

ENERGIESYSTEMANALYSE MIT MOBILER MESSTECHNIK: SYSTEMATISCHE AUSWERTUNG VON MESSKAMPAGNEN IN KMU UND ÖFFENTLICHEN GEBÄUDEN

Lukas HILGER¹, Thorsten SCHNEIDERS¹, Frank SCHOLZEN²

¹Technische Hochschule Köln, D-50679 Köln, Deutschland, +49 221 8275 4547,

lukas.hilger@th-koeln.de, <https://www.th-koeln.de>

²Universität Luxemburg, Fakultät für Naturwissenschaften, Technologie und Medizin, L-1511

Luxemburg, frank.scholzen@uni.lu, <https://www.uni.lu/fstm-en>

Kurzfassung: Bisher fehlt es an einer systematischen Mess- und Analysemethode zum Einsatz mobiler Messtechnik für Strommessungen in KMU und öffentlichen Gebäuden. In diesem Beitrag werden standardisierte Datenanalysen vorgestellt und auf die Messdatensätze durchgeführter Messkampagnen (Kurzzeitmessungen) angewendet. Die Ergebnisse zeigen, dass eine Anwendung der standardisierten Datenanalysen trotz Diversität der Messobjekte zu vergleichbaren Ergebnissen führt. So können relevante Strom- und Grundlast-Verbraucher identifiziert werden. Statistische Parameter erlauben die automatisierte Einordnung von erfassten Messpunkten auf der Grundlage des Lastverhaltens. Technische und bauliche Limitationen können die Aussagekraft der Analyseergebnisse einschränken. Die Ergebnisse bilden die Grundlage zur Weiterentwicklung des systematischen Einsatzes mobiler Messtechnik im Zuge von Energiesystemanalysen in KMU und öffentlichen Gebäuden.

Keywords: Energieeffizienz, Mobile Messtechnik, Energiesystemanalyse, Analysekonzept Messkampagnen, KMU, öffentliche Gebäude

1 Einleitung

Trotz steigender Stromkosten liegt in vielen kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) nach wie vor keine Transparenz über Energieflüsse vor [1]. Dabei ist Transparenz über Energieflüsse eine wichtige Basis zur Identifikation von Einsparpotenzialen und zur Umsetzung von Effizienzmaßnahmen [2]. Insbesondere in KMU liegen spezifische Barrieren zur Steigerung der Energieeffizienz vor. Dazu zählen unter anderem ein häufig fehlender Zugang zu Energiedaten sowie eine mangelnde Nutzung dieser Daten (vgl. [1]). Weiterhin haben KMU häufig keine Zeit oder fehlendes Wissen, um ihre Einsparpotenziale zu identifizieren [3]. Auch in öffentlichen Gebäuden fehlen häufig die Ressourcen oder das Know-How, um die Energiesparpotenziale aufzudecken [4]. Dies ist unter anderem auf die unzureichende Datengrundlage zurückzuführen, denn Informationen über das Betriebsverhalten größerer elektrischer Verbraucher sowie über Lastspitzen- und Grundlast-Verbraucher liegen in der Regel nicht vor.

Smart Meter und Energiemonitoring-Systeme können die Informationsbasis in KMU und öffentlichen Gebäuden verbessern und dadurch eine Grundlage schaffen, den energetischen Ist-Zustand zu identifizieren und geeignete Maßnahmen umzusetzen [5, 6]. Sie ermöglichen die Erfassung, Visualisierung und Analyse hochaufgelöster Energieverbrauchsdaten bis auf Verbraucherebene. So kann ein Verständnis über den Energieverbrauch und Energiekosten

geschaffen werden. Auf dieser Basis können Einsparpotenziale identifiziert und bewertet werden. In ihrem Energieaudit-Ansatz kommen *Fresner et al.* [7] zu dem Schluss, dass mit einer Rückführung des Energieverbrauchs auf einzelne elektrische Verbraucher ein Verständnis über die Ursache des Energieverbrauchs, die Prioritäten sowie das Reduktionspotenzial geschaffen werden kann. *Hein et al.* [8] betonen, dass der Einsatz von Messtechnik Energieaudits erheblich verbessern kann, indem eine leicht zugängliche Visualisierung des Energieverbrauchs und eine Darstellung der wichtigsten Kostentreiber realisiert wird. Der Einsatz von Messsystemen zur Schaffung von Transparenz über die Energie- und Lastflüsse stellt daher eine wichtige Grundlage zur Steigerung der Energieeffizienz dar.

Die Umsetzung von Messungen werden jedoch in der Praxis (z.B. im Zuge einer Energieberatung) häufig als zeitaufwendig angesehen. So werden Hochrechnungsverfahren zur Abschätzung des Stromverbrauchs angewendet, anstatt Potenziale basierend auf realen Messdaten zu identifizieren (vgl. [8]). In der Literatur wird der Einsatz von Messtechnik häufig in Verbindung mit Detailanalysen gebracht, die sich beispielsweise auf einzelne Prozesse konzentrieren (vgl. [8–10]). Es fehlt jedoch weiterhin an einer standardisierten Methode für den systematischen, vollumfänglichen Einsatz von mobiler Messtechnik zur Schaffung von Transparenz über die Energie- und Lastflüsse in Unternehmen.

Wie also kann mobile Messtechnik im Zuge der Energiesystemanalyse von KMU und öffentlichen Gebäuden systematisch eingesetzt werden, um Transparenz über die Energie- und Lastflüsse zu schaffen? Welche Auswertungen, Analysen und Parameter sind für ein standardisiertes Analysekonzept relevant? Zur Beantwortung dieser Forschungsfragen wurde in vorangegangenen Arbeiten ein standardisiertes, universell anwendbares Messkonzept für den Einsatz mobiler Messtechnik in KMU und öffentlichen Gebäuden entwickelt [11]. Die ausgewählte mobile Messtechnik ist für elektrische Leistungsmessungen spezifiziert. Die mobile Messung von Wärmeströmen ist mit einem deutlich höheren Installationsaufwand verbunden und Wärmeversorgungssysteme sind technisch heterogener aufgebaut (Gaskessel, Fernwärmeanschluss, Blockheizkraftwerk, etc.). Unabhängig von der Branche verfügen hingegen alle Unternehmen über einen Anschluss an das Stromnetz. Aus diesem Grund wurde der Schwerpunkt auf strombasierte Analysen mit mobiler Messtechnik gelegt.

