



PhD-FSTM-2024-063
Fakultät für Naturwissenschaften, Technologie und Medizin

DISSERTATION

verteidigt am 01/10/2024 in Luxemburg (Luxemburg)
zur Erlangung des Titels

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DU LUXEMBOURG EN SCIENCES DE L'INGÉNIEUR

von

Lukas Hilger

geboren am 18. Mai 1991 in Bad Honnef (Deutschland)

EINSATZ MOBILER MESSTECHNIK UND ENTWICKLUNG AUTOMATISIERTER AUSWERTEMETHODEN FÜR ELEKTRISCHE ENERGIEFLÜSSE IM GEWERBLICHEN BEREICH

Prüfungskommission

Prof. Dr.-Ing. Frank Scholzen, Betreuer der Doktorarbeit
Professor, Universität Luxemburg

Prof. Dr.-Ing. Thorsten Schneiders
Professor, Technische Hochschule Köln

Prof. Dr.-Ing. Jean-Régis Hadji-Minaglou, Vorsitzender
Professor, Universität Luxemburg

Prof. Dr.-Ing. Stefan Maas, Stellvertretender Vorsitzender
Professor, Universität Luxemburg

Prof. Dr.-Ing. Andreas R. Diewald
Professor, Hochschule Trier

Danksagung

Diese Arbeit ist während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Technischen Hochschule Köln und Promotionsstudent an der Universität Luxemburg entstanden. Das Forschungsthema ist im Zuge erster Forschungsprojekte von 2017-2020 entstanden, an denen ich als wissenschaftlicher Mitarbeiter mitwirkte. Ein Schwerpunkt lag dabei immer auf anwendungsorientierter und praxisnaher Forschung – ein Ansatz, der mein Promotionsvorhaben maßgeblich prägte. An meiner Dissertation habe ich im Zeitraum von 2020-2024 gearbeitet.

Die Arbeit an der Dissertation wäre nicht ohne die Unterstützung und Ermutigung durch eine Reihe von Menschen möglich gewesen. Mein tiefster Dank gilt zunächst meinen betreuenden Professoren der Universität Luxemburg, Herrn Prof. Dr.-Ing. Frank Scholzen und Herrn Prof. Dr.-Ing. Jean-Régis Hadji-Minaglou. Sie standen mir während meiner Promotion stets unterstützend zur Seite und gaben mir in fördernden Fachgesprächen wertvolles Feedback auf den Weg. Hervorheben möchte ich die besonders vertrauensvolle Zusammenarbeit während der letzten vier Jahre als Promotionsstudent.

Ein besonderer Dank gebührt auch meinem betreuenden Professor der Technischen Hochschule Köln, Herrn Prof. Dr.-Ing. Thorsten Schneiders, der mich an die Forschung und das Arbeiten als wissenschaftlicher Mitarbeiter herangeführt hat. Während der Promotion hat er mich stets gefördert und durch den kontinuierlichen fachlichen Austausch unterstützt, wofür ich ihm sehr dankbar bin.

Mein Dank richtet sich auch an Herrn Prof. Dr.-Ing. Stefan Maas und Herrn Prof. Dr.-Ing. Andreas Diewald für ihre Bereitschaft und Mühen, diese Arbeit als externe Prüfer zu begutachten.

Ein besonderer Dank gilt auch meinen Kolleginnen und Kollegen am Cologne Institute for Renewable Energy der Technischen Hochschule Köln. Hervorheben möchte ich Rudolf Gecke, der mich bei allen Messkampagnen in der Praxis begleitet und unterstützt hat und ohne den die Installation der Messtechnik nicht möglich gewesen wäre. Weiterhin danke ich Tobias Rehm, Sascha Birk, Stefanie Könen, Moritz End, Oliver Pfeiffer und Laura Züll. Die produktive und freundliche Atmosphäre, der fachliche Austausch und die vielen ermutigenden Gespräche waren für mich stets eine Erleichterung während der gesamten Promotionszeit.

Ein Dankeschön geht auch an die Kolleginnen und Kollegen der Projektpartner für die sehr gute interdisziplinäre Zusammenarbeit in den Forschungsprojekten. Ein besonderer Dank gilt Herrn Felix Große-Kreul vom Wuppertal Institut für die vielen hilfreichen fachlichen Diskussionen und die Arbeit an gemeinsamen Veröffentlichungen.

Herzlich bedanken möchte ich mich ebenso bei den involvierten Unternehmen, ohne die die Umsetzung von Messkampagnen in der Praxis nicht möglich gewesen wäre. Ein besonderer Dank gilt Herrn Daniel Kühler vom Bau- und Liegenschaftsbetrieb NRW sowie Herrn Udo Stoffel von der Technischen Hochschule Köln. Weiterhin möchte ich mich ganz herzlich bei Herrn Michael Pauli und dem Team der Firma manageE GmbH für die stets unkomplizierte Zusammenarbeit und den hervorragenden Support bedanken.

Ein ganz besonderes Dankeschön gilt meiner Freundin, meiner Familie und meinen Freunden für ihre kontinuierliche Unterstützung und Aufmunterung aber auch Verständnis und Geduld in den Zeiten, in denen die Arbeit meine volle Aufmerksamkeit erforderte. Diese Unterstützung hat mich immer darin bestärkt, auch stressigere Phasen zu bewältigen und die Promotionsarbeit erfolgreich abzuschließen.

Abschließend danke ich allen, die direkt oder indirekt zum Forschungsthema und dieser Arbeit beigetragen haben, auch wenn sie hier nicht namentlich erwähnt wurden. Besonderen Wert haben für mich die vielen Abschlussarbeiten, Projekt- und Gruppenarbeiten von Studierenden, die ich während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter betreuen durfte. Sie alle haben bedeutend zu meinem akademischen Weg beigetragen.

Köln im Oktober 2024

Kurzfassung

Trotz steigender Stromkosten bestehen im gewerblichen Bereich nach wie vor erhebliche Einsparpotenziale. Um diese zu erschließen, sind Details über die Energie- und Lastflüsse unerlässlich. Der Einsatz von Messtechnik ermöglicht im Rahmen von Effizienzanalysen und Audits die notwendige Datentransparenz. Insbesondere kleine und mittlere Unternehmen (KMU) zeichnen sich allerdings durch eine heterogene Struktur aus, was bisher die Entwicklung einer standardisierten Methodik für den systematischen Einsatz **mobiler Messtechnik** und die Analyse der resultierenden Daten verhindert hat. Zudem führt auch der mit Messungen verbundene Aufwand dazu, dass in der Praxis häufig auf die Erhebung von Messdaten verzichtet wird. Um den Zeitaufwand und die Kosten für den Einsatz mobiler Messtechnik zu reduzieren, ist auch eine weitgehende Automatisierung der Datenauswertung erforderlich. Bisher gibt es jedoch keine standardisierten Ansätze für eine automatisierte Auswertung von Kurzzeitmessungen.

Vor diesem Hintergrund entwickelt die vorliegende Arbeit einen **systematischen, branchenübergreifenden Ansatz** für den Einsatz mobiler Messtechnik und automatisierte Auswertemethoden für elektrische Energieflüsse im gewerblichen Bereich. Das Ziel ist die Erhöhung der Datentransparenz in KMU und öffentlichen Gebäuden durch detaillierte Stromverbrauchsmessungen, um Optimierungs- und Kostenreduktionspotenziale zu identifizieren und umzusetzen.

Die Arbeit gliedert sich in zwei Kernbausteine: Die Untersuchung von Fallbeispielen in KMU und öffentlichen Gebäuden zur Entwicklung eines **Messkonzeptes** und die automatisierte Auswertung der zugehörigen Messdaten in einem **Analysekonzept**. Die Fallbeispiele dienen dazu, die Umsetzbarkeit und Standardisierung des Ansatzes in verschiedenen Branchen und Unternehmensgrößen zu testen. Aus wissenschaftlicher Sicht steht dabei nicht die Analyse von Einzelfällen im Fokus, sondern die Entwicklung allgemeiner Mess- und Auditmethoden.

Die Ergebnisse der Arbeit zeigen, dass das Messkonzept unabhängig von der Branche, der Größe oder der Betrachtungsebene (ganzer Betrieb oder einzelne Anlagen bzw. Systeme) anwendbar ist. Die **Skalierung des Messequipments** ermöglicht die gleichzeitige Erfassung von bis zu 24 dreiphasigen elektrischen Verbrauchern. Die definierten Hierarchie-Ebenen der elektrischen Verteilung und Messprioritäten gewährleisten einen flexiblen Einsatz der mobilen Messtechnik. Die Messkampagnen haben jedoch auch praktische Einschränkungen aufgrund baulicher Gegebenheiten oder begrenzter Messausrüstung aufgezeigt. Trotzdem ermöglicht das entwickelte Messkonzept den systematischen Einsatz von mobiler Messtechnik in KMU und öffentlichen Gebäuden.

Das Analysekonzept beinhaltet die Entwicklung standardisierter Datenanalysen. Dabei kann zwischen **Disaggregationsanalysen**, die den Stromverbrauch transparent aufschlüsseln, und **Berechnungsverfahren zur Charakterisierung von Lastprofilen** unterschieden werden. Letztere beinhalten neue statistische Parameter zur Beurteilung des Last- und Betriebsverhaltens elektrischer Verbraucher. Grundlast-Verbraucher, die sich im Dauerbetrieb befinden oder Lastspitzen-Verbrau-

cher, die maßgeblich zur betrieblichen Spitzenlast beitragen, können anhand der Parameter identifiziert und bewertet werden. Alle Analysen werden in einem **Datenanalyse-Plan** konkreten Analyseschritten zugeordnet und abschließend auf ihre Relevanz bewertet.

Der in dieser Arbeit entwickelte Ansatz zum Einsatz mobiler Messtechnik bietet Chancen für Verwalter großer Gebäudebestände und Anbieter von Messdienstleistungen. Die Messtechnik kann im gewerblichen Bereich effizienter und flexibler eingesetzt werden, wodurch Auditverfahren und Effizienzanalysen verbessert werden. Zudem profitieren Unternehmen als Endverbraucher, indem sie einen detaillierten Einblick in ihren Stromverbrauch gewinnen und auf dieser Grundlage geeignete Effizienzmaßnahmen ergreifen.

Die Ergebnisse dieser Arbeit leisten einen relevanten Beitrag zu etablierten Verfahren der Effizienzanalyse und energetischen Optimierung im gewerblichen Bereich. Energieaudits und Verfahren zur energetischen Bewertung von Nichtwohngebäuden, wie die VDI 3807 oder DIN V 18599, können durch die systematische Erhebung realer Messdaten mittels Kurzzeitmessungen ergänzt und aufgewertet werden. So bilden nicht mehr bedarfsorientierte Kennwerte und Hochrechnungsmethoden, sondern reale Messdaten die Grundlage zur Ermittlung des energetischen Ist-Zustands.

Abstract

Despite rising electricity costs, there is still considerable potential for savings in the commercial sector. To realise this potential, details of energy and load flows are essential. The use of metering technology provides the necessary data transparency for efficiency analyses and audits. However, small and medium-sized enterprises (SME) are characterised by a heterogeneous structure. This has so far prevented the development of a standardised methodology for the systematic use of **mobile metering technology** and the analysis of the resulting data. To reduce the time and cost of using mobile measurement technology, it is also necessary to automate data analysis. However, to date there are no standardised approaches for the automated analysis of short-term measurements.

Against this background, this study develops a **systematic approach** for the use of mobile measurement technology and automated evaluation methods for electrical energy flows in the commercial sector. The aim is to increase data transparency in SMEs and public buildings through detailed electricity consumption measurements to identify and implement optimisation and cost reduction potentials.

The work is divided into two core parts. The investigation of case studies in SME and public buildings to develop a **measurement concept** and the automated evaluation of the associated measurement data in an **analysis concept**. The case studies will be used to test the feasibility and standardisation of the approach in different sectors and company sizes. From a scientific point of view, the focus is not on analysing individual cases, but on developing general measurement and audit methods.

The results of the work show that the measurement concept can be applied regardless of the sector, size or level of observation (whole company or individual systems). The **scaling of the metering equipment** allows to measure up to 24 three-phase electrical consumers simultaneously. The defined hierarchical levels of electrical distribution and measurement priorities ensure flexible use of the mobile measurement technology. However, the measurement campaigns also revealed practical limitations due to structural conditions or limited measurement equipment. Nevertheless, the measurement concept developed enables the systematic use of mobile measurement technology in SME and public buildings.

The analysis concept includes the development of standardised data analyses. A distinction can be made between **disaggregation analyses**, which provide a transparent breakdown of electricity consumption, and **calculation methods for characterising load profiles**. The latter include new statistical parameters for assessing the load and operating behaviour of electrical consumers. The parameters can be used to identify and evaluate base-load consumers that are in continuous operation or peak-load consumers that contribute significantly to the total peak load. All analyses are assigned to specific steps of analysis in a **data analysis plan** and evaluated according to their relevance.

The approach developed in this thesis offers opportunities for managers of large building portfolios and providers of metering services. Metering technology can be used more efficiently and flexibly in

the commercial sector, improving audit procedures and efficiency analysis. In addition, companies benefit from detailed insight into their electricity consumption. On this basis, they can take appropriate efficiency measures.

The results of this work contribute to established methods of efficiency analysis and energy optimisation in the commercial sector. Energy audits and procedures for the energy evaluation of non-residential buildings, such as VDI 3807 or DIN V 18599, can be improved by the systematic collection of real measured data based on mobile measurement technology. Instead of demand-oriented characteristics and extrapolation methods, real-time measurement data is used to determine the actual energy status.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	xi
Tabellenverzeichnis	xiii
Abkürzungsverzeichnis	xv
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Forschungsfragen und -ziele	3
1.3 Methodik.....	4
1.4 Aufbau der Arbeit.....	6
2 Thematische Einordnung und Grundlagen	7
2.1 Gewerbliche und öffentliche Gebäude.....	7
2.1.1 Einordnung und Klassifizierung.....	7
2.1.2 Energieverbrauch und Einsparpotenzial	9
2.2 Stand der Technik zur Analyse gewerblicher Energiesysteme.....	11
2.2.1 Definitionen und Einordnung.....	11
2.2.2 Gesetzliche Vorgaben und Regulatorik	13
2.2.3 Etablierte Normen und Analyseverfahren.....	15
2.3 Smarte Technologien und Messtechnik	21
2.3.1 Definition und Überblick.....	21
2.3.2 Intelligente Messsysteme	22
2.3.3 Energiemonitoring-Systeme.....	24
3 Stand der Forschung	27
3.1 Energieeffizienz im gewerblichen Bereich	27
3.2 Einsatz von Messtechnik in der Effizienzanalyse.....	30
3.3 Zwischenfazit: Stand der Forschung.....	33
4 Einsatz mobiler Messtechnik	34
4.1 Übersicht und Anforderungen.....	34
4.1.1 Übersicht mobile Messtechnik.....	34
4.1.2 Kriterien und Technologie-Auswahl.....	36
4.2 Messsystem zur Wirkleistungsmessung	38

4.2.1	Aufbau und Komponenten	38
4.2.2	Beschreibung der Messgrößen	40
4.2.3	Messfehler	44
4.3	Messsystem zur Scheinleistungsmessung	47
4.3.1	Aufbau und Komponenten	47
4.3.2	Beschreibung der Messgrößen	48
4.3.3	Messfehler	48
4.4	Pre-Tests zur Herleitung der Messmethode	48
5	Entwicklung und Anwendung eines Messkonzeptes mit mobiler Messtechnik	51
5.1	Ansatz für das Messkonzept.....	51
5.1.1	Festlegung des Messprinzips.....	51
5.1.2	Festlegung der Messprioritäten	54
5.1.3	Festlegung des Messzeitraums	56
5.1.4	Festlegung der Terminologie für das Messkonzept	57
5.2	Methodik der Messvorbereitung	58
5.2.1	Konzept der Messvorbereitung	58
5.2.2	Erstkontakt und Zieldefinition	59
5.2.3	Datenerfassung und Vor-Ort-Begehung	59
5.2.4	Erfassung technischer Rahmenbedingungen	60
5.2.5	Messplanung	61
5.3	Methodik der Messdurchführung.....	62
5.3.1	Konzept der Messdurchführung	62
5.3.2	Anschluss Messtechnik	63
5.3.3	Messung.....	64
5.3.4	Abbau Messtechnik	65
5.4	Durchgeführte Fallbeispiele und ihre Ergebnisse	66
5.4.1	Einordnung und Übersicht	66
5.4.2	Validierung des Messkonzeptes	74
5.5	Zwischenfazit: Messkonzept.....	78
6	Analysekonzept zur systematischen Messdatenauswertung	80
6.1	Analyseansatz	80
6.1.1	Festlegung des Datenzugriffs	80
6.1.2	Definition der Messdatensätze	81
6.1.3	Festlegung der Messdatenauflösung	82
6.1.4	Limitation für die Auswertung.....	83

6.2	Methodik der Messdatenauswertung und -analyse.....	84
6.2.1	Konzept der Messdatenauswertung und -analyse	84
6.2.2	Datenexport	85
6.2.3	Datenbereinigung	85
6.2.4	Datenanalyse.....	86
6.2.5	Ausarbeitung Ergebnisse.....	87
6.3	Berechnungsverfahren für statistische Parameter.....	87
6.3.1	Grundlagen der Lastprofilbeschreibung.....	88
6.3.2	Einteilung Ruhezeit- und Betriebszeitfenster	90
6.3.3	Leistungsspektrum.....	95
6.3.4	Grundlast und Grundlast-Faktor.....	98
6.3.5	Spitzenlast-Differenz und Lastspitzen-Faktor	102
6.3.6	Laständerung	107
6.3.7	Streuung an diskreten Zeitwerten.....	110
6.4	Entwicklung Datenanalyse-Plan	116
6.4.1	Verbrauchsdisaggregation	117
6.4.2	Grundlast-Disaggregation	120
6.4.3	Lastspitzen-Disaggregation.....	122
6.4.4	Lastprofil-Charakterisierung	126
6.4.5	Standardisierung der Datenanalyse	130
6.5	Anwendung auf die Fallbeispiele.....	132
6.5.1	Fallbeispiel Gerichtsgebäude	132
6.5.2	Fallbeispiel Polizeipräsidium	144
6.5.3	Fallbeispiel Metallverarbeitender Betrieb (Standort A)	149
6.5.4	Fallbeispiel Metallverarbeitender Betrieb (Standort B).....	153
6.5.5	Fallbeispiel Lüftungsanlage	158
6.5.6	Fallbeispiel Kälteanlage	162
6.6	Fehlerdiskussion.....	165
6.6.1	Disaggregationsanalysen	165
6.6.2	Berechnungsverfahren zur Lastprofil-Charakterisierung	167
6.7	Zwischenfazit: Analysekonzept	170
7	Gesamtbewertung und Diskussion der Ergebnisse	172
7.1	Mehrwerte des entwickelten Ansatzes.....	172
7.1.1	Mehrwert durch Datenerhebung und Analyse	173
7.1.2	Mehrwert durch Effizienz und Flexibilität des Ansatzes.....	179
7.2	Einflussfaktoren auf die Umsetzung in der Praxis.....	182

7.2.1 Chancen und Handlungsempfehlungen für die Umsetzung	183
7.2.2 Chancen zur Weiterentwicklung und zukünftige Anwendungen	185
8 Fazit	187
Literaturverzeichnis	190
Anhang	202
Methodik Messkonzept	203
Methodik Analysekonzept	205
Ergänzende Unterlagen Fallbeispiel Gerichtsgebäude	206
Ergänzende Unterlagen Fallbeispiel Polizeipräsidium.....	209
Ergänzende Unterlagen Fallbeispiel Metallverarbeitender Betrieb (Standort A)	214
Ergänzende Unterlagen Fallbeispiel Metallverarbeitender Betrieb (Standort B)	219
Ergänzende Unterlagen Fallbeispiel Lüftungsanlage	224
Ergänzende Unterlagen Fallbeispiel Kälteanlage.....	226

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Methodik zur Erarbeitung des Mess- und Analysekonzeptes.....	5
Abbildung 2: Einordnung Energiemanagement in Unternehmen (eigene Darstellung nach [45])	11
Abbildung 3: Aufbau von Energiesystemen im gewerblichen Bereich (eigene Darstellung nach [49])	13
Abbildung 4: Übersicht über die Teile der DIN V 18599 [62].....	18
Abbildung 5: Technologie-Screening zu smarten Technologien für Unternehmen (eigene Darstellung).....	21
Abbildung 6: Aufbau eines intelligenten Messsystems (eigene Darstellung, Bilder <i>ppc AG</i> und <i>Swistec GmbH</i>).....	23
Abbildung 7: Technisches Monitoring mit Unterbereichen (eigene Darstellung nach [77])	24
Abbildung 8: Schematischer Aufbau von Energiemonitoring-Systemen (eigene Darstellung).....	25
Abbildung 9: Erfassung von Stromverbräuchen – Differenzierung zwischen Smart Metern und Submetering (eigene Darstellung)	26
Abbildung 10: Mobiles Messsystem zur Wirkleistungsmessung	38
Abbildung 11: Anschlusschema des Messsystems im dreiphasigen Niederspannungsnetz	39
Abbildung 12: Kabelumbau-Stromwandler (links) und Rogowski-Spule (rechts) [121, 122].....	39
Abbildung 13: Prinzip eines Kabelumbau-Stromwandlers zur Messung des Leiterstroms (eigene Darstellung nach [123])	41
Abbildung 14: Prinzip einer Rogowski-Spule zur Messung des Leiterstroms [126]	42
Abbildung 15: Komponenten des Messsystems zur Scheinleistungsmessung (links Homepage, rechts Dreiphasen-Sensor) [131]	47
Abbildung 16: Top-Down und Bottom-Up-Ansatz zum Einsatz mobiler Messtechnik (eigene Darstellung nach [108])	50
Abbildung 17: Aufschlüsselung der Unternehmensstruktur in Hierarchie-Ebenen und äquivalente Ebenen in der elektrischen Verteilung.....	52
Abbildung 18: Grundprinzip bei der Messung elektrischer Haupt- und Unterverteilungen	53
Abbildung 19: Identifikation großer, mittlerer und kleiner elektrischer Verbraucher anhand der Hierarchie-Ebenen in der elektrischen Verteilung	55
Abbildung 20: Terminologie für das Messkonzept.....	57
Abbildung 21: Beispielhafter Auszug aus einem Messplan	62
Abbildung 22: Datenzugriff für das Mess- und Analysekonzept	81
Abbildung 23: Zusammenhang zwischen einer Messreihe und einem Messdatensatz	82
Abbildung 24: Lastprofil elektrische Wirkleistung eines Bürogebäudes (Referenzwoche)	88
Abbildung 25: Dauerlinie Lastprofil Bürogebäude (Referenzwoche).....	89
Abbildung 26: Einteilung einer Datenreihe in Ruhezeit- und Betriebszeitfenster	94
Abbildung 27: Leistungsspektrum der Datenreihe Bürogebäude	97
Abbildung 28: Einordnung Wertebereich Grundlast-Faktor anhand absoluter Klassenhäufigkeiten der in den Fallbeispielen erfassten Datenreihen (n=108).....	100
Abbildung 29: Vergleich der berechneten mittleren Grundlast mit der minimalen Grundlast anhand der Dauerlinie einer Datenreihe	101
Abbildung 30: Anwendung des Grundlast-Faktors auf beispielhafte Datenreihen	102
Abbildung 31: Einordnung Wertebereich Lastspitzen-Faktor anhand absoluter Klassenhäufigkeiten der in den Fallbeispielen erfassten Datenreihen (n=108).....	105

Abbildung 32: Verdeutlichung der Spitzenlast-Differenz (Beispiel Referenzwoche Bürogebäude).....	106
Abbildung 33: Anwendung des Lastspitzen-Faktors auf beispielhafte Datenreihen.....	106
Abbildung 34: Einordnung Wertebereich Laständerungsrate Betriebszeit anhand absoluter Klassenhäufigkeiten der in den Fallbeispielen erfassten Datenreihen (n=108).....	109
Abbildung 35: Anwendung der Laständerungsrate Betriebszeit auf beispielhafte Datenreihen.....	110
Abbildung 36: Ausschnitt von vier Leistungswerten (00:00-00:45h) eines Streudiagramms.....	111
Abbildung 37: Einordnung Wertebereich Quartilsdispersionskoeffizient Betriebszeit anhand absoluter Klassenhäufigkeiten der in den Fallbeispielen erfassten Datenreihen (n=108).....	114
Abbildung 38: Anwendung des Quartilsdispersionskoeffizienten Betriebszeit auf beispielhafte Datenreihen	115
Abbildung 39: Grundprinzip Verbrauchsdisaggregation	118
Abbildung 40: Grundprinzip Grundlast-Disaggregation	121
Abbildung 41: Grundprinzip Lastspitzen-Disaggregation.....	123
Abbildung 42: Vergleich der Leistungsspektren des Lüftungs- und Kompressorsystems.....	127
Abbildung 43: Standardisierter Datenanalyse-Plan für das Analysekonzept	131
Abbildung 44: Schema elektrische Verteilung und Messpunkte - Fallbeispiel Gerichtsgebäude.....	132
Abbildung 45: Verbrauchsdisaggregation nach Messpunkten - Fallbeispiel Gerichtsgebäude	133
Abbildung 46: Verbrauchsdisaggregation nach Verwendungszweck – Fallbeispiel Gerichtsgebäude	134
Abbildung 47: Grundlast-Disaggregation nach Messpunkten – Fallbeispiel Gerichtsgebäude	136
Abbildung 48: Grundlast-Disaggregation nach Verwendungszweck – Fallbeispiel Gerichtsgebäude.....	137
Abbildung 49: Berechnete mittlere Grundlast und Grundlast-Faktor der erfassten Messpunkte - Fallbeispiel Gerichtsgebäude.....	138
Abbildung 50: Lastgradienten der erfassten Messpunkte zum Zeitpunkt der Top 5 Lastspitzen - Fallbeispiel Gerichtsgebäude.....	139
Abbildung 51: Spitzenlast-Differenz und Lastspitzen-Faktor der erfassten Messpunkte - Fallbeispiel Gerichtsgebäude.....	140
Abbildung 52: Vergleich Leistungsspektrum der beiden identifizierten Cluster erfasster Messpunkte - Fallbeispiel Gerichtsgebäude.....	141
Abbildung 53: Lastgradient und Laständerungsrate Betriebszeit der erfassten Messpunkte - Fallbeispiel Gerichtsgebäude.....	142
Abbildung 54: Mittlerer Interquartilsabstand und Quartilsdispersionskoeffizient Betriebszeit der erfassten Messpunkte – Fallbeispiel Gerichtsgebäude.....	143
Abbildung 55: Schema elektrische Verteilung und Messreihen - Fallbeispiel Polizeipräsidium	144
Abbildung 56: Schema elektrische Verteilung und Messpunkte - Fallbeispiel metallv. Betrieb (Standort A).....	149
Abbildung 57: Schema elektrische Verteilung und Messpunkte - Fallbeispiel metallv. Betrieb (Standort B).....	154
Abbildung 58: Schema elektrische Verteilung und Messpunkte – Fallbeispiel Lüftungsanlage	158
Abbildung 59: Schema elektrische Verteilung und Messpunkte - Fallbeispiel Kälteanlage	162
Abbildung 60: Vergleich Leistungsspektren der Kälteanlagen	163

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Forschungsfragen für das Mess- und Analysekonzept	4
Tabelle 2: Schwellenwerte für KMU nach EU-Definition (eigene Darstellung nach [16])	8
Tabelle 3: Verwendungszwecke elektrischer Energie nach VDI 3807 (eigene Darstellung nach [66])	20
Tabelle 4: Rollout Vorgaben für den Einbau intelligenter Messsysteme in Deutschland [75]	24
Tabelle 5: Gegenüberstellung mobiler und stationärer Messsysteme (ergänzt aus [108])	35
Tabelle 6: Anwendung der Kriterien auf die Messsysteme	37
Tabelle 7: Messfehlerbetrachtung Messsystem zur Wirkleistungsmessung	45
Tabelle 8: Genauigkeit der verwendeten Stromwandler	45
Tabelle 9: Genauigkeit der verwendeten Messspulen	46
Tabelle 10: Überblick durchgeführter Pre-Tests zur Herleitung der Messmethode	49
Tabelle 11: Zusammenhang Hierarchie-Ebenen und elektrische Verteilung	53
Tabelle 12: Skalierung des Messequipments für die Durchführung der Fallbeispiele	54
Tabelle 13: Kriterien zum Anschluss der Messwandler	56
Tabelle 14: Arbeitsschritte Messvorbereitung	58
Tabelle 15: Informationen zur grundlegenden Datenerfassung	59
Tabelle 16: Berücksichtigung technischer Aspekte für den Einsatz mobiler Messtechnik	61
Tabelle 17: Arbeitsschritte Messdurchführung	63
Tabelle 18: Dokumentation der Messkanaleigenschaften (Beispiel)	64
Tabelle 19: Einordnung und Kategorisierung der durchgeführten Fallbeispiele	66
Tabelle 20: Vorstellung Messkampagne Fallbeispiel Gerichtsgebäude	67
Tabelle 21: Vorstellung Messkampagne Fallbeispiel Polizeipräsidium	69
Tabelle 22: Vorstellung Messkampagne Fallbeispiel metallverarbeitender Betrieb (Standort A)	70
Tabelle 23: Vorstellung Messkampagne Fallbeispiel metallverarbeitender Betrieb (Standort B)	71
Tabelle 24: Vorstellung Messkampagne Fallbeispiel Lüftungsanlage	73
Tabelle 25: Vorstellung Messkampagne Fallbeispiel Kälteanlage	74
Tabelle 26: Formatierung eines aufbereiteten Messdatensatzes	82
Tabelle 27: Limitationen für die Auswertung	83
Tabelle 28: Arbeitsschritte Messdatenauswertung und -analyse	84
Tabelle 29: Möglichkeiten zum Vergleich der RLM-Lastgangdaten mit erfassten Messdaten	86
Tabelle 30: Fallunterscheidung zur Ermittlung des Schwellenwertes (erster Iterationsschritt)	92
Tabelle 31: Parameter zur Beschreibung des Ruhezeit- und Betriebszeitfensters	94
Tabelle 32: Parameter zur Beschreibung des Ruhezeit- und Betriebszeitfensters (Beispiel Referenzwoche Bürogebäude)	95
Tabelle 33: Merkmale zur Interpretation des Leistungsspektrums	97
Tabelle 34: Identifikation der Lastniveaus anhand des Leistungsspektrums (Beispiel Referenzwoche Bürogebäude)	98
Tabelle 35: Einordnung Wertebereich Grundlast-Faktor	100
Tabelle 36: Einordnung Wertebereich Lastspitzen-Faktor	104
Tabelle 37: Einordnung Wertebereich mittlere Laständerungsrate	108

Tabelle 38: Parameter zur Beschreibung der Laständerung für Betriebstage (Beispiel Referenzwoche Bürogebäude).....	110
Tabelle 39: Einordnung Wertebereich mittlerer Quartilsdispersionskoeffizient	114
Tabelle 40: Parameter zur Beschreibung der Streuung an diskreten Zeitwerten für Betriebstage (Beispiel Referenzwoche Bürogebäude).....	115
Tabelle 41: Motivation und Ziele Datenanalyse Verbrauchsdisaggregation	117
Tabelle 42: Ergebnisse Verbrauchsdisaggregation nach Messpunkten (Fallbeispiel Gerichtsgebäude)	119
Tabelle 43: Motivation und Ziele Datenanalyse Grundlast-Disaggregation	120
Tabelle 44: Ergebnisse Grundlast-Disaggregation nach Messpunkten (Fallbeispiel Gerichtsgebäude).....	121
Tabelle 45: Motivation und Ziele Datenanalyse Lastspitzen-Disaggregation	123
Tabelle 46: Ergebnisse Lastspitzen-Disaggregation (Fallbeispiel Gerichtsgebäude)	125
Tabelle 47: Motivation und Ziele Datenanalyse Lastprofil-Charakterisierung	126
Tabelle 48: Vergleich der Ruhezeit- und Betriebszeitfenster für das Lüftungs- und Kompressorsystem	127
Tabelle 49: Identifizierte Lastniveaus des Lüftungs- und Kompressorsystems	128
Tabelle 50: Vergleich der Laständerung des Lüftungs- und Kompressorsystems	128
Tabelle 51: Vergleich der Streuung an diskreten Zeitwerten für das Lüftungs- und Kompressorsystem	129
Tabelle 52: Definition der Analyseschritte und Zuordnung der standardisierten Datenanalysen	130
Tabelle 53: Kennwerte zur Bewertung der Datenanalyse Verbrauchsdisaggregation – Fallbeispiel Gerichtsgebäude	134
Tabelle 54: Kennwerte zur Bewertung der Datenanalyse Grundlast-Disaggregation – Fallbeispiel Gerichtsgebäude	136
Tabelle 55: Kenndaten der Top 5 Lastspitzen – Fallbeispiel Gerichtsgebäude.....	139
Tabelle 56: Einordnung erfasster Output-Datenreihen nach Verwendungszweck (VDI 3807).....	144
Tabelle 57: Einordnung erfasster Messpunkte nach Verwendungszweck - Fallbeispiel metallv. Betrieb (Standort A).....	149
Tabelle 58: Einordnung erfasster Messpunkte nach Verwendungszweck - Fallbeispiel metallv. Betrieb (Standort B).....	154
Tabelle 59: Detailanalysen Lüftungsanlagen	160
Tabelle 60: Validierung der Disaggregationsanalysen mittels RLM-Lastgangdaten	166
Tabelle 61: Differenzierung durchgeführter Fallbeispiele nach Analyseschwerpunkt	173
Tabelle 62: Einstufung der Relevanz zur Beurteilung der Datenanalysen	174
Tabelle 63: Einordnung und Bewertung entwickelter Disaggregationsanalysen	175
Tabelle 64: Einordnung und Bewertung entwickelter Berechnungsverfahren	177
Tabelle 65: Indikatoren zur Durchführung von Detailanalysen.....	179
Tabelle 66: Maßnahmen zur Erhöhung der Effizienz des entwickelten Ansatzes	180
Tabelle 67: Maßnahmen zur Erhöhung der Flexibilität des entwickelten Ansatzes.....	181
Tabelle 68: Vergleich Zeitaufwand der Fallbeispiele Metallverarbeitender Betrieb – Standort A und B	182

Abkürzungsverzeichnis

AV	Allgemeinversorgung
BDEW	Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft
BHKW	Blockheizkraftwerk
BSI	Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik
COPS	Coefficient of Performance System
DAkkS	Deutsche Akkreditierungsstelle
DIN	Deutsches Institut für Normung
EC	European Commission
EDL-G	Energiedienstleistungsgesetz
EED	Energy Efficiency Directive
EMAS	Eco-Management and Audit Scheme
EnEfG	Energieeffizienzgesetz
EnEV	Energieeinsparverordnung
EnPI	Energy Performance Indicator
EnWG	Energiewirtschaftsgesetz
EPBD	Energy Performance of Buildings Directive
EU	Europäische Union
GEG	Gebäudeenergiegesetz
GLT	Gebäudeleittechnik
GHD	Gewerbe Handel Dienstleistungen
GHV	Gebäudehauptverteilung
GNDEW	Gesetz zum Neustart der Digitalisierung der Energiewende
HV	Hauptverteilung
IEA	International Energy Agency
IKT	Informations- und Kommunikationstechnologien
iMSys	Intelligente Messsysteme
IWU	Institut für Wohnen und Umwelt

HV	Hauptverteilung
KfW	Kreditanstalt für Wiederaufbau
KI	Künstliche Intelligenz
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
LAN	Local Area Network
LED	Light Emitting Diode
MsbG	Messstellenbetriebsgesetz
NSHV	Niederspannungshauptverteilung
OECD	Organization for Economic Co-operation and Development
PDCA	Plan-Do-Check-Act
PV	Photovoltaik
PwC	PricewaterhouseCoopers
RLM	Registrierende Leistungsmessung
SEU	Significant Energy Use (wesentlicher Energieeinsatz)
SLP	Standardlastprofil
SQL	Structured Query Language
SpaEfV	Spitzenausgleich-Effizienzsystemverordnung
StromStG	Stromsteuergesetz
SV	Sicherheitsversorgung
USV	Unterbrechungsfreie Stromversorgung
UV	Unterverteilung
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VG	Verbrauchergruppe
WLAN	Wireless Local Area Network

Kapitel 1

Einleitung

Dieses Kapitel beinhaltet zunächst eine Einleitung in das Thema und den Kontext der Arbeit. Dazu wird der Hintergrund und die Motivation für das Thema beschrieben und auf den übergeordneten Rahmen eingegangen (Kapitel 1.1). Auf dieser Basis werden sowohl Zielsetzung und konkrete Forschungsfragen abgeleitet (Kapitel 1.2). Schließlich werden in Kapitel 1.3 die Methodik und in Kapitel 1.4 der Aufbau der Arbeit beschrieben.

1.1 Motivation

Die Europäische Union (EU) verfolgt zunehmend ambitioniertere Klimaziele und setzt striktere Vorgaben zur Energieeffizienz-Thematik auf. Gerade den verbrauchsstarken Industrie- und Gewerbesektoren kommt dabei eine entscheidende Rolle zu [1]. Aber auch der Gebäudesektor muss effizienter werden, schließlich trägt er global zu einem Drittel des gesamten Energieverbrauchs und der Emissionen bei [2]. Auch in der EU wird etwa 40% der gesamten Energie in Gebäuden verbraucht [3]. Um dem auf EU-Ebene aufgesetzten Effizienzziel zur Reduktion des Endenergieverbrauchs um 11,7% bis zum Jahr 2030¹ nachzukommen, sind die Länder dazu angehalten nationale Aktionspläne aufzusetzen. So hat die Deutsche Bundesregierung im Dezember 2019 die Effizienzstrategie 2050 veröffentlicht, die eine Effizienzsteigerung zur Erreichung der nationalen Klimaziele (Treibhausgasneutralität bis 2045) vorsieht und Maßnahmen aufsetzt [4]. Die Effizienzziele wurden zuletzt in 2023 durch das novellierte Energieeffizienzgesetz verschärft. So soll der Endenergieverbrauch bis zum Jahr 2030 um 26,5% über alle Verbrauchssektoren reduziert werden [5]. Zusätzlich wird ein klimaneutraler Gebäudebestand angestrebt [6].

¹ Ggü. dem im Referenzszenario 2020 prognostizierten Energieverbrauch bis 2030.

Die Erfahrungen aus dem Forschungsprojekt *Smarte Technologien für Unternehmen* haben aufgezeigt, dass die teilweise erheblichen Effizienz- und Verbrauchsreduktionspotenziale von KMU aktuell nicht umfänglich genutzt werden (vgl. *Hilger, Schneiders et al.* 2021) [7]. Die Gründe dafür liegen häufig an einem Mangel an Zeit, Wissen und personellen Ressourcen seitens der Unternehmen, um sich intensiv mit dem Thema zu beschäftigen [8]. Viele KMU sind zu sehr auf alltägliche Betriebsabläufe fokussiert, realisieren die mit dem Energieverbrauch verbundenen Kosten nicht und wissen nicht, wo im Betrieb überhaupt Energie verbraucht wird. In der Literatur wird in diesem Kontext auch vom *Energy Efficiency Gap* gesprochen [9].

Die EU-Energieeffizienzrichtlinie hebt hervor, dass das Potenzial für Energieeinsparungen durch den Einsatz **digitaler Technologien** voll ausgeschöpft werden sollte [10]. Auch die auf Bundesebene aufgesetzte Effizienzstrategie sieht in digitalen Technologien einen „Enabler“ für neue Geschäftsmodelle in der Energiewirtschaft und eine Chance zur Steigerung der Energieeffizienz [4]. Die Bereitstellung detaillierter Informationen über den Energieverbrauch, der Einsatz künstlicher Intelligenz in der Datenauswertung und digitale Lösungen in der Energieberatung sind nur einige Anwendungsfelder, anhand derer die Chancen durch Digitalisierung zur Steigerung der Energieeffizienz verdeutlicht werden [4].

An dieser Stelle wurde in dem Forschungsprojekt angesetzt, um einen Lösungsansatz für KMU basierend auf dem Einsatz digitaler bzw. smarterer Technologien zu entwickeln. Mit dem Technologie-Screening wurde ein breiter Markt für smarte Technologien identifiziert – jedoch bestehen nur wenige spezifische Lösungen, die für KMU geeignet sind. Eine derartige Lösung sind Energiemonitoring-Systeme, die zur Schaffung von Transparenz über die Energie- und Lastflüsse eingesetzt werden und damit eine Basis zur Identifikation von Effizienzpotenzialen in Unternehmen schaffen [11]. Für KMU eignen sich in erster Linie Lösungsansätze mit geringem Installationsaufwand und einem guten Kosten-Nutzen-Verhältnis. Daher bot sich der **Einsatz mobiler Messtechnik** an. Der Einsatz eines mobilen Messsystems ist (im Vergleich zu stationären Systemen) mit einem geringen Installationsaufwand möglich. Die Transparenz über den Energieverbrauch bietet für KMU die Möglichkeit, Einsparpotenziale zu identifizieren und anhand der Messwerte auch zu quantifizieren.

Der Blick auf Referenzprojekte verdeutlicht, dass nach wie vor Potenzial zur Entwicklung eines systematischen Ansatzes zur Effizienzanalyse mit mobiler Messtechnik besteht. So greift *Hein et al.* (2018) [11] ebenfalls auf Kurzzeitmessungen vor und nach der Umsetzung von Effizienzmaßnahmen zurück. In diesem Zusammenhang wird auch auf die Optimierung der Energieberatung durch den Einsatz von Messtechnik hingewiesen, da Energieberater aus Zeitmangel in der Regel keine Energieverbrauchsmessungen durchführen. Darüber hinaus zeigen Studien, dass die Qualität von Energieaudits unmittelbar die Umsetzung von Effizienzmaßnahmen beeinflusst [12]. Im Projekt *Teilenergiekennwerte von Nichtwohngebäuden* des *Instituts für Wohnen und Umwelt GmbH* (IWU) wurde eine Methodik zur energetischen Analyse von Nichtwohngebäuden im Bestand mittels EXCEL-Tools entwickelt. Die Umsetzung der Tools ist angelehnt an die DIN V 18599, dessen Analyseverfahren für Einsparpotenziale und Schwachstellenanalysen häufig als zu aufwendig und zeitintensiv bezeichnet wird [13]. Die Erhebung detaillierter, realer Verbrauchsdaten könnte die energetische Analyse von Nichtwohngebäuden zusätzlich qualitativ aufwerten.

Die ersten Erfahrungen mit mobiler Messtechnik im Forschungsprojekt *Smarte Technologien für Unternehmen* haben das Potenzial zur Anwendung der Technologie in der Praxis dargelegt [7]. So kann die Effizienzanalyse mittels mobiler Messtechnik an vielen Stellen systematisiert und weiterentwickelt werden [7]. Die Ergänzung des Messequipments sowie die Weiterentwicklung des Messkonzeptes einschließlich des Messdatenexports und der Messdatenauswertung sind Bausteine, an die auf Basis der vorangegangenen Arbeiten angeknüpft werden kann. Vor diesem Hintergrund befasst sich diese Arbeit mit dem systematischen Einsatz mobiler Messtechnik und der Entwicklung automatisierter Auswertemethoden für elektrische Energieflüsse im gewerblichen Bereich.

1.2 Forschungsfragen und -ziele

Im gewerblichen Bereich besteht aufgrund fehlender Datentransparenz nach wie vor ein hohes Einsparpotenzial [14]. Dieses Einsparpotenzial wird bisher nicht erschlossen, da die verfügbaren Ansätze zu aufwendig oder oberflächlich sind. Digitale Technologien können diese Einsparpotenziale erschließen und mit dem Einsatz mobiler Messtechnik Transparenz über die Energie- und Lastflüsse schaffen. Vor diesem Hintergrund wird für diese Arbeit die folgende Zielsetzung definiert:

Entwicklung eines systematischen, branchenübergreifenden Ansatzes zur Analyse elektrischer Energieflüsse im gewerblichen Bereich basierend auf dem Einsatz mobiler Messtechnik.

Unmittelbar aus dieser Zielsetzung wird auch die **zentrale Forschungsfrage** abgeleitet:

Welchen Nutzen und Mehrwert liefert der Einsatz mobiler Messtechnik in einem systematischen, branchenübergreifenden Ansatz zur Analyse elektrischer Energieflüsse im gewerblichen Bereich?

Zur Beantwortung der Forschungsfragen ist diese Arbeit in die Kernbausteine Messkonzept und Analysekonzept gegliedert. Beim **Messkonzept** liegt der Fokus auf dem Einsatz mobiler Messtechnik in Fallbeispielen. Das Ziel ist dabei eine möglichst systematische und effiziente Erhebung von Messdaten mit mobiler Messtechnik. Das **Analysekonzept** setzt den Fokus auf die Entwicklung von Methoden zur automatisierten Datenauswertung auf der Grundlage der erhobenen Messdaten.

Die nachfolgende Tabelle stellt die mit dem Mess- und Analysekonzept verschränkten Forschungsfragen dar (s. Tabelle 1, Folgeseite). Darüber hinaus werden die Ansätze zur Beantwortung der Forschungsfragen aufgezeigt. Für das Messkonzept umfasst dies die Auswahl der Messtechnik, die Festlegung des Messequipments, die Definition von Arbeitsschritten für die Messmethode sowie die Identifikation von Indikatoren für die Durchführung einer Messung. Die Forschungsfragen zum Analysekonzept werden auf der Grundlage der erhobenen Messdaten beantwortet. Dabei liegt der Fokus auf der Entwicklung standardisierter Datenanalysen. Ein Datenanalyse-Plan ordnet die Analysen hinsichtlich konkreter Analyseschritte ein.

Tabelle 1: Forschungsfragen für das Mess- und Analysekonzept

Kernbaustein	Forschungsfragen	Beantwortung
Messkonzept	<p>Wie kann mobile Messtechnik effizient und systematisch zur Analyse elektrischer Energieflüsse im gewerblichen Bereich eingesetzt werden?</p> <p>Welche Anforderungen gibt es an die eingesetzte mobile Messtechnik?</p> <p>Wie sollte die mobile Messtechnik eingesetzt werden?</p> <p>Wann ist der Einsatz mobiler Messtechnik sinnvoll und wann kann darauf verzichtet werden?</p>	<p>Kriterien-basierte Auswahl der Messtechnik und Festlegung des Messequipments</p> <p>Definition von Arbeitsschritten der Messmethode</p> <p>Identifikation von Indikatoren und Kriterien für eine systematische Entscheidung über den Einsatz mobiler Messtechnik</p>
Analysekonzept	<p>Wie kann die Datenauswertung und -analyse vereinfacht und automatisiert werden?</p> <p>Welche Datenanalysen und Berechnungsverfahren werden durch den Einsatz mobiler Messtechnik ermöglicht?</p> <p>Wann ist eine individuelle Detailanalyse sinnvoll und wann kann darauf verzichtet werden?</p>	<p>Ausarbeitung standardisierter Datenanalysen und Datenanalyse-Plan anhand der Messdaten aus den Fallbeispielen</p> <p>Identifikation von Indikatoren und Kriterien für eine systematische Datenauswertung</p>

1.3 Methodik

Auf der Grundlage mehrerer im Forschungsprojekt *Smarte Technologien für Unternehmen* [7] durchgeführter Pre-Tests zum Einsatz mobiler Messtechnik wurde zunächst ein Messkonzept erarbeitet und ein Analyseansatz entwickelt. Zugleich erfolgte eine weitere Eingrenzung des Themas, indem unter anderem die Erfassung elektrischer Energieflüsse und die zugehörige mobile Messtechnik in den Fokus der Betrachtung gerückt sind. Die Erfahrungen aus den durchgeführten Pre-Tests sind sowohl in die technische (u.a. Skalierung Messequipment) als auch die methodische (u.a. Definition Arbeitsschritte) Ausgestaltung des Messkonzeptes eingeflossen.

Die beiden Kernbausteine dieser Arbeit sind in Abbildung 1 (Folgeseite) mit den jeweiligen methodischen Abschnitten schematisch dargestellt. Im Zeitraum von 2021 bis 2023 wurden insgesamt sechs Fallbeispiele durchgeführt. Dabei fanden Messkampagnen in verschiedenen gewerblichen und öffentlichen Gebäuden statt. Das zuvor erarbeitete **Messkonzept** wurde in der Praxis angewendet und validiert (Schritt 1). Die Erkenntnisse und Lessons Learnt dienen zur Ausarbeitung des finalen Messkonzeptes.

Mit der Durchführung der Fallbeispiele wurde zugleich eine Datengrundlage zur Entwicklung des **Analysekonzeptes** geschaffen (Schritt 2). Unter Berücksichtigung aller erhobenen Messdaten wurden standardisierte Datenanalysen erarbeitet, die eine systematische Bewertung der Messergebnisse zulassen.

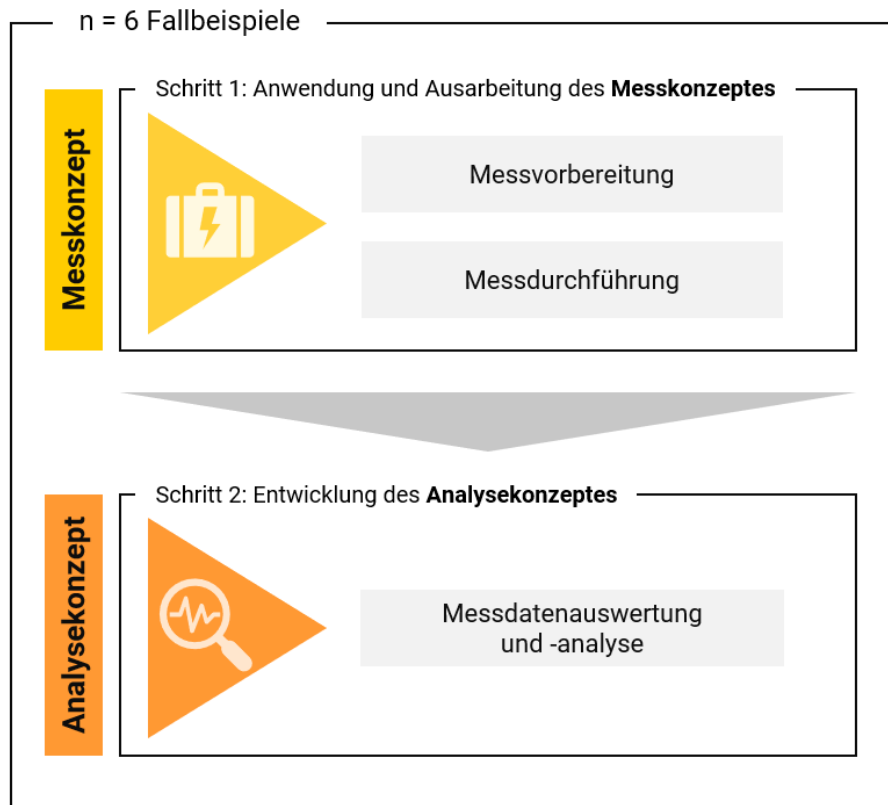


Abbildung 1: Methodik zur Erarbeitung des Mess- und Analysekonzeptes

Das Messkonzept basiert auf Praxiserfahrungen und umfasst den systematischen Einsatz der mobilen Messtechnik in den Fallbeispielen. Mit der „Messvorbereitung“ und der „Messdurchführung“ ist das Messkonzept aus zwei methodischen Abschnitten aufgebaut. Hier werden unter anderem Anforderungen an die eingesetzte Messtechnik definiert. Die Umsetzung der erarbeiteten methodischen Schritte zeigt, wie mobile Messtechnik im Rahmen von Effizienzanalysen im gewerblichen Bereich effizient und flexibel eingesetzt werden kann. Anhand konkreter Indikatoren und Kriterien wird definiert, wann der Einsatz mobiler Messtechnik sinnvoll ist und welche Zielsetzung hinter einer Messung steht.

Auf der Basis der erhobenen Messdatensätze erfolgt im zweiten Schritt die Anwendung des Analysekonzeptes (vgl. Abbildung 1). Der Abschnitt „Messdatenauswertung und -analyse“ umfasst dazu standardisierte Datenanalysen, die auf die Messdatensätze angewendet werden können. Das Analysekonzept beinhaltet weiterhin einen Datenanalyse-Plan, der die entwickelten Analysen zusammenfasst und konkreten Analyseschritten zuordnet. Die Anwendung dieser Analysen erfolgt je nach Zielsetzung der Messung und erfasster Datenreihen.

1.4 Aufbau der Arbeit

Die bereits vorgestellten Kernbausteine bilden die Grundlage für den Aufbau der vorliegenden Arbeit. Im Folgenden werden die Inhalte der einzelnen Kapitel vorgestellt, um einen Überblick über die Struktur der Arbeit zu geben.

Kapitel 2 *Thematische Einordnung und Grundlagen* ordnet das Thema der Arbeit zunächst in den fachlichen Kontext ein. Dabei werden die für das Verständnis und die Durchführung der Forschungsarbeit wesentlichen technischen Grundlagen als auch regulatorische Rahmenbedingungen beschrieben. Auch Begrifflichkeiten, die im weiteren Verlauf der Arbeit immer wieder auftauchen, werden definiert.

In Kapitel 3 *Stand der Forschung* wird der aktuelle Forschungsstand erläutert und die bestehende Forschungslücke identifiziert. Die Herleitung der Themenbereiche „Energieeffizienz im gewerblichen Bereich“ und „Einsatz mobiler Messtechnik in der Effizienzanalyse“ verdeutlicht, wie diese Bereiche miteinander verknüpft sind und an welcher Stelle die vorliegende Arbeit ansetzt.

Kapitel 4 *Einsatz mobiler Messtechnik* umfasst eine Übersicht zu mobilen Messsystemen, wobei unter anderem die spezifischen Anforderungen an die ausgewählte Messtechnik beschrieben werden. Die verwendeten Messsysteme zur Wirk- und Scheinleistungsmessung werden vorgestellt. Dabei erfolgt jeweils eine Beschreibung des Aufbaus und der Komponenten sowie der Messgrößen und Messfehler. Schließlich wird auf die durchgeführten Pre-Tests eingegangen, die eine Grundlage für den entwickelten Ansatz und die gewählte Messmethode darstellen.

In Kapitel 5 *Entwicklung und Anwendung des Messkonzeptes mit mobiler Messtechnik* erfolgt eine detaillierte Vorstellung der Messmethode. Die methodischen Abschnitte und Arbeitsschritte des Messkonzeptes werden ausführlich beschrieben, um ein Verständnis zum Einsatz mobiler Messtechnik zu vermitteln. Weiterhin werden die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Fallbeispiele vorgestellt. Abschließend werden die Lessons Learnt aus der praktischen Anwendung diskutiert.

Kapitel 6 *Analysekonzept zur automatisierten Messdatenauswertung* widmet sich der Vorstellung des entwickelten Analysekonzeptes. Dazu werden die standardisierten Datenanalysen beschrieben, darunter Disaggregationsanalysen und Berechnungsverfahren zu statistischen Parametern. Im Anschluss erfolgt die Anwendung der Analysen auf die bereits vorgestellten Fallbeispiele. Die Ergebnisse dieser Analysen werden diskutiert, wobei insbesondere die gewonnenen Erkenntnisse und Lessons Learnt zur Anwendung der Analysen sowie häufige Fehler und deren Ursachen in der Datenauswertung thematisiert werden.

Kapitel 7 *Gesamtbewertung und Diskussion der Ergebnisse* umfasst die übergreifende Bewertung des entwickelten Ansatzes. Es wird aufgezeigt, welche Mehrwerte der systematische Einsatz mobiler Messtechnik im Zuge von Effizienzanalysen mit sich bringt. Zudem werden die Einflussfaktoren beleuchtet, die eine Umsetzung des Ansatzes in der Praxis beeinflussen. Mit einer Einschätzung der Chancen zur Umsetzung des Ansatzes aus der Perspektive verschiedener Akteure und einem Ausblick zum weiteren Forschungsbedarf schließt das Kapitel.

Abschließend wird in Kapitel 8 ein *Fazit* zur vorliegenden Arbeit gezogen.

Kapitel 2

Thematische Einordnung und Grundlagen

Dieses Kapitel umfasst die für diese Arbeit relevanten Grundlagen. Dazu erfolgt eine grundlegende Einordnung und Abgrenzung des Themas in den fachlichen Kontext. Kapitel 2.1 beschreibt zunächst den Status-Quo gewerblicher und öffentlicher Gebäude. Neben einer allgemeinen Einordnung und Klassifizierung von Unternehmen und öffentlichen Gebäuden wird ein Überblick über den Energieverbrauch und die Einsparpotenziale in diesem Bereich gegeben. Kapitel 2.2 widmet sich dem Stand der Technik zur Analyse gewerblicher Energiesysteme, wobei unter anderem auf allgemeine Definitionen, eine Einordnung der gesetzlichen Vorgaben und Regulatorik sowie etablierte Normen und Analyseverfahren eingegangen wird. Abschließend umfasst Kapitel 2.3 eine Erläuterung und Eingrenzung der für die Arbeit relevanten Technologien.

2.1 Gewerbliche und öffentliche Gebäude

2.1.1 Einordnung und Klassifizierung

Die folgenden Abschnitte beinhalten zunächst eine Einordnung und Klassifizierung gewerblicher und öffentlicher Gebäude. Dazu werden die Begrifflichkeiten „KMU“, „Mittelstand“ sowie „Nichtwohngebäude“ und „öffentliche Gebäude“ voneinander abgegrenzt.

Definition des Begriffs KMU

Für kleine und mittlere Unternehmen (KMU) werden auf europäischer und nationaler Ebene unterschiedliche Definitionen verwendet. In Deutschland verwendet das *Institut für Mittelstandsforschung (IfM)* beispielsweise eine Definition nach quantitativen Kriterien wie dem Jahresumsatz (< 50 Mio. EUR) und der Mitarbeiterzahl (< 500 Mitarbeiter) [15].

Auf europäischer Ebene ist jedoch die KMU-Definition nach der Vorgabe 2003/361/EG der Europäischen Kommission relevant. Nach dieser Definition richten sich unter anderem gesetzliche Hilfsmaßnahmen und Fördermöglichkeiten für Unternehmen. Ein Unternehmen ist dabei nach Beschluss

des Europäischen Gerichtshofs „jede Einheit, unabhängig von ihrer Rechtsform, die eine wirtschaftliche Tätigkeit ausübt“. Die in der EU geltende KMU-Definition führt weiterhin zwei wesentliche Hauptkriterien auf [16]:

- Größe des Unternehmens: Nach den Kriterien Mitarbeiterzahl, Umsatz und Bilanzsumme
- Ressourcen des Unternehmens: Eigentum, Partnerschaften und Verflechtungen

Für die Kriterien Mitarbeiterzahl, Jahresumsatz und Jahresbilanzsumme werden gemäß der EU-Definition Schwellenwerte vorgegeben. Dabei erfolgt eine Einteilung in die Unterkategorien Kleinstunternehmen, kleine Unternehmen und mittlere Unternehmen. In Tabelle 2 sind die Schwellenwerte vergleichend für die Kategorien der Unternehmen dargestellt.

Tabelle 2: Schwellenwerte für KMU nach EU-Definition (eigene Darstellung nach [16])

Kategorie des Unternehmens	Mitarbeiterzahl	Jahresumsatz	oder	Jahresbilanzsumme
Kleinstunternehmen	< 10	≤ 2 Mio. EUR	oder	≤ 2 Mio. EUR
Kleine Unternehmen	< 50	≤ 10 Mio. EUR	oder	≤ 10 Mio. EUR
Mittlere Unternehmen	< 250	≤ 50 Mio. EUR	oder	≤ 43 Mio. EUR

Anhand der Schwellenwerte wird deutlich, dass nach der Definition nach der Europäischen Kommission KMU **weniger als 250 Mitarbeiter** und einen **Jahresumsatz von weniger als 50 Mio. EUR** oder eine **Jahresbilanzsumme von weniger als 43 Mio. EUR** aufweisen müssen. Die Mitarbeiterzahl stellt dabei eine zwingende Voraussetzung dar, die eingehalten werden muss. Beim Jahresumsatz und der Jahresbilanzsumme müssen von Unternehmen nicht zwingend beide Kriterien erfüllt werden, um den KMU-Status zu erhalten. Eines der beiden Kriterien darf überschritten werden [16].

KMU haben sowohl auf EU-Ebene als auch in Deutschland eine große volkswirtschaftliche Bedeutung. Im Jahr 2022 waren in der EU etwa 24,3 Mio. KMU tätig, die 99,8% aller Unternehmen ausmachten. Diese beschäftigten mit 84,9 Mio. Menschen etwa zwei Drittel aller Beschäftigten in Europa und trugen mehr als die Hälfte zur Wertschöpfung bei [17]. In Deutschland waren im Jahr 2021 etwa 99,3% (3,15 Mio.) Unternehmen gemäß der EU-Definition KMU [18]. Diese erwirtschafteten etwa 29% des Umsatzes und beschäftigten etwa die Hälfte aller in Unternehmen angestellten Mitarbeiter [19]. KMU können verschiedenen Wirtschaftszweigen zugeordnet werden [20]. Ein Großteil ist in Deutschland dem Sektor für Gewerbe, Handel und Dienstleistungen (GHD) zuzuordnen, aber auch im produzierenden und verarbeitenden Gewerbe des Industrie-Sektors sind KMU vertreten [21].

Definition Mittelstand

Die Begriffe „Mittelstand“ und „KMU“ werden im allgemeinen Sprachgebrauch häufig als Synonyme verwendet. Dennoch liegen beiden Begriffen unterschiedliche Definitionen zugrunde. Der Begriff Mittelstand wird nach dem *IfM* durch die **Einheit von Eigentum und Leitung** definiert. Demnach sind für den Begriff Mittelstand nicht quantitative Aspekte wie die Größe des Unternehmens relevant, sondern qualitative Merkmale. Dazu gehört bspw. die Tatsache, dass Unternehmer einen

maßgeblichen persönlichen Einfluss ausüben (Geschäftsführung), unternehmerisches Risiko getragen wird (Eigentumsverhältnisse) und dass das Unternehmen seine persönliche Existenzgrundlage sichert (wirtschaftliche Unabhängigkeit). Aspekte zur Branchenzugehörigkeit spielen demnach im Rahmen dieser Mittelstandsdefinition ebenso wenig eine Rolle wie bei der KMU-Definition [22].

Die qualitativen Merkmale des Mittelstands werden in der Praxis von einem Großteil der KMU erfüllt. Die Schnittmenge von mittelständischen Unternehmen und KMU ist aus diesem Grund entsprechend groß [22]. Daher hat das *IfM* vor allem zur Erstellung von Statistiken und der Erhebung der volkswirtschaftlichen Bedeutung des Mittelstands ebenfalls eine KMU-Definition eingeführt, jedoch – wie bereits beschrieben – mit Unterschieden zur EU-Definition. Da keine quantitativen Kriterien zur Definition des Mittelstandsbegriffs vorliegen, können auch große Unternehmen (> 500 Mitarbeiter) zum Mittelstand gehören, sofern die qualitativen Merkmale erfüllt werden [23]. Vor diesem Hintergrund liegt eine große Schnittmenge zwischen den KMU gemäß EU-Definition und mittelständischen Unternehmen vor.

Definition Nichtwohngebäude und Öffentliche Gebäude

Im Gebäudesektor kann allgemein zwischen Wohn- und Nichtwohngebäuden (NWG) differenziert werden. **Nichtwohngebäude** sind Gebäude, bei denen mehr als die Hälfte der Nutzfläche Nichtwohnzwecken gewidmet ist [24]. Eine weitere Klassifizierung der Nichtwohngebäude kann unter anderem auf der Grundlage verschiedener Nutzungsarten [25] (z.B. Büro- und Verwaltungsgebäude, Hotels und Gaststätten, etc.) oder mit besonderem Fokus auf öffentliche Gebäude nach dem Bauwerkszuordnungskatalog erfolgen [26]. Dabei findet eine Einteilung in verschiedene Haupt- und Untergruppen statt (z.B. Verwaltungsgebäude mit einfacher technischer Ausstattung). Der *Dena-Gebäudereport 2019* beziffert den Bestand an Nichtwohngebäuden in Deutschland auf 2,7 Mio. Gebäude mit einer beheizten Nettogrundfläche von ca. 1,35 Mio. m² [27]. Nichtwohngebäude können weiter in Gewerbeimmobilien (Büros, Gewerbe, Handel, Dienstleistungen und Produktionsgebäude) sowie **öffentliche Gebäude** unterteilt werden [28]. Letztere befinden sich in der Hand von Kommunen, von Ländern oder dem Bund und dienen öffentlichen Aufgaben der Daseinsvorsorge [25, 29].

Zur Erfassung von Nichtwohngebäuden im Bestand liegt nur eine unzureichende Datenlage (Anzahl, Nutzungsart, energetischer Zustand, Energiebezug) vor (vgl. *Forschungsdatenbank Nichtwohngebäude 2022* [24]). In der Bautätigkeitsstatistik und in den jährlichen Berichten zum Gebäudebestand (u.a. *Dena-Gebäudereport 2024* [30]) werden zu Nichtwohngebäuden lediglich Neubauten erfasst. Rückschlüsse auf die Struktur nach Gebäudetyp oder die energetische Qualität sind somit nicht unmittelbar möglich. Darüber hinaus fokussieren viele Studien eine einzelne Nutzungsart von Nichtwohngebäuden (vgl. *Energieeffizienz bei Büroimmobilien 2016* [28]), wodurch kein Überblick über den gesamten Gebäudebestand gegeben wird.

2.1.2 Energieverbrauch und Einsparpotenzial

Das Thema Energie hat in Unternehmen aus dem Industrie- und GHD-Sektor abhängig von der Unternehmensgröße unterschiedlichen Stellenwert. Im industriellen Bereich stellen Energiekosten häufig einen zentralen Kostenfaktor dar, während der Anteil der Energiekosten am Gesamtumsatz in mittelständischen Unternehmen eher gering ist. Bei etwa 70% der mittelständischen Unternehmen

beträgt der Anteil der Energiekosten am Gesamtumsatz weniger als 5% (vgl. *KfW Research* [31]). Dennoch ist die Relevanz der Energiekosten für Unternehmen in den letzten Jahren aufgrund erhöhter Energiepreise gestiegen.

Der **Energieverbrauch** von NWG kann dem Industrie- und GHD-Sektor zugeordnet werden. Beide Sektoren machten 2022 etwa 71% des gesamten Endenergieverbrauchs [32] und 69% des gesamten Stromverbrauchs in Deutschland aus [33]. Während der Industrie-Sektor vor allem den Verbrauch industrieller Prozesse umfasst, sind Gewerbeimmobilien von KMU und öffentliche Gebäude dem GHD-Sektor zuzuordnen. Beim Endenergieverbrauch des GHD-Sektors ist Strom mit einem Anteil von etwa 38% nach wie vor der dominierende Energieträger [32]. Die wesentlichen Anwendungsbereiche für Strom sind dabei Informations- und Kommunikationstechnik (ca. 35%), Beleuchtung (ca. 33%) sowie Prozess- und Kühllkälte (ca. 10%) [34].

Der Gebäudeenergieverbrauch umfasste in Deutschland 2016 etwa 35% des gesamten Endenergieverbrauchs. Dabei werden für Wohngebäude und Nichtwohngebäude lediglich die Anwendungsbereiche Raumwärme, Warmwasser, Beleuchtung und Klimakälte als „Gebäudeenergie“ berücksichtigt [35]. Nichtwohngebäude sind hinsichtlich der Typologie, der Nutzung, der Fläche und der Eigentümerstruktur deutlich heterogener als Wohngebäude. Daher wurden zum NWG-Bestand bisher nur wenige Studien durchgeführt und die Datenlage wird häufig als nicht ausreichend eingestuft [36]. Im Jahr 2018 wurde der Gebäudeenergieverbrauch von NWG auf 37% des gesamten gebäudebezogenen Energieverbrauchs in Deutschland beziffert. Dabei macht der Anwendungsbereich Raumwärme mit 72% ähnlich zu Wohngebäuden den größten Anteil aus [37]. Für einzelne Gebäudetypen wie büroähnliche Betriebe oder öffentliche Gebäude zeigen sich ähnliche Verteilungen mit Raumwärme als dominierenden Anwendungsbereich [35]. Aufgrund der Heterogenität des NWG-Bestands ist auch die Aufschlüsselung des Stromverbrauchs auf Verwendungszwecke stark von der Nutzung des Gebäudes abhängig. Verfügbare Daten beziehen sich daher auf einzelne Gebäudegruppen oder Branchen (z.B. Bürogebäude oder Lebensmitteleinzelhandel) [38].

Diverse Studien belegen, dass in Deutschland über alle Sektoren große **Einsparpotenziale** bestehen. Das *Umweltbundesamt* geht in aktuellen Szenarien von Einsparpotenzialen von 21% des Endenergieverbrauchs bis 2035 aus. Die realen Potenziale dürften jedoch noch höher sein, da die Szenarien nicht alle Politikinstrumente berücksichtigen [39]. Für den Industrie-Sektor werden die Einsparpotenziale bis zum Jahr 2030 in einer Studie des *ifeu* (Institut für Energie und Umweltforschung) auf 17% (116 TWh) und für den GHD-Sektor auf bis zu 27% (113 TWh) ggü. dem Energieeffizienzniveau 2008 beziffert [40]. Die größten Einsparpotenziale lassen sich für den gewerblichen Bereich im Segment Gebäude erschließen, aber auch in der Raumluftechnik und Beleuchtung bestehen weiterhin Reduktionspotenziale [40]. Vor dem Hintergrund zunehmender Preisschwankungen an den Energiemärkten und steigender Energiekosten gaben 41% der Unternehmen im *KfW-Mittelstandspanel* (Sept. 2023) an, dass die Umsetzung weiterer Energieeffizienzmaßnahmen aktuell mit Herausforderungen verbunden ist. Dies gilt insbesondere für kleine und Kleinstunternehmen, während größere Unternehmen bereits Pläne für weitere Energieeffizienzmaßnahmen verfolgen. 27% der befragten Unternehmen haben bislang noch keine Sparmaßnahmen durchgeführt und planen dies aktuell auch nicht. In mittelständischen Unternehmen lassen sich daher nach wie vor große Einsparpotenziale erschließen [41].

2.2 Stand der Technik zur Analyse gewerblicher Energiesysteme

2.2.1 Definitionen und Einordnung

Mit zunehmenden Ausbau von Erneuerbaren Energien können gewerbliche Energiesysteme beliebig komplex aufgebaut sein und neben elektrischen Verbrauchern auch Erzeugungsanlagen und Energiespeicher enthalten. Die nachfolgenden Abschnitte umfassen daher zunächst eine Definition wichtiger Begrifflichkeiten und eine Eingrenzung zur Betrachtung von Energiesystemen.

Energiemanagement umfasst in Unternehmen sowohl technische Maßnahmen, wie die Umsetzung von Energieeffizienzmaßnahmen, als auch strategische Maßnahmen durch Planung, Kontrolle und Koordination [42]. Das Ziel ist eine kontinuierliche Verbesserung der Energieeffizienz durch die Planung und Durchführung von Maßnahmen, um einen minimalen Energieeinsatz sicherzustellen. Dabei wird eine dauerhafte Aufrechterhaltung der erzielten Verbesserungen angestrebt [43]. Strukturell wird das Energiemanagement in Unternehmen durch die Einführung eines Energiemanagement-Systems (bspw. nach DIN EN ISO 50001) umgesetzt. Dabei steht die wirtschaftliche Betrachtung des betrieblichen Gesamtenergieverbrauchs im Fokus. Mit dem Nachweis solcher Systeme können Unternehmen (insbes. mit einem Energieverbrauch > 7,5 GWh) energiepolitische Ziele und Verpflichtungen einhalten und den Energiebezug des Betriebes in einem systematischen Ansatz dauerhaft verbessern [44]. Energiemanagement kann gemäß Abbildung 2 in drei zentrale Bereiche eingeteilt werden.

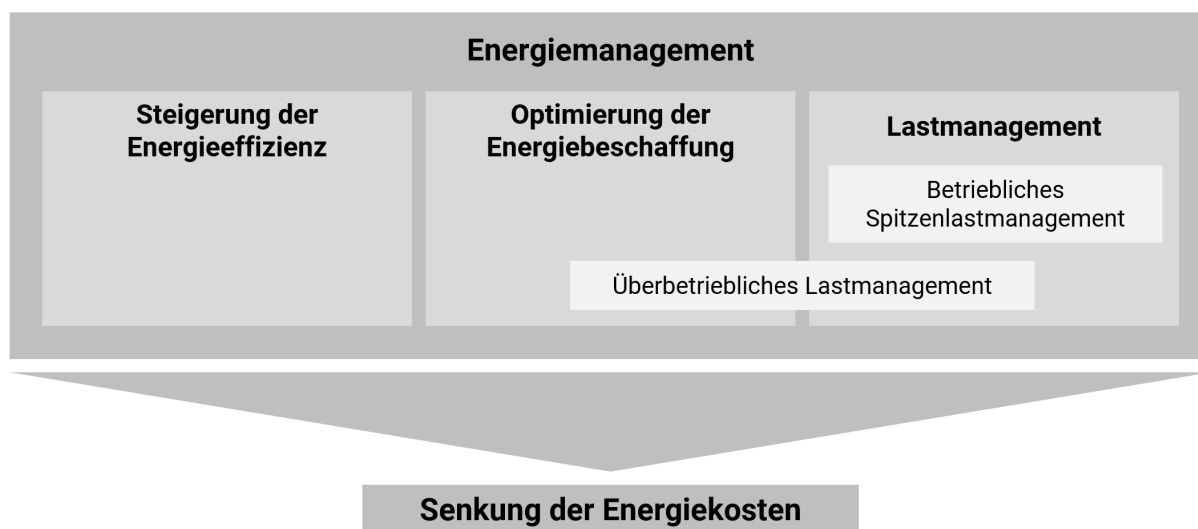


Abbildung 2: Einordnung Energiemanagement in Unternehmen (eigene Darstellung nach [45])

Die Steigerung der Energieeffizienz umfasst die Identifikation und Umsetzung von Effizienzmaßnahmen [45]. Dabei können technische, wirtschaftliche oder verhaltensbezogene Änderungen zur Steigerung der Energieeffizienz vorgenommen werden. **Energieeffizienz** beschreibt grundsätzlich das Verhältnis von Ertrag an Leistung, Dienstleistungen, Waren oder Energie zum Energieeinsatz (vgl. Energiedienstleistungsgesetz EDL-G [46]). Ein effizienter Einsatz von Energie bedeutet somit, den

Energieeinsatz in einem System zur Erbringung einer Dienstleistung oder eines Produkts zu reduzieren. Bei dem System kann es sich beispielsweise um Energiewandler (z.B. Fahrzeuge), einzelne Gebäude oder Unternehmen handeln [42]. Häufig sind Effizienzsteigerungen auch mit Komfortverbesserungen bspw. durch Gebäudeleittechnik (GLT) verknüpft.

Durch die **Optimierung der Energiebeschaffung** können Unternehmen bereits Energiekosten senken, bevor konkrete investive Maßnahmen umgesetzt werden. Dabei bestehen verschiedene Ansätze und Möglichkeiten, die unter anderem im Stromsteuergesetz (StromStG, Energieträger Strom) und Energiesteuergesetz (Energieträger Gas, Öl, etc.) festgelegt sind. Nachfolgend werden einige Möglichkeiten zur Optimierung der Energiebeschaffung stichpunktartig aufgeführt:

- Stromsteuerrückerstattung für das produzierende Gewerbe nach §9a und §9b StromStG [47]
- Spitzenausgleich (Entlastung in Sonderfällen) für produzierende Unternehmen nach Spitzenausgleich-Effizienzsystemverordnung (SpaEfV)
- Inanspruchnahme individueller Netzentgelte nach §19 Stromnetzentgeltverordnung (StromNEV)

Als ein weiterer Bereich des Energiemanagements umfasst **Lastmanagement** die gezielte Steuerung der zeitlichen Struktur der Stromnachfrage [48]. Diese Flexibilisierung der Stromnachfrage wird durch die gezielte Erhöhung oder Absenkung von Lasten erreicht und kann dadurch zur Netzstabilisierung oder der gezielten Ausnutzung von Preisschwankungen beitragen. In der Praxis wird zwischen zwei verschiedenen Nutzungsformen von Lastmanagement unterschieden [45]:

- **Betriebliches Spitzenlastmanagement:** Aktive Steuerung der Last im Betrieb, um bspw. betriebliche Lastspitzen zu reduzieren. Durch Änderung des Stromverbrauchsmusters soll eine „Glättung“ des Verbrauchsprofils erreicht werden.
- **Überbetriebliches Lastmanagement:** Schaffung von Flexibilitäten für das Stromnetz durch Vermarktung flexibler Lasten. Systemdienstleistungen wie Regelleistung tragen zur allgemeinen Netzstabilität bei und gewährleisten die Versorgungssicherheit.

Auf der Grundlage der erläuterten Begrifflichkeiten zum Handlungsfeld von Energiemanagement kann nun die Analyse von Energiesystemen im gewerblichen Bereich für diese Arbeit näher eingeordnet werden. Gewerbliche Energiesysteme umfassen verschiedenste Komponenten zur Energieerzeugung, Energieumwandlung und Energiespeicherung (s. Abbildung 3, Folgeseite).

Darüber hinaus gibt es in jedem Energiesystem individuelle Kopplungen zwischen dem Gas-, Strom-, Wärme- und Kältenetz, die von der jeweiligen Anwendung und den vorhandenen Komponenten abhängen [49]. Die aufgezeigten Komponenten stellen jeweils einzelne Bausteine des Energiesystems dar und dienen der Deckung des Energiebedarfs des Betriebes für Gas, Strom, Wärme und Kälte.

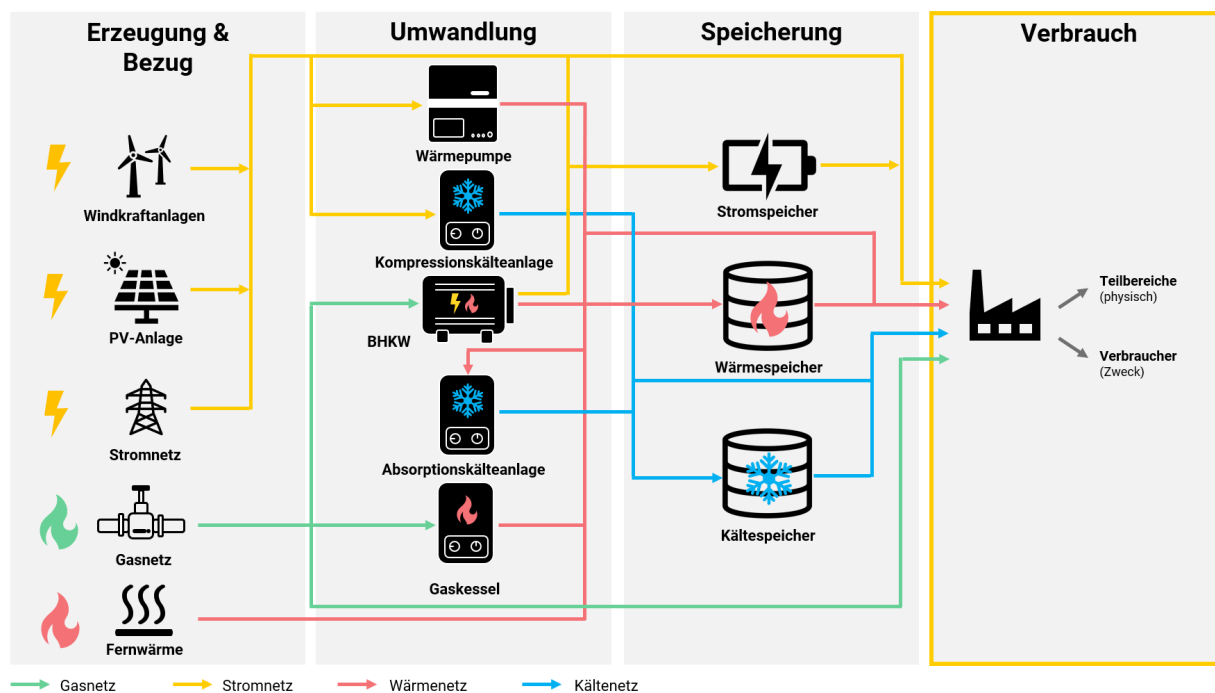


Abbildung 3: Aufbau von Energiesystemen im gewerblichen Bereich (eigene Darstellung nach [49])

In den Fallbeispielen stehen mit dem Einsatz mobiler Messtechnik einzelne Teilbereiche und elektrische Verbraucher im Vordergrund der Analyse. Die in Abbildung 3 dargestellten Komponenten der Bereiche Erzeugung, Umwandlung und Speicherung werden im Zuge der Fallbeispiele mit Ein- und Ausgangsparametern (bspw. Erzeugung einer Photovoltaik-Anlage) erfasst. Allerdings werden zu diesen Komponenten keine individuellen Detailanalysen durchgeführt, da die Aufschlüsselung der Verbrauchsseite den Fokus der Analyse darstellt.

Bedingt durch die ausgewählte Messtechnik (s. Kapitel 4) liegt der Schwerpunkt dieser Arbeit auf der Analyse von Stromverbräuchen und damit auf dem Stromnetz bzw. der elektrischen Verteilung im Betrieb (Abbildung 3, gelb dargestellt). Andere Energieträger (bspw. Wärmemenge) werden im Zuge der Fallbeispiele zum Teil auch erhoben. Zu diesen Energieträgern erfolgen allerdings keine Detailbetrachtungen.

2.2.2 Gesetzliche Vorgaben und Regulatorik

Auf europäischer Ebene werden zur Erreichung der EU-Klimaziele verschiedenste Richtlinien und Vorgaben aufgesetzt. Der Status-Quo zu den mit Effizienzanalysen im gewerblichen Bereich verbundenen Verpflichtungen wird nachfolgend erläutert.

EU-Energieeffizienzrichtlinie

Die Grundlagen zur Erreichung der Energie- und Klimaschutzziele der Europäischen Union wurden in der **Energieeffizienzrichtlinie** (engl. Energy Efficiency Directive EED) (EU) 2023/1791 vom 1. September 2023 festgelegt. An erster Stelle soll dabei der Zielsetzung nachgekommen werden, die Treibhausgasemissionen bis 2030 gegenüber dem Stand von 1990 um 55% zu reduzieren [50]. Vor diesem Hintergrund sieht die Richtlinie eine Verringerung des Primär- und Endenergieverbrauchs

von mindestens 11,7% basierend auf einer aktuellen Referenzentwicklung vor [51]. Für die EU-Mitgliedsstaaten ergeben sich daraus jährliche Einsparverpflichtungen. Darüber hinaus werden erstmals auch Vorschriften für den öffentlichen Sektor eingeführt [51].

In Deutschland werden die zentralen Anforderungen der EU-Energieeffizienzrichtlinie durch das am 18. November 2023 neu auferlegte **Energieeffizienzgesetz (EnEfG)** umgesetzt. Ziel des Gesetzes ist es, den Endenergieverbrauch im Vergleich zu 2008 bis zum Jahr 2030 um 26,5% und den Primärenergieverbrauch um 39,3% zu senken. Bis zum Jahr 2045 werden Primär- und Endenergieeinsparungen von 45% ggü. 2008 angestrebt [5]. Mit diesen neuen nationalen Zielsetzungen wurden die durch das Energiedienstleistungsgesetz (EDL-G) bestehende Anforderung an Unternehmen verschärft [52]. Auch für öffentliche Stellen und Rechenzentren bestehen nun verpflichtende Vorgaben. Die wesentlichen Änderungen werden nachfolgend stichpunktartig aufgeführt [5, 52]:

- **Unternehmen** mit einem jährlichen Gesamtenergieverbrauch von mehr als **7,5 GWh** (im 3-Jahresmittel) werden dazu verpflichtet, ein Energiemanagement-System nach ISO 50001 oder Umweltmanagementsystem (EMAS) einzuführen. Weiterhin sind Potenziale zur Abwärmenutzung zu identifizieren und wirtschaftlich zu bewerten.
- **Unternehmen** mit einem jährlichen Gesamtenergieverbrauch von mehr als **2,5 GWh** (im 3-Jahresmittel) werden dazu verpflichtet, Umsetzungspläne für wirtschaftlich umsetzbare Endenergieeinsparmaßnahmen² zu erstellen und zu veröffentlichen. Die Umsetzungspläne sind vor Veröffentlichung durch Zertifizierer, Umweltgutachter oder Energieauditor zu bestätigen. Zusätzlich werden diese Unternehmen dazu verpflichtet, die im Betrieb entstehende Abwärme zu vermeiden und Potenziale auf einer Plattform zu veröffentlichen.
- **Öffentliche Stellen**³ werden ab einem jährlichen Gesamtenergieverbrauch von 1 GWh dazu verpflichtet, jährlich 2% des Endenergieverbrauchs einzusparen. Zusätzlich muss ab einem jährlichen Gesamtenergieverbrauch von mehr als 3 GWh ein Energiemanagement-System (ISO 50001) oder Umweltmanagement-System (EMAS) eingeführt werden (unter 3 GWh muss ein vereinfachtes Energiemanagement-System nach ISO 50005 eingeführt werden).
- **Rechenzentren** müssen ab einer nicht redundanten Nennanschlussleistung (300 kW) Informationspflichten zum Energieverbrauch nachkommen, den Stromverbrauch durch Erneuerbare Energien decken, Mindeststandards bei Energieeffizienz einhalten, bei Inbetriebnahme ab Juli 2026 Abwärme verpflichtend nutzen und ein Energiemanagement-System bzw. Umweltmanagement-System einführen (abhängig von der Nennanschlussleistung).

² Eine Maßnahme gilt als wirtschaftlich, wenn sich bei der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der Maßnahme gemäß DIN EN 17463 nach maximal 50% der Nutzungsdauer ein positiver Kapitalwert ergibt (begrenzt auf Maßnahmen mit einer Nutzungsdauer von 15 Jahren) [5].

³ Behörden, Organe der Rechtspflege und andere öffentlich-rechtlich organisierte Einrichtungen des Bundes und der Länder.

Ungeachtet dieser neuen Verpflichtungen bestehen durch das Energiedienstleistungsgesetz (EDL-G) nach wie vor Anforderungen an Unternehmen. Dies gilt insbesondere für Unternehmen, die gemäß der EU-Definition als nicht-KMU gelten (vgl. Kapitel 2.1.1). Nicht-KMU mit einem jährlichen Gesamtenergieverbrauch von mindestens 500.000 kWh sind demnach durch das EDL-G dazu verpflichtet, ein Energieaudit nach DIN 16247-1 oder ein Energiemanagement-System nach ISO 50001 bzw. Umweltmanagement-System nach EMAS einzuführen [46]. Unternehmen mit einem jährlichen Gesamtenergieverbrauch unter 500.000 kWh müssen ein vereinfachtes Audit abgeben, das lediglich eine Online-Erklärung über Energieverbrauch und -kosten enthält [53]. Erst mit der im Mai 2024 diskutierten Novelle des EDL-G richtet sich die Energieauditpflicht an Unternehmen mit einem jährlichen Gesamtenergieverbrauch von über 2,77 GWh. Die Novelle tritt voraussichtlich im Laufe des Jahres 2024 in Kraft [54].

In der aktuellen Gesetzgebung bestehen für KMU mit einem Gesamtenergieverbrauch von weniger als 2,5 GWh nach wie vor keine Verpflichtungen in Form der Durchführung von Energieaudits oder der Einführung von Energiemanagement-Systemen. Damit bestehen für die große Anzahl kleinerer Betriebe nach wie vor keine gesetzlichen Pflichten zur Umsetzung von Energieeffizienzmaßnahmen. Durch das EDL-G müssen lediglich nicht-KMU mit einem jährlichen Gesamtenergieverbrauch von mehr als 0,5 GWh Energieaudits umsetzen.

EU-Gebäuderichtlinie

Die EU-Richtlinie über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden (auch EU-Gebäuderichtlinie, engl. Energy Performance of Buildings Directive - EPBD) regelt seit 2003 die Dekarbonisierung des Gebäudesektors und hat zum Ziel, den europäischen Gebäudebestand bis 2050 in Nullemissionsgebäude umzuwandeln [55]. Die Richtlinie regelt unter anderem Mindestanforderungen und Berechnungsverfahren der Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden und legt Vorgaben zur Ausstellung von Energieausweisen oder Inspektion von Heizungsanlagen fest. Die aktuelle Version der Richtlinie wurde vom europäischen Rat im April 2024 angenommen und ist im Mai 2024 in Kraft getreten [56].

Auf nationaler Ebene wurden die Vorgaben der EU-Gebäuderichtlinie zunächst durch die Energieeinsparverordnung (EnEV) erfüllt, die dann im November 2020 durch das Gebäudeenergiegesetz (GEG) ersetzt wurde. Das GEG legt in der aktuellen Fassung aus 2024 unter anderem fest, dass ab 2024 Energieausweise für Wohn- und Nicht-Wohngebäude verpflichtend unter Anwendung der DIN V 18599 (vgl. Kapitel 2.2.3) erstellt werden müssen [55]. Darüber hinaus stellt das Gesetz Vorgaben für den Umstieg auf Erneuerbare Energien beim Einbau neuer Heizungen.

2.2.3 Etablierte Normen und Analyseverfahren

Zur Umsetzung von Energieeffizienzmaßnahmen und Effizienzanalysen bestehen für den gewerblichen Bereich aktuell einige Normen und Analyseverfahren. Mit der Anwendung dieser Verfahren können wirtschaftliche Energieeinsparungen im Betrieb ermittelt und quantifiziert oder eine Optimierung der Energiebeschaffung erzielt werden. Die folgenden Normen und Analyseverfahren werden in diesem Kapitel kurz erläutert:

- Energieaudit nach DIN EN 16247-1
- Energiemanagement-System nach DIN EN ISO 50001 und 50005
- Energetische Bewertung von Nicht-Wohngebäuden nach DIN V 18599
- Verbrauchskennwerte für Gebäude nach VDI 3807

Energieaudit nach DIN EN 16347-1

Die Norm DIN EN 16247-1 beschreibt die für nicht-KMU gemäß EDL-G verpflichtende Umsetzung eines qualifizierten Energieaudits durch einen Auditor. Ein Energieaudit umfasst die systematische Inspektion und Analyse des Energieeinsatzes und des Energieverbrauchs einer Anlage, eines Gebäudes, eines Systems oder einer Organisation. Sie werden mit der Zielsetzung durchgeführt, die Energieflüsse und das Potenzial zur Verbesserung der Energieeffizienz zu identifizieren und über diese zu berichten [57]. Die Norm sieht eine periodische Durchführung in einem Zyklus von vier Jahren vor. Mit der Durchführung eines Energieaudits wird der energetische Ist-Zustand bewertet, jedoch kein kontinuierlicher Verbesserungsprozess aufrechterhalten, wie es bei Energiemanagement-Systemen der Fall ist. Dennoch werden sie häufig als Vorstufe von Energiemanagement-Systemen nach DIN EN ISO 50001 gesehen [58]. Der Ablauf von Energieaudits ist in der Norm fest vorgegeben [57]:

1. Einleitender Kontakt und Auftakt Besprechung mit Auditor
2. Datenerfassung
3. Außeneinsatz
4. Datenanalyse
5. Bericht und Abschlussbesprechung

Aus der Norm können keine Informationen entnommen werden, die den Einsatz von Messsystemen zur Datenerfassung beschreiben und regeln. Allerdings muss der Auditor eine Aufschlüsselung des Energieverbrauchs auf der Verbraucherseite nachweisen, Energieflüsse und Energiebilanzen des Objektes berücksichtigen sowie ein Muster der Energienachfrage unter Berücksichtigung des Zeitverlaufs erstellen. Auf der Grundlage dieser Daten können dann Verbesserungen ausgearbeitet werden [57].

Bei einer fundierten Datengrundlage und bei Betrachtungen von einfachen Systemen arbeiten Energieauditoren in der Praxis meist mit Hochrechnungen oder geschätzten Größen. Bei komplexeren Systemen (z.B. Querschnittstechnologien wie Lüftung und Kühlkälte in größeren Gebäudekomplexen) oder unzuverlässiger Datengrundlage müssen weitere Informationen und Daten erhoben werden. Erst wenn die getroffenen Annahmen auch verifizierbar sind, ist der Auditor einer ausreichenden Berichtspflicht nach DIN EN 16247-1 nachgekommen [57]. Daher nutzen Auditoren für komplexere Aufgaben zur Datenerhebung meist mobile Messsysteme. Auf der Grundlage dieser Daten lassen sich die zuvor getroffenen Annahmen prüfen und ggf. korrigieren [59].

Energiemanagement-System nach DIN EN ISO 50001 und 50005

Mit der Einführung eines Energiemanagement-Systems können Unternehmen ihren Energieverbrauch detailliert erfassen, Einsparpotenziale identifizieren und Energieeffizienzmaßnahmen umsetzen. In der Praxis gibt es zertifizierte Systeme mit definierten Anforderungen und Vorgaben an ein systematisches Energiemanagement. Eine Art der Zertifizierung eines Energiemanagement-Systems ist der internationale Standard ISO 50001. Die Norm wurde in Deutschland als DIN EN ISO 50001 im Jahr 2012 veröffentlicht und beschreibt die Anforderungen an das Managementsystem [60]. Wie das Energieaudit ist auch das zertifizierte Energiemanagement-System Voraussetzung zur Inanspruchnahme der vorgestellten Maßnahmen zur Optimierung der Energiebeschaffung (vgl. Kapitel 2.2.1). Zur Durchführung der Zertifizierung von Energiemanagement-Systemen sind Zertifizierungsgesellschaften berechtigt. Diese werden von der Deutschen Akkreditierungsstelle (DAkKS) begutachtet, bestätigt und überwacht [44].

Die eigentliche Norm bezieht sich auf die Zertifizierung von Energiemanagement-Systemen, durch deren Einführung ein kontinuierlicher Verbesserungsprozess im Unternehmen erreicht werden soll. Aus diesem Grund sind Energiemanagement-Systeme nach DIN EN ISO 50001 nach dem PDCA-Zyklus (Plan-Do-Check-Act) aufgebaut. Dabei werden die Phasen Planung, Umsetzen, Überprüfen und Handeln in einem kontinuierlichem Zyklus im Unternehmen ausgeführt, um die energetische Leistung systematisch und langfristig zu verbessern [44].

Die Basis für ein systematisches Energiemanagement ist die messtechnische Erfassung aller relevanten Verbrauchswerte (bspw. von Maschinen und Anlagen) im Unternehmen. Die Erhebung der Energieverbräuche gehört somit ebenso zu einem ganzheitlichen Energiemanagement-System wie die Festlegung von Zielen, Kennzahlen und Maßnahmen, die Benennung klarer Verantwortlichkeiten sowie die stetige Kontrolle der Ergebnisse. So wird eine systematische und strukturierte Dokumentation des betrieblichen Energiemanagements im Unternehmen aufgebaut [60].

Mit zunehmender Bedeutung für das Thema Energieeffizienz wurden mittlerweile mehrere 50000er Normen aufgelegt. Mit der neu eingeführten DIN EN ISO 50005 sollen insbesondere kleinere Unternehmen (KMU) stufenweise an die Einführung eines Energiemanagement-Systems herangeführt werden. Dabei werden Umsetzungsstufen (Level) mit konkreten Anforderungen definiert. Die Umsetzungsstufen stellen eine Staffelung von einem geringen zu einem hohen Erfahrungsgrad im Umgang mit Energiemanagement im Unternehmen dar. Ein Energiemanagement-System, das nach der ISO 50005 aufgebaut ist, kann nachträglich erweitert werden, um alle Anforderungen der DIN EN ISO 50001 zu erfüllen [61].

Energetische Bewertung von Gebäuden nach DIN V 18599

Die DIN V 18599 *Energetische Bewertung von Gebäuden* ist eine Vornorm, die Vorschriften und Bilanzierungsverfahren zur Berechnung und Bewertung der Energieeffizienz von Wohn- und Nichtwohngebäuden enthält. Die Anwendung der Norm ermöglicht eine einheitliche und systematische Bewertung von Gebäuden, was auch deren Vergleichbarkeit sicherstellt [55]. Dazu stellt die Norm Berechnungsverfahren des Energiebedarfs (Nutz-, End- und Primärenergiebedarf) von Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung bereit. In Abbildung 4 sind diese Bereiche, auf die sich die insgesamt 12 Teile der Norm beziehen, dargestellt.

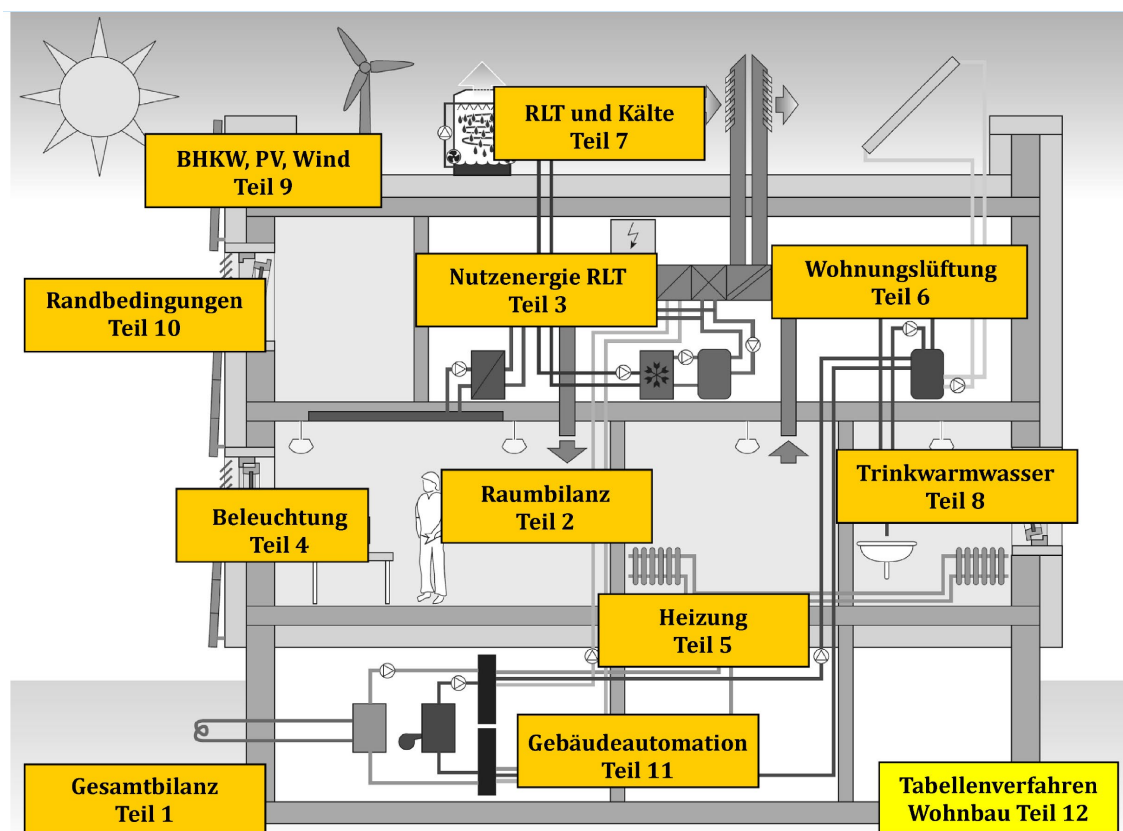


Abbildung 4: Übersicht über die Teile der DIN V 18599 [62]

Die DIN V 18599 dient als Vereinheitlichung der Berechnungsprozesse für sämtlichen Energiebedarf von Gebäuden und stellt dadurch eine Grundlage zur Berechnung der nach GEG geforderten Ausgangswerte dar. Insbesondere die Wechselwirkungen sowie gegenseitige Beeinflussungen der Energieströme (bspw. zwischen Sonnenschutz, Tageslichtversorgung, Beleuchtung und Kühlung) werden in den Berechnungsverfahren der Norm berücksichtigt [55].

Neben den Vorteilen der einheitlichen Bilanzierung verschiedenster Gebäude ist die Anwendung der 800 Seiten umfassenden Norm in der Praxis jedoch auch komplex und aufwendig. Dies gilt insbesondere für die Einsparpotenzial- und Schwachstellenanalyse. Daher wurden im Projekt *Energieoptimiertes Bauen – Teilenergiekennwerte von Nichtwohngebäuden* des IWU vereinfachte Methoden zur schnellen energetischen Bewertung von Nichtwohngebäuden im Bestand erarbeitet. Dabei wird ein Teilenergiekennwerte-Tool (kurz TEK-Tool) angewendet, das Verbräuche, Teilenergieverbräuche, Einsparpotenziale und energetische Schwachstellen aufzeigt. Die Gesamtbilanzierung erfolgt dabei in Anlehnung an die DIN V 18599. Die bestehende Norm wird durch diverse Vereinfachungen in ihrer Anwendung vereinfacht und beschleunigt [13].

