

# Identifizierung von Optimierungspotentialen in elektrischen Energiesystemen anhand von Last- und Erzeugungsprofilen

**Carolin Vogel\*, Marcel Eggemann\*, Veronika Barta\*,  
Stephanie Uhrig, Simon Schramm**

Hochschule München, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, Lothstr. 64, D - 80335 München, +49 89 1265-3416, vogel1@hm.edu & timeless@ee.hm.edu, www.hm.edu

## **Kurzfassung:**

Bestehende elektrische Energiesysteme, beispielsweise Gemeinden oder Industriebetriebe, sind historisch gewachsen und deshalb nicht immer optimal hinsichtlich der individuellen Ziele des Systembetreibers ausgelegt. Meist existieren mehrere Möglichkeiten, ein System hinsichtlich der gesetzten Ziele zu optimieren. Zur Ermittlung der Optionen ist zunächst eine detaillierte Analyse des Systems hinsichtlich seines Optimierungspotentials notwendig: Der vorgestellte Ansatz besteht aus einer Voranalyse und einer Detailanalyse. Die Voranalyse basiert auf dem Residuallastgang, den jeder Systembetreiber von seinem Netzbetreiber erhält. Es werden unter anderem kritische Zeiträume identifiziert und erste Aussagen zu vorhanden Lastspitzen und Flexibilitäten abgeleitet. Die folgende Detailanalyse berücksichtigt individuelle Messungen einzelner Betriebsmittel. Innerhalb der in der Voranalyse identifizierten Zeiträume werden die gemessenen Lastprofile individueller Verbraucher hinsichtlich ihres Verschiebungspotentials untersucht.

**Keywords:** Energiesysteme, Optimierung, Potential, Lastprofil

## **1 Motivation und Zielsetzung**

Ein Energiesystem wird durch seine Systemkomponenten und -grenzen definiert und kann beispielsweise eine Gemeinde, oder ein Industriebetrieb sein. Um den Ausbau elektrischer Energiesysteme, beispielsweise durch regenerative Energien vor dem Hintergrund der Energiewende, optimal zu gestalten, sind detaillierte Analysen der vorhandenen Infrastruktur erforderlich. Mit der softwaregestützten Analyse und Optimierung industrieller Energiesysteme befasst sich beispielsweise TOP-Energy [1], während sich RE<sup>3</sup>ASON [2] vor allem auf städtische Energiesysteme konzentriert. Die optimale Auslegung eines jeden Systems ist dabei abhängig von dessen lokalen Gegebenheiten und den individuellen Vorgaben und Zielen des Systembetreibers (Energiekosten, Energieautarkie, CO<sub>2</sub>-Emission, Platzbedarf etc.). Grundsätzlich gibt es verschiedene Möglichkeiten der Optimierung eines Systems hinsichtlich der genannten Ziele. Die Reduktion der Spitzenlast, beispielsweise durch Lastverschiebung oder den Einsatz von Speichern, verringert den an den Netzbetreiber zu entrichtenden Leistungspreis. Eine gesteigerte Nutzung selbst erzeugter Energie, durch den Zubau von Erzeugungsanlagen und oder Speichern, erhöht wiederum den Autarkiegrad. Je nach Priorisierung der Ziele variiert die Auslegung der einzelnen Systemkomponenten und somit das Optimum eines Systems.

Ziel des Projektes TIMELESS ist die Entwicklung eines übertragbaren Prozesses zur Analyse von elektrischen Energiesystemen und zur Bewertung vorhandener Optimierungspotentiale. Dabei werden sowohl Aus- und Neubaumaßnahmen als auch Anpassungen der bestehenden Infrastruktur berücksichtigt. Der vorläufige Prozess wird in ‚Prozess zur modellbasierten Analyse und Optimierung elektrischer Energiesysteme‘ [3] detailliert vorgestellt. Ein Teil des Prozesses, die systematische Identifizierung vorhandener Optimierungspotentiale, ist Thema dieses Beitrags und wird im Folgenden anhand eines Referenzsystems, der Bio-Bäckerei Gürtner, beschrieben. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Reduktion auftretender Lastspitzen, wobei die Spitzenlastreduktion bevorzugt durch die optimale Ausnutzung der bestehenden Infrastruktur und nicht durch Aus- oder Neubau erfolgen soll.

## 2 Referenzsystem

Der Hauptsitz der Bio-Bäckerei Gürtner befindet sich in Oberroth im Landkreis Dachau. Die Geschäftsführung legt großen Wert auf Nachhaltigkeit und strebt einen möglichst umweltfreundlichen und ressourcensparenden Backbetrieb an. Durch die Optimierung des Betriebs soll unter anderem ein möglichst hoher Autarkiegrad erreicht werden.

Neben einem Verkaufsbereich mit Café zählen Lager-, Gär- und Kühlräume, Backstuben, ein Getreidespeicher mit Silos und Mühlen sowie ein Liefer- und Ladebereich zum Hauptsitz der Bio-Bäckerei. Weitere Standorte, die täglich von der betriebseigenen Fahrzeugflotte beliefert werden, befinden sich in und um München. Ein Teil der Fahrten wird bereits mit elektrisch betriebenen Transportern ausgeführt, wobei der verstärkte Einsatz von Elektrofahrzeugen geplant ist. Am Hauptsitz der Bio-Bäckerei wird neben den zum Backbetrieb benötigten Anlagen (Verbrauchern) eine Photovoltaik-Anlage (PV) mit einer installierten Leistung von 23 Kilowatt peak (kWp) betrieben. Die erzeugte Energie der PV-Anlage wird bevorzugt direkt genutzt und nicht ins Netz eingespeist. Eine Hackschnitzelheizung versorgt neben den Backöfen ein Nahwärmenetz.

