

Hochschule Flensburg

B A C H E L O R – T H E S I S

Thema: Optimierung und Automatisierung der Energiedatenauswertung durch gezielte und spezifische Energiedatenerfassung/-verarbeitung

von: Matthias Sebastian Paetzke

Matrikel-Nr.: 611157

Studiengang: Energiewissenschaften

Betreuer/in und
Erstbewerter/in: Prof. Dr.-Ing. Dirk Volta

Zweitbewerter/in: Prof. Dr. rer. nat. Tim Aschmoneit

Ausgabedatum: 15.1.2020

Abgabedatum: 13.3.2020

Ich versichere, dass ich die vorliegende Thesis ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen benutzt habe.

Unterschrift des Verfassers

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen	1
1 Einleitung	3
1.1 Aufgabenstellung	4
2 Grundlagen der Energiedatenauswertung	5
2.1 Energieform	5
2.2 Bilanzierung und Kenngrößen.....	5
3 Qualität der Energiedaten	6
3.1 Verfahren zur Energieverbrauchsannäherung	7
3.2 Lastgänge	8
3.2.1 Energiedatenintervall (1)	9
3.3 Verbraucherklassifizierung.....	10
3.3.1 Beleuchtung	10
3.3.2 Elektrische Antriebe	11
4 Effizienzsteigerung und Optimierung	11
4.1 Ansätze	11
4.2 Effizienzsteigerung.....	12
4.2.1 Akzeptanz.....	12
4.2.2 Industrie 4.0.....	13
4.2.3 NILM Methode.....	14
4.3 Einsparpotenziale	14
5 Energiedatenauswertung	15
5.1 Bilanzraum – Verbraucheranalyse –	16
5.2 Bilanzraum – Grundlast –.....	17
5.3 Automatisierter Rechendurchlauf.....	19
5.3.1 Schaltzeitverzögerung.....	22

Inhaltsverzeichnis

5.4	Ergebnis des Rechendurchlaufs.....	24
5.4.1	Varianzen der Anwendungen.....	24
5.5	Einsparungsrichtwerte.....	27
5.6	Tagesauswertung.....	28
5.7	Bilanzraum – unregelmäßige Steigung –	29
6	Spezifizierung der Energiedaten	31
6.1	Energiedatenintervall (2)	31
6.2	Zusammenfassung der Anwendung.....	34
7	Effiziente Technologien – Sensorik –	35
7.1	Beleuchtung	35
7.2	Elektrische Antriebsmotoren.....	37
8	Kritische Diskussion	42
	Tabellenverzeichnis.....	44
	Abbildungsverzeichnis.....	45
	Quellenverzeichnis	46

Formelzeichen

W	:	elektrische Energie	[Wh]
$P_{el.}$	:	elektrische Leistung	[W]
$\bar{P}_{el.}$	:	mittlere elektrische Leistung	[W]
$\bar{P}_{Grundl}$	:	mittlere elektrische Leistung der Grundlast	[kW]
$P_{Annäh}$	:	elektrische Leistung des Annäherungsverfahrens	[kW]
P_{Prog}	:	elektrische Leistung der Einsparprognose	[kW]
P_{Umsetz}	:	elektrische Leistung der Umsetzung	[kW]
P_{Anwen}	:	elektrische Leistung der Anwendung	[kW]
$P_{Abwei 1}$	:	Leistungsabweichung von $P_{Annäh}$ zu P_{Anwen}	[%]
$P_{Abwei 2}$	:	Leistungsabweichung von P_{Prog} zu P_{Umsetz}	[%]
P_{mech}	:	mechanische Leistung	[W]
$P_{Antr 1}$	:	Antriebsleistung vor der Drehzahlreduzierung	[W]
$P_{Antr 2}$	:	Antriebsleistung nach der Drehzahlreduzierung	[W]
t	:	Betriebsstunden	[h/a]
t_{Anwen}	:	Betriebsstunden der Anwendung	[h/a]
$t_{Annäh}$	:	Betriebsstunden des Annäherungsverfahrens	[h/a]
t_{Abwei}	:	Abweichung der Betriebsstunden von t_{Anwen} zu $t_{Annäh}$	[%]
$\bar{t}_{Einschl}$	:	Mittelwert der Einschaltzeit	[Uhr]
Δt_{Zeit}	:	Stunden zwischen zwei Uhrzeiten	[h]
T_P	:	Periodendauer	[min]
N	:	Anzahl	[Stück]
n_{Wochen}	:	Anzahl der Wochen in einem Jahr	[]