Verbrauchskennwerte für Gebäude nach VDI 3807

Die Richtlinie VDI 3807 *Verbrauchskennwerte für Gebäude* stellt eine Grundlage zur Bildung und Interpretation von Energie- und Wasserverbrauchskennwerten für Gebäude und Liegenschaften dar, die mit Endenergie (Heizenergie einschl. Fernwärme und Strom) und Wasser versorgt werden. Anhand der Kennwerte können Energie- und Wassereinsparpotenziale identifiziert werden [63]. Die Richtlinie ist aus fünf Teilen aufgebaut:

- Teil 1: Grundlagen
- Teil 2: Verbrauchskennwerte für Heizenergie, Strom und Wasser
- Teil 3: Teilkennwerte Wasser
- Teil 4: Teilkennwerte elektrische Energie
- Teil 5: Teilkennwerte thermische Energie

Die Energieverbrauchskennwerte werden als Quotient aus dem Energieverbrauch (Heizenergie, elektrische Energie) eines Jahres bezogen auf die Bezugsfläche des Gebäudes in m^2 angegeben. Somit ergibt sich ein Kennwert in der Einheit kWh/m^2a . Energieverbrauchskennwerte eines Gebäudes werden als Vergleichswerte auf der Basis eines Mittelwertes, der aus der Betrachtung anderer Gebäude mit vergleichbarer Nutzung und Struktur stammt, herangezogen. Dieser Vergleichsprozess mit einem festgelegten Bezugswert wird auch als Benchmarking bezeichnet [64]. Die in der Richtlinie gebildeten Verbrauchskennwerte dienen unter anderem als [63]:

- Grundlage für eine energetische Gebäudebewertung,
- Vergleichsgrundlage für Gebäude gleicher Nutzung,
- Entscheidungshilfe für die Umsetzung von Effizienzmaßnahmen,
- Verfolgung und Dokumentation für den Erfolg von Effizienzmaßnahmen und
- Darstellung für die energetische Qualität einer Immobilie.

Ein Gebäudevergleich kann nur erfolgen, wenn Gebäudeart und Gebäudenutzung der Vergleichsobjekte nahezu identisch sind. Neben dem Gebäudetyp sind ebenso die gewählten Bezugsgrößen für einen aussagekräftigen Vergleich entscheidend. Dies bezieht sich gleichermaßen auf die Betrachtung der Energie sowie die Bezugsfläche [63].

Da innerhalb eines Gebäudes je nach Verwendungszweck und Nutzungsform individuelle Strukturen vorliegen und nicht jeder Gebäudebereich als gleich anzunehmen ist, werden in der Richtlinie Teilkennwerte eingeführt. Diese Kennwerte orientieren sich an Gewerken oder Nutzungszonen innerhalb des Gebäudes. Somit können variierende Bedarfsstrukturen innerhalb eines Gebäudes transparent dargestellt und für Nutzungszonen spezifische Schwachstellen aufgezeigt werden [13].

Der zweite Teil der Richtlinie beschreibt die Beurteilung der nach VDI 3807 Teil 1 gebildeten Kennwerte. Dazu führt Teil 2 Referenzkennwerte für verschiedene Gebäudegruppen auf, anhand derer eine erste überschlägige Beurteilung eines Gebäudes erfolgen kann. Den aufgeführten Referenzkennwerten sind gemessene Verbräuche aus den Jahren 2004 und 2005 zugrunde gelegt. Diese stammen aus Verbrauchsmessungen an Gebäuden, die mit einer konventionellen Technik ausgestattet sind [65].

Teil 4 der Richtlinie beinhaltet die Anwendung elektrischer Teilkennwerte. Anhand dieser Teilkennwerte kann die Analyse der Verbrauchsstruktur für elektrische Energie im Gebäude vorgenommen werden. Für die Bewertung und Berechnung der gebäudeinternen Aufteilung der elektrischen Energie gibt die Richtlinie sogenannte Nutzungszonen bzw. Verwendungszwecke vor. Als Nutzungszone gilt dabei die Teilfläche eines Gebäudes, die sich durch ihre Nutzungsbedingungen wesentlich von anderen Teilflächen unterscheidet [66]. Die Berechnungen und Analysen erfolgen an diesen definierten

Zonen. Die gemäß der Richtlinie definierten Verwendungszwecke und zugehörige elektrische Verbraucher sind nachfolgend in Tabelle 3 aufgeführt.

Tabelle 3: Verwendungszwecke elektrischer Energie nach VDI 3807 (eigene Darstellung nach [66])

Verwendungszweck	Beispiele für typische Verbraucher elektrischer Energie
Beleuchtung	Raumbeleuchtung, Arbeitsplatzbeleuchtung, Dekorations- und Akzentbeleuchtung, Sicherheitsbeleuchtung, Außenbeleuchtung
Lüftung	Zuluft- und Abluftventilatoren, Antriebe der Wärmerückgewinnung, Umwälzpumpen zur Wärmerückgewinnung, Luftherhitzer
Kühlkälte	Kompressoren und sonstige Antriebe von Kältemaschinen, Ventilatoren und Umwälzpumpen für Kälteversorgung und Rückkühlsysteme
Betriebseinrichtung	Üblicherweise steckbare elektrische Geräte, die den Betrieb der Räume dienen, in denen sie installiert sind, z.B. PC, Bildschirme, Drucker, Kopierer, etc.
Zentrale Einrichtungen	EDV-Zentrale, Küche, Schwachstromanlagen (z.B. Telefonzentrale, Brandmeldeanlage), Werkstatteinrichtungen usw.
Diverse Technik	Aufzüge, Hilfsenergie Heizung (Pumpen, Brenner, Regelung), Befeuchtung
Elektrowärme	Elektrische Energie, bereitgestellt für dezentrale Heizzwecke und dezentrale Brauchwarmwasserbereitung

Falls in einem Gebäude weitere Einsatzbereiche vorliegen, die keinem der aufgeführten Verwendungszwecke entsprechen, können diese gemäß der Richtlinie auch separat aufgeführt oder unter „Sonstige Verbraucher“ zusammengefasst werden [66].

Für die aufgeführten Verwendungszwecke sind in Teil 4 der VDI 3807 flächenspezifische Kennwerte für elektrische Energie aufgeführt. Zur Abschätzung des energetischen Einsparpotenzials wird die Differenz aus Ist-Verbrauch und Referenzenergiebedarf gebildet. Anhand dieser Berechnungen kann aufgezeigt werden, welche Gruppe elektrischer Verbraucher welchen Anteil am Gesamtenergiebezug ausmachen. Weiterhin führt die Richtlinie je Verwendungszweck auch spezifische Energieverbräuche und Bedarfe auf (bspw. spezifische elektrische Leistung) [66].

2.3 Smarte Technologien und Messtechnik

Digitale bzw. smarte Technologien werden heute in zahlreichen Anwendungsbereichen eingesetzt. Die hier betrachtete mobile Messtechnik kann ebenfalls den smarten Technologien im Kontext von Energielösungen zugeordnet werden. Dieses Kapitel erstellt eine Übersicht smarterer Technologien und ordnet die Messtechnik darin ein.

2.3.1 Definition und Überblick

Im Forschungsprojekt *Smarte Technologien für Unternehmen* wurde ein umfangreiches Screening smarterer Technologien zur Steigerung der Energieeffizienz im gewerblichen Bereich durchgeführt. Smarte Technologien sind definiert als eine Kombination von Hardware-Lösungen (u.a. zur Messung, Analyse und Steuerung) mit Komponenten der Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) als Basis für die Konnektivität (Sensorik, Speicherung, Auswertung und Aktorik) [7, 67]. Im Zeitraum von 2017-2020 erfasste das Technologie-Screening sechs Technologie-Kategorien. Diesen wurden insgesamt 20 einzelne Systeme auf Herstellerebene zugeordnet [68]. Abbildung 5 gibt einen Überblick über die im Screening identifizierten Technologie-Kategorien.

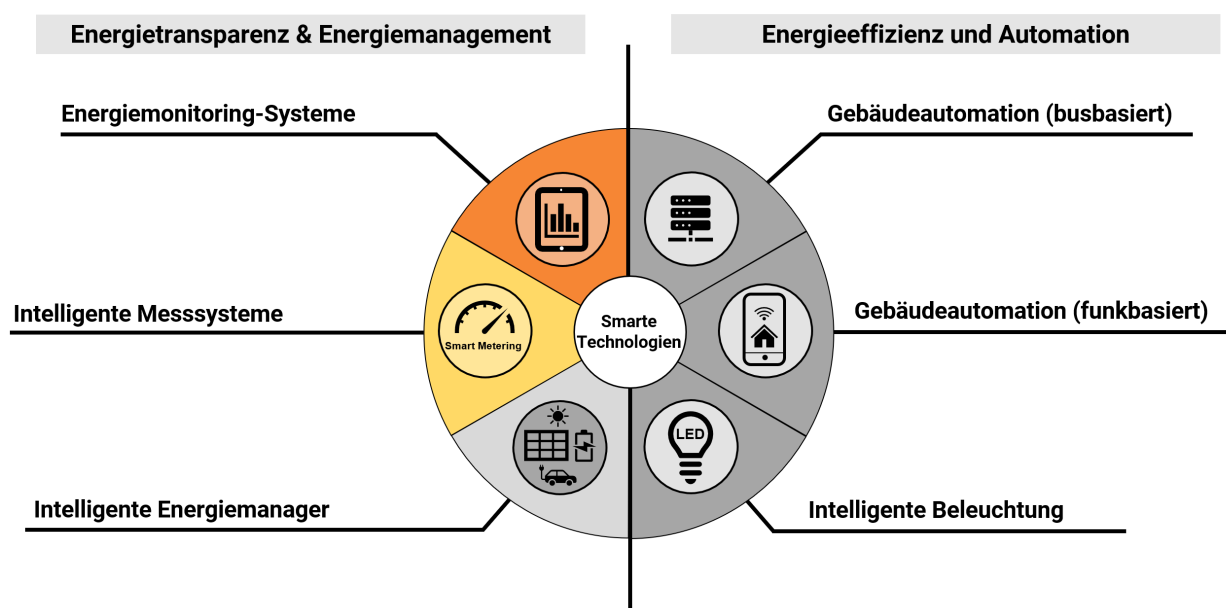


Abbildung 5: Technologie-Screening zu smarten Technologien für Unternehmen (eigene Darstellung)

Die Technologie-Kategorien wurden in zwei Bereiche eingeteilt. Die Kategorien „Energiemonitoring-Systeme“, „Intelligente Messsysteme“ und „Intelligente Energiemanager“ wurden dem Bereich **Energietransparenz & Energiemanagement** zugeordnet. Dabei handelt es sich um Systeme, die der Messung von Energie- und Zustandsgrößen dienen und damit zur Energie- und Datentransparenz im Unternehmen beitragen. Des Weiteren sind auch Systeme zur intelligenten Steuerung von Verbrauchern und Erzeugungsanlagen, sog. intelligente Energiemanager, diesem Bereich zugeordnet. Die Technologie-Kategorien „Gebäudeautomation (busbasiert)“, „Gebäudeautomation (funkbasiert)“ und „Intelligente Beleuchtung“ bilden den Bereich **Energieeffizienz & Automation**. Dieser Bereich

umfasst unter anderem Systeme zur Automation von Prozessen im Gebäude (u.a. Nutzung von Smart Home-Systemen) sowie den Einsatz von LED-Beleuchtungstechnik mit Sensorik zur Steigerung der Energieeffizienz.

Die Technologie-Kategorien „Energiemonitoring-Systeme“ und „Intelligente Messsysteme“ sind in Abbildung 5 farblich hervorgehoben. Diese Technologien haben sich im Anwendungsfeld KMU als besonders relevant herausgestellt [7]. So können KMU auf der Grundlage intelligenter Messsysteme (iMSys) erstmals ihre Stromverbrauchsdaten visualisieren und den energetischen Ist-Zustand detailliert analysieren. Energiemonitoring-Systeme liefern eine wichtige Grundlage zur Identifikation und Umsetzung von Effizienzpotenzialen im Unternehmen, indem sie Datentransparenz über die Energie- und Lastflüsse schaffen. Mit dem Einsatz mobiler Messtechnik umfassen Energiemonitoring-Systeme auch den technologiebezogenen Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit. Im Folgenden werden die beiden Technologie-Kategorien daher im Detail vorgestellt.

2.3.2 Intelligente Messsysteme

Gemäß dem dritten Energiepaket (2009/72/EC) [69] der Europäischen Union (EU) aus dem Jahr 2009 sind die Länder in der EU dazu angehalten, dass Letztverbraucher durch intelligente Messsysteme aktiv in den Stromversorgungsmarkt eingebunden werden. Laut Richtlinie sollten die Länder bis zum Jahr 2020 80% aller vorhandenen Messstellen mit intelligenten Stromzählern (engl. **Smart Meter**) ausstatten (Voraussetzung war eine positive Kosten-Nutzen-Analyse). Smart Meter erfassen elektrische Parameter wie den Stromverbrauch und ermöglichen die bidirektionale Kommunikation zum Informationsaustausch zwischen Energieversorger und Kunden zur Abrechnung und den Betrieb des Stromnetzes [70].

Aufgrund technischer und ökonomischer Barrieren kam es jedoch in vielen Ländern beim Einbau (engl. Rollout) von Smart Metern zu Verzögerungen [10]. Im Jahr 2020 hatten bereits 10 EU-Länder einen Rollout von 80% erreicht, darunter Dänemark, Estland, Schweden, Italien und Luxemburg [71, 72]. Es wird erwartet, dass viele EU-Länder bis 2025 Rollout-Quoten von 80% erreichen werden. Allerdings sieht die Planung in vielen Ländern einen vollständigen Rollout von Smart Metern erst im Jahr 2030 oder später vor [10].

In Deutschland ist der Einbau von Smart Metern bisher langsam vorangeschritten. Im Jahr 2020 lag die Rollout-Quote noch bei unter 10% [71]. Im Mai 2023 wurde daher das Gesetz zum Neustart der Digitalisierung der Energiewende (GNDEW) beschlossen, das einige Änderungen des Messstellenbetriebsgesetzes (MsbG) vorgesehen hat, darunter eine Beschleunigung des Rollouts sowie eine angepasste Kostenverteilung zwischen Verbraucher und Netzbetreiber [73]. So wurde unter anderem 2030 als Zieljahr definiert, um mit Smart Metern eine digitale Infrastruktur bereitzustellen.

Beim Einbau von Smart Metern wird in Deutschland auch der Begriff **intelligente Messsysteme** (iMSys) verwendet. Diese sind aus mehreren Hardware-Komponenten aufgebaut (s. Abbildung 6, Folgeseite). Die **moderne Messeinrichtung** ist ein digitaler Stromzähler zur Erfassung der Stromverbrauchsdaten. Unmittelbar an die moderne Messeinrichtung angeschlossen ist ein **Smart-Meter-Gateway**. Dabei handelt es sich um eine Kommunikationseinrichtung zur Übertragung der Stromverbrauchsdaten an den Messstellenbetreiber.

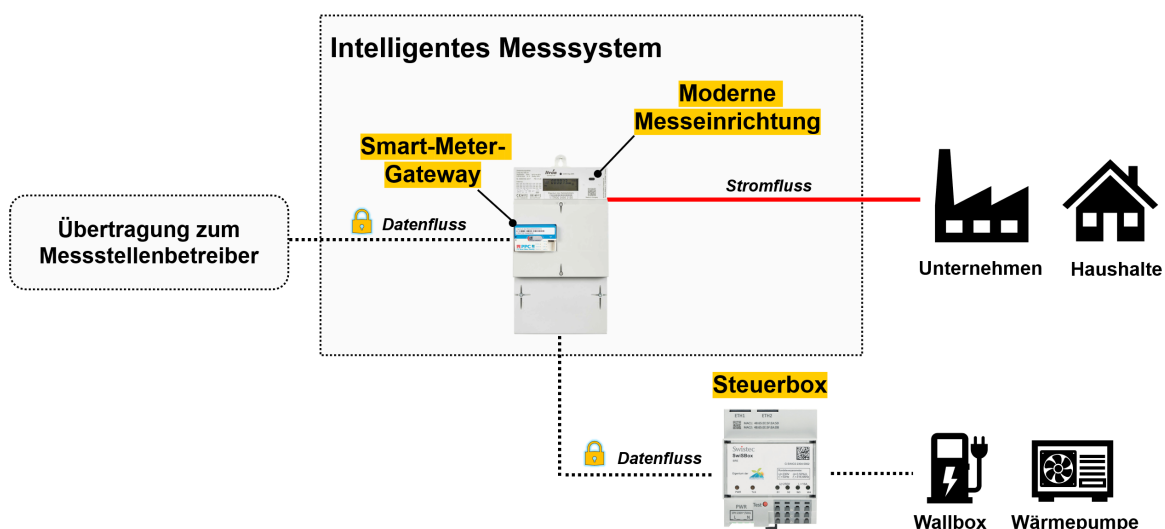


Abbildung 6: Aufbau eines intelligenten Messsystems (eigene Darstellung, Bilder *ppc AG* und *Swistec GmbH*)

Bei der Übertragung der Daten wurden durch das *Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik* (BSI) besonders hohe Vorgaben an Sicherheit und Datenschutz festgelegt. Die **Steuerbox** ist ebenfalls mit dem Smart-Meter-Gateway verbunden und ermöglicht Netzbetreibern zukünftig das Versenden von Steuerbefehlen an einzelne Verbrauchseinrichtungen wie Wallboxen und Wärmepumpen (vgl. § 14a Energiewirtschaftsgesetz, EnWG). So kann der Netzbetreiber in kritischen Netz-situationen, wie bspw. einem drohenden Blackout, eingreifen und Verbrauchseinrichtungen gezielt ansteuern. Verbraucher profitieren dabei durch reduzierte Netzentgelte [74].

Netzbetreiber erhalten durch intelligente Messsysteme wichtige Zustandsdaten zum Betrieb ihrer Stromnetze mit Erneuerbaren Energien und flexiblen Verbrauchern. Aber auch für Unternehmen als Letztverbraucher ergeben sich durch intelligente Messsysteme Mehrwerte:

- **Transparenz:** Die Erfassung und Visualisierung von Stromverbrauchsdaten in hoher zeitlicher Auflösung kann zu Änderungen des Verbrauchsverhaltens, Energieeinsparungen und aktiver Umsetzung von Energieeffizienzmaßnahmen führen [10].
- **Dynamische Stromtarife:** Hochaufgelöste Stromverbrauchsdaten bilden die Grundlage, um Anreize zur Verlagerung des Stromverbrauchs in Zeiten mit geringen Strompreis zu setzen und dadurch Energiekosten zu senken.
- **Energiemanagement:** Ein flexibles Lastmanagement ermöglicht es, von reduzierten Netzentgelten zu profitieren (vgl. §14a EnWG) und Energieflüsse von Verbrauchern, Erzeugungsanlagen und Speichern zu optimieren.

Der Einbau intelligenter Messsysteme erfolgt für Verbraucher abhängig vom Jahresstromverbrauch durch den Messstellenbetreiber. Dies ist in der Regel der örtliche Netzbetreiber. Dabei kann zwischen zwei relevanten Gruppen im gewerblichen Bereich differenziert werden (s. Tabelle 4, Folgeseite).

Tabelle 4: Rollout Vorgaben für den Einbau intelligenter Messsysteme in Deutschland [75]

Verbrauchergruppe	Rollout Vorgaben für Messstellenbetreiber
SLP*-Verbraucher 6.000-100.000 kWh pro Jahr	Einbau ab 2025 auf Kundenwunsch verpflichtend Einbau von 95% der Messstellen bis 2030
RLM**-Verbraucher > 100.000 kWh pro Jahr	Einbau ab 2028 auf Kundenwunsch verpflichtend Einbau von 95% der Messstellen bis 2032

*SLP: Standardlastprofil-Verbraucher sind Unternehmen bzw. Messstellen mit einem Jahresstromverbrauch unter 100.000 kWh. Dazu gehören unter anderem kleinere Gewerbebetriebe wie Restaurants, Bäckereien oder Dienstleistungsbetriebe [76].

**RLM: Die Registrierende Leistungsmessung erfolgt in der Regel bei Messstellen mit einem Jahresstromverbrauch über 100.000 kWh [76]. Dies sind größere Gewerbe- und Industriebetriebe wie Supermärkte, Produktionsunternehmen oder öffentliche Verwaltungsgebäude.

Die Differenzierung zwischen SLP- und RLM-Verbrauchern ist auch für diese Arbeit relevant. In Deutschland wurde bei **SLP**-Verbrauchern bisher nur der Jahresstromverbrauch erfasst (ein Messwert pro Jahr). Mit dem Einbau intelligenter Messsysteme werden in diesen Unternehmen erstmals Lastgangdaten (bspw. in einer Auflösung von 15-min) erhoben, auf deren Grundlage eine detailliertere Analyse des energetischen Ist-Zustands möglich ist. Bei **RLM**-Verbrauchern erfolgt bereits heute eine registrierende Leistungsmessung anhand digitaler Stromzähler (sog. RLM-Messung). Dabei erheben Energielieferanten zu Abrechnungszwecken Lastgangdaten in einer Auflösung von 15-min [76].

2.3.3 Energiemonitoring-Systeme

Das Monitoring umfasst die Sicherstellung eines bedarfsgerechten, effizienten und wirtschaftlichen Gebäude- und Anlagenbetriebes [77]. Das **Energiemonitoring** ist dabei neben dem Anlagenmonitoring und Gebäude- und Behaglichkeitsmonitoring ein Teil des technischen Monitorings (s. Abbildung 7).

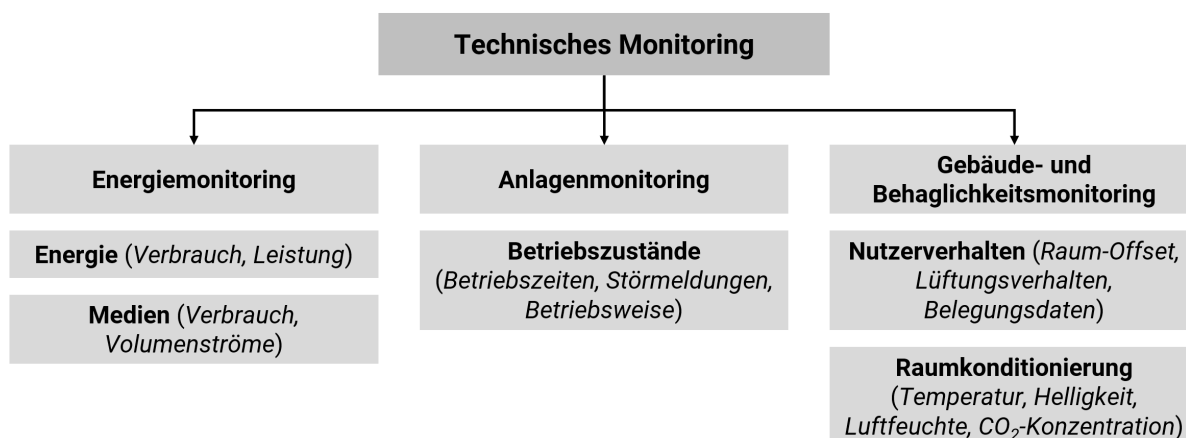


Abbildung 7: Technisches Monitoring mit Unterbereichen (eigene Darstellung nach [77])

Energiemonitoring-Systeme sind Messsysteme, die zur Erfassung, Überwachung und Analyse von Daten, Informationen und Zuständen dienen [68]. Mit der Erfassung der wichtigsten Energieträger stellen Energiemonitoring-Systeme einen wesentlichen Baustein für ein umfassendes Energiemanagement im Unternehmen dar. Energiemonitoring-Systeme werden für die Erfassung verschiedenster Messgrößen wie Gase, Feststoffe, Flüssigkeiten oder Druckluft eingesetzt. In der Regel wird die Energiemenge bzw. Leistung dabei nicht direkt erfasst, sondern auf der Grundlage von Messgrößen (bspw. Strom, Spannung) berechnet (indirekte Messverfahren) [78].

Der Aufbau von Energiemonitoring-Systemen kann grundlegend in drei Bereiche eingeteilt werden (s. Abbildung 8) [68].

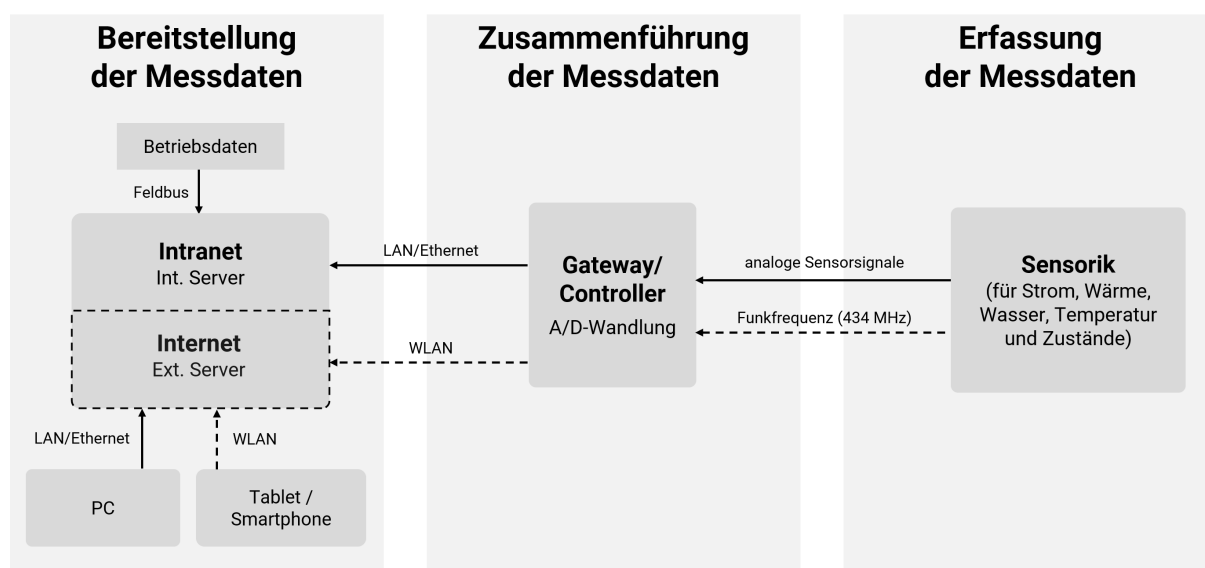


Abbildung 8: Schematischer Aufbau von Energiemonitoring-Systemen (eigene Darstellung)

Bei der Verwendung von Sensorik zur Erfassung der Messdaten wird zwischen funkbasierter und kabelgebundener Verbindung zum Gateway bzw. Messcontroller differenziert. Die verwendeten Sensortypen sind dabei abhängig vom zu erfassenden Energieträger bzw. Medium. Im Gateway bzw. Messcontroller findet eine Umwandlung der analogen Eingangssignale in digitale Messdaten (A/D-Wandlung) statt. Anschließend erfolgt die Speicherung und Übertragung der Messdaten via LAN/Ethernet oder WLAN auf einen unternehmensinternen Server (Intranet). Alternativ werden die Daten durch Fernübertragung (Internet) auf einen externen Server geladen. Die Bereitstellung der Messdaten erfolgt in der Regel über spezielle Energiemanagement-Software, auf die mittels PC, Tablet oder Smartphone zugegriffen werden kann [68].

Energiemonitoring-Systeme können weiterhin in stationäre und mobile Messsysteme unterteilt werden. Bei stationären Messsystemen wird das Messsystem fest im Unternehmen verbaut. Dadurch ist eine langfristige Aufzeichnung, Überwachung und Analyse der Messdaten möglich. Mobile Messsysteme werden auf dem Markt meist in Form von Messkoffern angeboten und ermöglichen eine kurzfristige, zeitlich limitierte Erfassung von Messdaten. Auf die genauen Unterschiede zwischen stationären und mobilen Messsystemen wird in Kapitel 4 eingegangen.

In Bezug auf die Erfassung von **Stromverbräuchen** bestehen Unterschiede zwischen den im vorherigen Abschnitt vorgestellten intelligenten Messsystemen und Energiemonitoring-Systemen. Energiemonitoring-Systeme ermöglichen die systematische Erfassung des Stromverbrauchs einzelner (Teil-)Bereiche oder elektrischer Verbraucher. Anhand dieser Untermessungen (engl. **Submetering**) kann eine strukturierte Aufschlüsselung des Gesamtstromverbrauchs erfolgen und somit eine Basis für die Identifikation und Umsetzung von Energieeffizienzmaßnahmen geschaffen werden. Intelligente Messsysteme bzw. Smart Meter erfassen in der Regel nur den Gesamtstromverbrauch des Unternehmens. Die mit Submetering verbundenen Mehrwerte werden somit nicht ermöglicht. In Abbildung 9 ist die Differenzierung zwischen Smart Metern und Submetering graphisch dargestellt⁴.

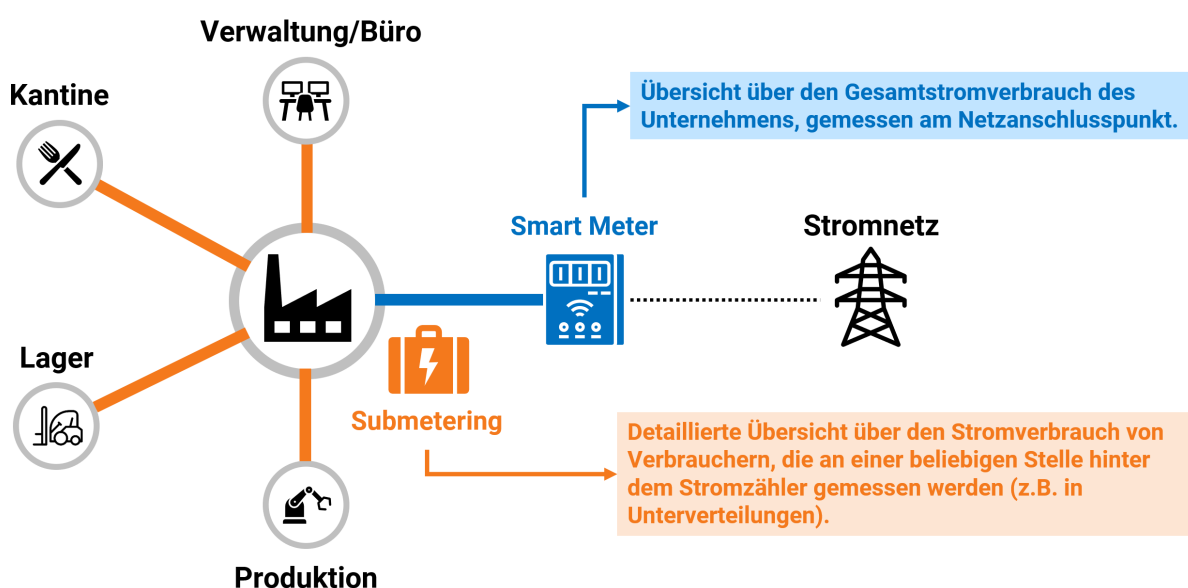


Abbildung 9: Erfassung von Stromverbräuchen – Differenzierung zwischen Smart Metern und Submetering (eigene Darstellung)

⁴ Vereinfachte schematische Darstellung mit einem Hauptstromzähler. Der Gesamtstromverbrauch kann sich auch aus mehreren Stromzählern ergeben.

Kapitel 3

Stand der Forschung

Dieses Kapitel gibt eine Übersicht über den theoretischen Hintergrund und bestehende Literatur zum Thema der vorliegenden Arbeit. Das Kapitel fasst die bestehende Literatur zusammen und identifiziert Lücken und Herausforderungen in der aktuellen Forschung. Aus den Forschungslücken leitet sich der Forschungsansatz der Arbeit ab.

3.1 Energieeffizienz im gewerblichen Bereich

Die Reduktion der Energiekosten ist für Unternehmen aufgrund der steigenden Energiepreise in den letzten Jahren immer wichtiger geworden. Laut der Preisanalyse des *Bundesverbandes der Energie- und Wasserwirtschaft* (BDEW) sind die Strompreise für Industriekunden in Deutschland zwischen 2013 und 2023 um etwa 75% gestiegen [79]. Trotz des starken Anstieges der Stromkosten zeigen aktuelle Studien, dass das Energieeinsparpotenzial in der deutschen Industrie nach wie vor besonders hoch ist [80]. Weitere Studien der *International Energy Agency* (IEA) haben ungenutzte Potenziale für kosteneffiziente Energieeinsparungen speziell in kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) identifiziert. So könnten durch kostengünstige Energieeffizienzmaßnahmen bis zu 30% des Energieverbrauchs eingespart werden [81].

Einzelnen betrachtet verbrauchen **KMU** nur geringe Mengen an Energie, aber insgesamt gesehen ist ihr Energiebedarf beträchtlich. Nach Schätzungen der IEA verbrauchen KMU mehr als 13% der gesamten weltweiten Energienachfrage [81]. Insgesamt sind mehr als 22,5 Millionen Unternehmen in der EU sind KMU, was 99,8 % aller Unternehmen entspricht [82]. Obwohl sie hinsichtlich ihres Energieverbrauchs und ihres Energiesparpotenzials so wichtige Akteure sind, werden die KMU von der derzeitigen Energieeffizienzpolitik in der EU weitgehend übersehen [83]. Mit der Einführung der Energieeffizienzrichtlinie (EED, 2012/27/EU) im Jahr 2012 werden große Unternehmen zur regelmäßigen Durchführung von Energieaudits verpflichtet, sofern sie kein Energiemanagementsystem einführen. KMU werden darüber hinaus dazu ermutigt, sich ebenfalls Energieaudits zu unterziehen

[84]. Da es jedoch nach wie vor keine Verpflichtungen für KMU gibt, bleibt ein großes Energiesparpotenzial ungenutzt. Mit der im Jahr 2023 aktualisierten Richtlinie 2023/1791 werden lediglich öffentliche Stellen und Rechenzentren zu jährlichen Energieeinsparungen verpflichtet [50].

Obwohl ein breites Spektrum an kosteneffizienten Energieeffizienzmaßnahmen zur Verfügung steht (vgl. *Thollander et al.* [85]), mangelt es an deren Umsetzung aufgrund KMU-spezifischer Barrieren (vgl. *Rodin & Thollander* [86], *Trianni & Cagno* [87]). *Fawcett & Hampton* [83] kommen zu zwei übergreifenden Erkenntnissen, die für KMU unabhängig von der Branche besonders relevant sind:

- Erstens sind die Funktionen des Energiemanagements oft auf eine einzige oder sehr wenige Personen konzentriert. Daher sind die individuellen Überzeugungen und Werte dieser Personen für die Energiemanagemententscheidungen von KMU besonders wichtig.
- Zweitens haben KMU in der Regel weniger Zeit und technische Fähigkeiten, um Energieeffizienzpotenziale zu identifizieren und relevante Informationen zu verarbeiten.

Janda et al. [88] verdeutlichen, dass KMU darüber hinaus häufig keinen Zugang zu grundlegenden Energiedaten haben und über veraltete Hardware (u.a. Stromzähler) verfügen. Ohne den Einsatz modernster Sensoren und Zähler zur Überwachung und Steuerung ihres Energieverbrauchs sind KMU "datenarm" und haben keine Transparenz über ihre Energie- und Lastflüsse [7, 88]. Auch an Informationen über Energiekosten, die zur Verbesserung der Energieeffizienz und der Bewertung von Investitionen erforderlich sind, scheint es häufig zu mangeln (vgl. *Mickovic & Wouters* [89]). *Mattes & Jäger* [90] kommen in ihrer Studie zu Energieeffizienz im Betriebsalltag zu dem Schluss, dass insbesondere investitionsintensivere und komplexere Energieeffizienztechnologien in Betrieben und Branchen mit einem niedrigeren Energieverbrauch in einem geringeren Umfang verbreitet sind. Die bisher ungenutzten Einsparpotenziale in KMU können daher gerade durch die Einführung digitaler Technologien erschlossen werden (vgl. *Warren et al.* [91]).

Die Ergebnisse des Forschungsprojektes *Smarte Technologien für Unternehmen* zeigen, dass trotz eines marktseitig vorhandenen Angebotes an smarten Technologien eine Nutzung bisher in KMU nicht gegeben ist [7]. So ist bspw. mobile Messtechnik bei den Unternehmen kaum bekannt und wird daher nicht als relevante Option angesehen. Dementsprechend hoch sind auch die in der Praxis identifizierten Effizienzpotenziale. Lösungen zur Erschließung des Energieeffizienzpotenzials von KMU sollten vor diesem Hintergrund in erster Linie die Informationsbasis von KMU verbessern, damit sie geeignete Maßnahmen ergreifen können [92].

Effizienzanalysen und qualitative Energieaudits haben sich als wertvolle Instrumente erwiesen, um das ungenutzte Potenzial in Unternehmen zu erschließen [93]. Energieaudits können insbesondere in KMU dazu beitragen, die Informationsbarrieren für Energieeffizienz-Investitionen zu überwinden. Allerdings zeigen Untersuchungen auch, dass die Vorteile von Energieaudits nicht mehr gegeben sind, wenn Unternehmen in finanziellen Engpässen stecken. Limitierte finanzielle Ressourcen können Unternehmen dazu zwingen, Energieeffizienzinvestitionen ungeachtet der durch Energieaudits herausgestellten Vorteile aufzugeben oder zu verschieben [94]. *Fleiter et al.* [95] kommen basierend auf einer empirischen Studie zu den Treibern von Energieeffizienz-Investitionen auf der Basis durchgeführter Energieaudits in KMU zu dem Schluss, dass die Qualität der Energieaudits die Umsetzung

von Energieeffizienzmaßnahmen beeinflusst. Qualitätsstandards und eine verbindliche Überwachung von Energieaudits sollten daher vorgesehen werden.

Auch in **öffentlichen Gebäuden** fehlen häufig die Ressourcen oder das Know-How, um die Einsparpotenziale aufzudecken [96]. 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. Selbst in größeren Liegenschaften kann die Infrastruktur zur Erfassung des gebäudescharfen Energieverbrauchs fehlen [97]. Hinzu kommt, dass für bestehende Nichtwohngebäude bislang effiziente Lösungen für eine nutzungsspezifische gesamtenergetische Analyse fehlen. So wird die Gebäudebilanzierung nach DIN V 18599 aufgrund der erforderlichen umfangreichen Eingabedaten als unverhältnismäßig aufwendig angesehen [98].

Datentransparenz über die Energieflüsse stellt daher eine weitere, wichtige Grundlage zur Identifikation von Einsparpotenzialen und zur Umsetzung von Effizienzmaßnahmen dar [10, 99]. In ihrem Energieaudit-Ansatz zeigen *Fresner et al.* [100], 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. Nicht zuletzt lassen sich auch im Kontext von Energiefeedbacks besonders hohe Potenziale erschließen, wenn es sich um disaggregiertes⁵ Feedback zu einzelnen elektrischen Verbrauchern handelt (vgl. *Armel et al.* [101]). In der Erhebung und Analyse von Energieverbrauchsdaten einzelner elektrischer Geräte liegt somit ein großes Potenzial zur Effizienzsteigerung.

Auf der Grundlage der dargestellten Literatur können die folgenden Punkte zu bestehenden **Forschungslücke** festgehalten werden:

- Im gewerblichen Bereich bestehen nach wie vor große Einsparpotenziale.
 - In **KMU** vor allem aufgrund spezifischer Barrieren im Kontext von Investitionen in Energieeffizienz.
 - In **öffentlichen Gebäuden** aufgrund unzureichender Datengrundlage und aufwendigen etablierten Verfahren zur Gebäudebilanzierung.
- In der Datentransparenz liegt ein Schlüssel zur Erschließung der bisher ungenutzten Effizienzpotenziale im gewerblichen Bereich.

⁵ Die Disaggregation bzw. die Aufschlüsselung des Energieverbrauchs auf einzelne Verbraucher umfasst in der Literatur eine Reihe von statistischen Ansätzen zur Extraktion von Daten auf Endverbraucher- oder Geräteebene aus einem aggregierten oder gebäudeübergreifenden Energiesignal [101].

3.2 Einsatz von Messtechnik in der Effizienzanalyse

Im Forschungsprojekt *Smarte Technologien für Unternehmen* wurden basierend auf einem Technologie-Screening zu digitalen, smarten Technologien zwei Technologie-Kategorien als vielversprechend für den Einsatz in KMU herausgestellt: **Smart Meter** bzw. intelligente Messsysteme und **Energiemonitoring-Systeme** [7]. Der Einsatz dieser Technologien kann die Informationsbasis in KMU und öffentlichen Gebäuden verbessern. Werden diese im Zuge einer Effizienzanalyse eingesetzt, kann der energetische Ist-Zustand basierend auf der Auswertung realer Verbrauchsdaten identifiziert und bewertet werden [10, 68].

Detaillierte Verbrauchsdaten einzelner Bereiche und Anlagen bieten im Vergleich zu den Daten des Gesamtstromverbrauchs erhebliche Vorteile in Bezug auf vertiefte Analysen [92]. Hochaufgelöste Energieverbrauchsdaten können bis auf Verbraucherebene erfasst, visualisiert und analysiert werden. So wird ein Verständnis über den Energieverbrauch und Energiekosten und eine Grundlage zur Identifikation und Bewertung von Einsparpotenzialen geschaffen. Aufgrund des geringen Installationsaufwands und der geringen Kosten wurde im Rahmen des Forschungsprojektes der Einsatz **mobiler Messtechnik** als spezifische Lösung für KMU identifiziert.

Vor dem Hintergrund, dass die verursachergerechte Zuordnung von Energieflüssen (insbesondere elektrischer Energie) für KMU aus technischer und finanzieller Sicht eine Hürde darstellt, wurde auch im Forschungsprojekt *sustainKMU* ein mobiler Messkoffer zur Erfassung von Stromverbrauchsdaten entwickelt [102]. Die Messtechnik im Kofferformat kann Messdaten im industriellen Umfeld über einen flexiblen Zeitraum erfassen. Eine unterbrechungsfreie Installation der Messtechnik sowie die Fernübertragung der Stromverbrauchsdaten sind weitere Eigenschaften der entwickelten Messkoffer-Lösung [102].

Die *Kompetenzstelle Energieeffizienz Ost-Württemberg* hat eine Methodik entwickelt, Messsysteme im Zuge von Energieberatungen einzusetzen, um den Energieverbrauch vor und nach einer Effizienzmaßnahme zu vergleichen und so die CO₂-Reduktion darzustellen [11]. Durch den Einsatz von Messtechnik sollen Unternehmen gezielt auf ihre Potenziale hingewiesen werden. Eine für das Unternehmen leicht zugängliche Visualisierung des energiebezogenen Verbrauchs von Anlagen und Maschinen und somit eine Darstellung der Hauptkostentreiber wird als Zielsetzung für die Messungen definiert. Eine Messung des Gesamtstromverbrauchs wird insbesondere bei produzierenden Unternehmen als nicht zielführend beschrieben, da versteckte Verbraucher, die mit der Zeit aus dem Fokus geraten sind, nicht identifiziert werden können [11].

Im Projekt *Teilenergiekennwerte von Nichtwohngebäuden* des IWU werden mit einem entwickelten Lastgang- und Hochrechnungstool Arbeitshilfen zur Auswertung von Messdaten aus Bestandsgebäuden bereitgestellt. Insbesondere das Hochrechnungstool setzt den Einsatz (mobiler) Messtechnik voraus und dient dazu, Teilenergiekennwerte für einzelne Gewerke (z.B. Luftförderung, Beleuchtung, Kälte) auf der Basis von Kurzzeitmessungen zu prognostizieren [103]. Die Hochrechnung ist notwendig, da Teilenergiekennwerte flächenbezogene Kennwerte des Bedarfs an Nutz-, End- oder Primärenergie in Form eines spezifischen Jahreswertes angeben (z.B. in kWh/m²a) [13].

Genauere Angaben über den tatsächlichen Einsatz von Messtechnik in Energieberatungen und Effizienzanalysen sind schwer zu beziffern. *Hein et al.* [11] kommen nach Auswertung bereits vermittelter und durchgeführter Energieberatungen zu dem Schluss, dass hauptsächlich aus Zeitmangel seitens der Energieberater meistens keine Messungen des Energieverbrauchs erfolgt. Gemäß der Vorgaben des *Bundesamtes für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle* (BAFA) ist der Einsatz von Messtechnik im Rahmen der Erstellung von Energieaudits nach DIN EN 16247-1 (Energieberatung Mittelstand) auch nicht zwingend vorgeschrieben. So kann bei „nicht kontinuierlich gemessenen Verbrauchern, für die eine Ermittlung des Energieverbrauchs mittels Messung nicht oder nur mit einem erheblichen Aufwand möglich ist, [...] der Energieverbrauch auch durch nachvollziehbare Hochrechnungen von bestehenden Betriebs-, Energie- und Lastkennwerten [...] ermittelt werden“ [104]. Die Anwendung solcher Hochrechnungsverfahren ist mit Unsicherheiten behaftet und Potenziale können ggf. nur unzureichend ermittelt werden [11]. Auch *Ondrusch & Kraushaar* [105] kommen zu dem Schluss, dass zur Bestimmung der Leistungsaufnahme von Anlagen stets Messungen durchgeführt werden sollten, da eine Abschätzung auf der Basis der angegebenen Nennleistung meist nicht zu repräsentativen Kennwerten führt.

In der Literatur wird der Einsatz von Messtechnik im Zuge von Energieberatungen und Effizienzanalysen häufig in Verbindung mit Detailanalysen bzw. Detailmessungen gebracht, die sich beispielsweise auf einzelne Prozesse, Anlagen oder Verbraucher konzentrieren [106]. Auf der Grundlage dieser Detailmessungen können Energiekennzahlen zum Vergleich des Stromverbrauchs mit anderen Betrieben der Branche genutzt und Energieeffizienz-Potenziale berechnet werden [8]. Der Beitrag der erfassten Prozesse, Anlagen und Verbraucher zum Gesamtstromverbrauch kann anhand dieser Detailmessungen allerdings nicht unmittelbar bestimmt werden. Vielmehr liegt der Fokus auf einer Optimierung der mit der Detailmessung betrachteten Systeme.

Diverse Leitfäden und Veröffentlichungen beschreiben den Einsatz von Messtechnik in der Praxis und geben Hinweise für die Anwendung im gewerblichen Bereich. Der *Leitfaden Lastgangmessung* des *Karlsruher Instituts für Technologie* (KIT) macht auf Probleme bei Strommessungen durch Zugänglichkeit der Elektroverteilungen und fehlende Standards bei der Zuordnung und Aufteilung von Stromkreisen aufmerksam [107]. Auch Empfehlungen zum Messzeitraum und der zeitlichen Auflösung von Daten werden gegeben. Im Rahmen des Projektes *ETA-Transfer* wurde ein *Leitfaden Monitoring von Energieeffizienzmaßnahmen* erstellt, der Grundlagen zur Konzeptionierung und dem Aufbau von Energiemonitoring-Systemen (stationär und mobil) aufführt [108]. Auch diesem Leitfaden können wichtige Erfahrungswerte zum grundlegenden Einsatz mobiler Messtechnik entnommen werden.

Allerdings gibt es noch keine standardisierte Methode für den systematischen, verallgemeinerbaren Einsatz von mobiler Messtechnik zur Schaffung von Transparenz über elektrische Energieflüsse im gewerblichen Bereich. In Anlehnung an die VDI 3922 [106] stellt dies die Erfassung des energetischen Ist-Zustandes und damit die Grundlage zur weiteren Identifikation von Energieeffizienzpotenzialen dar. Durch einen systematischen und effizienten Einsatz von mobiler Messtechnik könnte die Barriere des hohen Zeitaufwands überwunden und die Qualität von Energieberatungen und Effizienzanalysen verbessert werden.

Die Literaturrecherche zeigt, dass es ebenfalls keine etablierten Verfahren zur automatisierten Auswertung von Messdaten gibt, die im Zuge von Kurzzeitmessungen mit mobiler Messtechnik erhoben werden. Bestehende Leitfäden zur Lastprofilanalyse konzentrieren sich auf den Gesamtstromverbrauch von Messobjekten und längere Zeitreihen (z.B. jährliche Stromverbrauchsdaten) (vgl. [107, 108]).

Zur Charakterisierung von Lastprofilen anhand von Parametern liegen nur wenige Studien vor. *Li et al.* [109] beschreiben einen Ansatz zur Charakterisierung von Gebäudelastprofilen nach dem Zeitbereich. Die den Analysen zugrundeliegenden Daten umfassen jedoch Zeitreihen über ein vollständiges Jahr in einer Auflösung von 15-min. Auch auf der Ebene von Anlagen und Maschinen gibt es Untersuchungen zu verschiedenen Methoden der Lastprofilanalyse (vgl. *Teiwes et al.* [110]). Viele Veröffentlichungen fokussieren allerdings elektrische Lastprofile eines spezifischen Anwendungsbereichs, wie bspw. Werkzeugmaschinen (*Liebl et al.* [111]) oder Produktionsunternehmen und -prozesse (*Henning et al.* [112], *Dehning et al.* [113], *Gontarz et al.* [114]). Eine vollumfängliche Lastprofilanalyse diverser Anwendungsbereiche scheint speziell für Kurzzeitmessungen mit mobiler Messtechnik noch nicht vorhanden zu sein.

Ansätze zur Disaggregation und der automatisierten Aufschlüsselung der Gesamtlast auf spezifische Verbrauchsgruppen (u.a. non-intrusive load monitoring - NILM) sind bisher vor allem auf Anwendungen im Haushaltsbereich beschränkt. Die Verbrauchsstrukturen im gewerblichen Bereich sind zu vielfältig für die Anwendung von Disaggregationsalgorithmen [115]. Insbesondere aufgrund der Heterogenität der KMU in Bezug auf Arbeitsbereiche, Prozesse und Unternehmensgröße ist zu erwarten, dass die Anwendung solcher Algorithmen auf Lastprofile unterschiedlichster elektrischer Verbraucher und Ebenen (Gesamtunternehmen vs. Anlage/Maschine) eine Herausforderung darstellt und viel Zeit in Anspruch nimmt [116].

Vor dem Hintergrund der dargestellten Literatur können die folgenden Punkte zu bestehenden **Forschungslücke** festgehalten werden:

- Mobile Messtechnik zur Stromverbrauchsmessung wird bisher kaum genutzt, obwohl die Potenziale dadurch erschlossen werden könnten.
- Es ist nicht klar, welche Messtechnik für eine systematische Erfassung elektrischer Energieflüsse im gewerblichen Bereich angewendet werden soll.
- Es gibt bisher keine systematische und effiziente Methodik für den Einsatz mobiler Messtechnik im gewerblichen Bereich.
- Es gibt bisher keine automatisierte Auswertemethode für Stromverbrauchsdaten, die in Kurzzeitmessungen basierend auf dem Einsatz mobiler Messtechnik erhoben wurden.

3.3 Zwischenfazit: Stand der Forschung

Im gewerblichen Bereich bestehen nach wie vor große Energieeinsparpotenziale. Diese Potenziale werden aktuell nicht genutzt. In KMU liegen spezifische Barrieren für Investitionen in Energieeffizienz vor, die eine flächendeckende Erschließung der Potenziale verhindern. Bemängelt wird dabei häufig die schlechte Datengrundlage, die neben KMU auch im öffentlichen Bereich vorliegt. Etablierte Verfahren zur energetischen Bewertung von Gebäuden (VDI 3807 oder DIN V 18599) sind aufwendig und komplex in der Anwendung. Datentransparenz kann ein Schlüssel sein, die bestehenden Potenziale im gewerblichen Bereich zu erschließen. Erst auf der Grundlage realer Stromverbrauchsdaten einzelner Bereiche und Anlagen kann ein detailliertes Bild über die elektrischen Energieflüsse geschaffen werden. An dieser Stelle setzt die vorliegende Arbeit an und erarbeitet in den folgenden Kapiteln den einen Lösungsansatz, der die folgenden Bausteine umfasst:

- Kriterienorientierte Auswahl geeigneter mobiler Messtechnik zur Erfassung elektrischer Energieflüsse im gewerblichen Bereich (Kapitel 4).
- Systematischer Einsatz mobiler Messtechnik zur Schaffung von Transparenz über die elektrischen Energieflüsse und Verbraucher (Kapitel 5).
- Automatisierte Auswertemethoden für Stromverbrauchsdaten, die in Kurzzeitmessungen erhoben werden (Kapitel 6).

Kapitel 4

Einsatz mobiler Messtechnik

Kapitel 3 verdeutlicht, dass bisher kein systematischer Ansatz zum Einsatz von mobiler Messtechnik für die Analyse von Energiesystemen in gewerblichen und öffentlichen Gebäuden vorliegt. Darüber hinaus ist nicht klar, welche Messsysteme für diesen Einsatz besonders geeignet sind. Daher müssen auch Anforderungen an die eingesetzte Messtechnik definiert werden, um auf dieser Basis geeignete Messsysteme zu identifizieren. In diesem Kapitel wird zunächst ein allgemeiner Überblick über mobile Messtechnik gegeben und anschließend anhand von Kriterien eine Technologie-Auswahl verwendeter Messsysteme für das Mess- und Analysekonzept getroffen (Kapitel 4.1). In den darauffolgenden Kapiteln werden die ausgewählten Messsysteme im Detail vorgestellt (Kapitel 4.2 und 4.3). Abschließend werden die Erfahrungen und Lessons Learnt der im Zeitraum 2018-2021 durchgeführten Pre-Tests zur Herleitung der Messmethode zusammengefasst (Kapitel 4.4).

4.1 Übersicht und Anforderungen

4.1.1 Übersicht mobile Messtechnik

Energiemonitoring-Systeme können allgemein in mobile und stationäre Messsysteme eingeteilt werden (vgl. Kapitel 2.3.3). Mobile Messsysteme werden in der Regel in Form von portablen Messköpfen angeboten und können analog zu stationären Messsystemen für verschiedenste Anwendungsfälle eingesetzt werden. Zu den häufigsten Anwendungsfällen gehören:

- Elektrische Leistungsmessung
- Auslesung von Strom- und Wärmemengenzählern
- Wärmemengen- und Durchflussmessung
- Temperaturmessung
- Erfassung sonstiger Kenngrößen und Zustände

Die Regelungen zur Ausstattung von Messstellen mit intelligenten Messsystemen sind in §29 des Messstellenbetriebsgesetzes (MsbG) auf ortsfeste Zählpunkte beschränkt. Die Anwendung mobiler Messsysteme liegt demnach nicht im Geltungsbereich des MsbG. Dadurch finden mobile Messsysteme ein Marktumfeld vor, welches fast keine gesetzlichen Einschränkungen besitzt. Der Markt für intelligente Messsysteme ist hingegen seitens des Gesetzgebers stark reguliert (vgl. Kapitel 2.3.2).

Kennzeichnend für mobile Messsysteme ist weiterhin ein im Vergleich zu stationären Systemen geringerer Installationsaufwand sowie ein geringeres Investitionsvolumen [68]. Je nach zu erfassender Messgröße und Messverfahren können mobile Messsysteme auch ohne Unterbrechung der Betriebsvorgänge installiert werden. Mobile Messsysteme werden in der Regel temporär, d.h. über einen bestimmten Zeitraum eingesetzt [108]. Stationäre Messsysteme werden hingegen für den dauerhaften Einsatz installiert. In Tabelle 5 wird die Anwendung mobiler und stationärer Messsysteme gegenübergestellt.

Tabelle 5: Gegenüberstellung mobiler und stationärer Messsysteme (ergänzt aus [108])

	Mobile Messsysteme	Stationäre Messsysteme
Investitionsvolumen	Niedrig	Hoch
Installationsaufwand	Niedrig	Hoch
Betriebsaufwand	Hoch	Niedrig
Flexibilität	Hoch	Gering
Zielsetzung und Anwendung	Erstdiagnosen und Potenzialanalysen Messung spezifischer Energiebedarfe Überprüfung von Energieeffizienzmaßnahmen Detailmessungen und Fehlerdiagnosen	Langfristiges Monitoring und Controlling Automatisierte Energiereports und Alarmer Frühzeitige Erkennung von Maßnahmen

Mobile Messsysteme werden auf dem Markt häufig in Form von Messkoffern angeboten. Dabei kann zwischen den folgenden beiden Typen differenziert werden:

- Messkoffer mit Spezifizierung auf einen einzelnen Anwendungsfall
- Multifunktions-Messkoffer (Abdeckung mehrerer Anwendungsfälle)

Multifunktions-Messkoffer bieten den Vorteil, mehrere Anwendungsfälle (bspw. Zählerauslesung, Wärmemengen- und Durchflussmessung) parallel abdecken zu können. Dadurch ergibt sich für diese Messkoffer ein flexiblerer Einsatzbereich. Einschränkend kann bei Multifunktions-Messkoffern hingegen die limitierte Anzahl von Messsensoren für einzelne Anwendungsfälle sein. Mobile Messkoffer mit Spezifizierung bieten für den verfügbaren Anwendungsfall in der Regel mehr Flexibilität zum Anschluss der Messsensoren. Dies ist insbesondere für die Auswahl mobiler Messsysteme relevant, die im nachfolgenden Kapitel erläutert wird.

4.1.2 Kriterien und Technologie-Auswahl

Zur Identifikation geeigneter mobiler Messsysteme für den Einsatz in gewerblichen und öffentlichen Gebäuden wurden mehrere Kriterien definiert. Auf der Basis der Kriterien werden die Anforderungen an die mobilen Messsysteme erläutert.

Zunächst erfolgt eine Eingrenzung betrachteter mobiler Messsysteme auf strombasierte Analysen mit mobiler Messtechnik (vgl. Kapitel 3). Somit stehen mobile Messsysteme zur elektrischen Leistungsmessung im Fokus der Betrachtung. Die Erfassung von Wärmeströmen ist mittels mobiler Messtechnik in der Praxis komplexer. Darüber hinaus sind Wärmeversorgungssysteme von Gebäuden häufig heterogener aufgebaut (Fernwärmeanschluss, Gaskessel, Blockheizkraftwerk, etc.), was die Entwicklung einer einheitlichen Messmethode für wärmebezogene Kenngrößen erschwert.

Des Weiteren sind Investitionskosten und das geringe verfügbare Kapital insbesondere kleinerer Unternehmen wirtschaftliche Hindernisse für Investitionen in Energieeffizienz (vgl. *Cagno et al.* [117]). Daher ist das **Kosten-Nutzen-Verhältnis** ein wichtiges Kriterium für die Auswahl geeigneter Messsysteme. Das Investitionsvolumen für die Auswahl geeigneter mobiler Messtechnik sollte daher möglichst gering sein.

Ein gutes Kosten-Nutzen-Verhältnis setzt ein weiteres wichtiges Kriterium für mobile Messsysteme voraus: Die parallele Erfassung mehrerer Messpunkte über den Zeitraum der Kurzzeitmessung [118]. Um den Gesamtstromverbrauch eines Messobjektes möglichst schnell und effizient aufzuschlüsseln, sollte das mobile Messsystem über möglichst viele Messwandler-Eingänge (Messkanäle) für Strommessungen verfügen. Dadurch kann die Gesamteffizienz der Messkampagnen maßgeblich erhöht werden, da die Anzahl notwendiger Messreihen zur Erfassung aller relevanten Stromverbraucher verringert wird.

Als ein weiteres wichtiges Kriterium ist der Fernzugriff und die Fernauslesbarkeit der Messdaten zu nennen [118]. Dadurch wird zum einen ein einfacher Plausibilitätscheck während der Messkampagne gewährleistet. Eventuelle Messfehler können unmittelbar identifiziert und behoben werden, was die Qualität der Messungen erhöht. Zum anderen sichert die unmittelbare Datenübertragung der Messdaten (bspw. auf einen Server) einen einfachen Datenzugriff für Auswertungen und Analysen. Ein ggf. aufwendigerer Datenexport vom Messkoffer entfällt, wodurch Zeit eingespart und die Gesamteffizienz der Messkampagne erhöht wird. Insgesamt wurden 17 mobile Messsysteme (sog. Messkoffer) unterschiedlicher Hersteller nach den oben genannten Kriterien bewertet⁶. Nachfolgend wird die Anwendung der einzelnen Kriterien auf die Messsysteme kurz erläutert (s. Tabelle 6, Folgeseite):

⁶ Hinweis zum Recherchestand: Das Technologie-Screening und die zugehörige Literaturrecherche zu mobilen Messsystemen wurden im Jahr 2020 durchgeführt. Die technischen Spezifikationen sowie Angaben zu Anschaffungskosten können daher abweichen (bspw. aufgrund von Aktualisierungen seitens der Hersteller).

Tabelle 6: Anwendung der Kriterien auf die Messsysteme

Kriterium	Ergebnis
Fokus Strommessungen	Insgesamt 4 von 17 betrachteten Messsystemen wiesen keine ausgeprägten Funktionalitäten für Strommessungen auf. Stattdessen lag der Fokus dieser Messsysteme auf Wärme-, Temperatur- und Druckmessungen sowie der Möglichkeit, bestehende Strom- und Wärmemengenzähler auszulesen.
Fernauslesbarkeit	Insgesamt 4 von 17 betrachteten Messsystemen wiesen keine Funktionalitäten zur Fernauslesung der Messdaten auf. Bei diesen Systemen sind die Messdaten in der Regel auf einer Speicherkarte (SD-Karte im Messkoffer) geschrieben und können vor Ort exportiert werden.
Parallele Teilbereichsmessung	Insgesamt 11 von 17 betrachteten Messsystemen wiesen nur eine unzureichende Anzahl von Messwandler-Eingängen für Strommessungen auf. Die höchste Anzahl lag bei 18-24 Messwandler-Eingängen, was die parallele Erfassung von 6-8 dreiphasiger elektrischer Verbraucher ermöglicht.
Kosten-Nutzen (Anschaffungskosten)	Die Anschaffungskosten lagen für die betrachteten Systeme bei etwa 1.300-13.000 EUR. Bei insgesamt 4 Systemen im oberen Preissegment handelte es sich um multifunktionale Messkoffer, die neben Strommessungen auch Temperaturen, Drücke und die Auslesung bestehender Zähler ermöglichen. Bei zwei Systemen konnten keine Anschaffungskosten ermittelt werden. Diese Systeme fielen aber aufgrund anderer Kriterien (Fokus Strommessungen, Fernauslesbarkeit) aus der Betrachtung. Die angegebenen Anschaffungskosten wurden nach Möglichkeit inklusive der Kosten für das Messequipment zur Ausstattung des Messsystems mit Messwandlern angegeben.

Im Zuge der Literaturrecherche zu geeigneten Messsystemen entsprechend den genannten Kriterien wird deutlich, dass insbesondere durch die parallele Teilbereichsmessung die Auswahl geeigneter Systeme stark eingegrenzt wird. Von den sechs in Frage kommenden Messsystemen mit mehr als 18 Messwandler-Eingängen wurde eines für die Anwendung in Messkampagnen ausgewählt. Die Wahl fiel auf ein mobiles Messsystem zur Wirkleistungsmessung von bis zu sechs dreiphasigen elektrischen Verbrauchern, welches neben der Erfüllung der technischen Anforderungen zusätzlich ein gutes Preis-Leistungsverhältnis aufweisen konnte⁷. Das mobile Messsystem wird ausführlich in Kapitel 4.2 vorgestellt und im Zuge der Messkampagnen in den Fallbeispielen als Hauptmesssystem verwendet.

Ergänzend zum Messsystem zur Wirkleistungsmessung wird auch ein Messsystem zur Scheinleistungsmessung eingesetzt⁸. Dies soll vor allem die Flexibilität des zur Verfügung stehenden Messequipments erhöhen und im Bedarfsfall (falls alle Messkanäle des Hauptmesssystems bereits belegt

⁷ Ausgewählt wurde das [mobile Messsystem me2go](#) der Firma manageE GmbH.

⁸ Ausgewählt wurde das [mobile Messsystem Energomonitor](#) der Firma Smart Cost.

sind) zur Erfassung zusätzlicher Messpunkte dienen. Das verwendete Messsystem zur Scheinleistungsmessung wird ausführlich in Kapitel 4.3 vorgestellt.

4.2 Messsystem zur Wirkleistungsmessung

4.2.1 Aufbau und Komponenten

Das ausgewählte mobile Messsystem zur Wirkleistungsmessung umfasst einen Hartschalenkoffer mit montiertem Datenlogger (Messcontroller mit 18 Messkanälen), 400 V CEE-Norm Anschlusskabel (16A, 5-polig) zum Spannungsabgriff sowie verschiedenen Messwandlern. Das mobile Messsystem ist spezifiziert auf die Messung von Strömen und Spannungen im 230/400 V dreiphasigen Niederspannungsnetz [119]. In Abbildung 10 ist das Messsystem dargestellt.

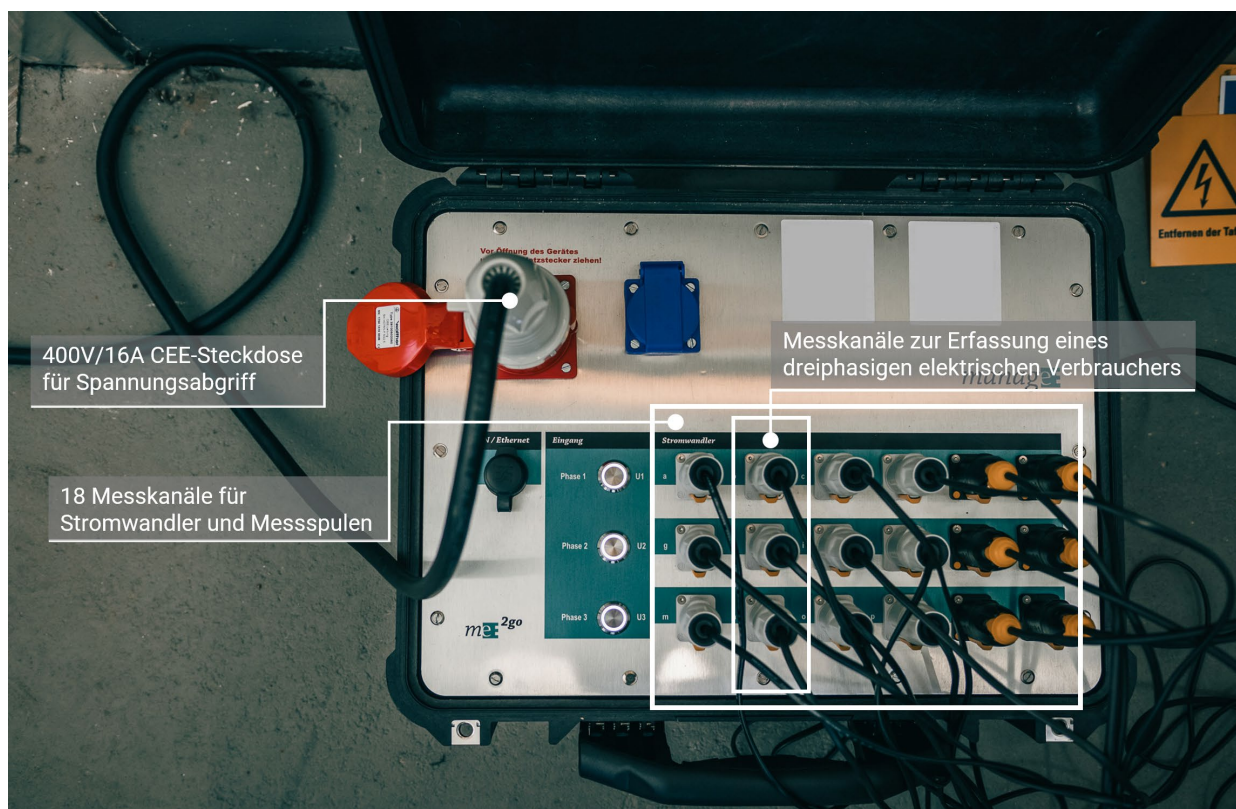


Abbildung 10: Mobiles Messsystem zur Wirkleistungsmessung

Zu erkennen sind zum einen 18 Messwandler-Eingänge zur Erfassung der Stromwerte sowie ein Eingang (CEE-Norm Anschluss) zum Abgriff der vorliegenden Netzspannung. Jeweils drei senkrecht abgebildete Messwandler-Eingänge erfassen die Stromwerte für einen dreiphasigen elektrischen Verbraucher. In Summe können somit sechs dreiphasige elektrische Verbraucher mit einem Messkoffer erfasst werden. Es handelt sich um ein leitungsgebundenes Messsystem, da die Messwandler über Kabelverbindungen mit dem Messkoffer verbunden werden (vgl. Kapitel 2.3.3).

In Abbildung 11 ist ein Anschlussschema des Messsystems im dreiphasigen Niederspannungsnetz dargestellt. Der Strom wird über Stromwandler und Messspulen an den drei stromführenden Leitern (L1-L3) des Verbrauchers abgenommen. Die relevanten Spannungsgrößen sind die Strangspannungen zwischen den Stromphasen und dem Neutralleiter [120].

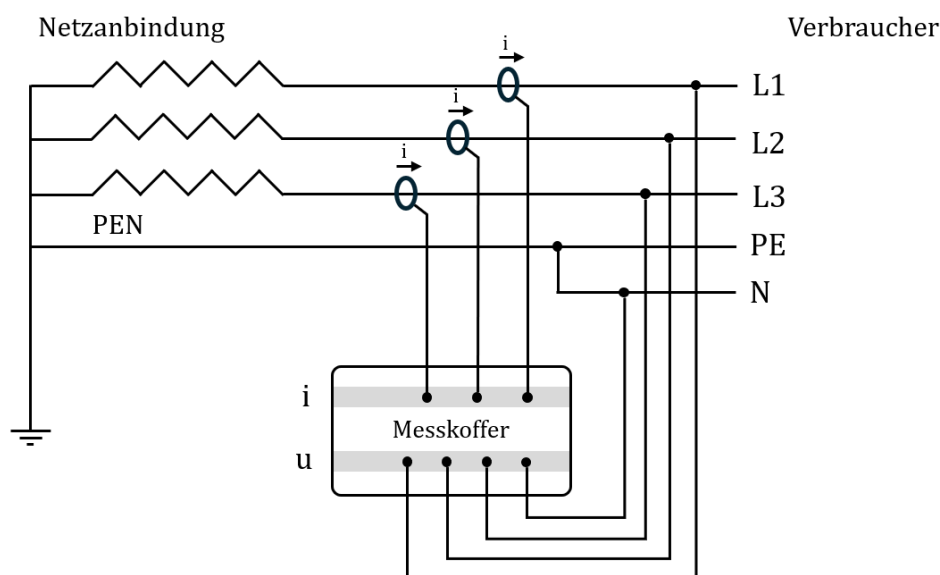


Abbildung 11: Anschlussschema des Messsystems im dreiphasigen Niederspannungsnetz

Als Messwandler zur Erfassung der Stromwerte kommen Kabelumbau-Stromwandler und Rogowski-Spulen zum Einsatz (s. Abbildung 12). Beide Messwandler können unterbrechungsfrei an der elektrischen Verteilung montiert werden. Das Grundprinzip beider Messwandler wird in Kapitel 4.2.2 erläutert.



Abbildung 12: Kabelumbau-Stromwandler (links) und Rogowski-Spule (rechts) [121, 122]

Die Sinusschwingungen der Spannung und des Stroms werden vom Messcontroller mit einer Abtast-rate von 4.096 Impulsen pro Sekunde (4,096 kHz) erfasst. Eine Sinusschwingung wird demnach im 50 Hz Netz mit 82 Impulsen erfasst. Das Messsystem stellt die Messdaten in der höchsten Messdatenauflösung sekundlich dar und speichert sie intern auf einer SD-Karte sowie extern durch Übertragung auf einem SQL-Server (stabile Internetverbindung vorausgesetzt). Auf dem SQL-Server werden die Messdaten in eine Datenbank geschrieben. Die Datenbank ist wiederum aus mehreren Tabellen aufgebaut. In diesen Tabellen sind die Messdaten in unterschiedlicher Messdatenauflösung abgespeichert:

- *data15m* speichert die Messdaten aller Messkanäle in einer Auflösung von 15-min (arithmetischer Mittelwert über 15-min Zeitintervall)
- *data1m* speichert die Messdaten aller Messkanäle in einer Auflösung von 1-min (arithmetischer Mittelwert über 1-min Zeitintervall)
- *data10s* speichert die Messdaten aller Messkanäle in einer Auflösung von 10-s (arithmetischer Mittelwert über 10-s Zeitintervall)

Eines der Hauptkriterien für die Auswahl des Messequipments bestand in der Möglichkeit der Fernauslesung der Messdaten. Dies kann nur über die Anbindung der Messtechnik an ein WLAN-Netzwerk bzw. ein Mobilfunknetz gewährleistet werden. Eine stabile Internetverbindung ist daher Grundvoraussetzung für die Fernüberwachung und Fernauslesung der Messdaten. Die Messsysteme verfügen dazu über einen integrierten Router mit SIM-Karte.

4.2.2 Beschreibung der Messgrößen

Induktiv gemessene Messgrößen

Für die elektrische Leistungsmessung mit digitaler Messtechnik müssen Spannung $u(t)$ und Strom $i(t)$ als Momentanwerte erfasst werden. Weitere elektrische Kenngrößen wie die Wirk-, Blind- und Scheinleistung werden auf der Basis dieser Messwerte berechnet. Da sich Wechselstrom aus sinusförmigen, periodischen Größen zusammensetzt, müssen für Strom und Spannung Effektivwerte (quadierte Mittelwerte) berechnet werden. Der Effektivwert für Strom (I_{eff}) und Spannung (U_{eff}) kann für eine beliebige Zeitspanne der Länge $n \times \Delta t$ wie folgt berechnet werden [120]:

$$I_{eff} = \sqrt{\frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n i_i^2} \quad \text{bzw.} \quad U_{eff} = \sqrt{\frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n u_i^2} \quad (1)$$

I_{eff}	Effektivwert Strom [A]
U_{eff}	Effektivwert Spannung [V]
i_i	Momentanwerte Strom [A]
u_i	Momentanwerte Spannung [V]
n	Anzahl erfasster Einzelwerte (Momentanwerte) innerhalb der Zeitspanne [-]

Mit dem gegebenen digitalen Messsystem werden in einer Abtastrate von 4.096 Impulsen pro Sekunde entsprechend 4.096 einzelne Momentanwerte für Strom und Spannung erfasst. Daraus resultiert gemäß der höchsten verfügbaren Messdatenauflösung ein sekundlich ausgegebener Messwert (Effektivwert) für Strom und Spannung [120].

Die Spannung kann nur durch einen direkten Abgriff gemessen werden. Dazu muss ein Kontakt zur unisolierten Ader des zu messenden Kabels hergestellt werden [120]. Für das gegebene Messsystem erfolgt der Spannungsabgriff über eine CEE-Steckdose. Dabei ist zu beachten, dass sich die CEE-Steckdose im gleichen Stromkreis wie die zu erfassende elektrische Verteilung bzw. der zu erfassende

elektrische Verbraucher befinden muss. Gleiches gilt für die im Zuge der Pre-Tests entwickelte Möglichkeit zur Sicherstellung eines Spannungsabgriffes mittels Abgriffsklemmen (sog. Krokodilklemmen). Weiterhin muss sichergestellt sein, dass Strom und Spannung am jeweils selben Leiter gemessen werden (Beachtung der Phasenlage) [120]. Andernfalls würde durch Phasenverschiebung ($\pm 120^\circ$) keine korrekte Erfassung der Messwerte erfolgen. Die korrekte Phasenlage ist bei der Montage der Messwandler über die Anzeige der Echtzeit-Messwerte in der Software zu prüfen.

Zur Erfassung des Stroms werden **induktive Stromwandler** bzw. Messwandler eingesetzt, die den stromführenden Leiter umschließen [120]. Zum Einsatz kommen die bereits vorgestellten Kabelumbau-Stromwandler sowie Rogowski-Spulen. Beide Messwandler nutzen das magnetische Feld des Leiters, welches im ringförmigen Wandler eine Spannung bzw. einen Strom induziert. Je nach verwendeten Messwandler wird die induzierte Spannung bzw. der induzierte Strom als auswertbares Spannungs- oder Stromsignal an den Messcontroller ausgegeben [120].

Kabelumbau-Stromwandler bestehen grundlegend aus einem geschlossenen Eisenkern, um den eine Spule gewickelt ist [123]. Große primärseitige Leiterströme werden proportional zu kleineren, sekundärseitigen Stromsignalen umgesetzt. Die Ausgangssignale der verwendeten Kabelumbau-Stromwandler liegen bei bis zu 1 A. Kabelumbau-Stromwandler besitzen nur einige wenige Primärwindungen (N_1). Die Anzahl der Sekundärwindungen ist dagegen größer. In Abbildung 13 wird das Prinzip eines Kabelumbau-Stromwandlers dargestellt.

Gemäß dem Transformationsgesetz wird in der Sekundärwicklung mit der Windungszahl N_2 ein Strom $I_2 = I_1 \times N_1/N_2$ induziert [124, p. 242]. Dadurch kann entsprechend dem ausgewählten Messbereich die Windungszahl N_2 so dimensioniert werden, dass der Strom I_2 mit dem eingebauten Stromwandler bestimmt werden kann.

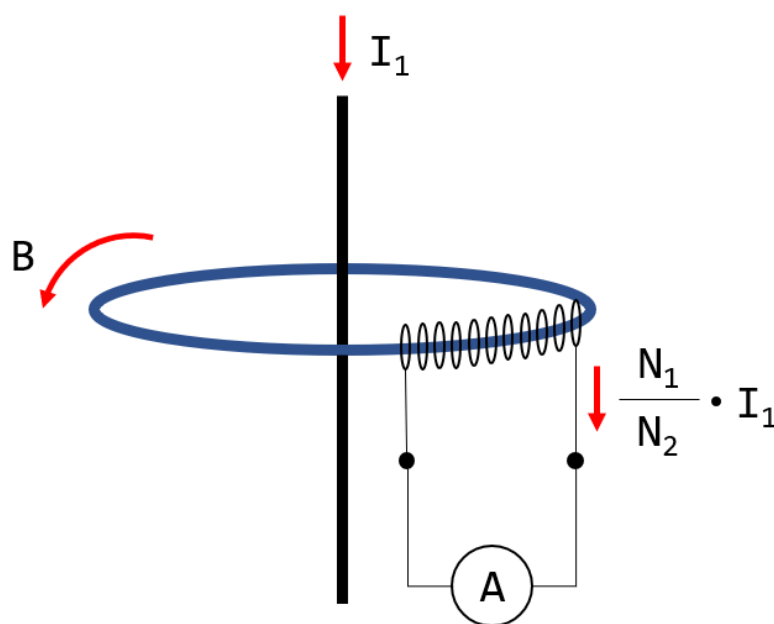


Abbildung 13: Prinzip eines Kabelumbau-Stromwandlers zur Messung des Leiterstroms (eigene Darstellung nach [123])

Da das Wandlerprinzip auf dem Induktionsgesetz basiert, können mit Kabelumbau-Stromwandlern nur Wechselströme gemessen werden [124]. Beim Anschluss der Kabelumbau-Stromwandler sollten diese zunächst sekundärseitig mit dem Messsystem verbunden und anschließend um den Leiter montiert werden. Andernfalls kann es zur Überhitzung und Zerstörung des Wandlers kommen [125].

Rogowski-Spulen sind Messspulen ohne Magnetkern [126]. Das elektromagnetische Feld des Leiters, um den die Rogowski-Spule montiert ist, induziert in der Messspule eine Spannung. Diese Spannung ist proportional zur zeitlichen Änderung des Stromflusses durch den Leiter. Der allgemeingültige Zusammenhang zwischen den Augenblickwerten der Spannung $u(t)$ und dem Strom di einer Rogowski-Spule wird durch die folgende Formel wiedergegeben [126] (2):

$$u(t) = \mu \times \frac{N \times A}{l} \times \frac{di}{dt} = M \times \frac{di}{dt} \quad (2)$$

$u(t)$	Spannung [V]
μ	Permeabilität (Magnetisierung des Materials) [Vs/Am]
N	Windungszahl [-]
A	Mittlerer Flächeninhalt des Drahtes [m ²]
l	Außenlänge der Rogowski-Spule [m]
M	Gegeninduktivität zwischen Messspule und Stromleiter [V/A/s] = [H]

Die geometrischen Faktoren (Permeabilität, Windungszahl, Mittlerer Flächeninhalt des Drahtes und Außenlänge der Rogowski-Spule) können dabei als Gegeninduktivität M zusammengefasst werden. Nachfolgend zeigt Abbildung 14 den Zusammenhang zwischen der induzierten Spannung $u(t)$ der Rogowski-Spule infolge des durch den Leiterstrom $i(t)$ erzeugten elektromagnetischen Feldes $H(t)$ [126].

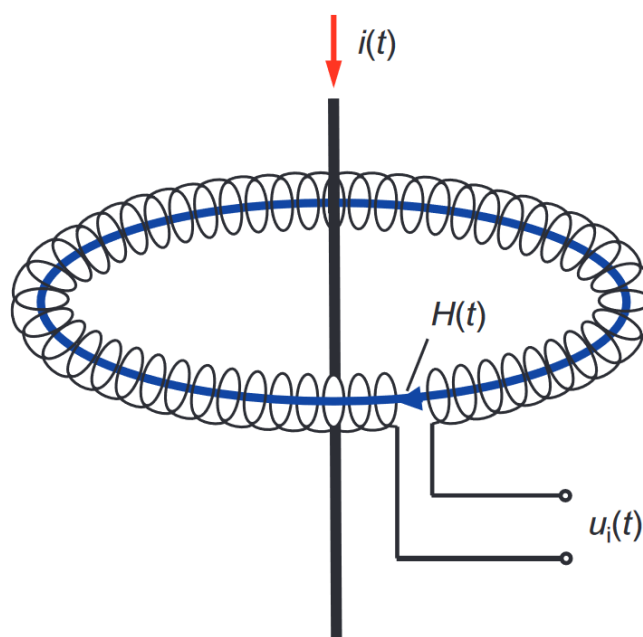


Abbildung 14: Prinzip einer Rogowski-Spule zur Messung des Leiterstroms [126]

Da die induzierte Spannung $u(t)$ am Ausgang der Messspule proportional zur zeitlichen Änderung des zu messenden Stromes ist, kann durch Integration der Ausgangsspannung über die Zeit der gesuchte Effektivwert des Stroms $i(t)$ wie folgt berechnet werden [126] (3):

$$i(t) = \frac{1}{M} \times \int_0^{\infty} u(t) dt \quad (3)$$

$i(t)$	Effektivwert des Stroms [A]
L	Gegeninduktivität [V/A/s] = [H]
$u(t)$	Induzierte Spannung [V]

Gemäß des Induktionsgesetzes wird eine Spannung nur während einer aufgetretenen Änderung des magnetischen Flusses $d\Phi/dt$ erzeugt [124, p. 77]. Daher können Rogowski-Spulen lediglich zur Wechselstrommessung verwendet werden.

Berechnete Messgrößen

Ausgehend von den durch die Messwandler induktiv erfassten Messgrößen für Strom und Spannung können weitere elektrische Kenngrößen berechnet werden. Aus dem Produkt der gemessenen Effektivwerte U_{eff} und I_{eff} kann zunächst die Scheinleistung ermittelt werden [120] (4):

$$S = U_{eff} \times I_{eff} \quad (4)$$

S	Scheinleistung [VA]
U_{eff}	Effektivwert Spannung [V]
I_{eff}	Effektivwert Strom [A]

Da Strom und Spannung in Wechselstromsystemen nicht immer in gleicher Phasenlage schwingen, kommt es zu einer Phasenverschiebung φ . Der Phasenverschiebungswinkel φ gilt als Maß für den zeitlichen Verzug zwischen Strom- und Spannungssignal [125]. Dabei wird zwischen kapazitiven (Strom eilt Spannung vor) und induktiven (Strom eilt Spannung nach) Lasten unterschieden, in denen Energie gespeichert werden kann ohne in Arbeit umgesetzt zu werden [120]. Diese zwischen Verbraucher und Erzeuger pendelnde Leistung wird auch als Blindleistung Q bezeichnet.

Scheinleistung, Blindleistung und Wirkleistung können in einem Kräfte dreieck als Vektoren dargestellt werden. Dabei stehen die Vektoren für Blind- und Wirkleistung senkrecht aufeinander (90°). Die Scheinleistung ergibt sich aus geometrischen Summe von Wirk- und Blindleistung [120]. Aus dem Phasenverschiebungswinkel ergibt sich der Leistungsfaktor $\cos(\varphi)$, der angibt, welcher Teil der Scheinleistung in Wirkleistung umgesetzt wird. Mit dem gegebenen Messsystem zur Wirkleistungsmessung wird der Leistungsfaktor aus der zeitlichen Differenz der Eingangssignale von Strom und Spannung am Messcontroller berechnet. Die Wirk- und Blindleistung sinusförmig schwingender Wechselströme kann wie folgt berechnet werden [120] (5) (6):

$$P = U_{eff} \times I_{eff} \times \cos(\varphi) \quad (5)$$

$$Q = U_{eff} \times I_{eff} \times \sin(\varphi) \quad (6)$$

P	Wirkleistung [W]
Q	Blindleistung [var]
U_{eff}	Effektivwert Spannung [V]
I_{eff}	Effektivwert Strom [A]
φ	Phasenwinkel [-]

In einem dreiphasigen Niederspannungsdrehstromnetz besteht das Leitungsnetz aus den drei stromführenden Leitern L1, L2 und L3 (Phasen), dem Neutralleiter N (Nullleiter) und dem Schutzleiter PE [120]. Der induktiv gemessene Effektivwert der Spannung U_{eff} entspricht im dreiphasigen Niederspannungsdrehstromnetz der Strangspannung U_{str} zwischen den jeweiligen Leitern L1-L3 und dem Nullleiter. Der induktiv erfasste Effektivwert des Stroms I_{eff} entspricht im dreiphasigen Niederspannungsdrehstromnetz dem Leiterstrom I_L (Strom durch den elektrischen Leiter). Die Gesamtleistung eines dreiphasigen elektrischen Verbrauchers ergibt sich aus der Summe der einzelnen Wirkleistungen der jeweiligen Phasen [125] (7):

$$P_{ges} = P_{L1} + P_{L2} + P_{L3} \quad (7)$$

P_{ges}	Gesamtleistung dreiphasiger elektrischer Verbraucher [W]
P_{L1}	Wirkleistung Leiter 1 (Phase 1) [W]
P_{L2}	Wirkleistung Leiter 2 (Phase 2) [W]
P_{L3}	Wirkleistung Leiter 3 (Phase 3) [W]

4.2.3 Messfehler

Die Genauigkeit eines Messsystems ergibt sich aus der Abweichung zwischen dem ausgegebenen Wert und dem tatsächlichen (wahren) Wert der Messgröße [108]. Der durch diese Abweichung bedingte Messfehler kann nach der Art des Auftretens in zufällige (statistische) Fehler und systematische Fehler eingeteilt werden:

- **Zufällige Fehler** sind Streuungen im Ergebnis einer Messung, die von messtechnisch nicht erfassbaren Änderungen hervorgerufen werden. Zufällige Fehler zeichnen sich dadurch aus, dass sie bei einer Einzelmessung weder nach dem Betrag noch nach dem Vorzeichen bestimmt werden können [127]. Sie sind daher nicht zu korrigieren und machen die Messung unsicher. Eine Wiederholung von Messungen führt zur zahlenmäßigen Erfassung des Messfehlers mittels statistischer Kenngrößen.
- **Systematische Fehler** sind Abweichungen vom wahren Wert, die ein bestimmtes Vorzeichen (+ oder -) aufweisen und unter gleichen Bedingungen den gleichen Betrag aufweisen. Eine Wiederholung von Messungen führt nicht zur zahlenmäßigen Erfassung des Messfehlers, sondern nur ein anderes (genaueres) Messgerät bzw. Messverfahren [127].

Die Messfehlerbetrachtung erfolgt für das Messsystem zur Wirkleistungsmessung bezogen auf die nachfolgend aufgeführten Messfehler (s. Tabelle 7):

Tabelle 7: Messfehlerbetrachtung Messsystem zur Wirkleistungsmessung

Zufällige Messfehler	Systematische Messfehler
Genauigkeit Messgerät	Nullwerte
Genauigkeit Messwandler	Wandlerfaktor (Parametrierungsfehler)

Zufällige Messfehler

Der zulässige Messfehler des **Messgerätes** beträgt 0,5% und beschreibt den bei der Umwandlung der analogen Eingangsgrößen (Strom- und Spannungswerte) in einen proportionalen Digitalwert entstehenden Fehler. Diese Schaltungen werden im Messcontroller von einem Analog/Digital-Umsetzer (A/D-Wandler) umgesetzt [124].

Stromwandler werden gemäß ihrer Genauigkeit in Norm-Genauigkeitsklassen (DIN EN 61869-2) eingeteilt [128]. In der nachfolgenden Tabelle sind die verwendeten Stromwandler mit den zugehörigen Genauigkeitsklassen und Anforderungen an einzuhaltende Stromfehler dargestellt (s. Tabelle 8). Der Stromfehler gilt dabei als Maß, wie genau der gemessene Ausgangsstrom den tatsächlichen Primärstrom widerspiegelt.

Tabelle 8: Genauigkeit der verwendeten Stromwandler

Stromwandler	Bemessungsstrom	Genauigkeitsklasse*	Zul. Stromfehler F_j
Kabelumbau-Stromwandler ELEQ TQ30 125/1 A [122]	125 A	3	+/- 3% bei 50% des Bemessungsstroms +/- 3% bei 120% des Bemessungsstroms
Kabelumbau-Stromwandler ELEQ TQ30 250/1 A [122]	250 A	1	+/- 1% bei 100% sowie 120% des Bemessungsstroms +/-1,5% bei 20% des Bemessungsstroms +/- 3% bei 5% des Bemessungsstroms
Kabelumbau-Stromwandler ELEQ TQ50 500/1 A [129]	500 A	0,5	+/- 0,5% bei 100% sowie 120% des Bemessungsstroms +/- 0,75% bei 20% des Bemessungsstroms +/- 1,5% bei 5% des Bemessungsstroms

*nach DIN EN 61869-2.

Die verwendeten Stromwandler mit 125/1 A Wandlerverhältnis weisen die Genauigkeitsklasse 3 mit den niedrigsten Anforderung an den einzuhaltenden Stromfehler F_j auf (vgl. Tabelle 8). Bei diesem Stromwandler fließt bei 50% des Bemessungsstroms ein Primärstrom von 62,5 A. Auf der Sekundärseite sollte dann ein (idealer) Ausgangsstrom von 0,5 A fließen. Aufgrund des maximal zulässigen Stromfehlers ($\pm 3\%$ bzw. $\pm 0,015$ A) liegt der tatsächliche Sekundärstrom jedoch zwischen 0,485 A und 0,515 A.

Die verwendeten **Messspulen** sind nach der internationalen Normenreihe IEC 61010-1 konstruiert. Für die Kombination aus Messspule und Messumformer wird seitens des Herstellers eine Genauigkeit $\geq 1\%$ angegeben [130]. Diese Genauigkeit ist auf den eingestellten primärseitigen Bemessungsstrom bezogen. Bei einem primärseitigen Bemessungsstrom von 1.000 A beträgt die Messgenauigkeit demnach ± 10 A. Die Angaben zur Genauigkeit der verwendeten Messspulen sind in Tabelle 9 festgehalten.

Tabelle 9: Genauigkeit der verwendeten Messspulen

Messspule	Bemessungsstrom	Genauigkeit
Rogowski-Spule PHOENIX CONTACT PACT RCP 4.000/1 A [121]	4.000 A*	$> 1\%$ [130]

*Am Messkanal flexibel einstellbar. Für die Messkampagnen wurde primärseitig ein Bemessungsstrom von 1.000 A bzw. 400 A eingestellt.

Da die Messwandler für einen bestimmten Messbereich (s. Bemessungsstrom) ausgelegt sind, gilt die für Stromwandler und Messspulen angegebene Genauigkeit nur für diesen Bereich. Daher ist ein Betrieb der Messwandler nahe dem primärseitigen Bemessungsstrom zu empfehlen, um eine hohe Messgenauigkeit zu gewährleisten [128]. Ein Betrieb der Messwandler außerhalb des vorgesehenen Messbereichs kann zu größeren Messfehlern und zur Zerstörung des Messwandlers führen [108].

Aus der Betrachtung der beiden zufälligen Messfehler ergibt sich der Gesamtfehler aus der Addition der Genauigkeit des Messgerätes und des verwendeten Messwandlers [125]. Der entsprechend den Herstellerangaben (Messgerät) und auf die Norm (Messwandler) bezogene maximal zulässige Messfehler beträgt demnach 3,5%. Die Messdaten sollten nach Möglichkeit mit den Daten geeichter Messgeräte (bspw. Lastgangdaten eines Stromzählers) validiert werden. Im Analysekonzept werden daher verschiedene Möglichkeiten zur Validierung der Messdaten aufgezeigt (s. Kapitel 6).

Systematische Messfehler

Systematische Messfehler können vor allem im Verarbeitungsprozess der Eingangsgrößen (Strom und Spannung), der Datenübertragung der Messwerte sowie der Speicherung in Datenbanken entstehen. An dieser Stelle sei zum einen auf einzelne Nullwerte (bspw. in der Datenreihe der elektrischen Wirkleistung) hingewiesen, die im Zuge der Messdatenaufbereitung und Visualisierung relativ schnell identifiziert und korrigiert werden können. Gründe für in den Datenreihen vorhandene Nullwerte sind im Einzelfall zu prüfen (bspw. auf regelmäßiges Auftreten zu diskreten Zeitwerten). Nullwerte über längere Zeitperioden sind in der Regel auf Probleme in der Datenübertragung zurückzuführen.

Ein weiterer wichtiger Faktor zur Vermeidung systematischer Messfehler ist ein in der Software korrekt eingestellter Wandlerfaktor. Ein damit verbundener Parametrierungsfehler kann erheblichen Einfluss auf die ausgegebenen Messdaten haben. Wird in der Software beispielsweise ein Wandlerfaktor von 125/1 A hinterlegt, obwohl an den entsprechenden Messkanälen 250/1 A Messwandler angebunden sind, werden die primärseitig erfassten Ströme auf der Sekundärseite halbiert. In diesem Fall muss eine Korrektur der gesamten Datenreihe durch Multiplikation mit dem Faktor 2 vorgenommen werden. Wird der Wandlerfaktor hingegen umgekehrt zu hoch eingestellt, werden sekundärseitig zu große Stromwerte ausgegeben. Dementsprechend muss eine Korrektur gemäß der Wandlerverhältnisse durch (bei den o.g. Messwandlern Division durch 2) vorgenommen werden.

4.3 Messsystem zur Scheinleistungsmessung

4.3.1 Aufbau und Komponenten

Das ausgewählte Messsystem zur Scheinleistungsmessung dient im Messkonzept als Ergänzung zur Erfassung kleinerer Messpunkte. Das System besteht aus einer zentralen Systemeinheit (sog. Homebase), an die bis zu 30 Sensoren zur Erfassung verschiedener Eingangsgrößen (Strom, Gas, Wasser, Temperatur, Luftqualität) angebunden werden können. Die Hauptanwendung des Messsystems liegt in der Erfassung des Stromverbrauchs kleinerer dreiphasiger elektrischer Verbraucher oder Unterverteilungen. Der dafür notwendige Dreiphasen-Sensor sowie die zentrale Systemeinheit sind in Abbildung 15 dargestellt.



Abbildung 15: Komponenten des Messsystems zur Scheinleistungsmessung
(links Homebase, rechts Dreiphasen-Sensor) [131]

Es handelt sich um ein funkbasiertes Messsystem, d.h. die vom Dreiphasen-Sensor erfassten Stromwerte werden mit einem Transmitter (s. Abbildung 15, rechts) via Funkprotokoll (433 MHz) an die zentrale Systemeinheit gesendet. Zur Erfassung der Stromwerte kommen 80 A Kabelumbau-Strömewandler zum Einsatz (s. Abbildung 15, rechts). Diese ergänzen insbesondere aufgrund der kompakten Bauweise und der dadurch gegebenen Flexibilität bei baulichen Einschränkungen das bestehende Messsystem zur Wirkleistungsmessung.

Zur Datenübertragung ist die zentrale Systemeinheit (Homebase) darüber hinaus mit einem externen Router zu verbinden. Alle 5 Sekunden sendet diese die Messwerte der angeschlossenen Sensoren auf einen Server (stabile Internetverbindung vorausgesetzt) [132]. Der Zugriff auf die Messdaten erfolgt über ein Webportal des Herstellers. Ein Datenexport steht in einer minimalen Messdatenauflösung von 1 Minute zur Verfügung.

4.3.2 Beschreibung der Messgrößen

Zur Erfassung der elektrischen Leistung werden in diesem Messsystem lediglich die Stromwerte über Kabelumbau-Stromwandler (Funktionsprinzip s. Kapitel 4.2.2) gemessen. Auf die Spannungsmessung wird ganz verzichtet und stattdessen 230 V und ein idealer Leistungsfaktor von $\cos(\varphi) = 1$ angenommen. Auf die damit verbundene Messunsicherheit wird im folgenden Kapitel eingegangen.

Die Scheinleistung S [VA] kann entsprechend Formel (4) aus dem ermittelten Stromwert und dem konstanten Spannungswert berechnet werden. Zur Ermittlung der Gesamtleistung eines dreiphasigen elektrischen Verbrauchers sind die berechneten Scheinleistungen der Leiter bzw. Phasen L1-L3 gemäß Formel (7) zu addieren.

4.3.3 Messfehler

Wie beim Messsystem zur Wirkleistungsmessung kann eine Messfehler-Betrachtung nach zufälligen und systematischen Messfehlern vorgenommen werden. Auf systematische Messfehler wird an dieser Stelle nicht nochmals im Detail eingegangen. Nullwerte sowie falsch eingestellte Wandlerfaktoren können auch in diesem Messsystem Einfluss auf die Messergebnisse haben.

Ein wesentlicher systematischer Messfehler liegt im Vergleich zum Hauptmesssystem in der Erfassung der Scheinleistung. Eventuelle Abweichungen des Leistungsfaktors $\cos(\varphi)$ sowie Spannungsschwankungen (mehr als 10 V je nach Betriebsnetz) können daher nicht berücksichtigt werden [120]. Dementsprechend ergeben sich bei diesem Messsystem deutlich größere Messunsicherheiten. Eine Messgenauigkeit von 10% wird seitens des Herstellers nur für die Sendeeinheit (Transmitter) angegeben [133].

Vor diesem Hintergrund sollte der Einsatz dieses Messsystems nur für kleinere Messpunkte erfolgen, um den absoluten Messfehler gering zu halten. Zusätzlich sollte der Einsatz des Messsystems zur Wirkleistungsmessung aufgrund der höheren Messgenauigkeit im Zuge des Messkonzeptes priorisiert erfolgen. Ein Einsatz des Messsystems zur Scheinleistungsmessung ist dann sinnvoll, wenn alle Messpunkte des Hauptmesssystems belegt sind. Somit kann durch die Erfassung zusätzlicher, kleinerer Messpunkte die Flexibilität des ausgewählten Messequipments erhöht werden.

4.4 Pre-Tests zur Herleitung der Messmethode

Im Zeitraum von 2018-2021 wurden mehrere Pre-Tests zur Herleitung der entwickelten Messmethode durchgeführt. In Tabelle 10 wird ein Überblick über die durchgeführten Pre-Tests mit Angabe des Messzeitraums sowie Equipments gegeben.

Tabelle 10: Überblick durchgeführter Pre-Tests zur Herleitung der Messmethode

Pre-Test	Zeitraum	Equipment
Museumsbetrieb	22.-28.02.2018 7 Messtage	1 Messsystem zur Wirkleistungsmessung
Öffentliches Gebäude (Schule)	29.04.-29.05.2019 22 und 10 Messtage	1 Messsystem zur Wirkleistungsmessung
Freizeitbetrieb	06.-16.06.2019 10 Messtage	1 Messsystem zur Wirkleistungsmessung
Lebensmitteleinzelhandel	15.10.-19.11.2019 14, 9 und 12 Messtage	1 Messsystem zur Wirkleistungsmessung in zeitlich gestaffelten Messkampagnen in drei Filialen
Bürogebäude	03.07.-15.07.2019 12 Messtage	1 Messsystem zur Wirkleistungsmessung
Öffentliches Gebäude (Schule)	16.07.-21.08.2019 21, 9 und 8 Messtage	1 Messsystem zur Wirkleistungsmessung
Metallverarbeitender Betrieb	28.11.-06.12.2019 8 Messtage	1 Messsystem zur Wirkleistungsmessung
Öffentliches Gebäude (Büro)	08.06.-23.07.2020 24, 14 und 7 Messtage	2 Messsysteme zur Wirkleistungsmessung
Bürogebäude	30.11.2020-08.02.2021 14, 27 und 14 Messtage	3 Messsysteme zur Wirkleistungsmessung (Strom) + 1 Messsystem (Wärme)

Die Pre-Tests wurden in Messobjekten verschiedenster Branchen und Größenordnung durchgeführt. Dabei wurden wichtige Erkenntnisse zum Einsatz der mobiler Messtechnik in der Praxis gesammelt. Die Erfahrungen und Lessons Learnt aus den durchgeführten Pre-Tests wurden für das entwickelte Messkonzept berücksichtigt. Bei den ersten Messkampagnen wurde lediglich ein Messsystem zur Wirkleistungsmessung eingesetzt. Dabei wurde schnell deutlich, dass für eine effizientere Durchführung der Messkampagnen eine **Skalierung des Messequipments** notwendig ist. Zum einen wird dadurch die Flexibilität hinsichtlich der parallel erfassbaren Messpunkte bei der Erfassung größerer Messobjekte erhöht. Zum anderen sind dadurch auch parallele Messungen an mehreren physisch getrennten Messlokalationen möglich. Auf die Skalierung des Messequipments für das entwickelte Messkonzept wird nochmals in Kapitel 5 eingegangen.