## 3 Datengrundlage

Die zur Analyse verwendeten Daten werden direkt vom Netzbetreiber zur Verfügung gestellt oder können durch Messungen individuell erhoben werden. Unter anderem wird der Jahreslastgang der Residuallast des Systems betrachtet. Der zeitliche Verlauf der Residuallast wird vom Netzbetreiber direkt am Netzanschlusspunkt (PCC) gemessen und setzt sich zu jedem Zeitpunkt aus der Gesamtlast und -erzeugung des Systems zusammen. Neben dem Residuallastgang werden im Folgenden auch Lastprofile einzelner wesentlicher Verbraucher und das Erzeugungsprofil der bestehenden PV-Anlage berücksichtigt.

Der vorliegenden Analyse des Referenzsystems der Bio-Bäckerei liegen individuell gemessene zeitliche Leistungsverläufe von 19 Einzelverbrauchern zugrunde. Die verwendeten Messgeräte liefern Messwerte mit einer zeitlichen Auflösung von 200 ms, unter anderem den Wirkleistungsbezug der angeschlossenen Verbraucher. Die Messungen werden über die ebenfalls erfasste Netzfrequenz synchronisiert. Die gemessenen Verbraucher wurden anhand von Kundenbefragungen und Anlagenbegehungen sowie einer ersten Analyse durch einen Energieberater, hinsichtlich ihrer Relevanz für den Energieverbrauch abgeschätzt und

als Hauptverbraucher des Referenzsystems identifiziert. Summiert über den zweiwöchigen Messzeitraum entsprechen sie rund 54 % des Gesamtverbrauchs der Bio-Bäckerei.

Für die weitere Analyse der Messwerte werden 15-Minuten-Mittelwerte verwendet, da die vom Netzbetreiber erhältlichen und für die jährliche Abrechnung verwendeten Lastgangdaten in dieser Auflösung vorliegen. Die Analyse von Daten mit höherer zeitlicher Auflösung kann die Genauigkeit der Ergebnisse gegebenenfalls erhöhen, da das zeitliche und technische Verhalten individueller Systemkomponenten besser erkennbar ist.

Um die Flexibilität einzelner Betriebsmittel bewerten zu können, werden zusätzlich Informationen zu deren technischer Betriebsweise benötigt. Diese umfassen beispielsweise den Leistungsbedarf, die Art der Ansteuerung und die Betriebszeiträume des jeweiligen Betriebsmittels und werden in Rücksprache mit dem Systembetreiber erhoben.

## **4 Voranalyse anhand des Residuallastgangs**

Die Voranalyse basiert auf dem vom Netzbetreiber erhältlichen Jahreslastgang der Residuallast eines Systems. Ziel der Voranalyse ist es, möglichst früh erste Abschätzungen bezüglich vorhandener Optimierungspotentiale treffen zu können. Da für die Voranalyse neben dem Jahreslastgang keine weiteren Daten, beispielsweise aus eigenen Messungen, benötigt werden, kann sie unabhängig von der individuellen Dokumentations- beziehungsweise Datenlage des betrachteten Systems durchgeführt werden. Die weitere Datenerfassung, beispielsweise durch ergänzende Messungen, kann somit basierend auf den Ergebnissen der Voranalyse gestaltet werden.

Während der Voranalyse werden zunächst sowohl die auftretenden Leistungsspitzen der Residuallast als auch die Zeiträume, zu denen diese vorkommen, betrachtet. Im Anschluss erfolgt eine erste Identifizierung vorhandener Flexibilitäten.

### **4.1 Analyse des Jahreslastgangs**

Im ersten Schritt der Voranalyse wird der maximale Leistungswert der Residuallast (Spitzenlast) eines Energiesystems innerhalb des Betrachtungszeitraums, hier ein Jahr, ermittelt. Mithilfe einer Jahresdauerlinie wird zudem festgestellt, wie lange das System welche Leistung benötigt beziehungsweise mit welcher Häufigkeit die einzelnen Leistungswerte auftreten. Da die Leistungsspitzen ausschlaggebend für den zu entrichtenden Leistungspreis des Energiesystems sind und sie das Netz zudem stärker beanspruchen, sollen sie gesenkt, beziehungsweise auf einen Maximalwert begrenzt werden. Aus der Häufigkeit und der zeitlichen Verteilung aller auftretenden Leistungswerte und dem Gesamtlastgang kann ein realistischer Wert für eine solche Leistungsbegrenzung bestimmt werden. Dieser ist abhängig von der Höhe der auftretenden Leistungsspitzen und den Verschiebungspotentialen vorhandener Betriebsmittel. Es gilt zu bestimmen, in welchem Maß sich die auftretenden Leistungsspitzen, beispielsweise durch Einsatz von Flexibilitäten, tatsächlich senken lassen.

