlich breite Vorgabe an zulässigen Innenraumtemperaturen bietet dem Nutzer durch Wahl der Innentemperatur Einsparungspotential. Ausgehend von einem einfachgedämmten Container und einer durchschnittlichen Lufttemperatur von 4,30 °C im Jänner 2023 ergeben sich nach Tabelle 3.18 allein bei der Betrachtung der Transmissionswärmeverluste Reduktion um ein Grad im Schnitt ein Einsparungspotential von zirka 6 %.

Tab. 3.18: Transmissionswärmeverluste in Abhängigkeit von Containeraufbau, Außenlufttemperatur und Innenraumtemperatur

Innenraumtemperatur	[°C]	18	19	20	21	22	23	24	25
Transmissionsverluste	[W/m ² BF]	33,0	35,4	37,8	40,2	42,6	46,0	47,4	49,8

Verbesserung der Luftdichtheit: Wie Tanyer et al. [139] in Feldversuchen nachgewiesen hat, weisen Bürocontainer bauartbedingt Undichtheiten auf, siehe Abbildung 3.30. Diese führen bei Bürocontainern zu einer unkontrollierten Luftwechselrate von 14,21/h. Versiegeln der Anschlussbereiche, siehe Abbildung 3.31a und Abbildung 3.31b, reduzierte die unkontrollierte Luftwechselrate auf 2,71/h und erhöhte an gewissen Punkten die Oberflächentemperatur, siehe Abbildung 3.31c und Abbildung 3.31d. Die nachträgliche Abdichtung konnte die Energieeffizienz des untersuchten Bürocontainers um 9,30 % verbessern [139].

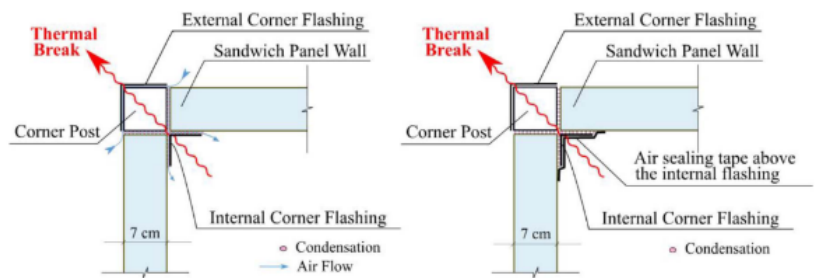


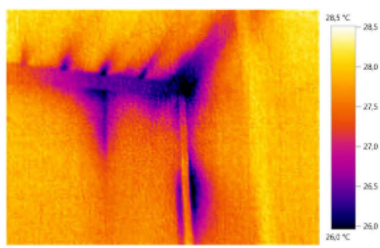
Abb. 3.30: Anschlussdetail



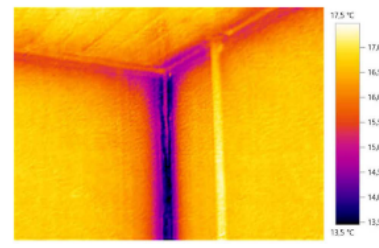
(a) Anschlussbereich OHNE Abdichtung



(b) Anschlussbereich MIT Abdichtung



(c) Wärmebildaufnahme OHNE Abdichtung

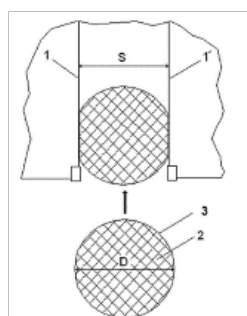


(d) Wärmebildaufnahme MIT Abdichtung

Abb. 3.31: Vergleich von Innenecke [139]

Kontrollierte Belüftung mit Wärmerückgewinnung: Da Baubürocontainer typischerweise über Fenster verfügen, welche als direkt ins Freie führende Lüftungsöffnungen gelten und diese größer als 2% der Bodenfläche sind, ist §26 Arbeitsstättenverordnung erfüllt. Mit zunehmender Luftdichtheit der Containerhülle könne es mit steigender Luftfeuchtigkeit erforderlich sein, mechanisch zu be- und entlüften, um Schimmelbildung zu verhindern. Aus nachvollziehbaren und gesetzlichen Gründen ist es der Baustellenmannschaft nicht zumutbar, ständig stoß- bzw. querszulüften. Bei Vorhandensein einer mechanischen Lüftungsanlage sieht die Arbeitsstättenverordnung vor, Außenluftvolumen in Abhängigkeit der körperlichen Belastung, pro anwesende Person und Stunde 35 m^3 bei Arbeiten mit geringer körperlicher Belastung, 50 m^3 bei Arbeiten mit normaler körperlicher Belastung und 70 m^3 bei Arbeiten mit hoher körperlicher Belastung dem Container zuzuführen. Bei zwei Arbeitsplätzen in einem 16 ft-Container führt diese gesetzliche Regelung dazu, dass die Lüftungsanlage mindestens zwei Mal pro Stunde das gesamte Luftvolumen des Containers austauscht. Daher ist es sinnvoll, der Zuluft mittels Kreuz- oder Gegenstromwärmetauscher entsprechend Wärme aus der Abluft zuzuführen. Laut einschlägigen technischen Datenblättern für dezentrale Lüftungsanlagen lässt sich bis zu 70% Wärme rückgewinnen [140].

Verbesserung der Winddichtheit: Bei größeren Containeranlagen empfiehlt es sich den Abstand zwischen den Containern so gering wie zu möglich halten, um konvektive Verluste an der Containeroberfläche durch Windzug zu vermeiden, siehe Abbildung 3.32b. Ausgehend von dem Problem, dass Hochseekühlcontainer ebenfalls einen hohen Stromverbrauch aufweisen, schlägt Filina-Dawidowicz et al. [141] in ihrer wissenschaftlichen Arbeit vor, diesen Spalt mittels einem überdimensionalen Fugendichtband abzudichten, siehe Abbildung 3.32a. In den Laborexperimenten wies Filina-Dawidowicz et al. [141] eine Energieersparnis von zirka 7,60 % nach.



(a) Abdichtungsband für Container



(b) Spalt zwischen zwei Containern

Abb. 3.32: Abdichtungsmaßnahmen bei Containern

Effizientere Wärmebereitstellung: In der Regel heizen E-Konvektoren mit rund 2 kW elektrischer Leistung die Baustellencontainer auf die gewünschte Innenraumtemperatur. Vorteilhaft sind die günstige Anschaffung und die Wartungsfreiheit. Da die Umwandlung von elektrischer Energie zu Heizwärme nahezu äquivalent ist, ist das System ineffizient. Der Einsatz von Luft-Luft-Wärmepumpensysteme wäre um ein Vielfaches effizienter. Beispielsweise bietet ETHERMA mit ihrem Produkt „Fire+Ice“ ein Wärmepumpensystem, das den Strombedarf auf Grund der höheren Effizienz (COP=3,28) auf etwa ein Drittel senken könnte [142].

Analog zur Heizlast ist die Kühllast der Baustelleneinrichtung durch technische Maßnahmen zu reduzieren:

Beschattung: Bereits aus der Stefan-Boltzmann-Beziehung, siehe Gleichung 3.2, wonach die Strahlungsleistung P eines Körpers mit der vierten Potenz seiner Temperatur T steigt, ergibt sich, dass Beschattung zur Senkung des Kühlbedarfs beitragen kann. Shinoda et al. [143] haben bei der Analyse von Verschattungssystemen für Tiefkühlcontainer festgestellt, dass der Kühlbedarf um zirka 5 % gesenkt werden könnte. Rechnerisch ($T \approx \sqrt[4]{0,8} = 0,95$) entspricht dies einer Reduktion der Strahlungsleistung auf den Baustellencontainer um 20 %. Shinoda et al. [143] hat in seinem Versuch die erforderliche Verschattung über einen Dachüberbau der (Hochsee-)Container erreicht.

$$P = \sigma * A * T^4 \quad (3.2)$$

Reduktion der inneren Wärmegewinne: Geräte wie zum Beispiel Kühlschränke, die viel Abwärme produzieren, sind außerhalb der Mannschaftsbereiche, beispielsweise in wenig genutzten Besprechungsräumlichkeiten unterzubringen. Die elektrische Leistungsaufnahme des Kühlschranks ist vereinfachend gleichzusetzen mit der Abwärmeleistung. Der Stromverbrauch des Kühlschranks während des Gleiserneuerungsvorhabens am Landstraßer Gürtel zeigt, dass zirka 14 % Kühlenergie hätte eingespart werden können. Es lässt sich allgemein festhalten, dass sich die Wärme- und Kältebereitstellung in einem Gerät zusammenfassen ließe, da Wärmepumpensysteme oftmals die beiden Funktionen Heizen und Kühlen technisch durch Umkehr der internen Prozesse bieten. Wie bei der Sanierung von Hochbauten empfiehlt es sich, die Containerhülle vorab hinsichtlich

der Transmissionswärmeverluste zu optimieren. Ein unzureichend gedämmter Container könnte dazu führen, dass sich die Wärmepumpe während des Heizens im Dauerbetrieb befindet, der Verdampfer vereisen könnte und der Kondensatabfluss verstopft, siehe Abbildung 3.33b. In diesem Zusammenhang ist anzumerken, dass die Lamellenverdampfer von Kompaktklimageräten aufgrund der eng liegenden Alulamellen, siehe Abbildung 3.33a, besonders gefährdet sind. Die Lamellen vergrößern die Oberfläche und verbessern die Wärmeübertragung zwischen Außenluft und Kühlmittel.



(a) Alulamellen von Kompaktklimagerät



(b) Kondensatabfluss bei Kompaktklimagerät

Abb. 3.33: Details am Komapaktklimagerät

Der Reststrombedarf der Baustelleneinrichtung lässt sich durch folgende Maßnahmen sinnvoll reduzieren: Umstellung auf LED-Beleuchtung: Im Vergleich zu einer konventionellen Leuchtstoffröhre mit 36 W reduziert sich die Leistungsaufnahme bei einer gleichwertigen LED-Röhre auf 15 W Leistungsaufnahme. Durch den Tausch der Leuchtmittel lässt sich der Stromverbrauch mehr als halbieren. Es gilt zu beachten, dass gemäß Ökodesign-Verordnung (EU) 2019/2020 ab 25. August 2023 keine T5 oder T8 Leuchtstoffröhren, sowie die meisten Halogenlampen in der Europäischen Union ohnehin nicht mehr in Verkehr gebracht werden dürfen.

3.6.1 Zusammenfassung

Die in Kapitel 3.6 erklärten Energiesparpotentiale lassen sich mit dem in Tabelle 3.19 stehenden Maßnahmenkatalog wie folgt zusammenfassen:

Tab. 3.19: Energiesparpotential

Maßnahmen	Einsparungspotential
MitarbeiterInnenschulung	zirka 14 %
Auswahl der Wärmedämmung	zirka 30 %
Auswahl der Containergröße	zirka 22 %
Wahl der Innenraumtemperatur	zirka 6 %
Verbesserung der Luftdichtheit	9,30 %
Kontrollierte Belüftung mit Rückgewinnung	zirka 70,00 %
Verbesserung der Winddichtheit	7,60 %
Effizientere Wärmebereitstellung	zirka 60 %
Beschattung	4,82 %
Reduktion der inneren Wärmegewinne	14 %
Umstellung auf LED-Beleuchtung	zirka 50 %

Kapitel 4

Forschungsergebnisse

Der nachstehende Abschnitt gliedert sich in Diskussion der Forschungsergebnisse, Beantwortung der Forschungsfragen und Ausblick auf weiteren Forschungsbedarf. Im darauffolgenden Fazit werden die gewonnenen Erkenntnisse konsolidiert.

4.1 Diskussion der Forschungsergebnisse

Die Analyse der vorgestellten Baustellen hat erstmalig ermöglicht, Kennzahlen für den Stromverbrauch von Baustellencontainern zu erfassen. Auffallend in der zusammenfassenden Tabelle 4.1 ist, dass die Heizung zwischen 9 bis 17 Mal so viel Strom verbraucht wie die Klimaanlage. In persönlichen Gesprächen gaben die ArbeiterInnen an, Kälte schneller als Wärme unangenehm wahrzunehmen. In diesem Zusammenhang sind Innenraumtemperaturen von über 25 °C in den Wintermonaten, siehe Abbildung 3.12, ins Treffen zu führen. Für das Aufwärmen in den Pausen steht ein geringes Zeitbudget zur Verfügung, dass durch überdurchschnittliche Innenraumtemperaturen ausgeglichen wird. Nichtsdestotrotz stehen längere Pausen in keinem wirtschaftlichen Verhältnis zum erwarteten Nutzen des geringeren Stromverbrauchs. Infrarotpaneele könnten die Energiebilanz möglicherweise verbessern. Hinsichtlich dem Stromverbrauch der Beleuchtung, siehe Tabelle 4.1, ist festzuhalten, dass dieser von der technischen Ausstattung, respektive vom Vorhandensein einer LED-Beleuchtung, abhängig ist.