Weitere Lessons Learnt betreffen die Festlegung von **Messprioritäten**. So wurde auf der Basis der durchgeführten Pre-Tests festgelegt, dass eine Disaggregation des Verbrauchs nur sinnvoll erfolgen kann, wenn auch die Zuleitung zu einer Messlokation (sog. Input-Datenreihe) messtechnisch erfasst wird. Weiterhin sind bei der Belegung der Messpunkte Prioritäten zu definieren. So hat sich in den Pre-Tests die Identifikation einflussreicher Messpunkte durch Messung der Phasenbelastung mit einer Stromzange als hilfreich herausgestellt. Weiterhin bietet auch die Größe der Sicherungslasttrennschalter eine Orientierung zur Identifikation relevanter Messpunkte in elektrischen Verteilungen. Auf die Kriterien zur Festlegung der Messprioritäten für das Messkonzept wird in Kapitel 5 detailliert eingegangen.

Während der Pre-Tests wurden darüber hinaus verschiedene **Messprinzipien** angewendet. Dabei kann allgemein zwischen dem Top-Down- und dem Bottom-Up-Ansatz unterschieden werden (s. Abbildung 16).

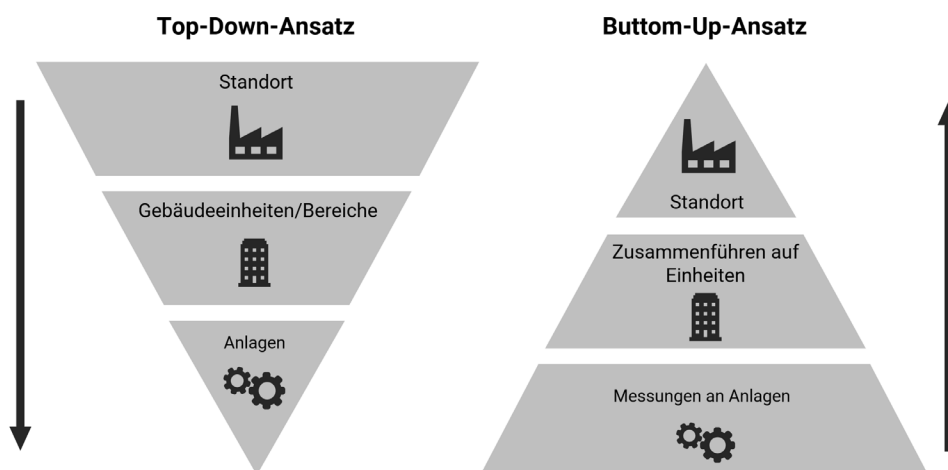


Abbildung 16: Top-Down und Bottom-Up-Ansatz zum Einsatz mobiler Messtechnik (eigene Darstellung nach [108])

Beim Top-Down-Ansatz erfolgt der Einsatz der Messtechnik ausgehend vom Netzanschluss des Unternehmens über Teilbereiche bis hin zu einzelnen elektrischen Verbrauchern [108]. Dadurch wird sichergestellt, dass der Gesamtlastfluss systematisch in kleinere Teillastflüsse aufgeteilt wird. Dieser Ansatz hat sich in den Pre-Tests als das geeignete Messprinzip herausgestellt, um eine systematische Disaggregation (Aufschlüsselung) des Gesamtstromverbrauchs auf einzelne Bereiche und Verbraucher zu ermöglichen. Insbesondere bei den durchgeführten Pre-Tests in größeren Messobjekten mit mehreren dezentralen Messlokalationen wurden die Vorteile dieses Ansatzes deutlich.

Der Einsatz mobiler Messtechnik nach dem Bottom-Up-Ansatz würde auf der Anlagen- bzw. Verbraucher-Ebene ansetzen und auf dieser Basis die verbraucherspezifischen Lastflüsse einzelnen Bereichen zuordnen. Auf der Anlagen- bzw. Verbraucher-Ebene ist die Anzahl und Vielfalt der angeschlossenen Verbraucher jedoch viel höher als auf den übergelagerten Ebenen (z.B. einem Bereich oder dem gesamten Standort). Messungen auf Anlagen- bzw. Verbraucher-Ebene nach dem Bottom-Up-Ansatz sind daher in der Regel mit höherem Aufwand verbunden. Der Top-Down-Ansatz stellt somit insgesamt die effizientere und strukturiertere Methodik zur Aufschlüsselung von Lastflüssen dar.

Der **Messzeitraum** lag für die durchgeführten Pre-Tests zwischen 7 und 27 Messtagen. Dieser besonders kurze Messzeitraum wurde zum einen aus Effizienzgründen gewählt, da in der Praxis mit der Dauer des Messzeitraums auch Aufwand und Kosten steigen. Weitere Einflussfaktoren auf den Messzeitraum sind individuelle Gegebenheiten des Messobjektes, die Zielsetzung der Messkampagne sowie externe Faktoren wie bspw. die zeitliche Einplanung des Einsatzes mobiler Messtechnik bei mehreren Messreihen bzw. Messkampagnen. Weiterhin gilt es mit dem zu entwickelnden Analysekonzept herauszufinden, welcher Mehrwert in der Analyse von Kurzzeitmessungen liegt, die über einen Zeitraum von ein bis vier Wochen durchgeführt wurden. Auf eine genauere Eingrenzung des vorgegebenen Messzeitraums wird in Kapitel 5.1.3 eingegangen.

Kapitel 5

Entwicklung und Anwendung eines Messkonzeptes mit mobiler Messtechnik

Dieses Kernkapitel beinhaltet die Entwicklung und Anwendung eines Messkonzeptes für den Einsatz mobiler Messtechnik. Zunächst wird der Ansatz für das Messkonzept erläutert. Dazu wird auf die grundlegenden wissenschaftlichen Aspekte Messprinzip und Messprioritäten eingegangen. Anschließend werden die methodischen Abschnitte des Messkonzeptes detailliert vorgestellt. Dabei wird neben den entwickelten Arbeitsschritten je Abschnitt auch der konzeptionelle Ansatz hergeleitet. Schließlich werden die Ergebnisse der Anwendung und Validierung des Messkonzeptes anhand der durchgeführten Fallbeispiele dargestellt. Im Fokus dieses Hauptkapitels steht somit die Forschungsfrage: „*Wie kann mobile Messtechnik effizient und systematisch zur Analyse von elektrischer Energieflüsse im gewerblichen Bereich eingesetzt werden?*“.

5.1 Ansatz für das Messkonzept

Für das Messkonzept sind zwei Aspekte von besonderer Bedeutung. Zum einen wird mit dem Messkonzept ein *flexibler* Einsatz der Messtechnik angestrebt. Dies wird unter anderem mit der Definition eines Messprinzips sichergestellt. Das Messprinzip gewährleistet unter anderem die Vergleichbarkeit der Ergebnisse. Zum anderen wird im Rahmen des Messkonzeptes ein *effizienter* Einsatz der Messtechnik angestrebt. Dazu sind Messprioritäten festzulegen, die eine bestmögliche Aufschlüsselung der elektrischen Verteilung bei einem begrenzten Messzeitraum sicherstellen.

5.1.1 Festlegung des Messprinzips

Mit der Definition des Messprinzips wird eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse aus den Messkampagnen angestrebt. Dabei wird ein Top-Down-Ansatz (vgl. Kapitel 4.4) angewendet, der eine strukturierte Aufschlüsselung der Unternehmensstruktur unabhängig vom Gebäudetyp oder der Branche sicherstellt. Die Unternehmensstruktur wird dazu in eindeutig definierte Hierarchie-Ebenen eingeteilt (s. Abbildung 17). Diese Einteilung basiert auf den Erfahrungen aus den Pre-Tests zur Herleitung

der Messmethode (s. Kapitel 4.4). Die Hierarchie-Ebenen „Betrieb/Standort“, „Bereich“ und „Anlagen“ entsprechen äquivalenten Ebenen der elektrischen Verteilung. Dadurch können die mit der mobilen Messtechnik in der elektrischen Verteilung erfassten Messpunkte den Ebenen der Unternehmensstruktur eindeutig zugeordnet werden.

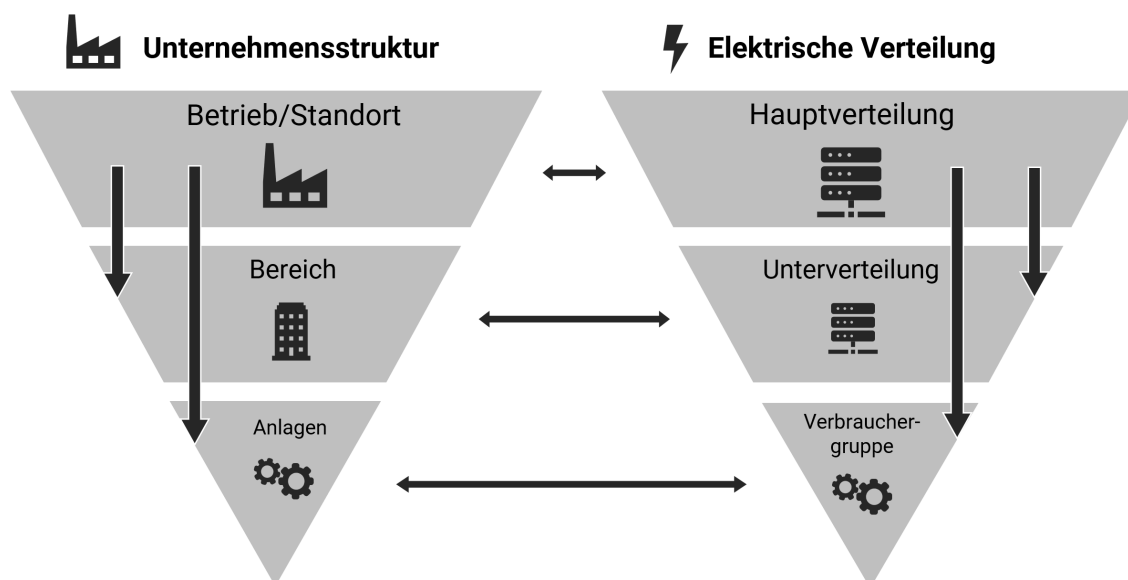


Abbildung 17: Aufschlüsselung der Unternehmensstruktur in Hierarchie-Ebenen und äquivalente Ebenen in der elektrischen Verteilung

Die elektrische Verteilung kann in die Ebenen Hauptverteilung (HV), Unterverteilung (UV) und Verbrauchergruppe (VG) eingeteilt werden (vgl. [134]):

- **Hauptverteilungen** (auch Niederspannungshauptverteilungen – kurz NSHV) werden in der Regel über Transformatoren aus dem Stromnetz gespeist. Auf Ebene der Hauptverteilungen findet eine Aufteilung des Gesamtstromverbrauchs eines Messobjektes auf Unterverteilungen und Verbrauchergruppen statt.
- **Unterverteilungen** versorgen unter anderem einzelne Gebäude(-bereiche) eines Messobjektes und umfassen daher wie Hauptverteilungen eine Vielzahl verschiedener elektrischer Verbraucher.
- **Verbrauchergruppen** versorgen mehrere elektrische Verbraucher eines Typs (z.B. baugleiche Produktionsmaschinen) oder Einzelverbraucher (z.B. Zuluftmotor einer Lüftungsanlage). Große Verbrauchergruppen sind teilweise unmittelbar an Hauptverteilungen angeschlossen, während kleinere auch in Unterverteilungen angeschlossen sind.

In der folgenden Tabelle werden die Zusammenhänge zwischen den Hierarchie-Ebenen der Unternehmensstruktur und den Ebenen der elektrischen Verteilung dargestellt (s. Tabelle 11).

Tabelle 11: Zusammenhang Hierarchie-Ebenen und elektrische Verteilung

Hierarchie-Ebenen Unternehmensstruktur	Definition	Hierarchie-Ebenen elektrischen Verteilung
Betrieb/Standort	Versorgt alle untergeordnete Bereiche bzw. Anlagen eines Messobjektes	Hauptverteilung (HV) - Zuleitung durch Transformator(en) - Abgänge: Unterverteilungen und Verbrauchergruppen
Bereich	Versorgt einen weiteren Bereich bzw. weitere Anlagen eines Messobjektes	Unterverteilung (UV) - Zuleitung durch Hauptverteilung - Abgänge: Unterverteilungen oder Verbrauchergruppen
Anlagen	Versorgt eine oder mehrere Anlagen (elektrische Verbraucher) des gleiches Typs	Verbrauchergruppe (VG) - Zuleitung durch Hauptverteilung bzw. Unterverteilung - i.d.R. keine weitere Abgänge

Die Berechnung der prozentualen Anteile von Unterverteilungen und Verbrauchergruppen am Gesamtverbrauch einer elektrischen Verteilung ist nur möglich, wenn parallel zu den Abgängen (sog. Output-Datenreihen) auch die Zuleitung (Input-Datenreihe) erfasst wird. Dieses Grundprinzip wird in Abbildung 18 schematisch dargestellt. Über den Messzeitraum ΔT werden in einer erfassten Haupt- bzw. Unterverteilung sowohl der Lastgang der Zuleitung $P_{ges}(t)$ als auch die Lastgänge mehrerer Abgänge $P_n(t)$ gemessen.

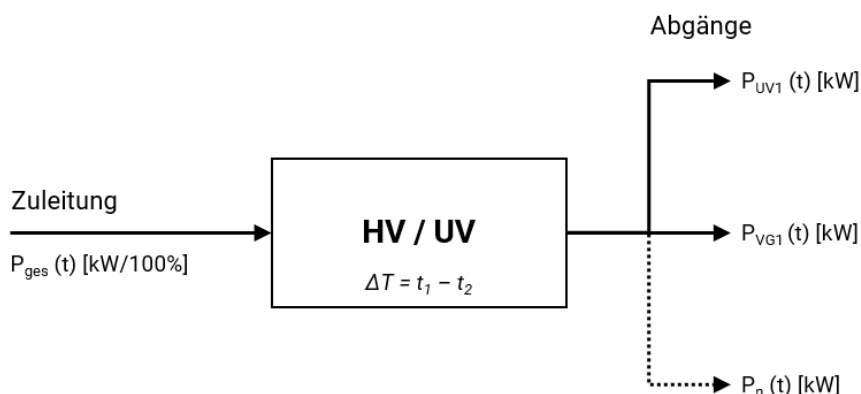


Abbildung 18: Grundprinzip bei der Messung elektrischer Haupt- und Unterverteilungen

Basierend auf diesem Messprinzip kann der Einfluss der erfassten Abgänge an der Zuleitung zur elektrischen Verteilung ermittelt werden (s. Analysekonzept, Kapitel 6).

5.1.2 Festlegung der Messprioritäten

Die einzusetzende mobile Messtechnik wurde nach spezifischen Anforderungskriterien ausgewählt (vgl. Kapitel 4.1.2). Die Erkenntnisse aus den Pre-Tests (s. Kapitel 4.4) haben dabei deutlich gemacht, dass ein flexibleres Messkonzept durch eine **Skalierung des Messequipments** möglich ist. Dafür sind die folgenden Aspekte ausschlaggebend:

- Erstens ist die Disaggregation des elektrischen Energieflüsse umso einfacher, desto mehr elektrische Verbraucher parallel gemessen werden. Daher wird durch die Skalierung der ausgewählten mobilen Messsysteme mehr Flexibilität bei der Belegung von Messkanälen geschaffen.
- Zweitens sind elektrische Energiesysteme in Unternehmen oft in mehrere physisch getrennte elektrische Haupt- und Unterverteilungen aufgeteilt. Eine Skalierung des Messequipments im Sinne mehrerer parallel einsetzbarer Messsysteme erleichtert die Aufschlüsselung dieser Unterverteilungen.

Das für die Durchführung der Fallbeispiele zur Verfügung stehende Messequipment besteht daher aus mehreren mobilen Messsystemen. Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über das in den Fallbeispielen eingesetzte Messequipment (Tabelle 12).

Tabelle 12: Skalierung des Messequipments für die Durchführung der Fallbeispiele

Messsystem	Anzahl Messgeräte*	Messpunkte (dreiphasig)
Messsystem zur Wirkleistungsmessung	3	18
Messsystem zur Scheinleistungsmessung	5	6
Insgesamt	8	24

*Als Anzahl Messgeräte ist hier definiert: Anzahl der Messcontroller bzw. Messkoffer, an denen Messwandler angeschlossen werden können.

Durch den Einsatz von drei Messgeräten zur Wirkleistungsmessung können insgesamt 18 Messpunkte parallel erfasst werden. Das Messequipment wird durch fünf Messgeräte zur Scheinleistungsmessung ergänzt. Mit diesem System können sechs weitere Messpunkte (dreiphasig) berücksichtigt werden. Insgesamt ermöglicht das bestehende Messequipment die parallele Erfassung von bis zu **24 elektrischen Verbrauchern**.

Mit der Skalierung des Messequipments wird ein flexibler Einsatz der mobilen Messtechnik im heterogenen gewerblichen Anwendungsfeld ermöglicht (vgl. Erfahrungen Pre-Tests Kapitel 4.4). Diese Flexibilität gilt insbesondere in Bezug auf die Unternehmensgröße, denn mit dem jährlichen Gesamtstromverbrauch eines Messobjektes steigt in der Regel auch die Komplexität zur Aufschlüsselung der elektrischen Verteilung.

Eine effiziente Aufschlüsselung des Stromverbrauchs kann darüber hinaus nur gewährleistet werden, wenn die Messprioritäten eine Identifikation der größten elektrischen Verbraucher (engl. significant energy use, SEU) des betrachteten Messobjektes vorsehen. Dazu sollte ein Großteil des Stromverbrauchs den elektrischen Verbrauchern zugeordnet werden (Praxiswerte ca. 80%, vgl. [76, p. 331]).

Erfahrungswerte zeigen, dass eine geringe Anzahl an Hauptstromverbrauchern bereits 80% des Gesamtstromverbrauchs ausmachen können [135].

Unter Berücksichtigung des Top-Down-Ansatzes (s. Kapitel 5.1.1) werden im Zuge des Messkonzeptes große elektrische Verbraucher anhand der Hierarchie-Ebenen identifiziert (s. Abbildung 19).

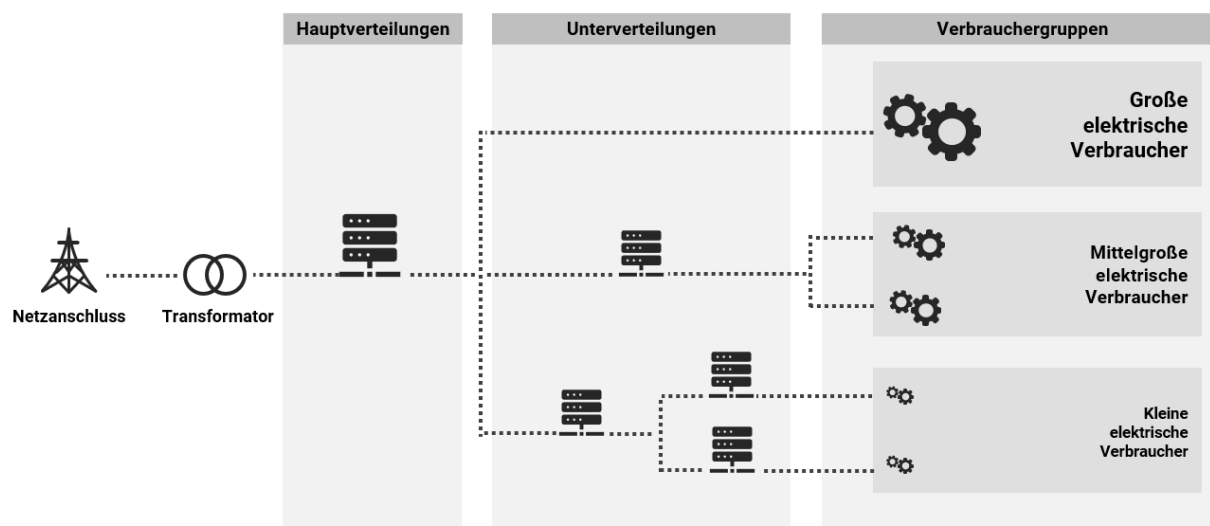


Abbildung 19: Identifikation großer, mittlerer und kleiner elektrischer Verbraucher anhand der Hierarchie-Ebenen in der elektrischen Verteilung

Die größten elektrischen Verbraucher können auf der Ebene der Hauptverteilungen identifiziert werden, da diese aufgrund der hohen Leistungsbezüge und entsprechender Vorsicherungen oft unmittelbar an Hauptverteilungen angebunden sind. Zusätzlich kann, falls vorhanden, die Dokumentation der elektrischen Hauptverteilung (Verteilungsplan) zur Ermittlung der größeren elektrischen Verbraucher dienen.

Mittlere elektrische Verbraucher sind häufig unmittelbar an Unterverteilungen der elektrischen Verteilung angeschlossen. Auch hier können einzelne Verbraucher über die Dokumentation der jeweiligen Unterverteilung ermittelt werden.

Kleine elektrische Verbraucher sind häufig über weitere Unterverteilungen an die elektrische Verteilung angeschlossen. Eine vollständige Identifikation und Dokumentation aller elektrischen Verbraucher ist nicht notwendig, da der Anteil der vielen kleineren elektrischen Verbraucher am Gesamtstromverbrauch zu gering ist.

Als zusätzliches Instrument zur Einschätzung der Größe bzw. des Einflusspotenzials elektrischer Unterverteilungen und Verbrauchergruppen dient die Messung der Phasenbelastung mittels digitaler Stromzangen. So kann anhand der Höhe der dokumentierten Stromwerte (in Ampere [A]) eine Priorisierung der zu erfassenden Unterverteilungen und Verbrauchergruppen vorgenommen werden [108]. Um einen möglichst großen Anteil des Gesamtstromverbrauchs je Hierarchie-Ebene aufzuschlüsseln, werden Kriterien für den Anschluss der Messwandler festgelegt (s. Tabelle 13, Folgeseite). Die Kriterien beruhen auf Erfahrungen aus den Pre-Tests zur Herleitung der Messmethode (s. Kapitel 4.4).

Tabelle 13: Kriterien zum Anschluss der Messwandler

Kriterien	Vorgehensweise
1) Erfassung der Zuleitung (Input-Datenreihe)	Anschluss der Messwandler an der Zuleitung (Input-Datenreihe) der elektrischen Verteilung Voraussetzung zur Durchführung von Disaggregationsanalysen (s. Kapitel 6.4)
2) Erfassung großer Verbrauchergruppen und Unterverteilungen (Output-Datenreihen)	Anschluss der Messwandler an größeren Abgängen bzw. Messpunkten (Unterverteilungen und Verbrauchergruppen), die unmittelbar an die elektrische Verteilung angeschlossen sind Priorisierung: nach Relevanz der Verbrauchergruppen/Unterverteilungen bzw. Höhe des Leistungsbezuges
3) Erfassung weiterer Verbrauchergruppen und Unterverteilungen (Output-Datenreihen)	Anschluss der Messwandler an weiteren Abgängen bzw. Messpunkten (Unterverteilungen und Verbrauchergruppen), die unmittelbar an die elektrische Verteilung angeschlossen sind Priorisierung: nach Relevanz der Verbrauchergruppen/Unterverteilungen bzw. Höhe des Leistungsbezuges

Wenn mehrere baugleiche elektrische Verbraucher (z.B. Produktionsmaschinen) an die elektrische Verteilung angebunden sind, kann je nach verfügbarem Messequipment auch lediglich eine Anlage erfasst werden. Der Verbrauch der nicht erfassten Anlagen wird dann anhand der vorliegenden Leistungswerte der gemessenen Anlage abgeschätzt (vgl. [108]). Durch diese Standardisierungsverfahren kann die Anzahl der notwendigen Messwandler zur Erfassung der Verbrauchergruppe reduziert werden. Nicht benötigte Messwandler stehen somit für den Anschluss an weiteren priorisierten Messpunkten zur Verfügung.

5.1.3 Festlegung des Messzeitraums

Beim Einsatz mobiler Messtechnik werden die Messdatensätze einmalig erhoben. Jede Messreihe ist daher an einen bestimmten Messzeitraum gebunden. Die Festlegung des Messzeitraums definiert die durchgeführten Messreihen über den Zeitpunkt des Anschlusses der Messtechnik (Start der Datenübertragung bzw. des Messdatensatzes) bis zum Zeitpunkt des Abbaus (Ende der Datenübertragung bzw. des Messdatensatzes).

In der Praxis können Messkampagnen nicht über einen beliebig langen Messzeitraum durchgeführt werden. Mit zunehmender Dauer der Messkampagne steigen sowohl der Aufwand und – im Kontext der Betrachtung als Messdienstleistung – auch die Kosten. Der Messzeitraum ist daher unter anderem aus Effizienzgründen der angewendeten Messmethode limitiert (vgl. Kapitel 4.4).

Hinsichtlich des Messzeitraums empfiehlt sich die Orientierung am *Leitfaden Lastgangmessung* des KIT [107]. Danach wird ein Mindest-Messzeitraum von zwei Wochen für Lastgangmessungen vorgeschlagen, um jeden Wochentag mindestens zweimal zu erfassen. Erfahrungswerte aus der Praxis

haben weiterhin gezeigt, dass über den Messzeitraum von einer Woche eine Differenzierung nach Betriebstagen und Ruhetagen ermöglicht wird (s. Pre-Tests Kapitel 4.4).

Um auch etwaige wöchentliche Abweichungen wie beispielsweise Feiertage zu berücksichtigen, sollte die Messung über einen Zeitraum von zwei Wochen erfolgen. Weiterhin ist darauf zu achten, dass das Messobjekt während der Messung unter normalen Betriebsbedingungen genutzt wird. Demnach sind Ferien, Urlaubszeiten, Umbaumaßnahmen und Sanierungen am Messobjekt während des Messzeitraums zu vermeiden [107]. Der Einsatz der mobilen Messtechnik sollte sich an diesen Empfehlungen orientieren. Für das Messkonzept wird daher ein Messzeitraum von zwei Wochen als Mindest-Messzeitraum festgelegt.

Die Dauer des Einsatzes mobiler Messtechnik hängt weiterhin von der individuellen Zielsetzung der Messkampagne ab. Daher sollte sich die Länge des Messzeitraums auch nach den individuellen Zielvorgaben der Messkampagne richten. Als Richtzeitraum kann, abhängig von individuellen Gegebenheiten, ein Messzeitraum von bis zu vier Wochen definiert werden (s. Kapitel 4.4).

5.1.4 Festlegung der Terminologie für das Messkonzept

Zur einheitlichen Beschreibung des Messkonzeptes wird eine Terminologie für die wichtigsten Begrifflichkeiten eingeführt. Für die Erläuterungen zum Messkonzept ist zunächst die Unterscheidung zwischen Fallbeispielen, Messkampagnen und Messreihen notwendig.

Ein **Fallbeispiel** ist ein von anderen Fällen unabhängiges Messobjekt (KMU oder öffentliches Gebäude), ein Teilbereich oder eine Anlage bzw. ein elektrischer Verbraucher, an dem die mobile Messtechnik gemäß dem entwickelten Messkonzept eingesetzt wird.

Der Einsatz der mobilen Messtechnik wird je Fallbeispiel im Rahmen einer **Messkampagne** beschrieben. Eine Messkampagne kann dabei eine oder mehrere **Messreihen** umfassen. Jede Messreihe ist durch einen **Messzeitraum** (Zeitraum vom Anschluss bis zum Abbau der Messtechnik) und eine oder mehrere **Messlokationen** definiert. Die Messlokation beschreibt den Ort der Installation der Messtechnik in der elektrischen Verteilung. Die Zusammenhänge sind in der folgenden Abbildung grafisch dargestellt (s. Abbildung 20).

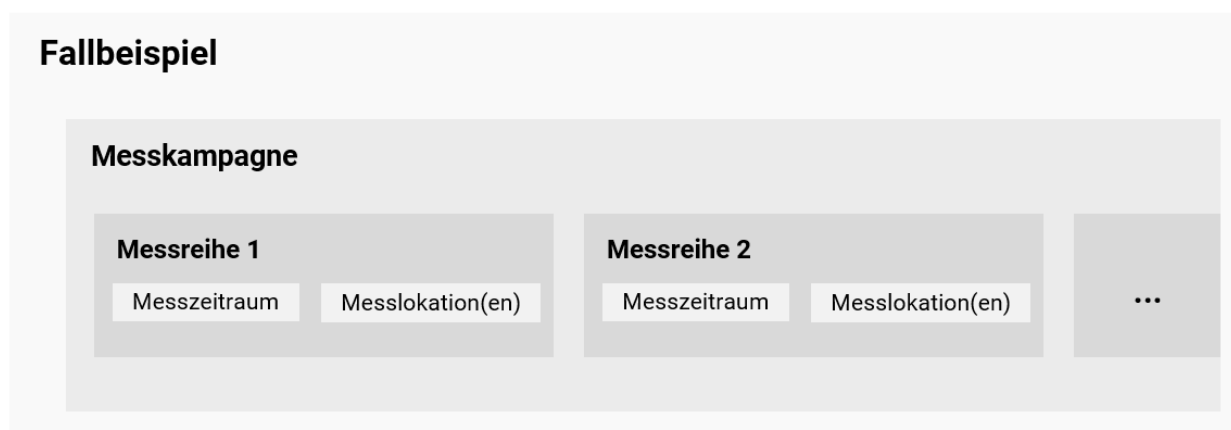


Abbildung 20: Terminologie für das Messkonzept

5.2 Methodik der Messvorbereitung

Der erste Abschnitt des Messkonzeptes ist die **Messvorbereitung**, die alle vorbereitenden Maßnahmen für die Umsetzung einer Messkampagne mit mobiler Messtechnik umfasst. Das Ziel dieses Abschnittes ist die Erhebung und Festlegung allgemeiner und technischer Rahmenbedingungen für die Durchführung der Messkampagne, um eine solide Datengrundlage für die Messdurchführung zu gewährleisten. In den nachfolgenden Kapiteln wird zunächst das grundlegende Konzept zu diesem Abschnitt erläutert. Ebenso werden die Arbeitsschritte der Vorbereitungsphase einer Messkampagne im Detail vorgestellt.

5.2.1 Konzept der Messvorbereitung

Vor der Durchführung einer Messkampagne sind zunächst vorbereitende Maßnahmen und Aspekte zu berücksichtigen. Vier Arbeitsschritte sind dabei von besonderer Bedeutung und bilden zusammen genommen den Abschnitt Messvorbereitung. In der nachfolgenden Tabelle sind die Arbeitsschritte sowie der jeweilige Ansatz und Hintergrund erläutert (Tabelle 14).

Tabelle 14: Arbeitsschritte Messvorbereitung

Arbeitsschritt	Zielsetzung	Hintergrund
Erstkontakt & Zieldefinition	Ermittlung der Motivation für die Durchführung einer Messkampagne in Absprache mit der Ansprechperson des Messobjektes	Aus der Motivation für die Messung lassen sich Indikatoren ableiten, die auf die Durchführung bestimmter Analysen und Auswertungen hindeuten (s. Analysekonzept, Kapitel 6)
Datenerfassung & Vor-Ort-Begehung	Erfassung grundlegender Betriebsdaten zur Einordnung des Messobjektes hinsichtlich der Größe, Branche, Betriebszeiten und der Energiebezüge	Betriebsdaten stellen eine Grundlage für das Analysekonzept dar (u.a. zur Datenvalidierung, Bildung von Kennzahlen, Abgleich der Betriebszeitfenster)
Erfassung technischer Rahmenbedingungen	Bestmögliche Aufschlüsselung der elektrischen Verteilung (Hierarchie-Ebenen)	Die technischen Aspekte zur elektrischen Verteilung sind die Grundlage für die Erstellung eines individuellen Messplans
Messplanung	Bündelung der erhobenen Informationen in einem zentralen Planungsdokument für die Umsetzung der Messkampagne	Sicherstellung einer nachvollziehbaren Messplanung für die Durchführungs- und Nachbearbeitungsphase

Die Methodik und die Arbeitsschritte zum Abschnitt Messvorbereitung sind ausführlich in Abbildung A 1 festgehalten (s. Anhang). Auf die einzelnen Arbeitsschritte wird in den folgenden Kapiteln eingegangen.

5.2.2 Erstkontakt und Zieldefinition

Der Arbeitsschritt „Erstkontakt & Zieldefinition“ umfasst den ersten Kontakt mit dem Unternehmen. Hier sollte zunächst eine Ansprechperson aus dem Unternehmen definiert werden, über die die Kommunikation zur Durchführung der Messkampagne abläuft. Im Rahmen einer ersten Besprechung mit dieser verantwortlichen Person werden die mit der Messkampagne verknüpften Ziele definiert. Dabei sollten die folgenden Fragestellungen beantwortet werden:

- 1) Was soll physisch gemessen werden? (Festlegung der Systemgrenze für die Messung)
- 2) Welches übergeordnete Ziel und welche Motivation sind mit der Messkampagne verbunden?
- 3) Welche Werte sollen erfasst werden? (Definition der Messgrößen)
- 4) Wie lange soll gemessen werden? (Festlegung der Messdauer zur Erreichung der Ziele)

Die Zieldefinition dient auch zur Standardisierung des Messkonzeptes und zur Verknüpfung mit dem Analysekonzept. So kann eine vorab im Messkonzept festgelegte Zieldefinition auf die Umsetzung bestimmter Datenanalysen hindeuten, die dann systematisch bei der Anwendung des Analysekonzeptes aufgegriffen werden.

5.2.3 Datenerfassung und Vor-Ort-Begehung

Mit diesem Arbeitsschritt werden zunächst grundlegende Daten des Messobjektes erhoben. Die Daten können einerseits bei der Ansprechperson vor Ort angefragt oder im Zuge einer Vor-Ort-Begehung erfasst werden. Die grundlegende Datenerfassung umfasst die folgenden Informationen (s. Tabelle 15):

Tabelle 15: Informationen zur grundlegenden Datenerfassung

Informationen	Hintergrund
Allgemeine Informationen	Dokumentation der Ansprechperson, Anzahl beschäftigter Personen, Betriebszeiten, Gebäudenutzung Sicherstellung einer klaren Rollenverteilung und Einordnung des Messobjektes
Energiebezüge und smarte Technologien	Erfassung der Energiebezüge und vorhandener Querschnittstechnologien Erfassung smarter Technologien (u.a. Energiemonitoring, Smart Metering, Lastgangdaten RLM-Messung) und dadurch eventuell vorliegende Energieverbrauchsdaten für die Anwendung des Analysekonzeptes (u.a. zur Datenbereinigung)

5.2.4 Erfassung technischer Rahmenbedingungen

Die Erfassung der technischen Rahmenbedingungen geschieht ebenfalls im Zuge der Vor-Ort-Begehung. Dadurch wird sichergestellt, dass Mess- und Installationsfehler vermieden und eine verlässliche Datengrundlage zur Entwicklung der Messplanung vorliegt. Im Fokus der Vor-Ort-Begehung steht daher die Erhebung notwendiger Informationen zum Einsatz der mobilen Messtechnik. In diesem Arbeitsschritt werden vor allem Daten zur elektrischen Verteilung des Unternehmens erfasst. Zur besseren Strukturierung und Standardisierung des Messkonzeptes wird die elektrische Verteilung bereits an dieser Stelle in eine Hierarchie-Struktur untergliedert.

Grundsätzlich wird die mobile Messtechnik für die Aufschlüsselung der Hierarchie-Ebenen „Betrieb/Standort“ sowie „Bereich“ nach dem Top-Down-Ansatz eingesetzt (vgl. Kapitel 5.1.1). Messkampagnen mit mobiler Messtechnik können jedoch auch unmittelbar an Verbrauchergruppen durchgeführt werden. Dadurch entfällt die Aufschlüsselung größerer Haupt- und Unterverteilungen. Je nach Zieldefinition und Motivation der Messkampagne kann daher zwischen verschiedenen Fällen unterschieden werden:

- 1) **Messung einzelner Betriebe/Standorte:** Ein Betrieb/Standort kann aus mehreren Bereichen bzw. Anlagen bestehen. Es findet eine ganzheitliche Erfassung aller Verbraucher und Erzeuger des Betriebes nach dem Top-Down-Prinzip unter Beachtung des Messprinzips und der Messprioritäten statt.
- 2) **Messung einzelner Bereiche:** Ein Bereich kann aus weiteren untergeordneten Bereichen bzw. Anlagen bestehen. Es findet eine ganzheitliche Erfassung aller Verbraucher und Erzeuger des Bereichs nach dem Top-Down-Ansatz unter Beachtung des Messprinzips und der Messprioritäten statt.
- 3) **Messung einzelner Anlagen:** Eine Anlage besteht aus einem oder mehreren technischen Geräten mit identischen Eigenschaften (z.B. Beleuchtung, Lüftungsanlage) bzw. identischen Verwendungszweck. Es findet eine ganzheitliche Erfassung aller Verbraucher bzw. Einzelverbraucher unter Beachtung des Messprinzips und der Messprioritäten statt.

Auch Erzeugungsanlagen (z.B. Photovoltaik-Anlagen) können im Rahmen einer Messkampagne erfasst werden, sofern eine Einspeisung der Anlage auf die Sammelschiene einer elektrischen Unterverteilung erfolgt. Dementsprechend ist eine Differenzierung nach Verbrauchern (Output-Datenreihe auf die Sammelschiene) und Erzeugern (Input-Datenreihe auf die Sammelschiene) vorzunehmen.

Die Erfassung der notwendigen Daten erfolgt mittels vorgefertigter Dokumente. Für die Aufschlüsselung der elektrischen Verteilung sind nach Möglichkeit die folgenden Informationen zu erfassen:

- 1) Nummerierung der Zuleitungen sowie der Abgänge inkl. Abgangsbezeichnung gemäß der Dokumentation in der elektrischen Verteilung.
- 2) Messung und Dokumentation der Phasenbelastung L1-L3 mittels digitaler Stromzangen.
- 3) Prüfung der Erreichbarkeit der Phasen, um den benötigten Platz für die Montage der Messwandler zu bestimmen.

Neben der Aufschlüsselung der elektrischen Verteilung bzw. der Hierarchie-Ebenen werden im Zuge dieses Arbeitsschrittes die folgenden technischen Aspekte für den Einsatz der mobilen Messtechnik erhoben (s. Tabelle 16):

Tabelle 16: Berücksichtigung technischer Aspekte für den Einsatz mobiler Messtechnik

Aspekt	Hintergrund
Erreichbarkeit der elektrischen Verteilung	Ermittlung von Berechtigungen für den Zugang zu elektrischen Verteilungen
Aufbaumöglichkeiten für mobile Messtechnik	Prüfung des Platzbedarfs für den Anschluss mobiler Messtechnik in der elektrischen Verteilung
Verfügbarkeit Internet-/Netzwerkzugriff	Prüfung Internet-/Netzwerkzugriff zur Datenübertragung während der Messung in unmittelbarer Nähe der elektrischen Verteilung
Verfügbarkeit elektrischer Anschluss Messkoffer	Prüfung 400V CEE-Steckdose in unmittelbarer Nähe der elektrischen Verteilung (alternativ Strom-/Spannungsbezug über elektrische Verteilung)

5.2.5 Messplanung

Auf der Grundlage der dokumentierten technischen Rahmenbedingungen wird in diesem Arbeitsschritt ein individueller Messplan für eine Messkampagne erstellt. Je Hierarchie-Ebene und Messlokation werden die zu erfassenden Messpunkte definiert. In diesem Arbeitsschritt wird bereits berücksichtigt, welche mobilen Messsysteme (s. Kapitel 4) in der jeweiligen Hierarchie-Ebene bzw. Messlokation zum Einsatz kommen. Auch die Belegung der Messkanäle kann im Zuge der Erstellung des Messplans berücksichtigt werden. Dazu sind die zu erfassenden ein- und ausgehenden Lastflüsse eindeutig den Messkanälen zuzuweisen. Anhand der dokumentierten Phasenbelastungen können die benötigten Messwandler (Stromwandler oder Messspulen) festgelegt werden.

Bei größeren elektrischen Verteilungen mit mehreren elektrischen Hauptverteilungen sollte die Messplanung in einem Excel-Sheet erfolgen, das während der Messdurchführung den aktuellen Stand der Messkampagne darstellt. Die nachfolgende Abbildung zeigt einen Auszug aus einem Messplan (s. Abbildung 21, Folgeseite). Für die elektrische Hauptverteilung *NSHVI AV* sind die ein- und ausgehenden Lastflüsse typisiert und gemäß den technischen Rahmenbedingungen bezeichnet. Darüber hinaus sind die Zuleitung sowie die Abgänge jeweils mit Informationen zur Messreihe, der zugeordneten Messtechnik sowie der geplanten Belegung der Messkanäle versehen. Der zeitliche Ablauf der Messkampagne wird ebenfalls – in Abstimmung mit der Ansprechperson des Messobjektes – im Messplan festgehalten.

				Messkoffer	Messwandler		
z = Zuleitung				Messkoffer 1: me2go-16	1.01-1.04 K, 1.05 u. 1.06 R		
v = Verbraucher				Messkoffer 2: me2go-231	2.01-2.04 K, 2.05 u. 2.06 R		
k = Kupplung/Weiterleitung				Messkoffer 3: me2go-47	3.01-3.04 K, 3.05 u. 3.06 R		
e = Erzeuger				Smart Cost	SC PS-01 K,,,,,SC PS-06 K		
				K = Klappstromwandler, R = Rogowski Spule			
Niederspannungshauptverteilung NSHV1 AV							
Nummer	Typ	Bezeichnung	Schaltschrank-Info	Gemessene Stromstärke einer Phase	Messreihe	Messkanal	Bauteil
2Q1	z	Transformator 1	Feld 2		M1	2.06 R	A+B
5Q1	z	Transformator 2	Feld 5		M1	3.05 R	A+B
1Q1	k	A-B/7, Technik 4.2 R.-1.840 NSHV 2	Feld 1		M1	2.05 R	A+B
3Q1	v	UV Werkstatt ZA17	Feld 3	60 mA			A+B
3Q2	v	UV Lüftung (1) Schacht 1.5 DG	Feld 3	26 A	M1	2.03 K	A+B
3Q3	v	UV Fernwärme	Feld 3	120 mA			A+B
3Q4	v	UV U2 Energiezentrale	Feld 3	8 A	X		A+B
3Q5	v	UV U3 Ausenbeleuchtung	Feld 3	160 mA	M1	2.02 K	A+B
3Q6	v	UV U7 Technik/Lager/Treppen	Feld 3	3 A			A+B
3Q7	v	Kälte 3 I+K Raum	Feld 3	2 A (2 K. pro L)	M1	2.01 K	A+B
3Q8	v	UV 04 Saal	Feld 3				A+B
3Q9	v	UV 06 Empfang/Druckerei	Feld 3	7,5 A			A+B

Abbildung 21: Beispielhafter Auszug aus einem Messplan

Mit der Umsetzung des Arbeitsschrittes Messplanung ist der Abschnitt Messvorbereitung abgeschlossen.

5.3 Methodik der Messdurchführung

Der Abschnitt **Messdurchführung** umfasst alle Tätigkeiten im Zusammenhang mit der Durchführung der Messkampagne und dem tatsächlichen Einsatz der Messtechnik in einem Messobjekt. In diesem Kapitel wird zunächst das Konzept der Messdurchführung beschrieben. Anschließend werden die einzelnen Arbeitsschritte im Detail vorgestellt.

5.3.1 Konzept der Messdurchführung

Der Abschnitt Messdurchführung besteht aus den Arbeitsschritten „Anschluss Messtechnik“, „Messung“ und „Abbau Messtechnik“. Ziel dieses Abschnittes ist die Sicherstellung eines effizienten und ordnungsgemäßen Einsatzes der mobilen Messtechnik von der Installationsphase über die Messung bis hin zur Abbauphase. Der Hintergrund dieser Arbeitsschritte liegt in der Vermeidung systematischer Messfehler insbesondere bei der Installation der Messwandler (vgl. Kapitel 4.2.3). Weiterhin stehen die Kriterien Zeitaufwand und Dokumentation im Vordergrund. Die folgende Tabelle führt jeweils Zielsetzung und Hintergrund der einzelnen Arbeitsschritte auf (Tabelle 17, Folgeseite).

Tabelle 17: Arbeitsschritte Messdurchführung

Arbeitsschritt	Zielsetzung	Hintergrund
Anschluss Messtechnik	Systematischer und ordnungsgemäßer Anschluss der Messtechnik gemäß Messplan; Dokumentation der Messkanaleigenschaften und Prüfung weiterer Anschlussbedingungen	Vermeidung systematischer Messfehler; fehlerfrei dokumentierte Messkanaleigenschaften als Grundlage für die weiteren Arbeitsschritte im Analysekonzept
Messung	Kontinuierliches Monitoring der Datenübertragung und etwaige Problembehebung (remote und ggf. vor Ort)	Strategie zur Vermeidung von Messfehlern; frühzeitige Identifikation und Behebung von Problemen bereits während der Messung (insbes. Messfehler)
Abbau Messtechnik	Systematischer Abbau der Messtechnik	Kontrolle der eingesetzten Messwandler sowie der dokumentierten Messkanaleigenschaften

Die Methodik mit den genannten Arbeitsschritten ist detailliert in Abbildung A 2 aufgeführt (s. Anhang). Die Inhalte der einzelnen Arbeitsschritte werden in den folgenden Kapiteln näher erläutert.

5.3.2 Anschluss Messtechnik

Dieser Arbeitsschritt umfasst den Anschluss der mobilen Messsysteme gemäß den in der Messplanung (s. Kapitel 5.2.5) definierten Hierarchie-Ebenen der elektrischen Verteilung bzw. Messlokalitionen. Dabei sind grundsätzlich die geltenden Vorschriften für sicheres Bedienen von und Arbeiten an elektrischen Anlagen zu beachten (vgl. DIN VDE 0105-100). Der Anschluss der Messtechnik darf nur durch geschultes Fachpersonal (Elektrofachkraft) erfolgen.

Der wichtigste Punkt dieses Arbeitsschrittes ist die Dokumentation der **Messkanaleigenschaften**. Dabei werden je installierten Messkoffer die Kanalbelegungen, Wandlerfaktoren und Kanalbezeichnungen dokumentiert. Dadurch werden unter anderem Installationsfehler vorgebeugt, wie beispielsweise Verwechslungen beim Anschluss der Messwandler. So bleibt auch im Falle der Installation mehrerer Messkoffer an einer elektrischen Verteilung die Übersicht über die Messkanaleigenschaften gewahrt. In der folgenden Tabelle ist beispielhaft die Dokumentation der Messkanaleigenschaften für einen mobilen Messkoffer dargestellt (s. Tabelle 18, Folgeseite).

Tabelle 18: Dokumentation der Messkanaleigenschaften (Beispiel)

Messkoffer	me2go-47 (Nr. 3)	
Messlokation	NSHV1 AV	
Kanal-Nr.	Wandlerfaktor	Kanalbezeichnung
3.01 K	250	UV Klima L1.1
3.02 K	250	UV Klima L1.2
3.03 K	250	UV Kälte L1.1
3.04 K	250	UV Kälte L1.2
3.05 R	1.000	Transformator 2
3.06 R	1.000	KS NSHV1 SV

Die Dokumentation der Messkanaleigenschaften dient auch als Grundlage für die softwareseitigen Eingaben im Zuge der Installation der Messsysteme. Da die eingetragenen Wandlerfaktoren einen entscheidenden Einfluss auf die Messdaten haben (s. Kapitel 4.2.3, Parametrierungsfehler), sollten diese nach Möglichkeit mehrfach geprüft und abgeglichen werden. Die Dokumentation der Messkanaleigenschaften kann auch in den Messplan integriert werden, um einen eindeutigen Bezug zwischen den zu messenden Abgängen und den Messkanälen herzustellen.

Für den Anschluss der Messtechnik sind darüber hinaus die folgenden Anschlussbedingungen zu prüfen und dokumentieren:

- 1) Ordnungsgemäßer mechanischer Anschluss der mobilen Messsysteme zur Vorbeugung etwaiger Messfehler
- 2) Einrichtung und Prüfung des Fernzugriffs (falls vorhanden) zur Sicherstellung der Datenübertragung
- 3) Abschließende Kontrolle des Gesamtsystems auf ordnungsgemäße Funktion zur Vorbeugung von Änderungen im Messaufbau
- 4) Fotos und Notizen zum Anschluss des Messsystems an der elektrischen Verteilung als Grundlage zur Nachvollziehbarkeit und Dokumentationszwecken
- 5) Kontakt zu Ansprechpersonen für Auf- und Abbau der Messtechnik sowie zur Klärung etwaiger Rückfragen

5.3.3 Messung

Der Arbeitsschritt Messung umfasst den Prozess vom Start bis zum Ende des Messzeitraums, in dem die Messdatensätze einer Messreihe erhoben werden. Zur Fehlervermeidung im Verlauf der Messung ist die Prüfung der ordnungsgemäßen Funktion der mobilen Messsysteme notwendig. Beim Auftreten von Problemen, beispielsweise hinsichtlich der Datenübertragung oder der Plausibilität der Messdaten, sollten die nachfolgenden Aspekte zur Problemlösung in der angegebenen Reihenfolge herangezogen werden:

- 1) Zunächst sollte das Ziel sein, die Probleme mittels Fernzugriff zu lokalisieren und remote zu lösen.
- 2) Können die Probleme nicht mittels Fernzugriff behoben werden, sollte die Ansprechperson des Unternehmens kontaktiert werden. Wenn es sich dabei um eine Elektrofachkraft handelt, kann diese das System vor Ort prüfen und ggf. das Problem beheben. Handelt sich es sich um eine elektrotechnisch unterwiesene Person, kann diese zumindest das mobile Messsystem auf äußere Probleme untersuchen und bspw. die WLAN-Verbindung prüfen.
- 3) Falls die Problem- bzw. Fehlerbehebung weiterhin scheitert, muss die Messung neu gestartet werden. Dazu sollte die für die Messung verantwortliche Person das mobile Messsystem erneut vor Ort installieren.

Um die Lastverläufe und Details zum Lastverhalten interpretieren zu können, ist eine Dokumentation von Betriebsabläufen und Besonderheiten mit Datum, Uhrzeit, Dauer und spezifischen Eigenschaften (z.B. betroffene(r) Teilbereich oder Verbrauchergruppe) hilfreich. Diese Dokumentation sollte von der Ansprechperson des Messobjektes erfolgen bzw. erfragt werden. Der Arbeitsschritt endet mit dem Abschluss der Messung gemäß dem vorab definierten Messplan.

5.3.4 Abbau Messtechnik

Dieser Arbeitsschritt umfasst alle Aktivitäten zum Abbau des mobilen Messsystems. Dabei gilt wie beim Anschluss der Messtechnik die Beachtung der Vorschriften für sicheres Bedienen von und Arbeiten an elektrischen Anlagen (vgl. DIN VDE 0105-100). Der Anschluss der Messtechnik darf nur durch geschultes Fachpersonal (Elektrofachkraft) erfolgen. Beim Abbau sind insbesondere die je Messkanal eingesetzten Messwandler zu prüfen. Falls Abweichungen gegenüber den bei Anschluss der Messtechnik dokumentierten Wandlerfaktoren auftreten, müssen die Messdaten gemäß den korrekten Wandlerfaktoren angepasst werden. Die Anpassung erfolgt dann im Analysekonzept (Abschnitt Messdatenauswertung und -analyse). Falsche Wandlerfaktoren können die Messergebnisse erheblich verfälschen (s. Kapitel 4.2.3, Parametrierungsfehler). Daher ist die Überprüfung der Wandlerfaktoren für eine korrekte Interpretation der Messdatensätze essenziell.

Für den Abbau der Messtechnik sind darüber hinaus die folgenden Punkte zu beachten:

- 1) Ordnungsgemäßer mechanischer Abbau der mobilen Messsysteme
- 2) Rückbau und abschließende Kontrolle der Elektroinstallationen bzw. der elektrischen Verteilung (inkl. Fotos und Notizen)

Wenn der Arbeitsschritt Abbau Messtechnik abgeschlossen ist, erfolgen gegebenenfalls gemäß dem Messplan weitere Messreihen an anderen Messlokalationen. Die Methodik zur Umsetzung weiterer Messreihen setzt dann zu Beginn des Abschnittes Messdurchführung (Arbeitsschritt Anschluss Messtechnik) an.

5.4 Durchgeführte Fallbeispiele und ihre Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Fallbeispiele vorgestellt, in denen das entwickelte Messkonzept angewendet wurde. Dazu werden die Fallbeispiele zunächst eingeordnet, kategorisiert und hinsichtlich charakteristischer Merkmale spezifiziert. Anschließend erfolgt eine detaillierte Vorstellung der einzelnen Messkampagnen. Schließlich wird das Messkonzept anhand von Erfahrungswerten und Lessons Learnt aus den Fallbeispielen validiert.

5.4.1 Einordnung und Übersicht

Zur übersichtlichen Darstellung der durchgeführten Fallbeispiele werden diese zunächst eingeordnet und kategorisiert. Dabei können die Hierarchie-Ebenen der elektrischen Verteilung zur Differenzierung herangezogen werden (vgl. Kapitel 5.2.4). Da das Messkonzept unabhängig von der Unternehmensgröße und Branchenzugehörigkeit des Messobjektes angewendet werden kann, werden an dieser Stelle die Kategorien **Öffentliche Gebäude** und **KMU** eingeführt. Aufgrund des weit verbreiteten Einsatzes von Querschnittstechnologien über alle Verbrauchssektoren und Branchen hinweg kommt diesen Technologien auch im Rahmen des Mess- und Analysekonzeptes eine besondere Bedeutung zu. Daher umfassen die durchgeführten Fallbeispiele an **Querschnittstechnologien** eine eigenständige Kategorie. In Tabelle 19 ist die Einordnung und Kategorisierung der durchgeführten Fallbeispiele dargestellt.

Tabelle 19: Einordnung und Kategorisierung der durchgeführten Fallbeispiele

Fallbeispiele Messung einzelner Betrieb/Standort	Kategorie
Gerichtsgebäude	Öffentliche Gebäude
Polizeipräsidium	Öffentliche Gebäude
Metallverarbeitender Betrieb (Standort A)	KMU
Metallverarbeitender Betrieb (Standort B)	KMU
Fallbeispiele Messung einzelner Bereich	Kategorie
Lüftungsanlage	Querschnittstechnologie
Fallbeispiele Messung einzelner Anlagen	Kategorie
Kälteanlage	Querschnittstechnologie

Vier Fallbeispiele können der Ebene „Betrieb/Standort“ zugeordnet werden. In diesen Fallbeispielen wurde gemäß dem Top-Down-Ansatz unter Berücksichtigung des Messprinzips und der Messprioritäten eine ganzheitliche Erfassung aller Verbraucher und Erzeuger vorgenommen. Zwei Fallbeispiele wurden in öffentlichen Gebäuden (Gerichtsgebäude, Polizeipräsidium) und zwei weitere in KMU

(metallverarbeitender Betrieb, Standort A und B) durchgeführt. Somit stehen insgesamt vier Fallbeispiele zur Validierung des Messkonzeptes zur Verfügung, die eine Betrachtung des gesamten Betriebes bzw. Standortes des Messobjektes umfassen.

Ein weiteres Fallbeispiel wird der Ebene „Bereich“ zugeordnet. Es wurde die elektrische Unterverteilung einer Lüftungsanlage mit mehreren Komponenten (u.a. Zuluft- und Abluftmotor) erfasst. Das Fallbeispiel Kälteanlage ist der Ebene „Anlagen“ zugeordnet, da die Messkampagne unmittelbar an elektrischen Einzelverbrauchern durchgeführt wurde. Beide Fallbeispiele repräsentieren Messkampagnen der Kategorie Querschnittstechnologie.

Zur weiteren Charakterisierung der Fallbeispiele werden die durchgeführten Messkampagnen in den folgenden Abschnitten näher erläutert.

Fallbeispiel Gerichtsgebäude

In Tabelle 20 werden die Eckdaten zur Messkampagne im Fallbeispiel Gerichtsgebäude vorgestellt.

Tabelle 20: Vorstellung Messkampagne Fallbeispiel Gerichtsgebäude

Fallbeispiel: Gerichtsgebäude	
Einordnung:	Betrieb/Standort
Kategorie:	Öffentliches Gebäude
Jahresstromverbrauch:	Ca. 0,9 GWh
Anzahl Gebäude:	1
Anzahl Messreihen:	1



Messreihe	Messzeitraum	Messlokation	Betrieb/HV	Bereich/UV	Anlage/VG
1	06.12.2021-10.01.2022 35 Messtage	HV	1	7	4

Es handelt sich um ein öffentliches Gebäude, das ausschließlich zu Büro- und Verwaltungszwecken genutzt wird. Der Jahresstromverbrauch liegt bei ca. 0,9 GWh. Dieser setzt sich aus Büroverbrauchern (PCs, Monitore, Drucker), Untertischgeräten, Teeküchen, Beleuchtung, Server inkl. Klimatisierung, Kantinenbetrieb sowie Umwälzpumpen für das Heizungssystem (Fernwärme) zusammen. Über weitere Lüftungs- und Klimatechnik verfügt das Gebäude nicht. Es kann daher von einem öffentlichen Gebäude mit geringer technischer Ausstattung ausgegangen werden.

Das Fallbeispiel umfasst einen unter Denkmalschutz stehenden Gebäudekomplex (Baujahr 1907-1911). Es wurde eine Messreihe in der elektrischen Hauptverteilung (HV) des Gebäudes durchgeführt. Über 35 Messtage wurden neben der Hauptverteilung des Gebäudes als Input-Datenreihe insgesamt sieben Unterverteilungen und vier Verbrauchergruppen parallel erfasst. Dazu wurden drei

Messgeräte zur Wirkleistungsmessung eingesetzt. Alle weiteren Abgänge der Hauptverteilung wiesen während der Überprüfung der Phasenbelastung mittels Stromzange geringe Werte auf oder wurden nach Absprache mit der Ansprechperson vor Ort als nicht relevant eingestuft.

Im Folgenden werden die Merkmale und Besonderheiten dieses Fallbeispiels nochmals herausgestellt:


- Weitere Messreihen in einzelnen Bereichen bzw. Unterverteilungen wurden nicht durchgeführt, da diese in den Fluren des Erdgeschosses liegen und die Messtechnik aufgrund der baulichen Gegebenheiten nicht im Schaltschrank untergebracht werden konnte. Darüber hinaus war aufgrund der Vielzahl an Abgängen in diesen Unterverteilungen (u.a. kleinere Stromkreise) und nur wenig Platz für den Anschluss der Messwandler vorhanden.
- Die Messkampagne fand über die Weihnachtsfeiertage und Neujahr 2021/2022 statt. Dadurch wurden Tage mit abweichenden Verbrauchsmuster ggü. dem regulären Betrieb des Gebäudes erfasst. Für die Datenvalidierung (u.a. Bildung einer Referenzwoche) sind die Tage mit abweichenden Verbrauchsmuster nicht geeignet. Im Zuge der Messvorbereitung und der Festlegung des Messzeitraums sind diese Umstände daher besonders zu beachten. Die standardisierten Datenanalysen können trotz dieser Umstände angewendet werden (s. Analysekonzept, Kapitel 6.5), da die Messkampagne ausreichend Messtage mit normalen Betriebsverhalten aufweist (vgl. Tabelle 20).
- Die Messkampagne fand während der Corona-Pandemie statt. Daher wurden in der Messvorbereitung auch Daten zur pandemiebedingten Gebäudenutzung erhoben (z.B. Anzahl Mitarbeitende im Home-Office). Auf der Grundlage dieser Daten können die Messergebnisse besser eingeordnet und interpretiert werden.

Fallbeispiel Polizeipräsidium

Tabelle 21 (s. Folgeseite) stellt die Eckdaten der durchgeführten Messkampagne im Fallbeispiel Polizeipräsidium dar. Das öffentliche Gebäude (Baujahr 2001) ist mit einem Jahresstromverbrauch von ca. 4,2 GWh und einer Aufteilung auf drei Gebäude deutlich größer als das Gerichtsgebäude. Der Jahresstromverbrauch setzt sich unter anderem aus Büroverbrauchern, Beleuchtung, Kantinenbetrieb, der Klima-, Lüftungs- und Kältetechnik, Server, USV-/Netzersatzanlagen und weiteren spezifischen elektrischen Verbrauchern zusammen.

Tabelle 21: Vorstellung Messkampagne Fallbeispiel Polizeipräsidium

Fallbeispiel: Polizeipräsidium	
Einordnung:	Betrieb/Standort
Kategorie:	Öffentliches Gebäude
Jahresstromverbrauch:	Ca. 4,2 GWh
Anzahl Gebäude:	3
Anzahl Messreihen:	3



Anonymisiert aus datenschutzrechtlichen Gründen

Messreihe	Messzeitraum	Messlokationen	Betrieb/HV	Bereich/UV	Anlage/VG
1	04.07.2023-21.07.2023 17 Messtage	HV1, HV2	4	2	6
2	21.07.2023-28.07.2023 7 Messtage	HV2, HV3, HV4	4	13	6
3	28.07.2023-15.08.2023 18 Messtage	HV5, UV1, UV2	1	16	8

Die gesamte Messkampagne umfasst 42 Messtage. Zur Aufschlüsselung der elektrischen Verteilung wurden insgesamt drei Messreihen mit unterschiedlichen Messzeiträumen und Messlokationen zeitlich gestaffelt durchgeführt. Dabei wurden gemäß dem Top-Down-Ansatz in der ersten Messreihe die zwei durch Transformatoren gespeisten Hauptverteilungen erfasst. So war unter anderem eine Aufschlüsselung des Gesamtstromverbrauchs auf die einzelnen Gebäude möglich. In der zweiten und dritten Messreihe wurden einzelne Haupt- und Unterverteilungen im Detail aufgeschlüsselt. In Summe umfasste die gesamte Messkampagne fünf Hauptverteilungen, 31 Unterverteilungen und 20 Verbrauchergruppen. Dabei kam das gesamte Messequipment bestehend aus drei Messgeräten zur Wirkleistungsmessung und ergänzender Messgeräte zur Scheinleistungsmessung zum Einsatz. Die folgenden Punkte fassen die Besonderheiten und Merkmale dieses Fallbeispiels zusammen:

- Aufgrund der Größe des Messobjektes und der entsprechend komplexen elektrischen Verteilung mussten mehrere Messreihen durchgeführt werden. Dies ist auf die Limitierung des Messequipments zurückzuführen. Mit der Erweiterung des Messequipments um zusätzliche mobile Messsysteme hätte die Anzahl der Messreihen reduziert werden können. Mit dem gegebenen Messequipment konnten jedoch die Hauptverteilungen sowie große Unterverteilungen durch drei zeitlich aufeinander folgende Messreihen erfasst werden.
- Obwohl drei Messreihen durchgeführt worden sind, konnten an den Messlokationen nicht alle Abgänge (Unterverteilungen und Verbrauchergruppen) erfasst werden. Daher wurden unter Berücksichtigung der Messprioritäten (vgl. Kapitel 5.1.2) je Messreihe und Messlokation zunächst die relevanten Messpunkte identifiziert.

- Die elektrische Verteilung des Messobjektes ist in Bereiche zur Allgemeinversorgung (AV) und Sicherheitsversorgung (SV) aufgeteilt. Dies hat sicherheitstechnische Hintergründe. Sicherheitsversorgungen sind im Falle von Störungen oder Ausfällen im Stromnetz durch Geräte zur unterbrechungsfreien Stromversorgung (USV-Geräte) zusätzlich abgesichert. Sie versorgen daher vor allem kritische Systeme zur Aufrechterhaltung des Gebäudebetriebs. Da die Hauptverteilungen (HV1 und HV2) unmittelbar an solche Sicherheitsversorgungen gekoppelt sind, werden beide Messlokationen als Hauptverteilung deklariert.

Fallbeispiel metallverarbeitender Betrieb (Standort A)

Tabelle 22 fasst die allgemeinen Informationen zur Messkampagne am Standort A des metallverarbeitenden Betriebes zusammen. Das Gebäude am Standort A kann in die Bereiche Büro, Lagerhallen, Maschinenparks und Ladestationen für Elektrofahrzeuge eingeteilt werden. Zusätzlich ist auf dem Gebäudedach eine Photovoltaik-Anlage mit Überschusseinspeisung installiert. Der Jahresstromverbrauch liegt bei ca. 0,2 GWh.

Tabelle 22: Vorstellung Messkampagne Fallbeispiel metallverarbeitender Betrieb (Standort A)

Fallbeispiel: Metallv. Betrieb (Standort A)	
Einordnung:	Betrieb/Standort
Kategorie:	KMU
Jahresstromverbrauch:	Ca. 0,2 GWh
Anzahl Gebäude:	1
Anzahl Messreihen:	1



Messreihe	Messzeitraum	Messlokation	Betrieb/HV	Bereich/UV	Anlage/VG
1	15.11.2022-30.11.2022 15 Messtage	HV1, HV2	2	4	11

Es wurde insgesamt eine Messreihe über einen Messzeitraum von 15 Tagen durchgeführt. Dabei wurde das Messequipment bestehend aus drei Messgeräten zur Wirkleistungsmessung und weiteren Messgeräten zur Scheinleistungsmessung installiert. Somit konnten zwei elektrische Hauptverteilungen, vier Unterverteilungen und 11 Verbrauchergruppen erfasst werden. Zur Auswahl der zu erfassenden Messpunkte wurde basierend auf der Phasenbelastung und nach Rücksprache mit der Ansprechperson vor Ort eine Priorisierung vorgenommen. Der Anschluss der Messtechnik erfolgte dann nach Rücksprache mit der Ansprechperson vor Ort, die mit der Elektroinstallation vertraut war. Dies hat die Priorisierung der zu erfassenden Messpunkte erheblich erleichtert.

Für einzelne Verbrauchergruppen wie den Maschinenpark wurden Standardisierungsverfahren angewendet. Dabei wurde die Erfassung einer Produktionsmaschine inkl. der Zusatzkomponenten gegenüber der Erfassung mehrerer baugleicher Maschinen vorgezogen, um Messequipment für weitere Messpunkte bereitzustellen. Im Zuge der Datenauswertung kann der Verbrauch der erfassten Maschine dann immer noch auf mehrere baugleiche Maschinen hochgerechnet werden.

Nachfolgend werden die Besonderheiten und Merkmale dieser Messkampagne aufgeführt:

- Bei der Erfassung von Photovoltaik-Anlagen mit Überschusseinspeisung ist das Anschlusskonzept der Erzeugungsanlage zu beachten. Das Anschlusskonzept zeigt auf, welche Größen für eine eindeutige Zuordnung und Verrechnung der Energiekosten der Photovoltaik-Anlage messtechnisch erfasst werden müssen. Die Erzeugungsleistung der Photovoltaik-Anlage kann als Einspeise-Messpunkt auf die Sammelschiene einer elektrischen Verteilung betrachtet werden. Sofern auch Einspeisedaten (Netzeinspeisung) am Hauptzähler vorliegen, kann die Photovoltaik-Anlage aus dem Gesamtlastgang des Messobjektes herausgerechnet werden. So ist es möglich, den Einfluss der Photovoltaik-Anlage auf den Gesamtstromverbrauch des Messobjektes zu betrachten und in der Auswertung zu berücksichtigen.
- Während der Messdurchführung war die Übertragung der Messdaten an einer Messlokation teilweise eingeschränkt. Dadurch konnten die Messdaten nicht ordnungsgemäß übertragen werden. So wurde im Anschluss an die durchgeführte Messreihe lokal auf die Messsysteme zugegriffen und der vollständige Messdatensatz gesichert. Hintergrund dieser Einschränkungen war eine schlechte Internetanbindung des Mobilfunk-Providers vor Ort.

Fallbeispiel metallverarbeitender Betrieb (Standort B)

In der folgenden Tabelle sind die grundlegenden Informationen zur Messkampagne am Standort B des metallverarbeitenden Betriebes festgehalten (s. Tabelle 23).

Tabelle 23: Vorstellung Messkampagne Fallbeispiel metallverarbeitender Betrieb (Standort B)

Fallbeispiel: Metallv. Betrieb (Standort B)	
Einordnung:	Betrieb/Standort
Kategorie:	KMU
Jahresstromverbrauch:	Ca. 0,4 GWh
Anzahl Gebäude:	2
Anzahl Messreihen:	1



Messreihe	Messzeitraum	Messlokation	Betrieb/HV	Bereich/UV	Anlage/VG
1	30.11.2022-08.12.2022 8 Messtage	Trafo-Station, GHV1, GHV2	3	4	9

An diesem Standort befinden sich zwei Gebäude, deren Nutzung ähnlich wie am Standort A in die Bereiche Büro, Lagerhallen, Maschinenparks (Produktion), Ladestationen für Elektroautos und Werkstatt eingeteilt werden kann. Der Jahresstromverbrauch beträgt ca. 0,4 GWh. Zwei Gebäudehauptverteilungen (GHV1 und GHV2) werden durch einen Transformator (Trafo-Station) gespeist. Der Gesamtstromverbrauch des Betriebes wurde daher aus der Summe der beiden Hauptverteilungen ermittelt, die an der Trafo-Station erfasst worden sind. An den Gebäudehauptverteilungen wurden jeweils nur Output-Datenreihen (Unterverteilungen und Verbrauchergruppen) erfasst.

Über einen Zeitraum von acht Messtagen wurde das Messequipment (3 Messgeräte zur Wirkleistungsmessung und zusätzliche Messgeräte zur Scheinleistungsmessung) an den drei Hauptverteilungen des Messobjektes installiert. In Summe konnten vier Unterverteilungen und neun Verbrauchergruppen erfasst werden. Dabei musste wie an Standort A aufgrund der Anzahl der Messpunkte und des begrenzten Messequipments eine Priorisierung der zu erfassenden Messpunkte vorgenommen werden.

Im Folgenden wird auf die Besonderheiten und Merkmale dieser Messkampagne eingegangen:

- Ein Teil des Gebäudes stammt aus Firmenanfängen und wurde mit der Zeit erweitert. Dadurch lag keine übersichtliche Dokumentation der allgemeinen Infrastruktur sowie der Elektroinstallationen vor. Die mit der Zeit „gewachsenen“ Elektroinstallationen bieten häufig nur wenig Platz zur Erreichbarkeit der Messpunkte. Dies schränkt die Installation der Messwandler ein.
- Eine Sicherstellung der Spannungsversorgung für mobile Messsysteme ist bei älteren Elektroinstallationen schwieriger, insbes. wenn keine 400V CEE-Steckdose vorhanden ist. Die Platzreserve im Inneren der Elektroinstallationen ist häufig ausgeschöpft und aufgrund veralteter Sicherungstrennschalter ist eine Demontage der Abdeckungen nicht immer möglich. Die Spannungsversorgung kann daher nur unter Berücksichtigung von Sicherheitsmaßnahmen (passende Kleidung und Isolationsmatte) und elektrischer Absicherungen sichergestellt werden und darf nur durch unterwiesenes Personal (Elektrofachkraft) erfolgen.

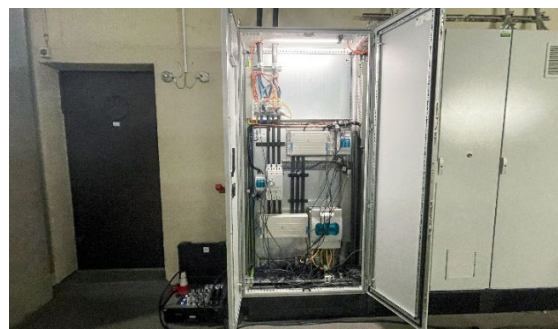
Fallbeispiel Lüftungsanlage

In diesem Fallbeispiel wurde die Unterverteilung einer Lüftungsanlage als Querschnittstechnologie in einem Hochschulgebäude betrachtet. Die Lüftungsanlage versorgt mehrere Hörsäle über einen zentralen Zuluft- und Abluft-Antrieb mit Frischluft und verfügt über Frequenzumrichter zur Drehzahlregelung der Antriebe anhand eines vorgegebenen Solldrucks im Zuluftkanal. Aus dem vorgegebenen Solldruck ergibt sich ein konstanter Volumenstrom im Zuluftkanal. Die Steuerung der Anlage erfolgt über die Gebäudeleittechnik (GLT). Eine CO₂-Regelung ist bisher nicht implementiert.

In den Zu- und Abluftkanälen zu den Hörsälen sind zusätzlich Lüftungsklappen verbaut, sodass potenziell Steuerungselemente zur Belüftung der einzelnen Hörsäle vorhanden sind. Dazu ist jedoch eine Anbindung der Lüftungsklappen an die GLT notwendig. In der folgenden Tabelle werden weitere Informationen zur Messkampagne vorgestellt (s. Tabelle 24, Folgeseite).

Tabelle 24: Vorstellung Messkampagne Fallbeispiel Lüftungsanlage

Fallbeispiel: Lüftungsanlage	
Einordnung:	Bereich
Kategorie:	Querschnittstechnologie
Jahresstromverbrauch:	-
Anzahl Gebäude:	-
Anzahl Messreihen:	1



Messreihe	Messzeitraum	Messlokation	Betrieb/HV	Bereich/UV	Anlage/VG
1	18.10.2022-09.11.2022 22 Messtage	UV	-	1	5

Die elektrische Unterverteilung der Lüftungsanlage wird gemäß der Hierarchie-Ebenen als „Bereich“ deklariert. Demnach liegt der Fokus der Messkampagne auf der Aufschlüsselung der Unterverteilung und Detailanalysen zur Querschnittstechnologie Lüftung. Mit dem Anschluss eines Messgerätes zur Wirkleistungsmessung konnten neben dem Gesamtstromverbrauch der Unterverteilung (Input-Datenreihe) die folgenden Abgänge (Output-Datenreihen) in der Messreihe erfasst werden:

- Zentraler Zuluft-Antrieb
- Zentraler Abluft-Antrieb
- Dezentrale Antriebe zur Belüftung von WCs
- Heizungspumpen
- Steuerspannung des Schaltschranks

Im Folgenden wird auf die Besonderheiten und Merkmale dieser Messkampagne eingegangen:

- Während der Messdurchführung wurde der Fokus unter anderem auf die Änderung systemrelevanter Parameter (z.B. Solldruck) oder Komponenten (z.B. Lüftungsklappen) gelegt, um deren Einfluss auf den Leistungsbezug des Systems zu analysieren. Auf die Ergebnisse der durchgeführten Datenanalysen wird im Analysekonzept eingegangen (s. Kapitel 6.5.5).

Fallbeispiel Kälteanlage

Dieses Fallbeispiel umfasst zwei Kompressionskälteanlagen der Hierarchie-Ebene „Anlagen“ in einem Veranstaltungs- und Eventgebäude. Die Anlagen dienen zur Kühlung einer Eisfläche und werden gemäß der Eistemperatur als Regelgröße gesteuert. Je nach eingestellter Soll-Eistemperatur und Ab-

weichung zur Ist-Eistemperatur laufen die beiden Kälteanlagen abwechselnd beziehungsweise zeitgleich. Die folgende Tabelle fasst die allgemeinen Informationen zur Messkampagne zusammen (s. Tabelle 25).

Tabelle 25: Vorstellung Messkampagne Fallbeispiel Kälteanlage

Fallbeispiel: Kälteanlage	
Einordnung:	Anlage
Kategorie:	Querschnittstechnologie
Jahresstromverbrauch:	-
Anzahl Gebäude:	-
Anzahl Messreihen:	1



Messreihe	Messzeitraum	Messlokation	Betrieb/HV	Bereich/UV	Anlage/VG
1	08.09.2023-12.10.2023 34 Messtage	VG	-	-	2

Im Fokus dieser Messkampagne steht die Erfassung elektrischer Verbraucher auf Anlagen-Ebene. So können Detailanalysen zur Lastcharakteristik der Querschnittstechnologie Kühltälte durchgeführt werden. Die Kälteanlagen wurden dazu über einen Zeitraum von 34 Messtagen im Zuge einer Messreihe erfasst. Dabei kamen zwei Messgeräte zur Wirkleistungsmessung zum Einsatz, an denen jeweils eine Kälteanlage als dreiphasiger Verbraucher angeklemt wurde.

Nachfolgend wird auf die Besonderheiten und Merkmale dieser Messkampagne eingegangen:

- Während der Messdurchführung wurden insbesondere Korrelationen zwischen dem Betriebsverhalten der Kälteanlagen (u.a. Leistungsbezug) und den im Messzeitraum stattgefundenen Events/Veranstaltungen untersucht. Die Ergebnisse dieser Analysen werden im Analysekonzept vorgestellt (s. Kapitel 6.5.6).

5.4.2 Validierung des Messkonzeptes

In diesem Kapitel werden die Erkenntnisse und Lessons Learnt zur Anwendung des Messkonzeptes in den vorgestellten Fallbeispielen zusammenfassend erläutert. Zur besseren Trennung und Kategorisierung wird auf vier wesentliche Punkte eingegangen, die sich einschränkend bzw. limitierend auf die Anwendung des Messkonzeptes ausgewirkt haben. Zusätzlich werden zu diesen Punkten Lösungsansätze aufgezeigt, die im Zuge der Anwendung des Messkonzeptes in den Fallbeispielen erarbeitet wurden.

Einschränkungen bei der Messvorbereitung

Das Hauptziel des Abschnittes Messvorbereitung ist die Schaffung einer soliden Datengrundlage für die Messdurchführung. Eine mangelnde Datengrundlage erschwert vor allem die Identifikation relevanter Unterverteilungen und Verbrauchergruppen in der elektrischen Verteilung und erhöht somit den Aufwand für die Erstellung eines zielgerichteten Messplans. Eine schlechte Datengrundlage liegt insbesondere bei einer fehlenden, fehlerhaften, veralteten oder lückenhaften Dokumentation der Elektroinstallationen vor. Dies betrifft insbesondere ältere, über die Jahre historisch gewachsene Elektroinstallationen. Ohne weitere Informationen kann eine solide Datengrundlage nur eingeschränkt bzw. mit erhöhtem Aufwand erreicht werden. Relevante elektrische Verbraucher werden gegebenenfalls nicht identifiziert.

Lösungsansatz: Zur Nachvollziehbarkeit der dokumentierten Datengrundlage bietet sich zunächst der Kontakt zur Ansprechperson vor Ort an. Diese verfügt häufig über das notwendige Wissen über die Abläufe, Prozesse und elektrischen Verbraucher des Messobjektes. Zum Verständnis über die Elektroinstallationen ist der Austausch mit einer Elektrofachkraft vor Ort oder mit dem zuständigen Elektro-Fachbetrieb hilfreich. Dadurch kann auch der Zeitaufwand für den Abschnitt Messvorbereitung reduziert werden.

Einschränkungen bei der Messdurchführung

Bei der Messdurchführung treten insbesondere während des Anschlusses der Messtechnik an den Elektroinstallationen Einschränkungen auf. Für das Messsystem zur Wirkleistungsmessung muss eine 400 V CEE-Steckdose in unmittelbarer Nähe der Elektroinstallation vorliegen, um den Spannungsabgriff der Messsysteme zu gewährleisten.

Lösungsansatz: Um die technische Einschränkung einer notwendigen CEE-Steckdose zu umgehen, wurde eine eigene Lösung zum Spannungsabgriff der Messkoffer entwickelt (vgl. Kapitel 4.2). Dabei erfolgt unmittelbar an der Elektroinstallation ein Spannungsabgriff mittels Abgreifklemmen. Die Notwendigkeit einer 400 V CEE-Steckdose entfällt somit. Bei älteren Elektroinstallationen kann es dennoch zu Einschränkungen kommen.

Weiterhin kann die Installation der Messwandler aus technischen Gründen eingeschränkt sein. Dies ist unter anderem der Fall, wenn die Elektroinstallationen nicht in geschlossenen Räumen (bspw. auf Fluren oder in einer Halle) liegen. Unter Umständen ist eine Installation der mobilen Messtechnik in der Elektroinstallation dann nicht möglich und die betroffenen Messlokationen können nicht erfasst werden.

Darüber hinaus ist der verfügbare Platz innerhalb der Elektroinstallationen in der Regel begrenzt. Dies gilt insbesondere für ältere elektrische Verteilungen, an denen über die Jahre weitere Unterverteilungen und Verbrauchergruppen angeklemt worden sind. Je nach verwendeten Messwandler ist es daher möglich, dass einzelne Messpunkte aus baulichen Gründen nicht erfasst werden können. Neben dem Alter der Elektroinstallation hat auch die Größe der elektrischen Verteilung einen Einfluss auf den verfügbaren Platz für die Installation der Messwandler. Die Fallbeispiele haben aufgezeigt,

dass die Messwandler grundsätzlich in größeren Elektroinstallationen problemlos angeklemt werden können. Je kleiner die elektrischen Verteilungen bezogen auf die Schaltschrank-Größe sind, desto geringer ist in der Regel auch der verfügbare Platz zur Installation der Messwandler.

Lösungsansatz: Falls in der Elektroinstallation kaum Platz zur Installation der Messwandler vorhanden ist, sollte zunächst geprüft werden, ob nicht kleinere Messwandler (z.B. 125/1A Kabelumbau-Stromwandler oder 80/1A Stromwandler des Messsystems zur Scheinleistungsmessung) verwendet werden können. Darüber hinaus bieten die flexiblen Rogowski-Spulen in vielen Fällen mehr Platz zur Erfassung der einzelnen Phasen eines Messpunktes.

Aufgrund der begrenzten Leitungslängen bei der Verwendung der kabelgebundenen Messwandler (Messsystem zur Wirkleistungsmessung) können bei ungünstiger Positionierung der Messkoffer Probleme bezüglich der Erreichbarkeit der Messpunkte entstehen. Nachträgliche Änderungen hinsichtlich der Positionierung der Messkoffer sind in der Regel aufwendig, zumal es dabei zu Fehlern bei der Messdokumentation (z.B. Verwechslung beim Anschluss der Messwandler an den Messkanälen) kommen kann.

Lösungsansatz: Vor der Installation der Messtechnik sollte die Positionierung der Messsysteme unter Beachtung der Entfernung zu den Messpunkten definiert werden. Nachträgliche Korrekturen des Messaufbaus sollten nur unter besonderer Beachtung der Messkanaleigenschaften durchgeführt werden.

Bei der Anwendung mobiler Messtechnik mit Datenübertragung via Internet kann es zu Problemen bei der Übertragung der Messdaten kommen. Maßgeblich beeinflusst wird die Qualität der Datenübertragung durch das vor Ort verfügbare Mobilfunk-Netz des Internet-Providers sowie dem Ort der Messlokation. Elektroinstallationen befinden sich häufig in durch Stahltüren geschlossenen Räumen im Unter- oder Erdgeschoss des Messobjektes. Dadurch liegen hohe Anforderungen an die Sicherstellung einer stabilen Datenübertragung vor.

Lösungsansatz: Falls die Übertragung der Messdaten aufgrund einer schlechten Internetverbindung nicht gewährleistet werden kann, besteht zusätzlich ein lokaler Datenzugriff auf die Messsysteme. Dieser Datenzugriff kann als Backup für den Export der Messdatensätze genutzt werden (s. Analysekonzept, Kapitel 6.2.2).

Einschränkungen durch die Größe des Messobjektes

Mit zunehmender Größe des betrachteten Messobjektes steigt der Aufwand zur Anwendung des Messkonzeptes. Dies ist insbesondere auf die mit der Größe komplexeren elektrischen Verteilungen und Elektroinstallationen zurückzuführen. Diese müssen im Zuge der Messvorbereitung strukturell aufgeschlüsselt und in der Messdurchführung in einer oder mehreren Messreihen erfasst werden. Zudem steigt mit der Größe der elektrischen Verteilung auch die Anzahl verfügbarer Messpunkte. Aufgrund des limitierten Messequipments können jedoch nicht alle vorhandenen Messpunkte erfasst werden.

Lösungsansatz: Aufgrund der Limitierung des Messequipments und der zugleich hohen Anzahl an Messpunkten wurden Messprioritäten definiert, die einen effizienten Einsatz des verfügbaren Messe-

quipments sicherstellen (vgl. Kapitel 5.1.2). Zusätzlich hat sich die Fokussierung auf Querschnittstechnologien als hilfreich erwiesen, da diese häufig einen größeren Anteil am Gesamtstromverbrauch ausmachen. Eine Absprache mit der Ansprechperson vor Ort und dem zuständigen Elektro-Fachbetrieb kann die Identifikation relevanter Verbrauchergruppen erleichtern.

Die Anwendung des Messkonzeptes auf die Fallbeispiele hat aufgezeigt, dass mit einer hintereinander gestaffelten Durchführung mehrerer Messreihen auch komplexere elektrische Verteilungen aufgeschlüsselt werden können. So ist es trotz des limitierten Messequipments möglich, auch größere öffentliche Gebäude und KMU zu analysieren. Dabei ist jedoch zu beachten, dass mit jeder weiteren Messreihe der zeitliche Aufwand zur Umsetzung der Messkampagne ansteigt.

Einschränkungen durch die Diversität der betrachteten Fallbeispiele

Das Messkonzept wurde bewusst in Fallbeispielen angewendet, die sich zum Teil stark voneinander unterscheiden. Neben der Differenzierung der durchgeführten Fallbeispiele nach dem Jahresstromverbrauch liegen in der Gebäudeanzahl, der Gebäudestruktur und der Gebäudenutzung weitere Unterscheidungsmerkmale.

Bei der Aufschlüsselung der elektrischen Verteilungen wurden einige Aspekte identifiziert, die bei der Entwicklung des Messkonzeptes noch nicht berücksichtigt worden sind. Dazu zählen unter anderem die Entwicklung einer Messplanung unter Berücksichtigung von Erzeugungsanlagen (z.B. einer Photovoltaik-Anlage mit Überschusseinspeisung) sowie die Unterscheidung zwischen Allgemeinversorgungen (UV) und Sicherheitsversorgungen (SV).

Lösungsansatz: Eine Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Fallbeispiele wird durch die Festlegung des Messprinzips sichergestellt (Kapitel 5.1.1). Die systematische Einteilung der Unternehmensstruktur bzw. der elektrischen Verteilung in Hierarchie-Ebenen ermöglicht eine eindeutige Zuweisung und Kategorisierung der erfassten Messpunkte. Dadurch wird eine Grundlage für die folgenden methodischen Abschnitte im Analysekonzept geschaffen (s. Kapitel 6.2). Dies gilt unter anderem für die Aufbereitung der Messdatensätze und die Anwendung standardisierter Datenanalysen.

Einschränkungen durch den Messzeitraum

Der vorgegebene Messzeitraum von mindestens zwei Wochen konnte in zwei Messreihen nicht eingehalten werden. Hintergrund waren unter anderem externe Faktoren wie die Reinigung einer Transformator-Station seitens des Netzbetreibers (Fallbeispiel metallv. Betrieb – Standort B) und der dadurch vorzeitig notwendige Abbau der Messtechnik. Bedingt durch eine kurzfristige Umplanung der gestaffelten Messreihen konnte die zweite Messreihe auch im Fallbeispiel Polizeipräsidium nur über den Zeitraum von einer Woche durchgeführt werden. Der Einfluss des kürzeren Messzeitraums auf die Anwendung der Datenanalysen wird im Zuge des Analysekonzeptes betrachtet (s. Kapitel 6).

5.5 Zwischenfazit: Messkonzept

In diesem Kapitel wurde eine Messmethode zum Einsatz mobiler Messtechnik für Effizienzanalysen in KMU und öffentlichen Gebäuden entwickelt und anhand von sechs in der Praxis durchgeführten Fallbeispielen validiert. Eine Grundlage mit ersten Erkenntnissen und Lessons Learnt zur Entwicklung des Messkonzeptes stellen mehrere, in diversen Messobjekten durchgeführte Pre-Tests dar (vgl. Kapitel 4.4). So konnten erste Erkenntnisse erzielt werden, mobile Messtechnik systematisch zur Effizienzanalyse in KMU und öffentlichen Gebäuden einzusetzen.

Die entwickelte Methodik für das Messkonzept beruht auf der Festlegung des Messprinzips, der Messprioritäten sowie des Messzeitraums:

- Das **Messprinzip** sieht einen Top-Down-Messansatz vor, der eine strukturierte Aufschlüsselung des Stromverbrauchs eines Messobjektes auf Teilbereiche und einzelne Anlagen ermöglicht. Ein wichtiger Schritt ist dabei die systematische Einteilung der Unternehmensstruktur in Hierarchie-Ebenen, die äquivalenten Ebenen in der elektrischen Verteilung zugeordnet werden können. Durch diese Strukturierung der elektrischen Verteilung wird unter anderem eine Vergleichbarkeit von Messkampagnen in unterschiedlichen Fallbeispielen gewährleistet.
- Die **Messprioritäten** umfassen die Skalierung des Messequipments auf mehrere Messsysteme, um einen möglichst effizienten Einsatz der mobilen Messtechnik zu gewährleisten. Darüber hinaus ist bei der Belegung der Messkanäle eine Priorisierung vorzunehmen. Dies soll die Erfassung der relevanten elektrischen Verbraucher eines Messobjektes sicherstellen.
- Der **Messzeitraum** ist ein wichtiger Faktor für das Analysekonzept, da durch die Dauer des Einsatzes der mobilen Messtechnik die verfügbare Datengrundlage für Analysen und Auswertungen definiert wird. Allgemein wird für Kurzzeitmessungen ein Messzeitraum von 2-4 Wochen angestrebt. Ein kürzerer Zeitraum kann zu Einschränkungen bei der Datenauswertung führen. Ein längerer Zeitraum ist in der Praxis unter Aufwand-Nutzen-Aspekten und der Zieldefinition der Messkampagne abzuwägen.

Das Messkonzept ist aus zwei grundlegenden methodischen Abschnitten aufgebaut, die einen effizienten und ordnungsgemäßen Einsatz der mobilen Messtechnik gewährleisten:

- Der Abschnitt **Messvorbereitung** umfasst die notwendigen Arbeitsschritte vor der Messung. Es werden zunächst allgemeine technische Rahmenbedingungen für die Durchführung der Messung definiert.
- Der Abschnitt **Messdurchführung** umfasst die notwendigen Arbeitsschritte während der Messung. Es werden Maßnahmen zur Vermeidung von Messfehlern und zur Sicherstellung eines reibungslosen Ablaufs der Messung festgelegt.

Zur Validierung des entwickelten Messkonzeptes wurden insgesamt **sechs Fallbeispiele** durchgeführt. Um das Messkonzept hinreichend in der Praxis zu testen, unterscheiden sich die Fallbeispiele zum Teil stark voneinander. Die Spannweite reicht von großen Messobjekten mit mehreren Gebäuden

und einer entsprechend komplexen elektrischen Verteilung bis hin zu Detailbetrachtungen einzelner Querschnittstechnologien wie Lüftungs- und Kälteanlagen.

Trotz der Diversität der Fallbeispiele konnte das Messkonzept in allen Messobjekten angewendet werden. Dies verdeutlicht die Flexibilität und den generischen Ansatz, mobile Messtechnik unabhängig von der Branche und der Größe eines Messobjektes, aber auch unabhängig von der Betrachtungsebene (gesamter Betrieb oder Detailbetrachtung eines elektrischen Verbrauchers) einzusetzen. Diese Flexibilität beruht insbesondere auf dem angewendeten Messprinzip (Standardisierte Hierarchie-Ebenen) und den festgelegten Messprioritäten (Skalierung des Messequipments).

Mit dem verwendeten Messequipment können bis zu 24 dreiphasig angeschlossene elektrische Verbraucher parallel erfasst werden. In kleineren Messobjekten war eine Messreihe ausreichend, um die relevanten Stromverbraucher zu identifizieren. Der Stromverbrauch größerer Messobjekte kann durch die Staffelung mehrerer Messreihen aufgeschlüsselt werden. Eine Ergänzung des Messequipments um weitere Messsysteme ist dadurch nicht zwingend notwendig.

In der Praxis treten bei der Anwendung des Messkonzeptes dennoch Einschränkungen auf. Diese Einschränkungen führen unter anderem dazu, dass

- 1) ein erhöhter Aufwand für die Umsetzung der Messkampagne notwendig ist (bspw. bei der Datenbeschaffung für die Messplanung oder der Sicherstellung der Spannungsversorgung),
- 2) Fehler auftreten (bspw. bei einer unvollständigen Datenübertragung oder falsch eingestellten Wandlerfaktoren) oder
- 3) die Installation der mobilen Messtechnik grundsätzlich nicht möglich ist (aufgrund baulicher Gegebenheiten oder limitierten Messequipment).

Die Anwendung des Messkonzeptes in den betrachteten Fallbeispielen zeigt auch Lösungsansätze auf, um die aufgeführten Einschränkungen zu vermeiden bzw. den Einfluss zu minimieren. Somit liegt durch das entwickelte Messkonzept eine Methode vor, um mobile Messtechnik in KMU und öffentlichen Gebäuden systematisch zur Erhebung von Messdaten einzusetzen. Die erhobenen Messdaten gehen aus der Anwendung des Messkonzeptes hervor und sind zugleich Eingangswerte für die im Analysekonzept entwickelten Datenanalysen.

Kapitel 6

Analysekonzept zur systematischen Messdatenauswertung

In diesem Kapitel wird ein systematisches Analysekonzept für Energieverbrauchsdaten basierend auf dem temporären Einsatz mobiler Messtechnik gemäß des Messkonzeptes (Kapitel 6) erarbeitet. Dazu werden zunächst die grundlegenden Aspekte zur Systematisierung des Analysekonzeptes sowie Limitationen für die Auswertung beschrieben. Anschließend wird die Methodik zum Abschnitt „Messdatenauswertung und -analyse“ erläutert. Dabei werden die methodischen Arbeitsschritte bis zum Abschluss einer Messkampagne vorgestellt. Der Datenanalyse-Plan ist integraler Bestandteil dieses Abschnittes und wird basierend auf den Datenanalysen und Berechnungsverfahren entwickelt. Im Fokus dieses Hauptkapitels steht somit die Forschungsfrage: *„Wie kann die Datenauswertung und -analyse vereinfacht und automatisiert werden?“*.

6.1 Analyseansatz

Zur Entwicklung eines systematischen Auswertungsansatzes und standardisierter Datenanalysen muss ein strukturierter Datenzugriff sowie eine Vergleichbarkeit der auszuwertenden Messdatensätze gewährleistet sein. Der entwickelte Prozess zum Datenzugriff und die Maßnahmen für vergleichbare Messdatensätze werden daher in den folgenden Kapiteln vorgestellt.

6.1.1 Festlegung des Datenzugriffs

Der Prozess des Datenzugriffs hängt unter anderem wesentlich von der verwendeten mobilen Messtechnik ab. Dennoch werden die Schritte zum Datenzugriff in Abbildung 11 (s. Folgeseite) schematisch für die beiden ausgewählten Messsysteme dargestellt. Nach der Umwandlung der analogen Sensordaten in digitale Messdaten werden diese über die mobile Datenverbindung auf einen SQL-Server übertragen. Eine stabile Datenübertragung vorausgesetzt kann bereits während einer Messung über die Web-Portale der Hersteller auf die Messdaten zugegriffen werden. Dies erlaubt unter anderem vereinfachte Datenvisualisierungen und Plausibilitäts-Checks während der Messung (vgl. Kapitel

6.3.3). Über eine Datenvisualisierungs-Software (z.B. *Tableau®*) kann darüber hinaus für das Monitoring während einer Messung und den Datenexport auf den Server zugegriffen werden. Schließlich steht als Backup-Lösung auch ein lokaler Datenexport vom Messsystem zur Verfügung.

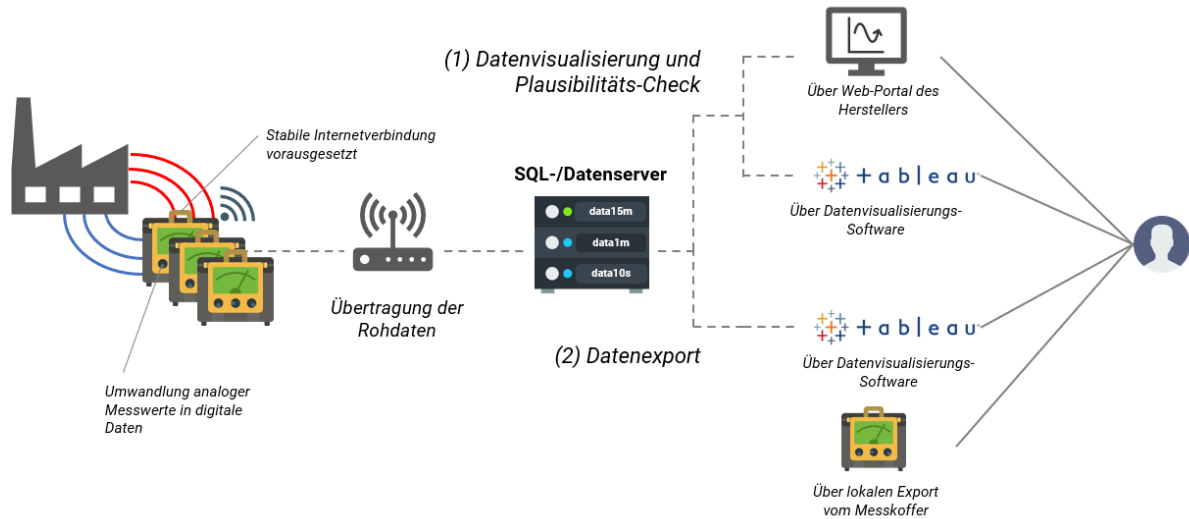


Abbildung 22: Datenzugriff für das Mess- und Analysekonzept

6.1.2 Definition der Messdatensätze

Das Analysekonzept ist unmittelbar mit dem Messkonzept verknüpft, denn die Art und Weise, wie die Messtechnik im Zuge einer Messkampagne eingesetzt wird beeinflusst die vorliegende Datengrundlage für Auswertungen und Analysen. Durch den systematischen Einsatz der Messtechnik wird die elektrische Verteilung in fest definierte Hierarchie-Ebenen aufgeschlüsselt (vgl. Messprinzip, Kapitel 5.1.1). Je Fallbeispiel sind eine oder mehrere Messreihen über den jeweiligen Messzeitraum durchgeführt worden (vgl. Terminologie, Kapitel 5.1.4). Dadurch lässt sich ein direkter Bezug von den im Messkonzept durchgeführten Messreihen zu den Messdatensätzen im Analysekonzept herstellen.

Diese Zusammenhänge sind in Abbildung 23 (s. Folgeseite) schematisch dargestellt. Der Messzeitraum der Messreihe entspricht der Spalte „Zeitstempel“ des Messdatensatzes. Sofern eine Messreihe nur eine Messlokation aufweist, wird aus einer durchgeführten Messreihe ein aufbereiteter Messdatensatz entwickelt. Bei mehreren Messlokalationen werden verschiedene elektrische Verteilungen parallel aufgeschlüsselt. Dementsprechend entsteht aus jeder weiteren Messlokation ein weiterer Messdatensatz. Die Messlokation entspricht in der Regel der Input-Datenreihe des Messdatensatzes. Dabei handelt es sich um die erfasste elektrische Leistung der Zuleitung der elektrischen Verteilung (Haupt- oder Unterverteilung). Die in einer Messreihe erfassten Abgänge einer elektrischen Verteilung stellen jeweils Output-Datenreihen dar und erweitern den Messdatensatz.

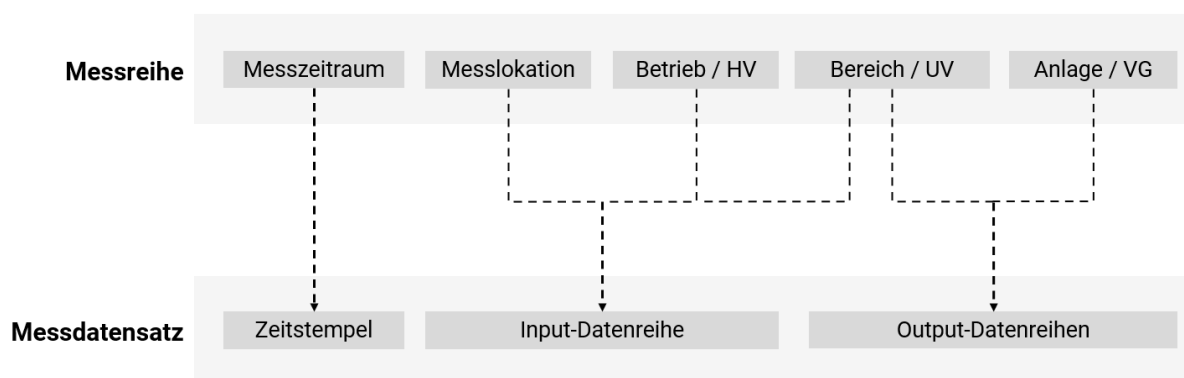


Abbildung 23: Zusammenhang zwischen einer Messreihe und einem Messdatensatz

Unter Berücksichtigung dieser Zusammenhänge ist ein aufbereiteter Messdatensatz einer Messreihe wie folgt formatiert (s. Tabelle 26).