Anhand der Jahresdauerlinie der Residuallast der Bio-Bäckerei (vgl. Abbildung 1, links) werden die Spitzenlast und die Häufigkeit hoher Leistungswerte während des Betrachtungszeitraums identifiziert. Für das Referenzsystem wurde ein abrechnungsrelevanter 15-Minuten-Mittelwert von 95 kW identifiziert. Auch ist in Abbildung 1 zu erkennen, dass hohe Leistungswerte im Referenzbetrieb nur vergleichsweise selten

auftreten. Im Beispieljahr wurden nur 35 der 35.040 erfassten 15-Minuten-Intervalle mit einer gemittelten Leistung über 85 kW gemessen, das entspricht 0,1 % der Zeit. Dieser Wert liegt circa 10 kW unter der auftretenden Spitzenlast und würde als Ziel-Spitzenleistung bei einem zu entrichtenden Leistungspreis von 80 Euro pro kW bereits eine jährliche Einsparung von 800 Euro bedeuten.

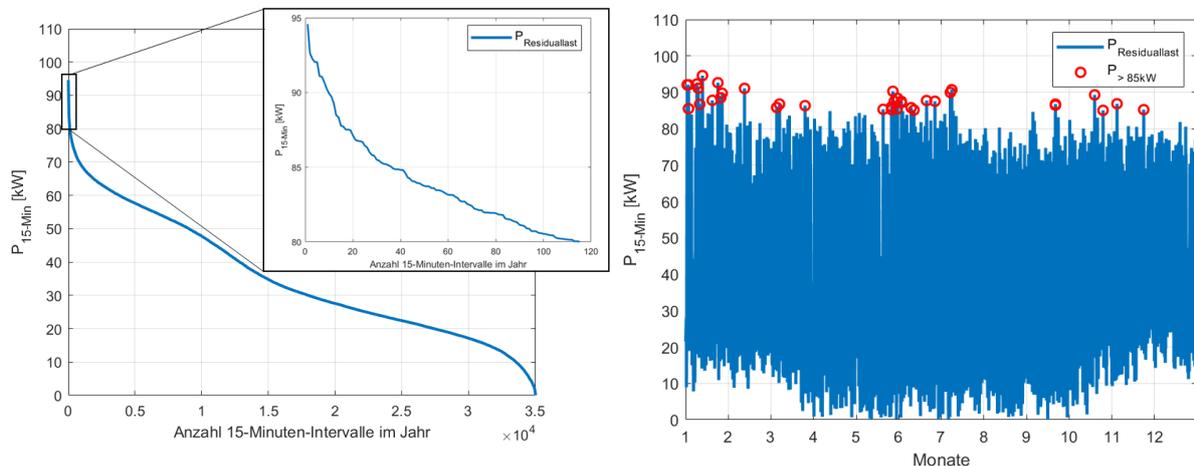


Abbildung 1: Analyse des Jahreslastgangs der Residuallast der Bio-Bäckerei. Links: Jahresdauerlinie der Residuallast zur Identifizierung vorhandener Leistungsspitzen. Rechts: Zeitlicher Verlauf des Jahreslastgangs der Residuallast inklusive auftretender Leistungswerte über 85 kW.

Um die Residuallast unter die definierte Leistungsbegrenzung senken zu können, müssen zunächst die Zeitpunkte ermittelt werden, zu denen sie nahe oder über der Ziel-Spitzenleistung liegt. Hierzu wird in einem ersten Schritt der zeitliche Verlauf der Residuallast über den gesamten Betrachtungszeitraum hinweg analysiert.

Wann die Residuallast der Bio-Bäckerei innerhalb des Beispieljahres beispielsweise Werte über 85 kW annimmt, wird in Abbildung 1 ersichtlich (rechts). Die Leistungsspitzen treten scheinbar zufällig und unabhängig von der Jahreszeit auf (vgl. Abbildung 1 rechts ‚rot‘). Dass trotzdem eine Regelmäßigkeit besteht und die Lastspitzen nicht vollkommen zufällig auftreten, wird erst bei der folgenden Analyse der Tagesverläufe der Residuallast deutlich.

Zur Analyse der Tagesverläufe werden zunächst sämtliche Tage innerhalb des Betrachtungszeitraums in einem Diagramm aufgetragen. Hierbei können gegebenenfalls verschiedene Verlaufsformen, wie beispielsweise Betriebs- und Ruhetage, unterschieden werden. Für die Senkung der Leistungsspitzen auf oder unter die festgelegte Ziel-Spitzenleistung ist die Identifizierung des Tageszeitraums, in dem die Leistungsspitzen typischerweise auftreten (kritischer Zeitbereich) nötig. Innerhalb dieses Zeitraums soll das Lastverschiebungspotential aktiver Verbraucher anschließend identifiziert und zur Senkung der Residuallast genutzt werden.

In Abbildung 2 sind sämtliche Tagesverläufe der Residuallast der Bio-Bäckerei innerhalb des Beispieljahres sowie die Mittelwerte der Typtage für Betrieb- ( $P_{avg,Betrieb}$  ‚rot‘) und Ruhetag ( $P_{avg,Ruhe}$  ‚grün‘) aufgetragen. Nachts, das heißt zwischen circa 22:00 Uhr und 10:00 Uhr kommt es an Betriebstagen zu erhöhten Leistungsbezügen, weshalb der Zeitbereich in der Abbildung als kritisch markiert ist. Innerhalb dieses Zeitbereichs treten die absoluten Spitzenwerte der Residuallast zwischen 22:00 Uhr und 1:00 Uhr auf. Im Folgenden wird daher

vor allem dieser Abschnitt des kritischen Zeitbereichs näher betrachtet und analysiert. Die Tagesverläufe werden dabei jeweils von 12:00 Uhr eines Betriebstags bis 12:00 Uhr des nächsten Betriebstags dargestellt, um den gesamten kritischen Zeitbereich zusammenhängend abbilden zu können. Innerhalb des kritischen Zeitbereichs entspricht die Residuallast dem reinen Lastverlauf, da die im Referenzsystem vorhandene PV-Anlage nachts keinen Einfluss auf die maximale Leistung hat.