Tätigkeit je Container	Stromverbrauch in kWh je Kalenderwoche
Bürotätigkeit	15 kWh
Beleuchtung	4–9 kWh
Heizung	Besprechungscontainer 80 kWh Bürocontainer 100 kWh Sanitärcontainer 190 kWh
Klimatisierung	11 kWh
Warmwasserbereitung Sanitärcontainer	40 kWh

Tab. 4.1: Kennwerte — Stromverbrauch je Kalenderwoche

Die wissenschaftliche Auseinandersetzung mit Stromverbrauch auf Baustellen hat gezeigt, dass neben dem Verbrauch der Leistungsbedarf eine große Rolle spielt. Während sich Nisançoglu [36] und Piatek [38] in ihren Arbeiten in erster Linie mit dem Verbrauch beschäftigen, bietet die vorliegende Betrachtung des Leistungsbedarfs eine kalkulatorische Ausgangsbasis sowie Einsparungs- und Optimierungspotential für den Baubetrieb.

Auf Grundlage der gewonnenen durchschnittlichen Leistungsspitzen und Volllaststunden lässt sich der Stromverbrauch von Baustellen abschätzen. Zur überschlagsmäßigen Berechnung ist ein Volllaststundenanteil von 30 % heranzuziehen. Für die mittlere Spitzenleistung kann auf die vorliegenden Forschungsergebnisse, siehe Tabelle 4.2, oder auf eigene Erhebungen zurückgegriffen werden. Zunächst sind für das jeweilige Bauvorhaben die maximalen Volllaststunden zu ermitteln, welche sich aus der Anzahl der Tage \times 24 h ergeben. In weiterer Folge ergibt sich aus 30 % der Volllaststunden multipliziert mit der mittleren Leistung der geschätzte Stromverbrauch.

(Teil-)Bereich	Mittlere Leistungsbedarfsspitze	Anmerkung
Baustelleneinrichtung	19 kW	Kapitel 3.4.1
Baubetrieb inklusive einem Turmdrehkran	38 kW	Kapitel 3.4.2
Baustelleneinrichtung und Baubetrieb inklusive 2 Turmdrehkränen	57 kW	Kapitel 2

Tab. 4.2: Mittlere Leistungsbedarfsspitze in kW je (Teil-)Bereich

Mit Blick auf die vorgestellte Berechnung ist es wichtig zu betonen, dass es für Bauunternehmen aus finanzieller Sicht sinnvoll ist, den Volllaststundenanteil zu steigern. Durch Steigerung der Volllaststunden zum Beispiel durch Implementierung eines Lastmanagements, siehe Kapitel 2.6, lassen sich die Netzbereitstellungskosten senken und eine ausfallsicherere Stromversorgung sicherstellen. Um eine derartige Maßnahme umzusetzen, bedarf es eines intensiven Austauschs mit der Bauleitung und der Definition von Lastabwurfpaketen. Die vorliegende Diplomarbeit indiziert, dass Heizungen und Klimaanlage als Lastpakete hierfür sinnvolle Ansatzpunkte sein könnten, siehe Tabelle 4.3.

Gerät	Leistungsbedarf
Heizung	2–18 kW
Klimaanlage	zirka 920 W
Weitere Details siehe Tabelle 2.3.	

Tab. 4.3: Leistungsaufnahme Heizung und Klimaanlage [1]

Vor Einführung eines Lastmanagements ist die Einführung eines strukturierten Energiemonitorings sinnvoll. Die vorliegenden Untersuchungen belegen die Relevanz von Energiemonitoring für Bauunternehmen. Die Anschaffung kostspieliger Software oder Hardware ist hierfür zunächst nicht erforderlich. Im Zuge der Rechnungsfreigabe von Netzbetreiber- oder Energielieferantenrechnungen empfiehlt es sich, wesentliche Informationen wie monatliche Leistungsspitzen, Hochtarifzone- und Niedertarifzone-Stromverbrauch sowie Blindstromverbrauch mithilfe einer Tabellenkalkulationssoftware zu erfassen. Durch die Auswertung dieser Daten lassen sich bereits wichtige Kennzahlen ableiten, wie zum Beispiel der Anteil des Niedertarifverbrauchs am Gesamtstromverbrauch oder die Anzahl der Volllaststunden. Ein hoher Niedertarifverbrauchsanteil weist auf Standby-Verbräuche hin, während eine geringe Volllaststundenanzahl eine ineffiziente Nutzung der angemeldeten elektrischen Leistung signalisiert.

Die Verzögerung bei der Rechnungslegung um zwei bis drei Monate nach dem Leistungszeitraum stellt jedoch ein Problem dar, da dies den Handlungsspielraum der Bauleitung einschränkt. Um diese zeitliche Lücke zu überbrücken, bietet es sich an das Smart Meter Portal des jeweiligen Netzbetreibers zu nutzen. Durch die Kommunikationsfähigkeit zwischen Smart Meter und Netzbetreiber kann die Bauleitung das Energieverbrauchsprofil der Baustelle mit einem Tag Verzögerung überwachen. Die Datenauflösung beträgt standardmäßig 15 Minuten und kann nach Erteilen der erforderlichen Freigaben durch Hinzuschalten der Kundenschnittstelle am Smart Meter auf 1 Minute erhöht werden. Allerdings erfordert die Verwendung der Kundenschnittstelle zusätzliche Hard- und Software [131]. Durch die Kombination von Energiemonitoring und „Smart Home“-Technologien konnte der Energieverbrauch von Containeranlagen effektiv reduziert werden. Während dem Bauvorhaben „Hauptstraße 139, 2391 Kaltenleutgeben“ ließen sich beispielsweise Einsparungen von etwa 60% erzielen. Eine weitere Erkenntnis war, besonders bei energieintensiven Gewerken wie Estricheinbau, Vereinbarungen zu treffen, wonach der Subunternehmer die Energiekosten zu tragen hat. Um dies umzusetzen, werden Subunternehmervertreilerbeschränkungen benötigt, um individuelle Zählpunkte für jedes Gewerk oder für jede Mannschaft zu ermöglichen. Der direkte Vergleich des Energieverbrauchs von laufenden Baustellen gestaltet sich aufgrund der individuellen Randbedingungen jeder Baustelle als herausfordernd. Um dennoch einen sinnvollen Vergleich zu ermöglichen, ist im Hochbau ein Streupunktdiagramm in Verbindung mit dem Kennwert „Stromverbrauch je m²-Bruttogeschossfläche“ heranzuziehen. Dies ermöglicht den (laufenden) Vergleich von Stromverbräuchen und die Festlegung realistischer Zielwerte.

Betrachtete Baustellencontainer haben weiters gezeigt, dass sich Container in den Sommermonaten rasch aufheizen und in den Wintermonaten ebenso rasch auskühlen, siehe Abbildungen 3.8 und 3.12. Aus diesem Grund ist es erforderlich, die Containerkonstruktion hinsichtlich Wärmebrücken und Luftundichtheiten signifikant zu verbessern. Im Zuge dessen sollten die bekannten Problemfelder Luftfeuchtigkeit und Schimmel nicht außer Acht gelassen werden. Weiters ist es sinnvoll, bekannte Konzepte aus dem klassischen Gebäudebereich, wie zum Beispiel das Prinzip der Nachtkühlung, auf Containeranlagen zu übertragen. Unter zusätzlicher Berücksichtigung der Containeranlagenausrichtung könnte eine saisonale Flexibilisierung der Arbeitsplätze Heiz- und Kühlenergie sparen. Aus der Gebäudeklimatisierung ist bekannt, dass die Ausrichtung des Gebäudes sich auf den Wärmeeintrag auswirkt. In diesem Zusammenhang spielt in den Sommermonaten die solare Einstrahlung aus dem Westen aufgrund der tief stehenden Sonne eine große Rolle. Um den Kühlbedarf für intensiv genutzte Arbeitsräume zu reduzieren wäre es daher naheliegend, die Arbeitsbereiche in die östlich orientierten Container und die weniger genutzten Besprechungsbereiche in den westlichen Container zu verlagern. Um den Heizbedarf im Winter zu optimieren, findet ein Zonenwechsel statt. Diesem Konzept folgend sollten, Besprechungstermine im Winter am Nachmittag und im Sommer am Vormittag stattfinden. Darüber hinaus kann es sinnvoll sein veraltete Geräte durch sparsamere zu ersetzen oder diese, wie zum Beispiel den Multifunktionsdrucker, zumindest außerhalb der Arbeitszeit abzuschalten. Abschließend ist die Einführung neuer Heiz- und Kühlsysteme, wie zum Beispiel kompakter Monobloc-Wärmepumpen, anzudenken.

4.2 Beantwortung der Forschungsfragen

Wie viel Strom verbrauchen Baustellen bzw. Teilbereiche davon?

Der Gesamtstromverbrauch einer Baustelle lässt sich durch Multiplikation der mittleren Spitzenleistung, siehe Tabelle 4.2, mit den erwarteten Volllaststunden über die veranschlagte Bauzeit abschätzen. Je nach Dauer und zeitlicher Lage des Bauprojekts ist zu berücksichtigen, dass Baustellen in den Wintermonaten eine höhere Anzahl an Volllaststunden als in den Sommermonaten erzielen. Durch die gesammelten Erkenntnisse aus Literatur und eigenen Messungen lässt sich belegen, dass bei Bauvorhaben mit einer Bauzeit von zwei Jahren ein Auslastungsgrad von zirka 30 % erzielt wird. Für diese Art von Baustellen sind 2.628 Volllaststunden pro Jahr Bauzeit anzusetzen. Betriebsintern zu erwartende Volllaststunden können basierend auf bereits abgeschlossenen Bauvorhaben und vorliegenden Netzberechnungen ermittelt werden (siehe Kapitel 2.6). Im Übrigen trägt die Steigerung der Volllaststunden zur Kostenreduktion bei. Im Falle kürzer Bauzeit oder anderer technischer Ausprägung des Bauvorhabens lässt sich der Stromverbrauch für die Baustelleneinrichtung mittels Tabelle 4.1 eruieren.

Welchen Einfluss hat laufendes Energiemonitoring und -management auf die Energieeffizienz von baubetrieblichen Abläufen?

Die vorliegenden Untersuchungen bestätigen die Bedeutung von Energiemonitoring für Bauunternehmen. Während der Rechnungsfreigabe können relevante Daten wie die monatliche Leistungsspitze, Stromverbrauch in Hoch- und Niedertarifzonen sowie Blindstromverbrauch aus Netzbetreiber- oder Energielieferantenrechnungen erfasst werden. Die Analyse dieser Daten ermöglicht die Ableitung wichtiger Kennzahlen, wie beispielsweise den Anteil des Niedertarifverbrauchs am Gesamtstromverbrauch oder die Anzahl der Volllaststunden. Durch die Kombination von Energiemonitoring und „Smart Home“-Technologien während dem Bauvorhaben „Hauptstraße 139, 2391 Kaltenleutgeben“ sank der Energieverbrauch der Heizung um etwa 60 %. Weiters wurde erkannt, dass es sinnvoll erscheint, Subunternehmer während der Ausführung energieintensiver Arbeiten in die vertragliche Pflicht zu nehmen, Strom zu sparen und sich an den Energiekosten finanziell zu beteiligen. Energiemonitoring ermöglicht in der Bau-/Errichtungsphase die Bildung von Kennwerten, wie zum Beispiel „Stromverbrauch je m² Bruttogeschossfläche“. Nur mit Kennwerten ist es möglich, ein Energiemanagement im Unternehmen zu etablieren, laufende und abgeschlossene Bauprojekte zu vergleichen und realistische Ziele zu definieren.

Wo liegen Einsparpotentiale und wie hoch sind diese zu beziffern?

Die Untersuchungen an Baustellencontainern haben gezeigt, dass diese in den Sommermonaten schnell aufheizen und in den Wintermonaten ebenso rasch abkühlen. Daher ist es notwendig, die Containerkonstruktion deutlich zu verbessern, um Wärmebrücken und Luftundichtheiten zu minimieren. Bewährte Konzepte aus dem Gebäudebereich, wie das Prinzip der Nachtkühlung, könnten weitere Abhilfe schaffen. Mit Berücksichtigung der Ausrichtung der Containeranlagen könnte die saisonale Flexibilisierung der Arbeitsbereiche Heiz- und Kühlenergie einsparen. Die Ausrichtung beeinflusst den Wärmeeintrag in den Container. Um den Kühlbedarf zu reduzieren, könnten intensiv genutzte Arbeitsbereiche in die nach Osten ausgerichteten Container verlegt werden, während weniger genutzte Besprechungsbereiche in die nach Westen ausgerichteten Container verlegt werden könnten. Ein ähnliches Konzept könnte im Winter angewendet werden, um den Heizbedarf zu optimieren. Die Erneuerung veralteter Geräte durch energieeffizientere oder das gezielte Abschalten von Geräten außerhalb der Arbeitszeit ist ebenfalls wirkungsvoll. Zusätzlich könnte die Einführung neuer Heiz- und Kühlsysteme, wie kompakter Monobloc-Wärmepumpen, in Erwägung gezogen werden. Das Einsparpotential liegt zwischen 6 % und 60 % je nach gesetzter (Einzel-)Maßnahme.