Aus der Anwendung des Messkonzeptes entstehen standardisierte Messdatensätze, die im Zuge des Analysekonzeptes ausgewertet werden. Das Analysekonzept stellt dazu standardisierte Datenanalysen bereit. In diesem Beitrag wird das entwickelte Analysekonzept auf sechs durchgeführte Messkampagnen in KMU und öffentlichen Gebäuden angewendet. Die Auswertungen zu diesen Messkampagnen dienen als Proof-of-Concept für das entwickelte Analysekonzept. Ziel ist es, herauszuarbeiten inwiefern mittels der standardisierten Datenanalysen ein allgemeingültiger Ansatz zur Auswertung von Kurzzeitmessungen mit mobiler Messtechnik geschaffen werden kann.

2 Methodik

Basierend auf den methodischen Bausteinen des Mess- und Analysekonzeptes erfolgt in diesem Beitrag die Anwendung standardisierter Datenanalysen auf die Messdatensätze der Messkampagnen (s. Abbildung 1). Der Fokus wird dabei zunächst auf die Verbrauchsdisaggregation, die Grundlast-Disaggregation sowie Lastprofil-Charakterisierung gelegt. Anhand der Ergebnisse kann das Standardisierungspotenzial zur Anwendung des Analysekonzeptes

beurteilt werden (vgl. Abbildung 1). Dabei werden auch Limitationen aufgezeigt, die eine generische Anwendung des Analysekonzepts für Kurzzeitmessungen mit mobiler Messtechnik einschränken.

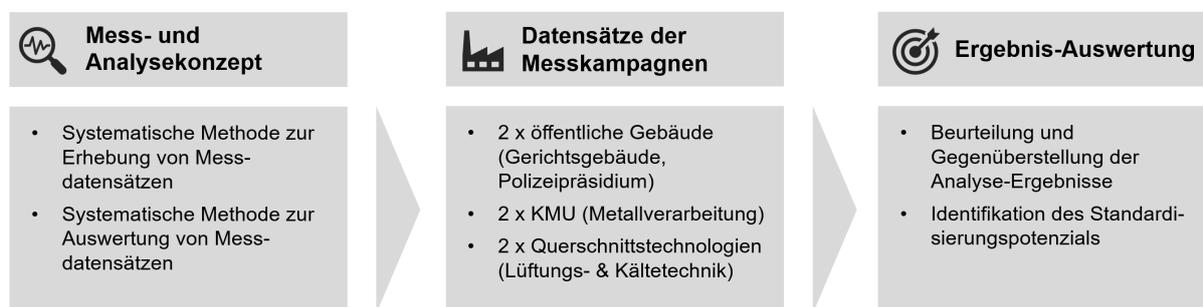


Abbildung 1: Methodik zur Anwendung des Analysekonzepts für Kurzzeitmessungen mit mobiler Messtechnik

2.1 Vorstellung des Messkonzeptes

Im Zeitraum von 2021 bis 2023 wurden sechs Messkampagnen zur Erfassung von Stromverbrauchsdaten mit mobiler Messtechnik in öffentlichen Gebäuden, KMU und spezifisch an Querschnittstechnologien durchgeführt. Diese Messkampagnen wurden unter Anwendung eines entwickelten Messkonzeptes zum Einsatz von mobiler Messtechnik für Kurzzeitmessungen durchgeführt [11]. Dabei erfolgt die Erfassung der Energieflüsse ausgehend von einer oder mehrerer elektrischen Hauptverteilungen (Top-Down-Messprinzip, vgl. [12]). Dies erlaubt eine stufenweise Zuordnung des Stromverbrauchs von der elektrischen Hauptverteilung auf elektrische Unterverteilungen (UV) sowie Verbrauchergruppen (VG).

Da in der Praxis stets ein begrenztes Messequipment (limitierte Anzahl an Messsystemen und Sensoren) vorliegt, müssen Messprioritäten definiert werden. Der Fokus liegt dabei analog zur Anwendung der Energiemanagement-Norm DIN EN ISO 50001 auf der Erfassung großer elektrischer Verbraucher (engl. significant energy users, SEU) [13]. Diese werden vor der Installation der Messtechnik entweder anhand vorliegender Schaltpläne oder durch Erfassung der momentanen Phasenbelastung (Strom in Ampere) mittels Strommesszange identifiziert. Das Messequipment besteht aus drei mobilen Messsystemen (Messkoffer) zur Erfassung der elektrischen Wirkleistung. Die Messkoffer können jeweils bis zu sechs dreiphasige elektrische Verbraucher erfassen. In Summe können somit 18 dreiphasige elektrische Verbraucher parallel an örtlich getrennten Messlokalen erfasst werden. Ergänzend können weitere Messpunkte mit einem Messsystem zur Scheinleistungsmessung erfasst werden, wodurch bei der Installation der Messtechnik eine höhere Flexibilität gewährleistet wird.

Kurzzeitmessungen liefern bedingt durch den limitierten Messzeitraum nur eine Momentaufnahme über den energetischen Zustand eines Messobjektes. In der Praxis werden daher unter anderem Hochrechnungsverfahren angewendet, um aus den Daten der Kurzzeitmessungen relevante Kennwerte für das Gebäude herzuleiten [14]. Das entwickelte Mess- und Analysekonzept sieht eine solche Hochrechnung nicht vor, da der Fokus nicht auf der Bildung von jährlicher Energievergleichskennwerten, sondern auf der Schaffung von Transparenz liegt. Anhand vorliegender Lastgangdaten der RLM-Messung (registrierende Leistungsmessung des Energieversorgers) kann jedoch eine Validierung und Einordnung der erfassten Messdaten erfolgen. Der Messzeitraum der durchgeführten Messreihen liegt zwischen einer und vier Wochen. Ein Messzeitraum von mindestens einer Woche wurde festgelegt, um an den Zeitwerten

innerhalb einer Referenzwoche (Montag – Sonntag) mindestens einen Leistungswert zu erfassen.

2.2 Vorstellung des Analysekonzeptes

Das entwickelte Analysekonzept umfasst mehrere standardisierte Datenanalysen, die unabhängig vom untersuchten Messobjekt angewendet werden können. Zusätzlich wird zwischen drei Analyseschritten unterschieden:

- *Erfassung*: Identifikation von Auffälligkeiten im Stromverbrauch (z.B. relevante Stromverbraucher, Grundlast- oder Lastspitzen-Verbraucher)
- *Diagnose*: Ermittlung der Ursachen identifizierter Auffälligkeiten (z.B. ineffiziente Regelung oder Verbrauchsmuster)
- *Optimierung*: Ermittlung von Optimierungspotenzialen für eine effizientere Betriebsweise (z.B. Betriebsstunden-Optimierung)

Mit dem Ziel der Identifikation von Auffälligkeiten im Stromverbrauch wurden drei Disaggregationsanalysen entwickelt, die dem Analyseschritt Erfassung zugeordnet wurden (s. Abbildung 2) [15]. Anhand der Aufschlüsselung (Disaggregation) des Stromverbrauchs auf die erfassten Messpunkte wird eine Grundlage zur Identifikation signifikanter Energieverbraucher (SEU) geschaffen. Die Aufschlüsselung des Grundlastverbrauchs liefert Erkenntnisse über relevante Grundlast-Verbraucher. Die innerhalb der Kurzzeitmessung aufgetretenen Lastspitzen können durch die parallele Erfassung mehrerer Messpunkte ebenfalls aufgeschlüsselt und auf Lastspitzen-Verbraucher zurückgeführt werden.