Formelzeichen

m	:	Steigung der elektrischen Leistung	[kW]
w	:	spezifischer Energiebedarf	$\left[\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}\right]$
A	:	Fläche	[m ²]
Φ	:	Lumen (Helligkeit)	[Lm]
E	:	Lux (Beleuchtungsstärke)	[Lx], $\left[\frac{\text{Lm}}{\text{m}^2}\right]$
η _{Bel.}	:	Lichtausbeute	$\left[\frac{\text{Lm}}{\text{W}}\right]$
η _{Antr.}	:	Wirkungsgrad Antriebsmotoren	[]
n _{d1}	:	Drehzahl vor der Drehzahlreduzierung	[s ⁻¹]
n _{d2}	:	Drehzahl nach der Drehzahlreduzierung	[s ⁻¹]
p ₁	:	Druck vor der Drehzahlreduzierung	[pa], $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m s}^2}\right]$
p ₂	:	Druck nach der Drehzahlreduzierung	[pa], $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m s}^2}\right]$

1 Einleitung

Die effiziente Nutzung der Energie gewinnt gesellschaftlich wie auch industriell zunehmend an Bedeutung. Energieintensive Unternehmen sind davon nicht ausgeschlossen und legen ihren Fokus vermehrt auf das Einsparen von Energiekosten.

Um Kosten einzusparen steht die Prozessoptimierung allerdings bislang stärker im Fokus als Investitionen in Energieeinsparmaßnahmen. Hintergrund sind die fehlenden Anreize für Unternehmen in Maßnahmen zur Energieeinsparungen zu investieren. Eine gewisse "Risikokalkulation" entsteht dem Unternehmen nämlich dadurch, dass unter Umständen Sicherheiten für eine fundierte und aussagekräftige Energieeinsparprognose fehlen.

Ist ein Unternehmen dennoch daran interessiert die Energiekosten zu senken, ist eine Analyse der IST-Situation notwendig. Energieverbräuche und Energieverläufe können u.a. im Rahmen eines internen Energiemanagementsystems oder extern durch Energieberatung ausgewertet werden. Die Energieauswertungen reichen von simplen Jahres-kosten/-verbräuchen bis hin zu komplexen Algorithmen Verfahren. Nicht selten werden die Kosten für externe Berater oder für ganze Einsparmaßnahmen durch Förderungen gesenkt. Dennoch ist die gegenwärtige Auswertung trotz Förderung nicht zwangsläufig zielführend und bewirkt für Unternehmen keine wirtschaftlich zufriedenstellenden Einsparmaßnahmen.

1.1 Aufgabenstellung

Die Thesis befasst sich mit der Optimierung und Automatisierung der Energiedatenauswertung. Es wird geprüft und veranschaulicht, dass die gegenwärtige Auswertung rechnerisch belegt und aussagekräftig ergänzt werden kann.

Auswertungsgrundlage ist ein Einzelhandelsunternehmen (Non Food) bei dem eine Analyse der Beleuchtung und der elektrischen Antriebsmaschinen (Lüftung) verdeutlicht, dass es für Unternehmen nicht zwangsläufig sinnvoll, effizient und wirtschaftlich ist ein Managementsystem, Messtechnik oder Sensorik einzuführen. Die Analyse erfolgt über den fürs Unternehmen frei zur Verfügung stehenden elektrischen Energieverbrauch (Lastgang).

Konkret werden diese Energiedaten in der vorliegenden Arbeit durch eine Reihe von speziell erarbeiteten Rechenprozessen ausgewertet (Excel). Die Anwendung hat das Ziel, den Energieverbrauch verbraucherspezifisch aufzuschlüsseln, um eine aussagekräftigere Energiebilanz zu erstellen. Anhand dieser Aufschlüsselung lässt sich durch die energetischen Kennzahlen das Einsparpotential je Verbraucher (z.B. Beleuchtung und Lüftungsmotoren) herleiten. Daraus folgt, dass die Anwendung das mögliche Einsparpotential zu jedem Verbraucher errechnet, prognostiziert und visualisiert.

Durch bereits durchgeführte Einsparmaßnahmen an den untersuchten Standorten, soll, durch Prüfung der Abweichungen zur bisherigen Auswertung, die Aussagekraft der Anwendung belegt werden. Außerdem wird die Einsparprognose der Anwendung durch die bereits umgesetzten Maßnahmen bestätigt oder widerlegt.

Die Aussagekraft und Qualität der frei zur Verfügung stehenden Energiedaten werden durch bereits durchgeführte Messungen beurteilt. Dafür wird vordergründig die Analyse vom zeitlichen Intervall der ausgegebenen Energiedaten und die Notwendigkeit von Sensoren ausgewertet. Der wirtschaftliche Aspekt, bei Implementierung von Messungen oder Sensorik, wird durch einen Mehrwert individueller Sensorik dargelegt.

2 Grundlagen der Energiedatenauswertung

Zur Verständlichen Verarbeitung müssen Fachbegriffe der Energieauswertung praktisch angewendet und definiert werden. Diese werden zunächst für die effiziente Verarbeitung fachbezogen erläutert.

2.1 Energieform

Die folgende Energiedatenauswertung bezieht sich ausschließlich auf die Endenergie des Energieträgers Strom.