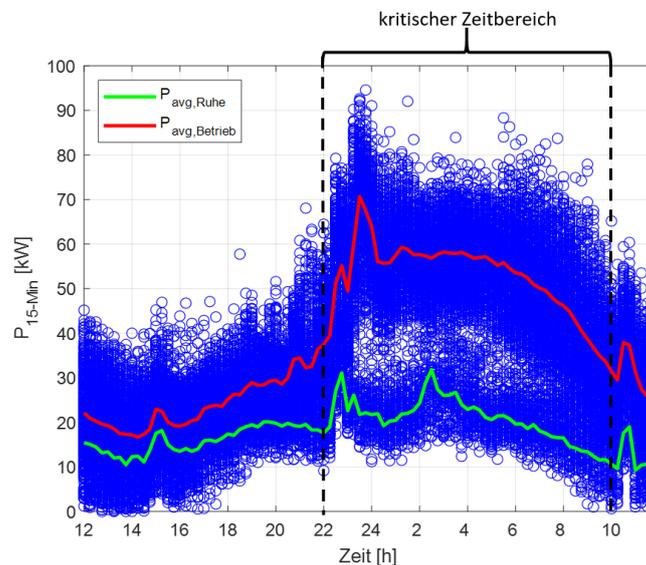


Abbildung 2: Gesamte Tagesverläufe der Residuallast der Bio-Bäckerei zur Identifizierung kritischer Zeitbereiche.

Neben den kritischen Zeiträumen muss die maximale Anzahl aufeinanderfolgender 15-Minuten-Intervalle mit hohen Leistungswerten im Betrachtungszeitraum identifiziert werden. Basierend darauf werden mögliche Flexibilitäten hinsichtlich ihrer notwendigen Einsatzdauer bestimmt. Hierzu wurden mehrere Zeitschrittsimulationen unter Einbeziehung des Residuallastverlaufs durchgeführt. Dabei wurden flexible Verbraucher, mit einer für jeden Simulationslauf festgelegten Leistung  $P_{la}$ , bei Überschreiten definierter Grenzen in direkt nachfolgende Zeiten mit geringerem Leistungsbezug verschoben. Beispielsweise wurde für eine Ziel-Spitzenleistung von  $P_{max} = 85$  kW eine Flexibilität mit  $P_{la} = 10$  kW bei einer Residuallast  $P_{res} > 85$  kW aktiviert, und in direkt folgende Zeiten verschoben, in welchen die Residuallast inklusive der zusätzlichen Flexibilität die Ziel-Spitzenleistung nicht überschreitet.

Das Ergebnis der Simulation ist in Abbildung 3 zusammengefasst. In der linken Darstellung ist die Anzahl der zusammenhängenden (15-Minuten) Aktivierungen der Flexibilität aufgezeigt, um eine Spitzenleistungsreduktion von  $P_{la}$  zu erreichen. Die rechte Darstellung zeigt die Anzahl der Aktivierungen während des Betrachtungszeitraums als Funktion von  $P_{la}$  auf. Für eine Ziel-Spitzenleistung von  $P_{max} = 85$  kW muss eine 10 kW Flexibilität mindestens zwei 15-Minuten-Zeiträume hintereinander, und im Betrachtungszeitraum von einem Jahr für insgesamt 35 15-Minuten-Zeiträume zur Verfügung stehen. Ein Batteriespeicher mit einer Leistung von 10 kW und einer Kapazität von 5 kWh wäre eine technisch geeignete Flexibilität für diese Anforderung.

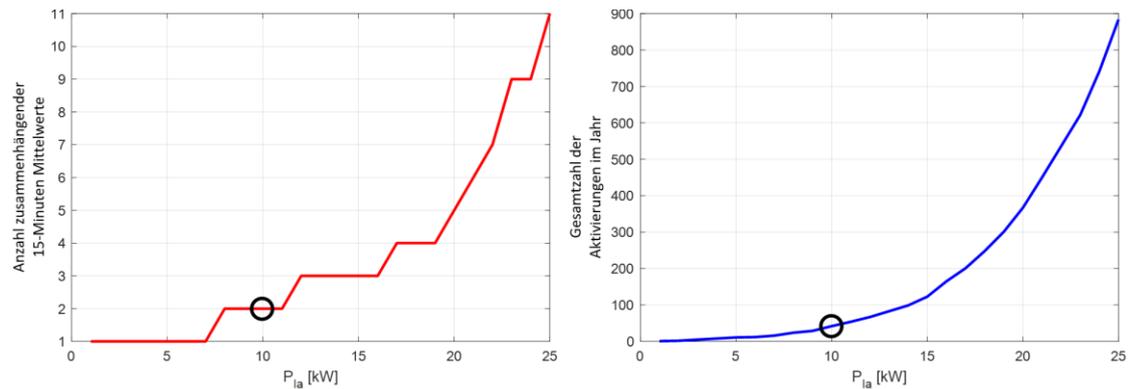


Abbildung 3: Bewertung möglicher Flexibilitäten für das Ziel der Spitzenlastreduktion. Links: Anzahl zusammenhängender 15-Minuten-Mittelwerte als Funktion der Leistungsreduktion. Rechts: Gesamtzahl der „Aktivierungen“ als Funktion der Leistungsreduktion.