4.3 Ausblick auf weiteren Forschungsbedarf

Unter Berücksichtigung der zunehmenden Elektrifizierung von Baugeräten stellt der Einsatz von Batteriesystemen und die Erzeugung von erneuerbarer Energie auf Baustellen interessante Möglichkeiten im Umgang mit knappen Ressourcen (zum Beispiel eingeschränkte Möglichkeiten hinsichtlich Netzzutritt im urbanen Raum) und zur Kosteneinsparung dar. Für den Einsatz sind zwei Szenarien denkbar:

1.) **Kurzfristig:** Vorhalten von ausreichend elektrischer Energie zur autarken Bewältigung eines Arbeitstages unter Berücksichtigung der erschwerten baubetrieblichen Bedingungen. Interessant erscheint in diesem Zusammenhang der Einsatz im Gleisbau. Wie die nachstehende Abbildung 4.1 zeigt, setzen die Wiener Linien Klein-LKWs als mobile Werkbank ein. Statt dem Dieselaggregat zur Energieerzeugung könnte eine passende Batterie zum Einsatz kommen. Ergänzend zur Speicherung wäre es sinnvoll, die Dachfläche des Kofferaufbaus durch Photovoltaikmodule zur Energieerzeugung zu ergänzen.

2.) **Langfristig:** Für die Steigerung der Volllaststunden auf Baustellen ist es opportun, auf Wasserstoff als Langzeitspeichersystem zu setzen. Aktuell bietet das Konsortium bestehend aus Test-Fuchs GmbH, SFC Energy AG und der Auto AG mit dem H₂Genset einen emissionsfreien Wasserstoffgenerator an [95]. Um die Anschlussleistung der Baustelle besser auszunutzen, wäre es denkbar, nach Vorbild des PICEA-Systems [144] für Gebäude den Wasserstoffgenerator auf Baustellen mit einem Elektrolyseur zu ergänzen. Unter Heranziehung von öffentlichem und selbsterzeugtem Strom (Photovoltaik auf Containerdach und Windturbinen am Turmdrehkran) im Sommer wäre dank Langzeitspeicherung in den Wintermonaten möglicherweise ein autarker Baubetrieb denkbar.

Die aufgezeigten Szenarien bedürfen im Rahmen eines partnerschaftlichen Austauschs mit der Bauindustrie einer intensiven wissenschaftlichen Auseinandersetzung.



Abb. 4.1: Klein-LKW als mobile Werkbank

Der Einfluss von Informationskampagnen zum Thema „Energiesparen auf Baustellen“ auf die Sensibilität von MitarbeiterInnen ist näher zu untersuchen. Am Beispiel der Firma Sedlak lässt sich nach Auskunft der Projektbeteiligten festhalten, dass nach Veröffentlichung der ersten Blogposteinträge im unternehmensinternen Intranet ein erstes Umdenken begonnen hat. Weiters sind Auswirkungen neuer Gesetze auf den Stromverbrauch auf Baustellen zu untersuchen. Die Reformierung des Energieeffizienzgesetzes und die einhergehende Selbstbindung des Bundes hinsichtlich Steigerung der eigenen Energieeffizienz lässt vermuten, dass bei zukünftigen Ausschreibungen für die Errichtungsphase die Erfüllung von Nachhaltigkeitskriterien ein Zuschlagskriterium wird. Eine fundierte wissenschaftliche Aussage zu den Auswirkungen von Informationskampagnen und Gesetzen ist auf Grundlage der geführten Gespräche nicht möglich. Es bedarf weiterer Untersuchungen, zum Beispiel in Form von strukturierten Interviews, in Bauunternehmen unterschiedlichster Größe.

Kapitel 5

Fazit

Für das Fazit ist das eingangs erwähnte Zitat [145] wie folgt umzuformulieren:

„Lassen Sie uns den Begriff **Energieeffizienz** neu definieren, in dem Sinne, dass es nicht unbedingt notwendig ist etwas zu tun, nur weil wir in der Lage sind, auf diesem Gebiet etwas zu tun.“

Falsch verstandene, vorausseilende Nachhaltigkeit ist im Baubetrieb nicht gefragt. Es ist zu bezweifeln, dass beispielsweise die augenblickliche Erneuerung sämtlicher Containeranlagen und der Ersatz sämtlicher E-Konvektoren durch Luft-Luft-Wärmepumpen ökologisch sinnvoll ist. Die technische Restnutzungsdauer bestehender Anlagen ist der ökologischen Ersparnis durch Neuanschaffung kritisch gegenüberzustellen. Der nachhaltigste Baubetrieb ist vermutlich jener, wo sensibilisiertes Personal achtsam mit den zur Verfügung gestellten Ressourcen umgeht. Der verantwortungsvolle Bauunternehmer hat sein Personal durch flankierende Maßnahmen bestmöglich dabei zu unterstützen, die gestellte Bauaufgabe so ressourcenschonend wie möglich durchzuführen.

Die vorliegende Diplomarbeit legt im Ergebnis die Einführung eines Energiemonitoringsystems als erste flankierende Maßnahme nahe. Denn Energieeffizienz kann bereits im Rechnungsfreigabeprozess beginnen. Viele wichtige Daten, wie die monatliche Leistungsspitze, Stromverbrauch in Hoch- und Niedertarifzonen, sowie Blindstromverbrauch, sind abhängig vom Stromliefervertrag in Netzbetreiber- oder Energielieferantenrechnungen bereits enthalten. Das Einordnen dieser Daten mittels Kennzahlenbildung ermöglicht der Unternehmensführung und der Bauleitung erste energetische Einblicke in das Baugeschehen. So lässt sich durch Differenzierung zwischen Hoch- und Niedertarifverbrauch die zeitliche Lage des Stromverbrauchs feststellen oder die Anzahl der Volllaststunden berechnen. Besonders letzteres kann, wie die vorliegende Diplomarbeit zeigt, im Rahmen der Kalkulation zur Abschätzung des Energieverbrauchs oder zur Optimierung des Energiebezugs herangezogen werden. In Verbindung mit „Smart Home“-Technologien bietet Energiemonitoring rasches Energiesparpotential ohne die gesamte elektrotechnische Ausstattung des Containers umzubauen. Während dem vorgestellten Bauvorhaben „Hauptstraße 139, 2391 Kaltenleutgeben“ ließ sich durch diesen Ansatz der Energieverbrauch der Heizung um etwa 60 % senken. Energiemonitoring schafft die Grundlage, um Subunternehmer verbrauchsabhängig in die finanzielle Verantwortung nehmen zu können. Weiters bietet die laufende Überwachung und einhergehende Verbesserung den Vorteil eines stabilen Stromnetzes auf der Baustelle und verhindert ungewollte kostspielige Produktionsausfälle. Da Auftraggeber mittlerweile Nachhaltigkeitskriterien hinsichtlich Energieeffizienz in die Ausschreibung aufnehmen, erhöht Energiemonitoring auch die Wettbewerbsfähigkeit. Erst nach Ausschöpfen aller organisatorischer und technischer (Zusatz-)Maßnahmen ist über die Neuanschaffung von Geräten und Containern nachzudenken.

Kapitel 6

Verzeichnisse & Anhang

Abbildungsverzeichnis

1.1	Weihnachtsbeleuchtung am 24.12.2022 gegen 19:00	2
2.1	Entwicklung des österreichischen Strompreisindex [20]	5
2.2	Price Forward Curves [25]	6
2.3	Abhängigkeit von Stromverbrauch und Temperatur von der Jahreszeit [36]	8
2.4	Gegenüberstellung des Stromverbrauchs mit Umweltfaktoren	9
2.5	Stromverbrauch gegenüber der vom Netzbetreiber gemessenen Leistungsspitzen [38, 39, 40]	10
2.6	Ermittlung der Anschlussleistung [46]	12
2.7	Direktheizungsgeräte im Sinne der OVE EN 60675 [65]	19
2.8	Mittlerer Jahresgang der Kapazitätsfaktoren über Deutschland (Mittelwert 1995 bis 2015) [74]	24
2.9	Photovoltaikpotential für Österreich [78]	25
2.10	Photovoltaikanlagen im Baustellenbetrieb	26
2.11	Energieerzeugung am Dach der Brunnenanlage Katzelsdorf	28
2.12	Windräder auf Turmdrehkran [89]	29
2.13	Standortvergleich der Windgeschwindigkeitsverteilung: Stockerau und Katzelsdorf	30
2.14	Omniflow: Ansicht von unten	30
2.15	Netzbereitstellungskosten für 2023 in der Netzebene 7 (gemessen) [2]	31
2.16	Leistungsspitzen laut Netzanbieter gegenüber Vollauslastungsgrad	32
2.17	PDCA-Zyklus [100]	33
2.18	Energieplanungsprozess [97]	34
3.1	Rechnungsausschnitt Wiener Netze; mit der freundlichen Erlaubnis zur Veröffentlichung in der vorliegenden Diplomarbeit durch die Firma Sedlak	36
3.2	„Metering-to-go“ der Firma LeP Lehotzki electronic Products GmbH	36
3.3	Messeinrichtung im Bauleitungscontainer	38
3.4	Beispielhafte Gleiserneuerung auf der Baustelle Simmeringer Hauptstraße	38
3.5	Lage der Baustelleneinrichtung für das Gleiserneuerungsvorhaben Landstraßer Gürtel	39
3.6	Stromversorgung während dem Gleiserneuerungsvorhaben	39
3.7	Maschinen- und Geräteinsatz während des Gleiserneuerungsvorhabens	40
3.8	Innen- und Außentemperatur versus Leistungsaufnahme der Klimaanlage in den Kalenderwochen 29, 30 und 31	42

3.9	Lage der Baustelleneinrichtung für das Gleiserneuerungsvorhaben „Simmeringer Hauptstraße“	43
3.10	Stromversorgung des Gleiserneuerungsvorhabens „Simmeringer Hauptstraße“ . .	43
3.11	Maschineneinsatz beim Gleiserneuerungsvorhaben „Simmeringer Hauptstraße“ .	44
3.12	Temperaturverlauf innerhalb des Baustellencontainers	45
3.13	Vergleich der Beleuchtungssituation im Bauleitungscontainer	45
3.14	Vergleich vom Stromverbrauch der beiden Gleiserneuerungsbaustellen	47
3.15	Bauprojekt „Hauptstraße 139, 2391 Kaltenleutgeben“	48
3.16	Stromverteilung für den Baubetrieb	48
3.17	Anschlussverteilerkasten der Baustelleneinrichtung	49
3.18	Problemereiche bei der Installation des Monitorings	50
3.19	Baustelleneinrichtung: Stromverbrauch gegenüber Temperaturverlauf	51
3.20	Baustelleneinrichtung: Auslastungsgrad gegenüber Leistungsspitzen	52
3.21	Baustellenbetrieb: Stromverbrauch gegenüber Temperaturverlauf	55
3.22	Baustellenbetrieb: Auslastungsgrad gegenüber Leistungsspitzen	56
3.23	Gesamtstromverbrauch von Baubetrieb und Turmdrehkran zwischen KW50'22 und KW09'23	57
3.24	Im Baubetrieb: Leistungsbedarfsganglinien je Wochentag in der Kalenderwoche 3	58
3.25	Turmdrehkran: Leistungsbedarfsganglinien je Wochentag in der Kalenderwoche 2	58
3.26	EPEX-Spotpreis [123] vs. Leistungsaufnahme in der Kalenderwoche 3	59
3.27	Baustellen im Vergleich	62
3.28	Normierter Stromverbrauch, siehe Tabelle 6.2	63
3.29	Baustelleneinrichtung im Vergleich	64
3.30	Anschlussdetail	68
3.31	Vergleich von Innenecke [139]	68
3.32	Abdichtungsmaßnahmen bei Containern	69
3.33	Details am Komapaktklimagerät	70
4.1	Klein-LKW als mobile Werkbank	75
6.1	Im Baubetrieb: Gegenüberstellung von Leistungsbedarfsganglinien in den Kalenderwochen 2, 3 und 4	92
6.2	Turmdrehkran: Gegenüberstellung von Leistungsbedarfsganglinien in den Kalenderwochen 2, 3 und 4	93
6.3	EPEX-Spotpreise in den Kalenderwochen 2, 3 und 4	95
6.4	EPEX-Spotpreise vs. Leistungsaufnahme des Baubetriebs	96