Die Energieumwandlung von Endenergie zu Nutzenergie soll so effizient gestaltet werden wie es der heutigen Technik entspricht. Dies wird verdeutlicht durch den Einsatz von Beleuchtung auf Basis von Leuchtdioden (LED) und durch Optimierung von elektrischen Antriebsmotoren.

Um diese Effizienz plausibel, wissenschaftlich und aussagekräftig zu visualisieren wird die Anwendung, die entsprechenden physikalischen Einheiten errechnen, umwandeln und automatisch in Diagramme darstellen.

2.2 Bilanzierung und Kenngrößen

Vorab ist hierfür die Prüfung der folgenden Punkte erforderlich:

- Energiebilanzierungen

Obwohl die Bilanzierung von Energie grob in zwei Arten (technisch und wirtschaftlich) unterschieden werden kann, ist die wirtschaftliche Bilanzierung hier vorerst zweitrangig. Technische Systeme richten sich nach strengen räumlichen, zeitlichen, apparativen und prozesstechnischen Grenzen, um die ein- und austretenden Energiemengen eines Systems zu erfassen (vgl. Keichel [1] S. 27).

- Energiekenngrößen

Abgesehen von der generellen Nutzung von Kenngrößen, zum Vergleichen und Bewerten von Anlagen und Prozessen, ist die energetische Bewertung die wichtigste und erfolgt über den spezifischen Energiebedarf [w]. (vgl. Keichel [1] S. 25)

Um die Bilanz aussagekräftig darzustellen, ist speziell im Fall der zu beschreibenden Beleuchtungen (Lichtausbeute) und elektrischen Antriebe (Effizienzklassen) der Wirkungsgrad eine notwendige Größe bei der technischen Bilanzierung.

- Energiebilanzraum und Bilanzgrenzen

Um Bilanzräume und die Bilanzgrenzen entsprechend einzuordnen werden diese vorab klar definiert. Dem dargestellten Bilanzraum Hauptprozess (Jahresverbrauch) unterliegen intern weitere Prozessschritte (Tagesverbrauch) und Hilfsanlagen (Sensoren). Da der Ressourcenstrom (Jahresleistungsverlauf) durch die frei verfügbare Messtechnik und die Aufgabenstellung klar definiert ist, beinhaltet das betrachtete System die örtlichen, stofflichen und vor allem zeitlichen Bilanzgrenzen.

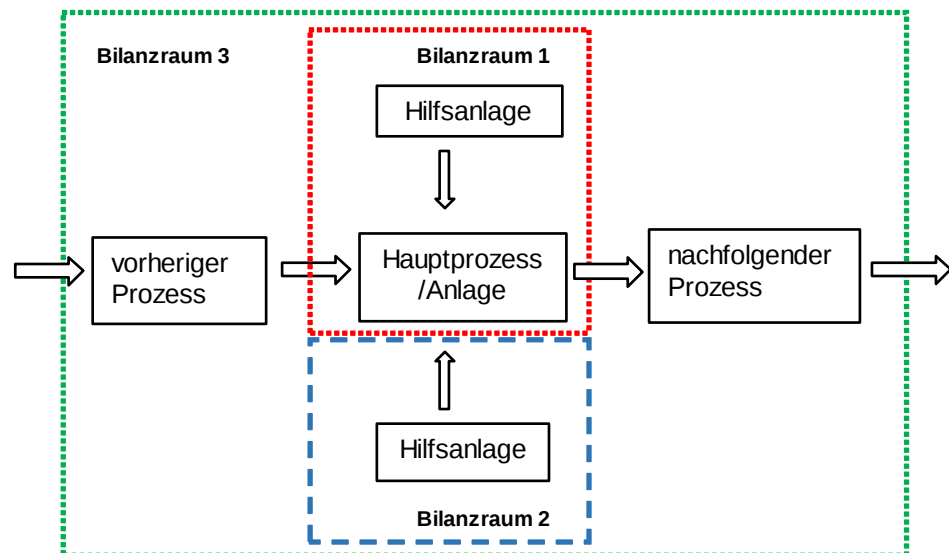


Abb. 1 Darstellung von beispielhaften Bilanzräumen (vgl. Keichel [1] S. 28)

3 Qualität der Energiedaten

Die als Ziel definierten Energieeinsparungspotenziale werden absolut zum Gesamtenergieverbrauch betrachtet. Eine Einzelbetrachtung der jeweiligen Energieträger (Strom, Erdgas, Heizöl etc.) ist zur besseren Einschätzung sinnvoll. Daher hat es sich etabliert im Unternehmen den Großverbrauch zu erschließen. Als Grundlage wird hier meist das Pareto-Prinzip angewendet. Demnach wird 80% des Energieverbrauchs durch 20% aller Verbraucher generiert. Unter Großverbrauchern

werden die Maschinen, Anlagen oder Systeme verstanden, die einen Großteil am Gesamtenergieverbrauch ausmachen (vgl. Stephan Theis [2] S.243). Daraus folgt eine grobe Aufnahme aller Verbraucher des Unternehmens.