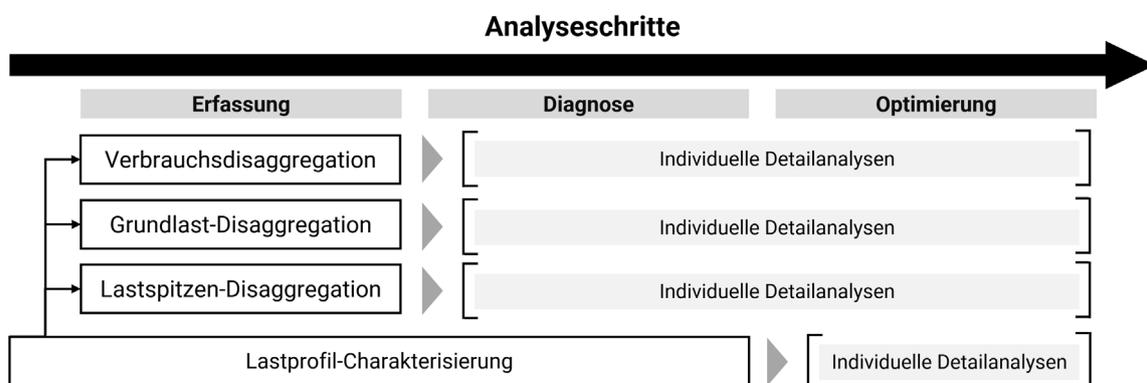


Abbildung 2: Standardisierte Datenanalysen des Analysekonzeptes [15]

Im Zuge der Lastprofil-Charakterisierung werden verschiedene Berechnungsverfahren für statistische Parameter auf einzelne erfasste Datenreihen angewendet. Aus den Parametern können zum einen Indikatoren abgeleitet werden, die auf Ineffizienzen und Anomalien hindeuten. Darüber hinaus kann auf dieser Basis das Betriebsverhalten elektrischer Verbraucher beurteilt werden. Die Lastprofil-Charakterisierung deckt somit die Analyseschritte „Erfassung“ und „Diagnose“ ab (s. Abbildung 2). Die Anwendung der vorgestellten Datenanalysen kann jeweils auf individuelle Detailanalysen hindeuten, die in weiterführenden Analyseschritten (Diagnose und Optimierung) erfolgen.

Um eine Anwendung der Datenanalysen unabhängig von der Messkampagne und dem Messobjekt zu gewährleisten, wurde der Aufbau der Messdatensätze standardisiert. Dabei ist je

Messlokation (bspw. einer elektrischen Haupt- oder Unterverteilung) zwischen Input- und Output-Datenreihen zu unterscheiden (s. Abbildung 3, beispielhaft dargestellt am Schema einer elektrischen Hauptverteilung). Die zeitgleiche Erfassung von Input- und Output-Datenreihen erlaubt die Aufschlüsselung des Gesamtstromverbrauchs einer elektrischen Verteilung auf die erfassten Messpunkte (Unterverteilungen und Verbrauchergruppen). Sofern Verbrauchergruppen erfasst wurden, können ggf. unmittelbar Rückschlüsse auf elektrische Einzelverbraucher gezogen werden.

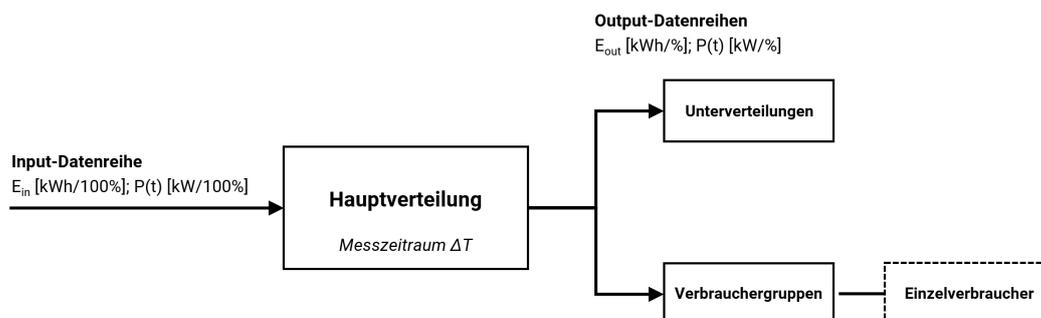


Abbildung 3: Grundprinzip zur Anwendung standardisierter Datenanalysen

Die Messdatensätze liegen zur Anwendung der standardisierten Datenanalysen in einer Auflösung von 15min vor. Dies entspricht der Auflösung, in der auch die Lastgangdaten der RLM-Messung vorliegen. Eine höhere Datenauflösung (bspw. 10 Sekunden) wird unter anderem für individuelle Detailanalysen benötigt.

3 Ergebnisse

3.1 Durchgeführte Messkampagnen

An dieser Stelle werden die durchgeführten Messkampagnen zunächst grundlegend vorgestellt. Tabelle 1 gibt dazu einen Überblick und ordnet die Messkampagnen hinsichtlich des Messobjektes, der durchgeführten Messreihen, des Messzeitraums, der Messlokationen sowie der erfassten Messpunkte ein.

Tabelle 1: Überblick und Einordnung der durchgeführten Messkampagnen

Messobjekt	Messreihen	Messzeitraum (Tage)	Messlokationen (input)			Messpunkte (output)		
			HV	UV	VG	HV	UV	VG
Öff. Gebäude1	1	35	1	-	-	-	7	4
Öff. Gebäude2	3	17 / 7 / 18	6	2	-	3	29	20
KMU1	1	15	2	-	-	-	6	11
KMU2	1	8	3	-	-	2	4	9
QT1*	1	22	-	1	-	-	-	5
QT2*	1	34	-	-	1	-	-	2

*Querschnittstechnologie

Bei den Messkampagnen in öffentlichen Gebäuden lagen zwei stark unterschiedliche Messobjekte vor. Die erste Messkampagne (Öff. Gebäude1) wurde in einem Gebäude mit niedriger

technischer Ausstattung (keine Lüftungssysteme und Raumklimatisierung) durchgeführt. Der Jahresstromverbrauch des Gebäudes liegt bei ca. 1 GWh/a. Die zweite Messkampagne (Öff. Gebäude2) fand in einem öffentlichen Gebäude mit höherer und modernerer technischer Ausstattung statt. Das Messobjekt ist darüber hinaus mit drei Gebäuden und einem Jahresstromverbrauch von ca. 3,5 GWh/a deutlich größer.