Tabelle 26: Formatierung eines aufbereiteten Messdatensatzes

Zeitstempel	HV _n [kW]	UV _n [kW]	...	VG _n [kW]
t ₁	P _{HV} (t ₁)	P _{UV} (t ₁)	...	P _{VG} (t ₁)
...
t ₂	P _{HV} (t ₂)	P _{UV} (t ₂)	...	P _{VG} (t ₂)

Dabei beschreibt der Zeitstempel den Messzeitraum vom Anschluss der Messtechnik (Zeitpunkt t_1) bis zum Abbau der Messtechnik (Zeitpunkt t_2). Die anderen Spalten enthalten die Input- und Output-Datenreihen der Gesamtwirkleistung⁹ von n erfassten elektrischen Unterverteilungen bzw. Verbrauchergruppen. Die Aufbereitung des Messdatensatzes beinhaltet bereits je Messkanal die berechnete Gesamtwirkleistung der Phasen L1-L3 (vgl. Formel (7) Kapitel 4.2).

6.1.3 Festlegung der Messdatenauflösung

Die Messdatenauflösung bestimmt den Zeitabschnitt, über den das arithmetische Mittel der elektrischen Wirk- bzw. Scheinleistung berechnet wird [107, p. 6]. Je geringer dieser Zeitabschnitt, desto detaillierter kann der Verlauf der elektrischen Leistung abgebildet werden. Mit kleiner werdendem Zeitabschnitt steigen allerdings die Datenmenge und die Anforderungen an den Datenexport und die

⁹ Bei Verwendung des Messsystems zur Scheinleistungsmessung kann nur die Scheinleistung für die Auswertung herangezogen werden (vgl. Kapitel 4.3).

Datenübertragung. Je höher die zeitliche Auflösung ist, desto weniger Informationen können über die Lastcharakteristik und das Betriebsverhalten entnommen werden.

Die Lastgangmessung von Stromzählern in der registrierenden Leistungsmessung (sog. RLM-Lastgangdaten) erfolgt in einem Zeitintervall von 15-min [76, p. 155]. Diese zeitliche Auflösung wird auch zur Verrechnung der Lastspitzen mit dem Leistungspreis herangezogen [136, p. 373]. Aus diesem Grund wird für aufbereitete Messdatensätze standardmäßig eine Messdatenauflösung von 15- min verwendet. Die eingesetzten mobilen Messsysteme erlauben jedoch bei Bedarf auch den Zugriff auf höhere Messdatenaufösungen im Minuten- bzw. Sekunden-Bereich (vgl. Kapitel 4). Abhängig von der erfassten Hierarchie-Ebene der elektrischen Verteilung sowie der Zieldefinition der Messkampagne können daher auch Messdatensätze mit kleinerer zeitlicher Auflösung für Auswertungen herangezogen werden.

6.1.4 Limitation für die Auswertung

Die systematische Messdatenauswertung zur Entwicklung des Analysekonzeptes ist durch einige grundlegende Aspekte eingeschränkt. Auf die wesentlichen Limitationen wird in Tabelle 27 eingegangen.

Tabelle 27: Limitationen für die Auswertung

Limitation	Hintergrund
Messzeitraum	Limitierte Datenmenge für statistisch belastbare und robuste Aussagen Keine Betrachtung saisonaler Einflüsse auf den Stromverbrauch
Datenkonsistenz und Datenaktualität (vgl. [108])	Gegenüber stationärer Messtechnik ist die Datenkonsistenz (Korrektheit gespeicherter Daten) und die Datenaktualität (einmalige Erfassung des Ist-Zustands) eingeschränkt
Externe Einflussfaktoren	Wetter, Temperatur, Jahreszeit, Werks- und Betriebsferien sowie Feiertage können den Stromverbrauch beeinflussen Pandemien und damit zusammenhängende Ausgangssperren können zu gegenüber dem Normalbetrieb abweichendem Verbrauch führen
Betrachtete Fallbeispiele	Limitation hinsichtlich betrachteter Fallbeispiele zur Entwicklung des Analysekonzeptes

Vor dem Hintergrund der Entwicklung des Mess- und Analysekonzeptes müssen diese natürlichen Einschränkungen für die Auswertungsmethode berücksichtigt werden. Die Verlängerung des Messzeitraums ist in der Praxis bspw. unmittelbar mit zusätzlichen Kosten verbunden. Höhere Kosten stehen im Gegensatz zur Anforderung an den entwickelten Ansatz, mit mobiler Messtechnik eine kostengünstige Lösung für gewerbliche und öffentliche Liegenschaften bereitzustellen. Die Datenanalyse und -auswertung muss daher trotz dieser Limitationen systematisch umsetzbar sein und zielführende Ergebnisse liefern.

6.2 Methodik der Messdatenauswertung und -analyse

Der Abschnitt **Messdatenauswertung und -analyse** setzt unmittelbar an den vorherigen Abschnitten des Messkonzeptes an und umfasst die durchzuführenden Schritte bis zum Abschluss einer Messkampagne. Der Abschnitt ist in vier Arbeitsschritte gegliedert, die in den folgenden Kapiteln im Detail vorgestellt werden.

6.2.1 Konzept der Messdatenauswertung und -analyse

Ziel des Abschnittes Messdatenauswertung und -analyse ist es, einen systematischen Ablauf der Arbeitsschritte des Analysekonzeptes zu gewährleisten. Im Folgenden werden die Zielsetzung sowie der Hintergrund zur Umsetzung der einzelnen Arbeitsschritte erläutert (s. Tabelle 28).

Tabelle 28: Arbeitsschritte Messdatenauswertung und -analyse

Arbeitsschritt	Zielsetzung	Hintergrund
Datenexport	Aufbereitung der Daten gemäß Definition standardisierter Messdatensätze und Sicherstellung des Zugriffs auf vollständigen Messdatensatz je Messlokation für den Export	Bereitstellung standardisierter Messdatensätze zur Anwendung der Datenanalysen
Datenbereinigung	Plausibilitätsprüfung der Messwerte anhand von Referenz-Messdaten sowie Identifikation zufälliger und systematischer Messfehler	Vermeidung von Messfehlern und Einordnung der Messdaten ggü. Referenzdaten
Datenanalyse	Anwendung des entwickelten Datenanalyse-Plans als „Werkzeugkasten“ mit standardisierten Datenanalysen	Fallunabhängige, systematische Anwendung des Analysekonzeptes auf standardisierte Messdatensätze
Ausarbeitung Ergebnisse	Konsolidierung und Aufbereitung der Ergebnisse durchgeführter Datenanalysen in Berichts-/ Präsentationsformat	Abschluss der Messkampagne und Kommunikation der Ergebnisse ggü. Ansprechperson

Mit dem Abschluss der Messdurchführung wurden die Messdaten auf einen Server übertragen bzw. lokal gespeichert. Um eine systematische Datenauswertung zu ermöglichen, müssen die Messdaten zunächst aufbereitet und exportiert werden. Dies geschieht im Arbeitsschritt „Datenexport“ (Kapitel 6.2.2). Anschließend erfolgt im Arbeitsschritt „Datenbereinigung“ eine Prüfung der Datenreihen auf systematische und zufällige Messfehler (Kapitel 6.2.3). Der Arbeitsschritt „Datenanalyse“ beinhaltet die Umsetzung der Datenanalysen gemäß dem entwickelten Datenanalyse-Plan (Kapitel 6.2.4). Schließlich endet die Messkampagne mit der „Ausarbeitung der Ergebnisse“ (Kapitel 6.2.5).

Eine detaillierte schematische Darstellung der Methodik und der Arbeitsschritte dieses Abschnittes ist in Abbildung A 3 aufgeführt (s. Anhang). Im Folgenden werden die einzelnen Arbeitsschritte erläutert.

6.2.2 Datenexport

Im Arbeitsschritt „Datenexport“ werden zunächst die Rohdaten einer durchgeführten Messkampagne gesichert. Dies ist bei erfolgreicher Fernübertragung der Messdaten durch die Messgeräte zur Wirkleistungsmessung mit dem Zugriff auf einen SQL-Server möglich. Die Messdaten werden aufbereitet, indem je Messkanal bzw. Phase L1-L3 die Wirkleistungen zu einer Gesamtwirkleistung aufsummiert werden (vgl. Kapitel 4.2). Wird das mobile Messsystem zur Scheinleistungsmessung eingesetzt, ist der Datenexport vom Webportal des Herstellers als csv-Datei möglich.

Generell sollten die Messdaten der durchgeführten Messreihen zunächst als csv- bzw. xls-Datei abgespeichert werden, um für die nachfolgenden Arbeitsschritte „Datenbereinigung“ und „Datenanalyse“ bereitzustehen. Als Standard-Datenexport werden gemäß Kapitel 6.1.3 zunächst die Messdaten über den Zeitraum der gesamten Messkampagne in einer Auflösung von 15-min gesichert. Weitere Datenexporte in höherer zeitlicher Auflösung können bei Bedarf ebenfalls vom Webportal oder SQL-Server exportiert werden. Beim Zugriff auf kürzere zeitliche Messdatenaufösungen (z.B. 10-Sekunden) muss aufgrund der erhöhten Datenmenge ggf. eine Eingrenzung des zu exportierenden Zeitraums erfolgen.

6.2.3 Datenbereinigung

Der zweite Arbeitsschritt umfasst die „Datenbereinigung“. Dieser Schritt dient der Überprüfung der Messdaten auf systematische und zufällige Messfehler sowie nach Möglichkeit deren Korrektur. Falls Lastgangdaten der registrierenden Leistungsmessung (RLM-Lastgangdaten) vorliegen, können diese als Referenzdaten zur Plausibilitätsprüfung für den Gesamtstromverbrauch eines Betriebes bzw. Bereichs im Messzeitraum herangezogen werden. Durch den Vergleich der Messdaten mit der RLM-Messung kann beurteilt werden, ob valide Messdatensätze für die Anwendung der Datenanalysen vorliegen.

RLM-Lastgangdaten können in der Regel dann herangezogen werden, wenn es sich bei der Input-Datenreihe der Messlokation um eine elektrische Hauptverteilung handelt. In diesem Fall sind die folgenden Möglichkeiten zum Vergleich der RLM-Lastgangdaten mit den Messdaten möglich (s. Tabelle 29, Folgeseite).

Tabelle 29: Möglichkeiten zum Vergleich der RLM-Lastgangdaten mit erfassten Messdaten

Vergleich	Hintergrund
Stromverbrauch Referenzwoche (Mo-So) der Messung vs. durchschnittlicher Wochenstromverbrauch historischer RLM-Lastgangdaten	Einordnung, ob der Stromverbrauch während des Messzeitraums dem typischen Stromverbrauch des Messobjektes entspricht oder davon abweicht.
Stromverbrauch Referenzwoche (Mo-So) der Messung vs. Stromverbrauch Referenzwoche der RLM-Lastgangdaten über Messzeitraum	Überprüfung der Messgenauigkeit erfasster Messdaten zur Identifikation von Messfehlern.
Grundlast Input-Datenreihe vs. Grundlast historische RLM-Lastgangdaten	Einordnung, ob die anliegende Grundlast während des Messzeitraums der typischen Grundlast des Messobjektes entspricht oder davon abweicht.
Grundlast Input-Datenreihe vs. Grundlast RLM-Lastgangdaten über Messzeitraum	Überprüfung der Messgenauigkeit erfasster Messdaten zur Identifikation von Messfehlern.
Lastspitzen Input-Datenreihe vs. Lastspitzen historischer RLM-Lastgangdaten	Einordnung, ob die erfassten Lastspitzen während des Messzeitraums den typischen Lastspitzen des Messobjektes entsprechen oder davon abweichen.
Lastspitzen Input-Datenreihe vs. Lastspitzen RLM-Lastgangdaten über Messzeitraum	Überprüfung der Messgenauigkeit erfasster Messdaten zur Identifikation von Messfehlern und der Zeitsynchronität zwischen RLM-Lastgangdaten und Messdaten

Sollten beim Vergleich der Messdaten mit RLM-Lastgangdaten hohe Abweichungen auftreten, sind die Ursachen dafür zu prüfen. Einflussparameter für Abweichungen können beispielsweise eine variiierende Auftragslage, durchgeführte Effizienzmaßnahmen oder systematische Messfehler wie die Einstellung eines fehlerhaften Wandlerfaktors sein.

Weiterhin ist je erfasster Hierarchie-Ebene ein Vergleich der Summe des Stromverbrauchs erfasster Output-Datenreihen mit der Input-Datenreihe sinnvoll. Auch Auffälligkeiten in den einzelnen Datenreihen wie bspw. Nullwerte oder doppelte Messwerte müssen als zufällige Messfehler durch Visualisierung der Datenreihen identifiziert und ggf. korrigiert werden (vgl. Messfehler, Kapitel 4.2.3).

6.2.4 Datenanalyse

Der Arbeitsschritt „Datenanalyse“ umfasst die Anwendung verschiedener Analyseformen auf die Messdatensätze. Zur Strukturierung dieses Arbeitsschrittes dient die Entwicklung eines standardisierten Datenanalyse-Plans. Dieser stellt einen „Werkzeugkasten“ für die Anwendung der Analysen und wird in Kapitel 6.4 ausgearbeitet. Die im Zuge des Messkonzeptes aufgesetzte Zieldefinition einer Messkampagne kann auf die Durchführung einzelner Analyseformen hindeuten. Wird beispielsweise die Identifikation von Grundlast-Verbrauchern vorab als Ziel festgehalten, kann dies im Zuge der Datenanalyse unmittelbar aufgegriffen werden.

Darüber hinaus ist in diesem Abschnitt zu klären, ob die Durchführung einer weiteren Messreihe in der Unternehmensstruktur notwendig ist. Dies könnte zum Beispiel durch Ergebnisse aus der ersten Messreihe motiviert sein, sofern Detailanalysen nur anhand weiterer Messreihen umgesetzt werden können. Die Durchführung weiterer Messreihen erhöht jedoch den Aufwand einer Messkampagne.

Das Mess- und Analysekonzept ist daher standardmäßig auf einen Iterationsschritt zur Erhebung und Auswertung von Messdaten festgelegt. Aufwand und Nutzen zur Umsetzung weiterer Messreihen sollten daher für den individuellen Fall abgewogen werden. Als Indikatoren zur Durchführung weiterer Messreihen können auch statistische Parameter zur Beurteilung des Lastverhaltens der erfassten Datenreihen herangezogen werden.

6.2.5 Ausarbeitung Ergebnisse

In diesem Arbeitsschritt werden die Ergebnisse der Messkampagne in Form eines Berichts oder einer Präsentation ausgearbeitet und zusammengefasst. Anschließend erfolgt die Präsentation der Ergebnisse ggü. der Ansprechperson des Messobjektes. Falls seitens der Ansprechperson Rückfragen oder Unklarheiten bestehen, sollten diese unmittelbar bzw. durch weitere Detailanalysen geklärt werden (vgl. Abbildung A 3, Anhang).

Mit diesem Arbeitsschritt ist die Messkampagne abgeschlossen.

6.3 Berechnungsverfahren für statistische Parameter

In diesem Kapitel werden Berechnungsverfahren für statistische Parameter und Indikatoren hergeleitet, die für die Anwendung der standardisierten Datenanalysen relevant sind. Die Parameter können zum einen Indikatoren zur Durchführung bestimmter Detailanalysen sein. Zum anderen beschreiben die Parameter auch die Lastcharakteristik und stellen somit eine Grundlage zur schnellen Identifikation und Beschreibung auffälliger Datenreihen dar.

Kapitel 6.3.1 beinhaltet zunächst die Grundlagen der Lastprofilbeschreibung. Dabei wird unter anderem auf Begrifflichkeiten und Definitionen eingegangen, die für die Beschreibung der Analysen und deren Anwendung an den Fallbeispielen wichtig sind. Anschließend werden die Berechnungsverfahren zur Beschreibung und Beurteilung der Lastprofil-Charakteristik beschrieben (Kapitel 6.3.2-6.3.7). Dabei wird je Berechnungsverfahren zunächst der theoretische Ansatz erläutert. Anschließend erfolgt die empirische Herleitung der zugehörigen Parameter und Indikatoren sowie die Umsetzung anhand praktischer Anwendungsbeispiele.

Die folgenden Berechnungsverfahren werden nachfolgend vorgestellt:

- Einteilung Ruhezeit- und Betriebszeitfenster (Kapitel 6.3.2)
- Leistungsspektrum (Kapitel 6.3.3)
- Grundlast und Grundlast-Faktor (Kapitel 6.3.4)
- Spitzenlast-Differenz und Lastspitzen-Faktor (Kapitel 6.3.5)
- Dynamische Laständerung (Kapitel 6.3.6)
- Streuung an diskreten Zeitwerten (Kapitel 6.3.7)

6.3.1 Grundlagen der Lastprofilbeschreibung

Lastprofile werden in der Energieversorgung unter anderem zur Bedarfsprognose, zur Planung und Auslegung von Energieerzeugungsanlagen, zur Beschaffung von Strom, Wärme und Gas sowie zur Identifikation von Einsparpotenzialen verwendet. Das Lastprofil bzw. die Lastgangkurve bezeichnet dabei den zeitlichen Verlauf der abgenommenen Leistung für Strom, Wärme oder Gas über einen definierten Zeitraum (Jahr, Monat, Woche, Tag) [137].

An dieser Stelle wird der Fokus auf Lastprofile gelegt, die die abgenommene elektrische Wirkleistung über die Zeit darstellen. Eine Übertragbarkeit auf Lastprofile anderer Messgrößen oder Energieträger (bspw. Wärmemengenmessung) ist grundsätzlich möglich. Abbildung 24 stellt beispielhaft das Lastprofil der elektrischen Wirkleistung eines Bürogebäudes über den Zeitraum von einer Woche (Referenzwoche Montag-Sonntag) dar. Die Messdatenauflösung beträgt 15-min.

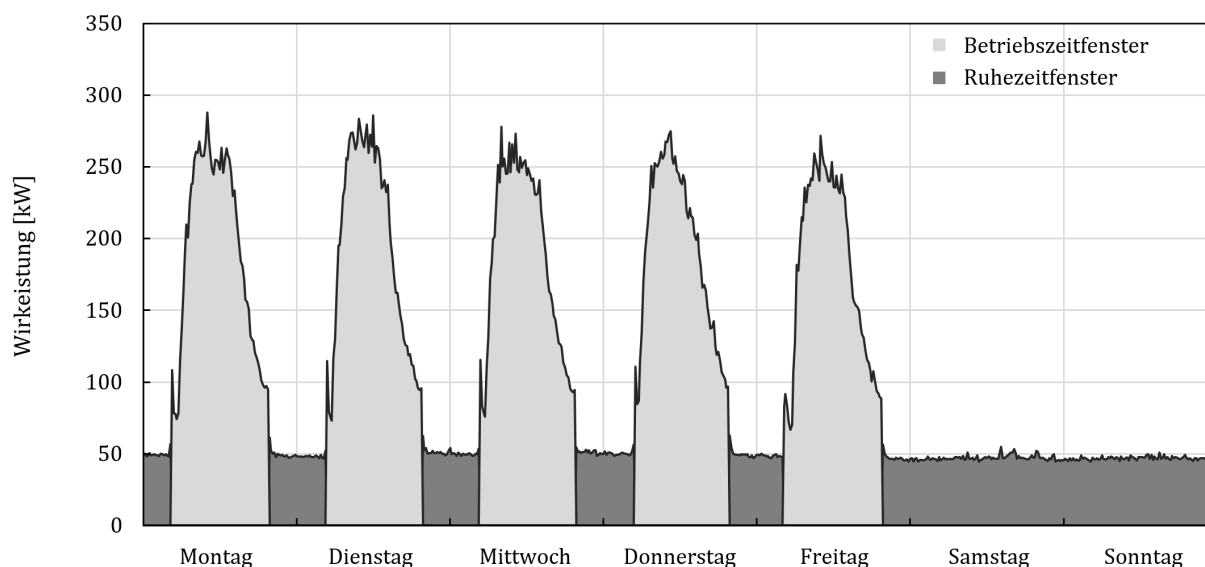


Abbildung 24: Lastprofil elektrische Wirkleistung eines Bürogebäudes (Referenzwoche)

Die Last setzt sich aus elektrischen Verbrauchern zusammen, die zum Zeitpunkt der Messung elektrische Energie beziehen. Im Laufe der Zeit liegt eine unterschiedlich hohe Last an, da die Anzahl sowie die Leistung der elektrischen Verbraucher über die Zeit variiert. Die Fläche unterhalb der Lastgangkurve entspricht dem Stromverbrauch [kWh], der als Produkt aus Leistung und Zeit berechnet wird [124].

Die tageszeitlichen Schwankungen hängen unter anderem von Wochentagen ab und können auch durch saisonale Einflussfaktoren beeinträchtigt werden (z.B. Temperatur, Sonneneinstrahlung) [137]. In Abbildung 24 ist deutlich der Anstieg der Last über den Tagesverlauf an Wochentagen (Montag bis Freitag) erkennbar, während am Wochenende (Samstag und Sonntag) kein Anstieg der Last erfolgt. Lastprofile können daher grundsätzlich in Betriebstage und Ruhetage eingeteilt werden.

Anhand der Zeitpunkte der Laständerungen können Schlussfolgerungen zu den Nutzungszeiten eines Gebäudes gezogen werden. Außerhalb der Nutzungszeiten – in diesem Beispiel nachts und am Wochenende – liegt eine nahezu konstante Last an. Lastprofile können daher grundsätzlich in zwei Zeitfenster eingeteilt werden (vgl. Abbildung 24):

- **Betriebszeitfenster:** Das Betriebszeitfenster ist durch die Last bzw. das Lastniveau gekennzeichnet, welches zu den Nutzungszeiten eines Gebäudes oder eines elektrischen Verbrauchers anliegt. Dieses Lastniveau wird im Folgenden auch als **Betriebslastniveau** bezeichnet.
- **Ruhezeitfenster:** Das Ruhezeitfenster ist durch die Last bzw. das Lastniveau gekennzeichnet, welches außerhalb der Nutzungszeiten eines Gebäudes oder eines elektrischen Verbrauchers anliegt. Dieses Lastniveau wird im Folgenden auch als **Grundlastniveau** bezeichnet.

Lastprofile können darüber hinaus nach den charakteristischen Merkmalen Grundlast, Mittellast, Spitzenlast sowie Lastspitzen charakterisiert werden [137]. In Abbildung 25 werden diese Begrifflichkeiten anhand einer Dauerlinie dargestellt. In einer Dauerlinie sind die Leistungswerte einer Lastgangkurve nach ihrer Größe absteigend sortiert (vgl. [66]).

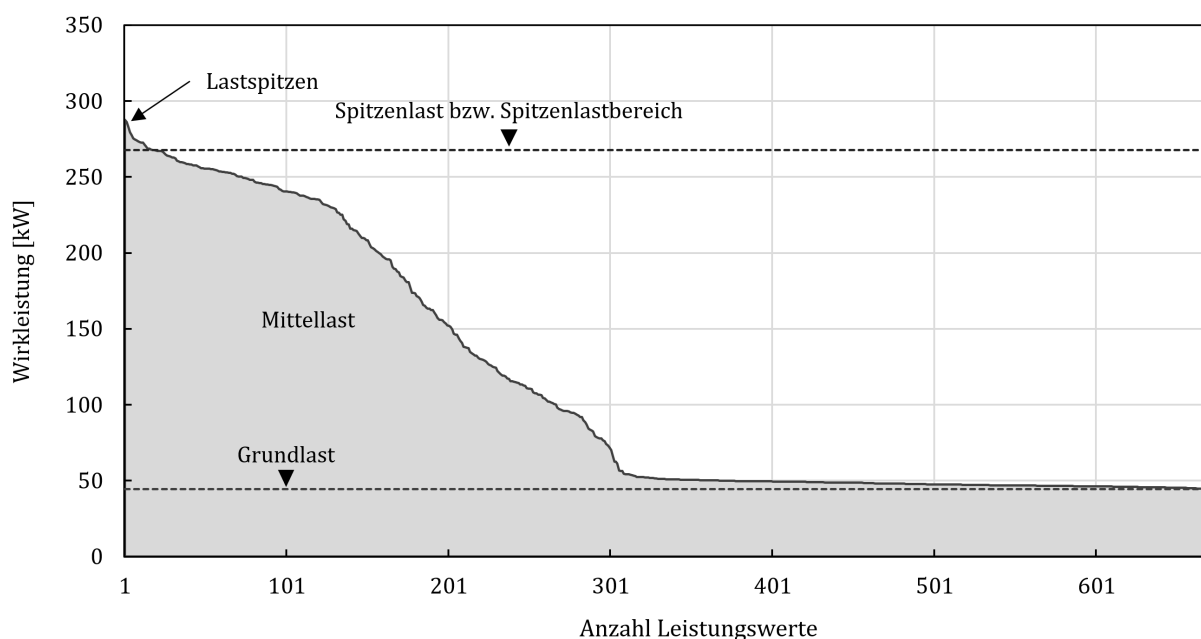


Abbildung 25: Dauerlinie Lastprofil Bürogebäude (Referenzwoche)

Die **Grundlast** wird in der Literatur in der Regel als die minimale, permanent anliegende Last in einem Energiesystem beschrieben (Einheit elektrische Leistung, [W] bzw. [kW]) [138]. In den folgenden Abschnitten und bei der Anwendung der Analysen wird abweichend von der Literatur eine **berechnete, mittlere Grundlast** verwendet und hergeleitet (s. Kapitel 6.3.4). Die Grundlast ist grundsätzlich die benötigte Last für den Betrieb eines Gebäudes außerhalb der Nutzungszeiten. Daher ist die Grundlast in einem Lastprofil vor allem im Ruhezeitfenster erkennbar (vgl. Abbildung 24). Im Lastprofil eines Gebäudes wird die Grundlast in der Regel durch elektrische Verbraucher mit hohen Vollbenutzungsstunden (Server, Kältetechnik, Standby-Verbrauch) verursacht [66]. In Lastprofilen

elektrischer Einzelverbraucher (z.B. Motor) handelt es sich bei der Grundlast in der Regel um den Standby-Betrieb des elektrischen Verbrauchers.

Die **Spitzenlast** bzw. der **Spitzenlastbereich** beschreibt den Leistungsbereich einer Lastgangkurve, an dem eine besonders hohe Last anliegt (Einheit elektrische Leistung, [W] bzw. [kW], vgl. [138]). In der Literatur wird die Spitzenlast häufig durch die Berechnung des Leistungswertes definiert, der die oberen 2,5% aller Leistungswerte einer Lastgangkurve enthält [109]. **Lastspitzen** sind kurzfristige Maximalwerte einer Lastgangkurve und definieren die höchsten Leistungswerte des Spitzenlastbereichs (s. Abbildung 25). Lastspitzen werden häufig durch den gleichzeitigen Betrieb mehrerer leistungsintensiver elektrischer Verbraucher hervorgerufen [66].

Die **Mittellast** deckt entsprechend der o.g. Definitionen den Leistungsbereich zwischen der Grundlast und der Spitzenlast ab [137]. Übertragen auf das Beispiel des Bürogebäudes enthält die Mittellast vor allem die Leistungswerte unterhalb des Spitzenlastbereichs, die in der Nutzungszeit bzw. im Betriebszeitfenster des Gebäudes liegen.

6.3.2 Einteilung Ruhezeit- und Betriebszeitfenster

Wie bereits in Kapitel 6.3.1 erläutert, können Lastprofile in ein Ruhezeit- sowie ein Betriebszeitfenster eingeteilt werden. Zur Automatisierung dieses Schrittes wird nachfolgend ein Berechnungsverfahren vorgestellt. Dieser initiale Schritt ist unter anderem notwendig, um eine Grundlage zur Berechnung weiterer statistischer Parameter zu schaffen. Darüber hinaus kann das Lastverhalten zwischen Ruhezeit- und Betriebszeitfenster variieren. Somit müssen einige statistische Parameter zwangsläufig für beide Zeitfenster berechnet werden.

Empirische Herleitung

In Abhängigkeit von der Dauer des Messzeitraums besteht eine gemäß dem Messkonzept erfasste und aufbereitete Datenreihe aus x_n Einzelwerten der elektrischen Wirk- bzw. Scheinleistung (nachfolgend Leistungswerte) in einer Messdatenauflösung von 15-min (vgl. Kapitel 6.1.2). Zur automatisierten Einteilung der gesamten Datenreihe in ein Ruhezeit- und Betriebszeitfenster sind zwei Iterationsschritte notwendig.

Im **ersten Iterationsschritt** erfolgt zunächst eine grobe Einteilung der Leistungswerte in ein Ruhezeit- und Betriebszeitfenster anhand eines berechneten Schwellenwertes P_s [kW]. Vor dem Hintergrund der Diversität der Lastgangkurven und zur Sicherstellung von robusten Parametern erfolgt die Berechnung des Schwellenwertes P_s abhängig von dem auf die Maximalleistung x_{peak} bezogenen Median \tilde{x} einer Datenreihe (8):

$$P_{S1} = \begin{cases} \frac{x_{peak}}{2} & \text{falls } \frac{\tilde{x}}{x_{peak}} < u \\ \tilde{x}_{0,05} + \frac{\tilde{x}_{0,975} - \tilde{x}_{0,05}}{2} & \text{falls } u \leq \frac{\tilde{x}}{x_{peak}} \leq o \\ \tilde{x} & \text{falls } \frac{\tilde{x}}{x_{peak}} > o \end{cases} \quad (8)$$

P_{S1}	Schwellenwert erster Iterationsschritt [kW]
x_{peak}	Maximalleistung der Datenreihe [kW]
\tilde{x}	Median der Datenreihe [kW]
$\tilde{x}_{0,05}$	0,05-Quantil der Datenreihe (Grundlastbereich) [kW]
$\tilde{x}_{0,975}$	0,975-Quantil der Datenreihe (Spitzenlastbereich) [kW]
u	Unterer Grenzwert [-]
o	Oberer Grenzwert [-]

Die Fallunterscheidung anhand des auf die Maximalleistung bezogenen Medians wird gewählt, da der Median die Leistungswerte einer Datenreihe in zwei gleich große Hälften teilt. Dabei sind mindestens 50% der Leistungswerte kleiner oder gleich dem Median und mindestens 50% der Leistungswerte größer oder gleich dem Median (50%-Trennmarke) [139]. Zur Fallunterscheidung wird das Verhältnis des Medians \tilde{x} der Datenreihe zur aufgetretenen Maximalleistung x_{peak} gebildet. Dabei liegt ein Wertebereich von $0 < \frac{\tilde{x}}{x_{peak}} < 1$ vor. Die Fallunterscheidung erfolgt anhand eines unteren Grenzwertes u und eines oberen Grenzwertes o . Diese Grenzwerte wurden empirisch anhand von $n=108$ im Rahmen der Fallbeispiele erfassten Datenreihen hergeleitet und wie folgt festgelegt:

- **Unterer Grenzwert u :** Der untere Grenzwert beträgt $u = 0,05$. Der Median ist in diesem Fall viel kleiner als die aufgetretene Maximalleistung der Datenreihe. 50% der Leistungswerte der Datenreihe sind daher deutlich kleiner als die aufgetretene Maximalleistung.
- **Oberer Grenzwert o :** Der obere Grenzwert beträgt $o = 0,6$. Der Median liegt demnach näher an der aufgetretenen Maximalleistung der Datenreihe. 50% der Leistungswerte der Datenreihe liegen daher nahe an der aufgetretenen Maximalleistung.

Mit der Berechnung des Grund- und Spitzenlastbereichs (vgl. Formel (8)) werden zwei weitere wichtige Faktoren für die Fallunterscheidung eingeführt. Grundlast- und Spitzenlastbereich werden anhand der Berechnung von Quantilen ermittelt. Das p -Quantil \tilde{x}_p ($0 < p < 1$) trennt dabei die $p \times 100\%$ der kleinsten Leistungswerte von den übrigen Leistungswerten der Datenreihe [139].

- Der **Grundlastbereich** $\tilde{x}_{0,05}$ trennt die 5% der kleinsten Leistungswerte von den übrigen Leistungswerten der Datenreihe. Dieser Kennwert dient zur groben Erfassung der in der Datenreihe anliegenden Grundlast. In der Literatur wird für die Berechnung des Grundlastbereichs auch das 0,025-Quantil einer Datenreihe bestimmt (vgl. [140]). Allerdings ist der Messzeitraum der in dieser Arbeit betrachteten Datenreihen deutlich kürzer. Mit dem 0,025-Quantil werden daher häufig Leistungswerte deutlich unterhalb der tatsächlich anliegenden Grundlast erfasst. Vor diesem Hintergrund wird der Grundlastbereich mit dem 0,05-Quantil ermittelt.
- Der **Spitzenlastbereich** $\tilde{x}_{0,975}$ trennt die 97,5% der kleinsten Leistungswerte von den übrigen Leistungswerten der Datenreihe. Dieser Kennwert dient zur Erfassung des Spitzenlastbereichs der Datenreihe (vgl. Kapitel 6.3.1) und orientiert sich an Literaturwerten (vgl. [109, 140]).

Dadurch ergibt sich für die erfassten Datenreihen die in Tabelle 30 aufgezeigte Fallunterscheidung:

Tabelle 30: Fallunterscheidung zur Ermittlung des Schwellenwertes (erster Iterationsschritt)

Fallunterscheidung	Erläuterung
$\frac{\tilde{x}}{x_{peak}} < 0,05$	<p>Der Median \tilde{x} der Datenreihe ist kleiner als 5% der im Messzeitraum aufgetretenen Maximalleistung x_{peak}. Dies deutet auf eine Datenreihe mit einer geringen bzw. keiner anliegenden Grundlast und kurzer Nutzungszeit (Betriebszeitfenster) hin.</p> <p>Der Schwellenwert P_{S1} wird für diesen Fall wie folgt definiert: P_{S1} liegt bei 50% der aufgetretenen Maximalleistung x_{peak} (vgl. Formel (8)).</p>
$0,05 \leq \frac{\tilde{x}}{x_{peak}} \leq 0,6$	<p>Der Median \tilde{x} der Datenreihe liegt im Leistungsbereich von 5- 60% der im Messzeitraum aufgetretenen Maximalleistung x_{peak}. Dies deutet auf eine Datenreihe mit einer erkennbaren Grundlast und Betriebslast hin.</p> <p>Der Schwellenwert P_{S1} wird für diesen Fall wie folgt definiert: P_{S1} liegt zwischen dem Grundlastbereich $\tilde{x}_{0,05}$ und dem Spitzenlastbereich $\tilde{x}_{0,975}$ (vgl. Formel (8)).</p>
$\frac{\tilde{x}}{x_{peak}} > 0,6$	<p>Der Median \tilde{x} der Datenreihe ist größer als 60% der im Messzeitraum aufgetretenen Maximalleistung x_{peak}. Dies deutet auf eine Datenreihe mit hoher Grundlast und langer Nutzungszeit (Betriebszeitfenster) hin.</p> <p>Der Schwellenwert P_{S1} wird für diesen Fall wie folgt definiert: P_{S1} entspricht dem Median \tilde{x} der Datenreihe (vgl. Formel (8)).</p>

Die Leistungswerte $x_i > P_{S1}$ werden nach dem ersten Iterationsschritt dem Betriebszeitfenster (BZ1) zugeordnet. Nachfolgend werden diese Leistungswerte als $x_{i,BZ1}$ bezeichnet. Für alle anderen Leistungswerte $x_i \leq P_{S1}$ erfolgt nach dem ersten Iterationsschritt eine Zuordnung zum Ruhezeitfenster (RZ1). Diese Leistungswerte werden nachfolgend als $x_{i,RZ1}$ bezeichnet.

Im **zweiten Iterationsschritt** erfolgt eine präzisere Eingrenzung der Leistungswerte $x_{i,RZ1}$ im Ruhezeitfenster. Dazu wird ein weiterer Schwellenwert P_{S2} definiert, der auf die Leistungswerte des Ruhezeitfensters $x_{i,RZ1}$ angewendet wird. Der Schwellenwert P_{S2} wird wie folgt berechnet (9):

$$P_{S2} = \tilde{x}_{RZ1} + \frac{\sigma_{RZ1}}{2} \quad (9)$$

P_{S2}	Schwellenwert zweiter Iterationsschritt [kW]
\tilde{x}_{RZ1}	Median Leistungswerte $x_{i,RZ1}$ [kW]
σ_{RZ1}	Standardabweichung Leistungswerte $x_{i,RZ1}$ [kW]

Dabei weist die Standardabweichung die durchschnittliche Abweichung der Leistungswerte $x_{i,RZ1}$ vom arithmetischen Mittel aus [139] (10):

$$\sigma_{RZ1} = \sqrt{\frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n x_{i,RZ1} - \bar{x}_{RZ1}} \quad (10)$$

σ_{RZ1}	Standardabweichung Leistungswerte $x_{i,RZ1}$ [kW]
$x_{i,RZ1}$	Leistungswerte Ruhezeitfenster (RZ1) [kW]
\bar{x}_{RZ1}	Arithmetisches Mittel Ruhezeitfenster (RZ1) [kW]

Das arithmetische Mittel ist ein Durchschnittswert, bei dem die Summe der Leistungswerte auf die Anzahl der Leistungswerte bezogen wird [139] (11):

$$\bar{x}_{RZ1} = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n x_{i,RZ1} \quad (11)$$

\bar{x}_{RZ1}	Arithmetisches Mittel Ruhezeitfenster (RZ1) [kW]
$x_{i,RZ1}$	Leistungswerte Ruhezeitfenster (RZ1) [kW]

Der Schwellenwert P_{S2} wird demnach aus dem Median der Leistungswerte $x_{i,RZ1}$ und der Addition eines Leistungswertes in Form der Standardabweichung $\sigma_{RZ1}/2$ berechnet. Der Median wird an dieser Stelle statt dem arithmetischen Mittel verwendet, da dieser unempfindlicher gegenüber Ausreißern ist [139]. Diese Ausreißer – bspw. die hohen Leistungswerte unmittelbar unterhalb des Schwellenwertes P_{S1} – sollen den Schwellenwert P_{S2} möglichst wenig beeinflussen.

Die Addition eines Leistungswertes in Form der Standardabweichung hat den folgenden Hintergrund: Wenn der Schwellenwert gleich dem Median \bar{x}_{RZ1} der Datenreihe ist, wäre aufgrund der natürlichen Streuung der Leistungswerte im Ruhezeitfenster keine eindeutige Einteilung in ein Ruhezeit- und Betriebszeitfenster möglich. Daher muss der Schwellenwert P_{S2} größer als der Median \bar{x}_{RZ1} der Datenreihe sein. Die Standardabweichung gilt als Maß für die Streuung der Leistungswerte um das arithmetische Mittel (vgl. Formel (10)).

Der Schwellenwert P_{S2} wird somit unter Berücksichtigung der Streuung der Leistungswerte im Ruhezeitfenster RZ1 berechnet. Bei einer höheren Streuung ergibt sich automatisch ein höherer Schwellenwert P_{S2} . Basierend auf der empirischen Herleitung anhand von $n=108$ Datenreihen wird eine halbe Standardabweichung ($\sigma_{RZ1}/2$) addiert. Die Leistungswerte $x_{i,RZ1}$ können dadurch eindeutig dem Ruhezeit- oder Betriebszeitfenster zugeordnet werden. Bei der Addition eines geringeren Leistungswertes (z.B. $\sigma_{RZ1}/3$ oder $\sigma_{RZ1}/4$) wäre eine eindeutige Trennung der beiden Zeitfenster nicht gegeben. Auch ein zu hoch liegender Schwellenwert, wie es bei der Addition einer vollen Standardabweichung σ_{RZ1} der Fall wäre, wird durch die Verwendung von $\sigma_{RZ1}/2$ vermieden.

Die Leistungswerte $x_{i,RZ1} < P_{S2}$ werden nun dem Ruhezeitfenster nach dem zweiten Iterationsschritt (RZ2) zugeordnet. Nachfolgend werden diese Leistungswerte als $x_{i,RZ2}$ bezeichnet. Für alle anderen Leistungswerte $x_{i,RZ1} \geq P_{S2}$ erfolgt nach dem zweiten Iterationsschritt eine Zuordnung zum Betriebs-

zeitfenster (BZ2). Diese Leistungswerte werden nachfolgend als $x_{i,BZ2}$ bezeichnet. Die Leistungswerte x_i der ursprünglichen Datenreihe sind nun eindeutig entweder dem Ruhezeitfenster RZ2 oder ein Betriebszeitfenster BZ2 zugeordnet.

Anwendungsbeispiel

Die Ergebnisse der Einteilung einer Datenreihe in ein Ruhezeit- und Betriebszeitfenster werden beispielhaft anhand der Lastgangkurve eines Bürogebäudes über den Zeitraum einer Referenzwoche aufgezeigt (s. Abbildung 26). Anhand der Abbildung ist zu erkennen, dass dem Ruhezeitfenster RZ2 (dunkelgrauer Bereich) die Leistungswerte außerhalb der Nutzungszeiten des Gebäudes zugeordnet werden (v.a. nachts und am Wochenende).

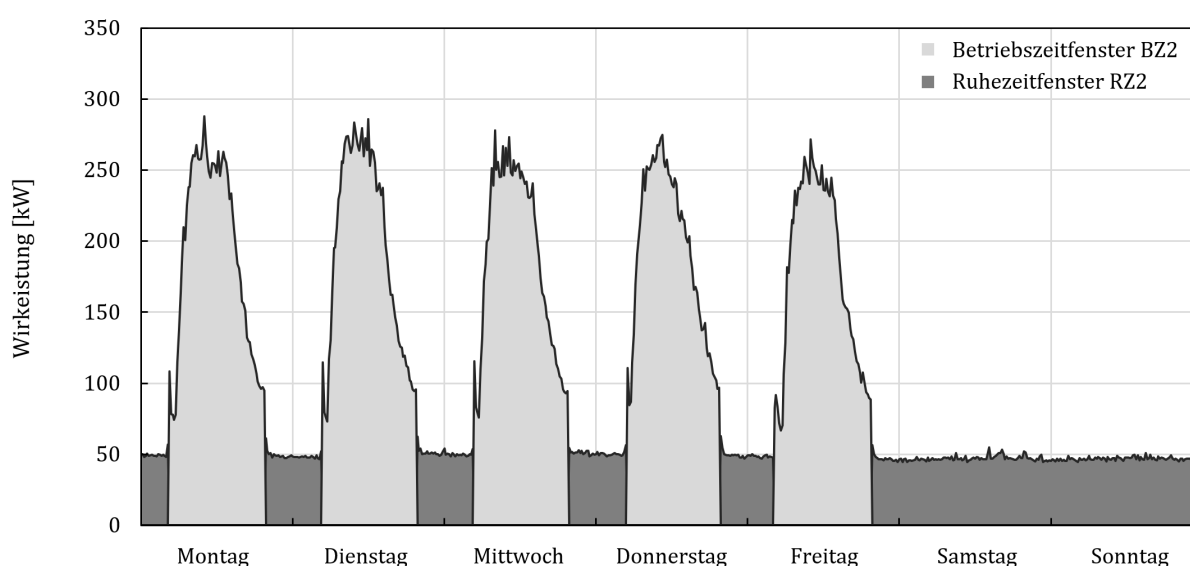


Abbildung 26: Einteilung einer Datenreihe in Ruhezeit- und Betriebszeitfenster

Das Ruhezeit- und Betriebszeitfenster kann durch die folgenden Parameter näher beschrieben werden (s. Tabelle 31):

Tabelle 31: Parameter zur Beschreibung des Ruhezeit- und Betriebszeitfensters

Parameter	Ruhezeitfenster (RZ2)	Betriebszeitfenster (BZ2)
Stromverbrauch der Datenreihe E [kWh]	E_{RZ2} [kWh]	E_{BZ2} [kWh]
Stromverbrauchs-Anteil am Gesamtstromverbrauch der Datenreihe e [%]	e_{RZ2} [%]	e_{BZ2} [%]
Zeitlicher Anteil am Gesamtzeitraum t [%]	t_{RZ2} [%]	t_{BZ2} [%]

Angewendet auf die Datenreihe des Bürogebäudes ergeben sich die in Tabelle 32 (s. Folgeseite) aufgezeigten Werte. Der Stromverbrauch des Ruhezeitfensters außerhalb der Nutzungszeiten des Bürogebäudes macht demnach bezogen auf die Referenzwoche etwa $\frac{1}{4}$ des Gesamtstromverbrauchs aus.

Tabelle 32: Parameter zur Beschreibung des Ruhezeit- und Betriebszeitfensters
(Beispiel Referenzwoche Bürogebäude)

Parameter	Ruhezeitfenster (RZ2)	Betriebszeitfenster (BZ2)
E [kWh]	4.465	14.332
e [%]	24	76
t [%]	55	45

Der Anteil des jeweiligen Zeitfensters am gesamten Messzeitraum kann Aufschluss über die Betriebs- bzw. Nutzungszeiten des Gebäudes geben. Für Bürogebäude wird häufig eine Nutzungszeit von 4.000 h/a bzw. 45% zeitl. Anteil pro Jahr angenommen (vgl. [141]). Dies stimmt gut mit den in Tabelle 32 angegebenen Werten überein.

6.3.3 Leistungsspektrum

Das Leistungsspektrum ist ein Berechnungsverfahren zur Ermittlung der Häufigkeitsverteilung der Leistungswerte einer Datenreihe. Anhand des Leistungsspektrums ist es möglich, die Lastniveaus einer Datenreihe zu identifizieren und zu beschreiben. Dadurch sind Aussagen über die Anzahl der Lastniveaus sowie die Lage und „Dichte“ der Lastniveaus möglich. Dieses Berechnungsverfahren kann unter anderem zur allgemeinen Einordnung der Datenreihen hinsichtlich des Lastverhaltens sowie für die Anwendung weiterer Berechnungsverfahren relevant sein.

Empirische Herleitung

Um das Leistungsspektrum einer Datenreihe zu berechnen, erfolgt zunächst eine Normierung der Datenreihe mit den Leistungswerten x_i auf die im Messzeitraum aufgetretene Maximalleistung x_{peak} . Dadurch ergibt sich eine Datenreihe mit normierten Leistungswerten x_i^* , die im Wertebereich $0 < x_i^* \leq 1$ liegen.

Um das Leistungsspektrum zu erstellen, müssen die Leistungswerte der Datenreihe x_i^* in p gleich große Intervalle (Leistungsklassen) ($x'_{k-1}; x'_k$] eingeteilt werden. Die Anzahl der Leistungsklassen wird auf $p=20$ festgelegt. Der Wertebereich von 0-1 teilt sich demnach in 20 Leistungsklassen gleicher Breite auf. Die Klassenbreite beträgt demnach 0,05 bzw. 5% des gesamten Leistungsspektrums. So wird gewährleistet, dass Lastniveaus hinreichend genau identifiziert und beschrieben werden können. Durch die Wahl kleinerer Klassenbreiten würde das Leistungsspektrum zwar detaillierter ausfallen, allerdings wären die Hauptaussagen bzgl. der Identifikation der Lastniveaus sowie zu deren Charakteristik die gleichen.

Die Grenzen der Leistungsklassen werden als x'_k bezeichnet, wobei der Index k von 1 bis p läuft und x'_k jeweils die Obergrenze der k -ten Leistungsklasse darstellt [142]. So liegen die Obergrenzen der Leistungsklassen bei 0,05, 0,1, 0,15...1.

Die Anzahl der Leistungswerte, die einer k-ten Leistungsklasse zugeordnet werden, wird als absolute Klassenhäufigkeit n_k bezeichnet [139]. So umfasst die erste Leistungsklasse beispielsweise alle Leistungswerte x_i^* , für die gilt $0 < x_i^* \leq 0,05$. Da die relativen Klassenhäufigkeiten aufgrund der Normierung einfacher zu interpretieren sind, werden diese für die Leistungsklassen wie folgt berechnet [139] (12):

$$h_k = \frac{n_k}{n} \quad (12)$$

h_k	Relative Klassenhäufigkeit [-]
n_k	Absolute Klassenhäufigkeit [-]
n	Anzahl Leistungswerte der Datenreihe [-]

Ziel der Auswertung des Leistungsspektrums ist es, signifikante Leistungsklassen mit hoher relativer Klassenhäufigkeit zu identifizieren. Basierend auf der empirischen Anwendung an $n=108$ Datenreihen wird eine Leistungsklasse dann als signifikant bewertet, wenn die relative Klassenhäufigkeit $h_k > 0,1$ ist. Demnach liegen mindestens 10% aller Leistungswerte x_i^* innerhalb dieser Leistungsklasse. Kennzeichnend für das Leistungsspektrum sind die folgenden Lastniveaus:

- **Grundlastniveau:** In der Regel erkennbar an einer oder mehreren signifikanten Leistungsklassen auf der linken Seite des Leistungsspektrums.
- **Betriebslastniveau:** In der Regel erkennbar an einer oder mehreren signifikanten Leistungsklassen auf der rechten Seite des Leistungsspektrums.

Die Häufigkeitsverteilung der Leistungswerte wird in einem Histogramm visualisiert (vgl. [139]). Bei gleicher Klassenbreite ist die Höhe der aneinander angrenzenden Balken proportional zur relativen Klassenhäufigkeit [142]. Eine hohe relative Klassenhäufigkeit lässt demnach auf ein „dichtes“ Lastniveau schließen, da viele Leistungswerte in einem kleinen Leistungsbereich liegen. Niedrige relative Klassenhäufigkeiten lassen auf ein „weites“ Lastniveau schließen, da wenige Leistungswerte über einen größeren Leistungsbereich verteilt sind. Das Leistungsspektrum kann demnach gemäß drei wesentlicher Merkmale interpretiert werden (s. Tabelle 33, Folgeseite).

Tabelle 33: Merkmale zur Interpretation des Leistungsspektrums

Merkmalsname	Interpretation
Anzahl der Lastniveaus	<p>Ein erkennbares Lastniveau: Indikator für eine Datenreihe mit elektrischen Verbrauchern, die nur ein Betriebslastniveau aufweisen und daher dauerhaft im Betrieb (oder Standby) sind.</p> <p>Zwei erkennbare Lastniveaus: Indikator für eine Datenreihe mit elektrischen Verbrauchern, die ein Betriebs- und ein Grundlastniveau aufweisen.</p> <p>Drei oder mehr erkennbare Lastniveaus: Indikator für eine Datenreihe mit elektrischen Verbrauchern, die mehrere Betriebs- oder Grundlastniveaus aufweisen.</p>
Lage der Lastniveaus	<p>Ein Lastniveau bei den Leistungsklassen $(x'_{k-1}; x'_k] < 0,5$ (linke Seite des Leistungsspektrums) deutet auf ein Grundlastniveau hin.</p> <p>Ein Lastniveau bei den Leistungsklassen $(x'_{k-1}; x'_k] > 0,5$ (rechte Seite des Leistungsspektrums) deutet auf ein Betriebslastniveau hin.</p>
Höhe der Lastniveaus	<p>Beurteilung der „Dichte“ des Lastniveaus anhand der relativen Klassenhäufigkeit h_k. Bei $h_k > 0,1$ handelt es sich um ein signifikantes Lastniveau, welches mindestens 10% der Leistungswerte der Datenreihe enthält.</p>

Anwendungsbeispiel

Bezogen auf die Datenreihe des Bürogebäudes ergibt sich das in Abbildung 27 dargestellte Leistungsspektrum.

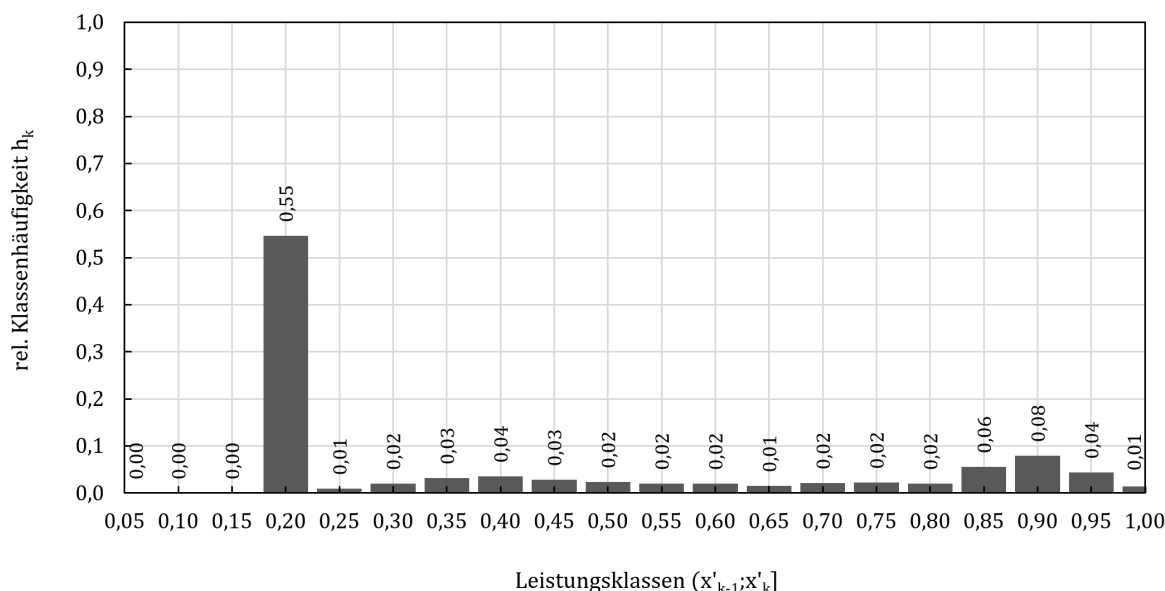


Abbildung 27: Leistungsspektrum der Datenreihe Bürogebäude

Dabei ist die relative Klassenhäufigkeit h_k für die insgesamt 20 Leistungsklassen $(x'_{k-1}; x'_k]$ dargestellt. Die Ergebnisse können wie folgt interpretiert werden:

- Das **Grundlastniveau** liegt bei 15-20% der aufgetretenen Maximalleistung x_{peak} (Leistungsklasse 0,20). In dieser Leistungsklasse liegen etwa 55% aller Leistungswerte x_i^* ($h_k = 0,55$). Dies lässt auf ein bezogen auf das Leistungsspektrum „dichtes“ Grundlastniveau schließen.
- Das **Betriebslastniveau** ist über die Leistungsklassen 0,25-1 verteilt. Die niedrigen Werte der relativen Klassenhäufigkeit lassen auf ein „weites“ Betriebslastniveau schließen, d.h. die Leistungswerte liegen über einen großen Leistungsbereich verteilt.

Die wichtigsten Parameter des Leistungsspektrums der Datenreihe sind in Tabelle 34 festgehalten:

Tabelle 34: Identifikation der Lastniveaus anhand des Leistungsspektrums
(Beispiel Referenzwoche Bürogebäude)

Lastniveau	Leistungsklassen ($x'_{k-1}; x'_k$]	Relative Klassenhäufigkeit h_k
Grundlastniveau	0,20	0,55
Betriebslastniveau	0,25-1	0,01-0,08

6.3.4 Grundlast und Grundlast-Faktor

Für den Stromverbrauch in der Grundlast sind in der Regel elektrische Verbraucher mit hohen Vollbenutzungsstunden (u.a. Serverräume, Kältetechnik) sowie der Standby-Verbrauch elektrischer Geräte verantwortlich. Eine hohe Grundlast kann auf eine nicht bedarfsgerechte Betriebsweise und Ineffizienzen elektrischer Verbraucher (Bürogeräte, Beleuchtung, Kühlkälte, etc.) hindeuten [66]. Da die Grundlast in vielen Lastprofilen über einen nicht unerheblichen Zeitraum anliegt (vgl. Ruhezeitfenster), ist eine Reduktion der Grundlast in der Regel mit hohen Einsparungen verbunden. Für eine standardisierte Datenanalyse sind daher absolute und relative Parameter zur Beurteilung der Grundlast sowie zur Identifikation relevanter Grundlast-Verbraucher notwendig.

Empirische Herleitung

Aufgrund der Diversität der Lastgangkurven wird die Grundlast an dieser Stelle **nicht als die minimal anliegende Last** berechnet (vgl. Grundlast-Definition, Kapitel 6.3.1). Die minimal anliegende Grundlast ist stärker durch Ausreißer oder eventuelle Messfehler beeinflusst, da sie vom kleinsten Leistungswert der Datenreihe abhängig ist. Darüber hinaus berücksichtigt die minimale Grundlast nicht die natürliche Streuung der Leistungswerte im Ruhezeitfenster. Zur Verdeutlichung zeigt Abbildung 29 (s. Seite 101) ein Anwendungsbeispiel zum Vergleich der minimalen und der mittleren Grundlast.

Um die Höhe der anliegenden Grundlast einer Datenreihe zu beschreiben, wird zunächst der absolute Parameter der **mittleren berechneten Grundlast** P_{base} eingeführt. Die Berechnung dieser mittleren Grundlast erfolgt anhand der Leistungswerte $x_{i,RZ2}$, die dem Ruhezeitfenster RZ2 zugeordnet werden. Dazu wird das arithmetische Mittel der Leistungswerte $x_{i,RZ2}$ berechnet (vgl. Formel (11)):

$$P_{base} = \bar{x}_{RZ2} \quad (13)$$

P_{base}	Mittlere Grundlast [kW]
\bar{x}_{RZ1}	Arithmetisches Mittel der Leistungswerte $x_{i,RZ2}$ [kW]

Diese mittlere Grundlast stellt ein statistisch berechnetes Mittel der Leistungswerte im Ruhezeitfenster dar. Es handelt sich um einen absoluten Parameterwert, der unter anderem für die standardisierte Datenanalyse „Grundlast-Disaggregation“ verwendet wird (vgl. Kapitel 6.4.2) und als Maß zur Beurteilung der Höhe der anliegenden (absoluten) Grundlast dient.

Eine Beurteilung des Grundlastverbrauchs einer erfassten Datenreihe unabhängig vom Messobjekt und der anliegenden Leistung [kW] ist durch den **Grundlast-Faktor** als relativen Parameter gegeben. Der Grundlast-Faktor gilt als Maß zur Beurteilung des Grundlast-Stromverbrauchs am Gesamtstromverbrauch einer Datenreihe und wird wie folgt berechnet (14):

$$k_{base} = \frac{P_{base} \times \Delta t}{E} \quad (0 < k_{base} < 1) \quad (14)$$

k_{base}	Grundlast-Faktor [-]
P_{base}	Mittlere Grundlast [kW]
Δt	Messzeitraum der Datenreihe [h]
E	Gesamtstromverbrauch der Datenreihe [kWh]

Der Grundlast-Faktor kann auch als prozentualer Anteil des Grundlast-Stromverbrauchs am Gesamtstromverbrauch einer Datenreihe interpretiert werden. Anhand des Parameters sind Rückschlüsse auf das Lastverhalten der elektrischen Verbraucher einer Datenreihe möglich. Der Grundlast-Faktor ist ein Indikator zur Identifikation von Datenreihen, die

- 1) vollständig dem Grundlastverbrauch zuzuordnen sind. Es ist kein Ruhezeitfenster erkennbar und die elektrischen Verbraucher befinden sich im Dauerbetrieb.
- 2) keine nennenswerte Grundlast aufweisen. Im Ruhezeitfenster liegt dann nur ein sehr geringer Standby-Verbrauch vor.

Die Einordnung des Wertebereichs ($0 < k_{base} < 1$) erfolgt auf der Basis von $n=108$ im Rahmen der Fallbeispiele empirisch erhobenen Datenreihen. In Tabelle 35 (s. Folgeseite) wird die für den Grundlast-Faktor k_{base} definierte Einordnung des Wertebereichs erläutert.

Tabelle 35: Einordnung Wertebereich Grundlast-Faktor

Einordnung Wertebereich	Erläuterung
$k_{base} \leq 0,05$	Die Datenreihe weist einen Grundlast-Anteil kleiner gleich 5% am Gesamtstromverbrauch auf. Der Stromverbrauch der Datenreihe trägt fast vollständig zum Betriebszeitfenster bei, da nahezu keine Grundlast erkennbar ist. Die zugehörigen elektrischen Verbraucher sind im Ruhezeitfenster fast vollständig abgeschaltet. Indikator zur Identifikation elektrischer Verbraucher mit geringem Standby-Verbrauch.
$0,05 < k_{base} \leq 0,80$	Die Datenreihe weist einen Grundlast-Anteil von 5-80% am Gesamtstromverbrauch auf. Mit steigendem Grundlast-Faktor nimmt die Bedeutung der Grundlast bezogen auf den Gesamtstromverbrauch der Datenreihe zu.
$k_{base} > 0,80$	Die Datenreihe weist einen Grundlast-Anteil von über 80% am Gesamtstromverbrauch auf. Die zugehörigen elektrischen Verbraucher befinden sich im Dauerbetrieb. Es ist kein Ruhezeitfenster erkennbar. Indikator zur Identifikation elektrischer Verbraucher mit hohen Vollbenutzungsstunden bzw. Dauerbetrieb

Die Grenzen für die dargestellte Einordnung wurden empirisch auf Basis der erfassten Datenreihen ermittelt. Abbildung 28 zeigt dazu die Verteilung der absoluten Klassenhäufigkeiten n_k der erfassten Datenreihen (zur Theorie der Bildung von Klassenhäufigkeiten siehe Kapitel 6.3.3).

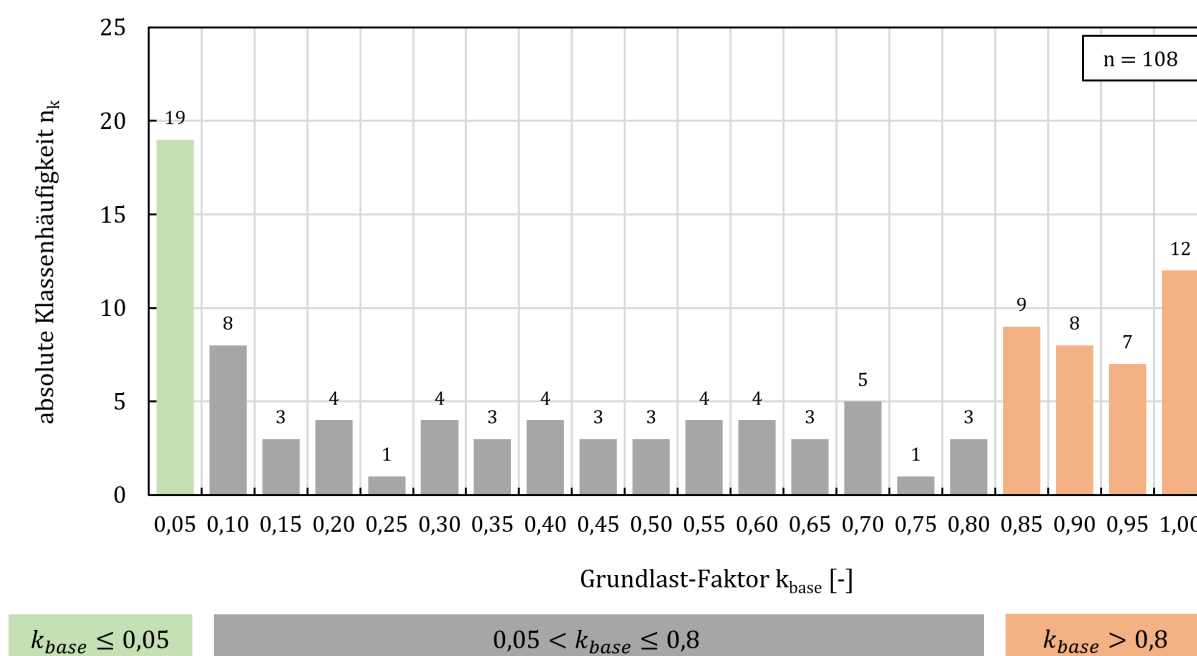


Abbildung 28: Einordnung Wertebereich Grundlast-Faktor anhand absoluter Klassenhäufigkeiten der in den Fallbeispielen erfassten Datenreihen (n=108)

Die untere Grenze $k_{base} \leq 0,05$ wurde gewählt, da in den zugehörigen Datenreihen nahezu keine Grundlast anliegt. Somit unterscheiden sich diese Datenreihen eindeutig von jenen, die ein Grundlastniveau aufweisen. Die obere Grenze für den Grundlast-Faktor $k_{base} > 0,80$ wurde gewählt, da die Datenreihen ab diesem Wert kein eindeutiges Ruhezeitfenster aufweisen. Der Stromverbrauch dieser Datenreihen wird maßgeblich durch die Grundlast verursacht und daher vollständig dem Betriebszeitfenster zugeordnet.

Anwendungsbeispiel

Die Anwendung des Berechnungsverfahrens zur Ermittlung der mittleren Grundlast wird in Abbildung 29 beispielhaft für die Datenreihe des Bürogebäudes dargestellt. Zur Verdeutlichung ist in der Grafik auch die in der Literatur definierte minimale, permanent anliegende Grundlast („minimale Grundlast“) der Datenreihe eingezeichnet.

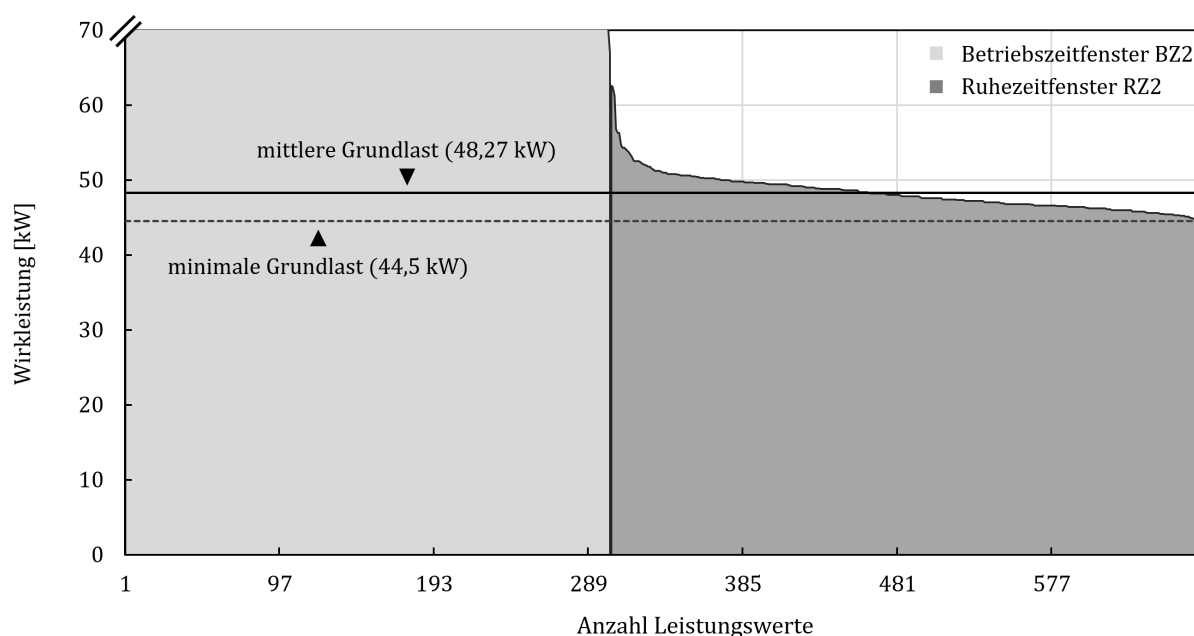


Abbildung 29: Vergleich der berechneten mittleren Grundlast mit der minimalen Grundlast anhand der Dauerlinie einer Datenreihe

Es ergibt sich eine berechnete mittlere Grundlast von 48,27 kW und eine minimale Grundlast von 44,5 kW. Die mittlere Grundlast weicht in diesem Beispiel etwa 3,77 kW bzw. 8,5% von der minimalen Grundlast (kleinster Leistungswert der Datenreihe) ab. Die Abbildung macht auch deutlich, dass das Berechnungsverfahren zur mittleren Grundlast die mittlere Last der Leistungswerte des Ruhezeitfensters RZ2 (dunkelgrauer Bereich) gut widerspiegelt.

Bezogen auf die Datenreihe des Bürogebäudes ergibt sich ein Grundlast-Faktor von **0,43**. Der Grundlast-Stromverbrauch beträgt daher etwa 43% des Gesamtstromverbrauchs der Datenreihe über den Zeitraum der Referenzwoche. Gemäß der Einordnung des Wertebereichs nach Tabelle 35 kann geschlossen werden, dass in der Datenreihe ein nennenswerter Grundlast-Verbrauch anliegt. Dies kann u.a. auf den Standby-Verbrauch elektrischer Verbraucher zurückgeführt werden.

In Abbildung 30 wird die Anwendung des Grundlast-Faktors auf weitere beispielhafter Datenreihen dargestellt. Dabei wird für die definierten Wertebereiche auch eine Interpretation des Lastverhaltens gegeben.

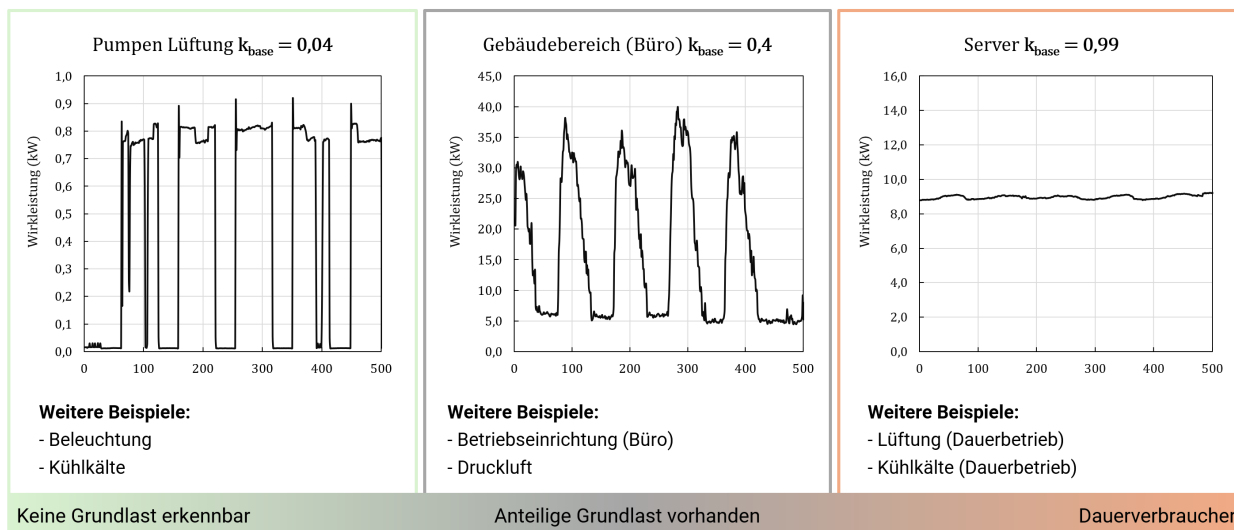


Abbildung 30: Anwendung des Grundlast-Faktors auf beispielhafte Datenreihen

Die Datenreihe der Pumpen eines Lüftungssystems (links) weist einen niedrigen Grundlast-Faktor auf. Während der Ruhezeit- bzw. Standby-Zeit sind die Pumpen nahezu vollständig ausgeschaltet. Es ist kein Grundlastverbrauch erkennbar. Die Datenreihe des Gebäudebereichs (mittig) hingegen weist eine permanent anliegende Grundlast auf. Der Grundlastverbrauch beträgt etwa 40% des Gesamtstromverbrauchs der Datenreihe. Die Datenreihe des Servers (rechts) ist durch einen Dauerbetrieb charakterisiert. Der hohe Grundlast-Faktor verdeutlicht, dass kein Ruhezeitfenster anliegt bzw. erkennbar ist. Der gesamte Stromverbrauch ist daher dem Betriebszeitfenster zuzuordnen.

6.3.5 Spitzenlast-Differenz und Lastspitzen-Faktor

Lastspitzen sind kurzfristig auftretende Maximalwerte einer Datenreihe, die häufig durch den gleichzeitigen Betrieb mehrerer leistungsintensiver Verbraucher hervorgerufen werden (vgl. Kapitel 6.3.1) [66]. In Deutschland werden Unternehmen mit einem Stromverbrauch von mehr als 100.000 kWh pro Jahr mit einem Arbeitspreis (€/kWh) und einem Leistungspreis (€/kW) tarifiert. Da der Leistungspreis von der höchsten jährlichen Lastspitze abhängt, wirken sich Lastspitzen direkt auf die Energiekosten eines Unternehmens aus. Die Analyse und Reduktion von Lastspitzen ist für Unternehmen daher besonders relevant, um Energiekosten zu sparen [92].

Vor diesem Hintergrund sollten für eine standardisierte Datenanalyse sowohl absolute als auch relative Parameter zur Beurteilung der Lastspitzen der erfassten Datenreihen entwickelt und angewendet werden.

Empirische Herleitung

Die Spitzenlast-Differenz [kW] sowie der Lastspitzen-Faktor k_{peak} [-] werden als Parameter zur Beurteilung der kurzfristig auftretenden Maximalwerte der Lastgangkurve verwendet. Anhand dieser Parameter kann eine Aussage über die Häufigkeit des Auftretens und die Höhe kurzfristiger maximaler Leistungswerte in einer Datenreihe getroffen werden. Dies lässt Rückschlüsse auf das Betriebsverhalten elektrischer Verbraucher zu und kann ein Indikator zur Identifikation von Lastspitzen-Verbrauchern darstellen. Die Parameter orientieren sich am Spitzenlastbereich (vgl. Kapitel 6.3.1), der die oberen 2,5% der Leistungswerte einer Datenreihe mittels 0,975-Quantil $\tilde{x}_{0,975}$ vom Rest der Leistungswerte trennt.

Die **Spitzenlast-Differenz** ΔP_{peak} gilt als absolutes Maß zur Beschreibung der Lastdifferenz [kW] im Spitzenlastbereich $\tilde{x}_{0,975}$. Durch den Bezug auf die absoluten Leistungswerte kann dieser Parameter zum Vergleich mehrerer in einer Messkampagne erfassten Datenreihen herangezogen werden. Die Spitzenlast-Differenz ergibt sich aus der Differenz zwischen der Maximalleistung x_{peak} und dem Spitzenlastbereich $\tilde{x}_{0,975}$ (15):

$$\Delta P_{peak} = x_{peak} - \tilde{x}_{0,975} \quad (15)$$

ΔP_{peak}	Spitzenlast-Differenz [kW]
x_{peak}	Maximalleistung der Datenreihe [kW]
$\tilde{x}_{0,975}$	Spitzenlastbereich der Datenreihe [kW]

Da der Spitzenlastbereich die oberen 2,5% der Leistungswerte der Datenreihe umfasst, ergibt sich der Zeitraum des Spitzenlastbereichs Δt_{peak} wie folgt (16):

$$\Delta t_{peak} = 0,025 \times \Delta t \quad (16)$$

Δt_{peak}	Zeitraum Spitzenlastbereich [h]
Δt	Messzeitraum der Datenreihe [h]

Eine hohe Spitzenlast-Differenz bedeutet, dass innerhalb des Spitzenlastbereichs der Dauerlinie ein großes Leistungsgefälle vorliegt. Geordnet in einer Dauerlinie fällt die Kurve daher steil ab. Je nach elektrischer Hierarchie-Ebene (Hauptverteilung, Unterverteilung) deutet dies auf das Auftreten einzelner, kurzfristiger Maximalwerte in der Datenreihe hin. Eine niedrige Spitzenlast-Differenz bedeutet, dass die Dauerlinie flach abfällt, was darauf hindeutet dass die Datenreihe keine vereinzelten, ausgeprägten Lastspitzen bzw. Leistungsmaxima enthält.

Der **Lastspitzen-Faktor** k_{peak} gilt als relatives Maß zur Beurteilung der Leistungsdifferenz innerhalb des Spitzenlastbereichs bezogen auf die aufgetretene Maximalleistung x_{peak} . Anhand des Parameters können daher Datenreihen unterschiedlicher Messobjekte miteinander verglichen werden. Die Berechnung des Lastspitzen-Faktors erfolgt anhand der folgenden Formel (17):

$$k_{peak} = \frac{x_{peak} - \tilde{x}_{0,975}}{x_{peak}} \text{ bzw. } \frac{\Delta P_{peak}}{x_{peak}} \quad (0 < k_{peak} < 1) \quad (17)$$

k_{peak}	Lastspitzen-Faktor [-]
$\tilde{x}_{0,975}$	Spitzenlastbereich der Datenreihe [kW]
x_{peak}	Maximalleistung der Datenreihe [kW]

Der Parameter lässt sich auch als prozentuale Leistungsreduktion der Datenreihe innerhalb des Spitzenlastbereichs bezogen auf die aufgetretene Maximalleistung interpretieren. Die Einordnung des Wertebereichs ($0 < k_{peak} < 1$) erfolgt auf der Basis von $n=108$ im Rahmen der Fallbeispiele empirisch erhobener Datenreihen. In Tabelle 36 wird die für den Lastspitzen-Faktor k_{peak} definierte Einordnung des Wertebereichs erläutert.

Tabelle 36: Einordnung Wertebereich Lastspitzen-Faktor

Einordnung Wertebereich	Erläuterung
$k_{peak} \leq 0,05$	<p>Leistungsdifferenz innerhalb des Zeitraums des Spitzenlastbereichs ist $\leq 5\%$ der aufgetretenen Maximalleistung</p> <p>Die Datenreihe weist gering ausgeprägte, kurzfristige Maximalwerte der Leistung auf.</p>
$0,05 < k_{peak} \leq 0,3$	<p>Leistungsdifferenz innerhalb des Zeitraums des Spitzenlastbereichs liegt bei 5 - 30% der aufgetretenen Maximalleistung</p> <p>Die Datenreihe weist ausgeprägte, kurzfristige Maximalwerte der Leistung auf. Bei den zugehörigen elektrischen Verbrauchern kann es sich um Lastspitzen-Verbraucher handeln.</p> <p>Indikator zur Identifikation von Lastspitzen-Verbrauchern (s. Kapitel 6.4.3)</p>
$k_{peak} > 0,3$	<p>Leistungsdifferenz innerhalb des Zeitraums des Spitzenlastbereichs ist $> 30\%$ der aufgetretenen Maximalleistung</p> <p>Die Datenreihe weist stark ausgeprägte, kurzfristige Maximalwerte der Leistung auf. Bei den zugehörigen elektrischen Verbrauchern kann es sich um Lastspitzen-Verbraucher handeln.</p> <p>Besonders hohe Werte $k_{peak} > 0,9$ deuten auf einzelne oder einige wenige innerhalb des Messzeitraums aufgetretene kurzfristige Maximalwerte in der Datenreihe hin.</p> <p>Indikator zur Identifikation von Lastspitzen-Verbrauchern (s. Kapitel 6.4.3)</p>

Die Grenzen für die dargestellte Einordnung wurden empirisch auf der Basis der erfassten Datenreihen ermittelt.

- Die untere Grenze $k_{peak} \leq 0,05$ wurde gewählt, da die entsprechend eingeordneten Datenreihen keine ausgeprägten, kurzfristigen Maximalwerte enthalten. Dies lässt darauf hindeuten, dass die Datenreihen keine Lastspitzen-Verbraucher beinhalten.
- Die obere Grenze $k_{base} > 0,3$ wurde gewählt, da die zugehörigen Datenreihen einige wenige stark ausgeprägte, kurzfristige Maximalwerte enthalten. Dies kann auf Lastspitzen-Verbraucher hindeuten, die sich maßgeblich auf das Gesamtlastprofil (RLM-Lastgangdaten) auswirken und die darin enthaltenen Lastspitzen verursachen.

Abbildung 31 zeigt die Verteilung der absoluten Klassenhäufigkeiten n_k der berechneten Lastspitzen-Faktoren.

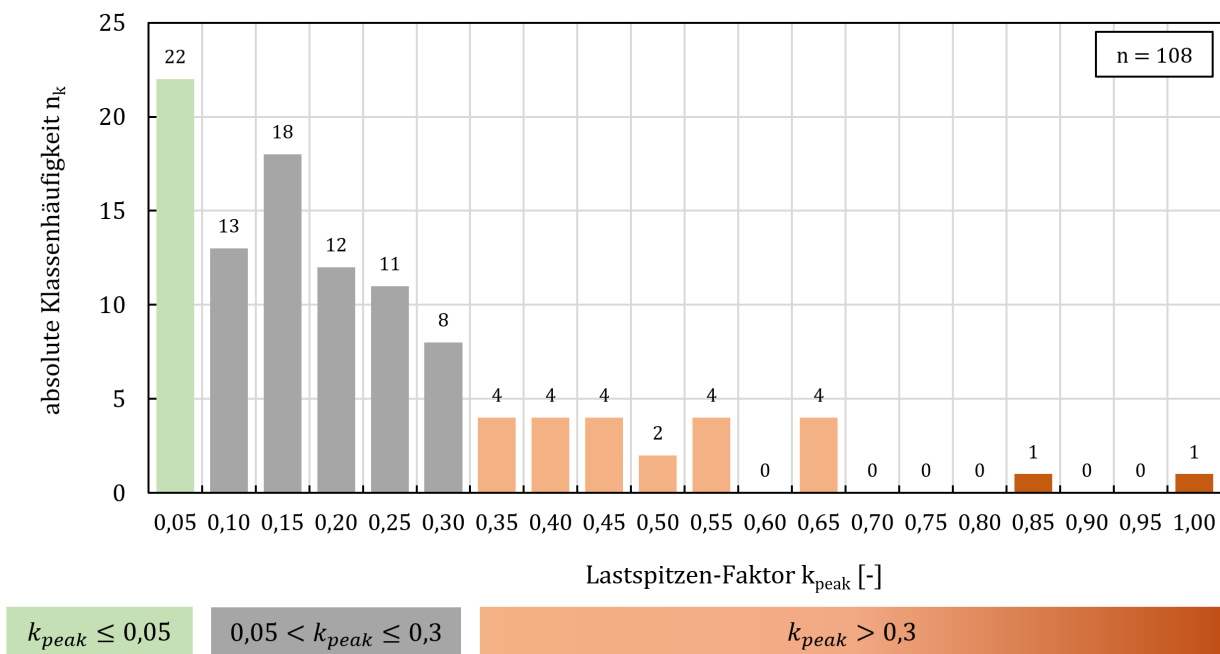


Abbildung 31: Einordnung Wertebereich Lastspitzen-Faktor anhand absoluter Klassenhäufigkeiten der in den Fallbeispielen erfassten Datenreihen (n=108)

Anwendungsbeispiel

Angewendet auf die Datenreihe des Bürogebäudes beträgt der Zeitraum des Spitzenlastbereichs 4,2 h. Im Spitzenlastbereich dieser Datenreihe liegen somit 16 Leistungswerte bei einer Messdatenauflösung von 15-min (vgl. Abbildung 32, Folgeseite).

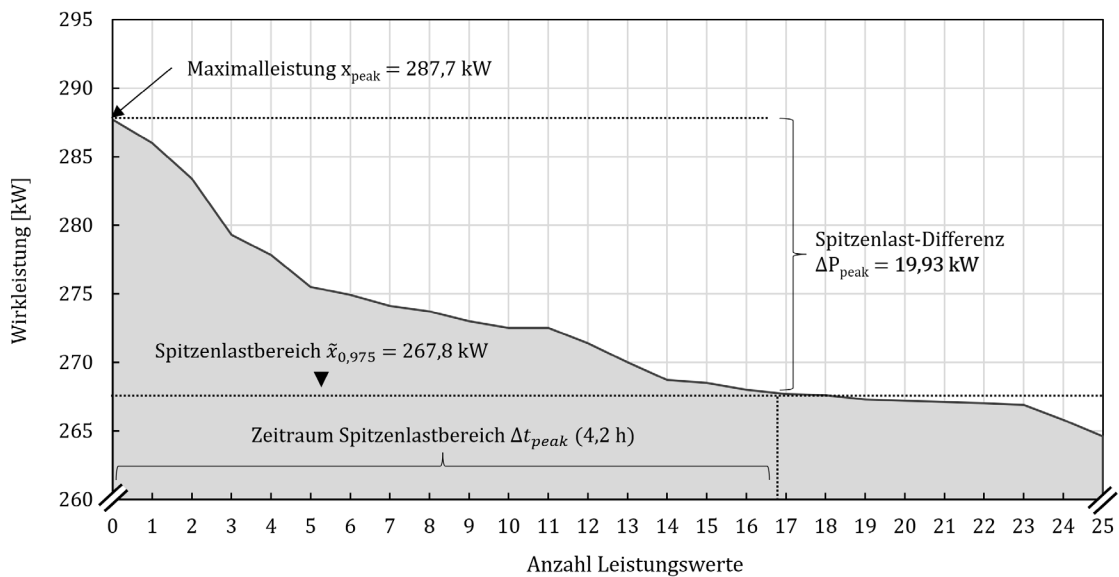


Abbildung 32: Verdeutlichung der Spitzenlast-Differenz (Beispiel Referenzwoche Bürogebäude)

Bezogen auf die Spitzenlast der Datenreihe können die folgenden Punkte festgehalten werden:

- Die **Spitzenlast-Differenz** beträgt 19,93 kW. Da es sich um einen absoluten Parameterwert handelt, kann dieser erst durch den Vergleich mit weiteren in der Messreihe parallel erfassten Datenreihen bewertet werden.
- Der **Lastspitzen-Faktor** beträgt 0,07. Die Leistungsdifferenz innerhalb des Zeitraums des Spitzenlastbereichs beträgt 7% der aufgetretenen Maximalleistung x_{peak} der Datenreihe.

Gemäß der Einordnung der Wertebereiche nach Tabelle 36 kann geschlossen werden, dass die Datenreihe ausgeprägte kurzfristige Maximalwerte der Leistung aufweist. Weitere Detailanalysen zu Lastspitzen sollten jedoch auf Basis der Erfassung untergeordneter elektrischer Verteilungen und Verbrauchergruppen des Bürogebäudes erfolgen. In Abbildung 33 werden weitere beispielhafte Datenreihen für den Lastspitzen-Faktor aufgezeigt.

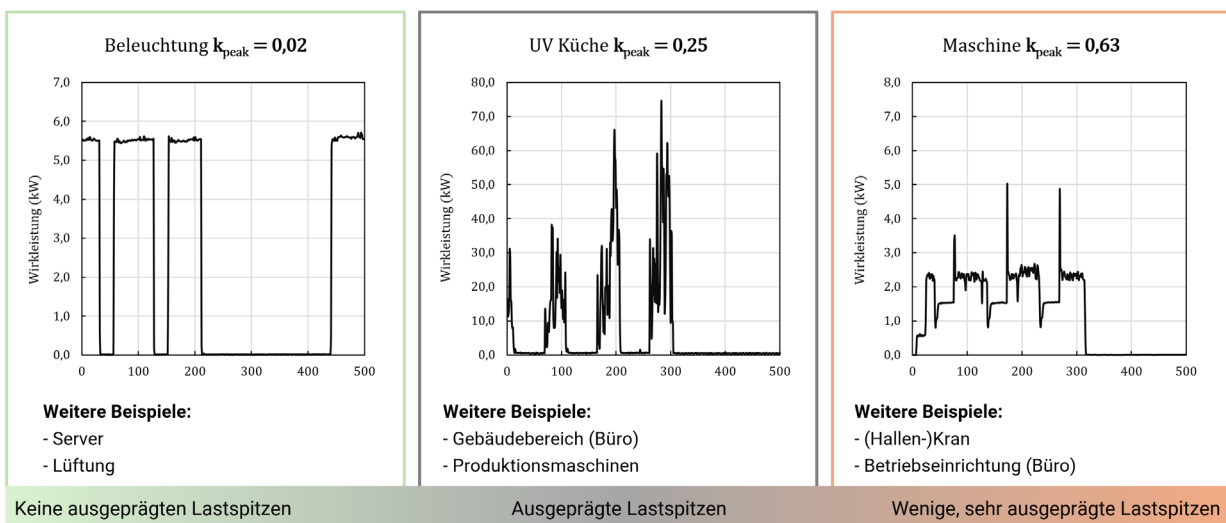


Abbildung 33: Anwendung des Lastspitzen-Faktors auf beispielhafte Datenreihen

Während die Lastgangkurve der Datenreihe „Beleuchtung“ (links) keine kurzfristig auftretenden Maximalwerte enthält, sind diese in der Datenreihe „UV Küche“ (mittig) deutlich erkennbar. Die Datenreihe „Maschine“ stellt mit einem Lastspitzen-Faktor von 0,63 ein Beispiel für eine Lastgangkurve mit wenigen, stark ausgeprägten Maximalwerten dar.

6.3.6 Laständerung

Ein weiteres Indiz für das Auftreten von Lastspitzen-Verbrauchern in einer Datenreihe kann eine hohe Laständerung aufeinander folgender Zeitwerte sein. Liegen bei aufeinander folgenden Zeitwerten hohe Lastgradienten (Rampen) vor, kann dies auf größere elektrische Verbraucher in der Datenreihe hindeuten [143]. Zusätzlich lassen sich anhand der statistischen Parameter dieses Berechnungsverfahrens auch Rückschlüsse auf das Lastverhalten der elektrischen Verbraucher ziehen.

Analog zur Grundlast und den Lastspitzen erfolgt daher im Folgenden die Herleitung eines absoluten und eines relativen Parameters zur Beurteilung der Laständerung. Aufgrund der häufig unterschiedlichen Lastcharakteristik des Ruhezeit- und Betriebszeitfensters muss eine Berechnung der Parameter je Zeitfenster erfolgen.

Empirische Herleitung

Der **mittlere Lastgradient** LG_{avg} dient als absolutes Maß zur Beschreibung der mittleren Laständerung aufeinander folgender Leistungswerte bezogen auf das Ruhezeit- oder Betriebszeitfenster. Der Parameter wird aus dem arithmetischen Mittel der Absolutwerte der Differenz aufeinander folgender Leistungswerte berechnet [143] (18):

$$LG_{avg} = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n |x_i - x_{i-1}| \times 4 \quad (18)$$

LG_{avg}	Mittlerer Lastgradient je Zeitfenster (RZ/BZ) [kW/h]
n	Anzahl Leistungswerte je Zeitfenster (RZ/BZ) [-]
x_i	Leistungswerte der Datenreihe je Zeitfenster [kW]

Da die Leistungswerte x_i in einer Messdatenauflösung von 15-min vorliegen, korrigiert der Faktor 4 den Parameter auf einen mittleren Lastgradienten bezogen auf eine volle Stunde [kW/h]. Anhand dieses absoluten Parameterwertes können insbesondere Datenreihen mit einem großen Einfluss auf das Gesamtsystem identifiziert werden. Zum übergeordneten Vergleich der erfassten Datenreihen sollte neben dem mittleren Lastgradienten zusätzlich die mittlere Laständerungsrate als relativer Parameter hinzugezogen werden.

Die **mittlere Laständerungsrate** LR_{avg} gilt als relatives Maß zur Beschreibung der mittleren Laständerung aufeinander folgender Leistungswerte bezogen auf das Ruhezeit- oder Betriebszeitfenster. Dazu wird die Leistungsdifferenz auf das arithmetische Mittel \bar{x} der Leistungswerte je Zeitfenster (RZ/BZ) bezogen (19):

$$LR_{avg} = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n \frac{|x_i - x_{i-1}|}{\bar{x}} \quad (19)$$

LR_{avg}	Mittlere Laständerungsrate je Zeitfenster (RZ/BZ) [-]
n	Anzahl Leistungswerte je Zeitfenster (RZ/BZ) [-]
x_i	Leistungswerte der Datenreihe je Zeitfenster [kW]
\bar{x}	Arithmetisches Mittel der Leistungswerte je Zeitfenster (RZ/BZ) [kW]

Es ergibt sich ein Parameter, der je Zeitfenster die mittlere prozentuale Laständerung zum arithmetischen Mittel der Leistungswerte beschreibt. Der Parameter ist notwendig, um unabhängig vom Messobjekt Rückschlüsse auf das Lastverhalten der erfassten Datenreihen ziehen zu können. Die Laständerungsrate kann ein Indikator zur Identifikation von Datenreihen sein, die

- 1) Ein **statisches** Lastverhalten aufweisen und durch niedrige Lastgradienten aufeinander folgender Leistungswerte gekennzeichnet sind.
- 2) Ein **dynamisches** Lastverhalten aufweisen und durch hohe Lastgradienten aufeinander folgender Leistungswerte gekennzeichnet sind.

Eine Einordnung sowie eine Erläuterung zur Interpretation des Wertebereichs $0 < LR_{avg} < 1$ erfolgt in Tabelle 37.

Tabelle 37: Einordnung Wertebereich mittlere Laständerungsrate

Einordnung Wertebereich	Erläuterung
$LR_{avg} \leq 0,05$	Geringe Laständerung aufeinander folgender Leistungswerte zum arithmetischen Mittel des Zeitfensters: $\leq 5\%$ Indikator zur Identifikation von Datenreihen, die im Ruhezeit- oder Betriebszeitfenster niedrige Lastgradienten (Rampen) aufweisen. Dies kann auf elektrische Verbraucher mit statischer Lastcharakteristik (z.B. Serversystem) oder Unterverteilungen ohne größere elektrische Verbraucher hindeuten.
$0,05 < LR_{avg} \leq 0,35$	Hohe Laständerung aufeinander folgender Leistungswerte zum arithmetischen Mittel des Zeitfensters: zwischen 5-35% Indikator zur Identifikation von Datenreihen, die im Ruhezeit- oder Betriebszeitfenster hohe Lastgradienten (Rampen) aufweisen. Dies kann auf elektrische Verbraucher mit dynamischer Lastcharakteristik (z.B. Kompressorsystem) oder Unterverteilungen mit größeren elektrischen Verbrauchern sowie Lastspitzen-Verbraucher hindeuten.
$LR_{avg} > 0,35$	Sehr hohe Laständerung aufeinander folgender Leistungswerte zum arithmetischen Mittel des Zeitfensters: $> 35\%$ Indikator zur Identifikation von Datenreihen, die im Ruhezeit- oder Betriebszeitfenster sehr hohe Lastgradienten (Rampen) aufweisen. Dies kann auf elektrische Verbraucher mit besonders dynamischer Lastcharakteristik (z.B. Kältesysteme) sowie Lastspitzen-Verbraucher hindeuten.

Die in der Tabelle definierten Grenzwerte basieren auf der Anwendung der Parameter auf $n=108$ empirisch erfasste Datenreihen. Die Einordnung des Wertebereichs basiert auf dem Betriebszeitfenster, das für alle erfassten Datenreihen vorliegt. Abbildung 34 zeigt die Verteilung der absoluten Klassenhäufigkeiten n_k der erfassten Datenreihen.

- Als unterer Grenzwert wird ein Wert von $LR_{avg} \leq 0,05$ gewählt. Die zugehörigen Datenreihen weisen eine geringe Laständerung bei den aufeinander folgenden Zeitwerten auf. In dem betrachteten Zeitfenster liegt ein **statisches** Lastverhalten vor.
- Als oberer Grenzwert wird ein Wert von $LR_{avg} > 0,35$ festgelegt. Die zugehörigen Datenreihen weisen eine sehr hohe Laständerung bei den aufeinander folgenden Zeitwerten auf. Dieses sehr **dynamische** Lastverhalten weisen insgesamt nur $n=12$ Datenreihen auf.

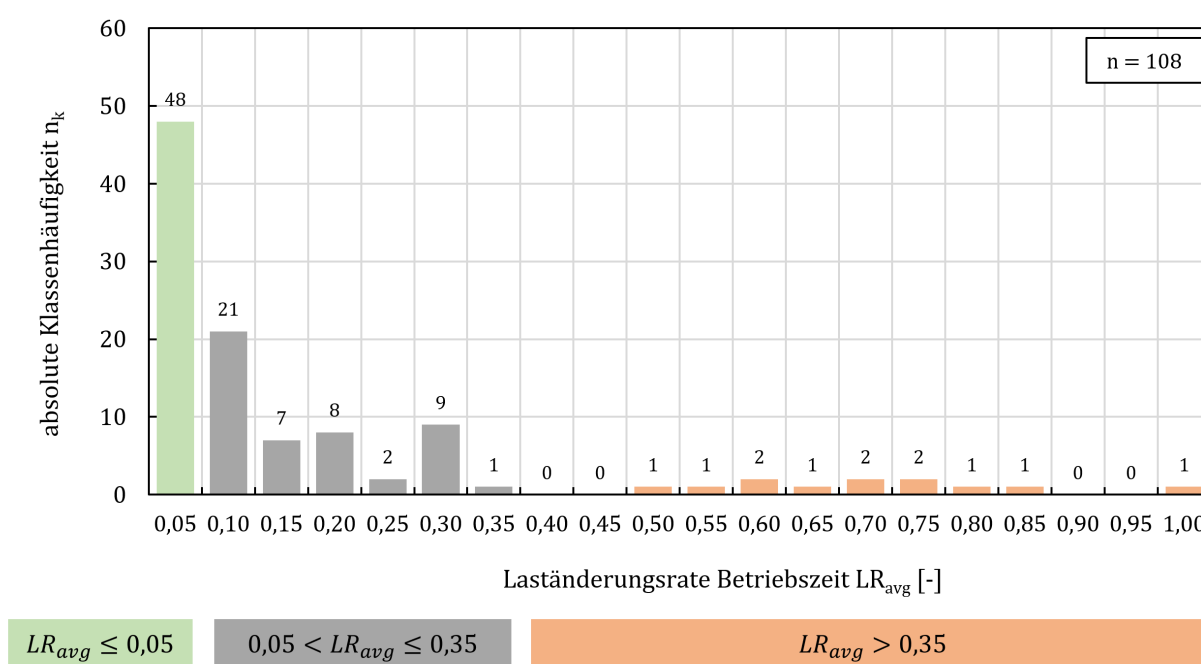


Abbildung 34: Einordnung Wertebereich Laständerungsrate Betriebszeit anhand absoluter Klassenhäufigkeiten der in den Fallbeispielen erfassten Datenreihen ($n=108$)

Anwendungsbeispiel

Angewendet auf die Datenreihe der Referenzwoche eines Bürogebäudes liegen die Parameterwerte für die mittlere Laständerungsrate LR_{avg} bei 0,05 (Betriebszeitfenster) und 0,03 (Ruhezeitfenster) (s. Tabelle 38, Folgeseite). Entsprechend der Einordnung des Wertebereichs nach Tabelle 37 liegen die Werte im mittleren Bereich. Die Anwendung des Berechnungsverfahrens auf diese Datenreihe weist somit nicht unmittelbar einen Indikator aus, der auf eine Auffälligkeit hindeutet.

Tabelle 38: Parameter zur Beschreibung der Laständerung für Betriebstage
 (Beispiel Referenzwoche Bürogebäude)

Mittl. Lastgradient LG_{avg} [kW/h]		Mittl. Laständerungsrate LR_{avg} [-]	
Betriebszeit	Ruhezeit	Betriebszeit	Ruhezeit
39,44	5,18	0,05	0,03

Zur Verdeutlichung der Auswirkung der Laständerungsrate auf die Lastcharakteristik zeigt Abbildung 35 weitere beispielhafte Datenreihen. Die Datenreihe „Hallenbeleuchtung“ (links) steht beispielhaft für ein Lastprofil mit niedriger Laständerungsrate und entsprechend statischem Lastverhalten während der Betriebszeit. Deutlich dynamischer ist das Lastverhalten während der Betriebszeit einer erfassten Maschine (mittig). Sehr hohe Laständerungsraten wie in der aufgezeigten Datenreihe „Kühltechnik“ deuten auf ein besonders dynamisches Lastverhalten der zugehörigen elektrischer Verbraucher hin.

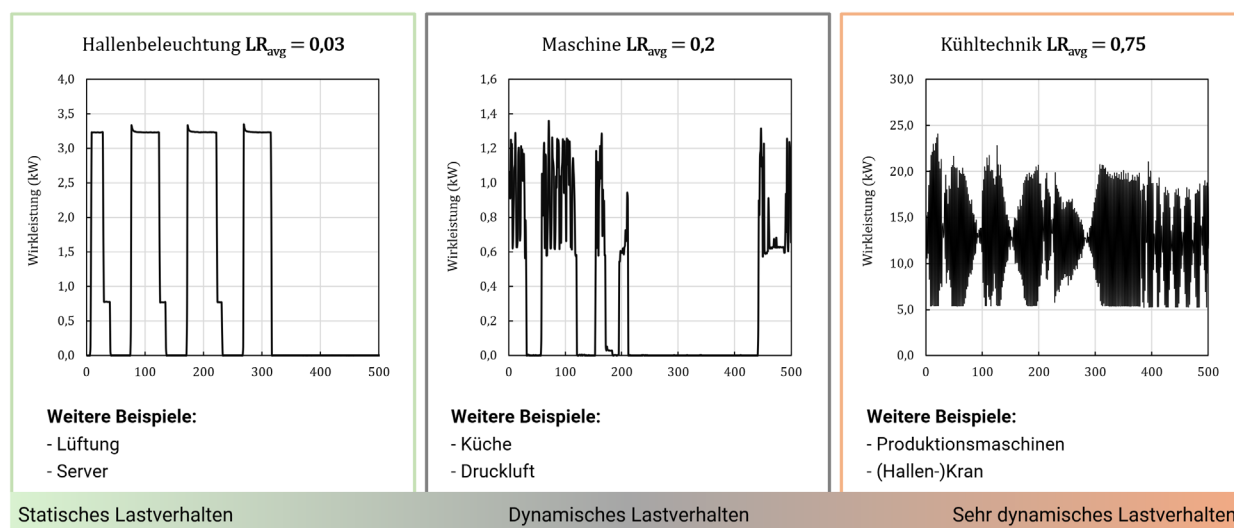


Abbildung 35: Anwendung der Laständerungsrate Betriebszeit auf beispielhafte Datenreihen

6.3.7 Streuung an diskreten Zeitwerten

Die bisher vorgestellten Berechnungsverfahren beschreiben das Lastverhalten bezogen auf die Grundlast zur Identifikation von Grundlast-Verbrauchern sowie Lastspitzen zur Identifikation von Lastspitzen-Verbrauchern. Diese Berechnungsverfahren basieren auf der Analyse der vollständigen Datenreihen und der initialen Einteilung in ein Ruhezeit- und Betriebszeitfenster (vgl. Kapitel 6.3.2).