## 4.2 Identifizierung vorhandener Flexibilitäten

Innerhalb der kritischen Zeiträume müssen vorhandene Flexibilitäten identifiziert werden, die genutzt werden können, um die Residuallast zu senken und Leistungsspitzen zu vermeiden. Die folgenden Möglichkeiten bestehen generell:

- Lastsenkung durch Lastverschiebung
- Lastsenkung durch Speichereinsatz
- Erhöhung der eigenen Erzeugung durch Ausbau oder Effizienzsteigerung

Durch die Erhöhung der eigenen Erzeugung innerhalb der kritischen Zeiträume kann die Residuallast gesenkt werden. Dabei muss jedoch darauf geachtet werden, dass die Erzeugungsleistung verlässlich innerhalb der kritischen Zeiträume zur Verfügung steht. Das Referenzsystem der Bio-Bäckerei verfügt sowohl über eine PV-Bestandsanlage als auch über PV-Ausbauf Flächen. Da die kritischen Zeiträume im Fall der Bio-Bäckerei jedoch stets nachts oder früh morgens auftreten, bietet die Erhöhung der PV-Erzeugung, ohne den zusätzlichen Einsatz von Speichern, kein nutzbares Potential zur Senkung der Leistungsspitzen.

Energiespeicher können generell genutzt werden, um bekannte Leistungsspitzen zu senken und werden sowohl auf Quartiers-Ebene [4] als auch in Industriebetrieben [5] eingesetzt. Sie stellen die nötige Leistung zur Begrenzung der Residuallast innerhalb der kritischen Zeiträume bereit und werden wiederum zu einem anderen Zeitpunkt geladen. Idealerweise dann, wenn Erzeugungsüberschüsse bestehen oder die Residuallast deutlich unter dem Wert der Leistungsbegrenzung liegt. Durch intelligente Steuerung der Lade- und Entladezeiten können Speicher somit optimal im Sinne der Leistungsbegrenzung eingesetzt werden.

Da jedoch sowohl der Einsatz von Speichern als auch der Aus- beziehungsweise Neubau von Erzeugungsanlagen mit hohen Investitionskosten verbunden ist, werden zunächst nur Flexibilitäten innerhalb der bereits vorhandenen Infrastruktur betrachtet, um diese optimal zu nutzen. Der Fokus der weiteren Betrachtungen liegt deshalb auf der Identifizierung und Analyse vorhandener Lastverschiebungspotentiale in Form zeitlich flexibler Verbraucher.

Ziel der Lastverschiebung ist es, den Betrieb relevanter Verbraucher so zu verschieben, dass die Residuallast dauerhaft unterhalb der Leistungsbegrenzung, im Beispiel 85 kW, liegt. Im Idealfall werden flexible Lasten dabei so verschoben, dass ihr Betrieb in nicht kritische Zeitbereiche mit Erzeugungsüberschuss fällt. Zusätzlich ist eine automatisierte Überwachung

des Leistungsbezugs empfohlen, welche gegebenenfalls Verbraucher mit niedriger Priorität bei kritischem Leistungsbezug deaktiviert.

## 5 Detailanalyse relevanter Verbraucher

Relevante Verbraucher sind Verbraucher, die regelmäßig innerhalb der kritischen Zeiträume aktiv sind und deren Betrieb

- zeitlich flexibel und unabhängig von anderen Verbrauchern oder Prozessen,
- mit verminderter Leistung über einen längeren Zeitraum oder
- mit erhöhter Leistung zu einem anderen Zeitpunkt möglich ist.

Ihr Betrieb kann also idealerweise so angepasst werden, dass ihr Verbrauch auf die Zeitpunkte mit geringerer Momentanleistung beziehungsweise Erzeugungsüberschuss fällt.

### 5.1 Identifizierung relevanter Verbraucher

Der erste Schritt zur Identifizierung relevanter Verbraucher erfolgt in Rücksprache mit dem Systembetreiber und unter Berücksichtigung bereits bekannter Daten. Beispielsweise Prozess- oder Betriebspläne können zur Identifizierung relevanter Verbraucher, die regelmäßig innerhalb der kritischen Zeitbereiche aktiv sind, genutzt werden. Sind die relevanten Verbraucher bestimmt, werden diese über eine anhand der Voranalyse festgelegte Zeitspanne gemessen.

Für die weitere Betrachtung der relevanten Verbraucher muss ihr Betriebsverhalten anhand der gesammelten Messergebnisse genauer analysiert werden. Beispielsweise muss festgestellt werden, ob sie tatsächlich regelmäßig innerhalb der kritischen Zeiträume aktiv sind und ob ein erkennbares Verhaltensmuster vorliegt. Verbraucher, die nur sporadisch oder gar nicht innerhalb der kritischen Zeiträume betrieben werden, bieten zwar kein Potential hinsichtlich der Lastverschiebung, können aber noch relevant für die Identifizierung weiterer Optimierungsmaßnahmen sein.