Tabellenverzeichnis

2.1	NE7 (gemessen) – Netznutzungs- & Netzverlustentgelt in Cent/kWh ab März 2023 [2]	6
2.2	Netzbereitstellungsgebühr für Netzebene 7 je Netzbereich [2]	11
2.3	Motorleistung gängiger Geräte auf der Baustelle gemäß BGL[1, 47]	13
2.4	Gleichzeitigkeitsfaktor für induktive und ohmsche Verbraucher [1]	14
2.5	PR — Performance Ratio einer Photovoltaikanlage [77]	25
2.6	Erzielbare Volllaststunden [h/Jahr] von Windkraftanlagen [84]	27
2.7	Spezifischer Flächenertrag von Windkraftanlagen je m ² Rotorfläche [kWh/m ²][84]	27
2.8	Stromerzeugung laut Marktgemeinde Tübing am Standort Wasserwerk Katzelsdorf	29
3.1	Geräteliste inklusive elektrischer Leistungsaufnahme laut Herstellerangaben . . .	37
3.2	Stromverbrauch je Abrechnungszeitraum	40
3.3	Stromverbrauch des Bauleitungscontainers inklusive Klimatisierung während der Ausführungsphase je Kalenderwoche	41
3.4	Stromverbrauch des Bauleitungscontainers inklusive Klimatisierung während der Ausführungsphase je Kalenderwoche	42
3.5	Gesamtverbrauch (Baucontainer inkl. Akkugeräte); *keine Rechnung vorhanden .	44
3.6	Stromverbrauch inklusive Klimatisierung des Bauleitungscontainers während der Ausführungsphase je Kalenderwoche	46
3.7	Stromverbrauch der Heizung im Baubüro	52
3.8	Stromverbrauch der Heizung im Lean Container	53
3.9	Stromverbrauch der Beleuchtung im Baubüro	53
3.10	Stromverbrauch der Beleuchtung im Lean Container	54
3.11	Stromverbrauch im Sanitärcontainer	54
3.12	Ausgewählte Bauvorhaben der Firma Sedlak	60
3.13	Ermittlung der Heizgradtage	63
3.14	Vergleich Hauptstraße 139, 2391 Kaltenleutgeben und Gesundheitszentrum Aspern	64
3.15	Wärmedämmvarianten für das Containerdach und die Containerwand [135] . . .	66
3.16	Wärmedämmvarianten für den Containerboden [135]	66
3.17	Außenabmessungen gängiger Containergrößen laut CHV-Katalog [136]	67
3.18	Transmissionswärmeverluste in Abhängigkeit von Containeraufbau, Außenlufttemperatur und Innenraumtemperatur	67
3.19	Energiesparpotential	70
4.1	Kennwerte — Stromverbrauch je Kalenderwoche	71
4.2	Mittlere Leistungsbedarfsspitze in kW je (Teil-)Bereich	72
4.3	Leistungsaufnahme Heizung und Klimaanlage [1]	72
6.1	Die wichtigsten Kältemittel [69]	91
6.2	Gegenüberstellung der Heiz(grad)tage mit den normierten Stromverbräuchen . .	94

Literatur

- [1] R. Schach und J. Otto, *Baustelleneinrichtung: Grundlagen – Planung – Praxishinweise – Vorschriften und Regeln*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2022, ISBN: 978-3-658-36870-8. DOI: 10.1007/978-3-658-36871-5. Adresse: <https://link.springer.com/10.1007/978-3-658-36871-5> (Zugriff am 22.02.2023).
- [2] „Systemnutzungsentgelte-Verordnung 2018 - Bundesrecht konsolidiert, Fassung vom 01.03.2023“. (2023), Adresse: <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=20010107&FassungVom=2023-03-01> (Zugriff am 12.03.2023).
- [3] Wiener Netze GmbH, *Systemnutzungsentgelte für temporäre Anlagen in der NE7 (Ab 1. März 2023)*, 3. Jan. 2023. Adresse: https://www.wienernetze.at/o/document/wienernetze/systemnutzungsentgelte-fur-temporare-anlagen-in-der-netzebene-7_202303_geschutzt (Zugriff am 07.08.2023).
- [4] „DIN 49440-1:2006-01, Zweipolige Steckdosen mit Schutzkontakt, AC 16 A 250 V - Teil 1: Hauptmaße“, Beuth Verlag GmbH. DOI: 10.31030/9617812. Adresse: <https://www.beuth.de/de/-/-/79246918> (Zugriff am 18.04.2023).
- [5] EU Kommission. „In focus: Energy efficiency in buildings“. (2023), Adresse: https://commission.europa.eu/news/focus-energy-efficiency-buildings-2020-02-17_en (Zugriff am 22.02.2023).
- [6] *Energieeffizienz-Reformgesetz 2023*. Adresse: <https://www.parlament.gv.at/gegenstand/XXVII/I/1929?selectedStage=100> (Zugriff am 17.07.2023).
- [7] *Erneuerbare-Wärme-Gesetz*, 14. Juni 2022. Adresse: <https://www.parlament.gv.at/gegenstand/XXVII/ME/212>.
- [8] Österreichs E-Wirtschaft. „Netzausbau in Österreich“. (2023), Adresse: <https://oesterreichsenergie.at/standpunkte/netzausbau-in-oesterreich> (Zugriff am 30.03.2023).
- [9] *Erneuerbaren-Ausbau-Gesetz 2021*. Adresse: <https://www.parlament.gv.at/gegenstand/XXVII/I/733> (Zugriff am 15.08.2023).
- [10] *Energiewirtschaftsgesetz 2005*, 13. Juli 2005. Adresse: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Gesetze/Energie/EnWG.html>.
- [11] *Elektrizitätswirtschafts- und -organisationsgesetz 2010*, 24. Dez. 2010. Adresse: <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=20007045>.
- [12] R. Fellows und A. Liu, *Research methods for construction*, Fourth edition. Chichester, West Sussex, United Kingdom ; Malden, MA, USA: Wiley Blackwell, 2015, 1 S., ISBN: 978-1-118-91573-8 978-1-118-91572-1.
- [13] STRABAG SE, Hrsg., *Geschäftsbericht 2021*, Wien, 29. Apr. 2022, 273 S. Adresse: https://www.strabag.com/databases/internet/_public/content.nsf/web/DE-STRABAG.COM-GB.html (Zugriff am 22.02.2023).

- [14] PORR AG, Hrsg., *PORR Nachhaltigkeitsbericht 2021*, Wien, 19. Apr. 2022, 144 S. Adresse: <https://porr-group.com/investor-relations/reporting/nachhaltigkeitsberichte/> (Zugriff am 22.02.2023).
- [15] Swietelsky AG, Hrsg., *SWIETELSKY Nachhaltigkeitsbericht 2021*, Linz, 30. Nov. 2021, 126 S. Adresse: <https://www.swietelsky.at/news/nachhaltigkeitsbericht-2020-21-erschienen/> (Zugriff am 22.02.2023).
- [16] VOEB. „VOEB-Studie: Green Jobs unter Millennials und Gen Z besonders beliebt“. (), Adresse: <https://www.voeb.at/service/voeb-blog/detail/show-article/voeb-studie-green-jobs-unter-millennials-und-gen-z-besonders-beliebt/> (Zugriff am 24.02.2023).
- [17] Österreichs E-Wirtschaft. „Energienkung: Wenn Strom oder Gas knapp wird“. (), Adresse: <https://oesterreichsenergie.at/aktuelles/neuigkeiten/detailseite/energienkung> (Zugriff am 24.02.2023).
- [18] D. Hamberger. „Interview Barbara Schmidt: Eine Strommangellage ist kein Blackout“, *INDUSTRIEMAGAZIN*. (12. Juli 2022), Adresse: <https://industriemagazin.at/energie/barbara-schmidt-eine-strommangellage-ist-kein-blackout/> (Zugriff am 24.02.2023).
- [19] L. Ungerboeck. „Rationierungen im Strom- und Gasnotfall auch im Bahnverkehr“. (22. Okt. 2022), Adresse: <https://www.derstandard.at/story/2000140208381/rationierungen-im-strom-und-gasnotfall-auch-im-bahnverkehr> (Zugriff am 24.02.2023).
- [20] Austrian Energy Agency, *Strompreisentwicklung in Österreich*, 2023. Adresse: <https://www.energyagency.at/fakten/strompreisindex> (Zugriff am 22.02.2023).
- [21] E-Control. „E-Control: Strompreisänderungen (Archiv)“, Aktuelle Energiepreisänderungen. (5. Juli 2023), Adresse: https://www.e-control.at/documents/1785851/0/Archiv_Strom_Preis%3%A4nderungen_aktuell.pdf/f386e39a-085a-6e2d-bfa9-04fc97490510?t=1570099022952 (Zugriff am 05.08.2023).
- [22] APA. „Wien Energie und EVN erhöhen Preise für Strom und Gas per 1. September 2022“, *DER STANDARD*. (3. Aug. 2022), Adresse: <https://www.derstandard.at/story/2000138003587/wien-energie-und-evn-erhoehen-preise-fuer-strom-und-gas> (Zugriff am 05.08.2023).
- [23] E-Control. „Entwicklung der Großhandelspreise“. (), Adresse: <https://www.e-control.at/industrie/strom/strompreis/grosshandelspreise> (Zugriff am 24.02.2023).
- [24] Österreichs E-Wirtschaft. „Studie: Wie geht es weiter mit den Strompreisen?“ (), Adresse: <https://oesterreichsenergie.at/aktuelles/neuigkeiten/detailseite/strompreisstabilitaet> (Zugriff am 24.02.2023).
- [25] EEX. „Futures“. (2023), Adresse: <https://www.eex.com/en/market-data/power/futures> (Zugriff am 24.02.2023).
- [26] E-Control. „Preiszusammensetzung“. (2023), Adresse: <https://www.e-control.at/industrie/strom/strompreis/preiszusammensetzung> (Zugriff am 24.02.2023).
- [27] E-Control. „Stromnetzentgelte 2022“. (20. Dez. 2022), Adresse: <https://www.e-control.at/konsumenten/stromnetzentgelte-aktuell> (Zugriff am 24.02.2023).
- [28] E-Control. „Vergleiche der Netzentgelte“. (2023), Adresse: <https://www.e-control.at/industrie/strom/strompreis/netzentgelte/vergleiche-der-netzentgelte> (Zugriff am 24.02.2023).

- [29] Ingeborg Zechmann. „Kreislaufwirtschaft im Bausektor“, Kreislaufwirtschaft im Bausektor. (5. Dez. 2021), Adresse: <https://www.umweltbundesamt.at/news210512> (Zugriff am 19.03.2023).
- [30] „Elektrische Baumaschinen im Aufwind“, bauma. (), Adresse: <https://bauma.de/de/entdecken/branchen-insights/null-emission/elektrische-baumaschinen/> (Zugriff am 03.08.2023).
- [31] *Energieeffizienzgesetz 2014*, 1. Jan. 2014. Adresse: <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=20008914>.
- [32] *Vertrag über die Arbeitsweise der Europäischen Union*, 2007. Adresse: <https://eur-lex.europa.eu/DE/legal-content/summary/treaty-on-the-functioning-of-the-european-union.html> (Zugriff am 03.08.2023).
- [33] EU Kommission. „Vertragsverletzungsverfahren“. (15. Juli 2022), Adresse: https://commission.europa.eu/law/law-making-process/applying-eu-law/infringement-procedure_de (Zugriff am 23.03.2023).
- [34] *Bundesvergabegesetz 2018*, 21. Aug. 2018. Adresse: <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=20010295>.
- [35] „KMU als Rückgrat der österreichischen Wirtschaft (PK0694/17.06.2022)“. (17. Juni 2022), Adresse: https://www.parlament.gv.at/aktuelles/pk/jahr_2022/pk0694 (Zugriff am 03.08.2023).
- [36] S. Nisancioglu, „Grundlagen für ein Energiemanagement im Baubetrieb“, Diss., Bergische Universität Wuppertal, Wuppertal, 30. März 2016, 320 S.
- [37] „Thier-Galerie Dortmund“. (), Adresse: <https://www.ece.com/de/shopping-marketplaces/center/thier-galerie-dortmund> (Zugriff am 15.08.2023).
- [38] M. Piatek, *Die CO2-freie Baustelle - Chancen und Herausforderungen*. Wien: Technische Universität Wien, 2021, 112 S.
- [39] ZAMG. „Klimamonitoring“, ZAMG Klimamonitoring. (20. März 2023), Adresse: <https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/klima-aktuell/klimamonitoring/> (Zugriff am 20.03.2023).
- [40] „GeoSphere Austria Data Hub“. (), Adresse: <https://data.hub.geosphere.at/> (Zugriff am 05.08.2023).
- [41] M. A. Budiyanto und T. Shinoda, „The effect of solar radiation on the energy consumption of refrigerated container“, *Case Studies in Thermal Engineering*, Jg. 12, S. 687–695, Sep. 2018, ISSN: 2214157X. DOI: 10.1016/j.csite.2018.09.005. Adresse: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2214157X18301370> (Zugriff am 26.04.2023).
- [42] H. Bernstein, *Elektrotechnik/Elektronik für Maschinenbauer*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018, ISBN: 978-3-658-20837-0 978-3-658-20838-7. DOI: 10.1007/978-3-658-20838-7. Adresse: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-658-20838-7> (Zugriff am 03.08.2023).
- [43] W. Netze. „Temporäre Anlagen“, Wiener Netze. (), Adresse: <https://www.wienernetze.at/tempor%C3%A4re-anlagen> (Zugriff am 07.08.2023).
- [44] Wien Energie. „Baustrom beantragen“, Wien Energie. (), Adresse: <https://www.wienenergie.at/faqs/wie-bekomme-ich-einen-baustrom-bzw-wann-brauche-ich-den/> (Zugriff am 26.07.2023).