Einen zusätzlichen Betrachtungshorizont auf die vorliegenden Datenreihen ermöglicht das Berechnungsverfahren „Streuung an diskreten Zeitwerten“. Dabei werden die Leistungswerte über den Tagesverlauf von 00:00-24:00h betrachtet, um zwischen den vorliegenden Typtagen (Betriebs- und Ruhetage) zu unterscheiden und das Lastverhalten gleicher Typtage zu bewerten. Die Analyse erlaubt Rückschlüsse auf das Betriebs- und Regelverhalten der elektrischen Verbraucher. Dabei kann unterschieden werden zwischen

- 1) **Homogenen Betriebsverhalten:** Die Leistungswerte weisen an den diskreten Zeitwerten eine geringe Streuung auf. Es liegt ein eindeutig erkennbarer Tageslastverlauf vor.
- 2) **Heterogenen Betriebsverhalten:** Die Leistungswerte weisen an den diskreten Zeitwerten eine große Streuung auf. Es ist kein eindeutiger Tageslastverlauf erkennbar.

Die Parameter können eine Grundlage zur Beschreibung eines typischen Verbrauchsverhalten von elektrischen Geräten, Anlagen und Systemen darstellen. Auch Rückschlüsse auf das Regelverhalten der elektrischen Verbraucher sind möglich (bspw. Regelung eines Lüftungssystems nach konstantem Volumenstrom oder „zufälliger“ Betrieb elektrischer Verbraucher zu unterschiedlichen Zeitpunkten über den Tagesverlauf).

Empirische Herleitung

Zur Berechnung der Streuung an den diskreten Zeitwerten t (00:00-24:00h) ist zunächst eine Einteilung der Datenreihe gemäß den Tagestypen „Betriebstage“ und „Ruhetage“ notwendig. Ohne diese Einteilung würde die Berechnung der Parameterwerte verfälscht werden, da Betriebs- und Ruhetage an diskreten Zeitwerten ein unterschiedliches Betriebsverhalten aufweisen können.

Eine Visualisierung der Tageslastgänge einer Datenreihe ist in einem Streudiagramm möglich. Dabei werden die Leistungswerte der gesamten Datenreihe (bspw. eines Messpunktes) je Tagestyp in einem einzigen Diagramm dargestellt. In Abbildung 36 sind zur Verdeutlichung die Leistungswerte einer Datenreihe mit acht Betriebstagen über den Zeitraum von 00:00-01:00h dargestellt. Entsprechend der Messdatenaufösung von 15-min liegen Leistungswerte an den vier diskreten Zeitwerten 00:00h, 00:15h, 00:30h, 00:45h vor.

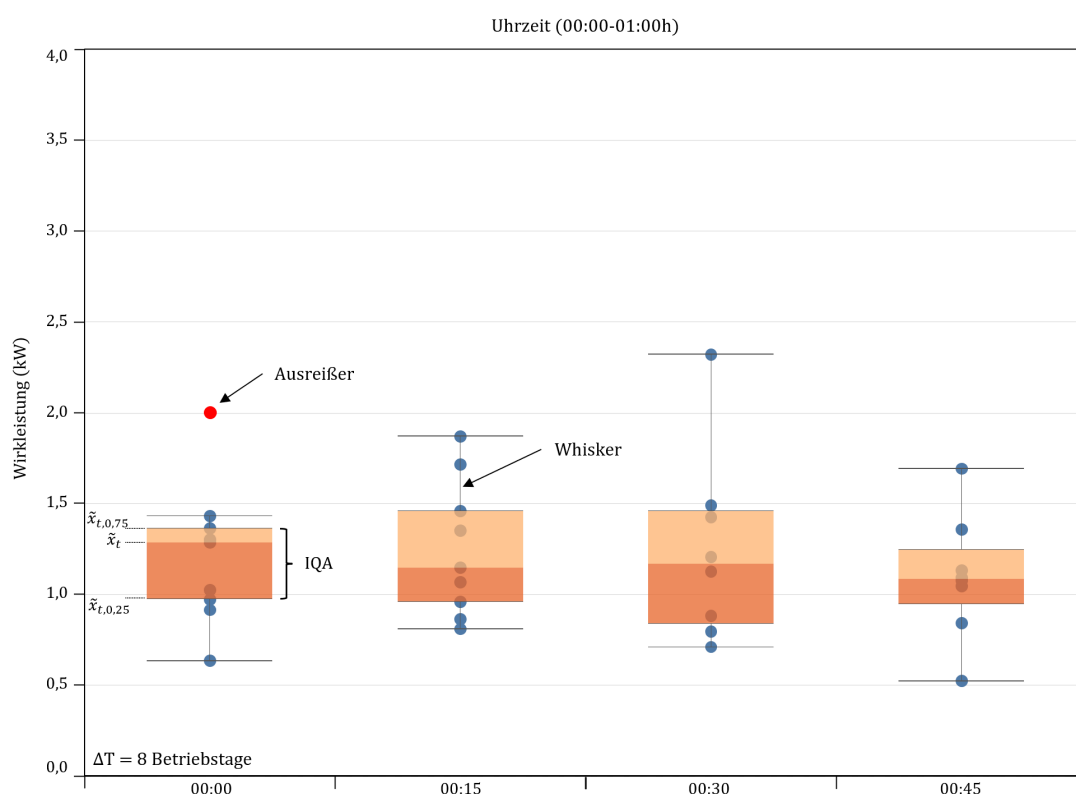


Abbildung 36: Ausschnitt von vier Leistungswerten (00:00-00:45h) eines Streudiagramms

Als Maß für die Einteilung der Datenreihe nach Tagestypen gelten die erfassten Leistungswerte an den diskreten Zeitwerten 00:00-24:00h. An Ruhetagen liegen die Leistungswerte in der Regel nah an der berechneten Grundlast. Betriebstage sind durch ein kontinuierliches (24h am Tag) oder ein zeitlich differenziertes Betriebslastniveau (vgl. Betriebszeitfenster, Kapitel 6.3.2) identifizierbar.

Als Maß zur Beurteilung der absoluten Streuung der Leistungswerte wird für die diskreten Zeitwerte t der **Interquartilsabstand** IQA_t berechnet. Der Interquartilsabstand wird an dieser Stelle gegenüber der Standardabweichung verwendet, da es ein robusteres Maß gegenüber Ausreißern darstellt [139].

Ausreißer würden bei Verwendung der Standardabweichung einen zu großen Einfluss auf den Parameter haben. Dies ist insbesondere auf die zum Teil geringe Anzahl vorhandener Leistungswerte zurückzuführen. So liegen teilweise Datenreihen mit lediglich sieben Messtagen (eine Referenzwoche) vor. Die Einteilung nach Typtagen reduziert die vorhandenen Leistungswerte an den diskreten Zeitwerten zusätzlich.

Vor diesem Hintergrund beschreibt der Interquartilsabstand den Leistungsbereich, in dem sich die mittleren 50% der Leistungswerte je diskreten Zeitwert befinden [139]. Je größer der Interquartilsabstand, desto mehr streuen die Leistungswerte um den Median. Der Interquartilsabstand wird für die diskreten Zeitwerte t aus der Differenz zwischen dem dritten Quartil und dem ersten Quartil der Leistungswerte x_t berechnet (20):

$$IQA_t = \tilde{x}_{t,0,75} - \tilde{x}_{t,0,25} \quad (20)$$

IQA_t	Interquartilsabstand am diskreten Zeitwert t [kW]
$\tilde{x}_{t,0,75}$	Drittes Quartil [kW]
$\tilde{x}_{t,0,25}$	Erstes Quartil [kW]

Der Interquartilsabstand wird durch die in Abbildung 36 eingeblendeten orangefarbenen Boxplots visualisiert. Das untere Ende des Boxplots bildet das erste Quartil $\tilde{x}_{t,0,25}$ der Leistungswerte x_t . Das obere Ende des Boxplots bildet das dritte Quartil $\tilde{x}_{t,0,75}$ der Leistungswerte x_t . Die Differenz aus dem dritten und ersten Quartil ergibt für die diskreten Zeitwerte den Interquartilsabstand (in diesem Beispiel $IQA_{t,00:00h} = 0,39 \text{ kW}$). In diesem Leistungsbereich liegen demnach die mittleren 50% der Leistungswerte für den diskreten Zeitwert 00:00h.

An den äußeren Enden werden die Boxplots durch „Whisker“ ergänzt (vgl. Abbildung 36). Die Whisker liegen um das 1,5-fache des Interquartilsabstands vom ersten bzw. dritten Quartil entfernt [139]. Leistungswerte außerhalb der Whisker können als **potenzielle Ausreißer** identifiziert werden (siehe in Abbildung 36 rot markierter Leistungswert).

Um den Interquartilsabstand nicht für jeden der 96 diskreten Zeitwerte an Betriebs- und Ruhetagen bewerten zu müssen, wird das arithmetische Mittel IQA_{avg} der Zeitwerte im Ruhezeitfenster (RZ) und Betriebszeitfenster (BZ) als relevanter Parameter zur Beurteilung des Lastverhaltens berechnet (21):

$$IQA_{avg} = \frac{1}{n} \times \sum_{t=1}^n IQA_t \quad (21)$$

IQA_{avg}	Mittlerer Interquartilsabstand je Zeitfenster (RZ/BZ) [kW]
n	Anzahl Leistungswerte je Zeitfenster (RZ/BZ) [-]
IQA_t	Interquartilsabstand an diskreten Zeitwerten je Zeitfenster (RZ/BZ) [kW]

Als Maß zur Beurteilung der relativen Streuung an diskreten Zeitwerten wird zusätzlich der **Quartilsdispersionskoeffizient** QD_t eingeführt. Der Quartilsdispersionskoeffizient gilt als relatives Streuungsmaß und beschreibt die Streuung der mittleren 50% der Leistungswerte am diskreten Zeitwert t bezogen auf den Median \tilde{x}_t [142] (22):

$$QD_t = \frac{IQA_t}{\tilde{x}_t} \quad (22)$$

QD_t	Quartilsdispersionskoeffizient am diskreten Zeitwert t [-]
IQA_t	Interquartilsabstand am diskreten Zeitwert t [kW]
\tilde{x}_t	Median am diskreten Zeitwert t [kW]

Auch hier wird das arithmetische Mittel QD_{avg} der Zeitwerte im Ruhezeitfenster (RZ) und Betriebszeitfenster (BZ) berechnet (23):

$$QD_{avg} = \frac{1}{n} \times \sum_{t=1}^n QD_t \quad (23)$$

QD_{avg}	Mittlerer Quartilsdispersionskoeffizient je Zeitfenster (RZ/BZ) [kW]
n	Anzahl Leistungswerte je Zeitfenster (RZ/BZ) [-]
QD_t	Quartilsdispersionskoeffizient an diskreten Zeitwerten je Zeitfenster (RZ/BZ) [kW]

Eine Einordnung sowie eine Erläuterung zur Interpretation des Wertebereichs des mittleren Quartilsdispersionskoeffizienten erfolgt in Tabelle 39 (s. Folgeseite).

Tabelle 39: Einordnung Wertebereich mittlerer Quartilsdispersionskoeffizient

Einordnung Wertebereich	Erläuterung
$QD_{avg} \leq 0,05$	Geringe Streuung der Leistungswerte an diskreten Zeitwerten, homogenes Betriebsverhalten <i>Indikator</i> zur Identifikation von Datenreihen mit eindeutig erkennbarem Tageslastverlauf bzw. eindeutigem Betriebsverhalten zugehöriger elektrischer Verbraucher.
$0,05 \leq QD_{avg} \leq 0,55$	Hohe Streuung der Leistungswerte an diskreten Zeitwerten, heterogenes Betriebsverhalten Ein eindeutiger Tageslastverlauf ist in der Regel erkennbar, jedoch liegt an den diskreten Zeitwerten eine größere Streuung vor. Auffälligkeiten ergeben sich durch den Vergleich der Parameter parallel erfasster Messpunkte bzw. Datenreihen.
$QD_{avg} > 0,6$	Sehr hohe Streuung der Leistungswerte an diskreten Zeitwerten, sehr heterogenes Betriebsverhalten <i>Indikator</i> zur Identifikation von Datenreihen ohne eindeutig erkennbares Tageslastverlauf bzw. Betriebsverhalten. Elektrische Verbraucher werden zu unterschiedlichen Tageszeitpunkten „zufällig“ verwendet.

Die Einordnung des Wertebereichs ist auf der Basis von n=108 empirisch erfassten Datenreihen erfolgt. Abbildung 37 stellt dazu die absoluten Klassenhäufigkeit n_k für die berechneten mittleren Quartilsdispersionskoeffizienten der Datenreihen dar.

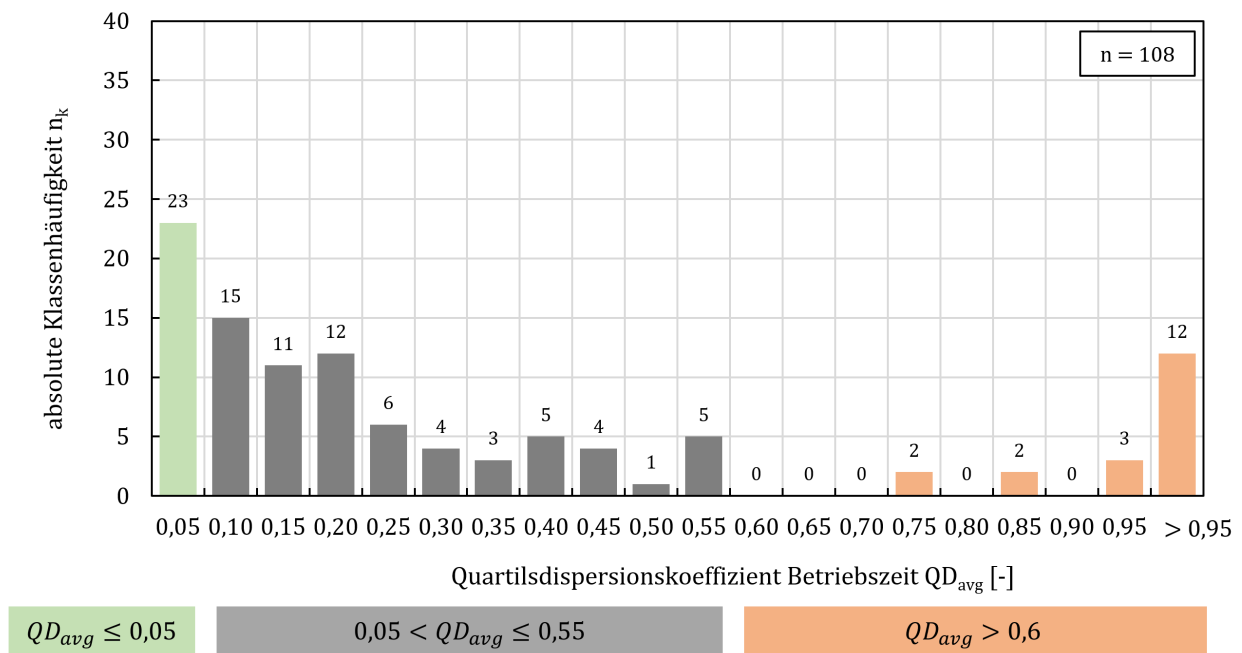


Abbildung 37: Einordnung Wertebereich Quartilsdispersionskoeffizient Betriebszeit anhand absoluter Klassenhäufigkeiten der in den Fallbeispielen erfassten Datenreihen (n=108)

Je Datenreihe ist eine Klassifizierung nach Betriebstagen und je Betriebstag eine Eingrenzung des Betriebszeitfensters erfolgt.

- Für den unteren Grenzwert wird ein Wert von $QD_{avg} \leq 0,05$ gewählt. Die zugehörigen Datenreihen weisen ein **homogenes Betriebs- bzw. Regelverhalten** auf.
- Als oberer Grenzwert wird ein Wert von $QD_{avg} > 0,6$ gewählt. Die Datenreihen dieses Wertebereichs weisen ein besonders **heterogenes Lastverhalten** über den Tagesverlauf auf. In der Regel ist in solchen Datenreihen kein eindeutiger Tageslastverlauf erkennbar. Elektrische Verbraucher werden dementsprechend zufällig bzw. nach Bedarf betrieben.

Anwendungsbeispiel

Bezogen auf die Referenzwoche des Bürogebäudes ergeben sich die in Tabelle 40 dargestellten Parameterwerte für den mittleren Interquartilsabstand IQA_{avg} und den mittleren Quartilsdispersionskoeffizienten QD_{avg} .

Tabelle 40: Parameter zur Beschreibung der Streuung an diskreten Zeitwerten für Betriebstage (Beispiel Referenzwoche Bürogebäude)

Mittl. Interquartilsabstand IQA_{avg} [kW]		Mittl. Quartilsdispersionskoeffizient QD_{avg} [-]	
Betriebszeit	Ruhezeit	Betriebszeit	Ruhezeit
8,33	1,64	0,06	0,03

Bei diesem konkreten Beispiel findet eine Eingrenzung der Betriebstage auf Montag-Freitag statt. Gemäß der Einordnung des Wertebereichs nach Tabelle 39 kann an Betriebstagen sowohl im Ruhezeitfenster als auch im Betriebszeitfenster ein zeitlich homogenes Betriebsverhalten detektiert werden. Dies lässt für die betrachteten Betriebstage auf einen eindeutigen Tageslastverlauf schließen.

In Abbildung 38 werden weitere Datenreihen mit unterschiedlichen Quartilsdispersionskoeffizienten aufgezeigt.

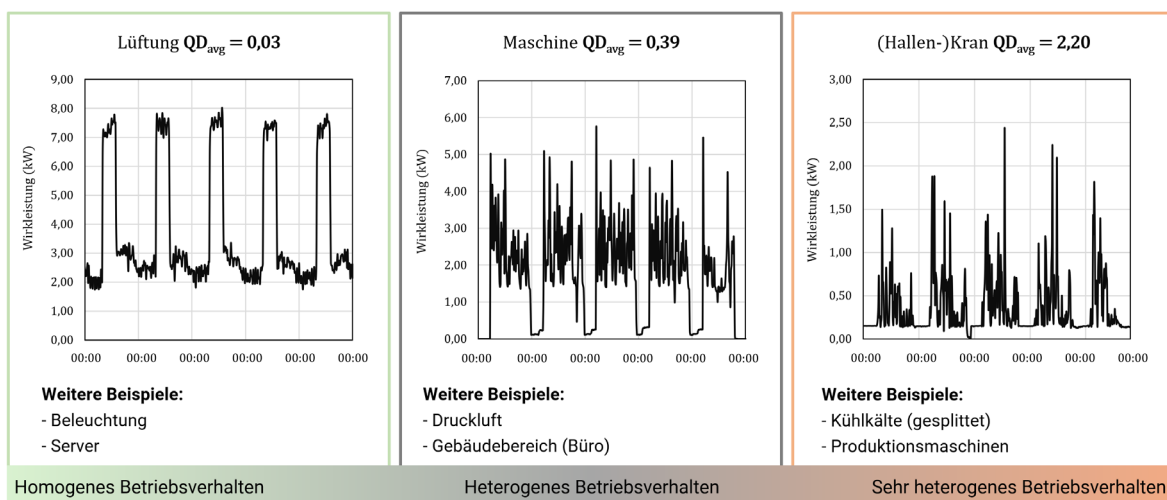


Abbildung 38: Anwendung des Quartilsdispersionskoeffizienten Betriebszeit auf beispielhafte Datenreihen

Die Verbrauchergruppe „Lüftung“ steht hier beispielhaft für eine Datenreihe mit geringer Streuung der Leistungswerte an den diskreten Zeitwerten der Betriebszeit (s. Abbildung 38, links). Die Lastgangkurve zeigt einen Ausschnitt von fünf Betriebstagen (Montag-Freitag). Es ist ein homogener Tageslastverlauf erkennbar. Die Lüftungsanlage wird zu fest definierten Zeitwerten betrieben und weist innerhalb des Betriebszeitfensters keine großen Schwankungen auf. Weitere Beispiele für diesen Wertebereich stellen Datenreihen „Beleuchtung“ und „Server“ dar.

Die in Abbildung 38 mittig dargestellte Datenreihe einer erfassten Maschine weist einen Quartilsdispersionskoeffizienten von 0,39 auf. Zwar ist der Tageslastverlauf anhand des Betriebes der Maschine erkennbar, jedoch liegt an den diskreten Zeitwerten während der Betriebszeit eine größere Streuung der Leistungswerte vor. Weitere Beispiele für diesen Wertebereich stellen Datenreihen „Druckluft“ und „Gebäudebereich (Büro)“ dar.

Beispielhaft für Messpunkte des Wertebereichs $QD_{avg} > 0,6$ wird in Abbildung 38 die Datenreihe „(Hallen-)Kran“ aufgezeigt. Das Lastverhalten an Betriebstagen ist durch den kurzfristigen, bedarfsgerechten Betrieb des Krans zu unterschiedlichen Zeitwerten charakterisiert. Dadurch liegt kein eindeutig erkennbarer Tageslastverlauf vor. Weitere Beispiele für diesen Wertebereich sind Produktionsmaschinen und Kühlsysteme, die im Parallelverbund mit zwei oder mehr einzelnen Geräten betrieben werden (bspw. um die Betriebsstundenzahl zu reduzieren oder eine redundante Kälteversorgung sicherzustellen).

6.4 Entwicklung Datenanalyse-Plan

Ziel dieses Kapitels ist die Entwicklung eines fallunabhängigen Datenanalyse-Plans zur Auswertung der gemäß Messkonzept erhobenen Messdaten. Dazu werden standardisierte Datenanalysen entwickelt und hinsichtlich Motivation, Ziele sowie dem Grundprinzip erläutert. Darüber hinaus erfolgt eine Bewertung der Aussagekraft und Bedeutung der jeweiligen Analyseergebnisse. Die standardisierten Datenanalysen werden in zwei Bereiche eingeteilt:

- **Disaggregationsanalysen:** Die Analysen basieren unmittelbar auf der im Messkonzept (s. Kapitel 5) festgelegten Messmethode und der Aufschlüsselung (Disaggregation) des Stromverbrauchs nach Hierarchie-Ebenen in der elektrischen Verteilung bzw. erfasster Messpunkte. Es erfolgt sowohl eine allgemeine Disaggregation des Stromverbrauchs (Verbrauchsdisaggregation, Kapitel 6.4.1) als auch die Disaggregation für die spezifischen Merkmale Grundlast (Kapitel 6.4.2) und Lastspitzen (Kapitel 6.4.3).
- **Lastprofil-Charakterisierung:** In der Datenanalyse Lastprofil-Charakterisierung werden alle Analysen zur Lastcharakteristik zusammengefasst (Kapitel 6.4.4). Die Lastprofil-Charakterisierung erfolgt basierend auf den in Kapitel 6.3 vorgestellten Berechnungsverfahren.

Schließlich werden in Kapitel 6.4.5 Limitierungen der entwickelten Datenanalysen aufgezeigt. Auf dieser Basis wird ein standardisierter Datenanalyse-Plan entwickelt.

6.4.1 Verbrauchsdisaggregation

Basierend auf der im Messkonzept (Kapitel 5) entwickelten Methode der parallelen Erfassung von Messpunkten in der elektrischen Verteilung kann der Gesamtstromverbrauch an einer Messlokation aufgeschlüsselt bzw. disaggregiert werden. Dies erlaubt eine Zuordnung des Gesamtstromverbrauchs auf Teilbereiche bzw. elektrische Verbraucher. Dadurch wird zum einen ein Grundverständnis über die Verteilung des Gesamtstromverbrauchs geschaffen. Weiterhin können auch Prioritäten für aufbauende Detailanalysen identifiziert werden (vgl. [100]).

Darüber hinaus werden anhand dieser Datenanalysen relevante Energieverbraucher, die für den wesentlichen Energieeinsatz verantwortlich sind (engl. significant energy use, SEU) identifiziert und anhand ihres Anteils am Gesamtstromverbrauch eingeordnet. Beim SEU handelt es sich um Abschnitte, Bereiche oder elektrische Verbraucher mit einem hohen Anteil am Gesamtstromverbrauch der elektrischen Verteilung, einem hohen Potenzial für Verbesserungen oder einer hohen Anschlussleistung [44].

Im Zuge des vorliegenden Mess- und Analysekonzeptes kann der SEU anhand des Stromverbrauchsanteils erfasster Messpunkte am Gesamtstromverbrauch lokalisiert werden. Dies ist allerdings nur für messtechnisch erfasste Verbrauchergruppen (VG) möglich, da diese eine eindeutige Zuordnung des Stromverbrauchs auf die angeschlossenen elektrischen Verbraucher erlauben.

Der Schwellenwert zur Einstufung als wesentlicher Energieverbraucher kann basierend auf Auswertungen der Fallbeispiele und Literaturwerten bei einem Anteil von 10% des Gesamtstromverbrauchs festgelegt werden (vgl. [144]). Identifizierte SEU können in weiterführenden Detailanalysen gezielt betrachtet werden, um Ineffizienzen zu ermitteln und geeignete Effizienzmaßnahmen zu definieren.

In Tabelle 41 werden die Motivation sowie die Ziele der Datenanalyse Verbrauchsdisaggregation zusammenfassend aufgeführt.

Tabelle 41: Motivation und Ziele Datenanalyse Verbrauchsdisaggregation

Motivation	Ziele
Ursachen und Details zur Zusammensetzung des Gesamtstromverbrauchs einer elektrischen Haupt- oder Unterverteilung sind nicht bekannt	Möglichst vollständige Disaggregation des Verbrauchs der elektrischen Verteilung auf die erfassten Messpunkte
Relevante Energieverbraucher sind nicht bekannt	Identifikation relevanter Stromverbraucher

Im Falle mehrerer parallel erfasster Messpunkte einer elektrischen Haupt- oder Unterverteilung kann der Gesamtstromverbrauch der Verteilung (Input-Datenreihe) auf die Output-Datenreihen (z.B. Gebäudeteile, weitere elektrische Unterverteilungen oder Verbrauchergruppen) aufgeschlüsselt werden (s. Abbildung 39, Folgeseite).

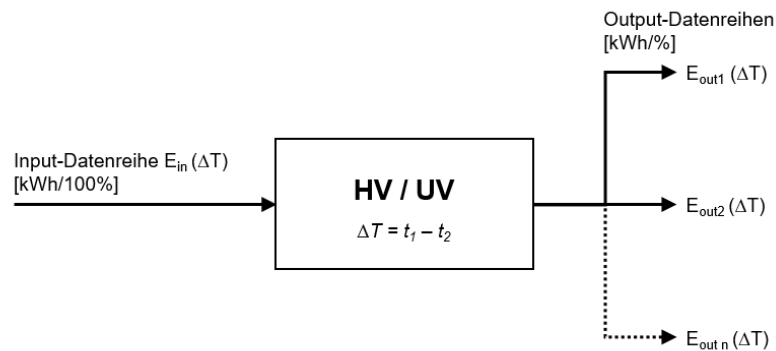


Abbildung 39: Grundprinzip Verbrauchsdissaggregation

Im Hinblick auf das vorgestellte Messkonzept wird die Verbrauchsdissaggregation somit wie folgt umgesetzt: In einem definierten Zeitraum ΔT (z.B. einer Referenzwoche) wird der Stromverbrauch der Input-Datenreihe E_{in} auf die Output-Datenreihen $E_{out\ n}$ aufgeteilt. Dies kann in absoluten Zahlen (Kilowattstunden, [kWh]) oder als prozentualer Anteil des eingehenden Lastflusses E_{in} , der 100% entspricht, erfolgen. Der Stromverbrauch einzelner erfasster Datenreihen $E_{in/out}$ wird basierend auf einem vorliegenden, aufbereiteten Messdatensatz (vgl. Kapitel 6.1.2) wie folgt berechnet (24):

$$E_{in/out} = \sum_{i=1}^n x_i \times 0,25h \quad (24)$$

$E_{in/out}$ Stromverbrauch der Input- bzw. Output-Datenreihe [kWh]

x_i Leistungswerte der Datenreihe [kW]

Nach dem Top-Down-Messprinzip beginnt die Verbrauchsdissaggregation an der Hierarchie-Ebene „Betrieb/Standort“. Dabei wird in der Regel der Stromverbrauch der elektrischen Hauptverteilung (auch NSHV) disaggregiert. Neben elektrischen Hauptverteilungen (HV) kann der Stromverbrauch auch an elektrischen Unterverteilungen (UV) aufgeschlüsselt werden. Bei Verbrauchergruppen ist eine weitere Disaggregation des Stromverbrauchs ebenfalls möglich (bspw. Disaggregation auf elektrische Einzelverbraucher). Unter Beachtung des messtechnischen Aufwands sowie technischer Einschränkungen (vgl. Kapitel 5.4.2) sollte eine Verbrauchsdissaggregation bei Verbrauchergruppen allerdings nur im Zuge von Detailanalysen umgesetzt werden.

Die Auswertung der Datenanalyse kann in einem ersten Schritt auf Basis der erfassten Messpunkte erfolgen. Tabelle 42 (s. Folgeseite) stellt beispielhaft die Ergebnisse der Verbrauchsdissaggregation nach Messpunkten für das Fallbeispiel Gerichtsgebäude (s. Kapitel 6.5.1) tabellarisch dar.

Tabelle 42: Ergebnisse Verbrauchsdisaggregation nach Messpunkten (Fallbeispiel Gerichtsgebäude)

Einstufung	Messpunkt	Stromverbrauch $E_{in/out}$ [kWh]*	Anteil Verbrauch [%]
Input (HV)	HV Trafo 1+2	71.513	100
Output (UV)	HUV5	11.536	16,1
	HUV6	9.620	13,5
	HUV3	8.736	12,2
	HUV1	8.132	11,4
	HUV2	7.459	10,4
	UV Küche	6.700	9,4
	HUV7	6.262	8,8
	$E_{out, UV}$		58.445
Output (VG)	VG EDV/Server	6.302	8,8
	VG Heizungspumpen	3.599	5,0
	VG Kälte	2.461	3,4
	VG Aufzug	108	0,2
	$E_{out, VG}$	12.470	17,4
	$E_{out, UV+VG}$	70.915	99,2
	E_{diff} (nicht erfasst)	598	0,8

*Bezogen auf die gesamte Messreihe (29 Messtage).

Dabei erfolgt für alle Messpunkte gemäß Abbildung 39 eine Einstufung nach Input- bzw. Output-Datenreihe sowie elektrischer Hierarchie-Ebene (HV, UV, VG). Je Hierarchie-Ebene wird der Stromverbrauch sowie der anteilige Verbrauch der Messpunkte aufsummiert, um den Anteil am Gesamtstromverbrauch zu bilanzieren (s. $E_{out,UV}$ und $E_{out,VG}$). Eine Visualisierung der Ergebnisse dieser Datenanalyse ist beispielsweise in Form von Sankey-Diagrammen möglich (vgl. Kapitel 6.5).

Anhand der absoluten und prozentualen Anteile der erfassten Messpunkte am Gesamtstromverbrauch liefert diese Analyse die folgenden Erkenntnisse:

- Insgesamt können in diesem Beispiel ca. **99,2%** des Gesamtstromverbrauchs auf die erfassten Messpunkte aufgeschlüsselt werden (vgl. $E_{out, UV+VG}$, Tabelle 42). Dementsprechend wurden etwa **0,8%** des Gesamtstromverbrauchs nicht messtechnisch erfasst. Die prozentualen Werte können als Parameter verwendet werden, um den Anteil des disaggregierten Stromverbrauchs an einer Messlokation zu bewerten. Ziel sollte ein möglichst hoher disaggregierter Stromverbrauch $E_{out,UV+VG}$ sein, der eindeutig den erfassten Messpunkten zugeordnet werden kann (vgl. Tabelle 41).
- Insgesamt können in diesem Beispiel ca. **17,4%** des Gesamtstromverbrauchs eindeutig einer elektrischen Verbrauchergruppe (VG) zugeordnet werden. Ein entsprechend hoher Anteil von ca. **81,7%** des Gesamtstromverbrauchs verteilt sich auf die erfassten elektrischen Unterverteilungen auf (UV). Dieser Stromverbrauch kann basierend auf den Messdaten nicht

eindeutig einer einzelnen elektrischen Verbrauchergruppe zugeordnet werden. Die prozentualen Werte können als Parameter verwendet werden, um den Anteil des eindeutig auf Verbrauchergruppen disaggregierten Stromverbrauchs an einer Messlokation zu bewerten. Ziel sollte ein möglichst hoher disaggregierter Stromverbrauch $E_{out,VG}$ sein.

- Zwar wurden in der Messreihe drei größere Verbrauchergruppen erfasst (vgl. Tabelle 42), jedoch deutet der Anteil der erfassten elektrischen Unterverteilungen am Gesamtstromverbrauch (**81,7%**) darauf hin, dass weitere wesentliche Energieverbrauch (SEU) diesen Unterverteilungen zuzuordnen ist.

In einem zweiten, erweiterten Schritt können die erfassten Messpunkte gemäß VDI 3807 Blatt 4 [66, p. 5] einem spezifischen Verwendungszweck zugeordnet werden (vgl. Kapitel 2.2.3). Damit ist eine Zuordnung des Stromverbrauchs der erfassten Messpunkte zum Einsatzbereich elektrischer Energie in einem Gebäude möglich.

6.4.2 Grundlast-Disaggregation

Die Datenanalyse Grundlast-Disaggregation hat zum Ziel, Transparenz über die Gesamtgrundlast eines Messobjektes bzw. einer elektrischen Verteilung schaffen. Um das Potenzial zur Reduktion der Grundlast zu identifizieren, müssen jedoch zunächst Informationen über die Zusammensetzung der Gesamtgrundlast eines Messobjektes vorliegen und Grundlast-Verbraucher identifiziert werden. In einem ersten Schritt kann anhand der RLM-Lastgangdaten die Gesamtgrundlast eines Messobjektes berechnet und anhand des Grundlast-Faktors k_{base} beurteilt werden (vgl. Kapitel 6.3.4).

Mit der parallelen Erfassung mehrerer Messpunkte an einer elektrischen Verteilung ist es möglich, die Gesamtgrundlast auf einzelne Messpunkte aufzuschlüsseln. Eine standardisierte Datenanalyse zur Grundlast-Disaggregation ist daher ein wichtiger Bestandteil des Analysekonzeptes. Die Motivation und Ziele dieser Datenanalyse sind zusammenfassend in Tabelle 43 dargestellt.

Tabelle 43: Motivation und Ziele Datenanalyse Grundlast-Disaggregation

Motivation	Ziele
Ursachen und Details zur Zusammensetzung der Gesamtgrundlast einer elektrischen Haupt- oder Unterverteilung sind nicht bekannt	Möglichst vollständige Disaggregation der Gesamtgrundlast der elektrischen Verteilung auf die erfassten Messpunkte
Grundlast-Verbraucher sind nicht bekannt	Identifikation von Grundlast-Verbrauchern

Analog zum Ansatz der Verbrauchsdisaggregation wird die Gesamtgrundlast einer gemessenen Hierarchie-Ebene (z. B. HV oder UV) aufgeschlüsselt (s. Abbildung 40). Dies wird standardisiert wie folgt umgesetzt. Zunächst wird die durchschnittliche Grundlast der Input-Datenreihe P_{base_input} sowie der Output-Datenreihen P_{base_output} berechnet (vgl. Kapitel 6.3.4). Die Berechnung der Grundlast sollte auf der Basis des gesamten vorliegenden Messzeitraums erfolgen. Anschließend werden

sowohl die absoluten Werte als auch die prozentualen Anteile jeder Unterverteilung bzw. Verbrauchsgruppe als Teil der Gesamtgrundlast dargestellt. Anhand der Einzelwerte und Anteile kann die Gesamtgrundlast auf erfasste Verbrauchergruppen und Unterverteilungen aufgeschlüsselt werden.

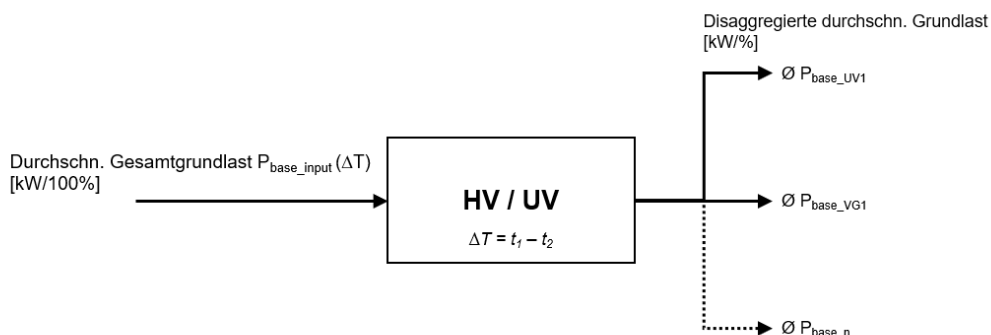


Abbildung 40: Grundprinzip Grundlast-Disaggregation

Die Ergebnisse der Grundlast-Disaggregation werden an dieser Stelle beispielhaft anhand der Messreihe des Fallbeispiels Gerichtsgebäude (Kapitel 6.5.1) aufgezeigt. Tabelle 44 zeigt für die erfassten Messpunkte jeweils die berechnete Grundlast P_{base} sowie den prozentualen Anteil an der Gesamtgrundlast der Input-Datenreihe „HV Trafo1+2“. Für die erfassten Unterverteilungen (UV) und Verbrauchergruppen (VG) sind die erfassten Messpunkte der Größe nach geordnet.

Tabelle 44: Ergebnisse Grundlast-Disaggregation nach Messpunkten (Fallbeispiel Gerichtsgebäude)

Einstufung	Messpunkt	Grundlast P_{base} [kW]	Anteil Gesamtgrundlast [%]
Input (HV)	HV Trafo 1+2	48,87	100
Output (UV)	HUV5	5,87	12,0
	HUV3	5,02	10,3
	HUV1	5,02	10,2
	HUV6	4,49	9,2
	HUV2	4,24	8,7
	UV Küche	3,63	7,4
	HUV7	2,48	5,1
		$P_{base, UV}$	30,73
Output (VG)	VG EDV/Server	8,91	18,2
	VG Heizungspumpen	4,94	10,1
	VG Kälte	3,10	6,2
	VG Aufzug	0,0	0,0
		$P_{base, VG}$	16,95
	$P_{base, UV+VG}$	47,68	98,0
	nicht erfasst	1,19	2,0

Die Datenanalyse liefert die folgenden Erkenntnisse:

- Insgesamt können in diesem Beispiel ca. **98%** der Gesamtgrundlast auf die erfassten Messpunkte aufgeschlüsselt werden (vgl. $P_{base,UV+VG}$, Tabelle 44). Dementsprechend wurden etwa **2%** der Gesamtgrundlast nicht messtechnisch erfasst. Diese prozentualen Werte können als Parameter verwendet werden, um den Anteil der disaggregierten Gesamtgrundlast an einer Messlokation zu bewerten. Ziel sollte eine möglichst hohe disaggregierte Gesamtgrundlast $P_{base,UV+VG}$ sein, die eindeutig den erfassten Messpunkten zugeordnet werden kann (vgl. Tabelle 43).
- Insgesamt können in diesem Beispiel ca. **35,0%** der Gesamtgrundlast eindeutig einer elektrischen Verbrauchergruppe (VG) zugeordnet werden. Dementsprechend sind etwa **63,0%** der Gesamtgrundlast den erfassten elektrischen Unterverteilungen (UV) zuzuordnen. Diese Grundlast kann basierend auf den Messdaten nicht eindeutig einzelnen elektrischen Verbrauchern zugeordnet werden. Die prozentualen Werte können als Parameter verwendet werden, um den Anteil der eindeutig auf Verbrauchergruppen disaggregierten Grundlast an einer Messlokation zu bewerten. Ziel sollte eine möglichst hohe disaggregierte Grundlast $P_{base,VG}$ sein, die eindeutig einzelnen Verbrauchergruppen zugeordnet werden kann. So können relevante Grundlast-Verbraucher schnell identifiziert werden.
- Die Messpunkte *VG EDV/Server* (ca. **18,2%**) und *VG Heizungspumpen* (ca. **10,1%**) können als große Grundlast-Verbraucher identifiziert werden. Jedoch deutet der Anteil der erfassten elektrischen Unterverteilungen an der Gesamtgrundlast (**63,0%**) darauf hin, dass weitere wesentliche Grundlast-Verbraucher diesen Unterverteilungen zuzuordnen sind.

Eine Visualisierung der Ergebnisse dieser Datenanalyse ist beispielsweise in Form von Sankey-Diagrammen möglich (vgl. Kapitel 6.5).

In einem zweiten, erweiterten Schritt können die erfassten Messpunkte gemäß VDI 3807 Blatt 4 [66, p. 5] einem spezifischen Verwendungszweck zugeordnet werden (vgl. Kapitel 2.2.3). Damit ist eine Zuordnung der Grundlast der erfassten Messpunkte zu den Einsatzbereichen elektrischer Energie in einem Gebäude möglich.

Die Grundlast-Disaggregation bietet einen ersten Ansatz, um relevante Grundlast-Verbraucher zu identifizieren. Um den Anteil des Grundlastverbrauchs am Gesamtverbrauch eines erfassten Messpunktes zu bewerten, können zusätzlich der Grundlast-Faktor k_{base} (vgl. Kapitel 6.3.4) sowie die berechnete mittlere Grundlast P_{base} herangezogen werden. So können unter anderem automatisiert Messpunkte identifiziert werden, deren Verbrauch maßgeblich zur Gesamtgrundlast eines Messobjektes beiträgt.

6.4.3 Lastspitzen-Disaggregation

Die Anwendung der Datenanalyse Lastspitzen-Disaggregation kann in zwei Schritten erfolgen: In diesem Fall besteht der erste Schritt in der Ermittlung der Lastspitzen, d. h. in der Analyse des Zeitraums und der Häufigkeit des Auftretens von Lastspitzen [145].

Schritt 1: Ermittlung der Lastspitzen

- Analyse der RLM-Lastgangdaten anhand Lastspitzen-Faktor k_{peak} (vgl. Kapitel 6.3.5) und Laständerungsrate LR_{avg} (vgl. Kapitel 6.3.6)
- Anhand dieser Parameter kann grundsätzlich eine Aussage über das Auftreten kurzfristiger Maximalwerte in der Datenreihe getroffen werden.

Schritt 2: Aufschlüsselung der Lastspitzen

- Zusammensetzung der Lastspitzen im Gesamtlastprofil untersuchen und Zuordnung der Lasten auf parallel erfassten Messpunkte
- Identifikation elektrischer Einzelverbraucher oder Verbrauchergruppen, die Lastspitzen verursachen
- Schaffung einer Grundlage zur Umsetzung geeigneter Maßnahmen für die Reduktion von Lastspitzen

Die Motivation und Ziele der Datenanalyse Lastspitzen-Disaggregation werden in Tabelle 45 zusammengefasst:

Tabelle 45: Motivation und Ziele Datenanalyse Lastspitzen-Disaggregation

Motivation	Ziele
Ursachen und Details zur Zusammensetzung der Lastspitzen einer elektrischen Haupt- oder Unterverteilung sind nicht bekannt	Möglichst vollständige Disaggregation der Lastspitzen der elektrischen Verteilung auf die erfassten Messpunkte
Lastspitzen-Verbraucher sind nicht bekannt	Identifikation von Lastspitzen-Verbrauchern

Abbildung 41 veranschaulicht das Grundprinzip der Lastspitzen-Disaggregation für aufbereitete Messdatensätze.

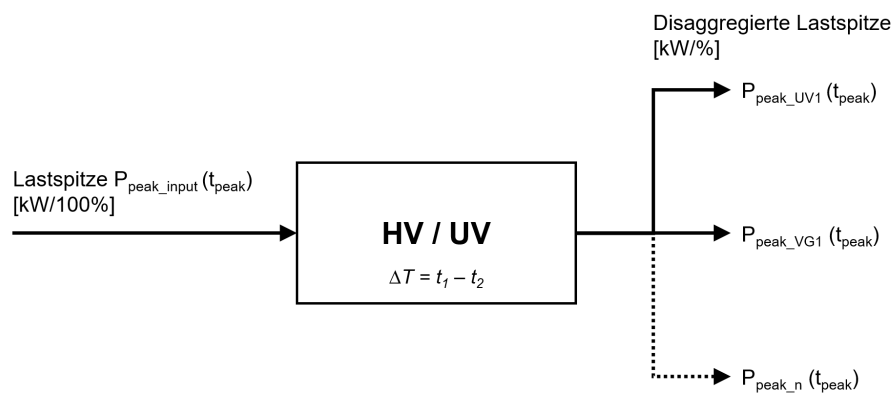


Abbildung 41: Grundprinzip Lastspitzen-Disaggregation

Dazu sind die folgenden Schritte zu beachten:

- Bestimmung der Zeitpunkte t_{peak} , zu denen die höchsten Lastspitzen der Input-Datenreihe einer erfassten Hierarchie-Ebene der elektrischen Verteilung aufgetreten sind.
- Erfassung der Leistungswerte der Output-Datenreihen P_{peak_output} zum Zeitpunkt t_{peak} . So kann die Lastspitze der Input-Datenreihe zum Zeitpunkt t_{peak} auf die Output-Datenreihen erfasster Messpunkte disaggregiert werden.

Die Leistungswerte der erfassten Messpunkte zum Zeitpunkt t_{peak} können sowohl als Absolutwert [kW] als auch anteilig als Prozentwert der Lastspitze der Input-Datenreihe P_{peak_input} betrachtet werden. Grundsätzlich sind auch der Anteil der Gesamtdisaggregation zum Zeitpunkt t_{peak} der Lastspitze sowie der respektiv nicht erfasste Anteil relevant, um die Aussagekraft der Datenanalyse zu beurteilen.

Um im Detail zu untersuchen, welcher Messpunkt zum Zeitpunkt t_{peak} eine signifikante Laständerung aufweist, sollten auch die Leistungswerte unmittelbar vor bzw. nach dem Auftreten der Lastspitze betrachtet werden. Durch die Berechnung des Lastgradienten zum Zeitpunkt t_{peak} können so die Messpunkte identifiziert werden, die maßgeblich zur Entstehung der Lastspitze beitragen. Der Lastgradient LG_{peak} kann wie folgt berechnet werden (25):

$$LG_{peak} = P_{t_{peak}} - P_{t_{peak}-1} \quad (25)$$

LG_{peak}	Lastgradient zum Zeitpunkt t_{peak} [kW]
$P_{t_{peak}}$	Leistung zum Zeitpunkt t_{peak} [kW]
$P_{t_{peak}-1}$	Leistung zum Zeitpunkt t_{peak-1} [kW]

Entsprechend der Formel kann ein positiver Wert für LG_{peak} als Lastanstieg und ein negativer Wert als Lastreduktion des Messpunktes interpretiert werden. Die für die Lastspitzen verantwortlichen Messpunkte sind in der Regel über den höchsten Lastgradienten der erfassten Messpunkte zu identifizieren. Um die Ursache der Lastspitzen eindeutig zu identifizieren, sollte die Analyse nicht nur an einer einzelnen Lastspitze, sondern beispielsweise an den **Top 5 Lastspitzen des Messzeitraums** durchgeführt werden.

Die Ergebnisse der Lastspitzen-Disaggregation werden an dieser Stelle beispielhaft anhand der Messreihe des Fallbeispiels Gerichtsgebäude (Kapitel 6.5.1) aufgezeigt. Tabelle 46 (s. Folgeseite) zeigt die Top 5 Lastspitzen des Messzeitraums sowie den Lastgradienten LG_{peak} der parallel erfassten Messpunkte.

Tabelle 46: Ergebnisse Lastspitzen-Disaggregation (Fallbeispiel Gerichtsgebäude)

Lastspitze Nr.	1	2	3	4	5
Leistung P_{peak} [kW]	287,7	286,0	283,4	279,3	278,2
Zeitpunkt t_{peak}	13.12.2021 10:15h	14.12.2021 12:15h	14.12.2021 10:00h	14.12.2021 11:15h	21.12.2021 08:30h
Anteil Disaggregation [%]	> 99	> 99	> 99	> 99	> 99

Messpunkt	Lastgradient LG_{peak} [kW]				
HV Trafo 1+2	20,40	22,00	16,30	9,30	17,20
HUV1	7,20	-0,84	1,16	0,79	0,97
HUV2	-1,00	-1,20	2,60	-1,40	2,90
HUV3	-2,60	-1,62	-0,07	-2,72	0,69
HUV5	-3,71	0,97	-1,46	-1,40	0,25
HUV6	-2,40	-1,30	1,80	0,10	-1,20
HUV7	0,29	0,30	3,02	-0,17	-0,57
UV Küche	22,44	25,17	8,57	14,25	13,75
VG EDV/Server	0,00	0,00	-0,01	-0,01	-0,01
VG Kälte	0,20	0,20	-0,10	0,30	0,60
VG Heizungspumpen	0,40	0,00	0,00	0,00	0,00
VG Aufzug	0,00	0,00	0,10	0,00	0,00

Aus den Ergebnissen dieser Datenanalyse können die folgenden Erkenntnisse abgeleitet werden:

- Die Top 5 Lastspitzen können in diesem Beispiel zu **> 99%** auf die erfassten Messpunkte aufgeschlüsselt werden (s. Anteil Disaggregation, Tabelle 46). Demnach liegt eine nahezu vollständige Disaggregation der Lastspitzen auf die erfassten Messpunkte vor. Der Anteil der Disaggregation sollte möglichst hoch sein, um die Zusammensetzung der Lastspitzen bestmöglich zu analysieren.
- Die Messpunkte mit der höchsten Laständerung zu den Zeitpunkten t_{peak} der Top 5 Lastspitzen können als Ursache für die in der Messreihe erfassten Lastspitzen identifiziert werden. In diesem Beispiel sind die Lastspitzen eindeutig auf die elektrischen Verbraucher des Messpunktes **UV Küche** zurückzuführen.

Eine differenzierte Betrachtung der Lastspitzen bezogen auf die einzelnen Datenreihen der erfassten Messpunkte ist u.a. anhand des Lastspitzen-Faktors sowie der Spitzenlast-Differenz möglich (vgl. Kapitel 6.3.5). Zusätzlich kann mit der Laständerungsrate ein weiterer Indikator für das Auftreten von Lastspitzen herangezogen werden. Anhand dieser Parameter ist eine systematische Identifikation von Messpunkten möglich, die hinsichtlich des Auftretens von Lastspitzen und Lastspitzen-Verbrauchern im Detail betrachtet werden sollten.

Mit der Datenanalyse Lastspitzen-Disaggregation ist die Identifikation elektrischer Verbraucher möglich, die während des Messzeitraums für die aufgetretenen Lastspitzen verantwortlich waren. Die Datenanalyse kann somit als Grundlage für weitere Detailanalysen dienen, z. B. zur Ermittlung des Flexibilitätspotenzials der elektrischen Verbraucher, die für die Lastspitzen verantwortlich sind.

6.4.4 Lastprofil-Charakterisierung

Aufgrund des eingeschränkten Messzeitraums liefern Kurzzeitmessungen nur eine Momentaufnahme über den Energieverbrauch eines Messobjektes. Basierend auf dem Analysekonzept soll jedoch aufgezeigt werden, dass das Betriebsverhalten elektrischer Verbraucher auf Grundlage der Messdatensätze interpretiert werden kann.

Dabei gilt im Allgemeinen: Je detaillierter der Stromverbrauch in einer Messreihe auf einzelne Verbrauchergruppen oder elektrische Einzelverbraucher disaggregiert werden kann (vgl. Hierarchie-Ebenen, Kapitel 6.1.1), desto besser können sowohl die Lastcharakteristik als auch das Betriebsverhalten analysiert und interpretiert werden (vgl. *Liebl et al.* [111]).

Durch Anwendung der in Kapitel 6.3 vorgestellten **Berechnungsverfahren** kann eine Grundlage geschaffen werden, die erfassten Datenreihen systematisch hinsichtlich der Lastprofil-Charakteristik zu beurteilen. So werden Auffälligkeiten und Ineffizienzen in den erfassten Messpunkten anhand der Parameter lokalisiert und einzelnen elektrischen Verbrauchern zugeordnet. Dadurch wird eine Basis zur Umsetzung von Optimierungen und Effizienzmaßnahmen geschaffen. Die Motivation und Ziele der Datenanalyse Lastprofil-Charakterisierung werden in Tabelle 47 zusammengefasst:

Tabelle 47: Motivation und Ziele Datenanalyse Lastprofil-Charakterisierung

Motivation	Ziele
Lastcharakteristik (Betriebsverhalten) einzelner Unterverteilungen, Verbrauchergruppen und Einzelverbraucher ist nicht bekannt	Beschreibung der Lastcharakteristik anhand von Parametern, um eine Grundlage zur Umsetzung von Optimierungen bzw. Effizienzmaßnahmen zu schaffen.

Die Lastprofil-Charakterisierung erfolgt durch die Anwendung der entwickelten Berechnungsverfahren auf die erfassten Datenreihen. Die einzelnen Berechnungsverfahren wurden bereits detailliert in Kapitel 6.3 vorgestellt. An dieser Stelle werden die Ergebnisse der Lastprofil-Charakterisierung beispielhaft anhand des Vergleichs zweier unterschiedlicher Systeme (Lüftungs- und Kompressorsystem) vorgestellt. Dazu werden die Berechnungsverfahren „Ruhezeit- und Betriebszeitfenster“, „Leistungsspektrum“, „Laständerung“ und „Streuung an diskreten Zeitwerten“ auf die Datenreihen beider Systeme angewendet.

Ruhezeit- und Betriebszeitfenster

Gemäß des in Kapitel 6.3 beschriebenen Berechnungsverfahrens können die Datenreihen in ein Ruhezeit- sowie ein Betriebszeitfenster eingeteilt werden. Für die beiden unterschiedlichen Systeme wird ein Vergleich basierend auf den relativen Parametern Stromverbrauchs-Anteil e (%) und zeitlicher Anteil t (%) je Zeitfenster durchgeführt.

Die berechneten Parameter sind für beide Systeme in Tabelle 48 dargestellt.

Tabelle 48: Vergleich der Ruhezeit- und Betriebszeitfenster für das Lüftungs- und Kompressorsystem

System	Stromverbrauchs-Anteil e [%]		Zeitl. Anteil t [%]	
	Betriebszeit	Ruhezeit	Betriebszeit	Ruhezeit
Lüftungssystem	99	1	52	48
Kompressorsystem	87	13	56	44

Obwohl die Datenreihen beider Systeme in zwei nahezu gleich große Zeitfenster eingeteilt wurden (s. zeitl. Anteil), fällt der deutlich höhere Stromverbrauchs-Anteil des Kompressorsystems im Ruhezeitfenster (13%) gegenüber dem Lüftungssystem (1%) auf. Dies lässt auf eine höhere Grundlast des Kompressorsystems schließen. Ein Vergleich der Grundlast-Faktoren k_{base} bestätigt den höheren Grundlast-Anteil am Gesamtverbrauch in der Datenreihe des Kompressorsystems (0,3 bzw. 30%) im Vergleich zum Lüftungssystem (0,02 bzw. 2%).

Leistungsspektrum

In Abbildung 42 sind die Leistungsspektren des Lüftungs- und Kompressorsystems dargestellt. Anhand der relativen Klassenhäufigkeiten h_k der Leistungsklassen können die Lastniveaus beider Systeme interpretiert werden (vgl. Kapitel 6.3.3).

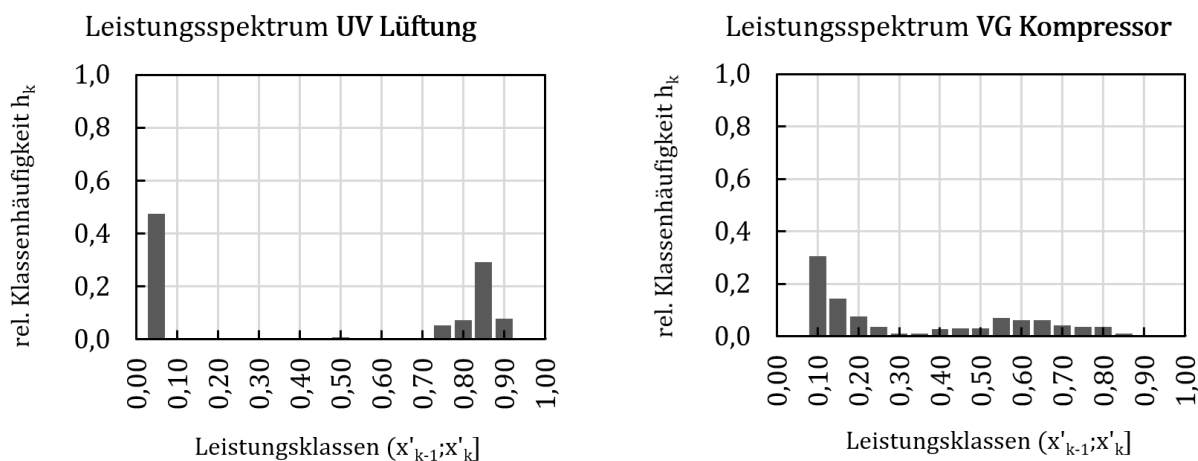


Abbildung 42: Vergleich der Leistungsspektren des Lüftungs- und Kompressorsystems

Die Leistungsspektren deuten jeweils auf ein Grundlast- sowie ein Betriebslastniveau hin. Beide Systeme können demnach in ein Betriebszeitfenster (gekennzeichnet durch das Betriebslastniveau) und ein Ruhezeitfenster (gekennzeichnet durch das Grundlastniveau) eingeteilt werden. In Tabelle 49 (s. Folgeseite) werden beide Lastniveaus anhand der Parameterwerte beschrieben.

Tabelle 49: Identifizierte Lastniveaus des Lüftungs- und Kompressorsystems

Lastniveau	Lüftungssystem		Kompressorsystem	
	Leistungskl.	Rel. Klassenh. h_k	Leistungskl.	Rel. Klassenh. h_k
Grundlastniveau	0,05	0,48	0,10	0,31
Betriebslastniveau	0,85	0,29	0,30-0,85	max. 0,07

Der Parametervergleich beider Systeme macht deutlich:

- Das Lüftungssystem weist je ein signifikantes Grundlast- und Betriebslastniveau auf ($h_k > 0,1$).
- Das Kompressorsystem weist nur ein signifikantes Grundlastniveau bei der Leistungsklasse 0,1 (5-10% der aufgetretenen Maximalleistung) auf. Da die benachbarte Leistungsklasse ebenfalls signifikant ist, deutet dies auf ein bezogen auf das Leistungsspektrum „weiteres“ Grundlastniveau bzw. eine größere Streuung der Leistungswerte als beim Lüftungssystem hin.
- Das Kompressorsystem weist kein signifikantes Betriebslastniveau auf (Bedingung $h_k > 0,1$). Die Leistungswerte des Betriebslastniveaus liegen in einem „weiten“ Leistungsbereich über die Klassen 0,30-0,85 verteilt.

Laständerung

Die Laständerung aufeinander folgender Leistungswerte über die Zeit kann anhand des Lastgradienten sowie der Laständerungsrate beschrieben werden (vgl. Kapitel 6.3.6). In Tabelle 50 sind die berechneten Parameter bezogen des Lüftungs- und Kompressorsystems für das Ruhezeit- und Betriebszeitfenster dargestellt.

Tabelle 50: Vergleich der Laständerung des Lüftungs- und Kompressorsystems

System	Mittl. Lastgradient LG_{avg} [kW/h]		Mittl. Laständerungsrate LR_{avg} [-]	
	Betriebszeit	Ruhezeit	Betriebszeit	Ruhezeit
Lüftungssystem	2,66	0,11	0,02	0,08
Kompressorsystem	5,66	0,52	0,27	0,13

Der Parametervergleich zeigt:

- Das Kompressorsystem weist im Mittel für das Betriebs- und Ruhezeitfenster eine dynamischere Laständerung auf, während die Laständerung des Lüftungssystems als statisch interpretiert werden kann (vgl. Einordnung Wertebereich LR_{avg} , Tabelle 37).
- Da das Lastverhalten des Kompressorsystems während der Ruhezeit dynamisch ist und zusätzlich ein hoher Grundlastverbrauch anliegt, sollte eine **Detailanalyse** durchgeführt wer-

den. In diesem Fall wäre die Lastganglinie des Kompressorsystems in einer höheren Messdatenaufösung (z.B. 10s) zu betrachten. So kann unter anderem überprüft werden, ob die Zykluszeiten eines taktenden Kompressors (Ein- und Ausschalten des Kompressors) in der Lastgangkurve mit höherer Auflösung erkennbar sind. Dadurch könnte bestätigt werden, dass das Kompressorsystem während der Ruhezeit nicht vollständig abgeschaltet wird.

Streuung an diskreten Zeitwerten

Für das Berechnungsverfahren der Streuung an diskreten Zeitwerten ist eine Klassifizierung der Datenreihen nach Tagestypen erforderlich (vgl. Kapitel 6.3.7). Der nachfolgende Vergleich beider Systeme erfolgt auf Basis der erfassten Betriebsstage. Es wird deutlich, dass die Datenreihe des Kompressorsystems sowohl im Betriebs- als auch im Ruhezeitfenster ein zeitlich heterogeneres Betriebs- und Regelverhalten aufweist (s. Tabelle 51).

Tabelle 51: Vergleich der Streuung an diskreten Zeitwerten für das Lüftungs- und Kompressorsystem

System	Mittl. Interquartilsabstand IQA_{avg} [kW]		Mittl. Quartilsdispersionskoeffizient QD_{avg} [%]	
	Betriebszeit	Ruhezeit	Betriebszeit	Ruhezeit
Lüftungssystem	0,75	0,04	0,02	0,12
Kompressorsystem	2,06	0,66	0,45	0,54

Der Parametervergleich beider Systeme verdeutlicht:

- Die höheren Parameterwerte des Kompressorsystems zur Betriebszeit ($QD_{avg} = 0,45$) zeigen, dass das System keinen eindeutigen Tageslastgang aufweist (vgl. Einordnung Wertebereich QD_{avg} , Tabelle 39).
- Das Lüftungssystem hingegen weist über die Zeitwerte der Betriebszeit ein homogenes Betriebsverhalten auf. Dies kann ein Indiz für ein zeitlich gesteuertes bzw. programmiertes Betriebs- bzw. Regelverhalten an Betriebstagen sein.
- Auffällig ist beim Kompressorsystem weiterhin der hohe mittlere Quartilsdispersionskoeffizient zur Ruhezeit. Verbunden mit dem hohen Grundlast-Faktor sowie der Laständerung kann dies ein weiteres Indiz dafür sein, dass das Kompressorsystem nachts nicht abgeschaltet wird.

Anhand der aufgezeigten Berechnungsverfahren zur Lastprofil-Charakterisierung ist es möglich, das Betriebsverhalten und die Charakteristik der elektrischen Verbraucher erfasster Datenreihen bzw. Messpunkte zu beurteilen und einzuordnen. Dies gilt insbesondere für die in einer Messreihe erfassten Verbrauchergruppen, die eindeutig Querschnittstechnologien wie Lüftungsanlagen, Druckluftanlagen oder Kälteanlagen zugeordnet werden. Auf der Basis der hergeleiteten Parameter und Indikatoren ist darüber hinaus ein Vergleich für gleiche Systeme (Lüftungssystem A vs. Lüftungssystem B) sowie unterschiedliche Systeme (Lüftungssystem vs. Kompressorsystem) möglich.

6.4.5 Standardisierung der Datenanalyse

In diesem Kapitel werden Limitierungen der aufgezeigten Datenanalyse-Formen untersucht und verglichen. Auf dieser Grundlage wird ein standardisierter Datenanalyse-Plan für Kurzzeitmessungen entwickelt. Hinsichtlich der Limitationen wird zwischen technischen Aspekten und analytischen Aspekten differenziert.

Die **technischen Aspekte** umfassen alle Einschränkungen, die bei der Anwendung des Messkonzeptes auftreten. Dabei können unter anderem Einschränkungen durch Unzugänglichkeit der Elektroinstallation oder limitiertes Messequipment entstehen (vgl. Kapitel 5.4.2). Nicht erfasste Unterverteilungen und Verbrauchergruppen können somit die Aussagekraft der Analyseergebnisse lindern. Dies gilt insbesondere für die identifizierten Disaggregationsanalysen.

Anhand der **analytischen Aspekte** kann das Ergebnis der standardisierten Datenanalysen bewertet werden. Dabei erfolgt eine Bewertung und Zuordnung nach den Analyseschritten Erkennung, Diagnose und Optimierung (s. Tabelle 52). Anhand der Tabelle wird deutlich, dass die Disaggregationsanalysen der Analysestufe „Erkennung“ zugeordnet wurden. Mit der Anwendung dieser Datenanalysen werden zunächst Lastflüsse, relevante Stromverbraucher sowie Grundlast- und Lastspitzen-Verbraucher erkannt und identifiziert. Damit bilden diese Analysen eine Grundlage für nachfolgende „Diagnosen“ und „Optimierungen“ (z.B. individuelle Detailanalysen und Auswertungen zu spezifischen Verbrauchern).

Tabelle 52: Definition der Analyseschritte und Zuordnung der standardisierten Datenanalysen

Analysestufe	Definition	Datenanalysen
Erkennung (<i>engl. Detection</i>)	Identifikation von Auffälligkeiten im Stromverbrauch (z.B. relevante Stromverbraucher, Grundlast- oder Lastspitzen-Verbraucher)	Disaggregationsanalysen Lastprofil-Charakterisierung
Diagnose (<i>engl. Diagnosis</i>)	Ermittlung der Ursachen identifizierter Auffälligkeiten (z.B. ineffiziente Regelung oder Verbrauchsmuster)	Lastprofil-Charakterisierung
Optimierung (<i>engl. Optimization</i>)	Ermittlung von Optimierungspotenzialen für eine effizientere Betriebsweise (z.B. Betriebsstundenoptimierung)	-

Die Lastprofil-Charakterisierung umfasst die Analyseschritte „Erkennung“ und „Diagnose“, da deren Anwendung bereits Rückschlüsse auf eine Beurteilung der Verbrauchs- und Betriebscharakteristik (z.B. einer Unterverteilung, einer Verbrauchergruppe oder eines Einzelverbrauchers) zulässt. Auf dieser Basis können weitere Detailanalysen (Analyseschritt „Diagnose“) vorgenommen werden, die zu Optimierungen des Last- und Betriebsverhaltens führen.

Zusammenfassend können die vier standardisierte Datenanalysen in einen standardisierten Datenanalyse-Plan integriert werden (s. Abbildung 43, Folgeseite). Dieser liefert eine Übersicht über die Datenquellen sowie eine Einordnung der entwickelten Datenanalysen gemäß der eingeführten Analyseschritte. Der Datenanalyse-Plan dient als standardisierter Analyse-Werkzeugkasten für durchgeführte

Kurzzeitmessungen mittels mobiler Messtechnik. Durch die Entwicklung des Analyse-Plans auf der Grundlage mehrerer durchgeführter Messkampagnen kann dieser nicht nur für die Analyse von Einzelfällen, sondern auch verallgemeinert für Effizienzanalysen im heterogenen Feld gewerblicher und öffentlicher Gebäude eingesetzt werden.

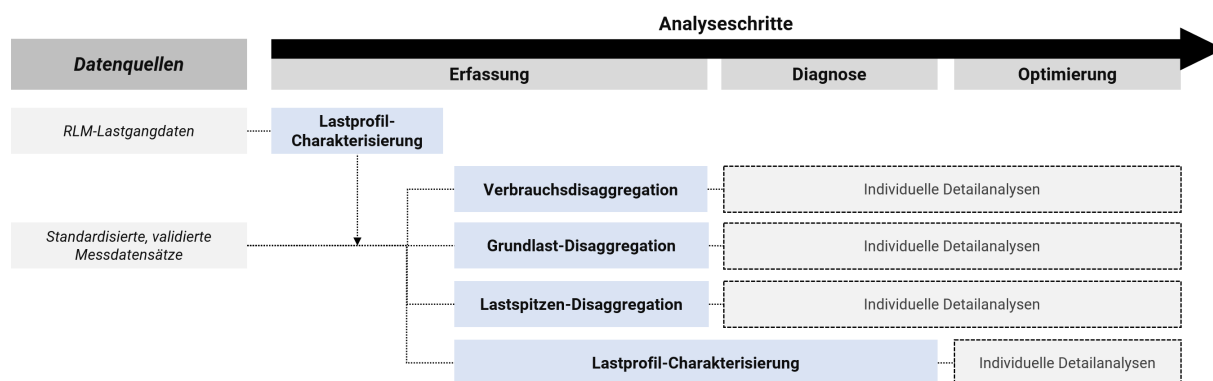


Abbildung 43: Standardisierter Datenanalyse-Plan für das Analysekonzept

Als Datenquellen sind im Datenanalyse-Plan grundsätzlich die RLM-Lastgangdaten sowie die gemäß Messkonzept erhobenen standardisierten und validierten Messdatensätze vorgesehen. Die Analyse der RLM-Lastgangdaten mit den Berechnungsverfahren der Lastprofil-Charakterisierung (Grundlast-Faktor, Lastspitzen-Faktor) ermöglicht erste Aufschlüsse über das Lastverhalten des gesamten Betriebes bzw. Standortes. Darüber hinaus sind die statistischen Parameter auch Indikatoren zur Durchführung der standardisierten Datenanalysen. Ein hoher Grundlast-Faktor in den RLM-Daten kann beispielsweise ein Indikator zur Durchführung der Grundlast-Disaggregation sowie zugehöriger statistischer Parameter in den erfassten Datenreihen sein.

Aus der Anwendung standardisierter Datenanalysen ergeben sich individuelle Detailanalysen (vgl. Abbildung 43). Diese sind den Analyseschritten „Diagnose“ (z.B. Detailanalysen zu ineffizientem Verbrauchsverhalten) und „Optimierung“ (z.B. der Betriebsstunden-Optimierung) zugeordnet. Die Detailanalysen ergeben sich auf der Basis individueller Gegebenheiten der Messobjekte sowie der Ergebnisse der vorgelagerten standardisierten Datenanalysen. Somit sind die Detailanalysen kein Bestandteil des Analysekonzeptes zur systematischen Messdatenauswertung. Die eingeführten standardisierten Datenanalysen stellen vielmehr eine Grundlage dar, auf der weitere individuelle Untersuchungen und Optimierungen durchgeführt werden können.

6.5 Anwendung auf die Fallbeispiele

In diesem Kapitel erfolgt die Anwendung der entwickelten Datenanalysen auf die durchgeführten Fallbeispiele. Das Fallbeispiel „Gerichtsgebäude“ soll dabei beispielhaft als Messobjekt dienen, das ausführlich vorgestellt wird (Kapitel 6.5.1). Die wesentlichen Ergebnisse der Fallbeispiele 2-6 werden steckbriefartig zusammengefasst (s. Kapitel 6.5.2-6.5.6). Dazu werden Messpunkte mit auffälligen Parameterwerten hervorgehoben. Es erfolgt allerdings keine umfassende Anwendung und Beschreibung aller Datenanalysen.

Um einen Überblick zu schaffen, werden je Fallbeispiel zunächst grundlegend die durchgeführten Messreihen vorgestellt. Anschließend erfolgt die Anwendung der Berechnungsverfahren zur Lastprofil-Charakterisierung (vgl. Kapitel 6.3) sowie Disaggregationsanalysen (vgl. Kapitel 6.4) auf die erfassten Datenreihen. Schließlich werden je Fallbeispiel die Kernergebnisse zusammengefasst.

6.5.1 Fallbeispiel Gerichtsgebäude

Im Fallbeispiel „Gerichtsgebäude“ wurde eine Messreihe an der elektrischen Hauptverteilung durchgeführt (vgl. Kapitel 5.4.1). Eine Übersicht über die an der elektrischen Verteilung erfassten Messpunkte gibt Abbildung 44.

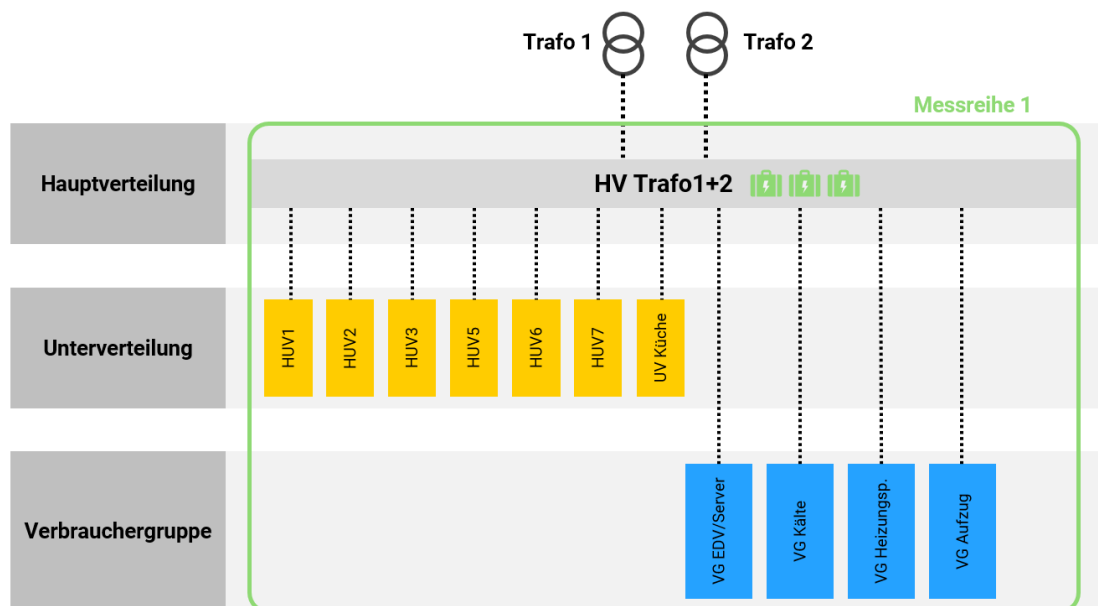


Abbildung 44: Schema elektrische Verteilung und Messpunkte - Fallbeispiel Gerichtsgebäude

Die durchgeführte Messreihe umfasst die nachfolgend aufgeführten Input- und Output-Datenreihen:

- Die elektrische Hauptverteilung wird durch zwei Transformatoren gespeist. Mit dem Messpunkt *HV Trafo 1+2* werden beide Transformatoren in einer Input-Datenreihe erfasst.
- Weitere erfasste Messpunkte sind elektrische Unterverteilungen (UV, gelb) und Verbrauchergruppen (VG, blau). Diese werden als Output-Datenreihen deklariert.

In Tabelle A 1 und Tabelle A 2 sind die Ergebnisse dieses Fallbeispiels steckbriefartig zusammengefasst (s. Anhang). Der Steckbrief führt die wesentlichen Ergebnisse der durchgeführten Analysen sowie relevante Parameter auffälliger Messpunkte auf. In Tabelle A 3 (s. Anhang) werden die erfassten Messpunkte im Detail vorgestellt. Diese werden nach der Ebene der elektrischen Verteilung, dem Datenreihen-Typ und dem Verwendungszweck (VDI 3807) zugeordnet und hinsichtlich zugehöriger elektrischer Verbraucher beschrieben.

Verbrauchsdisaggregation

Die Ergebnisse der Verbrauchsdisaggregation werden zunächst anhand der Aufschlüsselung der erfassten Messpunkte dargestellt. Die Aufschlüsselung der Energieflüsse nach Messpunkten ist in Abbildung 45 in einem Sankey-Diagramm zu sehen. Die berechneten Stromverbräuche und prozentualen Anteile des Verbrauchs basieren auf dem gesamten Messzeitraum (29 Messtage).

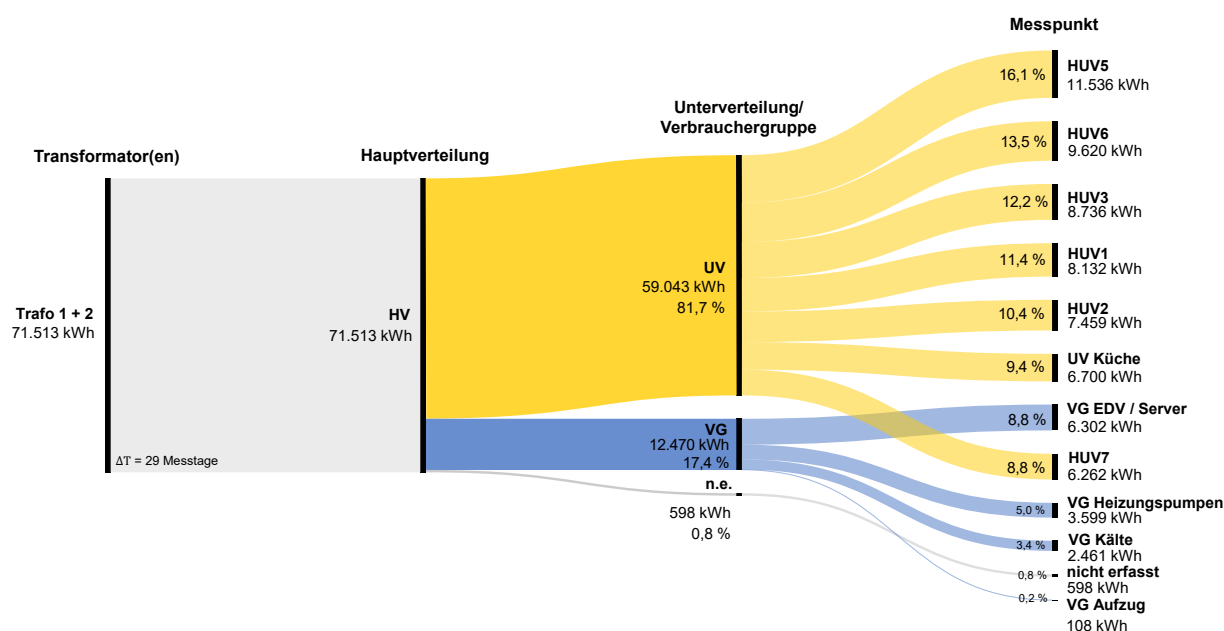


Abbildung 45: Verbrauchsdisaggregation nach Messpunkten - Fallbeispiel Gerichtsgebäude

Der Gesamtstromverbrauch der beiden Transformatoren wird zunächst auf die ermittelten Hierarchie-Ebenen (UV und VG) der elektrischen Verteilung aufgeteilt. Die erfassten Output-Datenreihen sind in dem Sankey-Diagramm jeweils absteigend sortiert. Die größte erfasste Unterverteilung „HUV5“ macht ca. **16,1%** des Gesamtstromverbrauchs aus. Die größte erfasste Verbrauchergruppe „VG EDV/Server“ umfasst einen Anteil von ca. **8,8%** des Gesamtstromverbrauchs.

Tabelle 53 (s. Folgeseite) zeigt die Kennwerte zur Bewertung dieser Datenanalyse.

Tabelle 53: Kennwerte zur Bewertung der Datenanalyse Verbrauchsdisaggregation – Fallbeispiel Gerichtsgebäude

Kennwert	Stromverbrauch [kWh]*	Anteil Verbrauch [%]
E_{in}	71.513	100
$E_{out, UV}$	58.445	81,7
$E_{out, VG}$	12.470	17,4
$E_{out, UV+VG}$	70.915	99,2
E_{diff} (nicht erfasst)	598	0,8

*Bezogen auf die gesamte Messreihe (29 Messtage).

Die erfassten elektrischen Unterverteilungen (UV) machen demnach mit 58.445 kWh bzw. **81,7%** den Großteil des Gesamtstromverbrauchs aus. Lediglich 17,4% des Gesamtstromverbrauchs können eindeutig einer Verbrauchergruppe zugewiesen werden. Insgesamt konnten in diesem Fallbeispiel somit **99,2%** des Gesamtstromverbrauchs aufgeschlüsselt werden. Eine Differenz E_{diff} von 0,8% bzw. 598 kWh wurden nicht messtechnisch erfasst. Die Ergebnisse zeigen, dass in der Messreihe die relevanten Messpunkte des Messobjektes erfasst wurden. Allerdings kann nur ein geringer Anteil von 17,4% des Gesamtstromverbrauchs eindeutig auf elektrische Verbraucher aufgeschlüsselt werden.

An dieser Stelle erlaubt die Einteilung der erfassten Messpunkte gemäß der Verwendungszwecke nach VDI 3807 weitere Informationen über die Verbrauchsstruktur des Messobjektes (vgl. Kapitel 2.2.3). Die Ergebnisse dieser Einteilung sind für das Fallbeispiel Gerichtsgebäude in Abbildung 46 dargestellt.

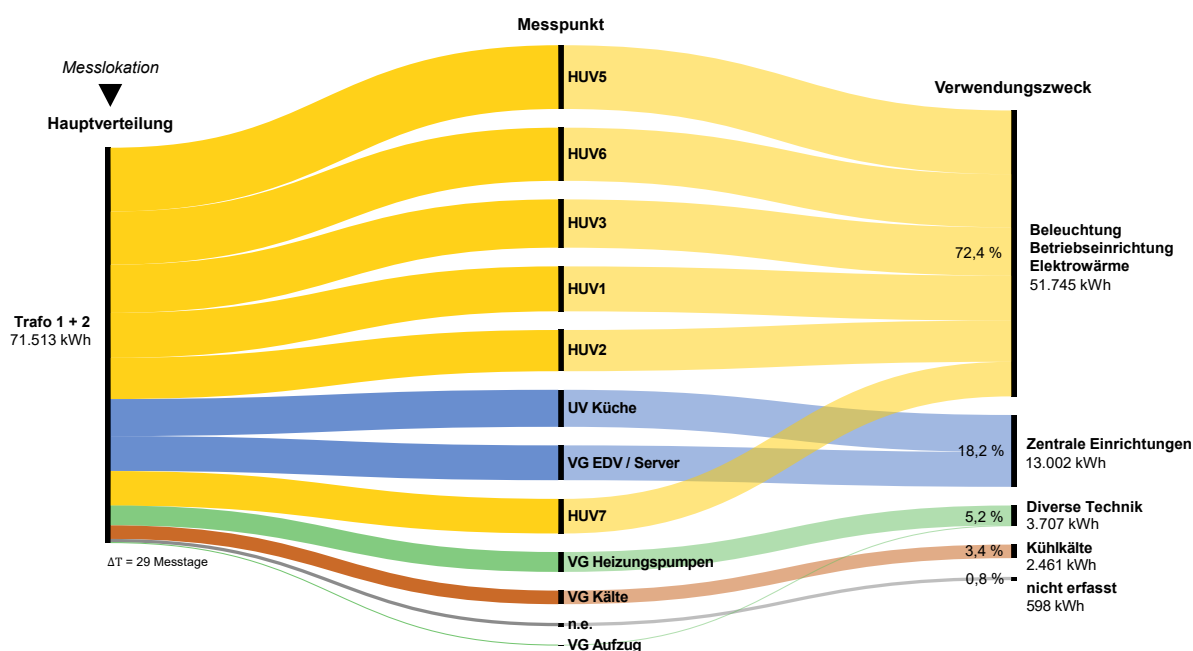


Abbildung 46: Verbrauchsdisaggregation nach Verwendungszweck – Fallbeispiel Gerichtsgebäude

Die erfassten Messpunkte werden vier Verwendungszwecken zugeordnet. Der Stromverbrauch der Gebäudeteilflächen $HUV1-7$ macht mit anteilig **72,4%** den größten Anteil am Gesamtstromverbrauch

aus. In diesem Stromverbrauch sind neben der Beleuchtung auch die Verwendungszwecke Betriebs-einrichtung und Elektrowärme berücksichtigt (vgl. Tabelle A 3, Anhang). Aufgrund von Literatur-werten (vgl. Kapitel 2.1.2) ist davon auszugehen, dass der Verwendungszweck Beleuchtung den größ-ten Anteil am Gesamtstromverbrauch des Messobjektes ausmacht. Auch der Verwendungszweck Betriebseinrichtung umfasst mit der Vielzahl an Bürogeräten (700 Arbeitsplätze) einen großen Anteil am Gesamtstromverbrauch.

Eine differenzierte Betrachtung der Verbrauchsanteile der Messpunkte „HUV1-7“ ist nur durch wei-tere Messungen in den elektrischen Unterverteilungen oder die Erfassung einzelner elektrischer Ver-bräucher (z.B. eines Referenz-Arbeitsplatzes) mit anschließender Skalierung möglich.

Zur Validierung der Messdaten wurde der Stromverbrauch der Input-Datenreihe „HV Trafo 1+2“ mit historischen RLM-Lastgangdaten aus 2021 über den Zeitraum einer Referenzwoche verglichen. Der Stromverbrauch der gemessenen Referenzwoche (13.12-19.12.2021, ohne Feiertage) weicht um etwa 1.610 kWh (+9%) vom durchschnittlichen Wochenstromverbrauch im Jahr 2021 ab. Die Abweichung wird durch den leicht höheren Stromverbrauch in den Wintermonaten verstärkt. Gemessen an den historischen RLM-Lastgangdaten kann daher von einem normalen Betriebsverhalten des Messobjek-tes während des Messzeitraums ausgegangen werden.

Weiterhin wurde der Stromverbrauch der Input-Datenreihe auch mit den RLM-Lastgangdaten über den Messzeitraum verglichen. Der Stromverbrauch der gemessenen Input-Datenreihe über den Zeit-raum vom 06.12.-31.12.2021 weicht um etwa 3,5% vom Stromverbrauch der RLM-Lastgangdaten ab. Die Messdaten können daher entsprechend der Messgenauigkeit (vgl. Kapitel 4.2.3) als plausibel angesehen werden.

Grundlast-Disaggregation

Analog zur Verbrauchsdisaggregation erfolgt die Grundlast-Disaggregation zunächst auf Basis der erfassten Messpunkte. Die Ergebnisse sind in Abbildung 47 (s. Folgeseite) in Form eines Sankey-Diagramms dargestellt. Die Gesamtgrundlast P_{base_input} der elektrischen Hauptverteilung wird über den Messpunkt „HV Trafo 1+2“ ermittelt. Die Berechnung dieser mittleren Grundlast erfolgt anhand des in Kapitel 6.3.4 vorgestellten Berechnungsverfahrens.

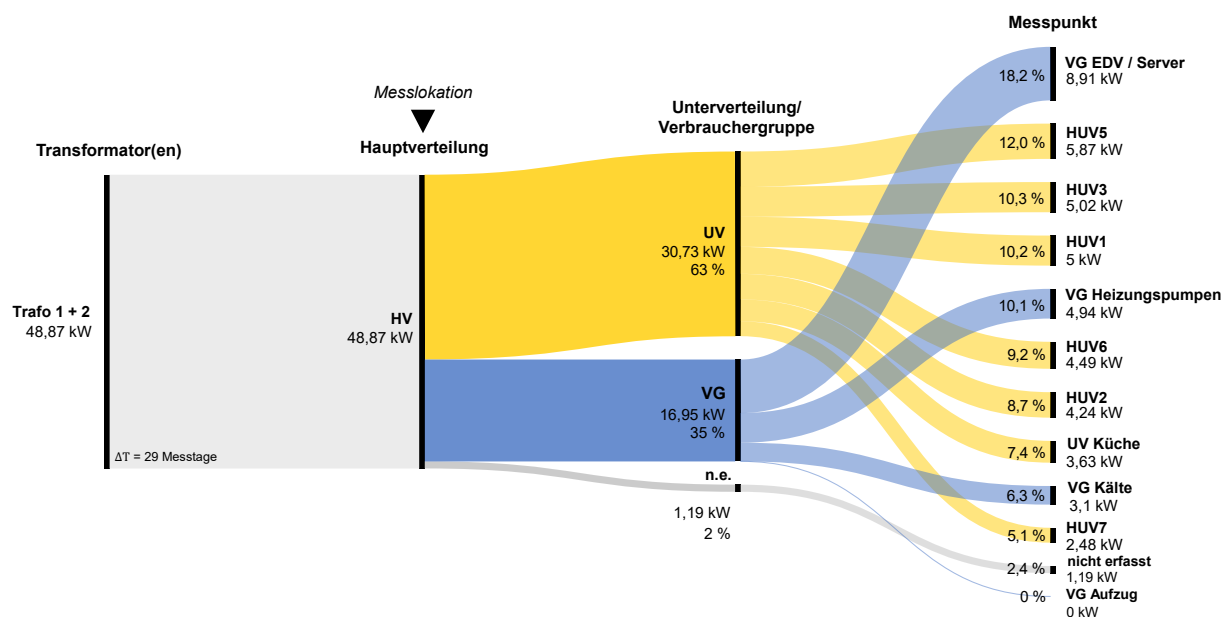


Abbildung 47: Grundlast-Disaggregation nach Messpunkten – Fallbeispiel Gerichtsgebäude

Mit der Berechnung der Grundlast für die einzelnen Messpunkte kann die Gesamtgrundlast wie folgt aufgeschlüsselt werden:

- Etwa **63%** der Gesamtgrundlast kann den erfassten elektrischen Unterverteilungen zugeordnet werden. Die Summe der erfassten Messpunkte „HUV1-7“ macht ca. **55,5%** der Gesamtgrundlast aus.
- Etwa **35%** der Gesamtgrundlast kann eindeutig einer erfassten Verbrauchergruppe zugeordnet werden. Der Messpunkt „VG EDV/Server“ hat mit **18,2%** den größten Anteil an der Gesamtgrundlast.
- Die Gesamtaufschlüsselung der Grundlast beträgt 97,6%. Etwa 2,4% der Gesamtgrundlast wurden im Rahmen der Messreihe nicht messtechnisch erfasst.

Die Kennwerte zur Bewertung dieser Datenanalyse sind in der folgenden Tabelle festgehalten (s. Tabelle 54):

Tabelle 54: Kennwerte zur Bewertung der Datenanalyse Grundlast-Disaggregation – Fallbeispiel Gerichtsgebäude

Kennwert	Grundlast [kW]	Anteil Verbrauch [%]
P_{base_input}	48,87	100
P_{base_UV}	30,73	63
P_{base_VG}	16,95	35
P_{base_UV+VG}	47,68	98
P_{base_diff} (nicht erfasst)	1,19	2

Analog zur Verbrauchsdisaggregation kann auch die Gesamtgrundlast in der Messreihe nahezu vollständig aufgeschlüsselt werden. Der Anteil der eindeutig auf Verbrauchergruppen aufgeschlüsselten

Grundlast ist mit 35% höher als bei der Verbrauchsdisaggregation. Dies ist darauf zurückzuführen, dass mit dem Server, der Kühlung und den Heizungspumpen zentrale Grundlast-Verbraucher identifiziert wurden.

Eine Zuordnung der Messpunkte gemäß der nach VDI 3807 definierten Verwendungszwecke (vgl. Kapitel 2.2.3) wird in Abbildung 48 dargestellt.

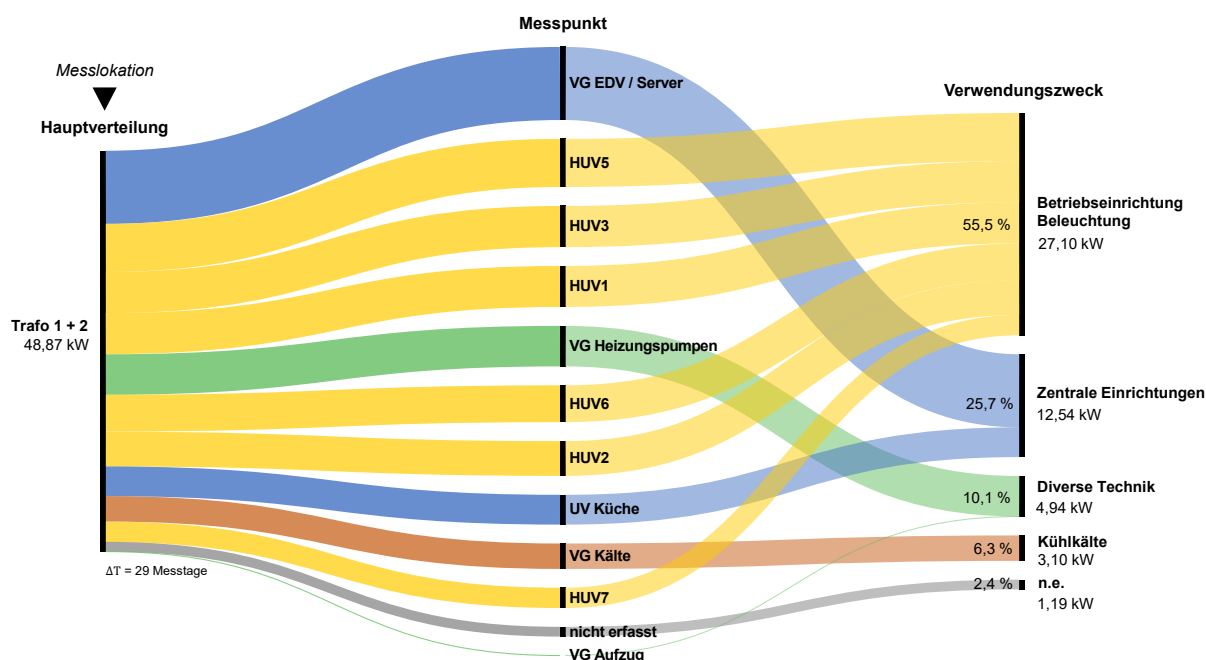


Abbildung 48: Grundlast-Disaggregation nach Verwendungszweck – Fallbeispiel Gerichtsgebäude

Die Gruppe „Betriebs-einrichtung und Beleuchtung“ macht mit **55,5%** den größten Anteil an der Gesamtgrundlast aus. Dieser Gruppe wurden die Messpunkte der Gebäudebereiche „HUV1-7“ zugeordnet (vgl. Tabelle A 3, Anhang). Die Unterverteilungen beinhalten unter anderem auch die Flur- und Arbeitsflächenbeleuchtung. Da diese jedoch nur zur Betriebszeit (06:00-20:00h) und an Betriebstagen (Mo-Fr) verwendet wird, trägt sie nicht maßgeblich zur Grundlast bei. Im Rahmen der Vor-Ort-Begehung wurde einzig die Außenbeleuchtung mit ca. 2 kW als Grundlast-Verbraucher des Verwendungszweckes Beleuchtung identifiziert. Die restliche Grundlast von ca. 25 kW ist dem Büro-equipment (PC, Monitor, Drucker, Telefon) und den Teeküchen zuzuordnen. Der Verwendungszweck **Betriebs-einrichtung** macht daher den größten Anteil an der Gesamtgrundlast aus.

Weitere Details über relevante Grundlast-Verbraucher können anhand von statistischen Parametern (Grundlast P_{base} sowie Grundlast-Faktor k_{base} , vgl. Kapitel 6.3.4) betrachtet werden. Abbildung 49 (s. Folgeseite) stellt die berechnete mittlere Grundlast P_{base} über den Grundlast-Faktor k_{base} aller erfasster Messpunkte dar.

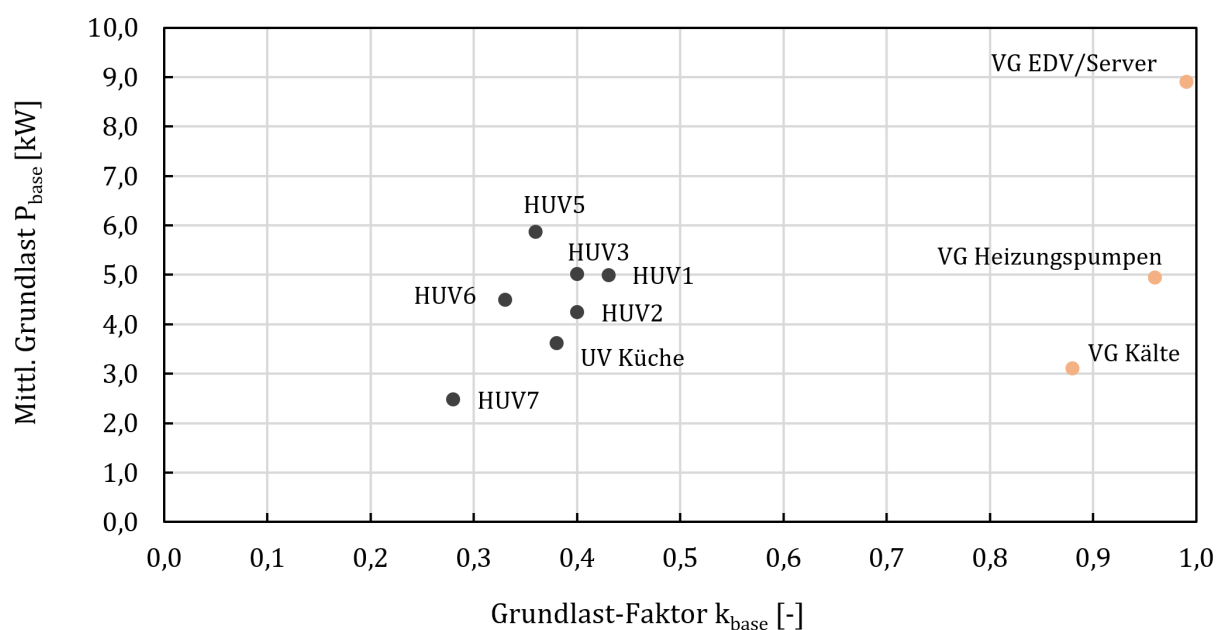


Abbildung 49: Berechnete mittlere Grundlast und Grundlast-Faktor der erfassten Messpunkte
- Fallbeispiel Gerichtsgebäude

Bei den Messpunkten „VG EDV/Server“, „VG Kälte“ und „VG Heizpumpen“ liegt der Grundlast-Faktor im Bereich 0,88 bis 0,99. Der Stromverbrauch dieser Messpunkte kann daher fast vollständig der Gesamtgrundlast zugeordnet werden (vgl. Einordnung Wertebereich Grundlast-Faktor, Tabelle 35). Die hohen Grundlast-Faktoren lassen darauf schließen, dass sich die zugehörigen elektrischen Verbraucher im Dauerbetrieb befinden. Demnach liegt in diesen Messpunkten kein Ruhezeitfenster vor. Die den Messpunkten zugehörigen elektrischen Verbraucher können als relevante Grundlast-Verbraucher eingestuft werden.

In den erfassten Unterverteilungen („HUV1-7“, „UV Küche“) beträgt der Grundlastverbrauch anteilig 28 bis 43% am gesamten Stromverbrauch des jeweiligen Messpunktes. Dies deutet auf Lastprofile mit anteiligem Grundlastverbrauch hin (vgl. Tabelle 35). Gemäß der Höhe des Grundlast-Faktors ist der Grundlastverbrauch dieser Unterverteilungen nicht zu vernachlässigen. Dies wird allein an der Summe der Grundlastverbräuche der Gebäudebereiche „HUV1-7“ deutlich (vgl. Abbildung 48).

Zur Validierung der Messdaten wurde die Gesamtgrundlast der Input-Datenreihe „HV Trafo 1+2“ mit der Gesamtgrundlast der RLM-Lastgangdaten im Jahr 2021 verglichen. Die in der Messung aufgetretene Gesamtgrundlast weicht um 0,2 kW (+0,4%) von der Gesamtgrundlast im Jahr 2021 ab. Die gemessene Gesamtgrundlast entspricht daher dem normalen Betriebsverhalten des Messobjektes und kann folglich als plausibel angesehen werden.

Lastspitzen-Disaggregation

Die Messreihe im Fallbeispiel „Gerichtsgebäude“ wurde an der Messlokation der elektrischen Hauptverteilung durchgeführt. Über diese elektrische Verteilung erfolgt auch die Messung der RLM-Lastgangdaten, die vom Energieversorger zur Abrechnung der aufgetretenen Lastspitzen benötigt wird.

Vor diesem Hintergrund ist in diesem Fallbeispiel eine detaillierte Betrachtung und Disaggregation aufgetretener Lastspitzen sinnvoll.

In Tabelle 55 sind die fünf höchsten im Messzeitraum aufgetretenen Lastspitzen (Top 5 Lastspitzen) des Messpunktes „HV Trafo 1+2“ aufgezeigt.