3.1 Verfahren zur Energieverbrauchsannäherung

Die Auflistung bzw. Benennung der Energieverbraucher muss „eine belastbare Datenbasis in Bezug auf die Aufteilung des Gesamtverbrauchs sein“ (Stephan Theis [2] S.245).

Da der tatsächliche Energieverbrauch nicht ausschließlich durch Betrachtung der elektrischen Leistung der Geräte erfolgt, ist es erforderlich, die Betriebsstunden und speziell in Prozessen (u.a. Heizungsanlagen), die Auslastungen zu erfahren.

Als Grundlage werden „die Angaben von Laufzeiten sowie den genutzten Leistungsniveaus auf Basis der Anschlusswerte“ verwendet (Stephan Theis [2] S.246).

Aus den zwei Faktoren (Leistung und Laufzeiten) werden erste Annahmen zum Energieverbrauch (elektrische Energie) (vgl. [3]) getroffen.

$$W = P_{el} \cdot t \quad [\text{kWh}] = [\text{kW}] \cdot [\text{h}]$$

Diese Annahmen sind je nach Erfahrung des Datenaufnehmers und der internen Unternehmenskenntnisse mal mehr und mal weniger repräsentativ.

Eine Aufnahme kann unter Umständen einem Verbraucher ein falsches Nutzungsprofil zuweisen. Nutzungsprofile werden u.a. in Dauerläufer und bedarfsbezogener Nutzung unterschieden (vgl. Stephan Theis [2] S.246).

Um solchen Fehlerquellen bzw. Ungenauigkeiten entgegenzuwirken, empfiehlt es sich, die Auswertungsergebnisse des Annäherungsverfahrens, den Lastgangdaten zu bilanzieren, sofern vorhanden.¹

¹ Registrierte Leistungsmessung (RLM) [7] „Ab einem Jahresverbrauch von ca. 100.000 kWh werden so genannte RLM-Zähler verwendet. Bei diesem Zählertyp erfasst eine Messeinrichtung pro Messperiode (15 Minuten bei Strom, 60 Minuten bei Gas) den Leistungsmittelwert.“

Mit den Energiedaten kann ein Bericht erstellt werden, in dem eine Bilanz vom Energieverbrauch dargestellt wird. Der Energiedienstleister ist, durch seine Qualifikation², in der Lage Einsparungen zu definieren und diese rechnerisch zu belegen.

3.2 Lastgänge

Lastgänge, auch als Lastprofil bekannt, beschreiben den Leistungsbedarf von Unternehmen einer bestimmten Energieverbrauchsgröße. Jahreswerte werden vom EVU (Energieversorgungsunternehmen) in Intervallen gespeichert und dem Unternehmen meist in 15 Minutenwerten zur Verfügung gestellt. Um das energetische Verhalten von

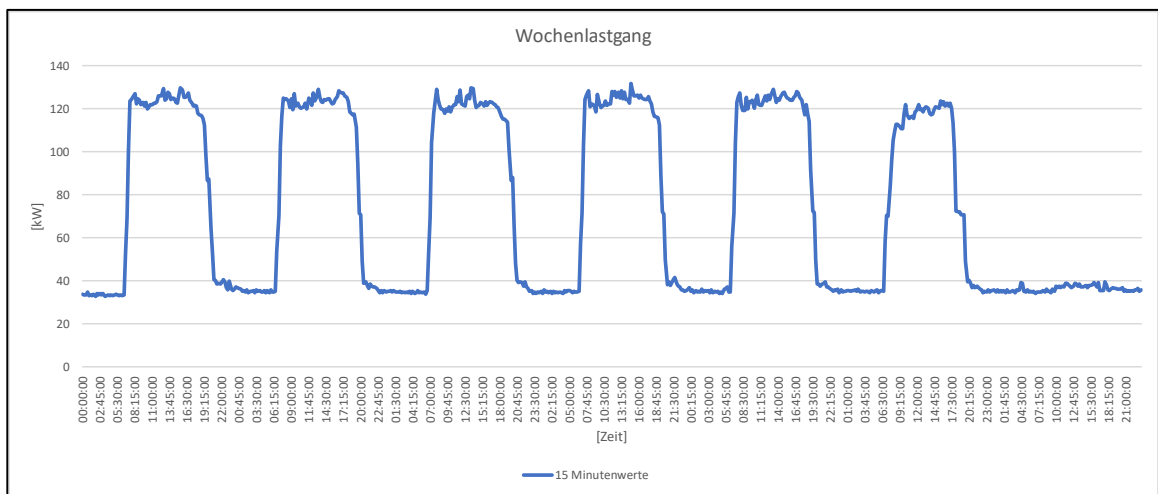


Abb. 2 Wochenverlauf eines Non Food Unternehmens

Unternehmen zu beschreiben ist eine Darstellung der Daten sinnvoll. Die gängigste Form der Darstellung ist das Liniendiagramm (Abb.2).