Die durchgeführten Messkampagnen in KMU umfassen zwei Messobjekte (Standorte) eines metallverarbeitenden Unternehmens. Die beiden Messobjekte weisen vergleichbare Strukturen und Verwendungszwecke der Gebäudenutzung auf. Der Jahresstromverbrauch der Messobjekte liegt bei etwa 0,2 GWh/a (KMU1) und 0,4 GWh/a (KMU2).

Zusätzlich wurden zwei weitere Messkampagnen an Querschnittstechnologien (QT) durchgeführt. Die Messkampagne QT1 umfasst die elektrische Unterverteilung eines Lüftungssystems, während in der Messkampagne QT2 zwei Kälteanlagen als elektrische Einzelverbraucher erfasst wurden (s. Tabelle 1).

Der Vergleich der in den Messkampagnen durchgeführten Messreihen zeigt, dass in fünf Messkampagnen eine einzelne Messreihe mit einem Messzeitraum von 8-35 Messtagen umgesetzt wurde. Einzig die Messkampagne Öff. Gebäude1 erforderte die Durchführung von drei hintereinander gestaffelten Messreihen (17, 7 und 18 Messtage). Dies war aufgrund der Vielzahl physisch getrennter Messlokationen und der deutlich komplexeren elektrischen Versorgungsstruktur des Messobjektes notwendig. Diese Ergebnisse verdeutlichen, dass mit den gegebenen Messsystemen zur Wirk- und Scheinleistungsmessung eine technische Umsetzung von Messkampagnen auch in komplexeren Messobjekten möglich ist. Allerdings steigen mit der Größe des Messobjektes auch die zeitlichen und strukturellen Anforderungen an die Umsetzung von Kurzzeitmessungen.

3.2 Anwendung der Disaggregationsanalysen

Die Anwendung der Disaggregationsanalysen erfolgt auf die durchgeführten Messkampagnen in öffentlichen Gebäuden (Öff. Gebäude1 und Öff. Gebäude2) sowie in KMU (KMU1 und KMU2). Die auf System- bzw. Anlagenebene durchgeführten Messkampagnen einzelner Querschnittstechnologien werden im Zuge der Lastprofil-Charakterisierung näher betrachtet (s Kapitel 3.3).

3.2.1 Verbrauchsdisaggregation

Mit der Verbrauchsdisaggregation wird der Energieverbrauch der erfassten Messpunkte E_{out} (kWh) für einen definierten Zeitraum (bspw. eine Referenzwoche des Messzeitraums) über den Gesamtstromverbrauch E_{in} einer elektrischen Verteilung aufgeschlüsselt (vgl. Abbildung 3). In erster Linie wird durch die Anwendung dieser Datenanalyse Transparenz über die Energie- und Lastflüsse geschaffen. Darüber hinaus können auf Grundlage dieser Analyse relevante Verbrauchergruppen und Unterverteilungen identifiziert werden.

Entscheidend für die Effizienz dieser Analyse ist je Messlokation die Summe des auf elektrische Unterverteilungen (UV) und Verbrauchergruppen (VG) aufgeschlüsselten Stromverbrauchs bezogen auf den erfassten Gesamtstromverbrauch E_{in} . Dabei sollte je Messlokation eine möglichst vollständige Disaggregation des Gesamtstromverbrauchs und eine möglichst hohe Disaggregation auf Verbrauchergruppen erfolgen. In Abbildung 4 werden die Ergebnisse

der Verbrauchsdisaggregation für die durchgeführten Messkampagnen in öffentlichen Gebäuden und KMU dargestellt. Dabei wird je Messobjekt der in Unterverteilungen (UV, gelb) und Verbrauchergruppen (VG, blau) erfasste Verbrauch sowie der nicht erfasste Stromverbrauch (grau) bilanziert. Zur Bilanzierung wurde jeweils der Zeitraum einer Referenzwoche gewählt.

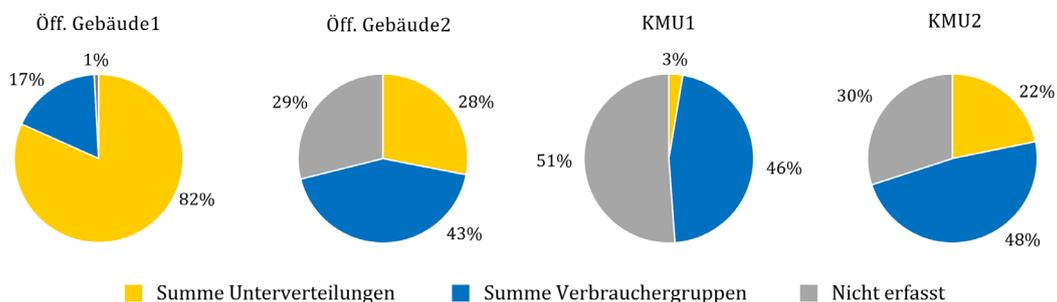


Abbildung 4: Vergleich Verbrauchsdisaggregation der Messkampagnen in öffentlichen Gebäuden und KMU

Bei den Messkampagnen in öffentlichen Gebäuden konnte eine Verbrauchsdisaggregation von 99% (Öff. Gebäude1) und 71% (Öff. Gebäude2) erreicht werden. Hintergrund für die nicht vollständige Aufschlüsselung in Öff. Gebäude2 waren technische Einschränkungen (verfügbares Messequipment) und bauliche Einschränkungen (Installation Sensorik in Schaltschränken). Dennoch war es in dem Messobjekt durch drei aufeinanderfolgende Messreihen möglich, 28% des Gesamtstromverbrauchs auf elektrische Unterverteilungen und weitere 43% eindeutig auf Verbrauchergruppen aufzuschlüsseln. In Öff. Gebäude1 wurden 82% des Gesamtstromverbrauchs auf elektrische Unterverteilungen aufgeschlüsselt. Auch hier war eine weitere Aufschlüsselung aufgrund baulicher Einschränkungen nicht möglich.