Tabelle 55: Kenndaten der Top 5 Lastspitzen – Fallbeispiel Gerichtsgebäude

Lastspitze Nr.	1	2	3	4	5
Leistung [kW]	287,7	286,0	283,4	279,3	278,2
Datum	13.12.2021	14.12.2021	14.12.2021	14.12.2021	21.12.2021
Uhrzeit	10:15h	12:15h	10:00h	11:15h	08:30h
Disaggregation [%]	> 99	> 99	> 99	> 99	> 99
Lastgradient [kW]	20,40	22,00	16,30	9,30	17,20

Das Zeitfenster für das Auftreten der Lastspitzen liegt zwischen 08:30h und 12:15h. Alle Lastspitzen können zu jeweils zu mehr als **99%** auf die erfassten Messpunkte disaggregiert werden. Es kann demnach von einer nahezu vollständigen Disaggregation der Lastspitzen auf die erfassten Messpunkte ausgegangen werden. Die Lastgradienten des Messpunktes „HV Trafo 1+2“ betragen für die erfassten Lastspitzen zwischen **9 und 22 kW** (vgl. Tabelle 55). Dies entspricht anteilig etwa 3-7% der aufgetretenen Lastspitze.

Durch die zeitlich parallele Erfassung der elektrischen Unterverteilungen und Verbrauchergruppen können nun auch die Lastgradienten der Output-Datenreihen zu den Zeitwerten der aufgetretenen Lastspitzen betrachtet werden. Für die Top 5 Lastspitzen sind die Lastgradienten der erfassten Messpunkte in Abbildung 50 dargestellt. Es wird deutlich, dass die erfassten Lastspitzen maßgeblich auf den Messpunkt „UV Küche“ zurückzuführen sind. Bei den Top 5 Lastspitzen ist hier ein Anstieg der Last von 9 bis maximal 25 kW erkennbar.

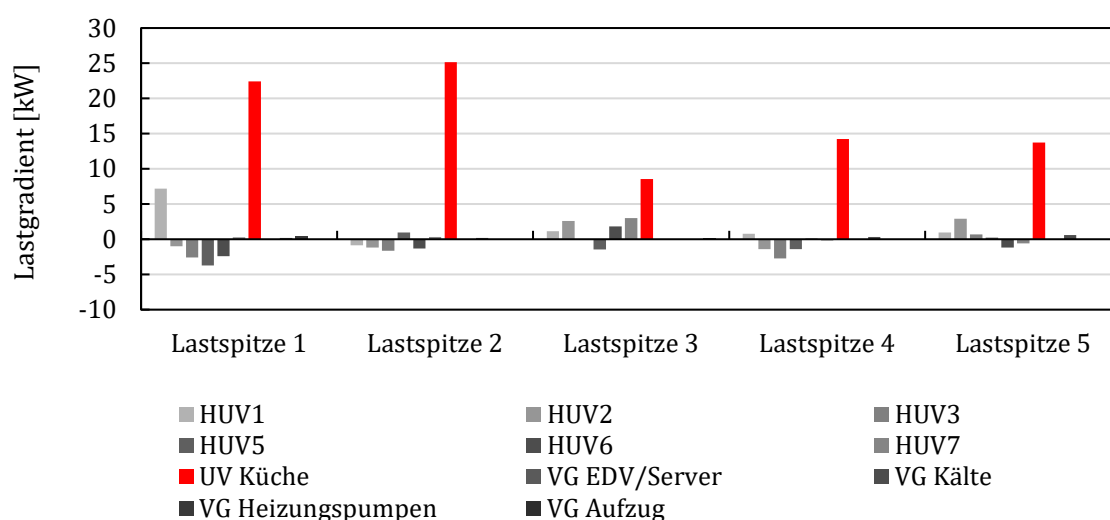


Abbildung 50: Lastgradienten der erfassten Messpunkte zum Zeitpunkt der Top 5 Lastspitzen - Fallbeispiel Gerichtsgebäude

Da es sich bei dem Messpunkt „UV Küche“ um eine elektrische Unterverteilung handelt, können die Lastspitzen-Verbraucher in diesem Fall nicht unmittelbar bestimmt werden. Allerdings kann anhand der Informationen zur Unterverteilung (vgl. Tabelle A 4) darauf geschlossen werden, dass die Lastspitzen in der elektrischen Hauptverteilung auf den gleichzeitigen Betrieb mehrerer Küchengeräte zurückzuführen sind.

Weitere Details über relevante Lastspitzen-Verbraucher können anhand von statistischen Parametern (u.a. Spitzenlast-Differenz ΔP_{peak} und Lastspitzen-Faktor k_{peak} , vgl. Kapitel 6.3.5) analysiert werden. In Abbildung 51 ist die Spitzenlast-Differenz ΔP_{peak} über den Lastspitzen-Faktor k_{peak} für alle erfassten Messpunkte dargestellt.

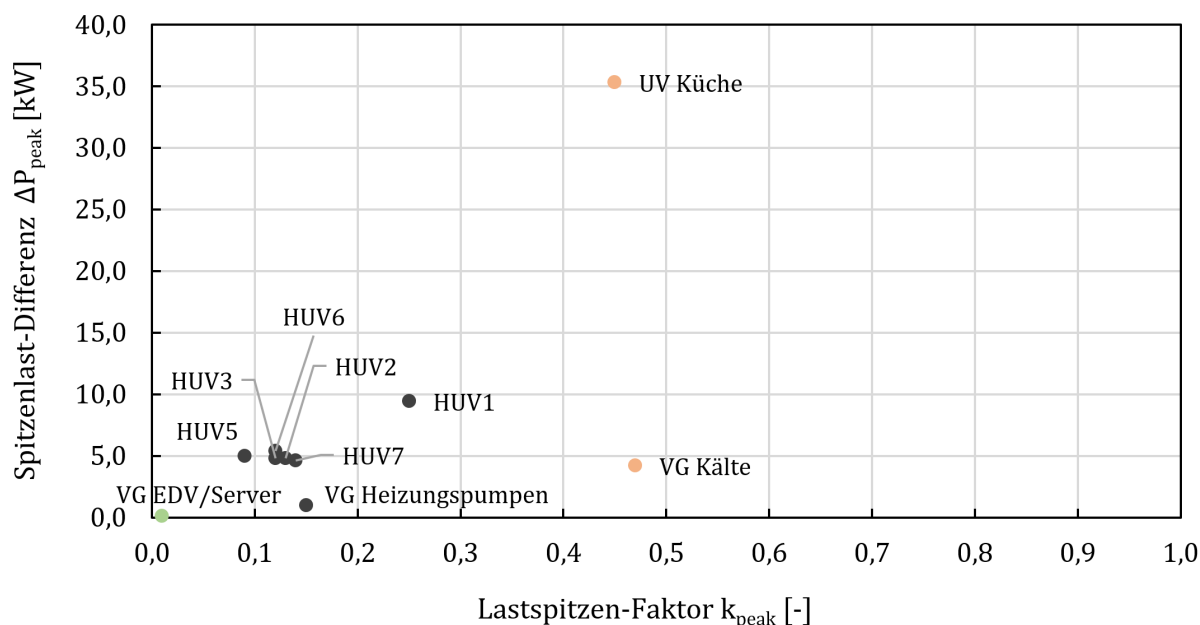


Abbildung 51: Spitzenlast-Differenz und Lastspitzen-Faktor der erfassten Messpunkte
- Fallbeispiel Gerichtsgebäude

Bei den Messpunkten „UV Küche“ und „VG Kälte“ liegen die höchsten Werte für den Lastspitzen-Faktor vor. Die Leistung fällt innerhalb des Spitzenlastbereichs (obere 2,5% der Datenwerte) um 47% („VG Kälte“) bzw. 45% („UV Küche“) der aufgetretenen Maximalleistung P_{peak} ab. Die zugleich hohe Spitzenlast-Differenz in der Datenreihe des Messpunktes „UV Küche“ deuten darauf hin, dass sich die zugehörigen Lastspitzen maßgeblich auf das Gesamtsystem auswirken. Die statistischen Parameter bestätigen somit die Ergebnisse der Betrachtung der Top 5 Lastspitzen während des Messzeitraums (vgl. Abbildung 50).

Zur Validierung der Messdaten wurden die Lastspitzen der Input-Datenreihe „HV Trafo 1+2“ mit den Lastspitzen der Lastgangdaten im Referenzjahr 2021 verglichen. Die in der Messung aufgetretene Lastspitze P_{peak} von 287,7 kW weicht um 23,1 kW (-8%) von der höchsten Lastspitze im Jahr 2021 ab. Die im Messzeitraum erfassten Lastspitzen liegen somit nah an den höchsten Lastspitzen im Referenzjahr 2021. Folglich entsprechen die im Messzeitraum erfassten Lastspitzen dem normalen Betriebsverhalten des Messobjektes.

Lastprofil-Charakterisierung

Die erfassten Messpunkte können gemäß der Einteilung nach **Ruhezeit- und Betriebszeitfenster** (s. Kapitel 6.3.2) in zwei Cluster eingeteilt werden. Im Folgenden werden die beiden Cluster kurz erläutert:

- **Cluster mit Betriebs- und Ruhetagen:** Für die Messpunkte „HV Trafo 1+2“, „HUV1-7“ und „UV Küche“ kann zunächst zwischen Betriebs- und Ruhetagen differenziert werden. Montag-Freitag können als Betriebstage und Samstag/Sonntag als Ruhetage klassifiziert werden. Betriebstage können weiterhin in die Zeitfenster Betriebszeit und Ruhezeit gegliedert werden. Die Betriebszeit macht von 06:00-20:00h etwa 14h eines Betriebstages aus, während die Ruhezeit zwischen 20:00-06:00h ca. 10h beträgt. Einzig der Messpunkt „UV Küche“ weicht von diesen Betriebs- und Ruhezeiten etwas ab (BZ: 04:30h-17:00h, RZ: 17:00-04:30h). Die Ruhetage liegen vollständig im Ruhezeitfenster.
- **Cluster mit Betriebstagen:** Für die Messpunkte „VG EDV/Server“, „VG Kälte“ und „VG Heizungspumpen“ liegen lediglich Betriebstage (Montag-Sonntag) vor. Die Betriebszeit beträgt an allen Messtagen 00:00-24:00h. Die Messpunkte sowie die zugehörigen elektrischen Verbraucher tragen somit 100% zur Grundlast bzw. zum Stromverbrauch im Ruhezeitfenster bei.

Die Unterschiede zwischen beiden Clustern werden auch anhand des **Leistungsspektrums** der erfassten Datenreihen deutlich. Abbildung 52 stellt dazu ein repräsentatives Leistungsspektrum von je einer beispielhaften Datenreihe je Cluster dar. Für die Datenreihen des Clusters mit Betriebs- und Ruhezeiten ist ein signifikantes Grundlastniveau (linke Seite des Leistungsspektrums) erkennbar. Die Leistungswerte im Betriebslastniveau sind über einen weiten Leistungsbereich verteilt. Datenreihen, die lediglich Betriebstage aufweisen zeichnen sich durch ein erkennbares Betriebslastniveau aus, welches auch im Leistungsspektrum gut zu erkennen ist.

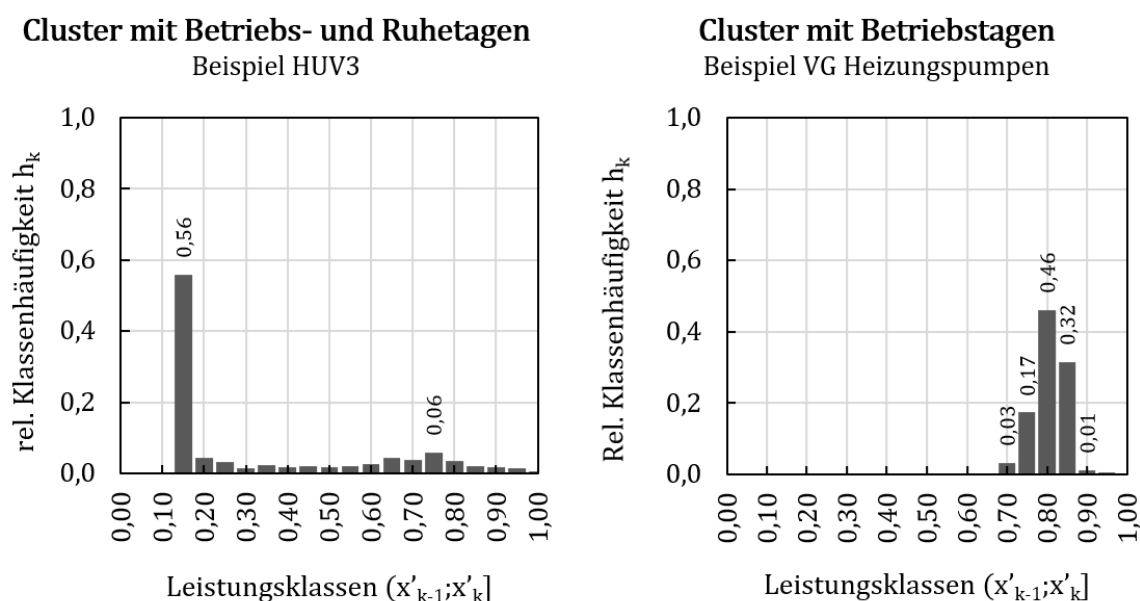


Abbildung 52: Vergleich Leistungsspektrum der beiden identifizierten Cluster erfasster Messpunkte
- Fallbeispiel Gerichtsgebäude

Der Messpunkt „VG Aufzug“ konnte basierend auf dem vorliegenden Messdatensatz (Messdatenauf-
 lösung 15-min) nicht unmittelbar einem Cluster zugeordnet werden. Die Detailanalyse ergab, dass
 die Betriebscharakteristik des elektrischen Verbrauchers erst in einer geringeren Messdatenauf-
 lösung (bspw. 10-s) sichtbar und interpretierbar wird. Dies ist auf die kurzen Zeitintervalle des Aufzugsbe-
 triebes zurückzuführen. In den folgenden Berechnungsverfahren zur Lastprofil-Charakterisierung
 wird der Messpunkt „VG Aufzug“ auch wegen des geringen Einflusses auf den Gesamtstromver-
 brauch (vgl. Abschnitt Verbrauchsdisaggregation) nicht weiter im Detail betrachtet.

Anhand der **Laständerung** können Lastsprünge und Rampen aufeinander folgender Leistungswerte
 der erfassten Datenreihen interpretiert werden (vgl. Kapitel 6.3.6). In Abbildung 53 sind für die Last-
 gradienten und Laständerungsraten der erfassten Messpunkte für die Leistungswerte der Betriebszeit
 dargestellt.

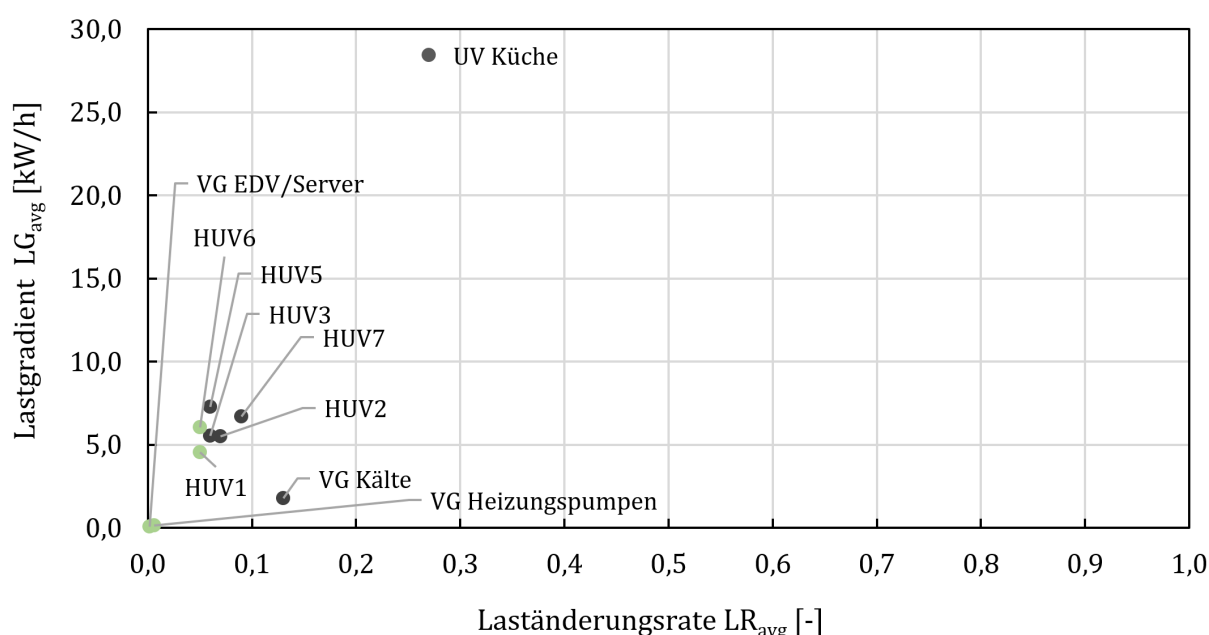


Abbildung 53: Lastgradient und Laständerungsrate Betriebszeit der erfassten Messpunkte
 - Fallbeispiel Gerichtsgebäude

Der Messpunkt „UV Küche“ weist die höchste Laständerungsrate und zugleich den höchsten Last-
 gradienten der Leistungswerte im Betriebszeitfenster auf. Der hohe Wert für des Lastgradienten ist
 ein weiterer Indikator für den Betrieb größerer elektrischer Verbraucher, die auch für die Lastspitzen
 in den RLM-Lastgangdaten verantwortlich sind. Die weiteren Messpunkte weisen Laständerungsra-
 ten von 0 - 0,13 auf. Die Parameter der Messpunkte „VG EDV/Server“, „VG Heizungspumpen“,
 „HUV1“ und „HUV6“ deuten auf elektrische Verbraucher mit statischem Lastverhalten hin. Es liegen
 keine hohen Lastsprünge bzw. Rampen in den aufeinander folgenden Leistungswerten vor.

Mit der **Streuung an diskreten Zeitwerten** kann das Betriebs- und Regelverhalten der erfassten
 Messpunkte interpretiert werden (vgl. Kapitel 6.3.7). Der mittlere Interquartilsabstand IQA_{avg}
 beschreibt als absolutes Maß die Streuung der Leistungswerte an den diskreten Zeitwerten
 00:00- 24:00h. Der mittlere Quartilsdispersionskoeffizient QD_{avg} gilt zusätzlich als relatives Maß zur
 Beurteilung der Streuung der Leistungswerte.

In Abbildung 54 sind der mittlere Interquartilsabstand IQA_{avg} sowie der mittlere Quartilsdispersionskoeffizient QD_{avg} aller Messpunkte für die Betriebszeit an Betriebstagen dargestellt. Der Messpunkt „UV Küche“ weist den höchsten QD_{avg} -Wert (0,53) und zugleich den höchsten mittleren Interquartilsabstand (10,22 kW) auf. Gemäß der Einordnung des Wertebereichs kann auf eine hohe Streuung der Leistungswerte an den diskreten Zeitwerten geschlossen werden. Dies bestätigt die These, dass die Charakteristik des Messpunktes „UV Küche“ während der Betriebszeit durch größere elektrische Verbraucher gekennzeichnet ist, die zu unterschiedlichen Zeitpunkten ein- und ausgeschaltet werden.

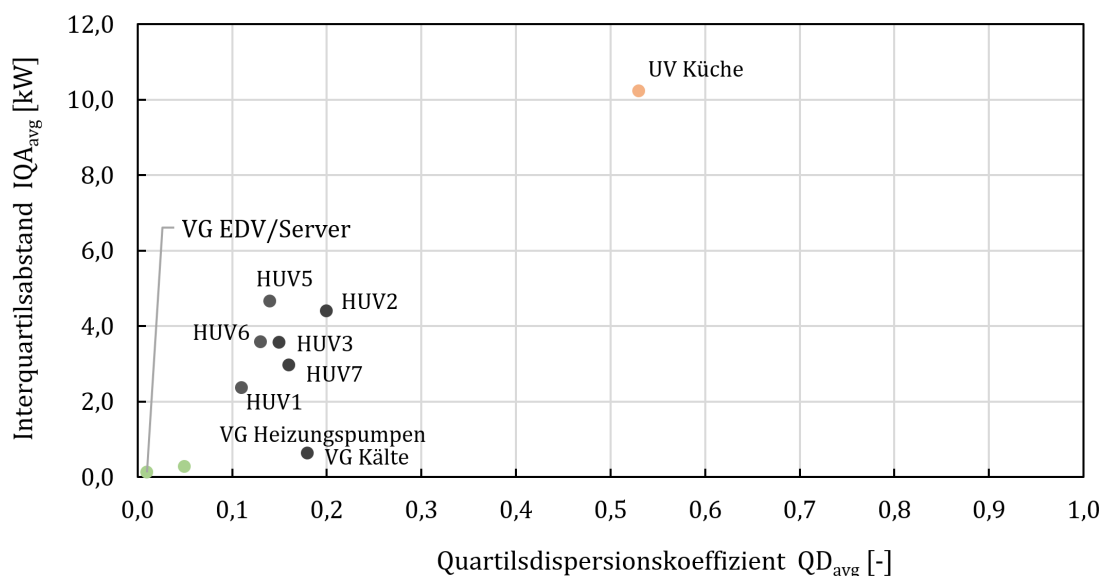


Abbildung 54: Mittlerer Interquartilsabstand und Quartilsdispersionskoeffizient Betriebszeit der erfassten Messpunkte – Fallbeispiel Gerichtsgebäude

Die Messpunkte „VG EDV/Server“, „VG Heizungspumpen“ und „VG Kälte“ weisen ein zeitlich homogenes Betriebsverhalten auf. Da es sich hierbei um Datenreihen mit elektrischen Verbrauchern im Dauerbetrieb handelt, weicht das Betriebsverhalten an den erfassten Messtagen kaum voneinander ab.

Zusammenfassung

In der Messkampagne zum Fallbeispiel „Gerichtsgebäude“ wurde eine sehr hohe Aufschlüsselung (> 99%) des Gesamtstromverbrauchs, der Grundlast sowie der Lastspitzen erreicht. Dadurch kann der Gesamtstromverbrauch nahezu vollständig auf die erfassten Messpunkte aufgeschlüsselt und Verwendungszwecken zugeordnet werden. Der Großteil des Stromverbrauchs (ca. 72%) ist den Verwendungszwecken **Betriebseinrichtung** und **Beleuchtung** zuzuordnen. Auch in der Gesamtgrundlast macht der Verwendungszweck **Betriebseinrichtung** den größten Anteil (ca. 55%) aus. Der größte Grundlast-Verbraucher ist der erfasste **Serverraum**, der inklusive der Kühlung etwa 24% der Gesamtgrundlast ausmacht. Neben dem Serverraum können auch die zugehörige Kälteanlage sowie die Heizungspumpen als **Dauerverbraucher** eingestuft werden. Die Lastspitzen-Disaggregation sowie Berechnungsverfahren identifizieren die Datenreihe „UV Küche“ als Messpunkt mit Lastspitzen-Verbrauchern, die sich maßgeblich auf das Gesamtsystem auswirken. Weiterführende Detailanalysen beziehen sich in diesem Messobjekt vor allem auf den Verwendungszweck **Betriebseinrichtung**.

6.5.2 Fallbeispiel Polizeipräsidium

Das Fallbeispiel „Polizeipräsidium“ stellt das größte betrachtete Messobjekt dar. Es wurden insgesamt drei zeitlich aufeinander folgende Messreihen durchgeführt (vgl. Kapitel 5.4.1). Dabei wurden insgesamt 60 Messpunkte (dreiphasig) über einen Zeitraum von 42 Messtagen erfasst. In Abbildung 55 ist vereinfacht die elektrische Verteilung des Messobjektes dargestellt. Aus Darstellungsgründen werden nicht alle erfassten Messpunkte einzeln aufgeführt. Erkennbar sind jedoch die drei durchgeführten Messreihen inklusive der Messlokationen an elektrischen Haupt- und Unterverteilungen.

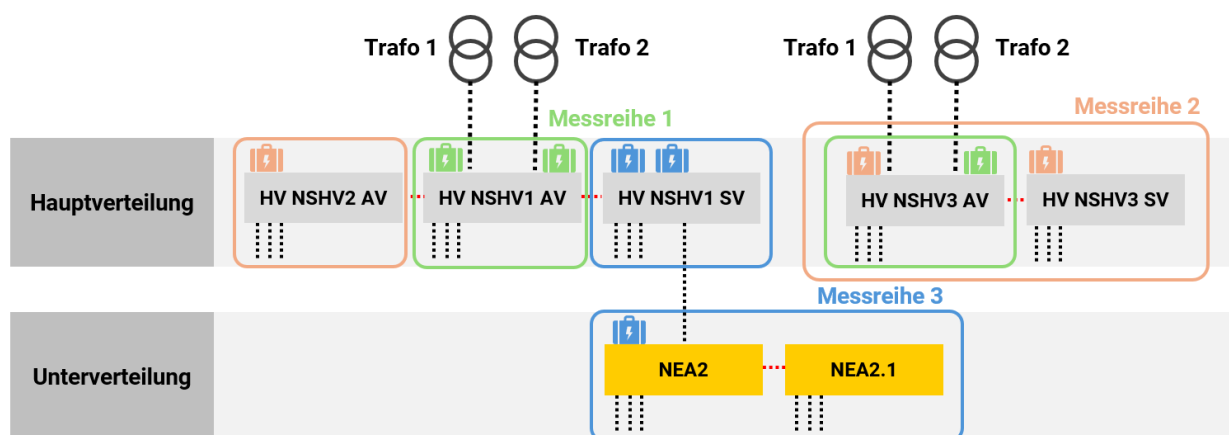


Abbildung 55: Schema elektrische Verteilung und Messreihen - Fallbeispiel Polizeipräsidium

In der ersten Messreihe (s. grüne Markierung) werden gemäß dem angewendeten Messprinzip zunächst die durch Transformatoren gespeisten elektrischen Hauptverteilungen erfasst. So kann unter anderem der Gesamtstromverbrauch des Messobjektes auf einzelne Teilbereiche bzw. in diesem Fall einzelne Gebäude aufgeschlüsselt werden. Die „HV NSHV3 AV“ versorgt dabei das Gebäude 3, während die „HV NSHV1 AV“ die Stromversorgung von Gebäude 1 und 2 sicherstellt. Die zweite Messreihe (orange) umfasst eine weitere Aufschlüsselung der Messpunkte in Gebäude 3 sowie eine weitere elektrische Hauptverteilung in Gebäude 2 (vgl. Abbildung 55). In der dritten Messreihe (s. blaue Markierung) wurden eine elektrische Hauptverteilung in Gebäude 1 sowie weitere Messpunkte an zwei unmittelbar an der Hauptverteilung angeschlossenen größeren elektrischen Unterverteilungen erfasst.

Zur besseren Übersicht stellt Tabelle 56 die Anzahl der je Verwendungszweck (VDI 3807) erfassten Output-Datenreihen dar.

Tabelle 56: Einordnung erfasster Output-Datenreihen nach Verwendungszweck (VDI 3807)

Verwendungszweck	Anzahl erfasster Output-Datenreihen
Diverse Technik	18
Lüftung	9
Betriebseinrichtung u. Beleuchtung	9
Kühlkälte	8
Zentrale Einrichtungen	2
Beleuchtung	1

Bei den Datenreihen, die dem Verwendungszweck „Diverse Technik“ zugeordnet wurden, handelt es sich vor allem um spezifische elektrische Verbraucher, die für den Betrieb des Polizeigebäudes notwendig sind (bspw. Wache, Leitwarte, etc.). Aufgrund der hohen technischen Ausstattung des Messobjektes wurden mehrere Lüftungs- und Kälteanlagen erfasst. Die Datenreihen des Verwendungszweckes „Betriebseinrichtung und Beleuchtung“ umfassen einzelne Etagen-/Büro-Bereiche des Gebäudes. Dem Verwendungszweck „Zentrale Einrichtungen“ wurden die erfasste Küche sowie der Server zugeordnet. Dem Verwendungszweck „Beleuchtung“ kann nur eine erfasste Datenreihe (Außenbeleuchtung des Messobjektes) eindeutig zugeordnet werden.

Verbrauchsdisaggregation

Die Anwendung der Verbrauchsdisaggregation wurde hinsichtlich der angewendeten Methodik für das Fallbeispiel „Polizeipräsidium“ angepasst. Hintergrund für diese Anpassung ist die zeitlich aufeinander folgende Durchführung der drei Messreihen, die jeweils mehrere Messlokationen umfassen. Eine möglichst fehlerfreie Verbrauchsdisaggregation kann nur erfolgen, wenn die Messreihen auf den gleichen Zeitraum bezogen werden (bspw. eine Referenzwoche). In diesem Fall wird je Messreihe eine Referenzwoche gebildet, über die der Stromverbrauch der erfassten Datenreihen aufgeschlüsselt wird. Durch die Zusammenführung der gebildeten Referenzwochen aus den drei Messreihen können die zentralen Ergebnisse zur Verbrauchsdisaggregation dieses Messobjektes dargestellt werden.

Die Analyseergebnisse zur Verbrauchsdisaggregation sind im Steckbrief (Tabelle A 4 und Tabelle A 5, s. Anhang) aufgeführt und werden nachfolgend stichpunktartig beschrieben:

- Insgesamt können etwa **71%** des Gesamtstromverbrauchs (bezogen auf die zusammengeführte Referenzwoche) aufgeschlüsselt werden. Dementsprechend ist ein Anteil von **29%** des Gesamtstromverbrauchs nicht messtechnisch erfasst worden.
- Weiterhin können etwa **43%** des Gesamtstromverbrauchs eindeutig auf elektrische Verbraucher zurückgeführt werden. Die Summe der erfassten Unterverteilungen macht demnach etwa **28%** des Gesamtstromverbrauchs aus.
- Die Top 5 Verbraucher machen in Summe etwa **33%** des Gesamtstromverbrauchs des Messobjektes aus. Der größte erfasste elektrische Verbraucher ist eine Kälteanlage zur Klimatisierung des Gebäudes (ca. 11% des Gesamtstromverbrauchs). Weitere relevante Stromverbraucher sind den Verwendungszwecken **Lüftung**, **Diverse Technik** (Sensible Haustechnik) sowie **Server** inkl. **Kühlkälte** zuzuordnen.
- Die Querschnittstechnologien **Lüftung** und **Kühlkälte** machen zusammen den größten Anteil am Gesamtstromverbrauch aus (ca. **40%**). Dem Verwendungszweck **Diverse Technik** wurden weitere **19%** des Gesamtstromverbrauchs zugeordnet. Die erfassten Datenreihen der Verwendungszwecke „Zentrale Einrichtungen“ sowie die Bürobereiche („Betriebseinrichtung und Beleuchtung“) machen jeweils weitere 7% am Gesamtstromverbrauch aus.

Unter Berücksichtigung des Messkonzeptes und der gezeigten Ergebnisse kann davon ausgegangen werden, dass die größten elektrischen Verbraucher im Zuge der Messkampagne erfasst wurden. Der nicht erfasste Anteil (28%) umfasst eine Vielzahl kleinerer elektrischer Verbraucher, die vor allem

den Verwendungszwecken „Diverse Technik“, „Betriebseinrichtung“ und „Beleuchtung“ zuzuordnen sind.

Zur Validierung der Messdaten wird die aggregierte Referenzwoche der drei Messreihen mit dem durchschnittlichen Wochenstromverbrauch der RLM-Lastgangdaten im Jahr 2023 verglichen. Der Stromverbrauch der gebildeten Referenzwoche (ca. 78.000 kWh) weicht in diesem Fall um etwa +1% vom durchschnittlichen Wochenstromverbrauch im Jahr 2023 (ca. 75.000 kWh) ab. Der Stromverbrauch der Referenzwoche wird daher als geeignet für die Durchführung der Verbrauchsdisaggregation an diesem Messobjekt eingestuft.

Zudem wird die Summe der erfassten Input-Datenreihen der ersten Messreihe („HV NSHV1 AV“ und „HV NSHV3 AV“) mit den RLM-Lastgangdaten für den Messzeitraum verglichen. Über 15 betrachtete Messtage weicht der Stromverbrauch der erfassten elektrischen Hauptverteilungen (155.467 kWh) um etwa 3% vom Stromverbrauch der RLM-Lastgangdaten (160.333 kWh) ab. Diese Abweichung liegt innerhalb der Messgenauigkeit der verwendeten Messsysteme (vgl. Kapitel 4.2.3). Ein weiterer Grund für die Abweichung kann der Tatsache geschuldet sein, dass die Erfassung der RLM-Lastgangdaten an der Mittelspannungsstation erfolgt und die mobile Messtechnik auf der Niederspannungsseite der Transformatoren angeschlossen wurde. Dementsprechend können Leitungs- und Transformatorverluste mögliche Ursachen für die Differenz der Lastgangkurven sein.

Grundlast-Disaggregation

Die Ergebnisse der Anwendung der Grundlast-Disaggregation auf das Fallbeispiel „Polizeipräsidium“ sind detailliert im Steckbrief festgehalten (Tabelle A 4 und Tabelle A 5, s. Anhang). Die Analyseergebnisse sind nachfolgend stichpunktartig aufgeführt:

- Insgesamt können etwa **71%** der Gesamtgrundlast (383 kW) auf elektrische Unterverteilungen und Verbrauchergruppen aufgeschlüsselt werden. Ein Anteil von 29% wurde demnach nicht im Zuge der Messkampagne erfasst.
- Etwa **41%** der Gesamtgrundlast kann eindeutig auf elektrische Verbraucher zurückgeführt werden. Die größten erfassten Grundlast-Verbraucher sind Lüftungsanlagen, Kälteanlagen sowie sensible Haustechnik, Server und Kältetechnik zur Klimatisierung des Serverraums. In Summe machen diese Verbraucher etwa 32% (122 kW) der Gesamtgrundlast aus.
- Die Zuordnung der erfassten Datenreihen nach Verwendungszweck (VDI 3807) ergibt eine Aufschlüsselung der Gesamtgrundlast zu ca. 21% auf „Diverse Technik“, 19% auf Kühlkälte und 17% auf Lüftung. Demnach sind mehr als ein Drittel der Gesamtgrundlast den Querschnittstechnologien **Lüftung** und **Kühlkälte** zuzuweisen. Etwas geringere Anteile sind bei den Verwendungszwecken „Betriebseinrichtung und Beleuchtung“ (9%) sowie „Zentrale Einrichtungen“ (6%) zu erkennen, wobei letzterer vor allem den Serverbetrieb als Dauerverbraucher umfasst.
- Die hohe Gesamtgrundlast des Messobjektes spiegelt sich auch in den Parametern der erfassten Datenreihen wider. Insgesamt weisen 24 Messpunkte einen Grundlast-Faktor

$k_{base} > 0,8$ auf, was auf ein durchgängiges Betriebszeitfenster (Dauerbetrieb) der zugehörigen elektrischen Verbraucher hindeutet. Eine ausführliche Darstellung der Parameterwerte für alle erfassten Datenreihen ist im Anhang zu finden (Abbildung A 4).

Zur Validierung der Messdaten wurde die für die Disaggregation herangezogene Gesamtgrundlast (383 kW) mit der mittleren Grundlast der RLM-Lastgangdaten im Jahr 2023 verglichen. Die Gesamtgrundlast der Messreihe ist um ca. 2,4% höher als die berechnete mittlere Grundlast im Jahr 2023 (ca. 374 kW). Die für diese Datenanalyse verwendete Gesamtgrundlast kann daher als Referenzgrundlast zur Aufschlüsselung verwendet werden.

Lastspitzen-Disaggregation

Bei der Anwendung der Lastspitzen-Disaggregation wird in diesem Fallbeispiel nur die erste Messreihe herangezogen, da nur in dieser abrechnungsrelevante Lastspitzen durch eine parallele Messung der vier Transformatoren erfasst wurden (vgl. Abbildung 55). Die wesentlichen Parameter zur Lastspitzen-Disaggregation sind im Steckbrief festgehalten (s. Tabelle A 4 und Tabelle A 5, s. Anhang). Die Kenndaten der Top 5 Lastspitzen sind detailliert in Tabelle A 6 aufgeführt. Die folgenden Erkenntnisse können zusammenfassend aus der Anwendung der Lastspitzen-Disaggregation gezogen werden:

- Die maximalen Leistungswerte treten in diesem Fallbeispiel vor allem zur Mittagszeit auf. Die Top 5 Lastspitzen können zu **73-78%** auf parallel erfasste Messpunkte aufgeschlüsselt werden. Der Lastgradient (Differenz zum vorherigen Leistungswert in der Datenreihe) liegt zwischen 11,8 und 50,9 kW (vgl. Tabelle A 6 und Abbildung A 5).
- Der Messpunkt „HV NSHV1 SV“ weist bei den betrachteten Top 5 Lastspitzen immer einen positiven Lastgradienten von **8-16 kW** auf. Da die Hauptverteilung „HV NSHV1 SV“ erst in der dritten Messreihe weiter aufgeschlüsselt wurde, kann keine weitere Zuordnung der Lastspitzen auf konkrete Messpunkte erfolgen. Die statistischen Parameter deuten jedoch auf eine Kälteanlage zur Klimatisierung eines Gebäudebereichs als Lastspitzen-Verbraucher hin. Die mittlere Laständerungsrate während der Betriebszeit $LR_{avg} = 0,75$ bestätigt das sehr dynamische Lastverhalten dieser Kälteanlage.
- Der Messpunkt „UV Küche“ lässt ebenfalls auf Lastspitzen-Verbraucher schließen, was vermutlich auf den Betrieb größerer Küchengeräte zurückzuführen ist. Dies wird auch durch die Laständerungsrate sowie den Lastspitzen-Faktor deutlich (vgl. Tabelle A 5).
- Die statistischen Parameter deuten auch auf die große Kälteanlage zur Klimatisierung des Messobjektes („VG Kälte“) als potenziellen Lastspitzen-Verbraucher hin (s. Abbildung A 6 und Abbildung A 7, Anhang). Die Anlage hat darüber hinaus einen großen Einfluss auf das Gesamtsystem, was an den hohen absoluten Parameterwerten deutlich wird.

Zur Validierung der Messdaten werden die Lastspitzen in den RLM-Lastgangdaten mit den tatsächlich erfassten Messdaten verglichen. Die im Messzeitraum aufgetretene Lastspitze (652,6 kW) ist um etwa 16,5% kleiner als die höchste im Jahr 2023 aufgetretene Lastspitze (760 kW). Die im Messzeitraum erfassten Lastspitzen sind somit etwas geringer als die höchsten Lastspitzen im Referenzjahr 2023. Dies ist bei der Einordnung der Ergebnisse der Lastspitzen-Disaggregation zu berücksichtigen.

Lastprofil-Charakterisierung

Die erfassten Messpunkte mit auffälligen Parametern sind im Steckbrief (Tabelle A 4 und Tabelle A 5, s. Anhang) aufgeführt. Zusätzlich werden die berechneten Parameter für alle Messpunkte in den Abbildung A 4 bis Abbildung A 8 grafisch dargestellt. Zu den Disaggregationsanalysen wurden bereits einige Parameter in den oberen Abschnitten erwähnt. Zusätzlich wird an dieser Stelle kurz auf die Ergebnisse des Berechnungsverfahrens „Streuung an diskreten Zeitwerten“ eingegangen:

- Die Datenreihen „UV 7.1“ (Büroverteilung), „VG Kühlzelle 1+2“ zur Klimatisierung eines Gebäudebereichs sowie „UV Küche“ weisen ein sehr **heterogenes Betriebsverhalten** auf (s. Abbildung A 8).
 - Bei der Kälteanlage zur Klimatisierung des Gebäudes („VG Kühlzelle 1+2“) ist dies auf eine starke zyklisch schwankende Lastgangkurve zurückzuführen.
 - Größere elektrische Verbraucher sind v.a. im Messpunkt „UV Küche“ zu erwarten. Diese werden nicht regelmäßig zu einer bestimmten Tageszeit, sondern zu unterschiedlichen Tageszeitpunkten in Betrieb genommen (vgl. Parameter Streuung im Anhang, Tabelle A 5).
 - Gleiches gilt für die größeren Kälte- und Lüftungsanlagen („VG Kälte“, „VG Klima Lüftung“), die ebenfalls an den diskreten Zeitwerten eine höhere Streuung aufweisen.
- Ein **homogenes Lastverhalten** kann vor allem bei einigen kleineren Lüftungsanlagen, dem Server inklusive dem Kältesystem sowie einigen Unterverteilungen (polizeispezifische Verbraucher) identifiziert werden.
 - Dabei handelt es sich größtenteils um Datenreihen, die als Dauerverbraucher (Grundlastfaktor $k_{base} > 0,8$) deklariert sind und dementsprechend kein Ruhezeitfenster aufweisen.

Zusammenfassung

In der Messkampagne zum Fallbeispiel „Polizeipräsidium“ wurde eine hohe Aufschlüsselung (~ **70%**) des Gesamtstromverbrauchs, der Grundlast und der Lastspitzen erreicht. Etwa **30%** des Gesamtstromverbrauchs wurden aufgrund technischer und baulicher Einschränkungen nicht messtechnisch erfasst. Die Ergebnisse verdeutlichen jedoch, dass die großen elektrischen Verbraucher des Messobjektes im Zuge der Messkampagne erfasst wurden. Der Großteil des Stromverbrauchs (**59%**) ist den Verwendungszwecken **Kühlkälte**, **Diverse Technik** und **Lüftung** zuzuordnen. Allein die erfassten Querschnittstechnologien Lüftung und Kühlkälte machen zusammen ca. **40%** des Gesamtstromverbrauchs aus. Die erfassten Kälte- und Lüftungsanlagen sowie Sensible Haustechnik stellen weiterhin auch große Grundlast-Verbraucher dar. In Summe machen die Verwendungszwecke Lüftung, Kühlkälte und Diverse Technik ca. **57%** der Gesamtgrundlast aus. Die besonders hohe Grundlast des Messobjektes wird durch die Identifikation von **24 Messpunkten als Dauerverbraucher** ($k_{base} > 0,8$) erklärt, die kein erkennbares Ruhezeitfenster aufweisen. Bezogen auf Lastspitzen und auffälliges Betriebsverhalten fallen vor allem Messpunkte der Verwendungszwecke **Kühlkälte** und

Zentrale Einrichtungen (Küche) auf. Ausgehend von diesen standardisierten Analysen sind vor allem Detailanalysen zu den Querschnittstechnologien Lüftung und Kühllkälte logische nächste Schritte.

6.5.3 Fallbeispiel Metallverarbeitender Betrieb (Standort A)

Am Standort A des metallverarbeitenden Betriebes wurde eine Messreihe an zwei Messlokalationen durchgeführt (vgl. Kapitel 5.4.1). Dabei wurden insgesamt zwei elektrische Hauptverteilungen als Input-Datenreihen und 15 elektrische Unterverteilungen und Verbrauchergruppen als Output-Datenreihen erfasst. Der schematische Aufbau der elektrischen Verteilung und ein Überblick über die erfassten Messpunkte ist in Abbildung 56 dargestellt.

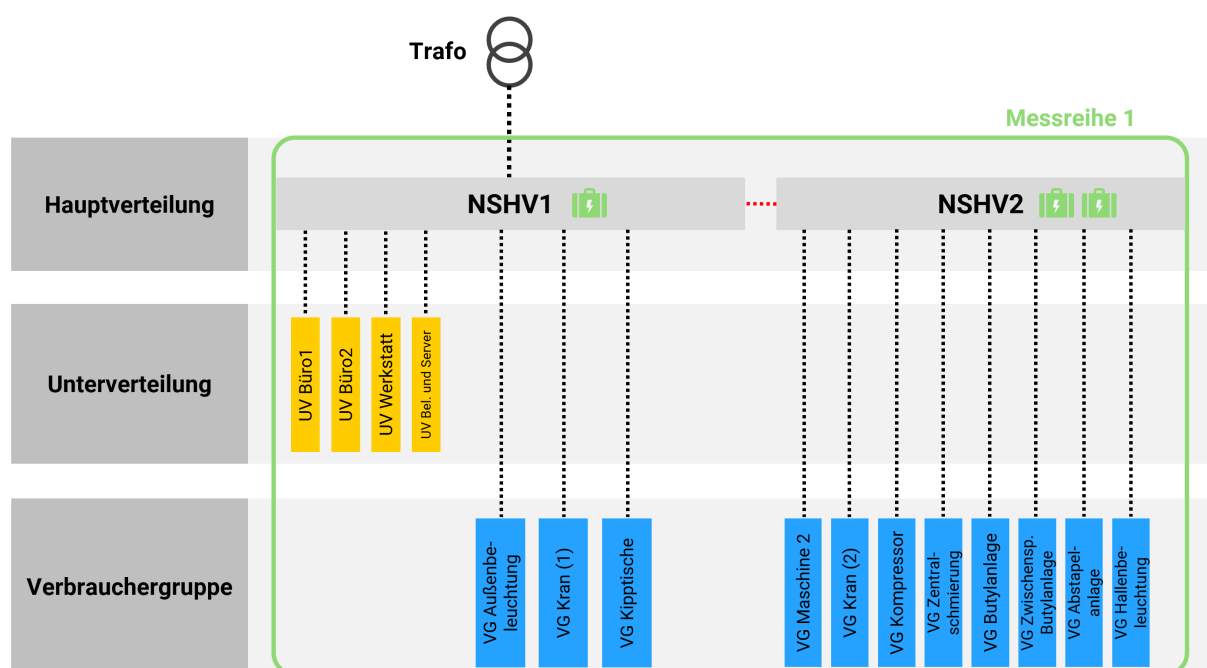


Abbildung 56: Schema elektrische Verteilung und Messpunkte - Fallbeispiel metallv. Betrieb (Standort A)

Die erfassten Messpunkte werden in die nachfolgenden Verwendungszwecke (VDI 3807) eingeordnet (s. Tabelle 57):

Tabelle 57: Einordnung erfasster Messpunkte nach Verwendungszweck - Fallbeispiel metallv. Betrieb (Standort A)

Verwendungszweck	Messpunkte
Produktion	Produktionsmaschinen und Zusatzkomponenten
Druckluft	Kompressor-System
Beleuchtung	Außen- und Hallenbeleuchtung
Diverse Technik	Werkstatt, Krane
Beleuchtung und zentrale Einrichtungen	Beleuchtung und Server
Betriebseinrichtung	Büroverteilung

Dem Verwendungszweck „Produktion“ wurden neben den Produktionsmaschinen selbst auch die Zusatzkomponenten (bspw. Kipptische, Butylanlage) zugeteilt. Der erfasste Messpunkt „UV Beleuchtung und Server“ umfasst elektrische Verbraucher aus zwei Verwendungszwecken und wurde entsprechend als separater Verwendungszweck „Beleuchtung und zentrale Einrichtungen“ aufgeführt.

Verbrauchsdisaggregation

In diesem Fallbeispiel wurde nicht die erfasste elektrische Hauptverteilung „HV NSHV1“ als Input-Datenreihe verwendet. Hintergrund ist der Anschluss einer Photovoltaik-Anlage mit Überschusseinspeisung an der Messlokation „HV NSHV2“. Da die Einspeisung des Messpunktes ins Stromnetz im Zuge der Messinstallation nicht berücksichtigt wurde, enthält die Datenreihe im Falle einer Überschusseinspeisung ins Stromnetz positive Leistungswerte. Vor diesem Hintergrund wurden die RLM-Lastgangdaten sowie der nicht eingespeiste Strom der PV-Anlage als Input-Datenreihe für die Verbrauchsdisaggregation verwendet.

Die Analyseergebnisse zur Verbrauchsdisaggregation sind steckbriefartig in Tabelle A 7 und Tabelle A 8 festgehalten. Im Folgenden werden die Ergebnisse in Stichpunkten aufgeführt:

- Insgesamt können ca. **49%** des Gesamtstromverbrauchs der Referenzwoche aufgeschlüsselt werden. **42%** des Gesamtstromverbrauchs sind eindeutig auf erfasste elektrische Verbraucher zurückzuführen. Die erfassten elektrischen Unterverteilungen machen in Summe nur **7%** des Gesamtstromverbrauchs aus.
- Im Vergleich zu den anderen Fallbeispielen ist der auf die erfassten Messpunkte **aufgeschlüsselte Stromverbrauch geringer**. Dies lässt sich zum einen auf die technischen und baulichen Einschränkungen zurückführen. Weiterhin lag bei der Messplanung der Fokus auf der Erfassung möglichst unterschiedlicher elektrischer Verbraucher (vgl. Kapitel 5.4.1). Daher wurde auch nur eine von insgesamt vier baugleichen Produktionsmaschinen messtechnisch erfasst. Mit der Annahme eines gleichen Betriebs- und Verbrauchsverhaltens der Produktionsmaschinen könnten etwa weitere 30% des Gesamtstromverbrauchs auf die nicht erfassten Produktionsmaschinen zurückgeführt werden. Dadurch wäre theoretisch eine Aufschlüsselung von ca. 79% des Gesamtstromverbrauchs gegeben.
- Die größten erfassten Stromverbraucher sind neben der erfassten Produktionsmaschine das Kompressorsystem, die Hallenbeleuchtung sowie Unterverteilungen mit Beleuchtung/Server und Zusatzkomponenten der Produktionsmaschinen. In Summe machen diese Messpunkte etwa **38%** des Gesamtstromverbrauchs aus.
- Der Verwendungszweck „**Produktion**“ macht den größten Anteil am Gesamtstromverbrauch aus (ca. **21%**). Unter Berücksichtigung der nicht erfassten Produktionsmaschinen ist davon auszugehen, dass dieser Verwendungszweck tendenziell noch bedeutender ist. Darunter sind mit Abstand die Verwendungszwecke „Druckluft“ (10%) und „Beleuchtung“ (8%). Keinen nennenswerten Einfluss auf den Gesamtverbrauch haben die erfassten Büroverteilungen.

Da die RLM-Lastgangdaten des Energieversorgers bei diesem Messobjekt als Input-Datenreihe verwendet werden, kann grundsätzlich von validen Daten ausgegangen werden. Der für die Disaggregation zugrunde gelegte Stromverbrauch der Referenzwoche (5.316 kWh + 486 kWh Photovoltaik-Erzeugung) entspricht dem typischen Wochenstromverbrauch des Messobjektes an Wintermonaten. Im Sommer ist der Netzbezug aufgrund der erhöhten Stromerzeugung durch die Photovoltaik-Anlage geringer.

Grundlast-Disaggregation

Die RLM-Lastgangdaten weisen einen vergleichsweise geringen Grundlast-Faktor $k_{base} = 0,14$ auf. Dies lässt auf eine niedrige Gesamtgrundlast des Messobjektes schließen. Dennoch wird die Grundlast-Disaggregation standardmäßig auf den erfassten Messdatensatz angewendet. Die Ergebnisse der Anwendung dieser Datenanalyse sind detailliert im Anhang aufgeführt (s. Tabelle A 7 und Tabelle A 8). Die wichtigsten Ergebnisse nicht nachfolgend aufgeführt:

- In dieser Messreihe können **88%** der Gesamtgrundlast aufgeschlüsselt werden. Die relevanten Grundlast-Verbraucher wurden demnach im Zuge der Messkampagne erfasst.
- Etwa **73%** der Gesamtgrundlast kann eindeutig auf elektrische Verbraucher zurückgeführt werden. Weitere **15%** sind den erfassten elektrischen Unterverteilungen zuzuordnen.
- Das **Kompressor-System** sowie die **Zentralschmierung** (Zusatzkomponente zur Produktionsmaschine) stellen die größten Grundlast-Verbraucher dar. Zusammen machen sie mehr als **50%** der Gesamtgrundlast aus. Weitere 11% sind vermutlich dem Server zuzuschreiben, da die Beleuchtung im Messpunkt „UV Beleuchtung und Server“ nachts ausgeschaltet sein sollte. Insgesamt machen allein die Top 5 Messpunkte ca. **77%** der Gesamtgrundlast aus.
- Der Verwendungszweck **Produktion** nimmt auch den größten Anteil (**36%**) an der Gesamtgrundlast ein. Weitere **29%** sind dem Verwendungszweck **Druckluft** zuzuordnen. Aufgrund des hohen Grundlast-Verbrauchs wurde für das Kompressor-System eine Detailanalyse durchgeführt. Die Betrachtung der hochaufgelösten Messdaten (10-s Auflösung) ergab, dass während der Ruhezeit ein zyklisches Takten des Kompressors identifiziert werden konnte. Optimierungspotenziale sind in weiterführenden Schritten zu untersuchen.
- Die Messpunkte „VG Kompressor“ und „VG Zentralschmierung“ weisen auffällige Parameterwerte bzgl. der Grundlast auf (hohe absolute Grundlast P_{base} und hoher Grundlast-Faktor k_{base} , der auf nennenswerte Grundlast hindeutet). Die statistischen Parameter zur Analyse der Grundlast der erfassten Messpunkte sind ausführlich in Abbildung A 9 dargestellt (s. Anhang).

Die Gesamtgrundlast wurde für diese Datenanalyse analog zur Verbrauchsdisaggregation basierend auf den RLM-Lastgangdaten über den Zeitraum der Messreihe (15.11.-30.11.2022) gebildet. Die der berechneten Gesamtgrundlast (3,43 kW) zugrunde liegenden Daten können daher als valide angesehen werden.

Lastspitzen-Disaggregation

Die Betrachtung der während des Messzeitraums aufgetretenen Lastspitzen erfolgt analog zu den anderen Datenanalysen auf der Basis der RLM-Lastgangdaten als Input-Datenreihe. Die Ergebnisse sind im Steckbrief (Tabelle A 7 und Tabelle A 8, s. Anhang) aufgeführt. Im Folgenden werden die Ergebnisse stichpunktartig aufgelistet:

- Die betrachteten Top 5 Lastspitzen treten vor allem morgens (07:15-09:00h) auf. Weitere Lastspitzen sind auch über den Tagesverlauf verteilt und treten u.a. nachmittags auf.
- Die Disaggregation der Lastspitzen liegt zwischen **27** und **42%**, was auf die im Abschnitt Verbrauchsdisaggregation vergleichsweise niedrige Aufschlüsselung des Gesamtstromverbrauchs zurückzuführen ist. Die Lastgradienten zum vorherigen Leistungswert liegen bei den Top 5 Lastspitzen zwischen **17,6** und **41,4 kW**.
- Bei der Betrachtung der Lastgradienten der Output-Datenreihen zum Zeitpunkt der Top 5 Lastspitzen wird deutlich, dass anhand der vorliegenden Messdaten **nur bedingt ein unmittelbarer Rückschluss auf einzelne Lastspitzen-Verbraucher** möglich ist. Dennoch liefert die Betrachtung der Top 5 Lastspitzen die folgenden Erkenntnisse:
 - Die aufgetretenen Lastspitzen können auf die erfassten Messpunkte „HV NSHV2“ sowie den nicht erfassten Anteil der Leistung eingegrenzt werden. Beide Datenreihen zeigen zu den Zeitwerten der Top 5 Lastspitzen erhöhte Lastgradienten (Abbildung A 10, s. Anhang).
 - Da in der erfassten Datenreihe „HV NSHV2“ weitere Produktionsmaschinen angeschlossen sind, kann davon ausgegangen werden dass der zeitgleiche Betrieb der Produktionsmaschinen Ursache für das Auftreten der Lastspitzen ist.
 - Die erfasste Produktionsmaschine sowie das Kompressor-System zeigen an den Lastspitzen 1-3 Lastgradienten von bis zu 10 kW auf. Gemessen am gesamten Lastgradienten der Input-Datenreihe machen diese Verbraucher aber nur einen kleinen Anteil aus.
- Unter Einbezug der statistischen Parameter (Lastspitzen-Faktor und Laständerungsrate) sind weitere Rückschlüsse über Lastspitzen-Verbraucher möglich:
 - Die Berechnung des **Lastspitzen-Faktors** für die erfassten Datenreihen zeigt, dass viele Messpunkte nur einige wenige, hohe Leistungswerte aufweisen. Dies lässt auf eine teilweise geringe Nutzungszeit der elektrischen Verbraucher (u.a. Zusatzkomponenten der Produktionsmaschinen, Kran) schließen. Details zum Lastspitzen-Faktor sind in Abbildung A 11 dargestellt (s. Anhang).
 - Die Anwendung der **Laständerungsrate** auf die erfassten Datenreihen identifiziert eindeutig die **Produktionsmaschine** als Lastspitzen-Verbraucher. Die statistischen Parameter deuten somit ebenfalls darauf hin, dass der parallele Betrieb der Produktionsmaschinen die Lastspitzen dieses Messobjektes verursacht. Details zur Laständerungsrate sind in Abbildung A 12 dargestellt (s. Anhang).

Zur Validierung der Messdaten erfolgt eine Einordnung der erfassten Lastspitzen während des Messzeitraums im Verhältnis zu den maximalen Leistungswerten im Jahr 2022. Bei der Bewertung der Analyseergebnisse ist demnach zu berücksichtigen, dass die im Messzeitraum erfasste Lastspitze (114,9 kW) ca. 16% geringer als die bisher höchste Lastspitze im Jahr 2022 (133,6 kW) ist.

Lastprofil-Charakterisierung

Die Ergebnisse der angewendeten Berechnungsverfahren zur Ermittlung der statistischen Parameter wurden zum Teil bereits in den vorangegangenen Abschnitten aufgeführt. Im Detail sind die Ergebnisse aller Berechnungsverfahren in den Abbildung A 9 bis Abbildung A 13 im Anhang aufgeführt. An dieser Stelle werden zusätzlich die Ergebnisse des Berechnungsverfahrens „Streuung an diskreten Zeitwerten“ aufgeführt:

- Ein **besonders heterogenes Betriebs- und Regelverhalten** ist bei den erfassten Kranen, den Kipptischen sowie der Produktionsmaschine („VG Maschine2“) erkennbar. Die zugehörigen elektrischen Verbraucher werden zu unregelmäßigen Zeitpunkten im Tagesverlauf eingeschalten. Es liegt somit kein eindeutiger Tageslastverlauf vor.
- An dem hohen Interquartilsabstand wird der Einfluss der **Produktionsmaschine** auf das Gesamtsystem des Messobjektes deutlich.
- Weitere Messpunkte wie dem **Kompressor-System** ist ebenfalls ein heterogenes Betriebsverhalten zuzuschreiben.
- Ein homogenes Betriebs- und Regelverhalten ($QD_{avg} \leq 0,05$) ist bei keiner der erfassten Datenreihen erkennbar.

Zusammenfassung

In der Messkampagne zum Fallbeispiel „Metallverarbeitender Betrieb (Standort A)“ wurde eine mittlere Aufschlüsselung (ca. **49%**) des Gesamtstromverbrauchs sowie der Lastspitzen erreicht. Die relevanten Grundlast-Verbraucher konnten jedoch identifiziert werden, was an der Aufschlüsselung von **88%** der Grundlast deutlich wird. Die Verwendungszwecke **Produktion** und **Druckluft** mit den zugehörigen elektrischen Verbrauchern (Produktionsmaschinen und Peripherie-Geräte sowie Kompressor-System) stellen die größten erfassten Verbraucher dar. Das **Kompressor-System** und die **Zentralschmierung** sind darüber hinaus auffällige Grundlast-Verbraucher, die in weiterführenden Detailanalysen betrachtet werden sollten. Während die Lastspitzen-Disaggregation nur eingeschränkt Aussagen über Lastspitzen-Verbraucher liefert, identifizieren die Berechnungsverfahren die Messpunkte des Verwendungszweckes **Produktion** als relevante Lastspitzen-Verbraucher (Produktionsmaschinen und Peripherie-Geräte).

6.5.4 Fallbeispiel Metallverarbeitender Betrieb (Standort B)

Die Messkampagne am Standort B des metallverarbeitenden Betriebes fand unmittelbar anknüpfend an die Messkampagne am Standort A statt. In diesem Fallbeispiel umfasst die Messreihe drei Messlokationen mit zwei elektrischen Hauptverteilungen (GHV = Gebäudehauptverteilung) sowie

13 elektrischen Unterverteilungen und Verbrauchergruppen. Abbildung 57 stellt dazu das Schema der elektrischen Verteilung sowie die erfassten Messpunkte dar.

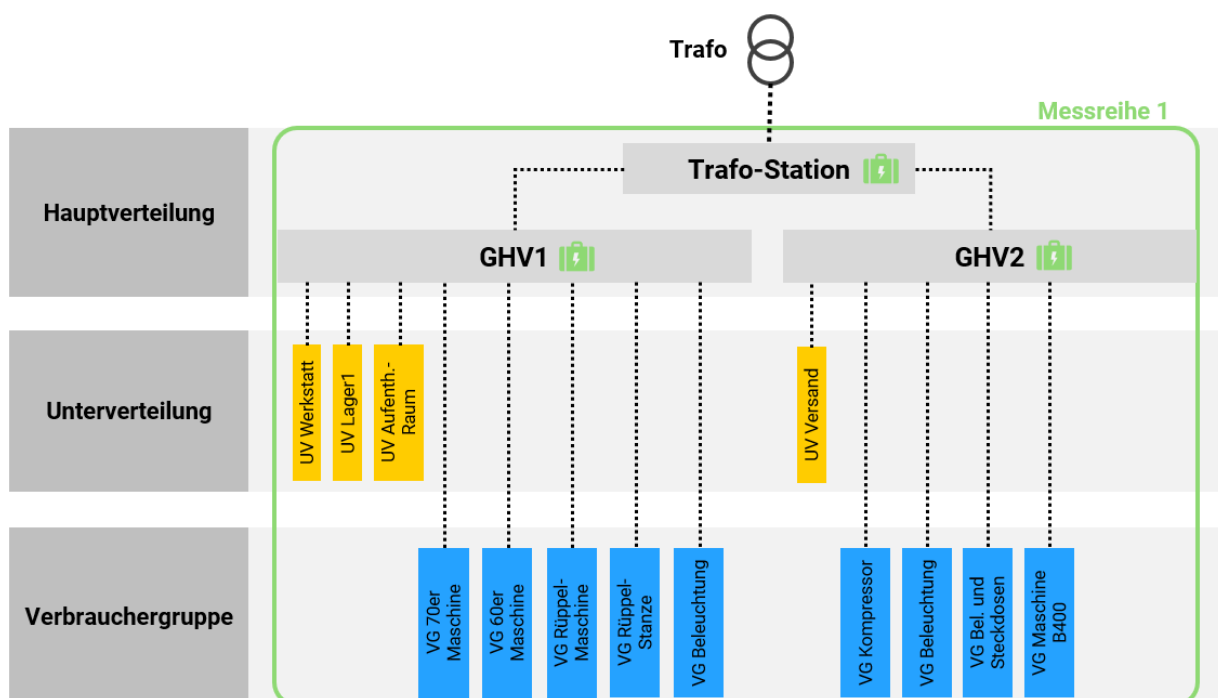


Abbildung 57: Schema elektrische Verteilung und Messpunkte - Fallbeispiel metallv. Betrieb (Standort B)

Die Messpunkte werden analog zu den anderen Fallbeispielen Verwendungszwecken (VDI 3807) zugeordnet. Tabelle 58 führt die Verwendungszwecke sowie die jeweils eingeordneten Messpunkte auf.

Tabelle 58: Einordnung erfasster Messpunkte nach Verwendungszweck - Fallbeispiel metallv. Betrieb (Standort B)

Verwendungszweck	Messpunkte
Produktion	Produktionsmaschinen und Zusatzkomponenten
Druckluft	Kompressor-System
Beleuchtung	Hallenbeleuchtung
Diverse Technik	Werkstatt, Lager, Versand
Betriebseinrichtung	Aufenthaltsraum

Verbrauchsdisaggregation

Zur Ermittlung des Gesamtstromverbrauchs des Messobjektes wurden die Leistungswerte der erfassten elektrischen Hauptverteilungen (GHV1 und GHV2) aufsummiert. Die so gebildete neue Datenreihe dient als Input-Datenreihe zur Anwendung der Disaggregationsanalysen. Die Ergebnisse der Verbrauchsdisaggregation sind für dieses Messobjekt in Tabelle A 10 und Tabelle A 11 steckbriefartig zusammengefasst. Im Folgenden wird auf die Kernergebnisse der Analyse eingegangen:

- Insgesamt können **70%** des Gesamtstromverbrauchs auf die erfassten Output-Datenreihen aufgeschlüsselt werden. Mit **48%** ist nahezu die Hälfte des Gesamtstromverbrauchs eindeutig auf erfasste elektrische Verbrauchergruppen zurückzuführen. Weitere **22%** des Gesamtstromverbrauchs sind erfassten elektrischen Unterverteilungen zuzuordnen.
- Der restliche Verbrauchsanteil von **30%** konnte bedingt durch das limitierte Messequipment sowie insbesondere bauliche Einschränkungen (gewachsene und veraltete Elektroinstallati-
onen) nicht messtechnisch erfasst werden. Unter Beachtung der Messplanung kann jedoch davon ausgegangen werden, dass ein Großteil des nicht erfassten Verbrauchs auf weitere Produktionsmaschinen zurückzuführen ist.
- Als relevante Stromverbraucher wurden das **Kompressor-System (16%** des Gesamtstromverbrauchs), eine der **Produktionsmaschinen** („VG 70er Maschine“, **8%**) sowie ein Teil der **Beleuchtung (7%)** identifiziert. Weiterhin gehören auch die Unterverteilungen der Gebäudebereiche **Lager (11%)** und **Versand (8%)** zu den größeren erfassten Messpunkten. Insgesamt machen die Top 5 Messpunkte etwa **50%** des Gesamtstromverbrauchs aus.
- Wie bei Standort A macht der Verwendungszweck **Produktion** auch in diesem Messobjekt den größten Anteil am Gesamtstromverbrauch aus (22%), gefolgt von „Diverse Technik“ (21%), „Druckluft“ (16%) und „Beleuchtung“ (11%).

Zur Validierung werden die Messdaten der Input-Datenreihe mit den RLM-Lastgangdaten über den Messzeitraum verglichen. Über fünf betrachtete Messtage weicht der Stromverbrauch der Input-Datenreihe um ca. 3% vom Stromverbrauch der RLM-Lastgangdaten ab. Da dies innerhalb der Messtoleranz liegt (vgl. Kapitel 4.2), kann von validen Messdaten ausgegangen werden. Der Stromverbrauch der Referenzwoche (7.125 kWh) weicht um ca. 4,4% vom durchschnittlichen Wochenstromverbrauch des Messobjektes im Jahr 2022 ab (6.827 kWh). Es handelt sich daher grundsätzlich um typische Verbrauchswerte für das Messobjekt.

Grundlast-Disaggregation

Die Ergebnisse der Grundlast-Disaggregation sind detailliert im Steckbrief des Fallbeispiels aufgeführt (Tabelle A 10 und Tabelle A 11, s. Anhang). Nachfolgend sind die wesentlichen Ergebnisse stichpunktartig aufgeführt:

- Die Gesamtaufschlüsselung des Stromverbrauchs beträgt **58%**. Besonders auffällig ist, dass die erfassten Unterverteilungen mit insgesamt **45%** den Großteil der erfassten Grundlast ausmachen. Weitere **13%** können auf erfasste Verbrauchergruppen aufgeschlüsselt werden.
- Der hohe Anteil der nicht erfassten Grundlast (**42%**) kann darauf hindeuten, dass in diesem Fallbeispiel größere elektrische Grundlast-Verbraucher nicht erfasst wurden.
- Als relevante Grundlast-Verbraucher fallen vor allem die elektrischen Unterverteilungen der Gebäudebereiche **Lager (27%** der Gesamtgrundlast) und **Versand (15%)** auf. Die Ursachen müssen im Rahmen weiterführender Detailanalyse geprüft werden.

- Weitere elektrische Grundlast-Verbraucher ergeben sich durch den Standby-Verbrauch des **Kompressor-Systems** sowie **Produktionsmaschinen**. Insgesamt machen die Top 5 Messpunkte etwa **51%** der Gesamtgrundlast aus.
- Da die Gebäudebereiche Lager und Versand dem Verwendungszweck „**Diverse Technik**“ zugeordnet werden, macht dieser auch den größten Anteil bei der Aufschlüsselung der Gesamtgrundlast nach Verwendungszwecken aus.

Aufgrund der geringen Abweichung zwischen RLM-Lastgangdaten und der Input-Datenreihe (ca. 3%, s. oberer Abschnitt) kann grundsätzlich auch von validen Daten für die Grundlast-Disaggregation ausgegangen werden. Eine genauere Betrachtung zeigt, dass die Grundlast starke Schwankungen aufweist. Dies zeigt sich auch beim Vergleich der berechneten mittleren Grundlast der Input-Datenreihe (8 kW) mit der auf gleiche Weise berechneten Grundlast der RLM-Lastgangdaten aus 2022 (ca. 6 kW). Nach Detailprüfung kann die schwankende Grundlast auf das Laden mehrerer Flurfahrzeuge sowie Elektroautos am Standort des Messobjektes zurückgeführt werden. Diese Ladestationen wurden im Zuge der Messkampagne nicht erfasst. Die geringe Aufschlüsselung der Gesamtgrundlast kann vermutlich auf diese Umstände zurückgeführt werden, zumal die Ladezeiten außerhalb der Betriebszeit liegen.

Lastspitzen-Disaggregation

Die Disaggregation der Top 5 Lastspitzen kann anhand der gebildeten Input-Datenreihe (Summe aus GHV1 und GHV2) erfolgen. Die Ergebnisse sind im Steckbrief (Tabelle A 10 und Tabelle A 11, s. Anhang) aufgeführt. Des Weiteren sind in Abbildung A 15 die Kenndaten der betrachteten Top 5 Lastspitzen aufgeführt (s. ebenfalls Anhang). Nachfolgend werden die wichtigsten Ergebnisse stichpunktartig aufgeführt:

- Die Lastspitzen treten in diesem Messobjekt verteilt über einen Zeitraum von 06:00- 22:30h (Betriebszeitfenster) auf. Die Top 5 Lastspitzen können zu **63-77%** auf erfasste Messpunkte disaggregiert werden.
- Die Lastgradienten (Änderung zum vorherigen Leistungswert) liegen zwischen **11,6** und **26,4 kW**.
- In diesem Fallbeispiel sind die Lastspitzen auf die folgenden Messpunkte bzw. Verbraucher zurückzuführen:
 - o Gebäudebereich **Lager**: Hohe Lastgradienten von 13 bzw. 24 kW bei der ersten und dritten Lastspitze (vgl. Abbildung A 15, s. Anhang). Auffällig ist auch der hohe Lastspitzen-Faktor, der auf einige wenige, hohe Lastspitzen in der Datenreihe hindeutet (vgl. Abbildung A 16, s. Anhang).
 - o Peripherie-Gerät **Rüppel-Maschine**: Weist bei den Top 5 Lastspitzen Lastgradienten zwischen 4 und 8 kW auf. Bestätigt wird das dynamische Lastverhalten auch durch die hohe Laständerungsrate (vgl. Abbildung A 17, s. Anhang).

- **Produktionsmaschine Maschine B400:** Weist bei den Lastspitzen 2 und 4 Lastgradienten von 9-14 kW auf. Auch hier bestätigt die hohe Laständerungsrate das dynamische Lastverhalten der Produktionsmaschine (vgl. Abbildung A 17, s. Anhang).

Die Einordnung der erfassten Lastspitzen während des Messzeitraums erfolgt durch den Vergleich mit den aufgetretenen Lastspitzen der RLM-Lastgangdaten. Die höchste abrechnungsrelevante Lastspitze im Jahr 2022 lag bei 135,6 kW. Die höchste im Messzeitraum aufgetretene Lastspitze ist somit etwa 17,9% geringer als die höchste Lastspitze des Jahres. Dennoch können die aufgetretenen Lastspitzen auf erfasste elektrische Verbraucher zurückgeführt werden.

Lastprofil-Charakterisierung

Die Ergebnisse der angewendeten Berechnungsverfahren zur Ermittlung der statistischen Parameter wurden zum Teil bereits in den vorangegangenen Abschnitten aufgeführt. Im Detail sind die Ergebnisse aller Berechnungsverfahren in den Abbildung A 14 bis Abbildung A 18 im Anhang dargestellt. An dieser Stelle wird zusätzlich auf die Ergebnisse des Berechnungsverfahrens „Streuung an diskreten Zeitwerten“ eingegangen:

- Die erfassten **Produktionsmaschinen** („Maschine B400“, „70er Maschine“, „60er Maschine“) weisen ein heterogenes Betriebsverhalten auf. Insbesondere bei der „70er Maschine“ liegt durch den hohen Interquartilsabstand ein großer Einfluss auf das Gesamtsystem vor. Ein besonders heterogenes Betriebsverhalten ist bei der „60er Maschine“ erkennbar (vgl. Abbildung A 18, Anhang). Dies verdeutlicht, dass die Produktionsmaschinen keinen geregelten bzw. homogenen Tagesablauf aufweisen, sondern zu unregelmäßigen Zeitpunkten betrieben werden (heterogenes Betriebsverhalten).
- Auch die Messpunkte „UV Werkstatt“, „UV Aufenthaltsraum“ und „VG Beleuchtung“ zeigen ein besonders heterogenes Betriebsverhalten. Die Unterverteilung „Aufenthaltsraum“ umfasst mehrere elektrische (Küchen-)Geräte, die zu unregelmäßigen Zeitpunkten über den Tagesverlauf betrieben werden.
- Ein homogenes Betriebsverhalten kann einzig bei den Messpunkten des Verwendungszwecks **Beleuchtung** nachgewiesen werden.

Zusammenfassung

In der Messkampagne zum Fallbeispiel „Metallverarbeitender Betrieb (Standort B)“ wurde eine hohe Aufschlüsselung (ca. **70%**) des Gesamtstromverbrauchs und der Lastspitzen erreicht. So konnte das **Kompressor-System** sowie der Gebäudebereich **Lager1** als größte Messpunkte identifiziert werden. Eingeteilt nach Verwendungszwecken stellen **Produktion** und **Diverse Technik** die größten Bereiche dar (insges. **43%**). In der Grundlast konnte nur eine mittlere Aufschlüsselung (**58%**) erreicht werden. Auffällig sind insbesondere die Messpunkte der Gebäudebereiche **Lager1** und **Versand**, die in Summe **42%** der Grundlast ausmachen. Hier sind weiterführende Detailanalysen notwendig, um die Ursache für die hohe Grundlast in diesen Teilbereichen zu betrachten. Die höchsten Lastspitzen

können auf mehrere Messpunkte der Verwendungszwecke **Produktion** und **Diverse Technik** zurückgeführt werden. Statistische Parameter identifizieren insbesondere Produktionsmaschinen als auffällige Messpunkte mit dynamischer Lastcharakteristik und heterogenen Betriebsverhalten.

6.5.5 Fallbeispiel Lüftungsanlage

Der Fokus liegt in diesem Fallbeispiel auf der Erfassung des Stromverbrauchs einer Lüftungsanlage in einem Hochschulgebäude (vgl. Kapitel 5.4.1). Dazu werden sowohl der Gesamtstromverbrauch in Form der Input-Datenreihe „UV Lüftung“ sowie mehrere Einzelkomponenten des Systems als Output-Datenreihen parallel erfasst. Abbildung 58 zeigt das Schema der elektrischen Verteilung und gibt einen Überblick über die erfassten Messpunkte.

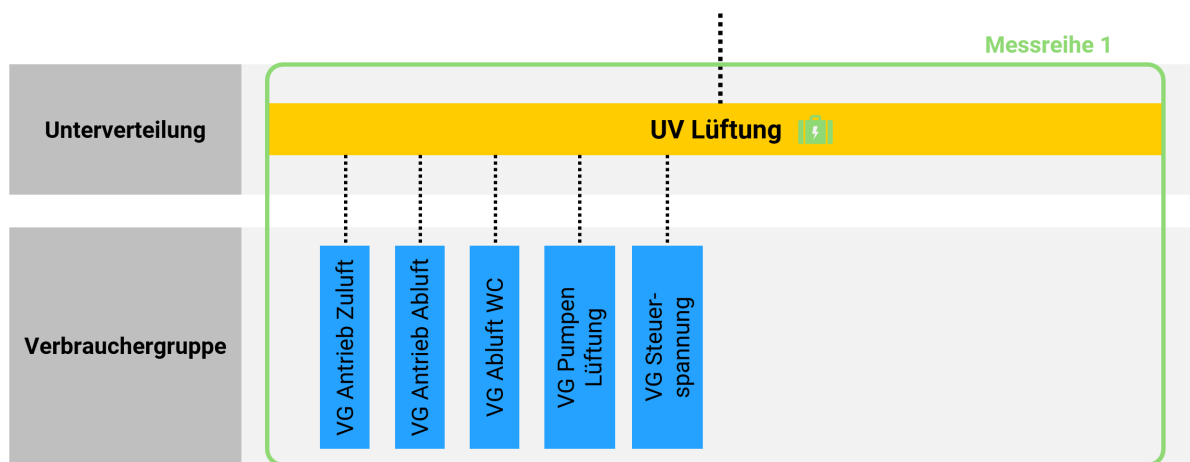


Abbildung 58: Schema elektrische Verteilung und Messpunkte – Fallbeispiel Lüftungsanlage

In diesem Fallbeispiel wird lediglich die Disaggregationsanalyse Verbrauchsdisaggregation angewendet. Die Input-Datenreihe „UV Lüftung“ weist einen Grundlast-Faktor $k_{base} = 0,02$ auf. Dies deutet auf ein Lastprofil mit nahezu keinem Grundlast- bzw. Standby-Verbrauch hin (vgl. Kapitel 6.3.4). Dementsprechend kann in diesem Fallbeispiel auf die Datenanalyse Grundlast-Disaggregation verzichtet werden. Es kann davon ausgegangen werden, dass das Lüftungssystem während der Ruhezeit vollständig ausgeschaltet ist und nahezu kein Standby-Verbrauch anliegt. Auch die Betrachtung der Lastspitzen erfolgt lediglich basierend auf den Berechnungsverfahren und zugehöriger statistischer Parameter. Die Lastspitzen-Disaggregation wäre dann notwendig, wenn die elektrische Verteilung abrechnungsrelevante Lastspitzen aufweist.

Die Ergebnisse der angewendeten Analysen sind ausführlich im Steckbrief (Tabelle A 13 und Tabelle A 14, s. Anhang) dargestellt. Nachfolgend werden die Kernergebnisse zur Verbrauchsdisaggregation stichpunktartig aufgeführt:

- Der **Zuluft-Motor** fällt als größter identifizierter elektrischer Verbraucher auf und macht insgesamt ca. **62%** des Gesamtstromverbrauchs der Unterverteilung aus.
- Der **Abluft-Motor** scheint deutlich kleiner dimensioniert zu sein und macht lediglich **22%** des Gesamtstromverbrauchs aus.

- Weitere **15%** sind auf mehrere dezentrale **Abluft-Motoren der WCs** des Gebäudes zurückzuführen.
- Der Stromverbrauch der erfassten **Pumpen** sowie der **Steuerspannung** des Schaltschranks ist verglichen mit den anderen Messpunkten gering.

Für dieses Fallbeispiel liegen keine RLM-Lastgangdaten zur Validierung der Messdaten vor. Weiterhin besteht für das Lüftungssystem bisher keine stationäre Untermessung. Eine Validierung der Messdaten ist daher nur durch einen Vergleich der erfassten Input-Datenreihe „UV Lüftung“ mit der Summe der Output-Datenreihen möglich. Bezogen auf die betrachtete Referenzwoche liegt zwischen beiden Datenreihen eine Differenz von ca. 59 kWh bzw. 1,8% vor. Diese Differenz ist auf die Messgenauigkeit der eingesetzten Messtechnik zurückzuführen (vgl. Kapitel 4.2).

Die automatisierte Einteilung der Datenreihen in ein Betriebs- und Ruhezeitfenster ermöglicht unmittelbare Aussagen über die Betriebszeiten der Lüftungsanlage. Bezogen auf eine Referenzwoche liegen **etwa 50%** der Zeitwerte im Betriebszeitfenster. Die Betriebszeiten liegen an den Betriebstagen Montag-Freitag zwischen 06:30-22:00h und Samstag zwischen 07:00-20:00h. Sonntage können als Ruhetage klassifiziert werden.

Die Parameter zur Beurteilung aufgetretener **Lastspitzen** sind ebenfalls detailliert im Steckbrief (Tabelle A 13, s. Anhang) aufgeführt. Die berechneten Parameter lassen die folgenden Schlussfolgerungen zu:

- Alle erfassten Datenreihen weisen eine **Laständerungsrate** $LR_{avg} \leq 0,05$ auf. Bei den aufeinander folgenden Leistungswerten während der Betriebszeit liegen somit keine hohen Lastgradienten (Rampen) vor.
- Alle erfassten Messpunkte weisen **niedrige Lastspitzen-Faktoren** $k_{peak} < 0,3$ auf. Dies bestätigt, dass es sich bei der Lüftungsanlage nicht um einen potenziellen Lastspitzen-Verbraucher handelt.
- Die Werte für die Spitzenlast-Differenz der Input-Datenreihe „UV Lüftung“ ($\Delta P_{peak} = 6,73 \text{ kW}$) und der Lastspitzen-Faktor ($k_{peak} = 0,18$) können auf eine Erhöhung des Soll-drucks während des Messzeitraums zurückgeführt werden. Die entstandenen Ausreißer beeinflussen den Lastspitzen-Faktor stärker als die über das arithmetische Mittel berechnete Laständerungsrate.

Schließlich kann auch das **Betriebs- und Regelverhalten** des Systems anhand des Berechnungsverfahrens „Streuung an diskreten Zeitwerten“ beurteilt werden:

- Das Betriebsverhalten des gesamten Lüftungssystems kann mit $QD_{avg} = 0,02$ als homogen bezeichnet werden. An den diskreten Zeitwerten liegt somit keine große Streuung der Leistungswerte vor.

Das anhand der Parameter beschriebene homogene Betriebsverhalten wird durch die Drehzahlregelung des Systems mit konstantem Druck und Volumenstrom bestätigt (Zeitabhängige Regelung, Kategorie C3 nach DIN EN 16798-3) [146]. Ein konstant vorgegebener Druck im Zuluft-Kanal definiert

somit das Betriebslastniveau sowie den geförderten Luftvolumenstrom des Systems. Mit einer bedarfsabhängigen Regelung (bspw. CO₂-Regelung) sowie einer Steuerung des Systems über Lüftungsclappen würde das System ein heterogeneres Lastverhalten aufweisen und in einer entsprechend höheren Kategorie der Regelung des Luftvolumenstroms einzuordnen sein.

Auf der Basis der standardisierten Datenanalysen können für einzeln betrachtete Systeme weitere Detailanalysen durchgeführt werden. Für Lüftungsanlagen sind die in Tabelle 59 aufgeführten Detailanalysen relevant. Aus diesen Analysen ergeben sich Ansätze zur Optimierung von Lüftungsanlagen, die im Zuge von Kurzzeitmessungen erfasst werden.

Tabelle 59: Detailanalysen Lüftungsanlagen

Detailanalyse	Hintergrund und Zielsetzung
Betriebsstundenoptimierung	Analyse der Betriebszeiten nach Typtagen und Beurteilung des Potenzials zur Optimierung der Betriebsweise.
Lüftungsclappen	Analyse des Betriebes von Lüftungsclappen auf das Betriebsverhalten einzelner Systemkomponenten (v.a. Zuluft- und Abluft-Motor). Erfordert bereits verbaute Lüftungsclappen und Betrachtung der Lastgangdaten in hoher Messdatenauflösung (bspw. 10-s).
Solldruck	Analyse der Solldruck-Änderung auf das Lastverhalten der einzelnen Systemkomponenten (v.a. Zuluft- und Abluft-Motor). Erfordert Lüftungssysteme mit vorgegebenen Solldruck im Zu- und Abluftkanal sowie Betrachtung der Lastgangdaten in hoher Messdatenauflösung (bspw. 10-s).
Anlaufverhalten	Analyse des Betriebsverhaltens des Lüftungssystems bzw. einzelner Systemkomponenten beim Anlaufen sowie während des Abschaltvorgangs. Erfordert Betrachtung der Lastgangdaten in hoher Messdatenauflösung (bspw. 10-s).

Die aufgeführten Detailanalysen wurden für das betrachtete Lüftungssystem durchgeführt. Es ist allerdings zu beachten, dass die Analysen zu Lüftungsclappen und Solldruck-Änderungen nur durchgeführt werden können, wenn die entsprechenden Anlagenspezifikationen (z.B. Lüftungsclappen oder Solldruck-Regelung) vorhanden sind.

Spezifische Kennzahlen Lüftungsanlagen

Anhand von spezifischen Energiekennzahlen kann die Effizienz von Lüftungsanlagen aufbauend auf den erfassten Messdatensätzen beurteilt und eingeordnet werden. Zur Ermittlung dieser Kennzahlen ist jedoch in der Regel die Erhebung weiterer **Betriebsdaten** notwendig.

Die spezifische Ventilatorleistung gilt als Maß zur Bestimmung des Wirkungsgrades des Lufttransports in einem System und ist in der DIN EN 16798-3 definiert [146]. Die Kennzahl P_{SFP} [W/(m³/s)] (*specific fan power*) kann aus dem Quotienten aus Leistungsaufnahme P [W] des Ventilators sowie dem Auslegungsvolumenstrom durch den Ventilator q_v [m³/s] ermittelt werden. Die Norm sieht zur

Einordnung der Kennzahl insgesamt acht Kategorien vor (SFP 0 – SFP 7). Für das gegebene Lüftungssystem kann diese Kennzahl jedoch aufgrund unbekannter Volumenströme nicht ermittelt werden. Erst eine Volumenstrommessung würde eine präzise Bestimmung der Kennzahl und damit eine Bewertung des Systems ermöglichen.

Eine weitere Energiekennzahl zur Beurteilung von Lüftungssystemen ist die spezifische installierte Leistung p_{LF} [W/m²] (LF = Luftförderung) nach VDI 3807 [66]. Sie kann aus dem Quotienten der elektrischen Leistung der Ventilatorantriebe P_{LF} [W] und der belüfteten Fläche A_{LF} [m²] des Lüftungssystems ermittelt werden. Die Richtlinie schlägt eine Einordnung nach fünf Bedarfsklassen (sehr hoch, hoch, mittel, gering, sehr gering) für verschiedene Standardnutzungen vor. Für die Standardnutzung „Hörsaal/Auditorium“ liegt die Energiekennzahl zwischen 77,9 W/m² (sehr hoch) und 10,6 W/m² (sehr gering) [66]. Die Bedarfsklasse „gering“ gilt dabei als Grenzwert und die Bedarfsklasse „sehr gering“ als Zielwert. Nachfolgend erfolgt die Berechnung für das betrachtete Lüftungssystem (26):

$$p_{LF} = \frac{P_{LF}}{A_{LF}} = \frac{P_{LF,Zuluft} + P_{LF,Abluft}}{A_{LF}} = \frac{33.720 \text{ W}}{1.193,62 \text{ m}^2} = 28,25 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \quad (26)$$

$P_{LF,Zuluft}$ Mittlere elektrische Leistung Zuluft-Antrieb [W]

$P_{LF,Abluft}$ Mittlere elektrische Leistung Abluft-Antrieb [W]

Zur Ermittlung der mittleren elektrischen Leistung der Antriebe wurde das arithmetische Mittel der Leistungswerte im Betriebszeitfenster bestimmt. Gemäß der Einordnung der Kennzahlenwerte kann das betrachtete Lüftungssystem der Bedarfsklasse „mittel“ zugeordnet werden. Damit liegt die Kennzahl für das betrachtete System deutlich über dem anzustrebenden Wert von 10,6 W/m². Um genauere Informationen über die Effizienz des Lüftungssystems zu erhalten, müsste eine Volumenstrommessung (bspw. im Zuluft-Kanal) erfolgen. So könnte die spezifische Ventilatorleistung als zusätzliche Kennzahl zur Bewertung des Systems herangezogen werden.

Zusammenfassung

In der Messkampagne zum Fallbeispiel „Lüftungsanlage“ wurde eine sehr hohe Aufschlüsselung (> 99%) des Gesamtstromverbrauchs erreicht. Der Zuluft-Antrieb ist der größte elektrische Verbraucher des Lüftungssystems (62%), gefolgt vom Abluft-Antrieb (22%). Eine Disaggregation der Grundlast sowie der Lastspitzen ist aufgrund statistischer Parameter (weder relevante Grundlast noch Lastspitzen) nicht notwendig. Anhand der berechneten statistischen Parameter kann dem Lüftungssystem ein statisches Lastverhalten und ein homogenes Betriebsverhalten nachgewiesen werden. Weiterführende spezifische Detailanalysen können zur Optimierung der Betriebsstunden und weiteren für die Querschnittstechnologie Lüftung spezifischen Auswertungen (Lüftungsklappen, Soll-druck-Änderung) durchgeführt werden. Anhand von Energiekennzahlen wie der spezifischen installierten Leistung kann die Effizienz des Lüftungssystems bewertet werden. Für eine präzisere Bewertung des Systems ist zusätzlich die (messtechnische) Erfassung des Volumenstromes notwendig.

6.5.6 Fallbeispiel Kälteanlage

Dieses Fallbeispiel umfasst eine Messkampagne in einem Veranstaltungs- und Eventgebäude mit dem Fokus auf ein Kältesystem bestehend aus zwei Kompressionskälteanlagen (vgl. Kapitel 5.4.1). Die beiden Anlagen werden im Parallelverbund betrieben. Im Teillastbereich kann eine Anlage ausgeschaltet und die andere im Volllastbetrieb betrieben werden [147]. Zudem handelt es sich um ein redundantes System. Zur messtechnischen Erfassung der beiden Kälteanlagen wurden zwei Messsysteme zur Wirkleistungsmessung verwendet. Das Schema der elektrischen Verteilung sowie der Messpunkte ist in Abbildung 59 dargestellt.

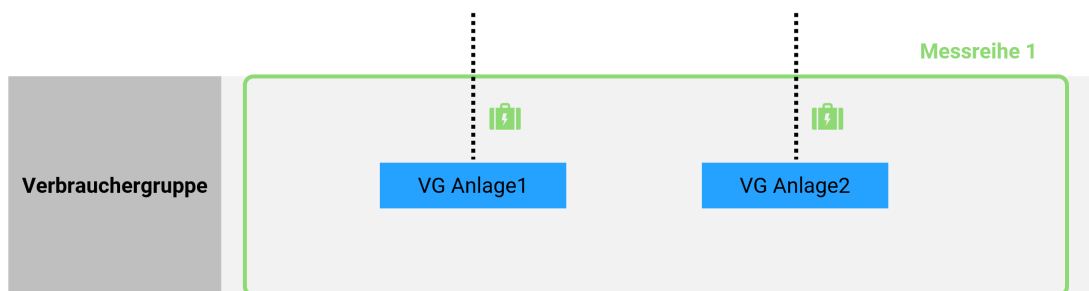


Abbildung 59: Schema elektrische Verteilung und Messpunkte - Fallbeispiel Kälteanlage

Analog zum Fallbeispiel Lüftungsanlage entfallen auch in diesem Fallbeispiel die Datenanalysen Grundlast-Disaggregation und Lastspitzen-Disaggregation. Der Grundlast-Faktor der beiden Anlagen deutet darauf hin, dass keine nennenswerte Grundlast anliegt. Dieser beträgt für beide Kälteanlagen bei $k_{base} \leq 0,05$ (vgl. Tabelle A 15, Anhang). Eine Input-Datenreihe mit abrechnungsrelevanten Lastspitzen wird ebenfalls nicht erfasst, sodass die Betrachtung der Lastspitzen auf der Basis statistischer Parameter erfolgt. Die wesentlichen Analyseergebnisse sind im Steckbrief festgehalten (s. Tabelle A 15, Anhang).

Die **Verbrauchsdisaggregation** gibt zunächst Aufschluss über die Aufschlüsselung des Stromverbrauchs. In diesem Fallbeispiel wurde der Stromverbrauch über den gesamten Messzeitraum aufgeschlüsselt, da die Anlagen kein wiederkehrendes, wöchentlich gleiches Betriebsverhalten aufweisen (s. Parameter zur Streuung, Tabelle A 15). Zudem beeinflussen zu unregelmäßigen Zeitpunkten stattfindende Veranstaltungen den Stromverbrauch der Anlagen wesentlich. Der auf eine Referenzwoche bezogene Stromverbrauch ändert sich somit abhängig von den Veranstaltungen. Die Ergebnisse der Verbrauchsdisaggregation zeigen, dass sich der Stromverbrauch des Kältesystems nahezu gleichmäßig auf die beiden baugleichen Anlagen aufteilt (**47%** Anlage1 vs. **53%** Anlage2).

Die Parameter zum Ruhezeit- und Betriebszeitfenster der Kälteanlagen verdeutlichen, dass „Anlage1“ zu 30% und „Anlage2“ zu 32% des betrachteten Messzeitraums in Betrieb ist. Bezogen auf den betrachteten Messzeitraum von 34 Messtagen entspricht das 245 Betriebsstunden für „Anlage1“ bzw. 260 Betriebsstunden für „Anlage2“.

Eine detailliertere Betrachtung der **Lastniveaus** der Kälteanlagen erfolgt an dieser Stelle anhand der Leistungsspektren (vgl. Kapitel 6.3.3). Abbildung 60 stellt dazu vergleichend die Leistungsspektren beider Kälteanlagen dar.

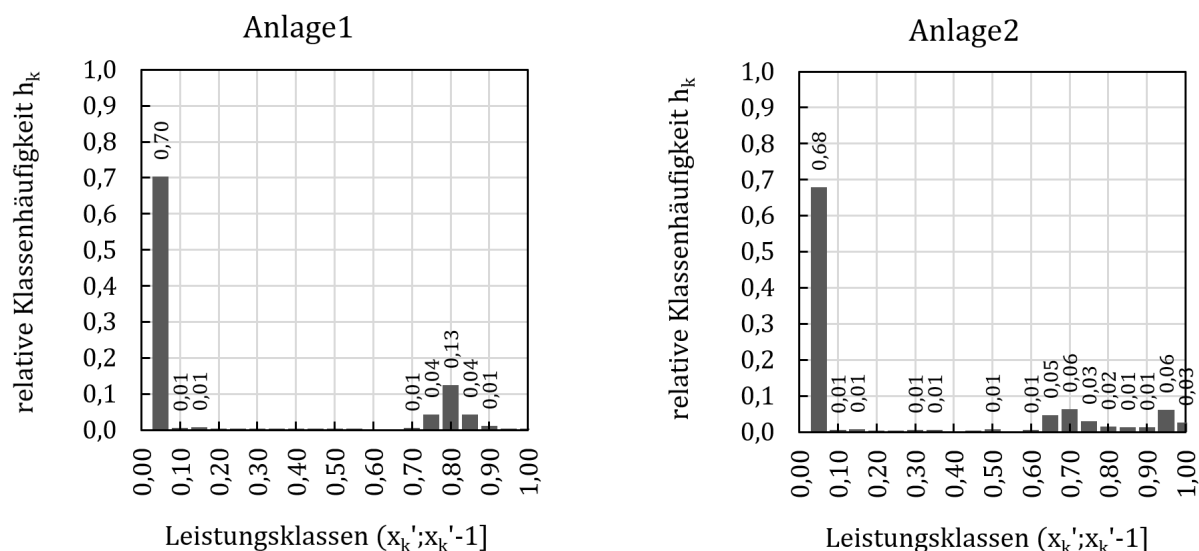


Abbildung 60: Vergleich Leistungsspektren der Kälteanlagen

Zum einen ist bei beiden Anlagen deutlich das **Grundlastniveau** bei der Leistungsklasse 0,05 erkennbar. Der prozentuale Anteil der Leistungswerte dieser Leistungsklasse entspricht dem zeitlichen Anteil der Leistungswerte im Ruhezeitfenster. Weiterhin ist bei „Anlage1“ ein signifikantes **Betriebslastniveau** bei der Leistungsklasse 0,8 erkennbar. Bei „Anlage2“ hingegen liegen zwei Betriebslastniveaus vor (Leistungsklassen 0,7 und 0,95). Dies deutet auf ein unterschiedliches Betriebsverhalten der beiden Anlagen während der Betriebszeit hin.

Eine Detailanalyse hat ergeben, dass das Lastniveau bei der Leistungsklasse 0,7 durch den Parallelbetrieb beider Kälteanlagen entsteht (vgl. Abbildung 60). Sobald „Anlage1“ in Betrieb geht und „Anlage2“ weiterhin in Betrieb ist, sinkt die Leistungsaufnahme von „Anlage2“ um etwa 20% ab. Ein Parallelbetrieb beider Kälteanlagen liegt für einen zeitlichen Anteil von ca. 18% des gesamten Messzeitraums vor. Dabei ist eine Korrelation zwischen dem Parallelbetrieb der Anlagen und den Zeitpunkten der Veranstaltungen erkennbar. Hintergrund ist eine Änderung der Soll-Temperatur der Eisfläche von -4°C auf -11°C während der Veranstaltungen.

Auf ein besonders heterogenes Betriebsverhalten deuten auch die Parameter zur Beurteilung des **Betriebs- und Regelverhaltens** („Streuung an diskreten Zeitwerten“) hin:

- Die Quartilsdispersionskoeffizienten von 105,95 („Anlage1“) und 60,02 („Anlage2“) zeigen, dass kein eindeutiger Tagesablauf in den Lastgangdaten erkennbar ist. Die Anlagen gehen abhängig von der Differenz zwischen Soll- und Ist-Eistemperatur zu unterschiedlichen Tageszeitpunkten in Betrieb.

- Die Kälteanlagen befinden sich bei Veranstaltungen teilweise im Parallelbetrieb, was die Heterogenität der Datenreihen verstärkt. Des Weiteren erfolgt die Änderung der Soll-Eistemperatur sowie die abwechselnde Schaltung der Anlagen im Betrieb manuell durch das Personal.

Spezifische Kennzahlen Kälteanlagen

Analog zu Lüftungssystemen bestehen in der VDI 3807 auch spezifische elektrische Energiebedarfe für Kühlkälte [66]. Die spezifische installierte Leistung des Kältesystems p_{KK} [W/m²] wird dabei für verschiedene Standardnutzungen und Bedarfsklassen vorgegeben. Bei den Standardnutzungen wird jedoch zwischen verschiedenen Arten der Raumnutzung/Raumklimatisierung differenziert (Einzelbüro, Hörsaal, Restaurant, ...). Das betrachtete Kältesystem zur Kühlung der Eisfläche stellt daher einen Spezialfall dar, der in der Richtlinie nicht abgebildet ist. Dennoch kann eine Berechnung der spezifischen installierten Leistung erfolgen, beispielweise durch den Bezug der elektrischen Leistung der Kälteanlagen P_{KK} auf die zu kühlende Eisfläche A_{EF} . Es fehlen jedoch Referenzwerte zur Einordnung dieser Kennzahl.

Eine weitere wichtige Effizienzkennzahl für Kälteanlagen stellt die Leistungszahl (auch COP, Coefficient of Performance) dar. Die Leistungszahl eines Kältesystems (COPS) ergibt sich aus dem Verhältnis von Nutzen und Aufwand (27) [147].

$$COPS = \frac{Q_0}{P_{ges}} \quad (27)$$

$COPS$	Leistungszahl des Kältesystems [-]
Q_0	Kälteleistung des Verdampfers [kW]
P_{ges}	Gesamte aufzubringende elektrische Energie (Verdichter und Hilfsaggregate) [kW]

Die elektrische Energie des Kältesystems kann basierend auf den vorliegenden Datenreihen der beiden Kälteanlagen ermittelt werden. Unter Volllast im Parallelbetrieb beider Anlagen beträgt die elektrische Leistung des Kältesystems etwa 214 kW. Die Kälteleistung konnte im Zuge des Fallbeispiels nicht ermittelt werden. In der Praxis ist die Ermittlung der Kälteleistung des Verdampfers komplizierter. Diese erfolgt bei Systemen mit Sekundärkreislauf über die Temperaturspreizung und den Volumenstrom des Kühlträgermediums. Bei Systemen mit Direktverdampfung kann die Kälteleistung in Abhängigkeit der Verdampfungs- und Verflüssigungstemperaturen ermittelt werden [147]. Typische Leistungszahlen für Tiefkühlkälteanlagen liegen bei 1,1-1,4 [147, 148].

Zusammenfassung

In der Messkampagne zum Fallbeispiel „Kälteanlage“ konnte eine gleichmäßige Aufschlüsselung des Stromverbrauchs auf die beiden Kälteanlagen festgestellt werden. Die statistischen Parameter zeigen, dass eine Analyse der Grundlast sowie der Lastspitzen nicht notwendig ist (keine Grundlast sowie ausgeprägte Lastspitzen erkennbar). Beide Kälteanlagen sind zu etwa **30%** der Zeitwerte des Messzeitraums in Betrieb, was über den gesamten Messzeitraum (34 Messtage) ca. 250 Betriebsstunden entspricht. Als wesentlichen Einflussfaktor auf den Stromverbrauch der Kälteanlagen wurde die **Soll-**

Eistemperatur identifiziert, die abhängig von Veranstaltungen manuell eingestellt wird. Zu den Veranstaltungen liegt teilweise ein **Parallelbetrieb** beider Anlagen vor. Die Berechnung der statistischen Parameter deuten insbesondere auf ein sehr heterogenes Betriebsverhalten der beiden Kälteanlagen hin. Zur Bewertung der Effizienz des Kältesystems anhand spezifischer Energiekennzahlen ist eine Detailanalyse unter Erhebung weiterer Betriebsdaten notwendig.