Bei der Visualisierung des Leistungsverlaufs wird die Leistung zu unterschiedlichen Zeiten dargestellt. Wie bei der Energieverbrauchsannäherung werden auch hier die Größen Kilowatt [kW] und Betriebsstunden [h] verwendet. Allerdings nicht in einer Multiplikation mit dem Ergebnis der elektrischen Energie [kWh], sondern in korrelierender Form mit Ergebnis des visualisierten Leistungsverlaufs. Unter anderem lässt sich dadurch bereits erkennen, dass es sich hier um ein sich wiederholendes Verbrauchsmuster handelt. Es zeigt ob Regelmäßigkeiten vorliegen, wie zum Beispiel die zu erwartende Grundlast und welche Lastspitzen vorhanden sind.

² (vgl. www.gih.de [4] S. 29-31)

3.2.1 Energiedatenintervall (1)

Die EVU Daten für Strom sind Leistungsmittelwerte von den zur Verfügung gestellten Intervallen. Da das Anwendungsverfahren ausschließlich mit elektrischen Verbrauchern (Strom) durchgeführt wird, wird die Aussagekraft der zur Verfügung gestellten 15 Minutenwerte betrachtet.

Die Summe aller Leistungen innerhalb der zeitlichen Periode von z.B. 15 Minuten, durch die Periodendauer, ist der Leistungsmittelwert. (vgl.[5])

$$\bar{P}_{el} = \frac{1}{T_P} \int_0^{T_P} P(t) * dt$$

Die Laufzeiten/Betriebsstunden pro Tag werden bei genauer Betrachtung (siehe Abb. 3) eines Tagesverlaufs grob aufgezeigt.

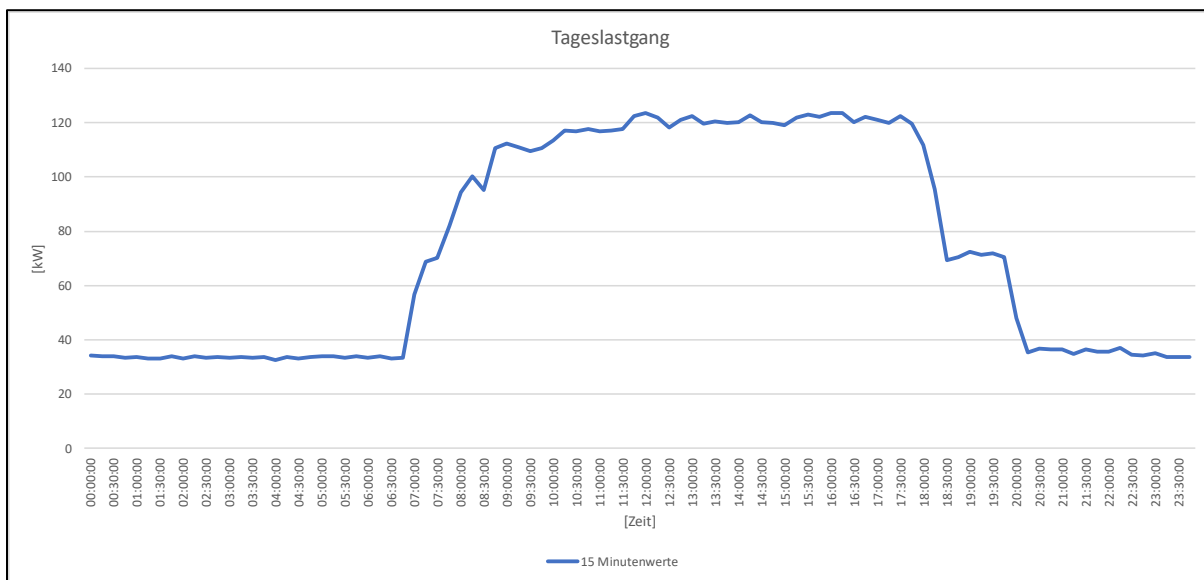


Abb. 3 Tagesverlauf eines Non Food Unternehmens

Die Einschränkung der Mittelwertbetrachtung, kann bei Betrachtung des Einsparpotenzials eine gewichtige Rolle spielen.

Die Darstellungen (Abb. 2 und 3) der 15 Minutenwerte unterschlagen aufgrund des Mittelwertes die tatsächliche Verbrauchskurve. Generell gilt, je kleiner das Intervall der Leistung ist, desto genauer die Verlaufskurve.