Im Fall der Bio-Bäckerei erstreckt sich der Messzeitraum über 14 Tage. Aus der Voranalyse geht hervor, dass sich die gesammelten Tagesverläufe in zwei Typtage einteilen lassen (Betriebs- und Ruhetage, vgl. Abbildung 2), wobei sich eine reguläre Woche aus sechs Betriebs- und einem Ruhetag zusammensetzt. Der Messzeitraum über zwei Wochen erfasst somit zwölf Betriebs- und zwei Ruhetage.

In Abbildung 4 wird exemplarisch der Leistungsbedarf von vier gemessenen Verbrauchern der des Referenzbetriebs dargestellt. Es wird der gesamte zweiwöchige Messzeitraum abgebildet, wobei die einzelnen Tage erkennbar sind. Anhand des Farbverlaufs ist zu erkennen, wann der Leistungsbedarf der einzelnen Verbraucher besonders hoch (‚gelb‘) beziehungsweise niedrig (‚blau‘) ist. Dabei sind nicht die genauen Leistungswerte, sondern deren zeitlicher Verlauf von Bedeutung. Die Verbraucher 1, 2 und 3 sind jeweils innerhalb des Zeitfensters der Lastspitzen (22:00 Uhr bis 1:00 Uhr) aktiv und demnach relevant für eine mögliche Lastverschiebung. Verbraucher 4 ist nicht innerhalb des kritischen Zeitbereichs aktiv und damit nicht relevant.

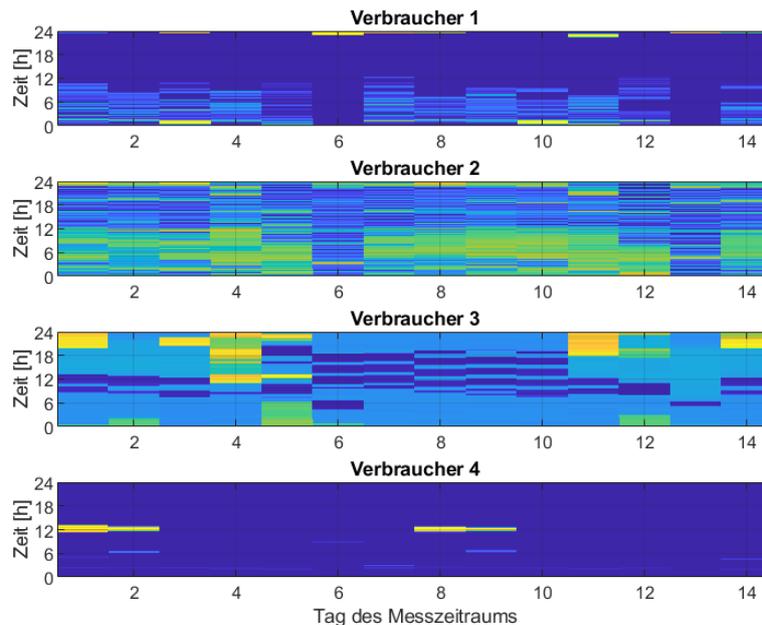


Abbildung 4: Darstellung der Messdaten einzelner Messungen zur Identifizierung relevanter Verbraucher.

## 5.2 Analyse der relevanten Verbraucher

Um das tatsächliche Lastverschiebungspotential der relevanten Verbraucher zu ermitteln, wird ihr Betrieb hinsichtlich der folgenden Kriterien betrachtet:

- Zeitlicher Leistungsverlauf (getaktet oder impulsförmig)
- Ansteuerung (manuell oder automatisiert)
- Flexibilität (Abhängigkeit von anderen Verbrauchern oder dem Gesamtprozess)

In Abbildung 5 sind der zeitliche Verlauf der Residuallast und die Verläufe der Einzelmessungen („Verbraucher 1-4“) in abrechnungsrelevanten 15-Minuten-Mittelwerten exemplarisch für einen Betriebstag des Messzeitraums dargestellt.

Durch das Zusammentreffen der Leistungsspitzen mehrerer relevanter Verbraucher innerhalb des kritischen Zeitbereichs entsteht kurz vor 24:00 Uhr eine Leistungsspitze, die einen Wert von über 90 kW erreicht. Die Leistungsspitze wird hauptsächlich von Verbraucher 1 („magenta“) und Verbraucher 2 („grün“) verursacht. Beide weisen innerhalb des kritischen Zeitbereichs ihr Tages-Maximum auf. Zudem ist der Leistungsbedarf von Verbraucher 3 („dunkelblau“) im selben Zeitbereich leicht erhöht.

Eine komplette Abschaltung einzelner Verbraucher würde die Residuallast im kritischen Zeitbereich signifikant senken, sie jedoch zu einem anderen Zeitpunkt gleichermaßen erhöhen. Dadurch können gegebenenfalls neue Leistungsspitzen entstehen. Sinnvoller als die komplette Abschaltung und Verschiebung einzelner Lasten ist es daher, den Leistungsbedarf mehrerer Verbraucher zeitlich aufeinander abzustimmen und die Leistungsspitzen somit auszugleichen. Da dafür der Eingriff in das Betriebsverhalten eines oder mehrerer Verbraucher nötig ist, werden sie im Folgenden bezüglich ihres Verschiebungspotentials untersucht.