- [45] Wiener Netze GmbH. „Stromnetzbedingungen“, Stromnetzbedingungen. (2023), Adresse: <https://www.wienernetze.at/stromnetzbedingungen>.
- [46] „Wirkleistung - Dreieck“. (2023), Adresse: <https://glossar.item24.com/glossarindex/artikel/item/wirkleistung.html> (Zugriff am 26.03.2023).
- [47] H. der Deutschen Bauindustrie und F. der Bauindustrie Österreichs, Hrsg., *BGL Baugeräteliste 2020: technisch-wirtschaftliche Baumaschinendaten*, Vollständig überarbeitete und aktualisierte Neuauflage, Baugeräteliste 2020, Gütersloh: Bauverlag BV GmbH, 2020, 1 S., ISBN: 978-3-7625-3690-1.
- [48] S. Polster und H. Renner, „Berechnung elektrischer Energienetze“, Technische Universität Graz, Graz, 2017, S. 28. Adresse: https://pure.tugraz.at/ws/portalfiles/portal/21042996/Berechnung_elektrischer_Energienetze_WS18_19.pdf (Zugriff am 26.04.2023).
- [49] Ferdinand Walther GmbH. „IPD“, Intelligente Baustromplanung. (24. Apr. 2023), Adresse: <https://www.walther-werke.de/ipd/> (Zugriff am 26.04.2023).
- [50] *Elektroschutzverordnung 2012*, 1. März 2012. Adresse: <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=20007682>.
- [51] *Elektrotechnikgesetz 1992*, 1993. Adresse: <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=10012241>.
- [52] *Elektrotechnikverordnung 2020*, 8. Juli 2020. Adresse: <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=20011222>.
- [53] Austrian Standards, „OVE EN IEC 61439-1: 2021 11 01 - Niederspannungs-Schaltgeräte-kombinationen – Teil 1: Allgemeine Festlegungen ((IEC 61439-1:2020) EN IEC 61439-1:2021) (deutsche Fassung)“, Austrian Standards, Wien, 2021. Adresse: https://shop.austrian-standards.at/action/de/public/details/708268/OVE_EN_IEC_61439-1_2021_11_01 (Zugriff am 19.07.2023).
- [54] Austrian Standards, „OVE EN IEC 61439-2: 2021 11 01 - Niederspannungs-Schaltgeräte-kombinationen – Teil 2: Energie-Schaltgeräte-kombinationen ((IEC 61439-2:2020) EN IEC 61439-2:2021) (englische Fassung)“, Austrian Standards, Wien, 2021. Adresse: https://shop.austrian-standards.at/action/de/public/details/708309/OVE_EN_IEC_61439-2_2021_11_01 (Zugriff am 19.07.2023).
- [55] Austrian Standards, „ÖVE/ÖNORM EN 61439-3: 2013 06 01 - Niederspannungs-Schaltgeräte-kombinationen - Teil 3: Installationsverteiler für die Bedienung durch Laien (DBO) (IEC 61439-3:2012) (deutsche Fassung)“, Austrian Standards, Wien, 2013. Adresse: https://shop.austrian-standards.at/action/de/public/details/473694/OEVE_OENORM_EN_61439-3_2013_06_01;jsessionid=17352331F855ECF47F8675C09B83218E (Zugriff am 19.07.2023).
- [56] Austrian Standards, „OVE E 8101: 2019 01 01 - Elektrische Niederspannungsanlagen“, Austrian Standards, Wien, 2019. Adresse: https://shop.austrian-standards.at/action/de/public/details/647951/OVE_E_8101_2019_01_01 (Zugriff am 19.07.2023).
- [57] Niederösterreichische Netze GmbH, „Technische Ausführungsbestimmungen für den Netzanschluss in Netzebene 6 und 7 der Netz Niederösterreich GmbH“, Maria Enzersdorf, 10. Jan. 2022, S. 46. Adresse: [https://www.netz-noe.at/Download-\(1\)/Verteilernetzbedingungen-Strom/B104_Technische-Ausfuhrungsbestimmungen_Netzebene_.aspx](https://www.netz-noe.at/Download-(1)/Verteilernetzbedingungen-Strom/B104_Technische-Ausfuhrungsbestimmungen_Netzebene_.aspx) (Zugriff am 22.02.2023).

- [58] Wiener Netze GmbH, „Technische Ausführungsbestimmungen für den Netzanschluss an das Niederspannungsverteilernetz der Wiener Netze GmbH“, Wien, Jan. 2020, S. 52. Adresse: <https://partner.wienernetze.at/documents/4163803/7620039/TAEV+2020.pdf/c509d77f-44ba-b7cb-c4dd-0066e09738ac?t=1651137754533> (Zugriff am 22.02.2023).
- [59] *ArbeitnehmerInnenschutzgesetz 1995*, 1. Jan. 1995. Adresse: <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=10008910> (Zugriff am 18.07.2023).
- [60] Österreichischer Verband für Elektrotechnik, „ÖVE/ÖNORM E 8001-4-704:2014-05-01 - OVE - Österreichischer Verband für Elektrotechnik“, Österreichischer Verband für Elektrotechnik, Wien, 19. Juli 2023. Adresse: <https://shop.ove.at/de/product/-ve-norm-e-8001-4-704-2014-05-01> (Zugriff am 19.07.2023).
- [61] „Leitungsroller für Bau- und Montagestellen“, bgetem.de - BG ETEM. (), Adresse: <https://www.bgetem.de/arbeitssicherheit-gesundheitsschutz/pruefen-zertifizieren/pruef-und-zertifizierungsstelle-elektrotechnik/pruefgrundsaeetze/GS-ET-35/view> (Zugriff am 07.08.2023).
- [62] *Arbeitsstättenverordnung 1998*, 14. Okt. 1998. Adresse: <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=10009098>.
- [63] *Technische Beschreibung für Containex Classic Line: Büro-, Sanitär-, und Verbindungscontainer*, Juli 2022. Adresse: https://catalog.containex.com/catalog/CONTAINEX/de/catalogs/Technische-Beschreibung-Sanitaer/pdf/Technische-Beschreibung-Sanitaer.pdf?_gl=1*1im58ze*_ga*MTE5MjY2MTU1Ny4xNjc5NTAxOTc5*_ga_0B2MD915K6*MTY4Mjg4MDQyNy4xMi4xLjE2ODI4ODAxNTUuMC4wLjA. (Zugriff am 30.04.2023).
- [64] T. Laasch und E. Laasch, *Haustechnik: Grundlagen - Planung - Ausführung*, 13. Auflage. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013, ISBN: 978-3-8348-1260-5. DOI: 10.1007/978-3-8348-9900-2. Adresse: <https://link.springer.com/10.1007/978-3-8348-9900-2> (Zugriff am 30.04.2023).
- [65] Austrian Standards, „OVE EN 60675 Elektrische Haushalt-Direktheizgeräte - Prüfverfahren zur Bestimmung der Gebrauchseigenschaft (IEC 60675:1994 + A1:1998 + A2:2018) (deutsche Fassung)“, OVE, Wien, 1. Dez. 2020, S. 40. Adresse: https://shop.austrianstandards.at/action/de/public/details/686670/OVE_EN_60675_2020_12_01.
- [66] *Richtlinien zur Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung energieverbrauchsrelevanter Produkte*, 21. Okt. 2009. Adresse: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32009L0125>.
- [67] *Verordnung Nr. 517/2014 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. April 2014 über fluorierte Treibhausgase*, 1. Jan. 2015. Adresse: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014R0517> (Zugriff am 07.08.2023).
- [68] „Montrealer protokoll über stoffe, die zu einem abbau der ozonschicht führen“. Doc ID: 4413653 Doc Sector: other Doc Title: Montreal Protocol on substances that deplete the ozone layer Doc Type: other Usr_lan: en. (12. Dez. 2019), Adresse: <https://eur-lex.europa.eu/DE/legal-content/summary/montreal-protocol-on-substances-that-deplete-the-ozone-layer.html> (Zugriff am 07.08.2023).
- [69] S. Sobotta, *Praxis Wärmepumpe: Technik, Planung, Installation*. Berlin: BEUTH, 2022, 364 S., ISBN: 978-3-410-30978-9. Adresse: <https://www.beuth.de/de/publikation/praxis-waermepumpe/348582215>.

- [70] S. N. Jendrossek, L. A. Jurk, K. Remmers, Y. E. Cetin, W. Sunder, M. Kriegel und P. Gastmeier, „The influence of ventilation measures on the airborne risk of infection in schools: A scoping review“, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, Jg. 20, Nr. 4, S. 3746, Jan. 2023, ISSN: 1660-4601. DOI: 10.3390/ijerph20043746. Adresse: <https://www.mdpi.com/1660-4601/20/4/3746> (Zugriff am 01.05.2023).
- [71] M. D. K, G. P. M und W. M. D, „Risk of sick leave associated with outdoor air supply rate, humidification, and occupant complaints“, 1. Jan. 2000. Adresse: <https://www.aivc.org/resource/risk-sick-leave-associated-outdoor-air-supply-rate-humidification-and-occupant-complaints> (Zugriff am 01.05.2023).
- [72] J. P. E. Petermann, *Erfolgreiches Energiemanagement im Betrieb: Lehrbuch für Energiemanager und Energiefachwirte*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018, ISBN: 978-3-658-22479-0 978-3-658-22480-6. DOI: 10.1007/978-3-658-22480-6. Adresse: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-658-22480-6> (Zugriff am 02.08.2023).
- [73] *Verordnung zur Durchführung der Richtlinie 2005/32/EG des Europäischen Parlaments und des Rates im Hinblick auf die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Haushaltslampen mit ungebündeltem Licht*, 18. März 2009. Adresse: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:076:0003:0016:de:PDF> (Zugriff am 02.08.2023).
- [74] P. Becker, „Rede von Dr. Paul Becker, Vizepräsident des Deutschen Wetterdienste“, Pressekonferenz, Pressekonferenz, Klimapressekonferenz des Deutschen Wetterdienstes (DWD), Berlin, 6. März 2018. Adresse: https://www.dwd.de/DE/presse/pressekonferenzen/DE/2018/PK_06_03_2018/rede_becker.pdf?__blob=publicationFile&v=2 (Zugriff am 15.07.2023).
- [75] „Innovative Energietechnologien in Österreich Marktentwicklung 2022“, Berichte aus Energie- und Umweltforschung, Wien, Marktbericht 36a/2023, Mai 2023, S. 320. Adresse: <https://pvaustria.at/wp-content/uploads/Marktstatistik-2022.pdf>.
- [76] V. Crastan und M. Höckel, „Photovoltaik“, in *Elektrische Energieversorgung 2*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2022, S. 453–505. DOI: 10.1007/978-3-662-65105-6_8. Adresse: https://link.springer.com/10.1007/978-3-662-65105-6_8 (Zugriff am 17.07.2023).
- [77] V. Quaschnig, *Regenerative Energiesysteme: Technologie, Berechnung, Klimaschutz*, 11., aktualisierte Auflage. München: Hanser, 2022, 472 S., ISBN: 978-3-446-47163-4.
- [78] Solargis. „SOLARGIS“, PV-Karte. (17. Juli 2023), Adresse: <https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/austria> (Zugriff am 17.07.2023).
- [79] Faber Infrastructure GmbH. „Faber Solar Frame“, Faber Solar Frame. (2023), Adresse: <https://www.faber-infrastructure.com/index.php/solarframe-die-mobile-solaranlage/> (Zugriff am 22.02.2023).
- [80] M. Obertimpfler. „Nachhaltiger Strom mit PV-Anlage: Saubere Energie für Baustelle Allerheiligenhof“, MeinBezirk.at. Section: Lokales. (10. Juli 2023), Adresse: https://www.meinbezirk.at/innsbruck/c-lokales/saubere-energie-fuer-baustelle-allerheiligenhof_a6155128 (Zugriff am 17.07.2023).
- [81] STRABAG SE. „STRABAG Baustelle mit eigenem Solarstrom“. Citation Key: Baustelle mit eigenem Solarstrom. (22. Sep. 2022), Adresse: <https://www.strabag.at/aktuelles/2022-09/baustelle-mit-eigenem-solarstrom> (Zugriff am 22.02.2023).