Die durchgeführten Messkampagnen in KMU erzielten eine Verbrauchsdisaggregation von 49% (KMU1) bzw. 70% (KMU2). Auch hier war eine weitere Aufschlüsselung aufgrund des limitierten Messequipments sowie insbesondere der baulichen Gegebenheiten (veraltete Elektroinstallationen) nicht möglich. In beiden Messkampagnen konnte jedoch fast die Hälfte des Gesamtstromverbrauchs eindeutig auf elektrische Verbraucher bzw. Verbrauchergruppen zugeordnet werden.

Die identifizierten Messpunkte mit dem höchsten Stromverbrauch sind für die durchgeführten Messkampagnen in Tabelle 2 aufgeführt.

Tabelle 2: Identifizierte Messpunkte mit höchstem Stromverbrauch

Öff. Gebäude1	Öff. Gebäude2	KMU1	KMU2
Gebäudebereich5 (UV) 16%	Kältetechnik (Gebäude) 11%	Beleuchtung 13%	Kompressor 15%
Gebäudebereich6 (UV) 13%	Klimatisierung (Geb.) 9%	Produktionsmaschine 10%	Hallenbereich Lager 11%
Gebäudebereich3 (UV) 12%	Kältetechnik (Server) 3%	Kompressor 10%	Hallenbereich Versand 8%

Die größten erfassten Messpunkte machen demnach bis zu 16% des Gesamtstromverbrauchs des Messobjektes aus. Es handelt sich dabei teilweise um Gebäude- oder Hallenbereiche (elektrische Unterverteilungen), die diverse elektrische Verbraucher eines Teilbereichs des

Messobjektes versorgen. Kälte- und Klimatechnik sowie Beleuchtung und Kompressoren stellen die größten erfassten Verbrauchergruppen und Einzelverbraucher dar.

3.2.2 Grundlast-Disaggregation

Die Grundlast beschreibt die minimale, permanent anliegende Last in einem Energiesystem [16]. Häufig wird die Grundlast durch elektrische Verbraucher mit hohen Vollbenutzungsstunden (Server, Kältetechnik) verursacht [17]. In der Lastgangkurve wird die Grundlast daher vor allem außerhalb der Nutzungszeiten eines Gebäudes (während des Ruhezeitfensters) sichtbar. Eine hohe Grundlast deutet darauf hin, dass viele elektrische Verbraucher durchgehend im Betrieb sind [18]. Dementsprechend ist es für die Energiesystemanalyse relevant, zunächst die Grundlast-Verbraucher eines Messobjektes zu identifizieren. Auf dieser Basis kann das Betriebsverhalten der Grundlast-Verbraucher im Detail analysiert werden, um geeignete Optimierungsmaßnahmen umzusetzen.

Mit der Datenanalyse Grundlast-Disaggregation wird die Gesamtgrundlast eines Messobjektes auf die zeitlich parallel erfassten Messpunkte aufgeschlüsselt. Entscheidend für die Effizienz dieser Analyse ist daher eine möglichst vollständige Aufschlüsselung der Gesamtgrundlast auf elektrische Unterverteilungen und Verbrauchergruppen. Um die Grundlast eindeutig elektrischen Verbrauchern zuzuweisen, ist darüber hinaus eine hohe prozentuale Aufschlüsselung auf Verbrauchergruppen anzustreben. Abbildung 5 stellt die Ergebnisse der Grundlast-Disaggregation für die durchgeführten Messkampagnen in öffentlichen Gebäuden und KMU dar. Dabei wurde für jede erfasste Datenreihe eine mittlere Grundlast berechnet und auf die Gesamtgrundlast der Messlokation bezogen.

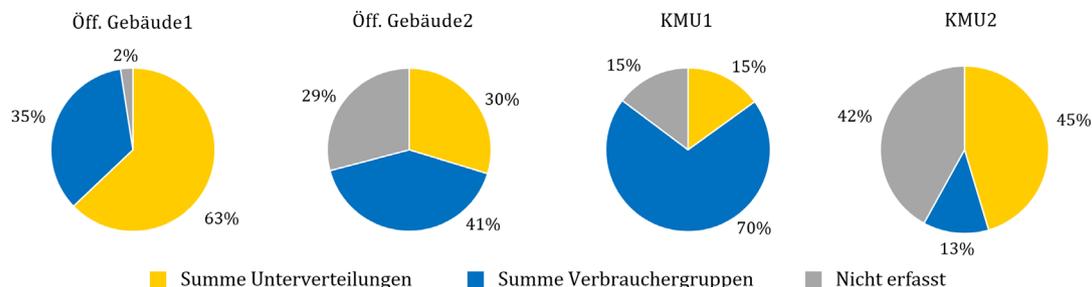


Abbildung 5: Vergleich Grundlast-Disaggregation der Messkampagnen in öffentlichen Gebäuden und KMU

In den Messkampagnen wurde eine Grundlast-Disaggregation von 58-98% erreicht. Die niedrigste Aufschlüsselung der Gesamtgrundlast (58%) wurde in der Messkampagne von KMU2 erreicht gefolgt von Öff. Gebäude2 (71%). In beiden Messobjekten lagen analog zur Verbrauchsdisaggregation technische und bauliche Einschränkungen vor, die eine höhere Aufschlüsselung der Gesamtgrundlast limitierten. Dennoch zeigen die Ergebnisse, dass mit dem gegebenen Messkonzept eine Grundlast-Disaggregation von über 70% auch in größeren und komplexeren Messobjekten möglich ist.

Die Aufschlüsselung auf Verbrauchergruppen lag zwischen 13% (KMU2) und 70% (KMU1). Dieser Grundlast-Anteil konnte demnach eindeutig auf elektrische Verbrauchergruppen und Einzelverbraucher zugeordnet werden. Tabelle 3 stellt je Messobjekt die größten identifizierten Grundlast-Verbraucher dar. Diese machen anteilig bis zu 28% der Gesamtgrundlast aus. Die identifizierten Verbraucher können in einem weiteren Schritt hinsichtlich des Reduktionspotenzials untersucht werden. Das Potenzial kann dabei anhand des Verbrauchertyps ausgemacht

werden. So sind bei dauerhaft laufenden Serversystemen in der Regel nur mit investiven Maßnahmen Optimierungspotenziale realisierbar. Druckluftsysteme und Heizungspumpen sollten jedoch im Zuge einer Detailanalyse hinsichtlich Ineffizienzen und Optimierungspotenziale untersucht werden.