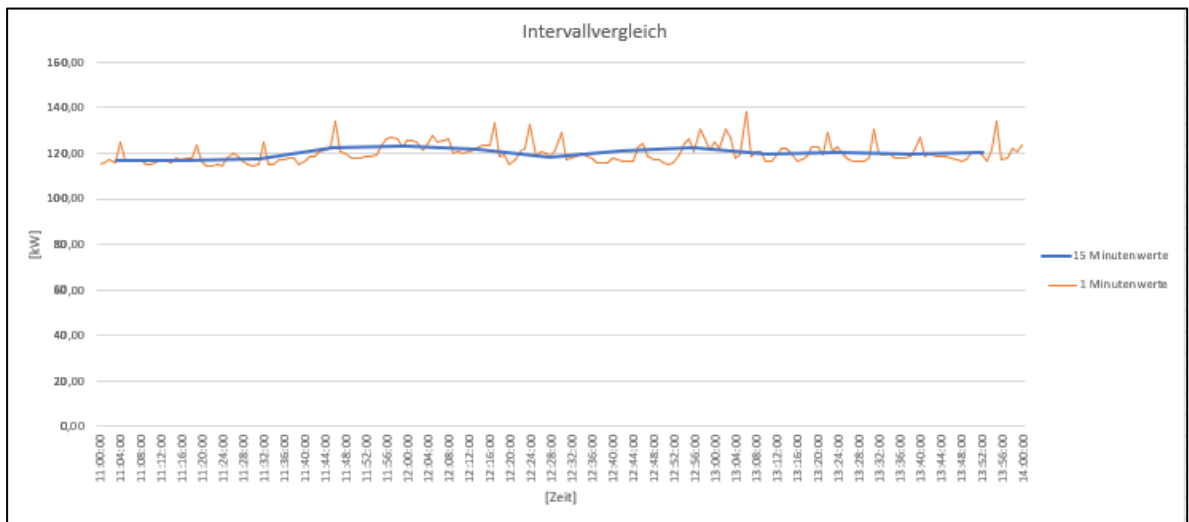


Abb. 4 Tagesverlauf im Vergleich 1 Minutenwerte zu 15 Minutenwerte

In Abb. 4 wird deutlich, dass die Mittelwerte nicht exakt die Lastspitzen erfassen. Die Modellierung der aufsummierten Verbraucher wird durch die 1 Minutenwerte ersichtlich und lässt unter Umständen detailliertere Schlüsse zum Prozessablauf des Unternehmens zu.

3.3 Verbraucherklassifizierung

Analysen, die auf installierte Messungen basieren, haben das Ziel, die Kleinverbraucher von den Großverbrauchern zu trennen (vgl. Stephan Theis [2] S.243).

Zum Vergleich: In einem industriellen Fertigungsunternehmen sind die Arbeitsmaschinen, absolut gesehen, ein Großverbraucher, wohingegen EDV-Verbraucher (Bildschirme, PC) im Verhältnis eher klein sind. Anders in einem reinen Verwaltungsunternehmen, wo der Anteil der EDV deutlich höher liegt und dort als Großverbraucher angesehen werden kann.

3.3.1 Beleuchtung

Die Beleuchtung als Großverbraucher zu definieren, wird oft vernachlässigt und die Einsparmöglichkeiten werden eher unterschätzt. Dabei sollten Unternehmen aus der Industrie und aus dem Handel dieses enorme Einsparpotential von bis zu 60[%]³ nicht

³ Energieagentur NRW 2010 [6]

unterschätzen. Für sich betrachtet, liegen die Stromkosten bei 15-30[%] (Industrie) und 70[%] (Handel) (vgl. Blesl und Kessler [6] S. 63).

3.3.2 Elektrische Antriebe

Die Antriebe/Elektromotoren verzeichnen weltweit die größte Umsetzung elektrischer Energie. 69[%] des Stroms der europäischen Industrie wird von Antriebssystemen genutzt. Das absolute Einsparpotential ist, aufgrund der Vielzahl an Motoren und der Vielzahl an Möglichkeiten, diese in effizientere Arbeit umzusetzen, schwer abzuschätzen (vgl. Blesl und Kessler [6] S. 63).

4 Effizienzsteigerung und Optimierung

Eine Optimierung bezieht sich unter anderem auf eine exaktere Auswertung der Energielastgänge.

Um Einsparungen zu generieren, ist es notwendig den IST-Stromverbrauch zu analysieren.