6.6 Fehlerdiskussion

In diesem Kapitel findet eine übergeordnete Fehlerdiskussion in Bezug auf die Anwendung der Datenanalysen auf die Messdatensätze statt. Dazu wird sowohl auf die Disaggregationsanalysen (Kapitel 6.6.1) als auch die Berechnungsverfahren zur Lastprofil-Charakterisierung (Kapitel 6.3) eingegangen.

6.6.1 Disaggregationsanalysen

Ziel der Disaggregationsanalysen ist es, eine möglichst vollständige Disaggregation der Input-Datenreihe hinsichtlich des Stromverbrauchs, der Grundlast sowie der Lastspitzen zu erreichen. Der Grad der Disaggregation kann unter anderem durch messtechnische Einflussfaktoren (technische und bauliche Einschränkungen) limitiert sein. Diese Einschränkungen treten bei der Anwendung des Messkonzeptes auf und sind somit von den individuellen Bedingungen des Messobjektes vor Ort abhängig.

Die Anwendung der Disaggregationsanalysen zeigt, dass bei geringerer Disaggregation der Input-Datenreihe eines Messobjektes die Aussagekraft und die Interpretationsmöglichkeiten der Analyseergebnisse sinken. Für die Fallbeispiele 1-4 wird eine Disaggregation von bis zu **99%** des Gesamtstromverbrauchs bzw. **98%** der Gesamtgrundlast erreicht. Die Grundlast-Aufschlüsselung im Fallbeispiel „Metallv. Betrieb (Standort B)“ wird mit 58% als „mittel“ eingestuft. Der nicht erfasste Anteil der Gesamtgrundlast (42%) enthält voraussichtlich weitere größere Grundlast-Verbraucher (u.a. Laden von Elektrofahrzeugen), die im Zuge der Messinstallation nicht aufgefallen sind bzw. betrachtet wurden. Gleiches gilt für die Aufschlüsselung des Gesamtstromverbrauchs im Fallbeispiel „Metallv. Betrieb (Standort A)“, die mit 49% ebenfalls als „mittel“ eingestuft wird.

Die Anwendung der Lastspitzen-Disaggregation ergab ebenfalls eine Aufschlüsselung von **bis zu 99%**. Lediglich die Top 5 Lastspitzen im Fallbeispiel „Metallv. Betrieb (Standort A)“ konnten zu 39% aufgeschlüsselt werden. In diesem Fall konnten relevante Lastspitzen-Verbraucher nicht unmittelbar auf die erfassten Messpunkte und elektrische Verbraucher zurückgeführt werden. Vielmehr ist in einem solchen Fall lediglich eine Eingrenzung der Ursache der Lastspitzen auf größere erfasste Teilbereiche möglich. Vor diesem Hintergrund ist trotz der erwähnten Einschränkungen bei der Anwendung des Messkonzeptes eine möglichst hohe Disaggregation der Input-Datenreihe anzustreben.

Neben dem Grad der Gesamtdisaggregation spielt auch der Grad des eindeutig auf elektrische Verbraucher zurückzuführenden Verbrauchs eine wichtige Rolle für die Interpretation der Analyseergebnisse. Für die in den Fallbeispielen 1-4 betrachteten Messobjekte wird **bis zu 48%** des Gesamtstromverbrauchs bzw. **73%** der Gesamtgrundlast eindeutig auf elektrische Verbraucher aufgeschlüsselt. Nur bei erfassten Verbrauchergruppen ist eine eindeutige Zuordnung des Verbrauchsverhaltens, der Grundlast sowie der Lastspitzen auf die angeschlossenen elektrischen Verbraucher möglich. Somit

kann das Betriebsverhalten der elektrischen Verbraucher besser interpretiert werden. Eine möglichst hohe Aufschlüsselung des Stromverbrauchs auf elektrische Verbraucher sollte demnach bei der Anwendung des Messkonzeptes angestrebt werden.

Beispielhaft sei an dieser Stelle das Fallbeispiel „Gerichtsgebäude“ genannt, wo zwar eine hohe Gesamtdisaggregation gegeben war, aber ein Großteil des Verbrauchs sowie der Grundlast nur elektrischen Unterverteilungen zugeordnet werden konnte (vgl. Kapitel 6.5.1). Die erfassten Unterverteilungen umfassen elektrische Verbraucher verschiedener Verwendungszwecke, wodurch die Interpretationsmöglichkeiten hinsichtlich des Betriebsverhaltens eingeschränkt werden. Der Grad des eindeutig auf Verbrauchergruppen zurückzuführenden Verbrauchs ist somit maßgeblich durch die **individuellen Gegebenheiten der Messobjekte** (u.a. Aufbau der elektrischen Verteilung) bestimmt.

Die Aussagekraft von Kurzzeitmessungen ist aufgrund des **limitierten Messzeitraums** eingeschränkt. Saisonale Effekte und Einflussfaktoren auf den Stromverbrauch können anhand der Messdatensätze nicht betrachtet werden. Die Analyseergebnisse liefern somit lediglich eine Aussage über den während des Messzeitraums erfassten energetischen Ist-Zustands des betrachteten Messobjektes.

Vor diesem Hintergrund hat sich eine Validierung der Messdaten mittels RLM-Lastgangdaten (sofern verfügbar) als besonders hilfreich herausgestellt (s. dazu auch Abschnitt Datenbereinigung, Kapitel 6.2.3). Dabei erfolgt in erster Linie eine Validierung der Input-Datenreihe des betrachteten Messobjektes. Sofern die Input-Datenreihe den Gesamtstromverbrauch des Messobjektes repräsentiert, sollte sie mit den RLM-Lastgangdaten übereinstimmen. Darüber hinaus ist mit den RLM-Lastgangdaten auch eine **Überprüfung der Zeitsynchronisation** der Messdatensätze möglich. Dies ist insbesondere bei der Lastspitzen-Disaggregation relevant, da diese Datenanalyse einzelne, diskrete 15-min Zeitwerte der Datenreihe betrachtet. Sofern RLM-Lastgangdaten für mehrere Jahre vorliegen, ist auch eine Betrachtung der saisonalen Einflüsse (z.B. Außentemperatur, Auftragslage) auf den Stromverbrauch möglich (s. auch Seasonal Variation Factor, [149]). Die Validierungsmöglichkeiten mittels RLM-Lastgangdaten sind in Tabelle 60 für die einzelnen Datenanalysen zusammengefasst.

Tabelle 60: Validierung der Disaggregationsanalysen mittels RLM-Lastgangdaten

Datenanalyse	Input-Datenreihe Messdaten	RLM-Lastgangdaten
Verbrauchsdisaggregation	Stromverbrauch betrachtete Referenzwoche (Stromverbrauch bezogen auf eine Referenzwoche des Messzeitraums)	Stromverbrauch betrachtete Referenzwoche und durchschnittlicher Wochenverbrauch (bezogen auf das gesamte Jahr)
Grundlast-Disaggregation	Berechnete mittlere Grundlast P_{base} (Grundlast bezogen auf Messzeitraum)	Berechnete mittlere Grundlast P_{base} (Grundlast bezogen auf das gesamte Jahr)
Lastspitzen-Disaggregation	Aufgetretener max. Leistungswert P_{peak} (Lastspitze bezogen auf Messzeitraum) Zeitsynchronisation	Aufgetretener max. Leistungswert P_{peak} (Lastspitze bezogen auf das gesamte Jahr) Zeitsynchronisation

Falls keine RLM-Lastgangdaten vorliegen, kann eine Validierung der Messdaten durch den Vergleich der Input-Datenreihe mit der Summe der erfassten Output-Datenreihen erfolgen. Dies setzt jedoch eine vollständige Aufschlüsselung der elektrischen Verteilung voraus.

Bedingt durch die Messgenauigkeit der verwendeten Messsysteme (vgl. Kapitel 4.2.3) liegt zwangsläufig eine Differenz zwischen Messdaten und den RLM-Lastgangdaten. Die Validierung der Datensätze in der Praxis hat aufgezeigt, dass bezogen auf den Stromverbrauch einer Referenzwoche in der Regel Abweichungen von etwa **3%** zwischen der Input-Datenreihe des Messdatensatzes und den RLM-Lastgangdaten vorliegen. Bei einer negativen Abweichung können auch Leitungs- und Transformatorverluste Ursache für den geringeren Stromverbrauch der Input-Datenreihe sein. Dies ist insbesondere der Fall, wenn die RLM-Lastgangmessung auf der Mittelspannungsseite des Transformators liegt und der Anschluss der mobilen Messtechnik niederspannungsseitig erfolgt.

Für die Disaggregationsanalysen ist weiterhin zu berücksichtigen, dass in den Messkampagnen verschiedene Messsysteme parallel eingesetzt werden (s. Kapitel 4). Dementsprechend werden auch die Datenreihen beider Messsysteme zu einem standardisierten Messdatensatz zusammengefügt. Hierbei muss auf die Zeitsynchronisation der beiden Messsysteme beim Zusammenführen der Datenreihen geachtet werden.

Hinzu kommt, dass bei den durchgeführten Messkampagnen neben dem primären Messsystem zur Wirkleistungsmessung und ein weiteres, sekundäres Messsystem zur Scheinleistungsmessung eingesetzt wurde. Beide Messsysteme liefern somit verschiedene Messgrößen. Bei den Messdaten des Messsystems zur Scheinleistungsmessung wird die Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung (ausgedrückt durch den Phasenwinkel φ) nicht berücksichtigt. Daher kommt es durch das Zusammenführen der Messdaten beider Messsysteme zwangsläufig zu größeren Messungenauigkeiten. Das primäre Messsystem zur Wirkleistungsmessung wurde dennoch um ein sekundäres Messsystem zur Scheinleistungsmessung ergänzt, um die Flexibilität zur Erfassung zusätzlicher Messpunkte zu erhöhen. Bei der Messplanung ist jedoch zu beachten, dass mit dem Messsystem zur Scheinleistungsmessung vor allem kleinere Messpunkte erfasst werden sollten. So wird vermieden, dass sich das Zusammenführen der Messdaten maßgeblich auf die Kernergebnisse der Analysen auswirkt. Um an dieser Stelle genauere Messergebnisse zu erhalten, müsste das bestehende Messsystem zur Wirkleistungsmessung um weiteres Messequipment ergänzt oder das sekundäre Messsystem ebenfalls eine Wirkleistungsmessung ermöglichen.

6.6.2 Berechnungsverfahren zur Lastprofil-Charakterisierung

Die Grundlage für die Berechnung statistischer Parameter wird durch die Anwendung des Berechnungsverfahrens zur automatisierten Einteilung der Datenreihen in ein **Betriebs- und Ruhezeitfenster** geschaffen (vgl. Kapitel 6.3.2). Das Berechnungsverfahren wurde empirisch auf der Basis der in den Fallbeispielen erfassten Datenreihen hergeleitet. Ziel war es, ein möglichst robustes Berechnungsverfahren für Datenreihen mit den unterschiedlichsten statistischen Merkmalen (u.a. Median und Anzahl der Lastniveaus) zu entwickeln. Daher wurde unter anderem eine Fallunterscheidung zur Ermittlung von Schwellenwerten eingeführt. Durch diese Fallunterscheidung wird sichergestellt, dass unabhängig von den statistischen Merkmalen einer Datenreihe eine Einordnung in ein Betriebs- und

Ruhezeitfenster erfolgen kann. Diese Einordnung konnte für $n=108$ erfasste Datenreihen umgesetzt werden. Einzig für Datenreihen mit einem Grundlast-Faktor $k_{base} > 0,8$ muss keine Differenzierung zwischen Ruhezeit- und Betriebszeitfenster vorgenommen werden. In diesem Fall ist aufgrund des hohen Grundlastverbrauchs davon auszugehen, dass es sich um einen Dauerverbraucher handelt. Dementsprechend liegt in der Datenreihe kein Ruhezeitfenster vor (vgl. Kapitel 6.3.4).

Die berechnete **mittlere Grundlast** hat sich als robuster Parameter zur Identifikation relevanter Grundlastverbraucher bewährt. Zusammen mit dem **Grundlast-Faktor** wurde ein Indikator zur Identifikation von Datenreihen mit kontinuierlichem Betriebszeitfenster (sog. **Dauerverbraucher**) geschaffen. Ist die Grundlast über den Messzeitraum konstant und unterliegt keinen Schwankungen, wird die berechnete mittlere Grundlast auch nach visueller Überprüfung eindeutig bestimmt. Unterliegt die Grundlast jedoch über den Messzeitraum hinweg größeren Schwankungen, so werden diese unterschiedlichen Grundlastniveaus in der Berechnung nicht berücksichtigt.

Dies liegt vor allem an der Tatsache, dass die mittlere Grundlast als arithmetisches Mittel der Leistungswerte im Ruhezeitfenster über den gesamten Messzeitraum berechnet wird. Die berechnete Grundlast stellt somit einen Mittelwert über den betrachteten Messzeitraum dar. Über mehrere Stunden anhaltende Änderungen der Grundlast werden somit in der berechneten mittleren Grundlast nicht berücksichtigt. Das Berechnungsverfahren Leistungsspektrum kann an dieser Stelle dazu dienen, zunächst die relevanten Lastniveaus einer Datenreihe (z. B. ein oder mehrere Grundlastniveaus) zu identifizieren und die Streuung der Leistungswerte in der Grundlast zu beschreiben (relative Klassenhäufigkeit, s. Kapitel 6.3.3).

Der **Lastspitzen-Faktor** wurde ursprünglich zur Identifikation und Beurteilung von Lastspitzen-Verbrauchern entwickelt. Nach der Anwendung auf die erfassten Datenreihen in den Fallbeispielen zeigt sich jedoch, dass dieser Parameter vor allem eine Aussage über die Häufigkeit für das Auftreten einzelner, kurzfristiger maximaler Leistungswerte in der Datenreihe erlaubt. Daher sollte bei der Analyse von Lastspitzen neben dem Lastspitzen-Faktor immer zusätzlich die **Laständerungsrate** betrachtet werden. Dieser Parameter berücksichtigt unabhängig von der Häufigkeit des Auftretens von Lastspitzen die Laständerung der aufeinander folgenden Leistungswerte. Unter Beachtung dieser beiden relativen Parameter sowie den absoluten Parametern (**Spitzenlast-Differenz** und **Lastgradient**) können potenzielle Lastspitzen-Verbraucher in den erfassten Datenreihen identifiziert und hinsichtlich des Einflusses auf das Gesamtsystem bewertet werden.

Das Berechnungsverfahren zur Streuung an diskreten Zeitwerten stellt einen Ansatz dar, das Betriebs- und Regelverhalten elektrischer Verbraucher zu beurteilen. Im Gegensatz zu den anderen Berechnungsverfahren erfordert diese Datenanalyse zunächst die Einordnung einer Datenreihe nach Tagestypen (Betriebs- und Ruhetage). Die zugehörigen Parameterwerte (**Interquartilsabstand** und **Quartilsdispersionskoeffizient**) werden an Betriebstagen separiert für das Ruhezeit- und Betriebszeitfenster berechnet. Die getrennte Berechnung für beide Zeitfenster wird durchgeführt, da das Lastverhalten in den Zeitfenstern unterschiedlich sein kann (bspw. größere Streuung während der Betriebszeit). Demnach sind die Parameterwerte basierend auf der Berechnung je Zeitfenster aussagekräftiger. Die für die Anwendung der Datenanalyse notwendigen Schritte (Einordnung nach Tagestypen und

Einteilung in Betriebs- und Ruhezeitfenster) erfolgen bisher nicht automatisiert. An dieser Stelle besteht das Potenzial, die Analyseschritte in einem erweiterten Analysetool zu automatisieren, bspw. indem Typtage durch die Anwendung von Machine Learning-Algorithmen identifiziert werden.

Weiterhin muss bei der Interpretation der Ergebnisse dieses Berechnungsverfahrens beachtet werden, dass die gegebenen Messzeiträume nur bedingt eine hinreichende Datengrundlage zur Ermittlung der statistischen Parameter darstellen. Erfolgt die Kurzzeitmessung beispielsweise über einen Zeitraum von einer Woche, liegen für jeden diskreten Zeitwert (00:00-23:45h) insgesamt sieben Leistungswerte vor. Durch die Einordnung nach Tagestypen (bspw. Betriebstage Montag-Freitag) wird die Anzahl der Leistungswerte zusätzlich reduziert. Statistische Merkmale wie Median, Quantil, Interquartilsabstand und Quartilsdispersionskoeffizient werden dann je diskreten Zeitwert auf der Grundlage von nur wenigen vorliegenden Leistungswerten ermittelt. Dementsprechend werden die statistischen Parameter durch die einzelnen Leistungswerte stark beeinflusst. Dies ist bei der Anwendung des Berechnungsverfahrens und der Einordnung der Analyseergebnisse zu beachten.

Schließlich stellen die Messdatensätze auch eine Grundlage zur Berechnung spezifischer (**Energie-)Kennzahlen** dar. Bei der Entwicklung des standardisierten Analysekonzepts wurde der Fokus auf die Auswertung der messtechnisch erhobenen Stromverbrauchsdaten gelegt. Mit der Bildung von Energiekennzahlen wird ein umfassendes Benchmarking, also ein kennzahlenbasierter Vergleich ermöglicht. Die erhobenen Messdaten erlauben dabei die Bildung verbraucherspezifischer Kennzahlen, die den energetischen Vergleich und die Bewertung einzelner Systeme (z. B. Lüftungssysteme, Kältesysteme, etc.) oder Teilbereiche (z. B. Gebäudebereich) zulassen. Für die Bildung spezifischer Benchmarks ist neben den Stromverbrauchsdaten zwangsläufig auch die Erhebung verlässlicher Betriebsdaten des betrachteten Systems bzw. Teilbereichs notwendig. Darüber hinaus müssen zu den berechneten Kennzahlen existierende Vergleichskennzahlen (bspw. aus der Literatur) vorliegen. Erst dann kann eine Bewertung des Systems bzw. Teilbereichs erfolgen. System spezifische Benchmarks müssten zunächst auf der Basis einer Vielzahl erhobener Datenreihen (bspw. zu Lüftungsanlagen) entwickelt werden.

Ein besonderes Potenzial zur Bildung von Energiekennzahlen besteht vor allem für erfasste **Querschnittstechnologien** (Lüftung, Kühlkälte, Druckluft, Beleuchtung) sowie Datenreihen, die einem **eindeutigen Verwendungszweck** nach VDI 3807 zugeordnet werden können. Die betrachteten Fallbeispiele an Querschnittstechnologien haben gezeigt, dass die Bildung spezifischer Energiekennzahlen basierend auf den vorhandenen Messdaten möglich ist. Sofern Referenzwerte in der Literatur vorliegen, kann anhand der gebildeten Energiekennzahlen schnell eine Effizienzbewertung des betrachteten Systems erfolgen. Die Ermittlung weiterer verbraucherspezifischer Energiekennzahlen müsste unter Berücksichtigung einer umfassenden Literaturstudie zu existierenden Referenzkennzahlen erfolgen. Grundsätzlich stellen die erfassten Datensätze aber eine gute Grundlage für verbraucherspezifische Benchmarks dar.

6.7 Zwischenfazit: Analysekonzept

In diesem Kapitel wurde ein Analysekonzept zur systematischen Auswertung von Kurzzeitmessungen mit mobiler Messtechnik entwickelt. Da bedingt durch die angewendete Messmethode (s. Messkonzept Kapitel 5) vergleichbare Datensätze bisher nicht vorliegen, mussten zunächst grundlegende Schritte zur Vereinfachung und Standardisierung des Datenanalyse-Prozesses entwickelt werden.

Als wesentlicher Schritt zur systematischen Anwendung verschiedenster Datenanalysen wurden zunächst Eigenschaften für standardisierte Messdatensätze definiert. Dies umfasste die Festlegung der Messdatenaufösung auf 15-min sowie eine Typisierung der vorhandenen Datenreihen. Die Input-Datenreihe stellt den Gesamtstromverbrauch einer elektrischen Verteilung dar. Die Output-Datenreihen umfassen die Messpunkte elektrischer Unterverteilungen und Verbrauchergruppen, die an der Messlokation angeschlossen sind.

Auf der Basis von $n=108$ empirisch erfassten Datenreihen wurden **Berechnungsverfahren zur Lastprofil-Charakterisierung** sowie zugehörige statistische Parameter entwickelt. Die Parameter ermöglichen eine Charakterisierung der Datenreihen hinsichtlich vorhandener Merkmale und Eigenschaften sowie eine Interpretation des Lastverhaltens. Somit gelten die Parameter als Indikatoren zur Identifikation von Auffälligkeiten und bilden eine Grundlage für die Durchführung von Detailanalysen. Perspektivisch können die entwickelten Parameter auch zur Beurteilung von Datenreihen in einer vollständig automatisierten Datenanalyse herangezogen werden. Nachfolgend werden die wichtigsten Parameter zusammenfassend aufgeführt:

- **Mittlere Grundlast P_{base}** : Beschreibung der Höhe der in einer Datenreihe anliegenden Grundlast (absoluter Parameterwert). Dient unter anderem zur Beurteilung des Einflusses der Grundlast auf das Gesamtsystem.
- **Grundlast-Faktor k_{base}** : Maß für den Anteil des Grundlast-Stromverbrauchs am Gesamtstromverbrauch einer Datenreihe. Indikator für Datenreihen mit elektrischen Verbrauchern im Dauerbetrieb ($k_{base} > 0,8$) sowie Datenreihen mit keinem nennenswerten Verbrauch im Ruhezeitfenster ($k_{base} \leq 0,05$). Zusammen mit der berechneten mittleren Grundlast können schnell relevante Grundlast-Verbraucher eines Messobjektes identifiziert werden.
- **Lastspitzen-Faktor k_{peak}** : Maß zur Beurteilung der Leistungsdifferenz innerhalb des Spitzenlastbereichs bezogen auf die aufgetretene Maximalleistung x_{peak} einer Datenreihe. Indikator für Datenreihen mit nur wenigen, aber besonders ausgeprägten Lastspitzen. Zusammen mit der **Spitzenlast-Differenz ΔP_{peak}** (absoluter Parameterwert) können Datenreihen mit Lastspitzen-Verbrauchern oder geringer Benutzungsdauer identifiziert werden.
- **Laständerungsrate LR_{avg}** : Maß zur Beurteilung des Lastverhaltens (statisch vs. dynamisch) einer Datenreihe. Zusammen mit dem **Lastgradienten LG_{avg}** (absoluter Parameterwert) können relevante Datenreihen mit Lastspitzen-Verbrauchern identifiziert werden.
- **Quartildispersionskoeffizient QD_{avg}** : Maß zur Beurteilung des Betriebs- und Regelverhaltens einer Datenreihe anhand der Streuung der Leistungswerte an diskreten Zeitwerten. Indikator zur Identifikation von Datenreihen mit eindeutigen Tageslastverhalten bzw. nicht

erkennbaren Tageslastverhalten (bei Letzteren werden elektrische Verbraucher zufällig oder nach Bedarf verwendet und unterliegen keinem regelmäßig wiederkehrenden zeitlichen Verbrauchsmuster).

Zur weiteren Systematisierung des Datenanalyse-Prozesses wurden mehrere **Disaggregationsanalysen** entwickelt:

- **Verbrauchsdisaggregation** zur Aufschlüsselung des Stromverbrauchs und Identifikation relevanter Stromverbraucher sowie Verwendungszwecke.
- **Grundlast-Disaggregation** zur Aufschlüsselung der Gesamtgrundlast und Identifikation relevanter Grundlast-Verbraucher.
- **Lastspitzen-Disaggregation** zur Aufschlüsselung von Lastspitzen und Identifikation von Lastspitzen-Verbrauchern.

Der **Grad der Gesamtdisaggregation** sowie der **Grad der Aufschlüsselung auf elektrische Verbraucher** sind bei diesen Analysen relevante Faktoren zur Interpretation der Aussagekraft der Ergebnisse. Je höher die Gesamtdisaggregation und die Aufschlüsselung auf elektrische Verbraucher, desto aussagekräftiger sind die Analyseergebnisse. Die Anwendung der entwickelten Disaggregationsanalysen auf die betrachteten Fallbeispiele hat gezeigt, dass die Identifikation relevanter Stromverbraucher, relevanter Grundlast-Verbraucher sowie Lastspitzen-Verbraucher möglich ist. Entscheidend für die Aussagekraft der Analysen ist die bereits erwähnte Gesamtdisaggregation. Sofern relevante Stromverbraucher oder Grundlast-Verbraucher während der Messinstallation nicht erfasst werden, ist auch die Aussagekraft der Analyseergebnisse eingeschränkt. Die messtechnischen Einschränkungen (limitiertes Messequipment und bauliche Gegebenheiten) sind in der Praxis zwar nicht vermeidbar, sie stellen jedoch keine allgemeingültige Limitation zur Anwendung der Analysen dar.

Alle Datenanalysen sind in einem **Datenanalyse-Plan** gemäß den definierten Analyseschritten „Erfassung“, „Diagnose“ und „Optimierung“ eingeordnet. Die entwickelten standardisierten Datenanalysen lassen sich dabei den Schritten „Erfassung“ und „Diagnose“ zuordnen. Nach der Anwendung der standardisierten Datenanalysen können weiterführende Detailanalysen erfolgen, die den Analyseschritten „Diagnose“ und „Optimierung“ zugeordnet sind.

Schließlich können auf der Grundlage der Messdaten auch spezifische Energiekennzahlen bzw. Benchmarks gebildet werden. Insbesondere wenn zu den Energiedaten auch Betriebs- und Gebäudedaten hinzugezogen werden, wird ein **verbraucher-spezifisches Benchmarking** ermöglicht. Anhand anlagen- bzw. systemspezifischer Kennzahlen können elektrische Verbraucher wie bspw. Lüftungsanlagen hinsichtlich der Effizienz beurteilt werden. Allerdings müssen aussagekräftige Kennzahlen erst noch auf der Basis einer größeren mit mobiler Messtechnik erhobenen Datenmenge entwickelt werden.

Kapitel 7

Gesamtbewertung und Diskussion der Ergebnisse

Auf der Basis der durchgeführten Arbeiten zum Einsatz mobiler Messtechnik (Kapitel 5) und der Entwicklung automatisierter Auswertemethoden (Kapitel 6) umfasst dieses Kapitel die Bewertung, Diskussion und Einordnung der Ergebnisse. Dabei wird einerseits ein Bogen zu den anfangs aufgestellten Forschungsfragen gezogen und auf die wesentlichen Mehrwerte des entwickelten Ansatzes eingegangen (s. Kapitel 7.1). Kapitel 7.2 diskutiert schließlich Hürden und Chancen für die Umsetzung des Ansatzes in der Praxis und erläutert Potenziale für die zukünftige Forschung.

7.1 Mehrwerte des entwickelten Ansatzes

Die für diese Arbeit aufgesetzten Forschungsfragen zielen darauf ab, die mit dem Einsatz mobiler Messtechnik und zugehöriger Auswertemethoden verbundenen Mehrwerte zu untersuchen. Dazu wurde im Zuge der vorliegenden Arbeit ein Ansatz entwickelt, der zwei Kernbausteine umfasst:

- 1) Ein **Messkonzept**, welches den effizienten, systematischen Einsatz mobiler Messtechnik im gewerblichen Bereich sicherstellt (vgl. Kapitel 5).
- 2) Ein **Analysekonzept**, welches automatisierte Auswertemethoden für die in den Fallbeispielen erhobenen Messdaten vorsieht (vgl. Kapitel 6).

Dieser Ansatz wird in den folgenden Abschnitten mehrfach erwähnt und bezieht sich dabei stets auf die beiden oben genannten Kernbausteine. Da mit den Kernbausteinen ebenfalls spezifische Forschungsfragen verbunden sind (vgl. Kapitel 1.2), werden diese in den nachfolgenden Abschnitten ebenfalls aufgegriffen.

7.1.1 Mehrwert durch Datenerhebung und Analyse

Die zu Beginn dieser Arbeit aufgestellte Forschungsfrage lautet:

Welchen Nutzen und Mehrwert liefert der Einsatz mobiler Messtechnik in einem systematischen, branchenübergreifenden Ansatz zur Analyse elektrischer Energieflüsse im gewerblichen Bereich?

Um diese Forschungsfrage zu beantworten, wurde eine Methode für den systematischen Einsatz mobiler Messtechnik entwickelt. Das resultierende **Messkonzept** zeigt die notwendigen Arbeitsschritte für den effizienten Einsatz mobiler Messtechnik im gewerblichen Bereich auf. Die Anwendung dieses Konzeptes stellt zugleich die Grundlage für automatisierte Auswertemethoden dar. Die notwendigen Arbeitsschritte und Analysen für eine standardisierte Messdatenauswertung werden im **Analysekonzept** dargelegt. In der systematischen Erfassung und Analyse der Messdaten einzelner Teilbereiche und elektrischer Verbraucher liegt somit der **grundlegende Nutzen und Mehrwert** des entwickelten Ansatzes:

*Mehrwert durch **Datenerhebung und -analyse**: Erfassung des energetischen Ist-Zustands und Identifikation von Potenzialen für weiterführende Analysen.*

Die Anwendung standardisierter Datenanalysen liefert allgemeine Informationen über die Aufschlüsselung der Energieflüsse sowie das Betriebs- und Regelverhalten elektrischer Verbraucher. Relevante elektrische Verbraucher werden identifiziert und hinsichtlich ihres Betriebsverhaltens analysiert. Spezifische Merkmale wie die Grundlast und Lastspitzen werden im Detail aufgeschlüsselt und auf die erfassten Messpunkte zurückgeführt. Die Identifikation von Einspar- und Optimierungspotenzialen steht daher bei der Anwendung des Mess- und Analysekonzeptes im Vordergrund.

Der Mehrwert durch Datenerhebung und -analyse wird bei der Differenzierung nach den **Analyse-schwerpunkten** „Disaggregation“ sowie „Last- und Betriebsverhalten“ deutlich (s. Tabelle 61). Je Analyseschwerpunkt werden der Fokus der Datenanalyse, die Motivation zur Anwendung der Datenanalyse, die Hierarchie-Ebene sowie die betreffenden Fallbeispiele aufgeführt.

Tabelle 61: Differenzierung durchgeführter Fallbeispiele nach Analyseschwerpunkt

Analyseschwerpunkt	Disaggregation	Last- und Betriebsverhalten
Datenanalysen	Disaggregationsanalysen (Stromverbrauch, Grundlast, Lastspitzen)	Berechnungsverfahren zur Lastprofil-Charakterisierung (stat. Parameter)
Motivation	Fehlende Transparenz über elektrische Energieflüsse – Analyse unterschiedlicher elektrischer Verbraucher in Relation zum Gesamtstromverbrauch	Unbekanntes Last- und Betriebsverhalten elektrischer Verbraucher – Analyse individueller Verbraucher
Hierarchie-Ebene	Betrieb bzw. Standort, Bereich (Anzahl Verbraucher $n > 1$)	Anlagen (Anzahl Verbraucher $n = 1$)
Fallbeispiele	Öffentliche Gebäude (Gerichtsgebäude und Polizeipräsidium) und KMU (Metallv. Betrieb – Standort A und B)	Querschnittstechnologien (Kälte- und Lüftungsanlage)

Disaggregation

In den Fallbeispielen, die auf der Hierarchie-Ebene „Betrieb“ bzw. „Standort“ und „Bereich“ durchgeführt wurden, stellt die **Disaggregation** des Stromverbrauchs auf erfasste Messpunkte bzw. elektrische Verbraucher den Analyseschwerpunkt dar. Die Motivation und Zielsetzung dieser Messkampagnen bestand darin, Transparenz über die elektrischen Energieflüsse zu schaffen. Die Analysen geben somit Aufschluss über die Zusammensetzung des Stromverbrauchs, der Grundlast sowie Lastspitzen bezogen auf erfasste Messpunkte und Verwendungszwecke. Der zentrale **Mehrwert** in der Anwendung des Analyseschwerpunktes „Disaggregation“ liegt somit in der systematischen Identifikation relevanter Messpunkte bzw. elektrischer Verbraucher und Teilbereiche.

An dieser Stelle erfolgt nochmals zusammenfassend eine Einordnung und Bewertung der entwickelten Disaggregationsanalysen. Dabei wird neben den Kernaussagen je Datenanalyse auch auf die Priorisierung sowie die Relevanz eingegangen. Die Priorisierung beschreibt den Indikator, wann die jeweilige Datenanalyse in der Anwendung priorisiert werden sollte. Die Einstufung der Relevanz erfolgt auf der Grundlage einer qualitativen Einordnung anhand von Erfahrungswerten und Eindrücken aus der Entwicklung und Anwendung der Datenanalysen in den durchgeführten Fallbeispielen. Dabei werden insbesondere die Aussagekraft der Analyseergebnisse (statistische Robustheit) sowie Aspekte zur technischen Anwendung der Datenanalysen (Grad der Automatisierung) berücksichtigt. In Tabelle 62 sind die Hintergründe zur Einstufung der Relevanz erläutert.

Tabelle 62: Einstufung der Relevanz zur Beurteilung der Datenanalysen

Relevanz	Erläuterung zur Einstufung
Sehr hoch	Datenanalyse liefert Parameter als Grundlage für weitere Berechnungsverfahren und Analysen
Hoch	Automatisierte Anwendung Ergebnisse haben hohe Aussagekraft Allgemein anwendbar
Mittel	Potenzial zur weiteren Automatisierung Ergebnisse abhängig von einzelnen bzw. wenigen Leistungswerten Anwendung abhängig vom Messobjekt
Niedrig	Anwendung bisher nicht zwingend notwendig Ergebnisse abhängig von einzelnen Leistungswerten

In Tabelle 63 ist die Einordnung und Bewertung der entwickelten Disaggregationsanalysen dargestellt.

Tabelle 63: Einordnung und Bewertung entwickelter Disaggregationsanalysen

	Verbrauchs- disaggregation	Grundlast- Disaggregation	Lastspitzen- Disaggregation
Kernaussagen	Identifikation relevanter Messpunkte/elektrischer Verbraucher und Aufschlüsselung nach Verwendungszweck	Identifikation relevanter Grundlast-Verbraucher und Aufschlüsselung nach Verwendungszweck	Identifikation relevanter Lastspitzen-Verbraucher
Priorisierung	Messobjekte mit fehlender Transparenz über elektr. Energieflüsse	Messobjekte mit unbekanntem Grundlast-Verbrauch oder hoher Gesamtgrundlast	Messobjekte mit abrechnungsrelevanten Lastspitzen oder auffälligen Lastspitzen im Gesamtlastgang
Relevanz	Hoch	Hoch	Mittel

Den Datenanalysen Verbrauchsdisaggregation und Grundlast-Disaggregation wird eine hohe Relevanz zugeteilt. Die Anwendung dieser Datenanalysen lieferte insbesondere in den Fallbeispielen der Ebene „Betrieb/Standort“ wichtige Aufschlüsse über die Verbrauchsstruktur und relevante Strom- bzw. Grundlast-Verbraucher. Auch wenn aus dem Gesamtlastgang eine niedrige Grundlast hervorgeht, können anhand der Grundlast-Disaggregation Ineffizienzen identifiziert werden, wie es am Fallbeispiel „Metallverarbeitender Betrieb (Standort A)“ deutlich geworden ist (Identifikation Kompressor-System als großer Grundlast-Verbraucher).

Die Relevanz der Datenanalyse Lastspitzen-Disaggregation wird basierend auf der Anwendung und der Ergebnisse der Fallbeispiele als „Mittel“ eingestuft. Die Reduktion von Lastspitzen ist maßgeblich für Messobjekte mit abrechnungsrelevanten Lastspitzen zur Reduktion der Energiekosten relevant. Ist dieser finanzielle Anreiz nicht gegeben (i.d.R. bei Unternehmen <100.000 kWh Stromverbrauch pro Jahr), sinkt die Relevanz zur detaillierten Betrachtung von Lastspitzen. Weiterhin besteht bei der Analyse das Risiko, dass die im Messzeitraum erfassten Lastspitzen maßgeblich von den abrechnungsrelevanten, höchsten Lastspitzen des Jahres abweichen. Es besteht zwar eine hohe Wahrscheinlichkeit, dass identifizierte Lastspitzen-Verbraucher auch für die höchsten Lastspitzen des Jahres verantwortlich sind, jedoch kann dies basierend auf einer durchgeführten Kurzzeitmessung nicht eindeutig belegt werden. Schließlich ist auch die Aussagekraft der Lastspitzen-Disaggregation stark vom Grad der Gesamtdisaggregation abhängig. Insbesondere in Fallbeispielen, in denen nur eine mittlere bis hohe Disaggregation der Top 5 Lastspitzen erreicht wurde, konnte die Ursache der erfassten Lastspitzen zum Teil nur eingeschränkt auf die Messpunkte bzw. elektrischen Verbraucher zurückgeführt werden. Eine hohe Gesamtdisaggregation ist daher die Grundvoraussetzung zur Anwendung und Interpretation dieser Datenanalyse.

Last- und Betriebsverhalten

In den Fallbeispielen der Hierarchie-Ebene „Anlagen“ (Lüftungs- und Kälteanlage) liegt der Analyseschwerpunkt auf dem **Last- und Betriebsverhalten** der elektrischen Verbraucher. Die Anwendung

der Disaggregationsanalysen kann, wie im Fallbeispiel Lüftungsanlage deutlich geworden ist, neue Erkenntnisse über die Aufschlüsselung des Stromverbrauchs von Einzelkomponenten des Systems liefern. Allerdings besteht die Motivation zur Durchführung einer Messkampagne auf Systemebene häufig darin, dass das Last- und Betriebsverhalten des betrachteten Systems unbekannt ist. Anhand der statistischen Parameter kann das Lastverhalten interpretiert werden. So wird eine Grundlage für weiterführende Datenanalysen geschaffen, die im Detail identifizierte Auffälligkeiten in den Analyseschritten „Diagnose“ und „Optimierung“ umsetzen. Mit der Anwendung dieser Analysen ist somit der **Mehrwert** verbunden, dass Last- und Betriebsverhalten elektrischer Verbraucher zu charakterisieren und Auffälligkeiten herauszustellen.

An dieser Stelle erfolgt eine Einordnung und Bewertung der in dieser Arbeit entwickelten Berechnungsverfahren (s. Tabelle 64 auf der folgenden Seite). In den nachfolgenden Abschnitten wird auf die einzelnen Berechnungsverfahren und deren Relevanz detailliert eingegangen.

Die Berechnung des **Ruhezeit- und Betriebszeitfensters** ist von besonders hoher Relevanz. Durch das iterative Verfahren können Leistungswerte automatisiert in ein Betriebs- und Ruhezeitfenster eingeteilt werden (vgl. Kapitel 6.3.2). So wird eine Grundlage zur Ermittlung weiterer statistischer Parameter geschaffen. Einige dieser Parameter, wie bspw. die mittlere berechnete Grundlast, werden auch für die Disaggregationsanalysen verwendet. Die Parameter des Berechnungsverfahrens liefern auch Aussagen über die Standby-Zeiten sowie Betriebsstunden erfasster Anlagen. Das Berechnungsverfahren ist daher grundsätzlich auf alle erfassten Datenreihen anzuwenden.

In allen durchgeführten Fallbeispielen waren Aussagen über die Grundlast der erfassten Datenreihen von Bedeutung. Die statistischen Parameter der **mittleren berechneten Grundlast** sowie der **Grundlast-Faktor** haben daher eine hohe Relevanz für die Anwendung des Analysekonzeptes. Das Berechnungsverfahren sollte sowohl bei Messobjekten der Ebene „Betrieb/Standort“ als auch für einzelne „Anlagen“ (Querschnittstechnologien) angewendet werden.

Das Berechnungsverfahren der **Laständerung** hat sich als zentral für die Beurteilung der Dynamik des Lastverhaltens herausgestellt. Die dem Verfahren zugrunde liegenden Parameter stellen Indikatoren zur Identifikation von Lastspitzen-Verbrauchern dar. Die statistischen Parameter werden automatisiert über alle Leistungswerte des Ruhezeit- und Betriebszeitfensters bestimmt und erlauben daher robuste Aussagen zur Dynamik des Lastverhaltens. Insgesamt wird dem Berechnungsverfahren eine hohe Relevanz zugeteilt.

Tabelle 64: Einordnung und Bewertung entwickelter Berechnungsverfahren

	Ruhezeit- und Betriebszeitfenster	Grundlast und Grundlast-Faktor	Laständerung	Spitzenlast-Differenz und Lastspitzen-Faktor	Streuung an diskreten Zeitwerten	Leistungsspektrum
Kernaussagen	Stromverbrauch und zeitl. Anteil (Standby-Zeit, Betriebsstunden) je Zeitfenster	Beurteilung der Grundlast (nicht erkennbar vs. Dauerverbraucher) und Indikator für Grundlast-Verbraucher	Beurteilung der Laständerung (statisch vs. dynamisch) und Indikator für Lastspitzen-Verbraucher	Beurteilung der Spitzenlast (nicht vorhandene vs. ausgeprägte Lastspitzen) und Indikator für Lastspitzen-Verbraucher	Beurteilung des Betriebs- und Regelverhaltens (homogen vs. heterogen) und Indikator für auffälliges Tageslastverhalten	Beurteilung der Lastniveaus anhand des Leistungsspektrums
Priorisierung	Alle Datenreihen (Grundlage für weitere stat. Parameter)	Messobjekte mit unbekanntem Grundlast-Verbrauch oder hoher Gesamtgrundlast	Messobjekte oder Anlagen mit unbekannter Laständerung	Messobjekte oder Anlagen mit unbekannter Spitzenlast	Messobjekte oder Anlagen mit auffälligen/unbekannten Betriebs- und Regelverhalten	Messobjekte oder Anlagen mit unbekanntem Lastniveaus
Relevanz	Sehr hoch	Hoch	Hoch	Mittel	Mittel	Niedrig

Mit der **Spitzenlast-Differenz** und dem **Lastspitzen-Faktor** wird der Spitzenlastbereich (obere 2,5% der Leistungswerte) einer Datenreihe beschrieben. Die Parameter beziehen sich daher abhängig vom Messzeitraum auf eine kleinere Anzahl an Leistungswerten und sind entsprechend stärker von Ausreißern beeinflusst. Die Aussagen dieser Datenanalyse können, insbesondere bezüglich der Identifikation von Lastspitzen-Verbrauchern mit dem Berechnungsverfahren Laständerung übereinstimmen. Beide Berechnungsverfahren grenzen sich jedoch dadurch ab, dass die Spitzenlast-Differenz und der Lastspitzen-Faktor auch Aussagen zur Ausprägung einzelner Lastspitzen in einer Datenreihe geben. Dem Berechnungsverfahren wird daher insgesamt eine mittlere Relevanz zugeordnet (vgl. Tabelle 64).

Mit dem Berechnungsverfahren **Streuung an diskreten Zeitwerten** wird der Betrachtungshorizont der Datenanalyse verändert. Das Berechnungsverfahren basiert nicht auf der automatisierten Einteilung der Datenreihe in ein Ruhezeit- und Betriebszeitfenster. Stattdessen erfolgt die Einteilung in Typtage und die Definition der Ruhezeit- und Betriebszeitfenster je diskreten Zeitwert aktuell noch individuell durch visuelle Betrachtung der Leistungswerte in einer Streugrafik. An dieser Stelle besteht Potenzial für die weiterführende Automatisierung der Datenanalyse. Weiterhin basiert das Berechnungsverfahren aufgrund der kurzen Messzeiträume auf einer geringen Anzahl an Leistungswerten je diskreten Zeitwert. Ausreißer können daher die Ergebnisse des Berechnungsverfahrens stärker beeinflussen. Dennoch besteht bei dem Berechnungsverfahren das Alleinstellungsmerkmal, Aussagen zum Betriebs- und Regelverhalten elektrischer Verbraucher zu liefern. Insgesamt wird dem Berechnungsverfahren eine mittlere Relevanz zugeteilt.

Das Berechnungsverfahren **Leistungsspektrum** wurde im Zuge der durchgeführten Fallbeispiele kaum angewendet. Dies hat den Hintergrund, dass bereits durch die Anwendung anderer Berechnungsverfahren Aussagen über das Grundlast- und Betriebslastniveau vorliegen. Die Betrachtung der Lastniveaus hätte daher keine neuen Erkenntnisse gebracht. Das Berechnungsverfahren umfasst zwar konkrete Parameter, die eine Interpretation der Lastniveaus einer Datenreihe zulassen, allerdings ist weiterhin auch eine grafische Darstellung des Leistungsspektrums zur Interpretation der Ergebnisse hilfreich. Die bereits realisierte automatisierte Anwendung und die Möglichkeit sowohl die Anzahl als auch die Dichte der Lastniveaus zu betrachten verdeutlichen das Potenzial zur Weiterentwicklung dieses Berechnungsverfahrens. Zukünftig könnten erfasste Datenreihen durch die Anwendung des Berechnungsverfahrens automatisiert Lastprofil-Clustern mit charakteristischen Eigenschaften bzgl. des Leistungsspektrums zugeordnet werden. Basierend auf der bisherigen Anwendung in den Fallbeispielen wird dem Berechnungsverfahren insgesamt eine niedrige Relevanz zugeordnet.

Die im Zuge dieser Arbeit entwickelten Berechnungsverfahren zur automatisierten Auswertung können nicht nur auf Datenreihen angewendet werden, die durch den Einsatz mobiler Messtechnik erhoben werden. Eine Anwendung ist auch auf **RLM-Lastgangdaten** bzw. Stromverbrauchsdaten, die heute und in Zukunft durch intelligente Messsysteme (Smart Meter) erhoben werden, möglich. Trotz der deutlich höheren Anzahl an Leistungswerten (bei einem vollen Jahr ca. 35.000 Werte) in den Datenreihen konnten Parameter wie die mittlere Grundlast automatisiert berechnet und interpretiert werden. Zu beachten ist allerdings, dass die Berechnungsverfahren in der Regel einen gemittelten Wert ausgeben. Jahreszeitliche Schwankungen wie beispielsweise saisonal bedingte Unterschiede in

der Höhe der anliegenden Gesamtgrundlast werden in den aktuellen Berechnungsverfahren nicht berücksichtigt. An dieser Stelle können die Verfahren weiterentwickelt werden – bspw. indem zusätzliche Parameter unter Berücksichtigung der jahreszeitlichen Änderung definiert werden oder eine Berechnung anhand von fest definierten Zeitabschnitten erfolgt (z.B. Quartalen).

Indikatoren für Detailanalysen

Die Ergebnisse der in dieser Arbeit entwickelten, standardisierten Datenanalysen stellen eine Basis zur Anwendung weiterführender Detailanalysen dar. In dem entwickelten Datenanalyse-Plan (vgl. Abbildung 43) wurde daher bewusst eine Abgrenzung zwischen den standardisierten Datenanalysen und individuellen Detailanalysen vorgenommen. Die entwickelten standardisierten Datenanalysen decken den ersten Analyseschritt „Erfassung“ umfassend ab. Die weiterführende Betrachtung der Ursachen identifizierter Auffälligkeiten (Analyseschritt „Diagnose“) sowie die Ermittlung von Optimierungspotenzialen (Analyseschritt „Optimierung“) erfordern dann in der Regel individuelle Detailanalysen. Basierend auf den durchgeführten Fallbeispielen können die folgenden Indikatoren darauf hinweisen, ob weiterführende Detailanalysen durchgeführt werden sollten (s. Tabelle 65).

Tabelle 65: Indikatoren zur Durchführung von Detailanalysen

Indikator	Detailanalyse
Hoher Stromverbrauch und hohe Grundlast	Diagnose und Optimierung zu Verwendungszweck Betriebseinrichtung (Fallbeispiel Gerichtsgebäude) Diagnose und Optimierung zu großen Lüftungs- und Kältesystemen (Fallbeispiel Polizeipräsidium)
Hohe Grundlast	Diagnose und Optimierung zu Kompressor-System und Zentralschmierung (Fallbeispiel Metallv. Betrieb – Standort A) Diagnose und Optimierung zu Teilbereichen Lager1 und Versand (Fallbeispiel Metallv. Betrieb – Standort B)
Auffällige Parameter zu Last- und Betriebsverhalten	Optimierung des Lüftungssystems (Fallbeispiel Lüftungsanlage) Optimierung und Effizienzbewertung des Kältesystems (Fallbeispiel Kälteanlage)

7.1.2 Mehrwert durch Effizienz und Flexibilität des Ansatzes

Bisher liegt keine systematische Methode für den Einsatz mobiler Messtechnik und eine automatisierte Auswertung von Lastgangdaten vor (vgl. Kapitel 3.2). Daher wurden bezogen auf die methodischen Bausteine des Mess- und Analysekonzeptes diverse Maßnahmen zur Erhöhung der **Effizienz** und **Flexibilität** des Ansatzes erarbeitet. Durch die Umsetzung dieser Maßnahmen wird der Aufwand für die Anwendung in der Praxis verringert. Vor diesem Hintergrund ergibt sich ein weiterer Mehrwert durch die Erhöhung der Effizienz und Flexibilität des entwickelten Ansatzes.

*Mehrwert durch **Effizienz**: Maßnahmen zur Reduktion des (Zeit-)Aufwands für die Anwendung des Mess- und Analysekonzeptes.*

*Mehrwert durch **Flexibilität**: Maßnahmen zur verallgemeinerbaren Anwendung des Mess- und Analysekonzeptes.*

Vor diesem Hintergrund wurden für die ausgearbeiteten methodischen Bausteine des Mess- und Analysekonzeptes konkrete Forschungsfragen aufgesetzt (vgl. Kapitel 1.2):

Messkonzept: *Wie kann mobile Messtechnik effizient und systematisch zur Analyse von elektrischen Energieflüssen im gewerblichen Bereich eingesetzt werden?*

Analysekonzept: *Wie kann die Datenauswertung und -analyse vereinfacht und automatisiert werden?*

Die Beantwortung dieser Forschungsfragen erfolgt anhand der Beschreibung und Diskussion der umgesetzten Maßnahmen zur Erhöhung der Effizienz und Flexibilität. In den folgenden Abschnitten werden diese Maßnahmen zusammenfassend aufgeführt und eingeordnet.

Eine Erhöhung der **Effizienz** kann insbesondere durch eine Reduktion des Zeitaufwands erreicht werden. Dieser kann nicht beliebig reduziert werden, da für einige Arbeitsschritte (u.a. die Installation der Messtechnik) zwangsläufig fachkundiges Personal benötigt wird (vgl. Kapitel 7.2). Dennoch wurden auf der Basis von durchgeführten Pre-Tests (Kapitel 4.4) und Fallbeispielen Maßnahmen getroffen, um den Zeitaufwand von Messkampagnen zu reduzieren. Tabelle 66 führt die Maßnahmen zur Erhöhung der Effizienz des Ansatzes zusammenfassend für das Mess- und Analysekonzept auf.

Tabelle 66: Maßnahmen zur Erhöhung der Effizienz des entwickelten Ansatzes

Kernbaustein	Maßnahmen Erhöhung der <u>Effizienz</u>
Messkonzept	Festlegung von Anforderungen an die mobile Messtechnik: Anzahl Eingänge/Messkanäle je Messsystem, Fernauslesbarkeit Festlegung der Messprioritäten: Priorisierung bei Belegung der Messkanäle zur Erfassung relevanter Messpunkte Eingrenzung des Messzeitraums auf 2-4 Wochen Verzicht auf aufwendige Erhebung detaillierter Betriebsdaten
Analysekonzept	Datenanalyse-Plan zur automatisierten Anwendung von Datenanalysen und Berechnungsverfahren

Insbesondere für kleinere Unternehmen ist es wichtig, dass Messdienstleistungen kostengünstig angeboten werden können. Mit den umgesetzten Maßnahmen kann ein effizienterer Einsatz der mobilen Messtechnik erreicht werden. Dennoch bleibt die Planung und Umsetzung von Messkampagnen in der Praxis immer mit einem gewissen Aufwand verbunden. Dazu wird der Zeitaufwand für die Umsetzung von Messkampagnen in Kapitel 7.2 beispielhaft anhand durchgeführter Fallbeispiele aufgezeigt und diskutiert.

Die Erhöhung der **Flexibilität** des Ansatzes stellt insbesondere durch die Diversität gewerblicher Messobjekte eine große Herausforderung dar. Neben den heterogenen gebäudetechnischen Strukturen tragen auch die verschiedenen Branchenwege (insbes. bei KMU) zur hohen Diversität des Anwendungsbereichs bei. Trotzdem konnten Maßnahmen erarbeitet werden und in die Entwicklung der

methodischen Bausteine des Mess- und Analysekonzeptes einfließen. Tabelle 67 gibt eine Übersicht über die umgesetzten Maßnahmen zur Erhöhung der Flexibilität des Ansatzes.

Tabelle 67: Maßnahmen zur Erhöhung der Flexibilität des entwickelten Ansatzes

Kernbaustein	Maßnahmen zur Erhöhung der <u>Flexibilität</u>
Messkonzept	Festlegung Messprinzip: Systematische Einordnung der elektrischen Verteilung in Hierarchie-Ebenen Festlegung der Messprioritäten: Skalierung des Messequipments Zeitliche Staffelung von Messreihen bei großen Messobjekten Sicherstellung Spannungsabgriff mittels Abgriffsklemmen
Analysekonzept	Erstellung standardisierter Messdatensätze Einordnung erfasster Messpunkte nach Hierarchie-Ebene und Verwendungszweck

Ein flexibler Ansatz erlaubt die Anwendung des Mess- und Analysekonzeptes unabhängig von der Branche oder den spezifischen Gegebenheiten (u.a. Energieverbrauch, Gebäudestruktur) eines Messobjektes. Die Anwendung des Mess- und Analysekonzeptes in unterschiedlichsten Fallbeispielen zeigt, dass mit dem entwickelten Ansatz bedingt durch die umgesetzten Maßnahmen eine hohe Flexibilität gegeben ist. Trotz der Unterschiede in der Größe und der Betrachtungsebene (gesamter Standort vs. Querschnittstechnologie) konnten in den Fallbeispielen vergleichbare Ergebnisse erzielt werden.

Allerdings ist zu berücksichtigen, dass technische und bauliche Einschränkungen den Einsatz mobiler Messtechnik in Messobjekten limitieren können. Dies gilt insbesondere für Messobjekte, die sich stark von den in dieser Arbeit betrachteten Fallbeispielen unterscheiden:

- Bei Messobjekten, die deutlich größer als die betrachteten Fallbeispiele sind, kann es verstärkt zu technischen Einschränkungen durch limitiertes Messequipment kommen. Durch die zeitliche Staffelung mehrerer Messreihen wird ein flexibler Ansatz auch in größeren Messobjekten mit komplexeren elektrischen Verteilungen gewährleistet (vgl. Fallbeispiel Polizeipräsidium, Kapitel 6.5.2). Dennoch kann bei besonders großen Messobjekten die Komplexität der elektrischen Verteilung ein limitierender Faktor sein.
- Weiterhin kann der Einsatz von mobiler Messtechnik in Messobjekten, die deutlich kleiner als die betrachteten Fallbeispiele sind, zunehmend durch bauliche Gegebenheiten limitiert sein. So ist es in kleineren Elektroinstallationen ggf. nicht möglich, die Messtechnik zu installieren, da kein Platz zur Installation der Sensoren vorhanden ist oder die Messlokation eine Installation grundsätzlich nicht zulässt (u.a. Flurverkehr).

7.2 Einflussfaktoren auf die Umsetzung in der Praxis

Trotz der Bemühungen um einen möglichst effizienten und flexiblen Ansatz kann der Zeitaufwand für die Umsetzung von Messkampagnen nach wie vor ein großes Hemmnis darstellen. Daher wird an dieser Stelle nochmals beispielhaft auf den benötigten Zeitaufwand in den durchgeführten Messkampagnen im Metallverarbeitenden Betrieb – Standort A und B eingegangen. In der folgenden Tabelle ist der Zeitaufwand in Stunden [h] für die einzelnen Arbeitsschritte aufgeführt (s. Tabelle 68).

Tabelle 68: Vergleich Zeitaufwand der Fallbeispiele Metallverarbeitender Betrieb – Standort A und B

Arbeitsschritte	Metallv. Betrieb – Standort A Zeitaufwand	Metallv. Betrieb – Standort B Zeitaufwand
Vor-Ort-Begehung und Informationsbeschaffung	7 h	7 h
Installation Messtechnik*	5 h	5 h
Kontrolle vor Ort und Fernauslesung	4 h	4 h
Lokaler Datenexport	4 h	-
Abbau Messtechnik*	4 h	4 h
Datenauswertung	25 h	25 h
SUMME	49 h	45 h

*Hier ist zu berücksichtigen, dass diese Arbeitsschritte durch eine Elektrofachkraft durchgeführt werden müssen.

Die angegebenen Werte für die Zeitdauer sind als grobe Orientierung für eine Messkampagne mit dem vollständigen Einsatz des zur Verfügung stehenden Messequipments¹⁰ zu interpretieren. Da die Arbeitsschritte „Installation Messtechnik“ und „Abbau Messtechnik“ durch eine Elektrofachkraft durchgeführt werden müssen, kann sich der Personalaufwand zur Umsetzung der Messkampagne erhöhen. Der Zeitaufwand ist im Fallbeispiel Metallv. Betrieb – Standort A etwas höher, da aufgrund unvollständiger Datenübertragung ein lokaler Datenexport notwendig war.

Der angegebene Zeitaufwand für die Datenauswertung berücksichtigt noch nicht die Anwendung des im Zuge dieser Arbeit entwickelten Analysekonzeptes. Daher ist von einem geringeren Zeitaufwand für die Datenauswertung auszugehen, wenn die standardisierten Datenanalysen (u.a. vorgefertigte Analysetools) angewendet werden.

¹⁰ Drei Messsysteme zur Wirkleistungsmessung und ein Messsystem zur Scheinleistungsmessung (vgl. Kapitel 5.1.2).

Die anfänglichen Arbeitsschritte der Datenerhebung und Informationsbeschaffung können beliebig aufwendig gestaltet werden. In dem entwickelten Ansatz wird der Fokus auf die Erhebung und Analyse von Stromverbrauchsdaten und grundlegenden Betriebsdaten gesetzt. Daher liegt ein erster wichtiger Schritt in der Beschaffung der RLM-Lastgangdaten, sofern diese vorhanden sind. Diese werden sowohl zu Validierungszwecken als auch zur ersten groben Analyse der Lastcharakteristik des Messobjektes benötigt. Weitere aufwendige und detaillierte Betriebsdaten (bspw. zu einzelnen Anlagen) wurden standardmäßig nicht erhoben. Dies kann im Falle von Detailanalysen ein wichtiger notwendiger Schritt sein. Der entwickelte Ansatz sieht dies jedoch zunächst nicht vor, da die Zielsetzung darin besteht, den Mehrwert aus der Analyse der erhobenen Messdatensätze zu maximieren.

In vergleichbaren Verfahren zur Ermittlung des energetischen Zustands von Nicht-Wohngebäuden, wie der an die DIN V 18599 angelehnte Ansatz zur Bildung von Teilenergiekennwerten [150] oder die Anwendung der VDI 3807 [66] bedarf es in der Regel einer deutlich umfangreicheren Erhebung von Betriebsdaten. Dabei muss jedoch beachtet werden, dass die genannten Verfahren eine gesamtenergetische Betrachtung von Gebäuden unter Berücksichtigung aller Energieträger (Strom, Wärme, Wasser) und Gewerke (Lüftung, Kühlung, etc.) umfassen. Weiterhin basieren die Ansätze auf der Ermittlung der **Energiebedarfe** auf der Grundlage normierter Nutzungsrandbedingungen anstatt der vollständigen Erfassung von Verbrauchsdaten vorliegender Teilbereiche und Verbrauchergruppen [97].

Vor diesem Hintergrund ist ein unmittelbarer Vergleich des Zeitaufwands zwischen den genannten Verfahren nur bedingt möglich. Vielmehr ist der entwickelte Ansatz als eine Ergänzung und Aufwertung der bestehenden Verfahren hinsichtlich einer systematischen, messtechnischen Erhebung elektrischer Energieflüsse in Kurzzeitmessungen anzusehen. Neben der Bildung von Kennwerten basierend auf realen Verbrauchsdaten bildet der Ansatz auch eine Grundlage zur Aufschlüsselung der Verbrauchsstruktur und Identifikation relevanter Teilbereiche, Verbrauchergruppen und Gewerke.

7.2.1 Chancen und Handlungsempfehlungen für die Umsetzung

Die Chancen zur Umsetzung des entwickelten Ansatzes werden nachfolgend aus der Sichtweise von drei zentralen Akteuren diskutiert. Die unterschiedlichen Perspektiven sind wichtig, um die Vor- und Nachteile herauszustellen und Handlungsempfehlungen für die Umsetzung in der Praxis abzuleiten. Dabei wird auf Verwalter großer Liegenschaftsbestände, Anbieter von Messdienstleistungen sowie Unternehmen als Letztverbraucher eingegangen.

Verwalter großer Liegenschaftsbestände müssen sich vor dem Hintergrund der Betriebsoptimierung ihrer Gebäude stetig mit der Identifikation und Umsetzung geeigneter energetischer Maßnahmen beschäftigen. Die in der Regel vorhandenen Gesamtstrom- und Wärmeverbräuche einzelner Liegenschaften stellen häufig eine unzureichende Grundlage zur gezielten Identifikation und Umsetzung von Maßnahmen dar. Auf der Grundlage dieser Daten ist zudem ein Vergleich der Gebäude nur schwer möglich, da sich die Gebäude in ihrer Nutzung unterscheiden [97]. Durch die Transparenz über die elektrischen Energieflüsse verbessert der entwickelte Ansatz die Datengrundlage, um Einsparpotenziale und geeigneten Maßnahmen zu ermitteln. Darüber hinaus wird durch den Ansatz die

Verbrauchsstruktur der Gebäude offengelegt. Die Zuordnung der Verbrauchsdaten zu Verwendungszwecken gemäß VDI 3807 stellt zudem eine Grundlage für gebäudeübergreifendes Benchmarking dar. So könnten in einem Gebäudeportfolio auf der Basis von Kurzzeitmessungen mit mobiler Messtechnik Vergleichskennwerte für einzelne Verwendungszwecke (z.B. Lüftung, Kühllkälte, Beleuchtung) gebildet werden. Im Gegenzug zu etablierten Verfahren basieren diese Kennwerte stets auf realen Verbrauchswerten.

In der Praxis stellen Kurzzeitmessungen mit mobiler Messtechnik für Verwalter von Liegenschaftsbeständen darüber hinaus eine Möglichkeit dar, geeignete Messpunkte für stationäre Messungen zu identifizieren. So kann basierend auf den Ergebnissen der Kurzzeitmessung entschieden werden, welche Messpunkte dauerhaft messtechnisch erfasst und überwacht werden sollten. Für einige Verwalter von Liegenschaftsbeständen bestehen auch Planungsvorgaben für eine Zählerstruktur (vgl. [151]). Zur Umsetzung solcher Vorgaben können Kurzzeitmessungen eine wichtige Entscheidungsgrundlage darstellen.

Außerdem werden Verwalter öffentlicher Gebäude zunehmend in die Pflicht genommen, Einsparpotenziale in ihren Gebäuden zu identifizieren und umzusetzen. Durch das im November 2023 novellierte Energieeffizienzgesetz sind nun erstmals auch öffentliche Stellen zu jährlichen Energieeinsparungen verpflichtet [5]. An dieser Stelle kann der Einsatz mobiler Messtechnik Verwalter öffentlicher Gebäude dabei unterstützen, diesen neuen Verpflichtungen nachzukommen.

Der mit dem Einsatz von Messtechnik verbundene Aufwand wird nach wie vor häufig als Grund genannt, dass Messtechnik in der Praxis nicht eingesetzt wird (vgl. [11]). **Unternehmen als Anbieter einer Messdienstleistung** können daher durch den entwickelten Ansatz unmittelbar profitieren. Durch einen geringeren Zeitaufwand und damit auch geringeren Kosten kann mobile Messtechnik vermehrt im Zuge von Energieberatungen und Effizienzanalysen eingesetzt werden. Je höher die Energiekosten des untersuchten Messobjektes, desto eher könnte dieser Ansatz zusätzlich herangezogen werden, um präzise Energieberatung und Effizienzanalysen zu ermöglichen.

Zudem könnten neue finanzielle Anreize oder Förderungen geschaffen werden, die Energieberatungen und Effizienzanalysen mit mobiler Messtechnik explizit unterstützen (Anreize für datenbasierte Audits/Effizienzanalysen). Auch das Angebot von Schulungen durch neutrale Stellen wäre ein möglicher Hebel, um Energieberatungen und Effizienzanalysen nachhaltig zu verbessern. Inhalte dieser Schulungen könnten unter anderem die systematische Herangehensweise an den Einsatz mobiler Messtechnik (Messplanung) als auch die standardisierte Auswertung von RLM-Lastgangdaten und mobilen Messdaten sein.

Unternehmen als Letztverbraucher erhalten durch den entwickelten Ansatz eine umfangreiche Analyse des energetischen Ist-Zustands mit dem Fokus auf elektrische Energieflüsse. In der Praxis ist über die Möglichkeiten des Einsatzes mobiler Messtechnik jedoch nach wie vor wenig bekannt. Der Aufwand und damit zusammenhängende Kosten sowie die Zurückhaltung vor der Anwendung aufgrund des vermeintlichen Eingriffs in den Betrieb stellen für Unternehmen Hürden, um mobile Messtechnik in der Praxis einzusetzen (vgl. [7]). Hinzu kommt, dass häufig eine Aufbereitung der Ergebnisse durch Experten notwendig ist, da insbesondere kleineren Unternehmen das nötige Fachwissen zur Interpretation von Energieverbrauchsdaten fehlt. Vor diesem Hintergrund könnten auch

auf der Seite der Letztverbraucher Schulungen zu digitalen Technologien umgesetzt werden, um über die Potenziale von mobiler Messtechnik zu informieren.

Durch neue Vorgaben auf EU-Ebene (vgl. Richtlinie EU 2023/1791 [50]) und nationaler Ebene (Energieeffizienzgesetz [5]) werden Unternehmen zunehmend in die Pflicht genommen, Energiemanagement und Energieaudits umzusetzen. Kleinere Unternehmen (insbes. KMU) sind jedoch weiterhin von diesen Verpflichtungen ausgenommen. Hier könnten, wie in der EU-Richtlinie vorgeschlagen, Programme zur Ermutigung und Unterstützung von KMU zur Umsetzung einer Energieberatung oder Effizienzanalyse auf nationaler Ebene aufgesetzt werden. Ein Schritt könnten gezielte Förderungen zur Umsetzung qualitativer Effizienzanalysen mit mobiler Messtechnik sein.

Die Einführung eines Energiemanagement-Systems nach DIN EN ISO 50005 kann Unternehmen dabei unterstützen, sich dem Thema Energiemanagement schrittweise zu anzunähern [152]. An dieser Stelle kann der systematische Einsatz mobiler Messtechnik bei der Umsetzung der ersten Schritte der DIN EN ISO 50005 unterstützen.

7.2.2 Chancen zur Weiterentwicklung und zukünftige Anwendungen

Auf der Grundlage im Vorfeld durchgeführter Pre-Tests und der in dieser Arbeit umgesetzten Fallbeispiele wurde ein möglichst effizienter und flexibler Ansatz erarbeitet, um mobile Messtechnik zur Erfassung elektrischer Energieflüsse im gewerblichen Bereich einzusetzen. Trotz der bereits identifizierten Mehrwerte des Ansatzes bestehen nach wie vor Potenziale zur Weiterentwicklung der entwickelten Methode. Im folgenden Abschnitt wird daher auf die Chancen zur Weiterentwicklung des Ansatzes aus wissenschaftlicher und praktischer Sicht eingegangen.

Aus **wissenschaftlicher Sicht** bedarf es der Betrachtung zusätzlicher Fallbeispiele, um die Mess- und Auswertemethode weiterzuentwickeln. Für den Einsatz der mobilen Messtechnik können Analysen in Messobjekten, die sich stark von den in dieser Arbeit betrachteten Fallbeispielen unterscheiden, Aufschluss über die verallgemeinerbare Anwendbarkeit des Ansatzes liefern. Hierzu wären Untersuchungen in weiteren Branchenzweigen oder in kleinen (bspw. $< 0,1$ GWh Stromverbrauch pro Jahr) und großen (> 4 GWh Stromverbrauch pro Jahr) Unternehmen von besonderem Interesse.

Im Hinblick auf das Analysekonzept und die Auswertemethode ist die Umsetzung weiterer Fallbeispiele relevant, um die entwickelten Datenanalysen und Berechnungsverfahren auf Robustheit zu prüfen. Darüber hinaus bestehen auch Potenziale zur Identifikation weiterer statistischer Parameter, die weniger stark auf die Maximalleistung einer Datenreihe ausgerichtet sind. Auch die im Zuge der Wirkleistungsmessungen je Phase aufgezeichneten Strom-, Spannungs- und $\cos(\phi)$ -Werte können weiterführende Analysen zulassen. So ermöglichen phasenspezifische Auswertungen je Messpunkt Rückschlüsse auf das Verhältnis von ein- zu dreiphasigen elektrischen Verbrauchern in einer Datenreihe.

Weitere Fallbeispiele würden auch die Grundlage zur Untersuchung der Potenziale eines **verbraucher-spezifischen Benchmarkings** basierend auf Kurzzeitmessungen darstellen. So können aus den Messdaten charakteristische Energiekennzahlen (Benchmarks) zur Effizienzbewertung einzelner Betriebe und Anlagen bzw. Querschnittstechnologien entwickelt werden. Die Potenziale zur Bildung

dieser spezifischen Kennzahlen auf der Grundlage mobiler Messdaten wurden bereits im Zuge durchgeführter Pre-Tests im Lebensmitteleinzelhandel aufgezeigt [153].

Die entwickelten statistischen Parameter können ebenfalls herangezogen werden, um anlagenspezifisches Verbrauchsverhalten systematisch einzuordnen und zu bewerten. Um entsprechende Kennzahlen und Parameter zu entwickeln, bedarf es allerdings der Erhebung zusätzlicher Messdatensätze. Erst wenn eine umfangreichere Datengrundlage geschaffen ist, kann technologie-spezifisch eine detailliertere Einordnung der statistischen Parameter und Kennzahlen erfolgen.

Des Weiteren ist der Vergleich neuer, verbrauchsspezifischer Kennzahlen mit bedarfsorientierten Kennzahlen aus etablierten Verfahren (DIN V 18599 und VDI 3807) zukünftig relevant, um eventuelle Abweichungen herauszustellen. So könnte der in dieser Arbeit entwickelte Ansatz zukünftig gegenüber einer Abschätzung des Energiebedarfs bevorzugt angewendet werden, um den energetischen Ist-Zustand von Messobjekten im gewerblichen Bereich realitätsnah abzubilden und zu beschreiben.

Aus **praktischer Sicht** bedarf es einer zielgerichteteren Ausrichtung und Anwendung des entwickelten Ansatzes, um einen noch effizienteren Einsatz der mobilen Messtechnik zu gewährleisten. Dazu wäre beispielsweise ein stärkerer Fokus auf die Auswertung der RLM-Lastgangdaten als Grundlage für eine gezielte Anwendung von Disaggregationsanalysen und Berechnungsverfahren denkbar. So wird vermieden, dass – wie bei den Fallbeispielen in dieser Arbeit – alle entwickelten standardisierten Datenanalysen angewendet und ausgewertet werden. Auch eine gezieltere Auswahl priorisierter Messpunkte kann die Datengrundlage vereinfachen und so eine effizientere Auswertung ermöglichen.

Das größte Potenzial in Bezug auf die praktische Umsetzung liegt allerdings in der weiterführenden Automatisierung der Auswertungsmethode. Durch die Fernauslesung der Messdaten und den Datenzugriff von einem SQL-Server konnte der Datenexport bereits maßgeblich vereinfacht werden. Potenzial besteht jedoch weiterhin in der automatisierten Erstellung standardisierter Messdatensätze sowie der unmittelbaren Anwendung der Disaggregationsanalysen und Berechnungsverfahren auf diese Messdatensätze. Dazu besteht Entwicklungsbedarf zu automatisierten Tools, die unmittelbar auf standardisierte Messdatensätze zugreifen und Ergebnisse direkt in Berichtsform ausspielen.

Nicht zuletzt stellen die in dieser Arbeit entwickelten Berechnungsverfahren und statistischen Parameter den ersten Schritt für eine Datenauswertung basierend auf Machine-Learning-Algorithmen und **künstlicher Intelligenz** (KI) dar. So wird der Arbeitsschritt der Datenauswertung weiter automatisiert und effizienter gestaltet. Die folgenden Ansätze könnten durch KI-Anwendungen und Machine-Learning-Algorithmen weiterverfolgt und ausgearbeitet werden:

- Automatisierte **Muster- und Anomalie-Erkennung**, um Auffälligkeiten in Datenreihen einfach zu identifizieren (hier kann eine Rekonstruktion von Lastgangkurven durch trainierte Daten erfolgen)
- **Clusterung** von Datenreihen anhand der Identifikation von Lastniveaus und Typtagen, um verbraucherspezifisches Lastverhalten zu einzuordnen und zu bewerten
- Integration der entwickelten **Berechnungsverfahren** zu statistischen Parametern in ein KI-Modell, um auffällige Datenreihen zu identifizieren (automatisierte Benachrichtigungen)

Kapitel 8

Fazit

Zur Erreichung der europäischen und nationalen Klimaziele ist neben dem Ausbau Erneuerbarer Energien auch die Steigerung der Energieeffizienz im Industrie- und Gewerbesektor von zentraler Bedeutung. Im gewerblichen Bereich und insbesondere in kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) bestehen nach wie vor große Einsparpotenziale, die es in den kommenden Jahren zu erschließen gilt. Dabei spielen digitale Technologien wie der Einsatz von Messtechnik eine entscheidende Rolle. So werden Einsparpotenziale identifiziert und geeignete Effizienzmaßnahmen in KMU und öffentlichen Gebäuden umgesetzt.

Die vorliegende Arbeit beinhaltet einen systematischen Ansatz zur Erfassung und Analyse elektrischer Energieflüsse in gewerblichen und öffentlichen Gebäuden mittels mobiler Messtechnik. Der Nutzen und Mehrwert dieses Ansatzes wird anhand von **sechs Fallbeispielen** in der Praxis erarbeitet. Der Fokus liegt dabei zum einen auf der Entwicklung einer systematischen Methodik für den Einsatz der Messtechnik. Zum anderen wird auch die automatisierte Datenauswertung von Kurzzeitmessungen, die in der wissenschaftlichen Literatur bisher kaum Beachtung gefunden hat, untersucht. Ein innovatives Mess- und Analysekonzept für Kurzzeitmessungen stellt somit den Kern der Arbeit dar.

Gleichzeitige Erfassung von Messpunkten als Schlüssel zur effizienten Aufschlüsselung des Stromverbrauchs

Für den effizienten Einsatz mobiler Messtechnik wurden spezifische Kriterien definiert, die zur **Auswahl eines geeigneten Messsystems** für die Wirkleistungsmessung führten. Das ausgewählte System zeichnet sich dadurch aus, mehrere Messpunkte bzw. dreiphasige elektrische Verbraucher gleichzeitig zu erfassen. Besonders hervorzuheben ist die Skalierbarkeit des Systems bezüglich der Anzahl der Messpunkte, was eine effiziente Aufschlüsselung des Stromverbrauchs erleichtert. In der Praxis konnten mit dem ausgewählten Messequipment bis zu 24 Messpunkte gleichzeitig erfasst werden.

Reduzierter Aufwand durch systematischen Einsatz mobiler Messtechnik

Auf der Grundlage mehrerer durchgeführter Pre-Tests wurde ein Messkonzept entwickelt und anhand von sechs Fallbeispielen validiert. Wesentliche Maßnahmen zur Optimierung der Messmethode sind die Definition des **Messprinzips**, der **Messprioritäten** und des **Messzeitraums**. Die erfolgreiche Anwendung an Messobjekten unterschiedlicher Größe und Branche hat die effiziente und flexible Er-

fassung von Messdaten verdeutlicht. Allerdings treten in der Praxis auch Einschränkungen durch bauliche Gegebenheiten oder limitiertes Messequipment auf. Mit Lösungen wie einer angepassten Messreihenplanung (zeitliche Staffelung der Messreihen) konnten diese Einschränkungen allerdings überwunden und so ein allgemeingültiger Einsatz der Messtechnik gewährleistet werden.

Neue Möglichkeiten der Analyse durch automatisierte Auswertemethoden

Das entwickelte Analysekonzept erlaubt neue Möglichkeiten durch die automatisierte Datenauswertung von Kurzzeitmessungen. Die erhobenen, standardisierten Messdatensätze ermöglichen eine systematische Anwendung der entwickelten Analysen. Dazu gehören neue **Berechnungsverfahren mit zugehörigen Parametern**, die auf der Grundlage von $n=108$ erfassten Datenreihen dreiphasiger elektrischer Verbraucher entwickelt wurden. Die Verfahren erlauben eine Lastprofil-Charakterisierung anhand statistischer Parameter, die spezifische Merkmale des Last- und Betriebsverhaltens beschreiben. Parameter wie der **Grundlast-Faktor** k_{base} können automatisiert auf die erfassten Datenreihen angewendet werden und bspw. Dauerverbraucher identifizieren. Auch das Betriebsverhalten in der **Spitzenlast**, der **Laständerung** und der **Streuung von Leistungswerten** kann kennzahlenbasiert bewertet werden. Querschnittstechnologien wie Kompressoren, Lüftungs- und Kälteanlagen aber auch einzelne Gebäudebereiche können anhand dieser Parameter für die weiterführende Optimierung charakterisiert werden.

Der Gesamtstromverbrauch eines Messobjektes kann durch die Anwendung der **Disaggregationsanalysen** gezielt aufgeschlüsselt werden. So ist die Identifikation relevanter elektrischer Verbraucher möglich, die zur Grundlast oder den Lastspitzen beitragen. Die Aussagekraft der Disaggregationsanalysen wird maßgeblich vom Grad der Gesamtdisaggregation sowie der Disaggregation auf einzelne elektrische Verbraucher bestimmt. Daher ist für alle Disaggregationsanalysen trotz eventueller messtechnischer Einschränkungen eine möglichst hohe Aufschlüsselung des Gesamtstromverbrauchs anzustreben.

Die standardisierten Datenanalysen sind zusammenfassend in einem **Datenanalyse-Plan** eingeordnet. Aus der Anwendung dieser Analysen können sich individuelle, vertiefende Untersuchungen ergeben, die in weiterführenden Analyseschritten umzusetzen sind. Die standardisierten Datenanalysen bieten somit eine solide Basis für die Anwendung weiterführender Detailanalysen und verbraucher-spezifischer Benchmarks. Für letztere müssen allerdings zunächst aussagekräftige anlagen- und systemspezifische Kennzahlen auf der Basis einer umfangreicheren Datengrundlage definiert werden.

Bei der Anwendung des Analysekonzeptes in den Fallbeispielen wurden auch Einschränkungen identifiziert. So bilden Kurzzeitmessungen keine saisonalen Effekte auf den Stromverbrauch ab. An dieser Stelle ermöglichen die Lastgangdaten der registrierenden Leistungsmessung (RLM) zusätzliche Erkenntnisse über saisonale Einflüsse. Darüber hinaus können diese Daten zur Validierung der erfassten Messdaten herangezogen werden.

Neues Mess- und Analysekonzept als Chance für Anbieter und Nutzer

Das neue Mess- und Analysekonzept ermöglicht eine optimierte, **systematische Erfassung und Auswertung** detaillierter Stromverbrauchsdaten. Dabei können ganze Standorte oder einzelne Systeme

untersucht werden. Je nach Analyseschwerpunkt wird eine präzise Identifikation relevanter elektrischer Verbraucher bzw. eine detaillierte Charakterisierung des Last- und Betriebsverhaltens ermöglicht.

Die Umsetzung verschiedener Maßnahmen hat zur Steigerung der **Effizienz und Flexibilität** des entwickelten Ansatzes geführt. Maßgeblich war dafür vor allem die Definition von Messprioritäten zur Reduktion des Zeitaufwands sowie die Skalierung des Messequipments zur flexiblen Anwendung des Mess- und Analysekonzeptes unabhängig von der Größe oder Branchenzugehörigkeit der Messobjekte.

In Bezug zu bestehenden Verfahren zur Analyse gewerblicher Gebäude ist der entwickelte Ansatz nicht als Konkurrenz, sondern als **Ergänzung und Aufwertung** zu sehen, um eine systematische Erfassung und Analyse detaillierter Stromverbrauchsdaten zu ermöglichen. So können Verwalter großer Liegenschaftsbestände den Ansatz zur verbesserten Betriebsoptimierung ihrer Gebäude nutzen und insbesondere eine verbesserte Datentransparenz der elektrischen Energieflüsse erzielen. Auch für Energieberater und Anbieter von Messdienstleistungen eröffnen sich Potenziale, indem maßgeblich der Aufwand zur Umsetzung von Messkampagnen reduziert und erstmals eine automatisierte, kennzahlenbasierte Auswertung ermöglicht wird. Letztlich profitieren auch die Endverbraucher von einer umfassenden Bewertung ihres Stromverbrauchs und neuen Erkenntnissen über Optimierungsmöglichkeiten.

Vielfältige Chancen und Potenzial zur Weiterentwicklung

Zukünftige Arbeiten sollten sich auf die Weiterentwicklung der Mess- und Analysemethodik konzentrieren. Aus wissenschaftlicher Sicht müssen weitere Fallbeispiele untersucht werden, die sich in ihren Eigenschaften stark von den bisherigen Fallbeispielen unterscheiden. Dadurch können neue Erkenntnisse über die generische Anwendbarkeit der Methodik gewonnen und entwickelte Datenanalysen hinsichtlich der Robustheit geprüft und weiterentwickelt werden. So ist die Anwendung der Datenanalysen auch auf Smart Meter-Daten denkbar. Energieberatern und Auditoren steht somit erstmals eine kennzahlenbasierte Bewertung der Merkmale des Last- und Betriebsverhaltens zur Verfügung.

Aus praktischer Sicht besteht Potenzial für eine gezieltere Ausrichtung und Anwendung der Mess- und Analysemethodik. Dies umfasst unter anderem eine weitere Automatisierung der Datenanalysen, beispielsweise durch Auswertungen mittels Machine-Learning- und KI-Algorithmen. Auch standardisierte Ergebnisberichte mit ansprechender grafischer Umsetzung und Übersetzung auf das Wissensniveau von KMU stellen einen Ansatz zur Weiterentwicklung dar.

Insgesamt hat sich gezeigt, dass Kurzzeitmessungen mit mobiler Messtechnik ein großes Potenzial für den gewerblichen Bereich bieten. Im Vordergrund steht dabei die Identifikation von Einspar- und Optimierungspotenzialen auf Basis detaillierter Messdaten der elektrischen Energieflüsse. Mit dem entwickelten Ansatz zum Einsatz mobiler Messtechnik und automatisierter Auswertemethoden leistet die vorliegende Arbeit einen Beitrag zur Erhöhung der Datentransparenz und damit der Energieeffizienz im gewerblichen Bereich.

Literaturverzeichnis

- [1] C. Perez-Linkenheil, *EU Energy Outlook 2050 - Wie entwickelt sich Europa in den nächsten 30 Jahren?* [Online]. Available: <https://blog.energybrainpool.com/eu-energy-outlook-2050-wie-entwickelt-sich-europa-in-den-naechsten-30-jahren-2/>
- [2] International Energy Agency (IEA), *Buildings*. [Online]. Available: <https://www.iea.org/energy-system/buildings> (accessed: Jun. 8 2024).
- [3] *Energy Performance of Buildings Directive*. [Online]. Available: https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/energy-performance-buildings-directive_en (accessed: Jun. 8 2024).
- [4] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), Ed., "Energieeffizienzstrategie 2050," 2019. Accessed: Jun. 23 2024. [Online]. Available: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/energieeffizienzstrategie-2050.pdf?__blob=publicationFile&v=1
- [5] *Gesetz zur Steigerung der Energieeffizienz in Deutschland (Energieeffizienzgesetz - EnEfg)*, 2023. Accessed: May 6 2024. [Online]. Available: <https://www.gesetze-im-internet.de/enefg/BJNR1350B0023.html#BJNR1350B0023BJNG000200000>
- [6] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz BMWK, *Klimaschutzplan 2050*. [Online]. Available: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Artikel/Industrie/klimaschutz-klimaschutzplan-2050.html#:~:text=Bis%202050%20soll%20der%20Prim%C3%A4renergiebedarf,klimaneutralen%20Geb%C3%A4udebestand%20bis%202050%20aufzeigt.> (accessed: Jun. 8 2024).
- [7] L. Hilger *et al.*, "Smart Energy für kleine und mittlere Unternehmen: Technologien, Nutzeranalysen und Lösungsansätze für mehr Energieeffizienz," Abschlussbericht Forschungsprojekt VISE - Smarte Technologien für Unternehmen, Virtuelles Institut Smart Energy, 2021. Accessed: Jun. 26 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.57683/EPUB-1965>
- [8] C. Schipplick, "Einbeziehung lokaler Unternehmen in die Umsetzung energie- und klimapolitischer Ziele," Master Thesis, Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energy gGmbH, 2017.
- [9] A. Jaffe and R. N. Stavins, "The Energy Efficiency Gap - What does it mean?," *Energy Policy*, vol. 22, pp. 804–810, 1994.
- [10] N. Efkarpidis, M. Geidl, H. Wache, M. Peter, and M. Adam, *Smart Metering Applications*. Cham: Springer International Publishing, 2022.
- [11] 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
- [12] A. Herbst *et al.*, "Energiebedarf und wirtschaftliche Energieeffizienz-Potentiale in der mittelständischen Wirtschaft Deutschlands bis 2020 sowie ihre gesamtwirtschaftlichen Wirkungen," Karlsruhe, Berlin, 2013.

- [13] Institut für Wohnen und Umwelt GmbH (IWU), *Teilenergiekennwerte von Nichtwohngebäuden*. [Online]. Available: <https://www.iwu.de/forschung/energie/teilenergiekennwerte-von-nicht-wohngebaeuden/>
- [14] G. Posselt, *Towards Energy Transparent Factories*. Cham: Springer International Publishing, 2016.
- [15] Institut für Mittelstandsforschung Bonn (IfM), *KMU Definition des IfM Bonn*. [Online]. Available: <https://www.ifm-bonn.org/definitionen/kmu-definition-des-ifm-bonn> (accessed: Jun. 5 2024).
- [16] Europäische Kommission, Ed., "Benutzerleitfaden zur Definition von KMU," 2020. Accessed: Jun. 5 2024. [Online]. Available: <https://op.europa.eu/de/publication-detail/-/publication/756d9260-ee54-11ea-991b-01aa75ed71a1>
- [17] L. Di Bella, A. Katsinis, J. Laguera-Gonzalez, L. Odenthal, M. Hell, and B. Lozar, "Annual Report on European SMEs 2022/2023: SME Performance Review 2022/2023," Luxemburg, 2023. Accessed: Jun. 5 2024. [Online]. Available: https://single-market-economy.ec.europa.eu/system/files/2023-08/Annual%20Report%20on%20European%20SMEs%202023_FINAL.pdf
- [18] Statistisches Bundesamt, *Anzahl der Unternehmen in Deutschland nach Unternehmensgröße im Jahr 2021*. [Online]. Available: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/731859/umfrage/unternehmen-in-deutschland-nach-unternehmensgroesse/> (accessed: Jun. 5 2024).
- [19] Statistisches Bundesamt, *Kleine und mittlere Unternehmen*. [Online]. Available: https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Unternehmen/Kleine-Unternehmen-Mittlere-Unternehmen/_inhalt.html (accessed: Jun. 5 2024).
- [20] *KMU nach Wirtschaftszweigen*. [Online]. Available: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/731975/umfrage/anzahl-der-kmu-in-deutschland-nach-wirtschaftszweigen/> (accessed: Jun. 5 2024).
- [21] Institut für Mittelstandsforschung Bonn (IfM), *Branchenstruktur der Unternehmen: Branchenstruktur der Unternehmen nach Unternehmensanzahl in 2021 in Deutschland laut Unternehmensregister*. [Online]. Available: https://www.ifm-bonn.org/fileadmin/data/redaktion/statistik/mittelstand_im_einzelnen/dokumente/Unt_2021_D_BR-STR.pdf (accessed: Jun. 5 2024).
- [22] Institut für Mittelstandsforschung Bonn (IfM), *Mittelstandsdefinition des IfM Bonn*. [Online]. Available: <https://www.ifm-bonn.org/definitionen/mittelstandsdefinition-des-ifm-bonn> (accessed: Jun. 5 2024).
- [23] Institut für Mittelstandsforschung Bonn (IfM), *Definitionen*. [Online]. Available: <https://www.ifm-bonn.org/definition> (accessed: Jun. 5 2024).
- [24] M. Hörner *et al.*, "Forschungsdatenbank Nichtwohngebäude. Repräsentative Primärdatenerhebung zur statistisch validen Erfassung und Auswertung der Struktur und der energetischen Qualität des Nichtwohngebäudebestands in Deutschland.," 2022. Accessed: Jun. 5 2024. [Online]. Available: https://www.iwu.de/fileadmin/publikationen/gebaeudebestand/2022_IWU_Hoerner-EtAl_ENOBdataNWG-Schlussbericht-Primaerdatenerhebung-Nichtwohngebaeude-Deutschland.pdf
- [25] C. Kluge *et al.*, "Studie Fit für 2045: Zielparameter für Nichtwohngebäude im Bestand: Wie viel Energie dürfen Rathäuser, Schulen und Kitas nach einer Sanierung noch verbrauchen?," 2023. Accessed: Jun. 5 2024. [Online]. Available: <https://www.dena.de/newsroom/publikationsdetailansicht/pub/studie-fit-fuer-2045-zielparameter-fuer-nichtwohngebaeude-im-bestand/>

- [26] Bauministerkonferenz, Ed., "Bauwerkszuordnungskatalog," 2010. Accessed: Jun. 5 2024. [Online]. Available: <https://www.bauministerkonferenz.de/Dokumente/42314086.pdf>
- [27] Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), Ed., "Dena-Gebäudereport Kompakt 2019: Statistiken und Analysen zur Energieeffizienz im Gebäudebestand," 2019. Accessed: Jun. 6 2024. [Online]. Available: https://www.bayika.de/bayika-wAssets/docs/aktuelles/2019/2019-11-15_dena-Gebaeudereport-kompakt-2019.pdf
- [28] R. Henger, P. Deschermeier, M. Hude, B. Seipelt, and Voigtländer, "Energieeffizienz bei Büroimmobilien: dena-Analyse über den Gebäudebestand und seine energetische Situation," März 2016. Accessed: Jun. 5 2024. [Online]. Available: <https://www.iwkoeln.de/fileadmin/publikationen/2016/282678/dena-Analyse-Bueroimmobilien.pdf>
- [29] *Verordnung zur Sicherung der Energieversorgung über kurzfristig wirksame Maßnahmen*, 2022. Accessed: Jun. 6 2024. [Online]. Available: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/E/ensikumav.pdf?__blob=publicationFile&v=1
- [30] Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), Ed., "Dena Gebäudereport 2024: Zahlen, Daten, Fakten zum Klimaschutz im Gebäudebestand," 2024. Accessed: Jun. 5 2024. [Online]. Available: <https://www.dena.de/newsroom/publikationsdetailansicht/pub/dena-gebaudereport-2024/>
- [31] *KfW Research: Deutscher Mittelstand hat Energiepreisschwankungen bisher gut verkraftet*. [Online]. Available: https://www.kfw.de/%C3%9Cber-die-KfW/Newsroom/Aktuelles/Pressemitteilungen-Details_781184.html (accessed: Jun. 5 2024).
- [32] Umweltbundesamt, *Endenergieverbrauch nach Energieträgern und Sektoren*. [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/energieverbrauch-nach-energetraegern-sektoren#entwicklung-des-endenergieverbrauchs-nach-sektoren-und-energetragern> (accessed: Jun. 7 2024).
- [33] BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., *Verteilung des Stromverbrauchs in Deutschland nach Verbrauchergruppen in den Jahren 2013 und 2023*. [Online]. Available: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/236757/umfrage/stromverbrauch-nach-sektoren-in-deutschland/> (accessed: Jun. 7 2024).
- [34] AGEBA AG Energiebilanzen e.V., Ed., "Anwendungsbilanzen zur Energiebilanz Deutschland: Endenergieverbrauch nach Energieträgern und Anwendungszwecken," 2023. Accessed: Jun. 7 2024. [Online]. Available: https://ag-energiebilanzen.de/wp-content/uploads/2023/01/AGEB_22p2_rev-1.pdf
- [35] U. Bigalke, A. Armbruster, F. Lukas, O. Krieger, C. Schuch, and J. Kunde, "dena-Gebäudereport: Statistiken und Analysen zur Energieeffizienz im Gebäudebestand," 2016.
- [36] Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), Ed., "dena-Analyse Insight Büroimmobilien: Marktsituation und Ausblick für klimafreundliche Bürogebäude," 2018.
- [37] Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), Ed., "dena-Gebäudereport kompakt 2018: Statistiken und Analysen zur Energieeffizienz im Gebäudebestand," 2018. Accessed: Jun. 7 2024. [Online]. Available: https://www.kea-bw.de/fileadmin/user_upload/Kommunaler_Klimaschutz/Wissensportal/Bauen_und_Sanieren/dena_Gebaeudereport_kompakt_2018.pdf
- [38] ASEW GbR, Ed., "Ihre Energie Effizient eingesetzt: Informationen für Büros und Verwaltungen," Accessed: Jun. 7 2024. [Online]. Available: https://www.proklima-hannover.de/downloads/unternehmen/Gewerbebroschueren/GewerbeInfos_Bueros_Verwaltung.pdf

- [39] Umweltbundesamt, *Energieeinsparpotenziale*. [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/energiesparen/energieeinsparpotenziale> (accessed: Jun. 7 2024).
- [40] E.ON Deutschland GmbH, Ed., "Ratgeber Effiziente Energienutzungen in Unternehmen," 2021. Accessed: Jun. 7 2024. [Online]. Available: <https://www.eon.de/content/dam/eon/eon-de-zwei/documents/Geschaeftskunden/whitepaper/energieeffizienz/eon-whitepaper-energieeffizienz-im-unternehmen.pdf>
- [41] E. Grewenig and M. Schwartz, "Weitere Energieeinsparungen für viele kleine Unternehmen aktuell mit Herausforderungen verbunden - bei einem Drittel Energieeinsparmaßnahmen geplant," 2023. Accessed: Jun. 7 2024. [Online]. Available: <https://www.kfw.de/PDF/Download-Center/Konzernthemen/Research/PDF-Dokumente-Fokus-Volkswirtschaft/Fokus-2023/Fokus-Nr.-439-September-2023-Energieeinsparmaßnahmen.pdf>
- [42] Martin Pehnt, *Energieeffizienz: Ein Lehr- und Handbuch*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2010.
- [43] Evelyn Mecklenburg, "Energiemanagement nach DIN EN ISO 50001 für Wasserversorger: Energieeffizienz steigern, Energiekosten senken und Steuervorteile nutzen mit einem Energiemanagementsystem," 2016.
- [44] A. Barckhausen, J. Becker, P. Malodobry, N. Harfst, and U. Nissen, "Energiemanagementsysteme in der Praxis: Vom Energieaudit zum Managementsystem nach ISO 50001: Leitfaden für Unternehmen und Organisationen," 2020. Accessed: Feb. 20 2024. [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/energiemanagementsysteme-in-praxis>
- [45] Energieagentur Rheinland-Pfalz, Ed., "Faktenpapier: Lastmanagement im Unternehmen," 2015. Accessed: Jun. 1 2024. [Online]. Available: https://www.energieagentur.rlp.de/fileadmin/user_upload/Faktenpapier_Lastmanagement_im_Unternehmen_20150209.pdf
- [46] *Gesetz über Energiedienstleistungen und anderen Energieeffizienzmaßnahmen (EDL-G)*, 2010. Accessed: Jun. 1 2024. [Online]. Available: <https://www.gesetze-im-internet.de/edl-g/EDL-G.pdf>
- [47] Industrie- und Handelskammer Lippe zu Detmold, *Energie- und Stromsteuer-Ermäßigungen für das produzierende Gewerbe*. [Online]. Available: <https://www.ihk.de/lippe-detmold/service/navigation/ihk-service/ihk-merkblaetter2/innovation-und-umwelt/ihk-merkblatt-energie-und-stromsteuer-4850388> (accessed: Jun. 1 2024).
- [48] T. Langrock, St. Brühl, A. Michels, A. El-Bahay, J. Litzenburger, and J. Schindler, "Lastmanagement in Nordrhein-Westfalen: Potenzial, Hemmnisse, Handlungsoptionen," 2016. Accessed: Jun. 1 2024. [Online]. Available: https://www.bet-energie.de/fileadmin/redaktion/PDF/Studien_und_Gutachten/Lastenmanagement-NRW.pdf
- [49] S. Sass *et al.*, "Model compendium, data, and optimization benchmarks for sector-coupled energy systems," *Computers & Chemical Engineering*, vol. 135, p. 106760, 2020, doi: 10.1016/j.compchemeng.2020.106760.
- [50] *Richtlinie (EU) 2023/1791 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 13. September 2023 zur Energieeffizienz und zur Änderung der Verordnung (EU) 2023/955 (Neufassung)*, 2023. Accessed: May 6 2024. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32023L1791>

- [51] Bundesstelle für Energieeffizienz, *Europäische Energieeffizienzpolitik*. [Online]. Available: <https://www.bfee-online.de/BfEE/DE/Effizienzpolitik/EuropaeischeEnergieeffizienzpolitik/europaeischeenergieeffizienzpolitik.html#:~:text=Die%20Novellierung%20der%20Energieeffizienz%2DRichtlinie,2007%20modelliert%20wurde%2C%20reduziert%20wird.> (accessed: Jun. 1 2024).
- [52] Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle, Ed., "Merkblatt für das Energieeffizienzgesetz (EnEfG)," 2024. Accessed: Jun. 1 2024. [Online]. Available: https://www.bafa.de/SharedDocs/Downloads/DE/Energie/ea_merkblatt_energieeffizienzgesetz.pdf?__blob=publicationFile&v=4
- [53] Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle, Ed., "Merkblatt zu §8ff EDL-G und §8-10 EnEfG," 2024. Accessed: Jun. 1 2024. [Online]. Available: https://www.bafa.de/SharedDocs/Downloads/DE/Energie/ea_faq.pdf?__blob=publicationFile&v=6
- [54] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz BMWK, *Kabinett beschließt Novelle des Energiedienstleistungsgesetzes: Unternehmen werden durch Entbürokratisierung entlastet*. [Online]. Available: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2024/05/20240523-novelle-des-energiedienstleistungsgesetzes.html> (accessed: Jun. 3 2024).
- [55] Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), Ed., "Leitfaden Energetische Gebäudebilanzierung nach DIN V 18599," 2023. Accessed: Jun. 3 2024. [Online]. Available: https://www.umgis.de/fileadmin/downloads/Leitfaeden_KWP/DENA/LEITFADEN_ENERGETISCHE_GEBAEUDEBILANZIERUNG_NACH_DIN_V_18599.pdf
- [56] Öko-Zentrum NRW GmbH, *Neue EU-Gebäuderichtlinie*. [Online]. Available: <https://oekozentrum.nrw/aktuelles/detail/news/neue-eu-gebaeuderichtlinie/#:~:text=Die%20Neufassung%20der%20EU%2DGeb%C3%A4uderichtlinie,in%20nationales%20Recht%20%C3%BCberf%C3%BChrt%20werden.> (accessed: Jun. 3 2024).
- [57] *DIN EN 16247-1 Energieaudits - Teil 1: Allgemeine Anforderungen*, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2022.
- [58] Ingenieurbüro für Energiewirtschaft, *Energieaudit DIN EN 16247-1: Prüfung KMU-Status und Auditpflicht*. [Online]. Available: <https://ifegmbh.de/dienstleistungen-energie-consult/energieaudit-din-en-16247-1/> (accessed: Jun. 2 2024).
- [59] Till Holmes, *Umsetzung eines qualifizierten Energieaudits in der Praxis*. Interview mit Till Holmes durchgeführt von René Etz Korn am 08.10.2022. Dorweiler.
- [60] *VDI 4602 Energiemanagement Grundlagen*, VDI - Verein Deutscher Ingenieure. [Online]. Available: <https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdi-4602-blatt-1-energiemanagement-grundlagen>
- [61] Umweltbundesamt, *ISO 50005: Energiemanagementsysteme: Leitlinien für eine stufenweise Einführung*. [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.de/energiemanagementsysteme-iso-50005?listpart=0#articlelist> (accessed: Jun. 2 2024).
- [62] *DIN V 18599 Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung: Teil 1: Allgemeine Bilanzierungsverfahren, Begriffe, Zonierung und Bewertung der Energieträger*, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Sep. 2018.
- [63] *VDI 3807 Verbrauchskennwerte für Gebäude: Blatt 1: Grundlagen*, VDI - Verein Deutscher Ingenieure, Jun. 2013.