Tabelle 3: Identifizierte Messpunkte der größten Grundlast-Verbraucher

Öff. Gebäude1	Öff. Gebäude2	KMU1	KMU2
Server 18%	Klimatisierung (Geb.) 8%	Kompressor 28%	Kompressor 4%
Heizungspumpen 10%	Kältetechnik (Gebäude) 8%	Maschine 26%	Maschine 3%
Kältetechnik 6%	Server 5%	Krane 7%	Maschine 2%

3.3 Anwendung der Lastprofil-Charakterisierung

Die Lastprofil-Charakterisierung sieht verschiedene Berechnungsverfahren vor, die auf die Datenreihen der erfassten Messpunkte einer Messkampagne angewendet werden können. Basierend auf den berechneten Parametern kann das Lastverhalten automatisiert beschrieben werden. Die Parameter können daher als Indikatoren zur Bewertung von Auffälligkeiten bezüglich des Lastverhaltens herangezogen werden.

In diesem Beitrag wird auf einen Parameter zur Beschreibung des Grundlast-Anteils einer Datenreihe (Grundlast-Faktor k_{base}) sowie einen Parameter zur Beschreibung der dynamischen Laständerung über die Zeit (mittlere Laständerungsrate ΔP_{avg}) eingegangen. Beide Parameter liegen in einem Wertebereich zwischen 0 und 1. Daher gelten sie als relative Parameter und können zum übergeordneten Vergleich der Datenreihen verschiedener Messkampagnen herangezogen werden.

Der Grundlast-Faktor k_{base} gilt als Maß zur Beurteilung des Grundlastverbrauchs am Gesamtstromverbrauch E (kWh) einer Datenreihe. Der Parameter ergibt sich demnach aus der in der Datenreihe anliegenden Grundlast P_{base} (kW), dem Messzeitraum Δt (h) sowie dem Gesamtstromverbrauch E (1).

$$k_{base} = \frac{P_{base} \times \Delta t}{E} \quad (1)$$

Der Grundlast-Faktor kann auch als prozentualer Anteil des Grundlastverbrauchs am Gesamtstromverbrauch einer Datenreihe interpretiert werden.

Abbildung 6 zeigt eine Einordnung des Wertebereichs für den Grundlast-Faktor anhand der absoluten Klassenhäufigkeiten der in den Messkampagnen erfassten Datenreihen ($n=108$). Die Abbildung verdeutlicht, dass die meisten Datenreihen ($n=19$) der Klasse $0 < k_{base} \leq 0,05$ zugeordnet sind. Diese Datenreihen weisen demnach einen Grundlast-Anteil $\leq 5\%$ am Gesamtstromverbrauch auf. Ein Grundlast-Faktor $k_{base} \leq 0,05$ gilt als Indikator für eine Datenreihe, deren elektrische Verbraucher einen geringen oder keinen Standby-Verbrauch während des Ruhezeitfensters aufweisen. Dies ist beispielsweise bei Hallenbeleuchtungen oder Produktionsmaschinen (ohne Standby-Verbrauch) der Fall. Ab einem Grundlast-Faktor $k_{base} > 0,8$ weist die Datenreihe einen Grundlast-Anteil von über 80% am Gesamtstromverbrauch auf. Der Stromverbrauch wird demnach durch die Grundlast dominiert und ein Ruhezeitfenster ist

nicht mehr erkennbar (durchlaufendes Betriebszeitfenster). Ein Grundlast-Faktor $k_{base} > 0,8$ gilt daher als Indikator zur Identifikation elektrischer Verbraucher mit hohen Vollbenutzungsstunden (Grundlast-Verbraucher). Serversysteme, Kälteanlagen und dauerhaft besetzte Bürobereiche sind Beispiele für ein solches Lastverhalten. Der Wertebereich $0,05 < k_{base} \leq 0,8$ wird keiner weiteren Klassifizierung eingeordnet. Mit steigendem Grundlast-Faktor nimmt die Bedeutung der Grundlast bezogen auf den Gesamtstromverbrauch dieser Datenreihen zu.

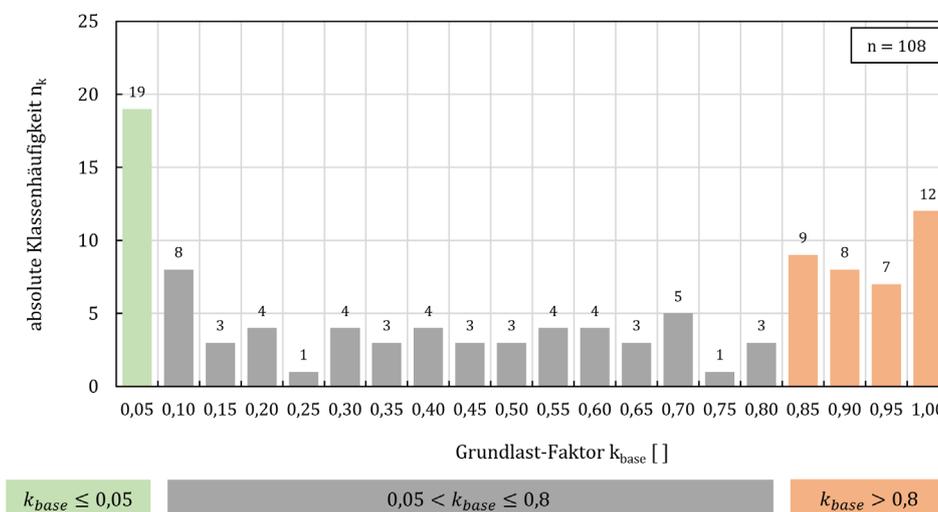


Abbildung 6: Einordnung Wertebereich des Grundlast-Faktors anhand absoluter Klassenhäufigkeiten der in den Messkampagnen erfassten Datenreihen ($n=108$)

Bei der Datenauswertung eines spezifischen Messobjektes sollten die Grundlast-Faktoren der Datenreihen unter Hinzunahme eines Absolutwertes (mittlere Grundlast in kW) betrachtet werden. So können insbesondere die Messpunkte identifiziert werden, deren Grundlast sich maßgeblich auf die Gesamtgrundlast des Messobjektes auswirkt.

Die mittlere Laständerungsrate ΔP_{avg} gilt als Maß zur Beschreibung der mittleren Laständerung aufeinander folgender Leistungswerte x_i einer Datenreihe [16] (2).

$$\Delta P_{avg} = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n \frac{|x_i - x_{i-1}|}{\bar{x}} \quad (2)$$

Die Berechnung erfolgt separiert für die Leistungswerte des Betriebs- und das Ruhezeitfensters, da sich das Lastverhalten in diesen Zeitfenstern unterscheiden kann. Der Parameter beschreibt somit die mittlere prozentuale Laständerung zum arithmetischen Mittel \bar{x} der Leistungswerte eines Zeitfensters.