- [82] Austrian Standards, „ÖVE/ÖNORM EN 61400-2:2013, Windenergieanlagen - Teil 2: Anforderungen für kleine Windenergieanlagen“, Austrian Standards, Wien, 1. Juni 2015, S. 138. Adresse: https://shop.austrian-standards.at/action/de/public/details/541761/OEVE_OENORM_EN_61400-2_2015_06_01;jsessionid=D4787C7FB9E4ED7CD5F15BA48558A4C1 (Zugriff am 13. 07. 2023).
- [83] Kurt Leohartsberger und Kathrin Renz, „Kleinwindkraftreport - Österreich 2015“, FH Technikum Wien - Institut für Erneuerbare Energie, Report. Adresse: https://nachhaltigwirtschaften.at/resources/iea_pdf/iea-wind-task-27_kleinwindkraftreport-oesterreich-2015.pdf (Zugriff am 13. 07. 2023).
- [84] Daniel Reiterer, „Kleinwindkraft - Ein Leitfaden zur Planung und Umsetzung“, Klima- und Energiefonds, Wien, 2. Auflage, 2014. Adresse: https://www.oegut.at/downloads/pdf/eb-kleinwindkraft_anhang5.pdf.
- [85] „Windkraftanlage-Tulbing“, Windkraftanlage-Tulbing. (5. Mai 2021), Adresse: <https://m.noen.at/tulln/innovativ-tulbing-hat-energie-vorreiterrolle-tulbing-kleinwindkraftanlagen-print-272606722> (Zugriff am 07. 07. 2023).
- [86] ZAMG. „Windgefährdung und Windenergiepotential“, Windgefährdung und Windenergiepotential. (12. Juli 2023), Adresse: <http://wmsx.zamg.ac.at/beauvort/index.php>.
- [87] A. Krenn und M. Biberacher. „Windatlas Österreich“, Windatlas Österreich. (), Adresse: <https://www.windatlas.at/kontakt.html> (Zugriff am 14. 07. 2023).
- [88] Q. Wang, J. Wang, Y. Hou, R. Yuan, K. Luo und J. Fan, „Micrositing of roof mounting wind turbine in urban environment: CFD simulations and lidar measurements“, *Renewable Energy*, Jg. 115, S. 1118–1133, Jan. 2018, ISSN: 09601481. DOI: 10.1016/j.renene.2017.09.045. Adresse: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960148117309060> (Zugriff am 14. 07. 2023).
- [89] „Windenergie auf dem Baukran“, Windenergie auf dem Baukran. (7. Juli 2023), Adresse: <https://www.mowea.world/de/sueba/>.
- [90] M. Stickland, T. Scanlon, S. Fabre, A. Oldroyd und D. Kindler, „Measurement and simulation of the flow field around a triangular lattice meteorological mast“, *Energy and Power Engineering*, Jg. 5, Nr. 10, Okt. 2013, Num Pages: 6 Number: 10, ISSN: 1949-243X. Adresse: <https://strathprints.strath.ac.uk/43674/> (Zugriff am 12. 07. 2023).
- [91] SÜBA. „SÜBA Windkraft“. (11. Juli 2023), Adresse: <https://www.sueba.at/de/news/suba-ag-baut-vorreiterrolle-weiter-aus-16-windturbinen-versorgen-baustelle-mit-strom-2796>.
- [92] J. Amme, J. Benesch, M. Buddeke, J. Thorbecke, J. Twele und D. Willnauer, „Empfehlungen zum Einsatz kleiner Windenergieanlagen im urbanen Raum“, Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin, Berlin, Leitfaden, Jan. 2013, S. 86. Adresse: http://www.aee-now.at/cms/fileadmin/downloads/allgemein/Kleinwind/Kleinwind_Handlungsempfehlungen_HTW-Berlin.pdf (Zugriff am 15. 07. 2023).
- [93] D. Hailes, „Warwick Wind Trials Final Report“, Encraft, Warwickshire, 2009, S. 64. Adresse: <https://www.zwiebelfam.nl/wp-content/uploads/2022/11/Warwick-Wind-Trials-Report.pdf> (Zugriff am 17. 07. 2023).
- [94] Omniflow. „Smart City Solution“, Omniflow. (11. Juli 2023), Adresse: <https://www.omniflow.io/>.
- [95] SFC Energy AG. „H2Genset - mobile Energieversorgung mit Wasserstoff“, H2 Genset. (2023), Adresse: <https://www.h2-genset.com/> (Zugriff am 31. 03. 2023).

- [96] „Wasserstoff-Aggregat: Feldtest im Autobahnbau erfolgreich bestanden“, Bredenoord. (), Adresse: <https://www.bredenoord.com/de/projekte/wasserstoff-aggregat-erster-feldtest-autobahnbau-bestanden/> (Zugriff am 15.08.2023).
- [97] „DIN EN ISO 50001:2018-12, Energiemanagementsysteme - Anforderungen mit Anleitung zur Anwendung (ISO 50001:2018); Deutsche Fassung EN ISO 50001:2018“, Beuth Verlag GmbH, 2018. DOI: 10.31030/2852891. Adresse: <https://www.beuth.de/de/-/-/289820323> (Zugriff am 22.02.2023).
- [98] „DIN EN ISO 14001:2015-11, Umweltmanagementsysteme - Anforderungen mit Anleitung zur Anwendung (ISO 14001:2015); Deutsche und Englische Fassung EN ISO 14001:2015“, Beuth Verlag GmbH, 2015. DOI: 10.31030/2330509. Adresse: <https://www.beuth.de/de/-/-/236721041> (Zugriff am 18.04.2023).
- [99] M. Geilhausen, *Kompakter Leitfaden für Energiemanager: Energiemanagementsysteme nach DIN EN ISO 50001:2018*, 2. Auflage. Dettenhausen: Springer Vieweg, 2020, 59 S., ISBN: 978-3-658-28853-2 (eBook).
- [100] J. Kurz. „Der PDCA-Zyklus – Wertschöpfungsprozesse im Fokus“. (2023), Adresse: <https://www.buero-kaizen.de/pdca-zyklus/> (Zugriff am 28.03.2023).
- [101] „DIN EN 16247-1:2022-11, Energieaudits - Teil 1: Allgemeine Anforderungen; Deutsche Fassung EN 16247-1:2022“, Beuth Verlag GmbH, 2022. DOI: 10.31030/3339938. Adresse: <https://www.beuth.de/de/-/-/352350790> (Zugriff am 18.04.2023).
- [102] BMK. „Förderung für Energiemanagement in KMUs“. (2022), Adresse: https://www.bmk.gv.at/themen/klima_umwelt/energiewende/energieeffizienz/kmu_foerderung.html (Zugriff am 30.03.2023).
- [103] BMF. „Transparenzportal“. (2023), Adresse: <https://transparenzportal.gv.at/tdb/tp/suche?execution=e3s2> (Zugriff am 30.03.2023).
- [104] LeP. „Metering to Go“. (2023), Adresse: <https://commu.shop/p/metering-to-go-promonat> (Zugriff am 28.03.2023).
- [105] „LeP GmbH“. (), Adresse: <https://www.lepcontrols.com/index.html> (Zugriff am 08.08.2023).
- [106] R. P. Ltd. „Raspberry pi“, Raspberry Pi. (), Adresse: <https://www.raspberrypi.com/> (Zugriff am 08.08.2023).
- [107] „Shelly Cloud“, Shelly Cloud. (), Adresse: <https://www.shelly.com/de> (Zugriff am 08.08.2023).
- [108] Home Assistant. „Home assistant“, Home Assistant. (2023), Adresse: <https://www.home-assistant.io/> (Zugriff am 16.03.2023).
- [109] „InfluxDB“, InfluxData. (26. Juli 2023), Adresse: <https://www.influxdata.com/influxdb/> (Zugriff am 08.08.2023).
- [110] „Grafana“, Grafana Labs. (), Adresse: <https://grafana.com/> (Zugriff am 08.08.2023).
- [111] W. Linien. „Wiener Linien starten Test für neues Grüngleis und CO2-optimierte Baustelle“, Wiener Linien. (), Adresse: <http://www.wienerlinien.at/wiener-linien-starten-test-f%C3%BCr-neues-gr%C3%BCngleis-und-co2-optimierte-baustelle> (Zugriff am 09.08.2023).
- [112] „CO2 optimierte Baustelle für die Wiener Linien“, Innovationspartnerschaft. (), Adresse: <https://www.ioeb-innovationsplattform.at/challenges/detail/co2-optimierte-baustelle-fuer-die-wiener-linien/> (Zugriff am 09.08.2023).

- [113] „MobilHybrid - die autarke, mobile netzunabhängige Stromerzeugung“, MobilHybrid. (), Adresse: <https://mobilhybrid.de/> (Zugriff am 09.08.2023).
- [114] „Tragbare energie für profis - instagrid“. (), Adresse: https://instagrid.co/de?gad=1&gclid=EAIaIQobChMIxaSEmZTPgAMVWPV3Ch1fLwljEAAAYASAAEgJkF_D_BwE (Zugriff am 09.08.2023).
- [115] „Takeuchi TB260E kaufen & mieten | Huppenkothen GmbH“, Huppenkothen Baumaschinen. (), Adresse: <https://www.huppenkothen.com/kaufen-und-mieten/bagger/elektrobagger/tb260e> (Zugriff am 09.08.2023).
- [116] „Radlader WL20e“. (), Adresse: <https://www.wackerneuson.de/products/radlader-wl20e> (Zugriff am 09.08.2023).
- [117] E-Control. „Stromverbrauch - Einpersonenhaushalt“, E-Control. (), Adresse: <https://www.e-control.at/newsletter-5/2022> (Zugriff am 08.10.2023).
- [118] BAUHAUS. „Lavida LED-Panel“. (2023), Adresse: <https://www.bauhaus.at/led-panels/lavida-led-panel-ip44/p/26484868#product-data> (Zugriff am 31.03.2023).
- [119] gourock. „Effective solar panel protection starts with custom netting solutions“, Custom Netting and Nets by Gourock.com. (31. Jan. 2023), Adresse: <https://www.gourock.com/blog/solar-panel-netting/> (Zugriff am 15.08.2023).
- [120] Sedlak. „KALEU 139“. (2023), Adresse: <https://www.sedlak.co.at/Kaltenleutgeben> (Zugriff am 10.03.2023).
- [121] „POTAIN MDT 219 J10 | Obendreherkrane“. (), Adresse: <https://www.manitowoc.com/de/potain/obendreherkrane/mdt-219-j10> (Zugriff am 10.08.2023).
- [122] „EHT 150 - Austria Email AG“. (), Adresse: <https://www.austria-email.at/produkte/elektrospeicher/haengespeicher/objekt-haengespeicher-eh/eh-150/> (Zugriff am 15.08.2023).
- [123] smartENERGY. „smartENERGY“. (), Adresse: <https://www.smartenergy.at/smartercontrol> (Zugriff am 01.09.2023).
- [124] A. Brüggemann, „KfW-Befragung zu den Hemmnissen und Erfolgsfaktoren von Energieeffizienz in Unternehmen“, KfW Bankengruppe, Frankfurt am Main, Dez. 2005, S. 47. Adresse: <https://www.kfw.de/PDF/Download-Center/Konzernthemen/Research/PDF-Dokumente-Sonderpublikationen/Sonderpublikation.pdf> (Zugriff am 22.07.2023).
- [125] M. Schwartz, „Energiekosten im Mittelstand betragen vor dem Ukraine-Krieg durchschnittlich 5,8% vom Umsatz“, *KfW Research*, ISSN: 2195-1403. Adresse: <https://www.kfw.de/PDF/Download-Center/Konzernthemen/Research/PDF-Dokumente-Volkswirtschaft-Kompakt/One-Pager-2022/VK-Nr.-228-Dezember-2022-Energiekosten.pdf> (Zugriff am 22.07.2023).
- [126] G. Wolf. „UniCredit Bank Austria Analyse: Gestiegene Energiekosten belasten die heimische Wirtschaft stark“. (28. Okt. 2022), Adresse: https://www.bankaustria.at/ueber-uns-presse-presseinformationen_63746.jsp (Zugriff am 22.07.2023).
- [127] D. W. S. GmbH. „SEDLAK-Homepage“, DI Wilhelm Sedlak GmbH. Publisher: MASSIVE ART WebServices GmbH. (), Adresse: <https://www.sedlak.co.at/> (Zugriff am 22.07.2023).
- [128] M. Kaltenleutgeben. „Folge 4 - Der Erste Weltkrieg“, Kaltenleutgeben. (), Adresse: https://www.kaltenleutgeben.gv.at/Kltg_von_damals_bis_heute_4 (Zugriff am 08.08.2023).