4.1 Ansätze

Ansätze von u.a. Schneider, von Tiedemann, Bobric et al. haben sich darauf fokussiert Clusteranalysen durchzuführen mit dem Ziel, Prognosen des zukünftigen Verbrauchs erstellen zu können. Schneiders Ansatz ist es, u.a. aus sieben Wochentagen fünf Tagestypen zusammenzufassen. Sein Fokus ist die Findung von repräsentativen Lastgangverläufen, die sich zukünftig wiederholen und somit Prognosen bilden. (vgl. Püschel [8], S. 6-8) Püschel selbst betrachtet die Clusteranalyse ebenfalls, allerdings mit dem Fokus der „Identifikation von Auffälligkeiten“. Des Weiteren führt Püschel aus, dass diese Auffälligkeiten nur mit einer Vielzahl von gleichen Gebäudeobjekten zu aussagekräftigen Vergleichen führen. (vgl. Püschel [8], S. 9)

Der Ansatz dieser Arbeit ist es nicht, die Energiedaten zum Vergleich zu nutzen, sondern, diese Daten dahingehend auszuwerten, dass Einsparpotentiale sichtbar werden. Es ist nicht zwingend erforderlich, Vergleiche zu anderen Standorten oder einer Vielzahl von Gebäuden zu betrachten. Der Vergleich, rein auf das spezifische Einsparpotenzial bezogen, ist hier nicht relevant. Sprich, die Einsparpotentiale müssen nicht miteinander verglichen werden. Einzig die resultierenden Kennzahlen lassen Vergleiche zu anderen Unternehmen gleicher Branche zu.

4.2 Effizienzsteigerung

In der Industrie wird eine Effizienzsteigerung durch die Erfassung von Betriebsdaten und Maschinendaten verwirklicht. Ein etabliertes Verfahren (Industrie 4.0) zur gezielten Überwachung betrieblicher Tätigkeiten wird in Großkonzernen bereits angewendet. Hierbei spielt der Produktionsfaktor „Energie“ eine eher untergeordnete Rolle. Ursache hierfür ist der „geringe“ Kostenanteil und die fehlende Relevanz im Verhältnis zum Unternehmensumsatz (vgl. Stephan Theis [2] S.243). Laut Energieagentur beträgt bei Non Food Unternehmen der Energiekostenanteil 0,9% vom Umsatz (vgl. www.energieeffizienz-im-betrieb.net [9] S.243).

Des Weiteren sind die Begriffe „Einsparung“ und „Effizienzsteigerung“ nicht gleichbedeutend. Es werden nicht zwangsläufig Energiekosten eingespart durch eine effizientere Einstellung eines Prozesses. (vgl. www.energiemanagement-und-energieeffizienz.de [10])

Auch die Erhöhung der Produktion ist ein Ergebnis der Effizienzsteigerung.

Um eine Optimierung der Energiedatenauswertung zu erreichen, sind die Lastgangdaten dennoch die „unverzichtbare Grundlage zur Effizienzsteigerung“ (Püschel [8], S. 12). Daraus lassen sich „Rückschlüsse auf wirtschaftlich sinnvolle Maßnahmen der energetischen Betriebsoptimierung ziehen“. (Püschel [8], S. 12).

„Zurzeit (Stand: 2014) beschränkt sich die Energiedatenerfassung häufig eben nur auf das Erfassen der Einspeisezähler des Energieversorgers“ (Stephan Theis [2] S.243).

4.2.1 Akzeptanz

Die oben beschriebenen theoretischen Ansätze führen bei idealem Vergleich zu richtigen Prognosen und somit auch zu Energieeinsparungen durch entsprechende Maßnahmen. Sowohl Püschel [8] als auch das Projekt des Instituts für Energie und Umweltforschung (ifeu) [11] von 2011 zeigen, dass speziell kleine und mittlere Unternehmen (KMU) Hemmnisse haben, Maßnahmen zu definieren. Zwar ist den Unternehmen meist bewusst, dass durch Maßnahmen die Energiekosten gesenkt werden und unter Umständen interne Prozesse effizienter durchgeführt werden können.

Allerdings wurden folgende Hemmnisse durch das Projekt der ifeu definiert.

- Kapital wird, falls vorhanden, in anderen Investitionen gebunden.
- Fehlendes Know-how und Kapazitäten, Energiesparmaßnahmen zu identifizieren und umzusetzen.
- Lange Amortisationszeiten von Energieeffizienzmaßnahmen (Investition mit der geringsten Amortisationszeit wird bevorzugt). (vgl. ifeu [11] 2011 S. 240)

Erschwerend zu den beschriebenen Hemmnissen kommt auch die Vielfalt der bisherigen individuellen Lösungen und Ansätze, die Effizienz von Prozessen zu verbessern (vgl. Keichel [1] S. 3).

Die Optimierung der bisherigen eher theoretischen Auswertungen/Ansätze, liegt darin auf effizientem Wege Aussagen über zukünftiges Verbrauchsverhalten treffen zu können.

Eine optimierte Energiedatenauswertung beinhaltet zudem den Aspekt der wirtschaftlichen Analyse der Maßnahmen bevor dem Unternehmen Kosten entstehen, die nicht im Verhältnis zum Einsparpotenzial stehen.