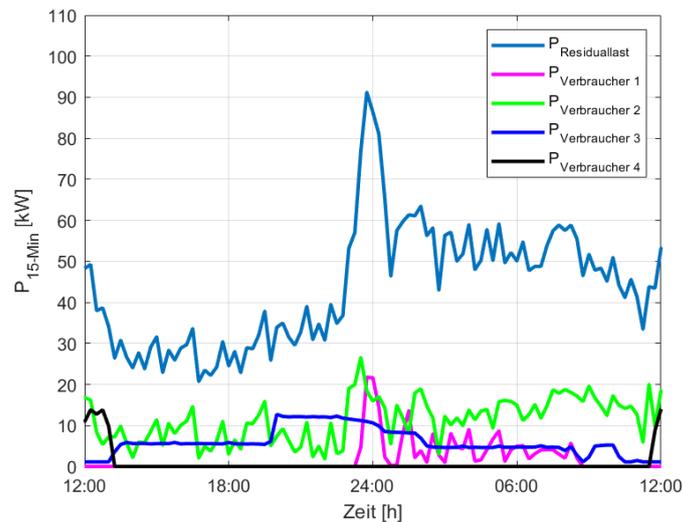


Abbildung 5: Darstellung der zeitlichen Verläufe der Residuallast und individueller Verbraucher der Bio-Bäckerei über 24 Stunden mit kritischer Leistungsspitze.

Der zeitliche Verlauf von Verbraucher 3 („dunkelblau“) bewegt sich dauerhaft in einem Leistungsband von 1 kW bis 12 kW. Ob eine komplette Abschaltung oder automatisierte Steuerung zur Lastreduktion innerhalb des kritischen Zeitbereichs technisch und realisierbar ist, muss zunächst mit dem Systembetreiber abgeklärt werden. Dabei muss auch die durch Verschiebung entstehende Leistungserhöhung zu einem späteren oder früheren Zeitpunkt berücksichtigt werden. Verbraucher 2 („grün“) bewegt sich dauerhaft in einem Leistungsband von 3 kW bis 26 kW, womit es sich um den Verbraucher mit dem höchsten individuell gemessenen Leistungsbedarf handelt. Auch hier ist zu prüfen, ob eine komplette Abschaltung beziehungsweise eine automatisierte Reduktion des Leistungsbedarfs innerhalb des kritischen Zeitbereichs realisierbar ist. Verbraucher 1 („magenta“) weist im kritischen Zeitbereich kurzzeitig einen starken Leistungsbedarf von 21 kW auf. Im Gegensatz zu Verbraucher 2 und 3 befindet sich Verbraucher 1 nicht im Dauerbetrieb. Eine komplette Abschaltung ist daher rein technisch möglich. Jedoch ist anzunehmen, dass der Betrieb des Verbrauchers aus betrieblichen beziehungsweise prozesstechnischen Gründen gezielt zu diesem Zeitpunkt stattfindet. Verbraucher 4 („schwarz“) wird nicht im kritischen Zeitbereich betrieben und bietet kein Verschiebungspotential. Jedoch muss er gegebenenfalls bei der Verschiebung anderer Verbraucher berücksichtigt werden, um keine neue Leistungsspitze zu erzeugen.

### 5.3 Verbesserter Betrieb der relevanten Verbraucher

Abbildung 6 zeigt die auf Abbildung 5 folgenden 24 Stunden. Dieser Tag dient als Mustertag für die Spitzenlastreduktion durch Anpassung der zeitlichen Verläufe des Leistungsbedarfs mehrerer Verbraucher. Ähnlich wie in Abbildung 5 weist Verbraucher 1 („magenta“) sein Maximum im kritischen Zeitbereich auf, diesmal um kurz nach 24:00 Uhr. Dies bestätigt die Annahme, dass der Verbraucher gezielt gegen 24:00 Uhr betrieben wird. Verbraucher 2 („grün“) weist im kritischen Zeitbereich nicht wie zuvor eine Leistungsspitze, sondern einen vergleichsweise niedrigen Leistungsbezug von 3 kW auf. Auch der Leistungsbezug von Verbraucher 3 („dunkelblau“) ist innerhalb des kritischen Zeitbereichs niedriger als zuvor. Insgesamt ist somit keine signifikante Leistungsspitze der Residuallast erkennbar und die

Spitzenlast des Tags liegt mit circa 75 kW sogar deutlich unter der exemplarischen Ziel-Spitzenleistung von 85 kW.

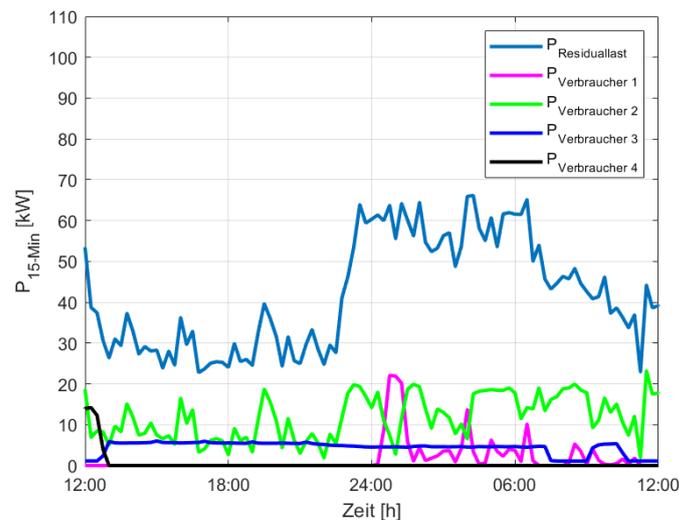


Abbildung 6: Darstellung der zeitlichen Verläufe der Residuallast und individueller Verbraucher der Bio-Bäckerei über 24 Stunden bei optimierter Betriebsweise.