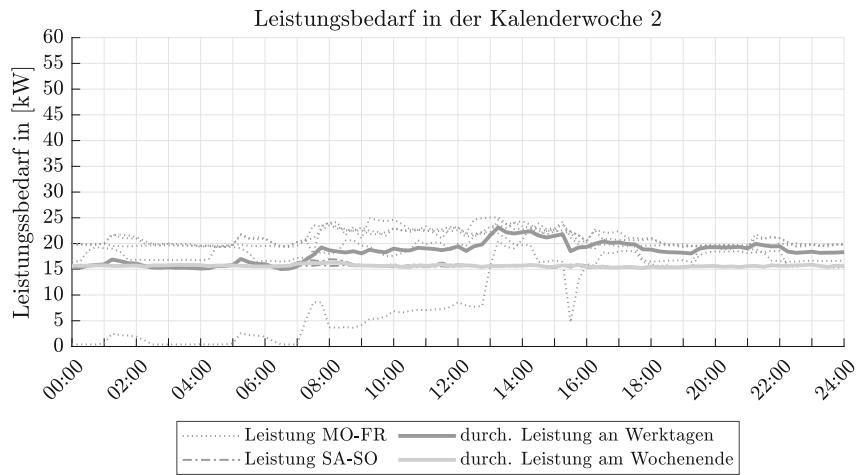
- [129] *Klimahandbuch der österreichischen Bodenschätzung. 1: Klimatographie: Klimareferat der österreichischen Bodenschätzung* (Mitteilungen der Österreichischen Bodenkundlichen Gesellschaft 58). Innsbruck: Wagner, 1999, 196 S., ISBN: 978-3-7030-0341-7.
- [130] D. Vujicic, „Das Verhältnis der Nutzungsfläche zu Bruttogrundfläche und die Ableitung von durchschnittlichen Bandbreiten bei Büro-, Verwaltungs- und bei Wohngebäuden“, Accepted: 2020-08-14T07:13:31Z Journal Abbreviation: Relation of usable area (NUF) to gross floor area (BGF), Thesis, Wien, 2020. DOI: 10.34726/hss.2020.81102. Adresse: <https://repositum.tuwien.at/handle/20.500.12708/15291> (Zugriff am 30.08.2023).
- [131] W. Netze. „Kundenschnittstelle“, Wiener Netze. (), Adresse: <https://www.wienernetze.at/kundenschnittstelle2> (Zugriff am 08.10.2023).
- [132] „Verteiler für Subunternehmer - MERZ GmbH (de)“. (), Adresse: https://www.merz-elektro.de/de/Produkte/Mobile-Stromverteiler/Baustromverteiler-Details/items/Verteiler_f%C3%BCr_Subunternehmer_Neu.html (Zugriff am 08.08.2023).
- [133] „Die Sozialtechnik Setsuden: Wie Japan nach Fukushima mit dem Verdacht eines Common Mode Failures umgegangen und über den Sommer 2011 gekommen ist“,
- [134] A. Standards. „ÖNORM H 7500-1: 2015 02 15 - Heizungssysteme in Gebäuden - Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast für Gebäude mit einem mittleren U -Wert $\geq 0,5$ W/(m² · K) - Nationale Ergänzung zu ÖNORM EN 12831“. (2015), Adresse: https://shop.austrian-standards.at/action/de/public/details/535721/OENORM_H_7500-1_2015_02_15 (Zugriff am 10.08.2023).
- [135] Containex. „Containex“, CONTAINEX. (), Adresse: <https://www.containex.com/at/de> (Zugriff am 12.08.2023).
- [136] CHV. „CHV“, CHV. (), Adresse: <https://chv.at/> (Zugriff am 12.08.2023).
- [137] Mobilbox. „Mobilbox“, MobilBox. (), Adresse: <https://www.mobilbox.at/> (Zugriff am 12.08.2023).
- [138] ISO, „ISO 668:2020-01, frachtcontainer - klassifizierung, abmessungen und gesamtgewichte“, S. 17. Adresse: <https://www.beuth.de/de/norm/iso-668/319051568> (Zugriff am 12.08.2023).
- [139] A. M. Tanyer, A. Tavukcuoglu und M. Bekboliev, „Assessing the airtightness performance of container houses in relation to its effect on energy efficiency“, *Building and Environment*, Jg. 134, S. 59–73, 15. Apr. 2018, ISSN: 0360-1323. DOI: 10.1016/j.buildenv.2018.02.026. Adresse: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132318300982> (Zugriff am 24.03.2023).
- [140] Limodor. „Dezentrale Wohnraumlüftung“. (2023), Adresse: <https://www.limodor.com/lueftungssysteme/dezentrale-wohnraumlueftung> (Zugriff am 25.03.2023).
- [141] L. Filina-Dawidowicz und S. Filin, „Innovative energy-saving technology in refrigerated containers transportation“, *Energy Efficiency*, Jg. 12, Nr. 5, S. 1151–1165, 1. Juni 2019, ISSN: 1570-6478. DOI: 10.1007/s12053-018-9729-2. Adresse: <https://doi.org/10.1007/s12053-018-9729-2> (Zugriff am 24.03.2023).
- [142] „FIRE+ICE Monoblock-Luftwärmepumpe - Wärmepumpe - ETHERMA“. (), Adresse: <https://www.etherma.com/de/waermepumpe/fireice-waermepumpe> (Zugriff am 12.08.2023).

- [143] T. Shinoda, M. A. Budiyo und Y. Sugimura, „Analysis of energy conservation by roof shade installations in refrigerated container areas“, *Journal of Cleaner Production*, Jg. 377, S. 134 402, 1. Dez. 2022, ISSN: 0959-6526. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.134402. Adresse: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652622039749> (Zugriff am 24. 03. 2023).
- [144] HomePowerSolutions. „Solar-Wasserstoff-System für Zuhause“, Home Power Solutions. (2023), Adresse: <https://www.homepowersolutions.de/produkt/> (Zugriff am 31. 03. 2023).
- [145] N. Meyer, *Star Trek VI: Das unentdeckte Land*, 1991. (Zugriff am 21. 08. 2023).

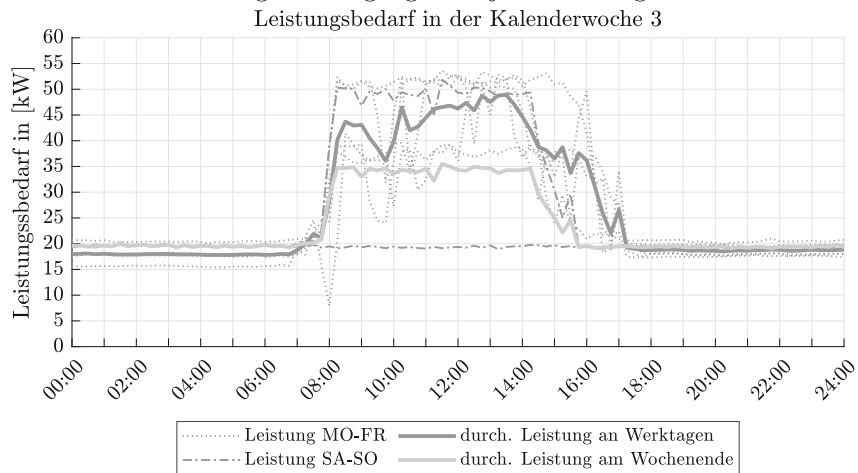
6.1 Anhang

Kältemittel	Kältemitteltyp	Stoffart	Zusammensetzung	Siedetemperatur °C	GWP kg	Flammbarkeit	Giftigkeit	Sicherheitsgruppe	Ersatzstoff für
R 32	H-FCKW	Einstoff	CHClF ₂	-41,0	1500	keine	gering	A1	[-]
R 134a	H-FKW	Einstoff	CFF ₃ CHF	-36,0	1300	keine	gering	A1	R 410a
R 32	H-FKW	Einstoff	CHF ₂ FF ₂ , Difluormethan	-51,7	675	niedrig	gering	A2L	[-]
R 717	natürliches Kältemittel	Einstoff	NHF ₃ (Ammoniak)	-33,0	0	niedrig	größere	B2	[-]
R 744	natürliches Kältemittel	Einstoff	CO ₂	-78,0	1	keine	gering	A1	[-]
R 290	KW	Einstoff	CF ₃ H ₈ (Propan)	-42,0	3	hoch	gering	A3	[-]
R 404a	H-FKW	Gemisch Zeotrop	R 143a/125/134a	-47,0	3260	keine	gering	A1	[-]
R 407c	H-FKW	Gemisch Zeotrop	R32/R 125/ 134a	-44,0	1525	keine	gering	A1	[-]
R 410a	H-FKW	Gemisch Azeotro	R32/125	-51,0	1725	keine	gering	A1	[-]
R 452b	HFO	Gemisch Zeotrop	R32/ R125/ R1234yf	-51,0	698/676	niedrig	gering	A2L	R 410a
R 454b	HFO	Gemisch Zeotrop	R32/R1234yf	-51	466/467,0	niedrig	gering	A2L	R 410a
R 454c	HFO	Gemisch Zeotrop	R32/R 1234yf	-45,9	148/146	niedrig	gering	A2L	R 404a und R 407c
R 1234yf	HFO	Einstoff	CF ₃ H ₂ F ₄ -2,3,3,3-Tetrafluorpropen	-30,0	4,4	niedrig	gering	A2L	R134a
R 1234ze	HFO	Einstoff	1,3,3,3-Tetrafluor-1-Propen	-19,0	6	niedrig	gering	A2L	R134a
L 41-2		Gemisch	R 134a/R1234ze		500	niedrig	gering	A2L	R410a

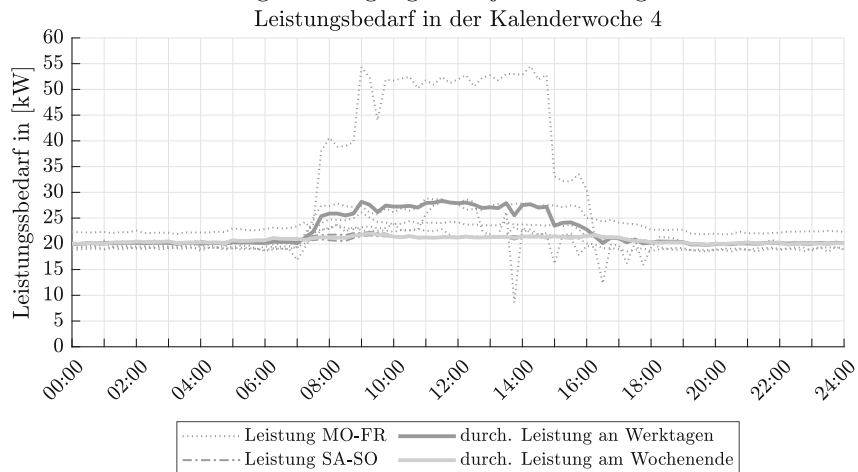
Tab. 6.1: Die wichtigsten Kältemittel [69]



(a) Im Baubetrieb: Leistungsbedarfsganglinien je Wochentag in der Kalenderwoche 2

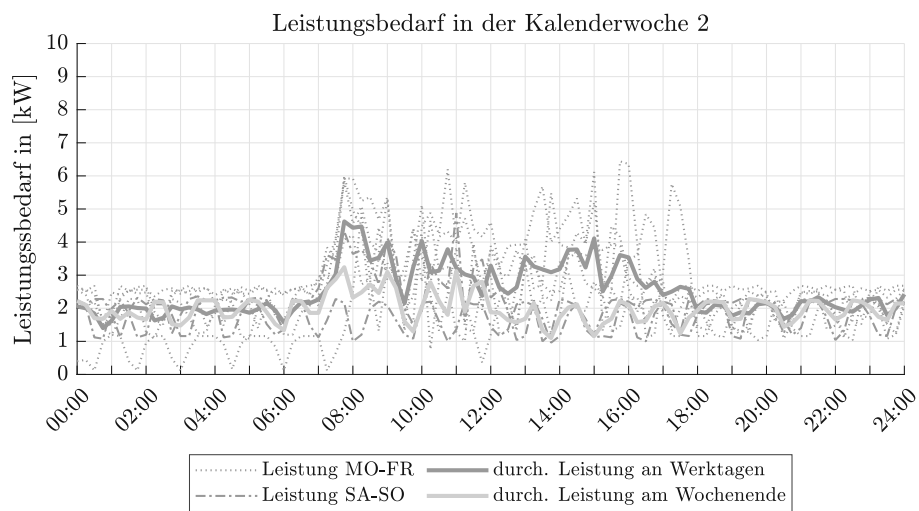


(b) Im Baubetrieb: Leistungsbedarfsganglinien je Wochentag in der Kalenderwoche 3

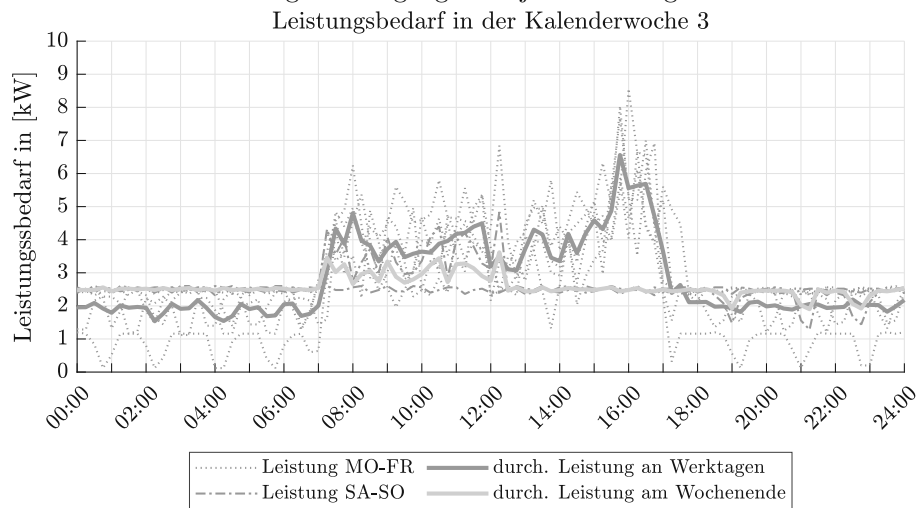


(c) Im Baubetrieb: Leistungsbedarfsganglinien je Wochentag in der Kalenderwoche 4