Abbildung 7 ermöglicht eine Einordnung des Wertebereichs der Laständerungsrate für das Betriebszeitfenster anhand absoluter Klassenhäufigkeiten der in den Messkampagnen erfassten Datenreihen. Die Abbildung zeigt, dass fast die Hälfte der erfassten Datenreihen ($n=48$) im Wertebereich $0 < \Delta P_{avg} \leq 0,05$ liegen. In diesen Datenreihen liegt eine geringe Laständerung aufeinander folgender Leistungswerte zum arithmetischen Mittel der Leistungswerte vor ($< 5\%$ zum arithmetischen Mittel). Eine Laständerungsrate $\Delta P_{avg} \leq 0,05$ gilt als Indikator für Datenreihen, deren zugehörige elektrische Verbraucher durch ein statisches Lastverhalten geprägt sind. Es liegen keine hohen Lastgradienten (Rampen) in der Datenreihe vor. Beispiele

für ein solches Lastverhalten sind Lüftungssysteme mit konstant vorgegebenem Volumenstrom. Im Wertebereich $0,05 < \Delta P_{avg} \leq 0,35$ liegt eine hohe Laständerung aufeinander folgender Leistungswerte vor. Dies kann auf elektrische Verbraucher mit dynamischer Lastcharakteristik (z.B. Kompressorsysteme) hindeuten. Besonders hohe Lastgradienten (Rampen) treten ab einer Laständerungsrate $\Delta P_{avg} > 0,35$ auf. Datenreihen dieses Wertebereichs umfassen häufig elektrische Verbraucher mit hochfrequenten, zyklischen Verhalten (z.B. Kühlkälte) sowie elektrische Verbraucher, die vom Standby-Betrieb unmittelbar auf die Nennleistung schalten (z.B. Hallenkran).

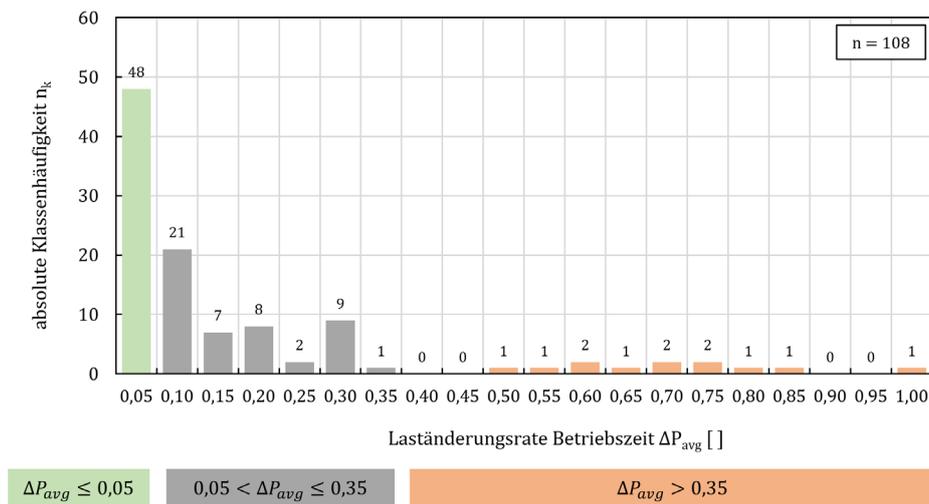


Abbildung 7: Einordnung Wertebereich der Laständerungsrate (Betriebszeit) anhand absoluter Klassenhäufigkeiten der in den Messkampagnen erfassten Datenreihen ($n=108$)

Bei der Datenauswertung eines spezifischen Messobjektes sollte die Laständerungsrate der Datenreihen unter Hinzunahme eines Absolutwertes (bspw. mittlerer Lastgradient in kW/h) betrachtet werden. So können insbesondere die Messpunkte identifiziert werden, deren dynamische Laständerung sich maßgeblich auf das Gesamtlastprofil des Messobjektes auswirkt.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Im Zeitraum von 2021 bis 2023 wurden insgesamt sechs Messkampagnen mit mobiler Messtechnik in öffentlichen Gebäuden, KMU sowie an Querschnittstechnologien durchgeführt. Die Messkampagnen wurden mit dem Ziel durchgeführt, Transparenz über die Energie- und Lastflüsse der Messobjekte zu schaffen. So wurde in vorangegangenen Arbeiten ein Messkonzept entwickelt, welches den systematischen Einsatz mobiler Messtechnik in öffentlichen Gebäuden und KMU ermöglicht.

Dieser Beitrag liefert erste Ergebnisse zur Anwendung des Analysekonzepts auf die Messdatensätze der durchgeführten Messkampagnen. Insgesamt wurden dabei 108 Datenreihen berücksichtigt und auf standardisierte Datenanalysen angewendet. Dabei dienen Disaggregationsanalysen zur standardisierten Aufschlüsselung des Gesamtstromverbrauchs sowie der Gesamtgrundlast eines Messobjektes auf die erfassten Messpunkte. Die Anwendung der Disaggregationsanalysen hat gezeigt, dass selbst in größeren, komplexen Messobjekten (3,5 GWh Jahresstromverbrauch, 350 kW Grundlast) eine Aufschlüsselung von mehr als 70% des Gesamtstromverbrauchs sowie der Gesamtgrundlast möglich ist. Allerdings steigt mit der

Größe des Messobjektes auch der Aufwand zur Durchführung einer zielgerichteten Messkampagne. Eine zeitlich gestaffelte Durchführung aufeinander folgender Messreihen ermöglicht jedoch auch eine Verbrauchs- und Grundlast-Disaggregation in größeren Messobjekten. Auch bei der Zuordnung des Stromverbrauchs sowie der Grundlast auf einzelne Verbrauchergruppen konnten Anteile von bis zu 70% erzielt werden. Dieser eindeutig auf elektrische Verbraucher bezogene Anteil ist jedoch stark von den spezifischen Gegebenheiten des Messobjektes (u.a. technische Ausstattung) abhängig.

Als wesentliche Limitierungen einer höheren prozentualen Aufschlüsselung des Gesamtstromverbrauchs sowie der Gesamtgrundlast wurden mehrere Faktoren identifiziert, darunter das limitierte Messequipment (verfügbare Sensorik und Messkoffer) sowie bauliche Einschränkungen (verfügbarer Platz zur Installation der Sensorik). Dabei handelt es sich jedoch um natürliche Einschränkungen, die bei der Anwendung in der Praxis nie gänzlich vermieden werden können.