- [64] M. Steininger, "Energieoptimierung in Bestandsimmobilien durch Energiemonitoring und Optimierungsmaßnahmen am Beispiel eines Bürogebäudes," Masterarbeit, Universität für Bodenkultur Wien, 2016. Accessed: Jun. 2 2024. [Online]. Available: <https://epub.boku.ac.at/obvbkhs/content/titleinfo/1936045>
- [65] *VDI 3807 Verbrauchskennwerte für Gebäude: Blatt 2: Verbrauchskennwerte für Heizenergie, Strom und Wasser*, VDI - Verein Deutscher Ingenieure, Nov. 2014.
- [66] *VDI 3807 Verbrauchskennwerte von Gebäuden: Blatt 4: Teilkennwerte elektrische Energie*, VDI - Verein Deutscher Ingenieure, Aug. 2008.
- [67] H. Shamon *et al.*, *Smart Energy in Haushalten: Technologien, Geschäftsmodelle, Akzeptanz und Wirtschaftlichkeit*. Jülich: Forschungszentrum Jülich GmbH Zentralbibliothek Verlag, 2021. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/2128/28546>
- [68] L. Hilger, T. Schneiders, and R. Etkorn, "Technologie-Screening "Smarte Technologien für Unternehmen", " Technologie-Screening Forschungsprojekt VISE-Smarte Technologien für Unternehmen, Virtuelles Institut Smart Energy, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.57683/EPUB-1975>
- [69] *Directive 2009/72/EC of the European Parliament and of the Council of 13 July 2009 concerning common rules for the internal market in electricity and repealing Directive 2003/54/EC*, 2009. Accessed: May 30 2024. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:211:0055:0093:en:PDF>
- [70] P. Koponen *et al.*, "Definition of Smart Metering and Applications and Identification of Benefits: Technical Report," 2007. Accessed: May 30 2024. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/235709839_Definition_of_Smart_Metering_and_Applications_and_Identification_of_Benefits
- [71] Landis & Gyr, Ed., "manage energy better together," 2021. Accessed: May 30 2024. [Online]. Available: <https://www.landisgyr.com/webfoo/wp-content/uploads/2021/01/20210127-Capital-Markets-Day-2021-Presentation.pdf>
- [72] ACER - European Union Agency for the Cooperation of Energy Regulators, Ed., "Annual Report on the Results of Monitoring the Internal Electricity and Natural Gas Markets in 2021: Energy Retail and Consumer Protection Volume," 2022. Accessed: Jun. 23 2024. [Online]. Available: https://www.acer.europa.eu/sites/default/files/documents/Publications/MMR_2021_Energy_Retail_Consumer_Protection_Volume.pdf
- [73] S. Sylla, "Smart Meter Rollout in Deutschland und Europa," 2023. Accessed: May 31 2024. [Online]. Available: https://www.ffe.de/wp-content/uploads/2023/02/iMSys_Aktualisierung_01-2023.pdf
- [74] M. McCulloch and D. Graeber, "Netzorientierte Steuerung und ihre Rolle in der Energiewende: Eine Analyse des §14a EnWG," *Energiewirtschaftliche Tagesfragen*, vol. 74, 5-6, pp. 10–16, 2024.
- [75] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz BMWK, Ed., "Smart Meter: Intelligente Messsysteme für die Energiewende: Infografik Gesetzlicher Smart-Meter-Rolloutfahrplan," 2023. Accessed: May 31 2024. [Online]. Available: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/I/Infografiken/infografik-smart-meter-rolloutfahrplan.pdf?__blob=publication-File&v=5

- [76] J. Bränzel, D. Engelmann, M. Geilhausen, and O. Schulze, *Energiemanagement*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019.
- [77] M. Dehli, *Energieeffizienz in Industrie, Dienstleistung und Gewerbe*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2020.
- [78] J. Hesselbach, *Energie- und klimaeffiziente Produktion: Grundlagen, Leitlinien und Praxisbeispiele*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2012.
- [79] BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., *BDEW-Strompreisanalyse Juli 2023: Strompreis in der Industrie*. [Online]. Available: https://www.bdew.de/media/documents/230724_BDEW-Strompreisanalyse_Juli_2023_24.07.2023.pdf (accessed: Aug. 15 2023).
- [80] J. Meyer, M. Madsen, and L. Saars, "Kurzstudie Energieeffizienzmaßnahmen in der Industrie: Marktnahe und wirtschaftliche Energieeinsparpotenziale in der Industrie," Krefeld, 2023. Accessed: Aug. 15 2023. [Online]. Available: <https://deneff.org/wp-content/uploads/2023/04/HSNR-Kurzstudie-EnEffPotenziale-Industrie-2023-03-31.pdf>
- [81] IEC and OECD, Ed., "Policy Pathway - Accelerating Energy Efficiency in Small and Medium-sized Enterprises," Paris, 2015. Accessed: Aug. 17 2023. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/policy-pathway-accelerating-energy-efficiency-in-small-and-medium-sized-enterprises-2015>
- [82] European Commission, Ed., "2021 SME Country Fact Sheet European Union," 2021. Accessed: Aug. 17 2023. [Online]. Available: <https://ec.europa.eu/docsroom/documents/46060>
- [83] 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.
- [84] *EED 2012/27/EU*, 2012.
- [85] P. Thollander, S. Backlund, A. Trianni, and E. Cagno, "Beyond barriers – A case study on driving forces for improved energy efficiency in the foundry industries in Finland, France, Germany, Italy, Poland, Spain, and Sweden," *Applied Energy*, vol. 111, pp. 636–643, 2013, doi: 10.1016/j.apenergy.2013.05.036.
- [86] P. ROHDIN and P. THOLLANDER, "Barriers to and driving forces for energy efficiency in the non-energy intensive manufacturing industry in Sweden," *Energy*, vol. 31, no. 12, pp. 1836–1844, 2006, doi: 10.1016/j.energy.2005.10.010.
- [87] A. Trianni and E. Cagno, "Dealing with barriers to energy efficiency and SMEs: Some empirical evidences," *Energy*, vol. 37, no. 1, pp. 494–504, 2012, doi: 10.1016/j.energy.2011.11.005.
- [88] 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.
- [89] A. Mickovic and M. Wouters, "Energy costs information in manufacturing companies: A systematic literature review," *Journal of Cleaner Production*, vol. 254, p. 119927, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.119927.
- [90] K. Mattes and A. e. a. Jäger, "Energieeffizienz im Betriebsalltag: Chancen durch Energiemanagement und Qualifikation," 2017.
- [91] P. Warren, "The Potential of Smart Technologies and Micro-Generation in UK SMEs," School of Public Policy, University of London, 2017.

- [92] L. Hilger, F. Große-Kreul, C. Feldhaus, and T. Schneiders, "Digitally driven energy management practices in SMEs – exploring potentials and barriers," *Die Unternehmung - Swiss Journal of Business Research and Practice*, vol. 76, no. 3, pp. 360–380, 2022, doi: 10.5771/0042-059X-2022-3-360.
- [93] T. Schubert, B. Breitschopf, and P. Plötz, "Energy efficiency and the direct and indirect effects of energy audits and implementation support programmes in Germany," *Energy Policy*, vol. 157, p. 112486, 2021, doi: 10.1016/j.enpol.2021.112486.
- [94] F. Kalantzis and D. Revoltella, "EIB Working Paper 2019 / 02 - How energy audits promote SMEs' energy efficiency investment," 2019. Accessed: May 12 2024. [Online]. Available: <https://www.eib.org/en/publications/economics-working-paper-2019-02#:~:text=Energy%20audits%20are%20a%20useful,as%20lighting%2C%20wall%20insulation%20etc.>
- [95] T. Fleiter, J. Schleich, and P. Ravivanpong, "Adoption of energy-efficiency measures in SMEs—An empirical analysis based on energy audit data from Germany," *Energy Policy*, vol. 51, pp. 863–875, 2012, doi: 10.1016/j.enpol.2012.09.041.
- [96] 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).
- [97] M. Grafe, M. Hörner, C. Jedek, and B. Bagherian, "Entwicklung, Erprobung und Einführung einer differenzierten Verbrauchsstrukturanalyse für bestehende Nichtwohngebäude," 2014. Accessed: May 6 2024. [Online]. Available: https://www.iwu.de/fileadmin/publikationen/energie/2014_IWU_GrafeEtAl_Differenzierte-Verbrauchsstrukturanalyse-für-bestehende-Nichtwohngebäude.pdf
- [98] D. Jacob, "Teilenergiekennwerte bei Nichtwohngebäuden - Leitfaden zur Hochrechnung von Kurzzeitmessungen," 2010. Accessed: May 13 2024. [Online]. Available: <https://www.iwu.de/forschung/energie/teilenergiekennwerte-von-nicht-wohngebäuden/>
- [99] 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.
- [100] 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.
- [101] K. Carrie Armel, A. Gupta, G. Shrimali, and A. Albert, "Is disaggregation the holy grail of energy efficiency? The case of electricity," *Energy Policy*, vol. 52, pp. 213–234, 2013, doi: 10.1016/j.enpol.2012.08.062.
- [102] S. Taugerbeck, *Mobiler Messkoffer zur dynamischen Erfassung von Stromverbrauchsdaten*. [Online]. Available: <https://www.digital-energy.nrw/> (accessed: May 11 2024).
- [103] M. Hörner, B. Bagherian, and C. Jedek, "Teilenergiekennwerte von Nichtwohngebäuden (TEK) - Querschnittsanalyse der Ergebnisse der Feldphase," Institut für Wohnen und Umwelt GmbH (IWU), 2014. Accessed: May 11 2024. [Online]. Available: http://www.iwu.de/fileadmin/user_upload/dateien/energie/tektool/IWU_TEK-QSA-Bericht.pdf
- [104] Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle, Ed., "Leitfaden zur Erstellung von Energieauditberichten nach den Vorgaben der DIN EN 16247-1 und den Festlegungen des Bundesamtes für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA)," 2020. Accessed: May 11 2024. [Online].

- Available: https://www.bafa.de/DE/Energie/Energieberatung/Energieaudit/energieaudit_node.html
- [105] M. Ondrusch and A. Kraushaar, "Leitfaden zur energetischen Analyse von Produktionsprozessen für Druckprodukten und Maßnahmenkatalog zur Optimierung bestehender Prozessstrukturen," 2014.
- [106] *VDI 3922: Energieberatung - Energieberatungsprozess und -methoden*, 2021.
- [107] M. Kleber, "Leitfaden Lastgangmessung," 2019.
- [108] M. Helfert and P. Schraml, "Leitfaden: Monitoring von Energieeffizienzmaßnahmen," ETA-Solutions Energiesystemplanung, 2021. Accessed: Apr. 22 2024. [Online]. Available: https://www.ptw.tu-darmstadt.de/media/fachgebietptw/dokumente_3/wissenssammlung_ptw/leitfaeden_2/Leitfaden_Energiemonitoring.pdf
- [109] H. Li, Z. Wang, T. Hong, A. Parker, and M. Neukomm, "Characterizing patterns and variability of building electric load profiles in time and frequency domains," *Applied Energy*, vol. 291, p. 116721, 2021, doi: 10.1016/j.apenergy.2021.116721.
- [110] H. Teiwes, S. Blume, C. Herrmann, M. Rössinger, and S. Thiede, "Energy Load Profile Analysis on Machine Level," *Procedia CIRP*, vol. 69, pp. 271–276, 2018, doi: 10.1016/j.procir.2017.11.073.
- [111] C. Liebl, R. S. Popp, and M. F. Zaeh, "Approach for a Systematic Energy Data Generation and Evaluation," *Procedia CIRP*, vol. 67, pp. 63–68, 2018, doi: 10.1016/j.procir.2017.12.177.
- [112] S. Henning, W. Hasselbring, H. Burmester, A. Möbius, and M. Wojcieszak, "Goals and Measures for Analyzing Power Consumption Data in Manufacturing Enterprises," *J. of Data, Inf. and Manag.*, vol. 3, no. 1, pp. 65–82, 2021, doi: 10.1007/s42488-021-00043-5.
- [113] P. Dehning, S. Blume, A. Dér, D. Flick, C. Herrmann, and S. Thiede, "Load profile analysis for reducing energy demands of production systems in non-production times," *Applied Energy*, vol. 237, pp. 117–130, 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.01.047.
- [114] A. M. Gontarz, D. Hampl, L. Weiss, and K. Wegener, "Resource Consumption Monitoring in Manufacturing Environments," *Procedia CIRP*, vol. 26, pp. 264–269, 2015, doi: 10.1016/j.procir.2014.07.098.
- [115] D. Egarter and W. Elmenreich, "Autonomous load disaggregation approach based on active power measurements," in *IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communication Workshops (PerCom Workshops)*, pp. 293–298. Accessed: Aug. 17 2023. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7134051>
- [116] L. Hattam and D. V. Greetham, "Energy Disaggregation for SMEs using Recurrence Quantification Analysis," in *Proceedings of the Ninth International Conference on Future Energy Systems*, Karlsruhe Germany, 2018, pp. 610–617.
- [117] E. Cagno, E. Worrell, A. Trianni, and G. Pugliese, "A novel approach for barriers to industrial energy efficiency," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 19, pp. 290–308, 2013, doi: 10.1016/j.rser.2012.11.007.
- [118] L. Hilger and T. Schneiders, "Systematische Energiedatenerfassung und -auswertung in KMU-Betrieben durch den Einsatz mobiler Messtechnik," 2020. Accessed: Apr. 22 2024. [Online]. Available: https://www.tugraz.at/fileadmin/user_upload/tugrazExternal/4778f047-2e50-4e9e-b72d-e5af373f95a4/files/lf/Session_F6/661_LF_Hilger.pdf

- [119] M. Pauli, "manageE mE 180 Benutzerhandbuch V1.2.10," 2018. Accessed: Mar. 3 2024. [Online]. Available: https://www.managee.de/wp-content/uploads/2016/05/manageE-mE-180-Benutzerhandbuch_V1.2.10.pdf
- [120] J. Paetzold, "Messung elektrischer Energie - Grundlagen und Erfahrungen," 2013. Accessed: Mar. 4 2024. [Online]. Available: <https://monarch.qucosa.de/api/qucosa%3A19870/attachment/ATT-5/>
- [121] Phoenix Contact, *Phoenix Contact Produktdatenblatt PACT RCP-4000A-1A-DI90-10M - Stromwandler*. [Online]. Available: https://www.phoenixcontact.com/product/pdf/api/v1/MjkwNDkyMw?_realm=de&_locale=de-DE&blocks=commercial-data%2Ctechnical-data%2Capprovals%2Cclassifications%2Cenvironmental-compliance-data%2Call-accessories (accessed: Mar. 3 2024).
- [122] ELEQ, *Produktdatenblatt ELEQ TQ30 Teilbare Stromwandler*. [Online]. Available: https://www.eleq.com/document/eleq_tq30_de.pdf (accessed: Mar. 3 2024).
- [123] H. Bumiller and K. Tkotz, *Fachkunde Elektrotechnik: bearbeitet von Lehrern an beruflichen Schulen und von Ingenieuren*, 29th ed. Vollmer: Haan-Gruiten: Verl. Europa-Lehrmittel Nourney, 2014.
- [124] R. Fischer, *Elektrotechnik für Maschinenbauer*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016.
- [125] M. Pauli, "Systematische Messdatenerfassung beim Energieaudit mit einer mobilen Messzeit," 2015. Accessed: Mar. 3 2024. [Online]. Available: <https://www.managee.de/wp-content/uploads/2015/10/07004-2.pdf>
- [126] K. Schon, *Hochspannungsmesstechnik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016.
- [127] P. W. Gräber, "Messfehler," *Automatisierungstechnik in der Wasserwirtschaft*, 2009. Accessed: Mar. 3 2024. [Online]. Available: <https://tu-dresden.de/bu/umwelt/hydro/iak/ressourcen/dateien/systemanalyse/studium/folder-2009-01-29-lehre/folder-2009-04-07-gwmt/Kap5.pdf?lang=de>
- [128] Janitza electronics GmbH, *Die richtige Auswahl von Stromwandlern*. [Online]. Available: <https://www.janitza.de/service-support/auswahl-von-stromwandlern.html> (accessed: Mar. 3 2024).
- [129] ELEQ, Ed., "Produktdatenblatt ELEQ TQ50 Teilbare Stromwandler," Accessed: Mar. 3 2024. [Online]. Available: https://www.eleq.com/document/eleq_tq50_de.pdf
- [130] Klawitter, Tim - Phoenix Contact Deutschland GmbH, "Messgenauigkeit Rogowski-Spule PACT RCP 4.000A/1A", E-Mail, Mar. 2024.
- [131] Smart Cost, Ed., "Produktdatenblatt Energomonitor Powersense," 2016. Accessed: Mar. 3 2024. [Online]. Available: https://shop.smart-cost.com/wp-content/uploads/2018/04/Energomonitor_Powersense__product-sheet2016.pdf
- [132] Smart Cost, Ed., "Energomonitor Homebase (Energie-Datenlogger)," 2024. Accessed: Mar. 3 2024. [Online]. Available: <https://shop.smart-cost.com/?product=energomonitor-homebase-datenlogger>
- [133] Smart Cost, Ed., "Energomonitor Katalog," 2019. Accessed: Mar. 3 2024. [Online]. Available: <https://smart-cost.com/wp-content/uploads/2020/01/Energomonitor-Katalog-2019.pdf>
- [134] ENIT Energy IT Systems GmbH, Ed., "Messen und Zählen im Energiemanagement: E-Book," 2021.

- [135] Dr. Rudi Eder, *The Second Step Towards Climate Neutrality - Energy Efficiency*. [Online]. Available: <https://www.consenzum.de/der-zweite-schritt-zur-klimaneutralitaet-energieeffizienz/> (accessed: Aug. 19 2023).
- [136] R. Marenbach, J. Jäger, and D. Nelles, *Elektrische Energietechnik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2020.
- [137] Wolfgang Schellong, *Analyse und Optimierung von Energieverbundsystemen*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016.
- [138] SinoVoltaics Group Limited, *Base Load an Peak Load: understanding both concepts*. [Online]. Available: <https://sinovoltaics.com/learning-center/basics/base-load-peak-load/#:~:text=Base%20load%20is%20the%20minimum,also%20referred%20as%20continuous%20load>. (accessed: Jan. 17 2024).
- [139] H.-F. Eckey, R. Kosfeld, and M. Türck, *Deskriptive Statistik: Grundlagen - Methoden - Beispiele*, 4th ed.: Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr. Th. Gabler/GWV Fachverlage GmbH, 2005.
- [140] P. Price, "Methods for Analyzing Electric Load Shape and its Variability," 2010. Accessed: Jan. 17 2024. [Online]. Available: <https://eta-publications.lbl.gov/sites/default/files/LBNL-3713E.pdf>
- [141] G. Benke, "Das Geheimnis des Lastgangs," in *EnInnov 2014 Tagungsband*. [Online]. Available: https://www.tugraz.at/fileadmin/user_upload/Events/Eninnov2014/files/lf/LF_Benke.pdf
- [142] P. von der Lippe, *Deskriptive Statistik*: De Gruyter, 2002.
- [143] 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. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7742034>
- [144] H. Karin, "Energetische Bewertung," Austrian Energy Agency, 2020. Accessed: Jan. 13 2024. [Online]. Available: https://www.energymanagement.at/fileadmin/elearning/Barrierefreie_Documente_0820/01_Energetische_Bewertung.pdf
- [145] C. Vogel, M. Eggemann, V. Barta, S. Uhrig, and S. Schramm, "Identifizierung von Optimierungspotenzialen in elektrischen Energiesystemen anhand von Last- und Erzeugungsprofilen," in *Technische Universität Graz (Hg.) 2020 – Tagungsband EnInnov2020*. Accessed: Sep. 3 2023. [Online]. Available: <https://www.tugraz.at/events/eninnov2020/nachlese/download-beitraege/stream-f#c279490>
- [146] *DIN EN 16798-3 Energetische Bewertung von Gebäuden - Lüftung von Gebäuden: Teil : Lüftung von Nichtwohngebäuden - Leistungsanforderungen an Lüftungs- und Klimaanlage und Raumkühlsysteme*, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Dec. 2022.
- [147] K. Kulterer and O. Mair, "Leitfaden für Energieaudits in Kältesystemen," Wien, 2015. Accessed: Feb. 28 2024. [Online]. Available: <https://www.klimaaktiv.at/dam/jcr:9e65273f-ec85-4aa7-9623-aa108c5a35ab/Kälteleitfaden.pdf>
- [148] C. Müller, "Leistungszahlen für Kälte-, Klima- und Wärmepumpensysteme," *VSSH Fachzeitschrift Friscaldo*, Ausgabe 1-2008, 2008. [Online]. Available: <https://www.reftec.ch/downloads/Leistungszahlen.pdf>

- [149] F. C. Melo, G. Da Carrilho Graça, and M. J. Oliveira Panão, "A review of annual, monthly, and hourly electricity use in buildings," *Energy and Buildings*, vol. 293, p. 113201, 2023, doi: 10.1016/j.enbuild.2023.113201.
- [150] Institut für Wohnen und Umwelt GmbH (IWU), Ed., "Teilenergiekennwerte - Neue Wege in der Energieanalyse von Nichtwohngebäuden im Bestand," 2014. Accessed: May 6 2024. [Online]. Available: https://www.iwu.de/fileadmin/publikationen/energie/tektool/2014_IWU_HörnerEtAl_Teilenergiekennwerte-Neue-Wege-in-der-Energieanalyse-von-Nichtwohngebäuden-im-Bestand.pdf
- [151] Ulrich Surrey, Horst Ramm, Henning Rehe, and Peter Reise, "Planungsvorgabe Zählerstruktur im BLB NRW und Technischer Anhang," 2015. Accessed: Apr. 26 2024. [Online]. Available: https://www.blb.nrw.de/fileadmin/Home/Service/Service_fuer_Auftragnehmer/Standards_Erlasse_Regelungen/Runderlasse_Regelungen_Planungsvorgabe/TGA_und_Gebaeudebetrieb/planungsvorgabe-zaehlerstruktur.pdf
- [152] *DIN EN ISO 50005: Energiemanagementsysteme - Leitfaden für eine phasenweise Umsetzung (ISO 50005:2021)*, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2022.
- [153] L. Hilger *et al.*, "Energy efficiency analysis and benchmark in grocery stores: Results of a short-term sub-metering measurement campaign," in *15th SDEWES Conference Cologne 2020*.

Anhang

- Methodik Messkonzept
- Methodik Analysekonzept
- Ergänzende Unterlagen Fallbeispiel Gerichtsgebäude
- Ergänzende Unterlagen Fallbeispiel Polizeipräsidium
- Ergänzende Unterlagen Fallbeispiel Metallv. Betrieb (Standort A)
- Ergänzende Unterlagen Fallbeispiel Metallv. Betrieb (Standort B)
- Ergänzende Unterlagen Fallbeispiel Lüftungsanlage
- Ergänzende Unterlagen Fallbeispiel Kälteanlage

Methodik Messkonzept

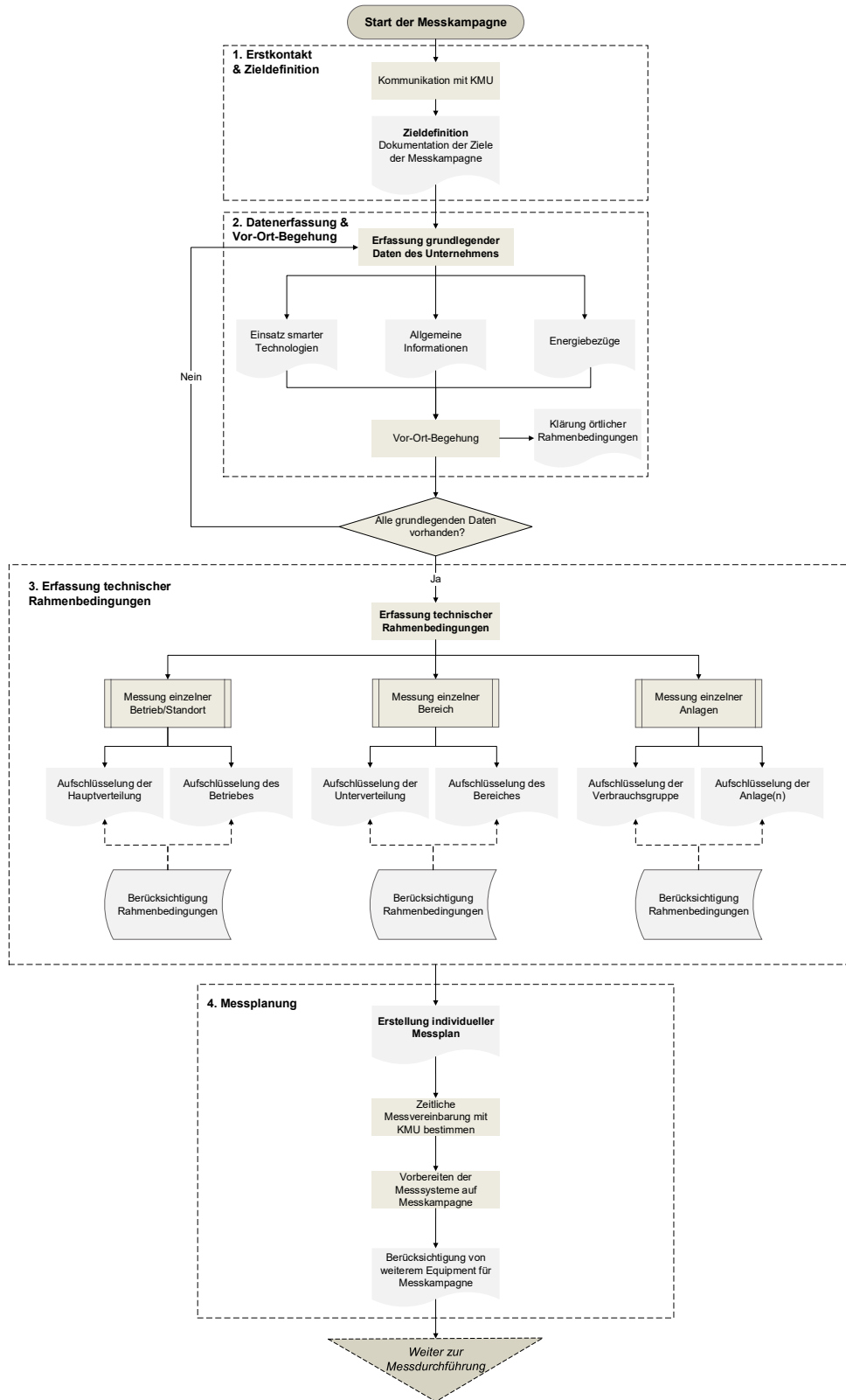


Abbildung A 1: Methodik und Arbeitsschritte zum Abschnitt *Messvorbereitung*

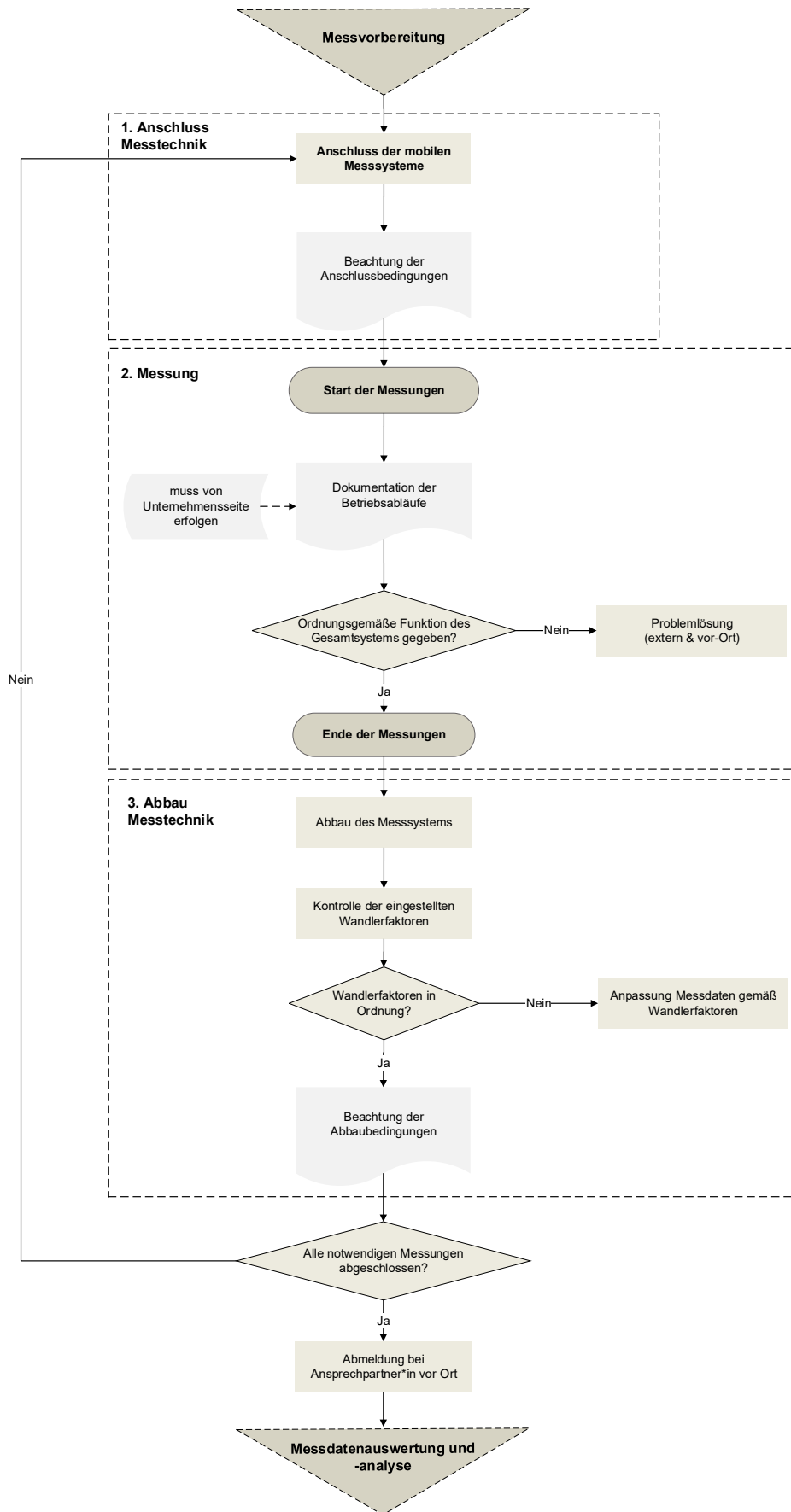


Abbildung A 2: Methodik und Arbeitsschritte zum Abschnitt *Messdurchführung*

Methodik Analysekonzept

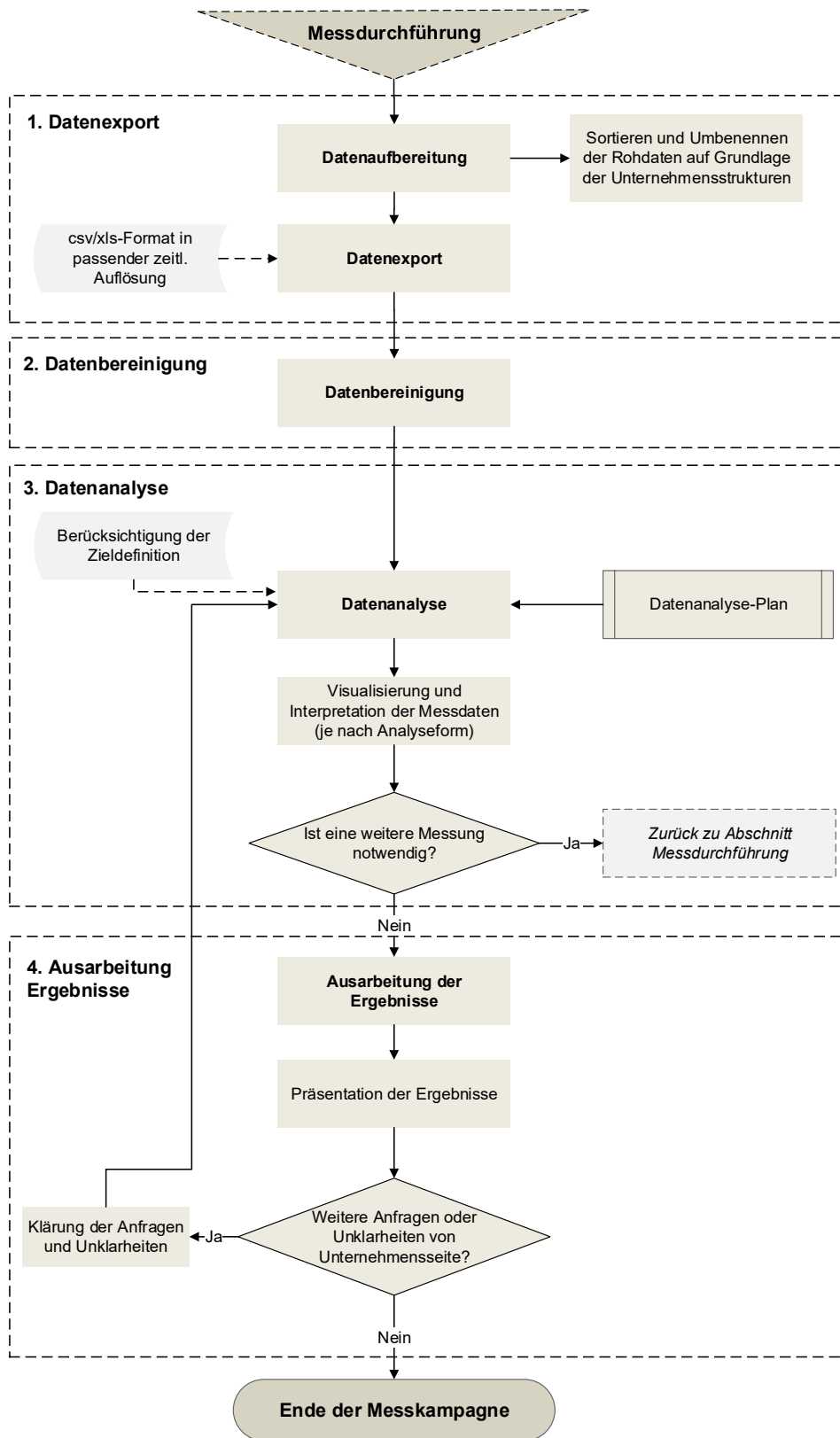
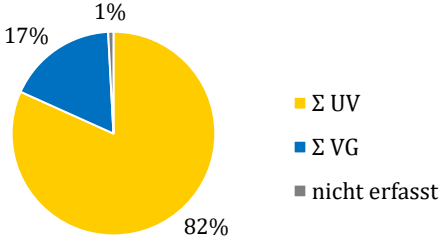
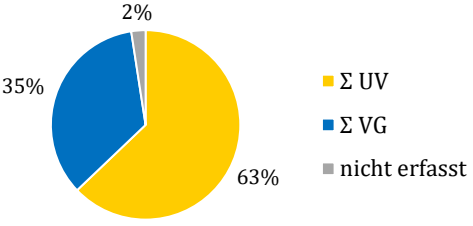


Abbildung A 3: Methodik und Arbeitsschritte zum Abschnitt *Messdatenauswertung und -analyse*

Ergänzende Unterlagen Fallbeispiel Gerichtsgebäude

Tabelle A 1: Steckbrief Analyseergebnisse (1) - Fallbeispiel Gerichtsgebäude

Verbrauchsdisaggregation	Relevante Messpunkte	
	Messpunkt	Anteil Stromverbrauch* [%]
 <p> ■ Σ UV ■ Σ VG ■ nicht erfasst </p>	HUV5	16%
	HUV6	13%
	HUV3	12%
	HUV1	11%
	HUV2	10%
	SUMME	62%
	Verwendungszweck DIN 3807	
Beleuchtung, Betriebseinrichtung, Elektrowärme		72,4%
Zentrale Einrichtungen		18,2%
Diverse Technik		5,2%
Kühlkälte		3,4%
Nicht erfasst		0,8%
Grundlast-Disaggregation	Relevante Grundlast-Verbraucher	
	Messpunkt	Anteil Gesamtgrundlast [%]
 <p> ■ Σ UV ■ Σ VG ■ nicht erfasst </p>	VG EDV/Server	18%
	HUV5	12%
	HUV3	10%
	HUV1	10%
	VG Heizungspumpen	10%
	SUMME	60%
	Verwendungszweck DIN 3807	
Betriebseinrichtung, Beleuchtung		55,5%
Zentrale Einrichtungen		25,7%
Diverse Technik		10,1%
Kühlkälte		6,3%
Nicht erfasst		2,4%

*Bezogen auf einen Messzeitraum von 29 Messtagen.

Tabelle A 2: Steckbrief Analyseergebnisse (2) - Fallbeispiel Gerichtsgebäude

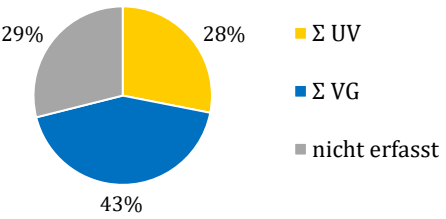
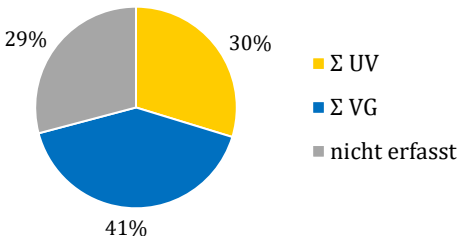
Messpunkte mit hohem Grundlast-Anteil		Grundlast [kW]	Grundlast-Faktor []
VG EDV/Server		8,9 kW	0,99
VG Heizungspumpen		4,9 kW	0,96
VG Kälte		3,1 kW	0,88
Lastspitzen-Disaggregation			
Gesamtdisaggregation	> 99%	Lastgradient Input-Datenr.	9-22 kW
Ursache Messpunkt	UV Küche	Lastgradient Messpunkt	9-25 kW
Lastprofil-Charakterisierung			
Auffällige Messpunkte Spitzenlast		Spitzenlast-Diff. [kW]	Lastspitzen-Faktor []
UV Küche		35,3 kW	0,45
VG Kälte		4,2 kW	0,47
VG EDV/Server		0,1 kW	0,01
Auffällige Messpunkte Laständerung		Lastgradient [kW/h]	Laständerungsrate []
UV Küche		28,4 kW	0,27
VG EDV/Server		0,08 kW	0,00
VG Heizungspumpen		0,12 kW	0,01
Auffällige Messpunkte Streuung		Interquartilsabstand [kW]	Quartilsdispersionsk. []
UV Küche		10,22 kW	0,53
VG Heizungspumpen		0,27 kW	0,05
VG EDV/Server		0,12 kW	0,01
Erläuternde Kommentare			
<ul style="list-style-type: none"> - Sehr hohe Aufschlüsselung (> 99%) des Gesamtstromverbrauchs, der Grundlast sowie der Lastspitzen auf die erfassten Messpunkte - Verwendungszweck Betriebseinrichtung und Beleuchtung machen den Großteil des Stromverbrauchs (ca. 72% aus) - Server als größter elektrischer Verbraucher und größter Grundlast-Verbraucher identifiziert (insbesondere im Zusammenhang mit der verbundenen Kühlung <i>VG Kälte</i> insges. ca. 24% der Gesamtgrundlast) - Der Verwendungszweck Betriebseinrichtung macht den größten Anteil an der Gesamtgrundlast aus (ca. 27 kW bzw. 55%) - Server inkl. Kälteanlage sowie Heizungspumpen als Dauerverbraucher identifiziert - Lastspitzen-Disaggregation und stat. Parameter identifizieren den Messpunkt <i>UV Küche</i> als Ursache für das Auftreten von Lastspitzen <ul style="list-style-type: none"> o <i>Lastgradient</i> und <i>Laständerungsrate</i> deuten auf dynamisches Verhalten hin, was auf größere elektrische Verbraucher schließen lässt, die sich maßgeblich auf den Lastgang des Messpunktes auswirken o <i>Spitzenlast-Differenz</i> und <i>Lastspitzen-Faktor</i> deuten auf wenige, sehr ausgeprägte Lastspitzen hin, die maßgeblich das Gesamtsystem beeinflussen o Zusätzlich auffälliges heterogenes Betriebsverhalten - Weiterführende Detailanalysen zum Verwendungszweck Betriebseinrichtung notwendig 			

Tabelle A 3: Vorstellung Messpunkte Fallbeispiel Gerichtsgebäude

Einstufung	Messpunkt	Verwendungszweck	Elektrische Verbraucher
Input (HV)	HV Trafo 1+2	/	Gesamtstromverbrauch des Messobjektes
Output (UV)	HUV1-7	Betriebseinrichtung Beleuchtung Elektrowärme	Stromverbrauch der Hauptunterverteilungen (HUV) der Gebäudebereiche: Büroequipment und Arbeitsplatz-Ausstattung, Teeküchen Leuchten auf Flur- und Arbeitsflächen Untertisch-Boiler
	UV Küche	Zentrale Einrichtung	Küchengeräte der Kantine
Output (VG)	VG EDV/Server	Zentrale Einrichtung	Serverraum mit zugehörigen Hard- und Softwarekomponenten (Serverschränke mit Racks, Routern, Switches, Telefonanlagen)
	VG Heizungspumpen	Diverse Technik	Diverse Technik: Stromverbrauch der Kälteanlage zur Klimatisierung des Serverraums
	VG Kälte	Kühlkälte	Stromverbrauch der Heizkreispumpen (Fernwärmeanschluss)
	VG Aufzug	Diverse Technik	Antrieb Aufzug

Ergänzende Unterlagen Fallbeispiel Polizeipräsidium

Tabelle A 4: Steckbrief Analyseergebnisse (1) – Fallbeispiel Polizeipräsidium

Verbrauchsdisaggregation	Relevante Messpunkte	
	Messpunkt	Anteil Stromverbrauch* [%]
 <p>29% 28% 43%</p> <p>■ Σ UV ■ Σ VG ■ nicht erfasst</p>	VG Kälteanlage (Gebäude)	11%
	VG Lüftungs-/Klimaanlage	9%
	UV Sensible Haustechnik	6%
	VG Server	5%
	VG Kälteanlage (Server)	3%
	SUMME	33%
Verwendungszweck DIN 3807	Anteil an Gesamtstromverbrauch [%]	
Kühlkälte	23%	
Diverse Technik	19%	
Lüftung	17%	
Betriebseinrichtung und Beleuchtung	7%	
Zentrale Einrichtungen	7%	
Nicht erfasst	28%	
Grundlast-Disaggregation	Relevante Grundlast-Verbraucher	
	Messpunkt	Anteil Gesamtgrundlast [%]
 <p>29% 30% 41%</p> <p>■ Σ UV ■ Σ VG ■ nicht erfasst</p>	VG Lüftungs-/Klimaanlage	8%
	VG Kälteanlage (Gebäude)	8%
	UV Sensible Haustechnik	7%
	VG Server	5%
	VG Kälteanlage (Server)	4%
	SUMME	32%
Verwendungszweck DIN 3807	Anteil an Gesamtstromverbrauch [%]	
Diverse Technik	21%	
Kühlkälte	19%	
Lüftung	17%	
Betriebseinrichtung und Beleuchtung	9%	
Zentrale Einrichtungen	6%	
Nicht erfasst	28%	

*Bezogen auf eine je Messreihe gebildete Referenzwoche, die den Gesamtstromverbrauch für die Disaggregation darstellt.

Tabelle A 5: Steckbrief Analyseergebnisse (2) – Fallbeispiel Polizeipräsidium

Messpunkte mit hohem Grundlast-Anteil		Grundlast [kW]	Grundlast-Faktor []
UV Sensible Haustechnik		24,7 kW	0,93
VG Server		20,1 kW	0,99
VG Kälteanlage Server		14,5 kW	1,00
Lastspitzen-Disaggregation			
Gesamtdisaggregation	74-78%	Lastgradient Input-Datenr.	11,8-50,9 kW
Ursache Messpunkt	HV NSHVI SV	Lastgradient Messpunkt	8-16 kW
Lastprofil-Charakterisierung			
Auffällige Messpunkte Spitzenlast		Spitzenlast-Diff. [kW]	Lastspitzen-Faktor []
UV Kälteanlage (Gebäude)		35,5 kW	0,26
UV Küche		18,5 kW	0,25
Auffällige Messpunkte Laständerung		Lastgradient [kW/h]	Laständerungsrate []
VG Kühlzelle 1+2		38,4 kW	0,75
UV Küche		36,9 kW	0,30
VG Kälteanlage (Gebäude)		24,8 kW	0,08
Auffällige Messpunkte Streuung		Interquartilsabstand [kW]	Quartilsdispersionsk. []
UV Küche		12,6 kW	1,08
VG Kühlzelle 1+2		9,4 kW	0,75
VG Kälteanlage (Gebäude)		25,8 kW	0,53
Erläuternde Kommentare			

- Hohe Aufschlüsselung (**71%**) des Gesamtstromverbrauchs, der Gesamtgrundlast (**71%**) und der Lastspitzen (**71-78%**) auf die erfassten Messpunkte
 - o **29%** des Gesamtstromverbrauchs wurden aufgrund technischer und baulicher Einschränkungen nicht aufgeschlüsselt (dieser Stromverbrauch ist v.a. einer großen Anzahl kleinerer Messpunkte zuzuordnen)
- Verwendungszweck **Kühlkälte**, **Diverse Technik** und **Lüftung** machen den Großteil (ca. **59%**) des Stromverbrauchs aus – allein die Querschnittstechnologien Kühlkälte und Lüftung zusammen ca. **40%**
 - o **Kälte- und Lüftungsanlagen** als relevante/große elektrische Verbraucher identifiziert
- **Kälte- und Lüftungsanlagen** sowie **Sensible Haustechnik** sind ebenfalls große Grundlast-Verbraucher
 - o Die Verwendungszwecke **Kühlkälte**, **Lüftung** und **Diverse Technik** stellen insgesamt **57%** der Gesamtgrundlast dar
- Insgesamt **24 Messpunkte als Dauerverbraucher** identifiziert (Grundlast-Faktor > 0,8)
 - o Hohe Gesamtgrundlast wird dadurch verdeutlicht
- Betrachtete Lastspitzen können nur auf einen Teilbereich (*HV NSHVI SV*) eingegrenzt werden – die tatsächliche Ursache bzw. der verantwortliche Messpunkt kann nicht eindeutig identifiziert werden
 - o Statistische Parameter identifizieren jedoch den Messpunkt *VG Kühlzelle* mit sehr dynamischer Laständerung und heterogenen Verhalten (Streuung), was auf einen Messpunkt mit Lastspitzen-Verbrauchern hindeuten kann
- Auffällig beim Lastverhalten v.a. Messpunkte der Verwendungszwecke **Kühlkälte** (große Kälteanlagen der Gebäude) und zentrale Einrichtungen (*UV Küche*)
- Weiterführende Detailanalysen zu Querschnittstechnologien **Kühlkälte** und **Lüftung** notwendig

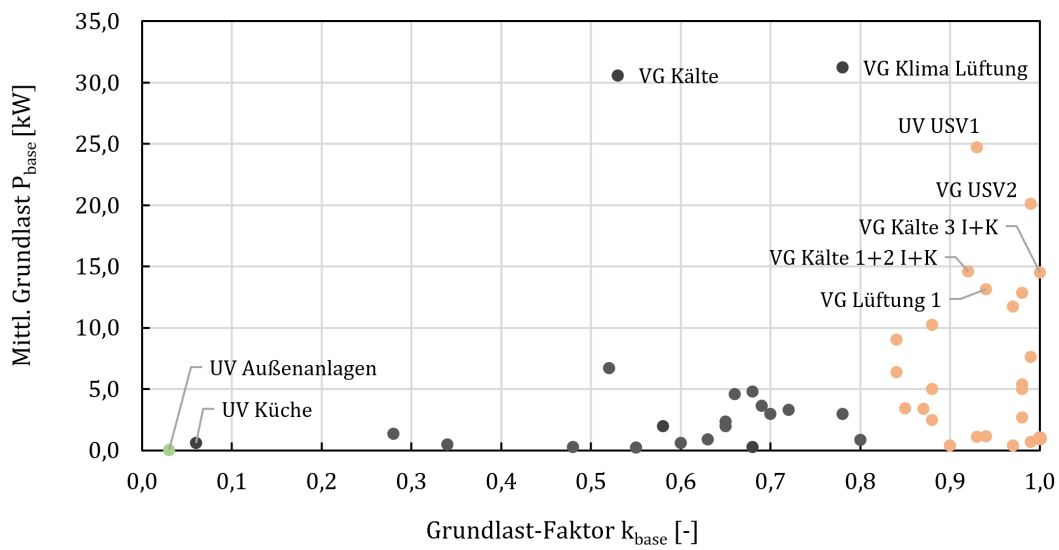


Abbildung A 4: Grundlast-Faktor und mittlere Grundlast der erfassten Messpunkte - Fallbeispiel Polizeipräsidium

Tabelle A 6: Kenndaten der Top 5 Lastspitzen – Fallbeispiel Polizeipräsidium

Lastspitze Nr.	1	2	3	6*	19*
Leistung [kW]	652,6	651,9	651,6	640,4	621,9
Datum	11.07.2023	10.07.2023	11.07.2023	11.07.2023	07.07.2023
Uhrzeit	12:30h	12:00h	13:00h	10:15h	12:45h
Disaggregation [%]	74	73	74	74	78
Lastgradient [kW]	13,97	50,87	15,63	18,93	11,78

*In diesem Fallbeispiel wurde die 6. und 19. Lastspitze betrachtet, um die zusätzliche Betriebstage und Uhrzeiten zu berücksichtigen. Ursprünglich würden weitere Lastspitzen vom 11.07.2023 in die Top 5 Lastspitzen fallen.

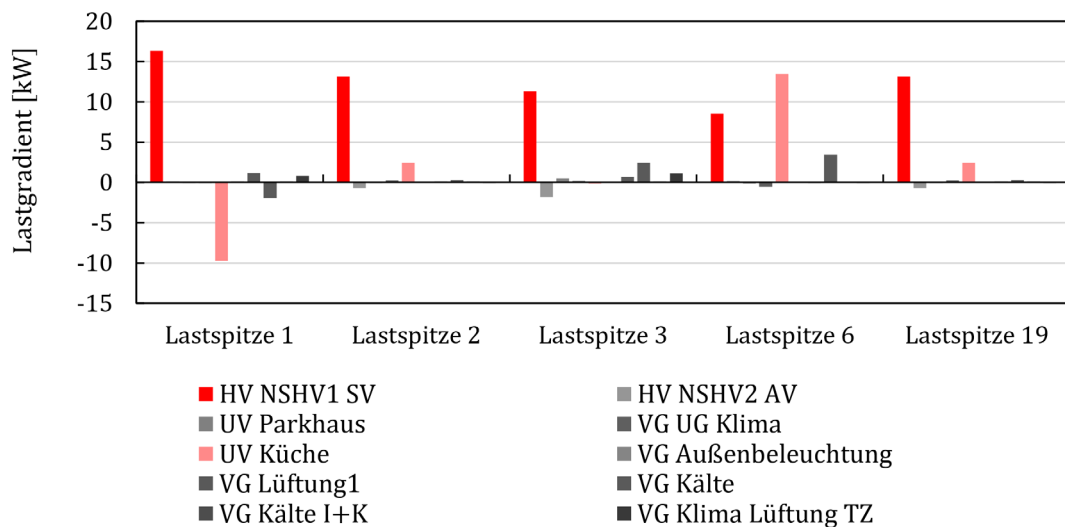


Abbildung A 5: Lastgradienten der erfassten Messpunkte zum Zeitpunkt der Top 5 Lastspitzen - Fallbeispiel Polizeipräsidium

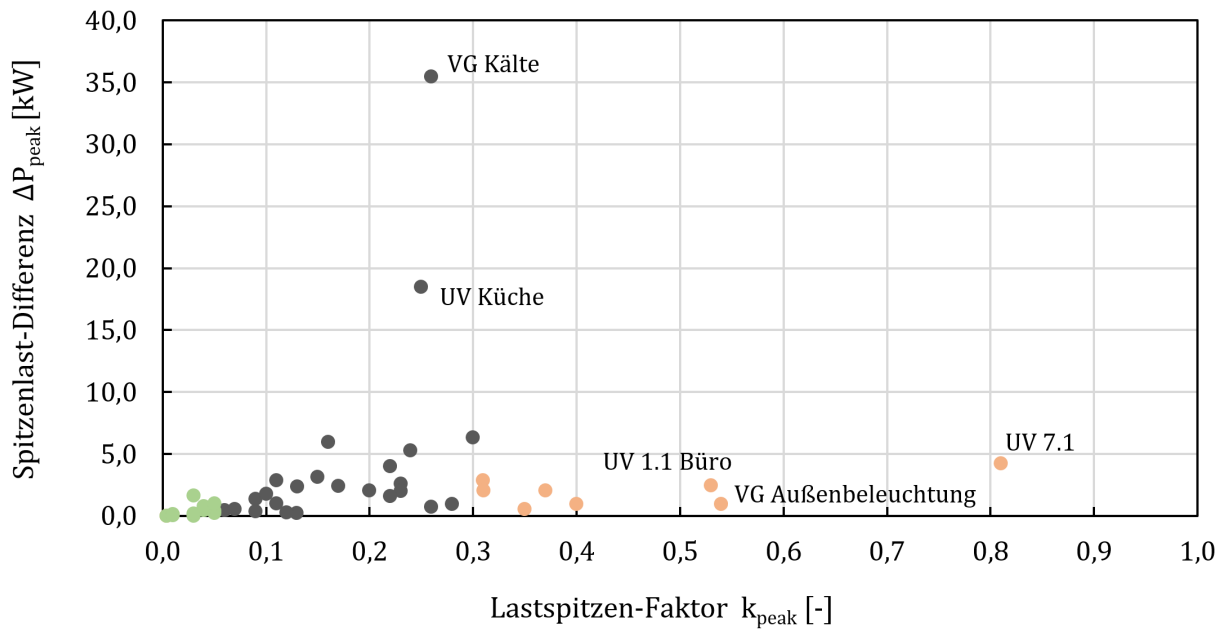


Abbildung A 6: Lastspitzen-Faktor und Spitzenlast-Differenz der erfassten Messpunkte - Fallbeispiel Polizeipräsidium

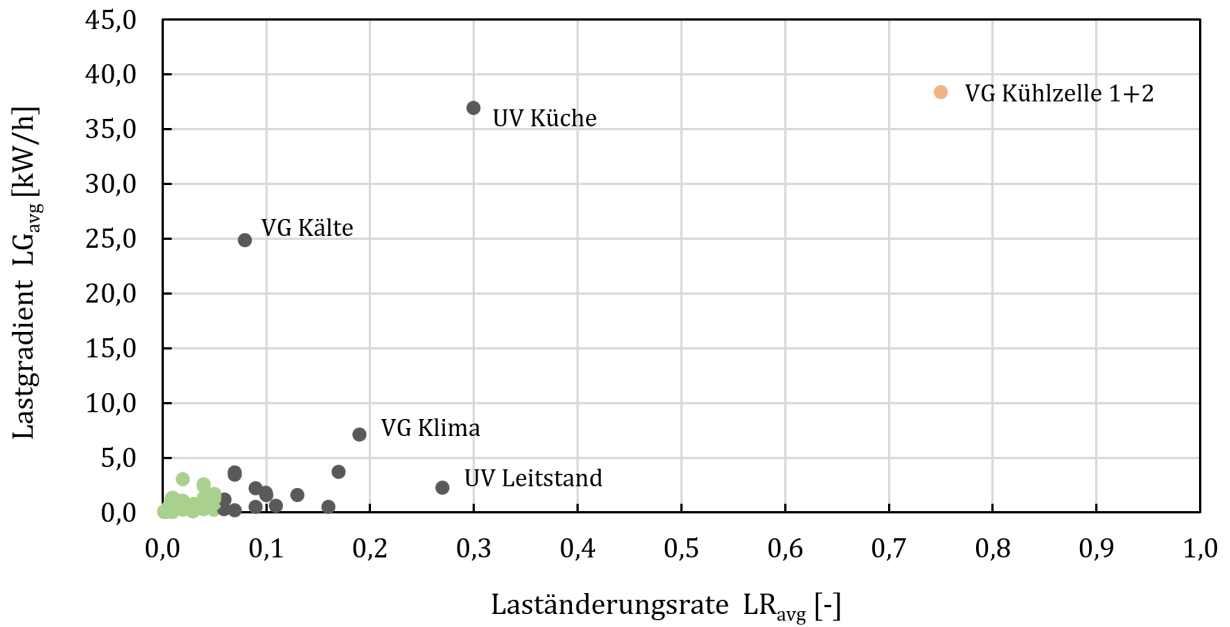


Abbildung A 7: Laständerungsrate und Lastgradient (Betriebszeit) der erfassten Messpunkte - Fallbeispiel Polizeipräsidium

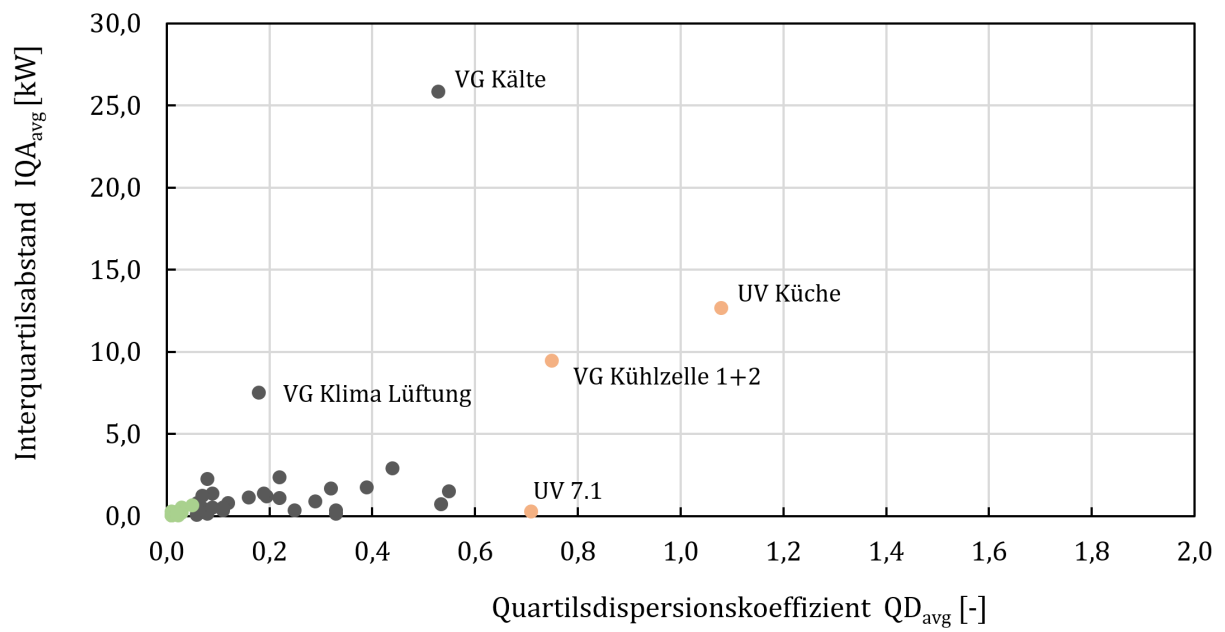


Abbildung A 8: Mittlerer Quartilsdispersionskoeffizient und Interquartilsabstand (Betriebszeit) der erfassten Messpunkte - Fallbeispiel Polizeipräsidium

Ergänzende Unterlagen Fallbeispiel Metallverarbeitender Betrieb (Standort A)

Tabelle A 7: Steckbrief Analyseergebnisse (1) – Metallv. Betrieb (Standort A)

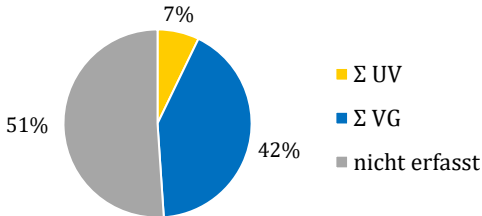
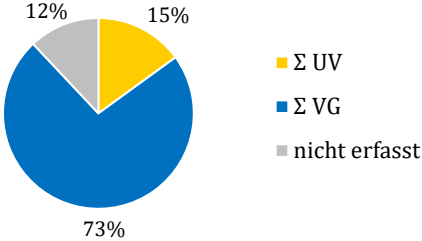
Verbrauchsdisaggregation	Relevante Messpunkte	
	Messpunkt	Anteil Stromverbrauch* [%]
 <p> ■ Σ UV ■ Σ VG ■ nicht erfasst </p>	VG Maschine 2	10%
	VG Kompressor	10%
	VG Beleuchtung Halle	8%
	UV Beleuchtung und Server	6%
	VG Zwischensp. Butylanl.	4%
	SUMME	38%
Verwendungszweck DIN 3807	Anteil an Gesamtstromverbrauch [%]	
Produktion	21%	
Druckluft	10%	
Beleuchtung	8%	
Beleuchtung und zentrale Einrichtungen	6%	
Diverse Technik	4%	
Betriebseinrichtung	1%	
Nicht erfasst	51%	
Grundlast-Disaggregation	Relevante Grundlast-Verbraucher	
	Messpunkt	Anteil Gesamtgrundlast [%]
 <p> ■ Σ UV ■ Σ VG ■ nicht erfasst </p>	VG Kompressor	29%
	VG Zentralschmierung	27%
	UV Beleuchtung und Server	11%
	VG Maschine 2	5%
	VG Kran (1)	4%
	SUMME	77%
Verwendungszweck DIN 3807	Anteil an Gesamtstromverbrauch [%]	
Produktion	36%	
Druckluft	29%	
Beleuchtung und zentrale Einrichtungen	11%	
Diverse Technik	7%	
Betriebseinrichtung	4%	
Nicht erfasst	12%	

Tabelle A 8: Steckbrief Analyseergebnisse (2) – Metallv. Betrieb (Standort A)

Messpunkte mit hohem Grundlast-Anteil		Grundlast [kW]	Grundlast-Faktor []
VG Abstapelanlage		0,04 kW	0,83
UV Büro (1)		0,04 kW	0,86
Lastspitzen-Disaggregation			
Gesamtdisaggregation	27-42%	Lastgradient Input-Datenr.	15,3-41,4 kW
Ursache Messpunkt	HV NSHV2	Lastgradient Messpunkt	14-56 kW
Lastprofil-Charakterisierung			
Auffällige Messpunkte Spitzenlast		Spitzenlast-Diff. [kW]	Lastspitzen-Faktor []
VG Abstapelanlage		3,3 kW	0,97
VG Zentralschmiere		7,8 kW	0,42
VG Zwischenspeicher Butylanlage		4,5 kW	0,63
VG Kran (2)		4,9 kW	0,53
UV Werkstatt		6,9 kW	0,62
Auffällige Messpunkte Laständerung		Lastgradient [kW/h]	Laständerungsrate []
VG Maschine 2		17,8 kW	0,62
VG Zentralschmiere		7,3 kW	0,26
VG Kompressor		5,7 kW	0,27
VG Kran (2)		5,5 kW	0,55
Auffällige Messpunkte Streuung		Interquartilsabstand [kW]	Quartildispersionsk. []
VG Maschine 2		5,8 kW	1,13
VG Kran (1)		0,3 kW	0,82
VG Kompressor		2,1 kW	0,44

Erläuternde Kommentare

- Mittlere Aufschlüsselung (**49%**) des Gesamtstromverbrauchs und der Lastspitzen, jedoch deutlich höhere Aufschlüsselung der Grundlast (**88%**) auf die erfassten Messpunkte
- **51%** des Gesamtstromverbrauchs wurden nicht aufgeschlüsselt – u.a. aufgrund von Einschränkungen und dem Fokus auf der Erfassung möglichst diverser elektrischer Verbraucher
- Verwendungszweck **Produktion** und **Druckluft** machen einen großen Teil (ca. **31%**) des Stromverbrauchs aus – durch die nicht erfassten Produktionsmaschinen ist die Produktion der größte Verwendungszweck
 - o **Produktionsmaschinen** als relevante/große elektrische Verbraucher identifiziert
- **Kompressor-System** und **Zentralschmierung** sind große Grundlast-Verbraucher – allein das Kompressor-System macht etwa **29%** der Gesamtgrundlast aus
 - o Bei beiden Messpunkten sind **Detailanalysen** zur Optimierung des Grundlast-Verbrauchs notwendig
- **Keine Dauerverbraucher** mit großem Einfluss auf das Gesamtsystem identifiziert
- Betrachtete Lastspitzen können nur auf einen Teilbereich (*HV NSHV2*) eingegrenzt werden – die tatsächliche Ursache bzw. der verantwortliche Messpunkt kann nicht eindeutig identifiziert werden
 - o Statistische Parameter identifizieren jedoch vor allem Messpunkte des Verwendungszweckes **Produktion** als Lastspitzen-Verbraucher (Produktionsmaschinen und Peripherie-Geräte)

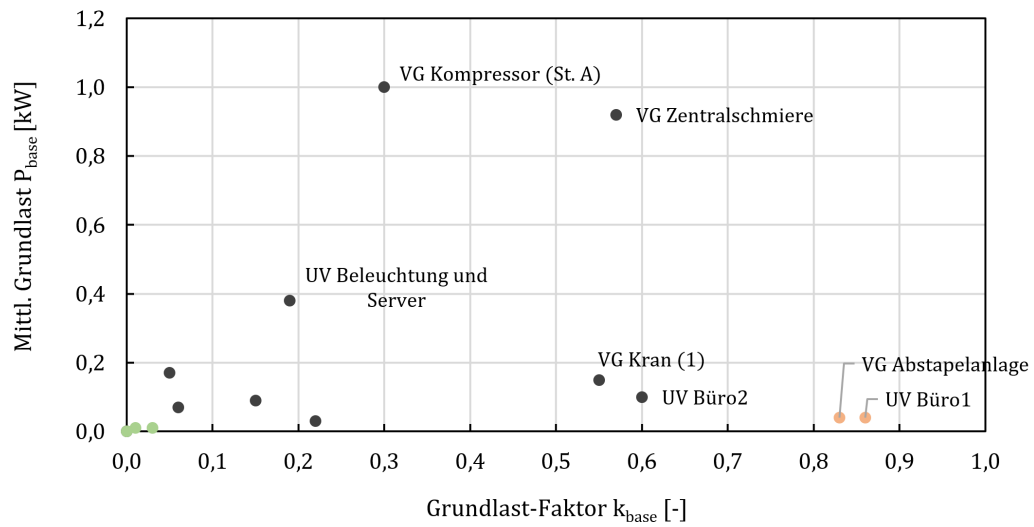


Abbildung A 9: Grundlast-Faktor und mittlere Grundlast der erfassten Messpunkte - Fallbeispiel metallv. Betrieb (Standort A)

Tabelle A 9: Kenndaten der Top 5 Lastspitzen - Fallbeispiel metallv. Betrieb (Standort A)

Lastspitze Nr.	1	2	3	4	6*
Leistung [kW]	114,9	111,5	109,0	104,9	100,7
Datum	23.11.2022	23.11.2022	16.11.2022	29.11.2022	21.11.2022
Uhrzeit	09:00h	07:30h	08:45h	08:00h	07:15h
Disaggregation [%]	30	38	42	27	39
Lastgradient [kW]	41,4	15,3	30,2	35,0	17,6

*In diesem Fallbeispiel wurde die 6. Lastspitze betrachtet, um die zusätzliche Betriebstage und Uhrzeiten zu berücksichtigen. Ursprünglich würden weitere Lastspitzen vom 23.11.2022 in die Top 5 Lastspitzen fallen.

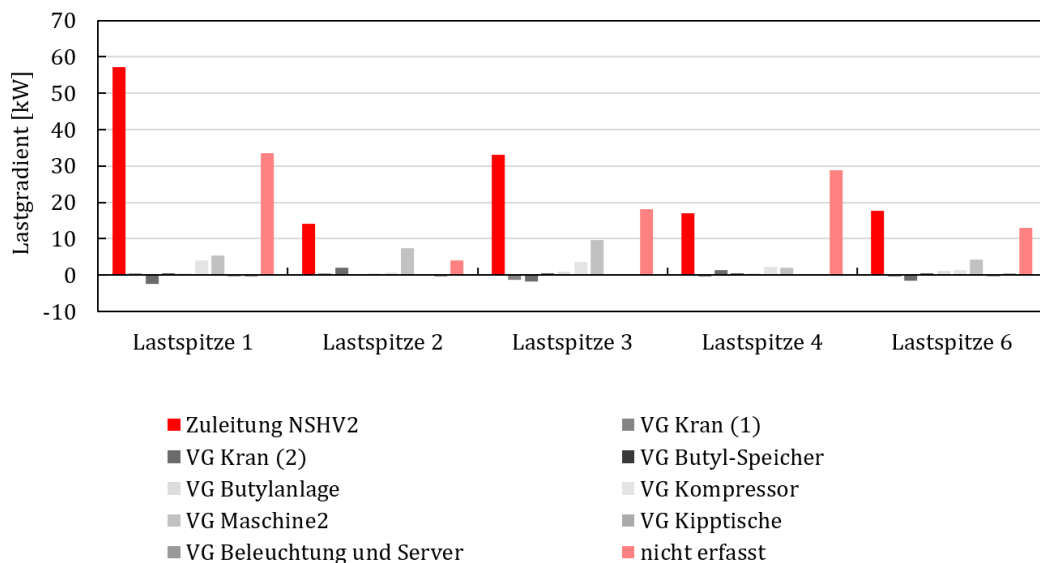


Abbildung A 10: Lastgradienten der erfassten Messpunkte zum Zeitpunkt der Top 5 Lastspitzen - Fallbeispiel metallv. Betrieb (Standort A)

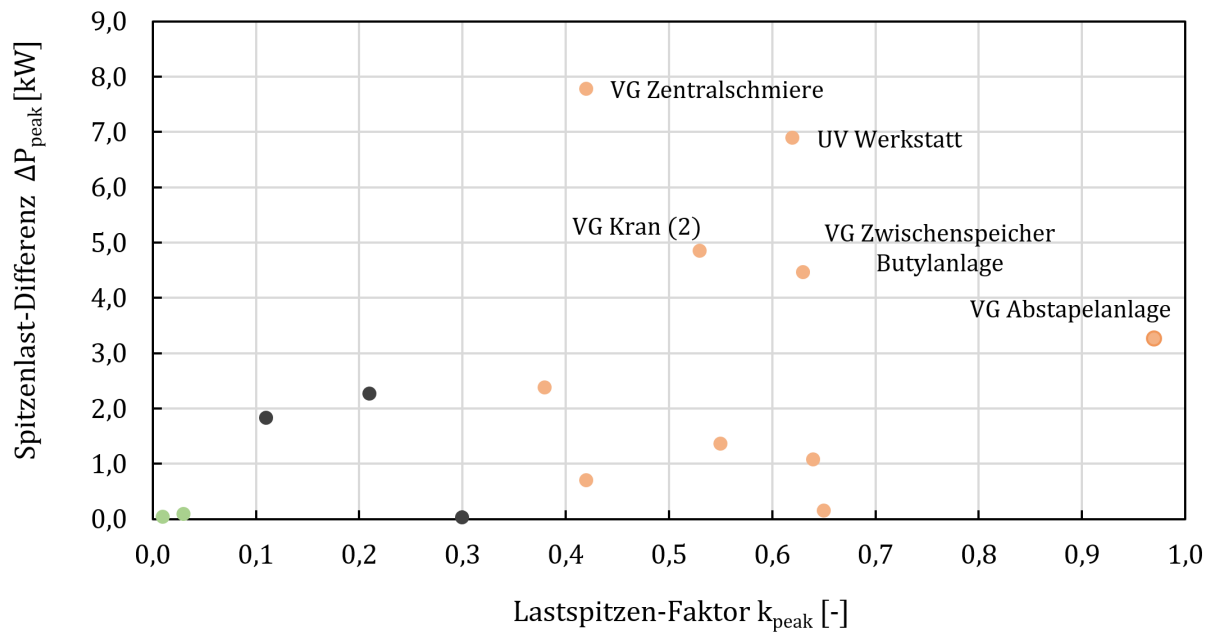


Abbildung A 11: Lastspitzen-Faktor und Spitzenlast-Differenz der erfassten Messpunkte
- Fallbeispiel metallv. Betrieb (Standort A)

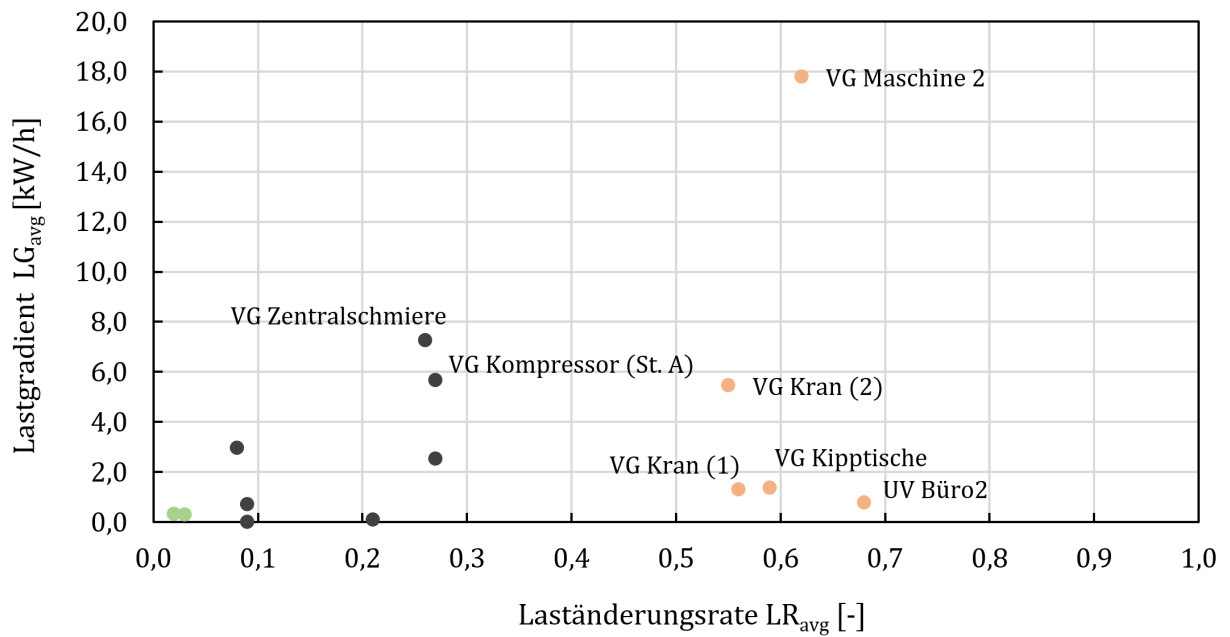


Abbildung A 12: Laständerungsrate und Lastgradient der erfassten Messpunkte
- Fallbeispiel metallv. Betrieb (Standort A)

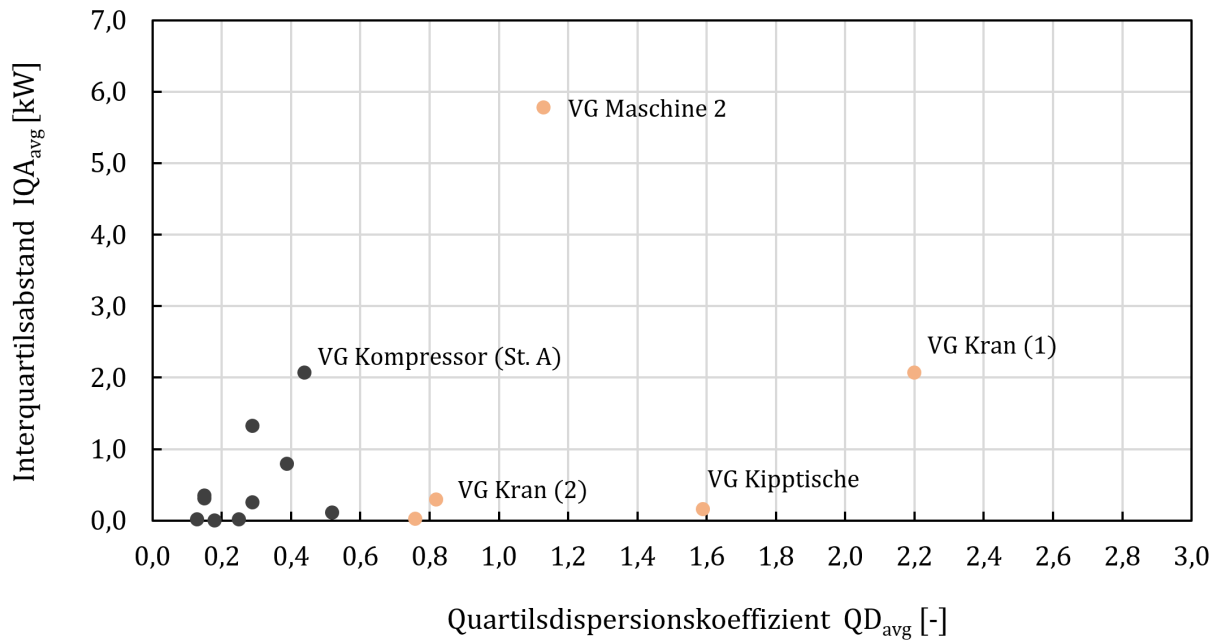
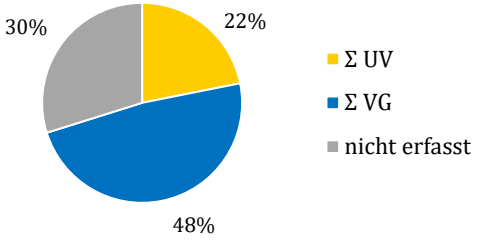
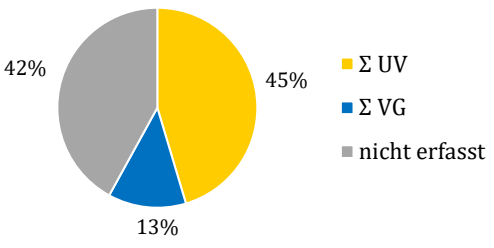


Abbildung A 13: Mittlerer Quartilsdispersionskoeffizient und Interquartilsabstand der erfassten Datenreihen
 - Fallbeispiel metallv. Betrieb (Standort A)

Ergänzende Unterlagen Fallbeispiel Metallverarbeitender Betrieb (Standort B)

Tabelle A 10: Steckbrief Analyseergebnisse (1) – Metallv. Betrieb (Standort B)

Verbrauchsdisaggregation	Relevante Messpunkte	
	Messpunkt	Anteil Stromverbrauch* [%]
 <p> ■ Σ UV ■ Σ VG ■ nicht erfasst </p>	VG Kompressor	16%
	UV Lager1	11%
	VG 70er Maschine	8%
	UV Versand	8%
	VG Beleuchtung und Steckd.	7%
	SUMME	50%
Verwendungszweck DIN 3807	Anteil an Gesamtstromverbrauch [%]	
Produktion	22%	
Diverse Technik	21%	
Druckluft	16%	
Beleuchtung	11%	
Betriebseinrichtung	1%	
Nicht erfasst	30%	
Grundlast-Disaggregation	Relevante Grundlast-Verbraucher	
	Messpunkt	Anteil Gesamtgrundlast [%]
 <p> ■ Σ UV ■ Σ VG ■ nicht erfasst </p>	UV Lager1	27%
	UV Versand	15%
	VG Kompressor	4%
	VG 60er Maschine	3%
	VG Rüttel-Maschine	2%
	SUMME	51%
Verwendungszweck DIN 3807	Anteil an Gesamtstromverbrauch [%]	
Diverse Technik	44%	
Produktion	7%	
Druckluft	4%	
Betriebseinrichtung	2%	
Beleuchtung	1%	
Nicht erfasst	42%	

*Bezogen auf eine gebildete Referenzwoche des Messzeitraums, die den Gesamtstromverbrauch für die Disaggregation darstellt.

Tabelle A 11: Steckbrief Analyseergebnisse (2) – Metallv. Betrieb (Standort B)

Messpunkte mit hohem Grundlast-Anteil		Grundlast [kW]	Grundlast-Faktor []
UV Lager1		2,1 kW	0,41
UV Versand		1,2 kW	0,35
Lastspitzen-Disaggregation			
Gesamtdisaggregation	63-77%	Lastgradient Input-Datenr.	11,6-26,4 kW
Ursache Messpunkt	UV Lager1	Lastgradient Messpunkt	13-24 kW
	VG Rüppel-Maschine		4-8 kW
	VG Maschine B400		9-14 kW
Lastprofil-Charakterisierung			
Auffällige Messpunkte Spitzenlast		Spitzenlast-Diff. [kW]	Lastspitzen-Faktor []
UV Lager1		15,3 kW	0,38
UV Werkstatt		1,9 kW	0,31
UV Aufenthaltsraum		1,5 kW	0,50
Auffällige Messpunkte Laständerung		Lastgradient [kW/h]	Laständerungsrate []
VG Rüppel-Maschine		15,8 kW	0,69
VG Maschine B400		14,3 kW	0,49
UV Aufenthaltsraum		2,4 kW	0,83
Auffällige Messpunkte Streuung		Interquartilsabstand [kW]	Quartildispersionsk. []
VG 70er Maschine		2,8 kW	0,46
UV Lager1		2,6 kW	0,4
VG 60er Maschine		1,0 kW	0,95
Erläuternde Kommentare			

- Hohe Aufschlüsselung (**70%**) des Gesamtstromverbrauchs und der Lastspitzen (**63-77%**), jedoch nur mittlere Aufschlüsselung der Grundlast (**58%**)
- Das **Kompressor-System** und der Gebäudebereich **Lager1** sind die größten erfassten Messpunkte – nach Verwendungszwecken stellen **Produktion** und **Diverse Technik** die größten Bereiche dar
- Bezogen auf die Grundlast sind insbesondere die Gebäudebereiche **Lager1** und **Versand** auffällig – zusammen machen diese ca. **42%** der Gesamtgrundlast aus
 - o Bei beiden Messpunkten sind weiterführende Detailanalysen zur Identifikation der Ursache für den hohen Grundlastverbrauch notwendig
 - o Der nicht aufgeschlüsselte Teil der Grundlast ist vermutlich auf Laststationen (E-Autos und Flurfahrzeuge) zurückzuführen
- **Keine Dauerverbraucher** mit großem Einfluss auf das Gesamtsystem identifiziert
- Betrachtete Lastspitzen können auf mehrere Messpunkte der Verwendungszwecke **Produktion** und **Diverse Technik** zurückgeführt werden
 - o Statistische Parameter identifizieren insbesondere **Produktionsmaschinen** als auffällige Messpunkte mit dynamischer Lastcharakteristik und heterogenen Betriebsverhalten

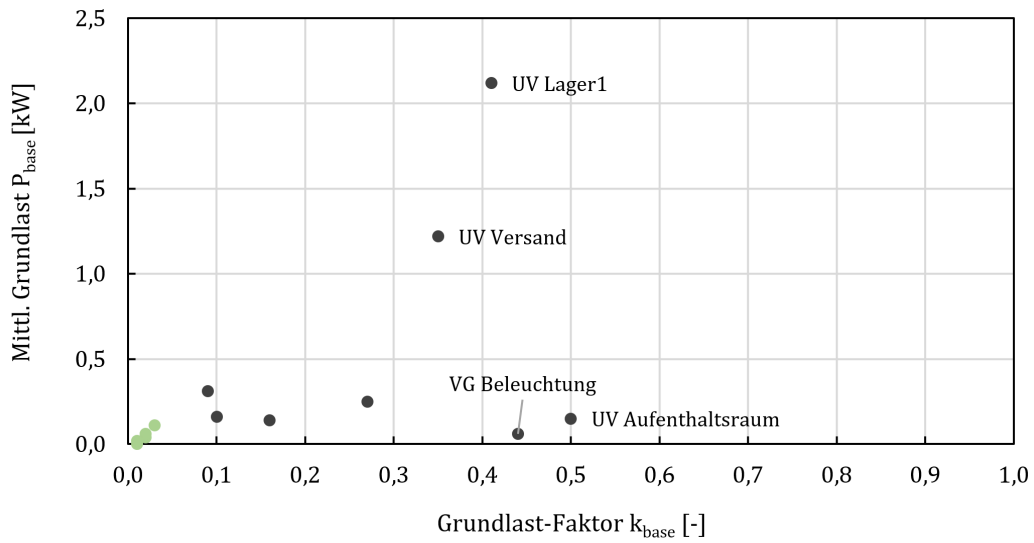


Abbildung A 14: Grundlast-Faktor und mittlere Grundlast der erfassten Messpunkte - Fallbeispiel metallv. Betrieb (Standort B)

Tabelle A 12: Kenndaten der Top 5 Lastspitzen – Fallbeispiel metallv. Betrieb (Standort B)

Lastspitze Nr.	1	2	3	4	6*
Leistung [kW]	115,0	110,7	102,1	100,8	100,5
Datum	30.11.2022	01.12.2022	05.12.2022	01.12.2022	01.12.2022
Uhrzeit	21:45h	10:15h	22:30h	17:15h	08:30h
Disaggregation [%]	68	71	77	70	63
Lastgradient [kW]	15,5	25,5	26,4	17,7	11,6

*In diesem Fallbeispiel wurde die 6. Anstatt der 5. Lastspitze betrachtet, um die zusätzliche Betriebstage und Uhrzeiten zu berücksichtigen. Ursprünglich würde die 5. Lastspitze auf den 30.11.2022 auf die 1. Lastspitze folgen.

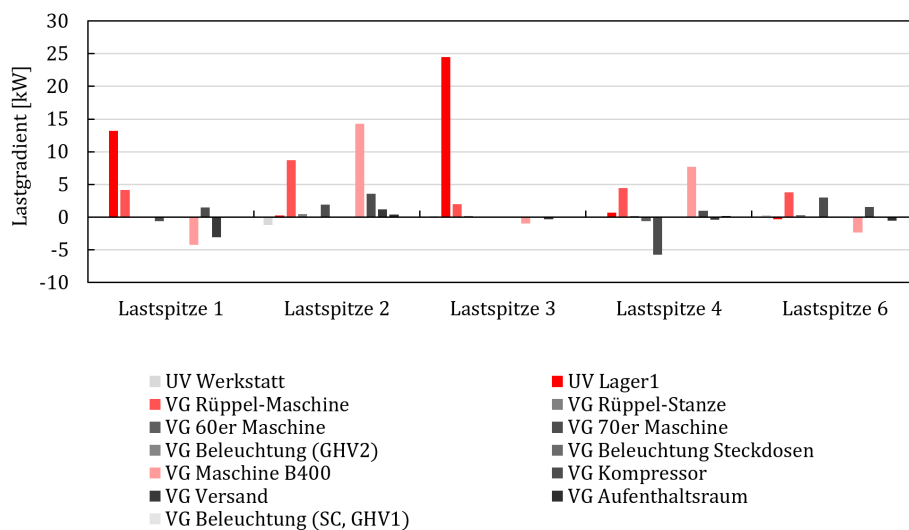


Abbildung A 15: Lastgradienten der erfassten Messpunkte zum Zeitpunkt der Top 5 Lastspitzen - Fallbeispiel metallv. Betrieb (Standort B)

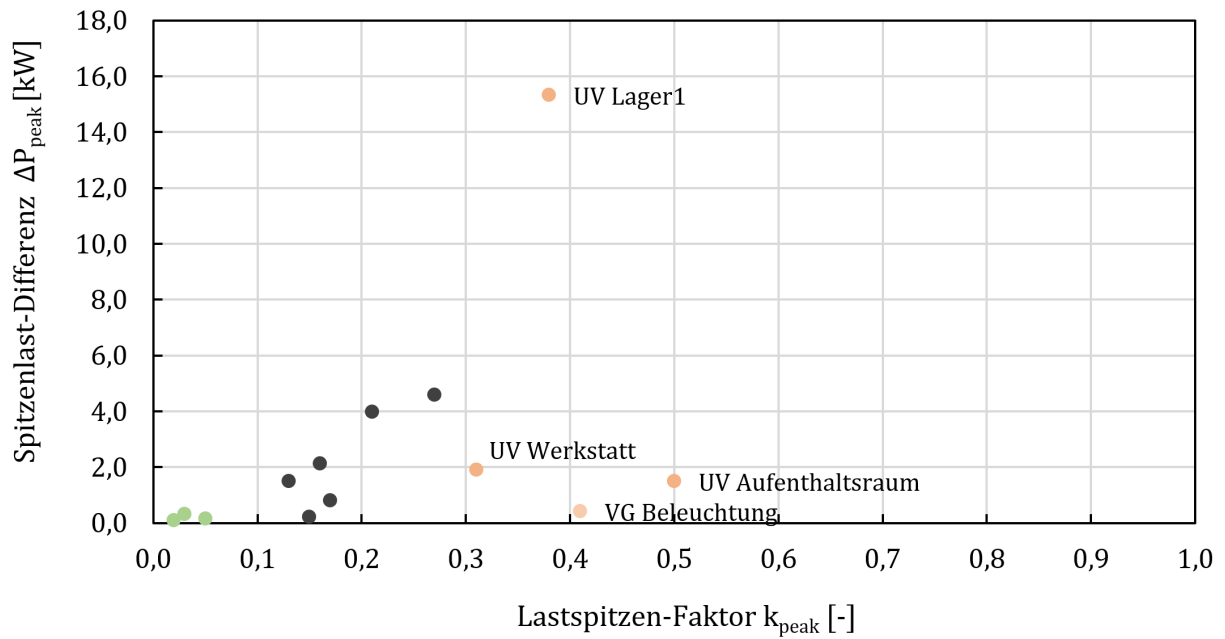


Abbildung A 16: Lastspitzen-Faktor und Spitzenlast-Differenz der erfassten Messpunkte
- Fallbeispiel metallv. Betrieb (Standort B)

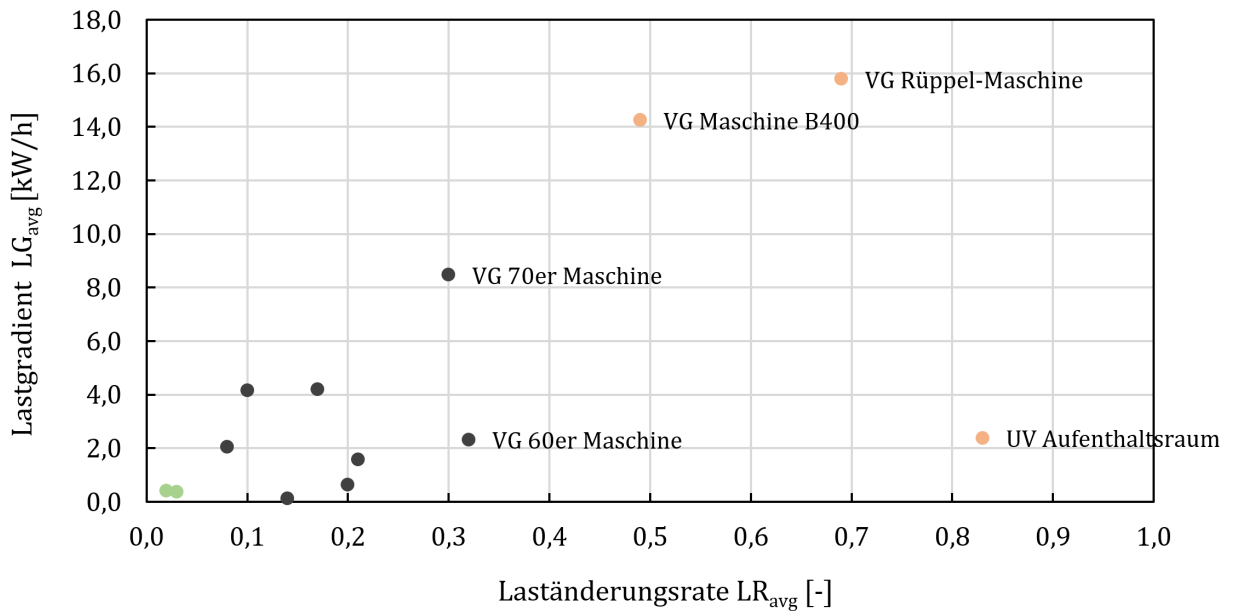


Abbildung A 17: Laständerungsrate und Lastgradient (Betriebszeit) der erfassten Messpunkte
- Fallbeispiel metallv. Betrieb (Standort B)

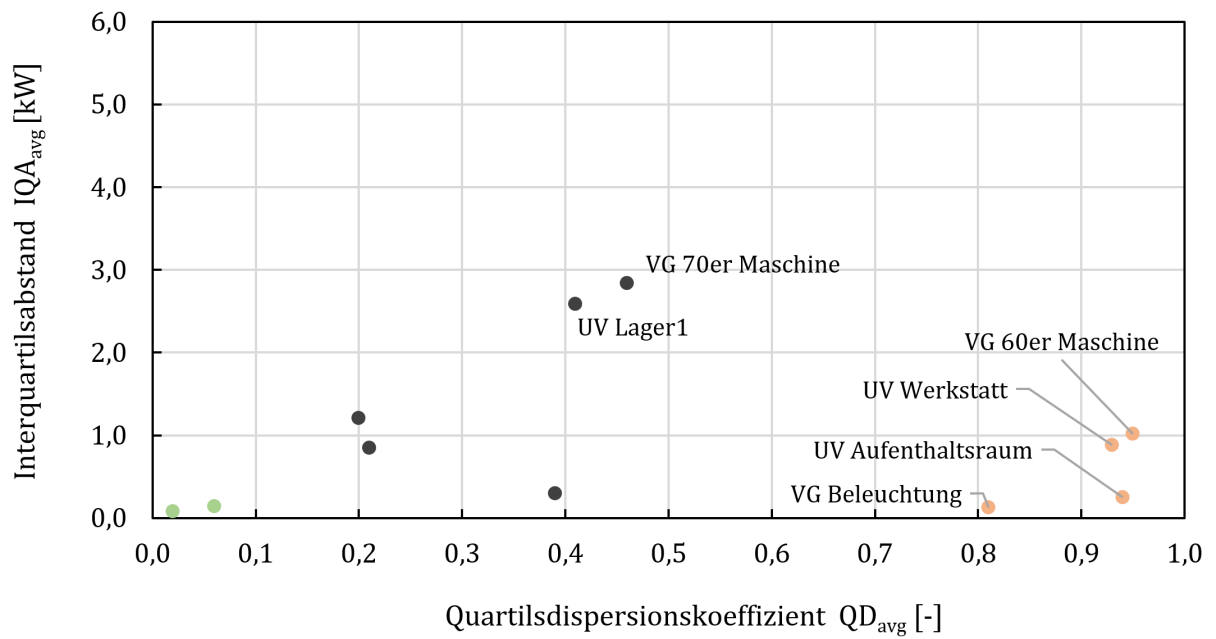


Abbildung A 18: Mittlerer Quartilsdispersionskoeffizient und Interquartilsabstand (Betriebszeit) der erfassten Messpunkte - Fallbeispiel metallv. Betrieb (Standort B)

Ergänzende Unterlagen Fallbeispiel Lüftungsanlage

Tabelle A 13: Steckbrief Analyseergebnisse (1) – Lüftungsanlage

Verbrauchsdisaggregation	Relevante Messpunkte	
	Messpunkt	Anteil Stromverbrauch* [%]
<p> ■ VG Antrieb Zuluft ■ VG Antrieb Abluft ■ VG Abluft WC ■ VG Pumpen Lüftung </p>	VG Antrieb Zuluft	62%
	VG Antrieb Abluft	22%
	VG Abluft WC	15%
	VG Pumpen Lüftung	0,8%
	VG Steuerspannung	0,4%
	SUMME	100%
	Lastprofil-Charakterisierung	
Auffällige Messpunkte Grundlast	Grundlast [kW]	Grundlast-Faktor []
VG Antrieb Zuluft	0,32 kW	0,02
VG Antrieb Abluft	0,47 kW	0,10
VG Abluft WC	0,00 kW	0,00
VG Pumpen Lüftung	0,01 kW	0,04
Auffällige Messpunkte Spitzenlast	Spitzenlast-Diff. [kW]	Lastspitzen-Faktor []
VG Antrieb Zuluft	5,1 kW	0,16
VG Antrieb Abluft	2,0 kW	0,18
VG Abluft WC	0,06 kW	0,26
VG Pumpen Lüftung	0,30 kW	0,07
Auffällige Messpunkte Laständerung	Lastgradient [kW/h]	Laständerungsrate []
VG Antrieb Zuluft	1,9 kW	0,02
VG Antrieb Abluft	0,74 kW	0,02
VG Abluft WC	0,30 kW	0,01
VG Pumpen Lüftung	0,12 kW	0,04
Auffällige Messpunkte Streuung	Interquartilsabstand [kW]	Quartildispersionsk. []
VG Antrieb Zuluft	0,61 kW	0,03
VG Antrieb Abluft	0,17 kW	0,02
VG Abluft WC	0,05 kW	0,01
VG Pumpen Lüftung	0,33 kW	0,43

*Bezogen auf eine gebildete Referenzwoche des Messzeitraums, die den Gesamtstromverbrauch für die Disaggregation darstellt.

Tabelle A 14: Steckbrief Analyseergebnisse (2) – Lüftungsanlage

Erläuternde Kommentare
<ul style="list-style-type: none">- Sehr hohe Aufschlüsselung (>99%) des Gesamtstromverbrauchs, der Grundlast und der Lastspitzen- Zuluft-Antrieb als größter elektrischer Verbraucher identifiziert (62%) gefolgt vom Abluft-Antrieb (22%)- Kein nennenswerter Grundlastverbrauch in der Input-Datenreihe – daher auch keine Grundlast-Disaggregation durchgeführt bzw. notwendig- Die Lüftungsanlage ist zu 50% der Zeitwerte in Betrieb (bezogen auf eine Referenzwoche) – 50% der Zeitwerte entsprechend im Standby bzw. kein nennenswerter Stromverbrauch- Keine abrechnungsrelevanten Lastspitzen in der Input-Datenreihe und keine auffälligen statistischen Parameter bzgl. Lastspitzen – daher auch keine Lastspitzen-Disaggregation durchgeführt bzw. notwendig- Statistische Parameter deuten auf statisches Lastverhalten und homogenes Betriebs- und Regelverhalten des Systems hin – letzteres deutet auf einen fest definierten Betriebsablauf des Systems hin (bspw. Ansteuerung nach Zeitplan durch Gebäudeleittechnik)

Ergänzende Unterlagen Fallbeispiel Kälteanlage

Tabelle A 15: Steckbrief Analyseergebnisse – Kälteanlage

Verbrauchsdisaggregation	Relevante Messpunkte	
	Messpunkt	Anteil Stromverbrauch* [%]
<p>53% 47% ■ VG Anlage1 ■ VG Anlage2</p>	VG Anlage1	47%
	VG Anlage2	53%
	SUMME	100%
Lastprofil-Charakterisierung		
Auffällige Messpunkte Grundlast	Grundlast [kW]	Grundlast-Faktor []
VG Anlage1	0,5 kW	0,02
VG Anlage2	1,1 kW	0,03
Auffällige Messpunkte Spitzenlast	Spitzenlast-Diff. [kW]	Lastspitzen-Faktor []
VG Anlage1	22,5 kW	0,16
VG Anlage2	7,3 kW	0,05
Auffällige Messpunkte Laständerung	Lastgradient [kW/h]	Laständerungsrate []
VG Anlage1	64,8 kW	0,16
VG Anlage2	69,3 kW	0,17
Auffällige Messpunkte Streuung	Interquartilsabstand [kW]	Quartilsdispersionsk. []
VG Anlage1	58,2 kW	105,95
VG Anlage2	66,7 kW	60,02
Erläuternde Kommentare		

- Nahezu **gleichmäßige Aufschlüsselung** des Stromverbrauchs beider Kälteanlagen – 47% Anlage1 vs. 53% Anlage2
- **Keine nennenswerte Grundlast** erkennbar (vgl. Grundlast-Faktor)
- Kälteanlagen sind jeweils zu etwa **30%** der Zeitwerte über den Messzeitraum in Betrieb (ca. 250 Betriebsstunden auf 34 Messtage) – 70% der Zeitwerte entsprechend im Standby bzw. kein nennenswerter Stromverbrauch
 - o **Soll-Eistemperatur** ist wesentlicher Einflussparameter auf den Betrieb der Kälteanlagen – insbes. bei Veranstaltungen teilweise **Parallelbetrieb** der beiden Anlagen
- **Keine abrechnungsrelevanten Lastspitzen** in der Input-Datenreihe und keine auffälligen statistischen Parameter bzgl. Lastspitzen – daher auch keine Lastspitzen-Disaggregation durchgeführt bzw. notwendig
- Statistische Parameter deuten insbesondere auf ein **sehr heterogenes Betriebsverhalten** der beiden Kälteanlagen – es ist **kein regelmäßiger Tageslastverlauf** erkennbar, da die Anlagen abhängig von der Differenz zwischen Ist- und Soll-Eistemperatur laufen

* Bezogen auf einen Messzeitraum von 34 Messtagen.