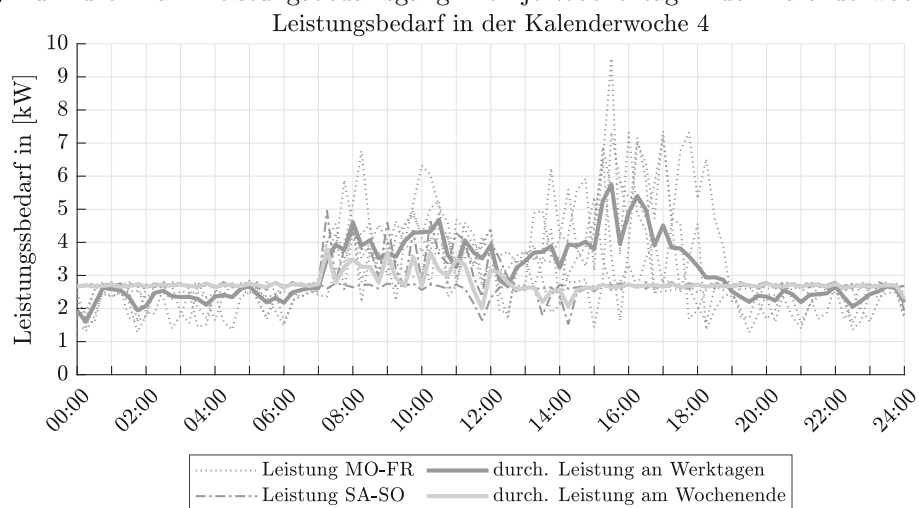
Abb. 6.1: Im Baubetrieb: Gegenüberstellung von Leistungsbedarfsganglinien in den Kalenderwochen 2, 3 und 4



(a) Turmdrehkran: Leistungsbedarfsganglinien je Wochentag in der Kalenderwoche 2



(b) Turmdrehkran: Leistungsbedarfsganglinien je Wochentag in der Kalenderwoche 2



(c) Turmdrehkran: Leistungsbedarfsganglinien je Wochentag in der Kalenderwoche 2

Abb. 6.2: Turmdrehkran: Gegenüberstellung von Leistungsbedarfsganglinien in den Kalenderwochen 2, 3 und 4

KW	Durchschnitts- temperatur	Heiz- tage	Heiz- gradtage	Bau- büro	Bau- büro _{norm}	Lean	Lean _{norm}	Sanitär- heizung	Sanitär- heizung _{norm}	Polier- toiletten- heizung	Polier- toiletten- heizung _{norm}
	°C	T	[-]	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh
2	7,3	7	88,8	176,92	174,49	115,46	113,87	96,29	94,97	39,21	38,67
3	6,7	7	93,2	377,97	355,18	226,18	212,54	167,26	157,17	62,33	58,57
4	2,4	7	123	415,09	295,56	185,08	131,78	158,18	112,63	75,46	53,73
5	0,9	7	133,6	399,04	261,59	101,96	66,84	250,2	164,02	64,60	42,35
6	3,4	7	116	445,48	336,34	273,69	206,64	199,04	150,28	66,01	49,84
7	0,2	7	138,5	276,92	175,11	132,99	84,10	138,92	87,85	29,11	18,41
8	7,3	6	83,5	136,85	143,54	58,90	61,78	67,23	70,52	13,30	13,95
9	8,9	5	61,7	250,8	356,00	190,29	270,11	123,27	174,98	22,66	32,16
10	3,9	7	112,5	173,54	135,10	120,26	93,62	98,11	76,38	25,56	19,90
11	8,20	7	82,6	218,63	231,81	85,70	90,85	137,66	145,96	25,57	27,11
12	13,56	1	8,5	87,04	896,82	38,37	395,35	34,45	354,96	17,34	178,66
13	8,67	5	65,7	192,6	256,74	126,99	169,28	138,86	185,10	30,79	41,04
14	5,03	7	104,8	199,79	166,96	144,17	120,48	157,91	131,96	39,7	33,18
15	8,13	7	83,1	168,98	178,09	80,03	84,34	95,92	101,09	8,88	9,36
16	12,89	2	18,2	98,68	474,86	64,92	312,40	113,82	547,71	0,00	0,00

Tab. 6.2: Gegenüberstellung der Heiz(grad)tage mit den normierten Stromverbräuchen

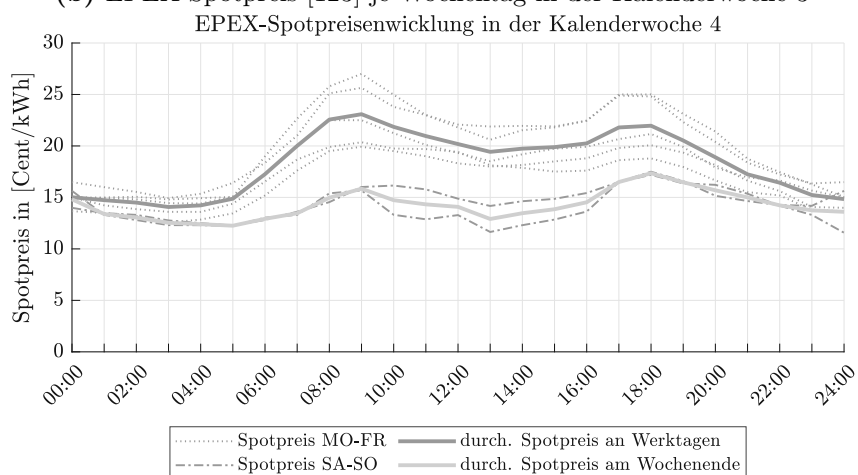
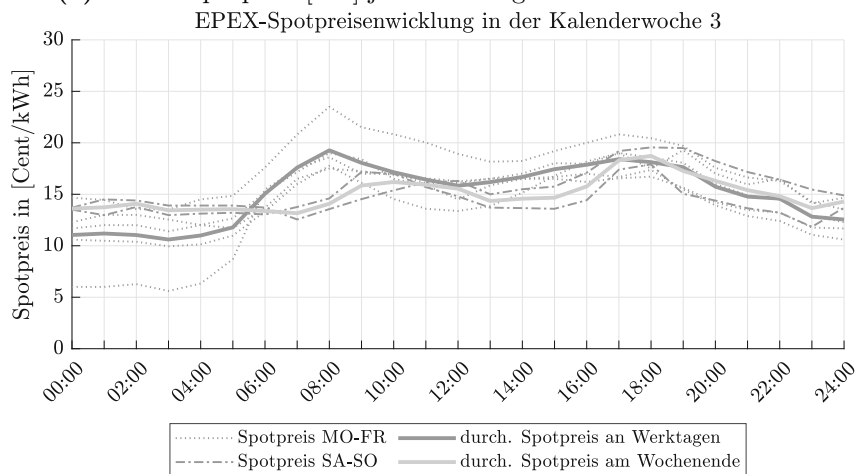
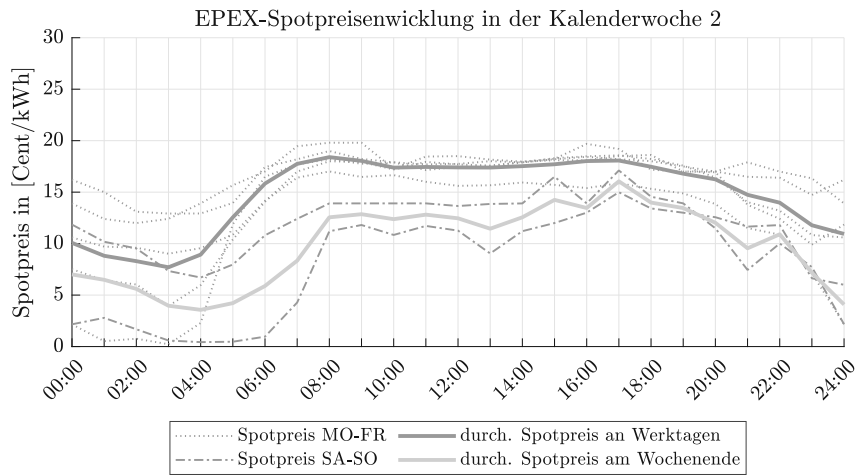
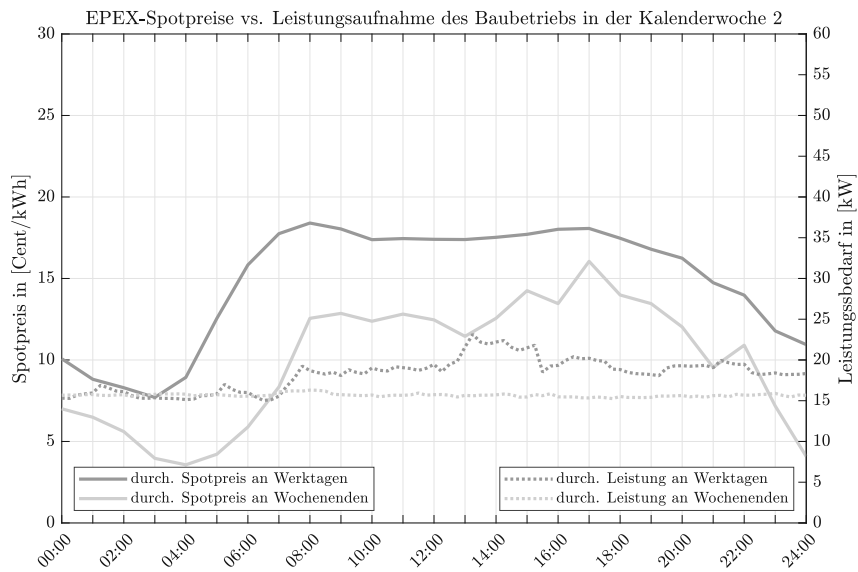
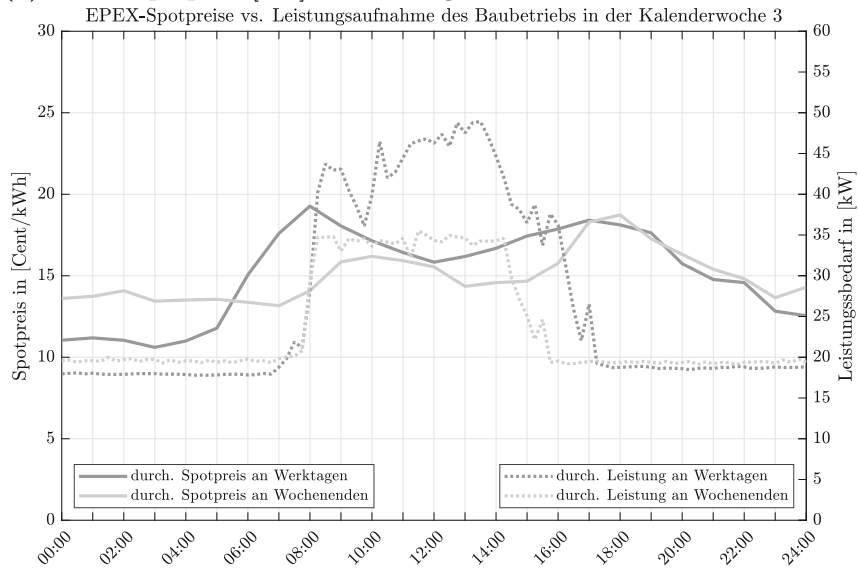


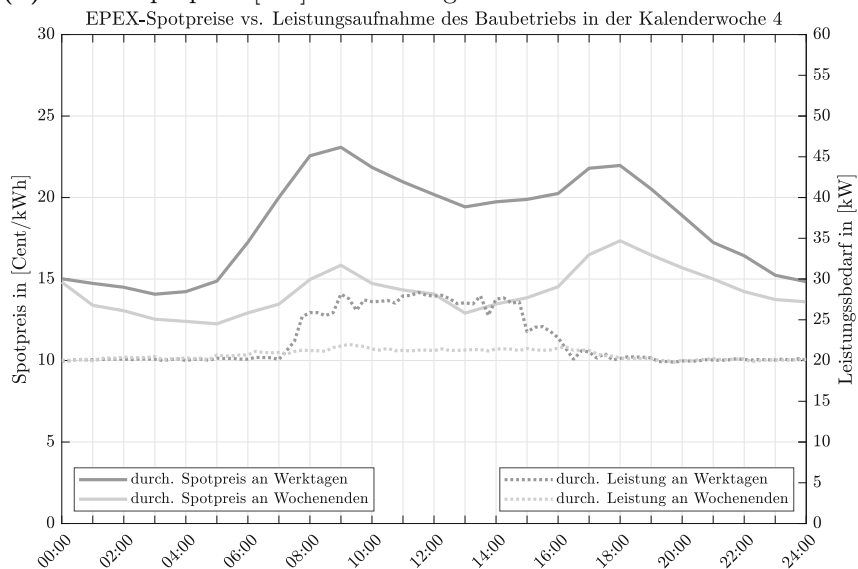
Abb. 6.3: EPEX-Spotpreise in den Kalenderwochen 2, 3 und 4



(a) EPEX-Spotpreis [123] vs. Leistungsaufnahme in der Kalenderwoche 2



(b) EPEX-Spotpreis [123] vs. Leistungsaufnahme in der Kalenderwoche 3



(c) EPEX-Spotpreis [123] vs. Leistungsaufnahme in der Kalenderwoche 4

Abb. 6.4: EPEX-Spotpreise vs. Leistungsaufnahme des Baubetriebs