Durch eine gezielte Steuerung der Verbraucher könnten die in Abbildung 6 zufällig auftretenden zeitlichen Verläufe regelmäßig realisiert werden. Die dauerhaft betriebenen Verbraucher 2 und 3 müssten lediglich zu den Zeiten, zu denen Verbraucher 1 betrieben wird, gedrosselt und zu einem anderen Zeitpunkt mit erhöhter Leistung betrieben werden. Die intelligente Automatisierung großer, dauerhaft betriebener Verbraucher mit variablem Leistungsband trägt somit einen wesentlichen Beitrag zur Vermeidung hoher Leistungsspitzen bei. Dadurch wird die Reduzierung der Leistungsspitzen ohne große Investitionskosten für Speicher oder den Aus- beziehungsweise Neubau von Erzeugungsanlagen erreicht. Bei der Realisierung ist jedoch darauf zu achten, dass der zum Ausgleich benötigte erhöhte Leistungsbedarfs einzelner Verbraucher keine erneuten Leistungsspitzen zu einem anderen Zeitpunkt erzeugt.

## 6 Schlussfolgerungen

Die vorgestellten Abläufe zeigen einen möglichen Ansatz zur Identifizierung von Optimierungspotentialen. Durch eine Voranalyse auf Grundlage des, für jedes Energiesystem vom Netzbetreiber erhältlichen, Jahreslastgangs kann eine erste Aussage zur Höhe der auftretenden Leistungsspitzen getroffen werden. Außerdem können die Zeitpunkte, zu denen diese Spitzen auftreten, eingegrenzt werden. Während der Voranalyse werden zudem vorhandene Flexibilitäten eines Energiesystems zur Spitzenlastsenkung identifiziert, beispielsweise Lastverschiebung, Speichereinsatz oder die Erhöhung der eigenen Erzeugung. Durch die Eingrenzung des kritischen Zeitbereichs, können zusätzliche Messungen gezielt durchgeführt und zur Identifizierung der relevanten Verbraucher genutzt werden. Die Analyse der Betriebsweise dieser Verbraucher deckt mögliche Lastverschiebungspotentiale auf.

Aufbauend auf den vorliegenden Ergebnissen erfolgt die erneute Rücksprache mit dem Kunden, der Bio-Bäckerei. Es gilt zu klären, welche der technisch sinnvoll einsetzbaren Verbraucher auch im realen Betriebsablauf optimiert werden können. Die zeitliche und

prozesstechnische Flexibilität der Verbraucher wird dabei vom Kunden vorgegeben. Basierend auf den Kundenvorgaben wird die Entwicklung eines Algorithmus zur automatisierten Identifizierung vorhandener Lastverschiebungspotentiale unter Berücksichtigung zusätzlicher Optionen, wie beispielsweise dem unterstützenden Einsatz von Speichern oder der Integration von Elektrofahrzeugen, angestrebt. Eine Herausforderung liegt dabei in der Identifikation der optimalen Betriebsweise jedes einzelnen Verbrauchers ohne Beeinträchtigung des Gesamtprozesses. Eine weitere Herausforderung besteht in der Gewährleistung der Übertragbarkeit des vorgestellten Analyseprozesses im Rahmen des Projektes TIMELESS.

## 7 Danksagung

Die Autoren danken Herrn Gürtner und seinen Mitarbeitern für die Bereitschaft, seine Bio-Bäckerei als Referenzbetrieb zur Verfügung zu stellen, für die Bereitstellung der notwendigen Informationen und die Möglichkeit, umfangreiche Messungen vor Ort durchzuführen. Herrn Dr. Wolfgang Christl, Beauftragter für Innovation und Technologie der Handwerkskammer für München und Oberbayern, danken die Autoren für zahlreiche Informationen und Impulse zu diesem Projekt.

## 8 Literatur

- [1] E. Augenstein, D. Gürzenich, I. Kuperjans, und G. Wrobel, „TOP-Energy -- Softwaregestützte Analyse und Optimierung industrieller Energieversorgungssysteme“, 2004.
- [2] K. Mainzer, „Analyse und Optimierung urbaner Energiesysteme - Entwicklung und Anwendung eines übertragbaren Modellierungswerkzeugs zur nachhaltigen Systemgestaltung“, *Karlsruher Inst. Für Technol. KIT*, 2019.
- [3] V. Barta, C. Vogel, M. Eggemann, S. Uhrig, und S. Schramm, „Prozess zur modellbasierten Analyse und Optimierung elektrischer Energiesysteme“, Januar 2020.
- [4] T. Wawer, K.-M. Griese, D. Halstrup, und M. Ortmann, „Stromspeicher im Quartier“, *Z. Für Energiewirtschaft*, Bd. 42, Nr. 3, S. 225–234, September 2018, doi: 10.1007/s12398-018-0230-6.
- [5] D. Halstrup und M. Schriever, „Zur Akzeptanz von Stromspeichern in Unternehmen“, *Z. Für Energiewirtschaft*, Bd. 42, Nr. 1, S. 13–20, März 2018, doi: 10.1007/s12398-017-0215-x.