Die Lastprofil-Charakterisierung ermöglicht eine Beschreibung der erfassten Datenreihen mittels statistischer Parameter (u.a. Grundlast-Faktor, Laständerungsrate). Anhand von relativen Parametern ist dabei eine Beschreibung des Lastverhaltens unabhängig von den absoluten Leistungswerten (kW) möglich. Dadurch wird eine Grundlage für die zukünftige, automatisierte Datenanalyse mittels KI-gestützter bzw. standardisiert anwendbarer Analyseverfahren geschaffen.

Insgesamt zeigen die ersten Ergebnisse, dass trotz der Diversität durchgeführter Messkampagnen (Größe der Messobjekte, Branchenzuordnung) eine standardisierte Analyseverfahren zur Auswertung von Kurzzeitmessungen mittels mobiler Messtechnik entwickelt werden kann. Relevante Strom- und Grundlast-Verbraucher können systematisch identifiziert und Auffälligkeiten sowie Anomalien im Lastverhalten mittels statistischer Parameter beschrieben werden. Die entwickelten standardisierten Datenanalysen stellen somit eine Grundlage zur Anwendung von Detailanalysen dar, die in einem weiterführenden Schritt der Energiesystemanalyse erfolgen müssen.

Die zukünftigen Forschungsarbeiten umfassen weitere Ausarbeitungen zum Analysekonzept, (z.B. Lastspitzen-Disaggregation) sowie die Entwicklung statistischer Parameter (Lastspitzen-Faktor, Streuung an diskreten Zeitwerten, Leistungsspektrum). Zusammenfassend lassen sich mit der entwickelten Mess- und Analyseverfahren viele Potenziale für einen systematischen und standardisierten Einsatz von mobiler Messtechnik erschließen. Auf diese Weise wird die Analyse von Energiesystemen in KMU und öffentlichen Gebäuden aufgewertet und effizienter gestaltet.

Danksagung

Diese Forschungsarbeiten sind in das Forschungsprojekt „Smart Metering in KMU“ eingebunden. Die Autoren bedanken sich für die Unterstützung durch das Ministerium für Wirtschaft, Industrie, Klimaschutz und Energie (MWIKE) des Landes Nordrhein-Westfalen (DE) und die progres.nrw-Innovationsförderung (Förderkennzeichen EFO 0031A).

5 Literatur

- [1] K. B. Janda, C. Bottrill, and R. Layberry, "Learning from the "data poor": energy management in understudied organizations," *Journal of Property Investment & Finance*, vol. 32, no. 4, pp. 424–442, 2014, doi: 10.1108/JPIF-03-2014-0018.
- [2] T. Rackow, T. Javied, T. Donhauser, C. Martin, P. Schuderer, and J. Franke, "Green Cockpit: Transparency on Energy Consumption in Manufacturing Companies," *Procedia CIRP*, vol. 26, pp. 498–503, 2015, doi: 10.1016/j.procir.2015.01.011.
- [3] T. Fawcett and S. Hampton, "Why & how energy efficiency policy should address SMEs," *Energy Policy*, vol. 140, p. 111337, 2020, doi: 10.1016/j.enpol.2020.111337.
- [4] dena, *Den Kommunen das Energiesparen erleichtern*. [Online]. Available: <https://www.dena.de/themen-projekte/energieeffizienz/gebäude/sanierungsstrategien-und-immobilienwirtschaft/oeffentliche-hand-kommunen/> (accessed: Nov. 28 2023).
- [5] N. Efkarpidis, M. Geidl, H. Wache, M. Peter, and M. Adam, *Smart Metering Applications*. Cham: Springer International Publishing, 2022.
- [6] L. Hilger and T. Schneiders, "Technologie-Screening: Smarte Technologien für Unternehmen," Virtuelles Institut Smart Energy (VISE), 2022. Accessed: Aug. 17 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.57683/EPUB-1975>
- [7] J. Fresner, F. Morea, C. Krenn, J. Aranda Uson, and F. Tomasi, "Energy efficiency in small and medium enterprises: Lessons learned from 280 energy audits across Europe," *Journal of Cleaner Production*, vol. 142, pp. 1650–1660, 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.11.126.
- [8] M. Hein, V. Mischo, and A. Hoffmann, "Die Kompetenzstelle Energieeffizienz Ost-Württemberg - Ein Beitrag zur Energiewende," in *Tagungsband EnInnov2018*, Graz, 2018. Accessed: Aug. 19 2023. [Online]. Available: https://www.tugraz.at/fileadmin/user_upload/Events/Eninnov2018/files/lf/Session_G5/852_LF_Hein.pdf
- [9] C. Schipplick, "Einbeziehung lokaler Unternehmen in die Umsetzung energie- und klimapolitischer Ziele," Master Thesis, Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energy gGmbH, 2017.
- [10] *VDI 3922: Energieberatung - Energieberatungsprozess und -methoden*, 2021.
- [11] L. Hilger and T. Schneiders, "Systematische Energiedatenerfassung und -auswertung in KMU-Betrieben durch den Einsatz mobiler Messtechnik," 2020.
- [12] M. Helfert and P. Schraml, "Leitfaden: Monitoring von Energieeffizienzmaßnahmen," *ETA-Solutions Energiesystemplanung*, 2021.
- [13] B. de Wachter, "Application Note - Energy Management in SMEs," 2022. Accessed: Jan. 24 2024. [Online]. Available: <https://copperalliance.org/wp-content/uploads/2022/09/ECI-EnergyManagement-202209-A4-R5.pdf>
- [14] D. Jacob, "Teilenergiekennwerte bei Nichtwohngebäuden: Leitfaden zur Hochrechnung von Kurzzeitmessungen," 2010.
- [15] L. Hilger, T. Schneiders, and F. Scholzen, "Energy System Analysis with Mobile Measurement Technology: Developing a Standardized Data Analysis Concept for Short-term Measurements in SMEs," in *18th SDEWES Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems: Conference Proceedings*, Dubrovnik, 2023.
- [16] X. Ke, A. Jiang, and N. Lu, "Load profile analysis and short-term building load forecast for a university campus," in *2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM)*, Boston, MA, USA, 2016, pp. 1–5.
- [17] *VDI 3807: Energie- und Wasserverbrauchskennwerte für Gebäude: Teilkennwerte elektrische Energie*, Blatt 4, VDI - Verein Deutscher Ingenieure, Aug. 2008.
- [18] M. Rogen, "Analyse der Stromverbräuche in einem Krankenhaus: Strategische Identifizierung der Verursacher mithilfe verschiedener Methoden," Masterarbeit, Fachhochschule Vorarlberg, Vorarlberg, 2018. Accessed: Jan. 27 2024. [Online]. Available: https://opus.fhv.at/frontdoor/deliver/index/docId/2770/file/Masterarbeit_Rogen.pdf