Nach der EU-Richtlinie 2006/32/EG [12] ist die Definition der Energieeffizienz folgende: „das Verhältnis von Ertrag an Leistung, Dienstleistung, Waren oder Energie zu Energieeinsatz“ (Kapitel 1 Artikel 3, Absatz b)

4.2.2 Industrie 4.0

Die zunehmende Digitalisierung findet vor allem Anwendung in der Industrie. Denn die Vernetzung in der Produktion setzt vermehrt auf Internettechnologie. Hier liegt der Fokus der Effizienzsteigerung auf den Produktionsprozessen. Die Effizienzsteigerung erfolgt durch die gezielte Kommunikation von Betriebsmitteln, die in einem Prozess integriert sind. (vgl. Fleischer [13] S.26)

Nach erfolgreicher Implementierung einer solchen Prozessüberwachung, hat die Auswertung auch einen erheblichen Forschungsanteil.

Maschinendaten geben Aufschluss über genaueste Maschineabläufe und lassen damit Rückschlüsse auf Wartung, Qualität und Lebensdauer zu. Die auf Sensorik und digitaler Kommunikation basierende Vernetzung ermöglicht schnelles Eingreifen und ist in der Lage Produktionsausfälle vorherzusagen. (vgl. Fleischer [13] S.26)

Da der Fokus auf der effizienteren Produktion liegt, ist das reine Einsparen von Energiekosten im besten Fall ein resultierender Nebeneffekt. Einsparungen werden in erster Linie durch Reduzierung der entstehenden Kosten durch Wartung, aufgrund fehlerhafter Bauteile (stabile Produktqualität) und plötzlicher Ausfälle in den Produktionszeiten generiert.

Allerdings haben die Sensorik und die Datenübertragung im Kern die gleiche Struktur wie sie auch in der hier beschriebenen Anwendung vorliegt. Somit ließe sich die Implementierung des Maschinenkommunikationsnetzwerks um die Komponente „Identifizierung von Energieeinsparpotential“ erweitern.

4.2.3 NILM Methode

Das NILM-Verfahren (Non intrusive Load Monitoring) bietet neben dem Industrie 4.0 Bestreben ein weiteres Element, welches auch zur Automatisierung der Datenauswertung beiträgt.

Die sogenannte Aufschlüsselung des Stromverbrauchs. Hierbei werden „Verbrauchsmuster anhand von elektrischen Parametern aus dem Gesamtverbrauch extrahiert und klassifiziert“ (www.inhaus.fraunhofer.de [14]).

Das NILM-System nutzt einen Zähler, welcher durch eigens entwickelte Algorithmen in der Lage ist, eine Vielzahl von Verbrauchern zu identifizieren. Die Algorithmen verfolgen das Ziel, das Verhalten des Verbrauchs kontinuierlich zu analysieren. Das Verhalten beinhaltet die wiederkehrenden Ein- und Ausschaltzeiten jedes einzelnen Verbrauchers. Daraus folgt ein Muster, welches visualisiert eine Aufschlüsselung der Verbraucher darstellt, ohne in die bestehende Installation mit weiteren Zählwerken einzugreifen. Die Datensätze können dadurch auf eine Quelle (Zähler) reduziert werden. Die gemessenen Daten erstellen genaueste Leistungskurven mit den dazugehörigen Betriebszeiten und liefern somit genaueste Angaben zum Energieverbrauch. (vgl. www.inhaus.fraunhofer.de [14])

4.3 Einsparpotenziale

„Eine fundierte Energieberatung ist dann aussagekräftig, wenn sie belegen kann, dass Einsparpotenziale analysiert wurden und diese wirtschaftlich und energetisch zu einer

Verbesserung der Energie und Kostenbilanz führen“. (www. energiemangement-und-energieeffizienz.de [10])

Aus dem beschriebenen NILM-Verfahren und der Industrie 4.0 lassen sich Einsparungen herleiten. Bei dem Industrie 4.0-Verfahren muss vorausgesetzt werden, dass das Ziel der Installation die Prozessoptimierung ist, anderenfalls ist eine Implementierung nur um Einsparpotentiale zu definieren nicht wirtschaftlich.

5 Energiedatenauswertung

Die Auswertung sieht vor, die Lastgangdaten vom EVU zu analysieren und Verbraucher zu extrahieren. Exemplarisch werden hierfür die Beleuchtung und die Lüftung (elektrischer Antrieb) betrachtet.

Nach Ablauf mehrerer Rechenprozesse wird dargelegt wie hoch das Einsparpotenzial in [kW] und [%] ist. Diese Ergebnisse werden anhand einer bereits durchgeführten Maßnahme verglichen, -der tatsächlichen Einsparung-.

Anschließend wird eine Auswertung mit gemessenem 1-Minutenintervall durchgeführt.

Die Ergebnisse werden auf ihre Genauigkeit verglichen und sollen belegen, dass eine optimierte Energiedatenauswertung durch spezifische Energiedatenerfassung zu aussagekräftigen Einsparpotentialen führt.

Zunächst ist es notwendig die Anwendung durch genaue Abgrenzungen in Bilanzräume zu unterteilen.

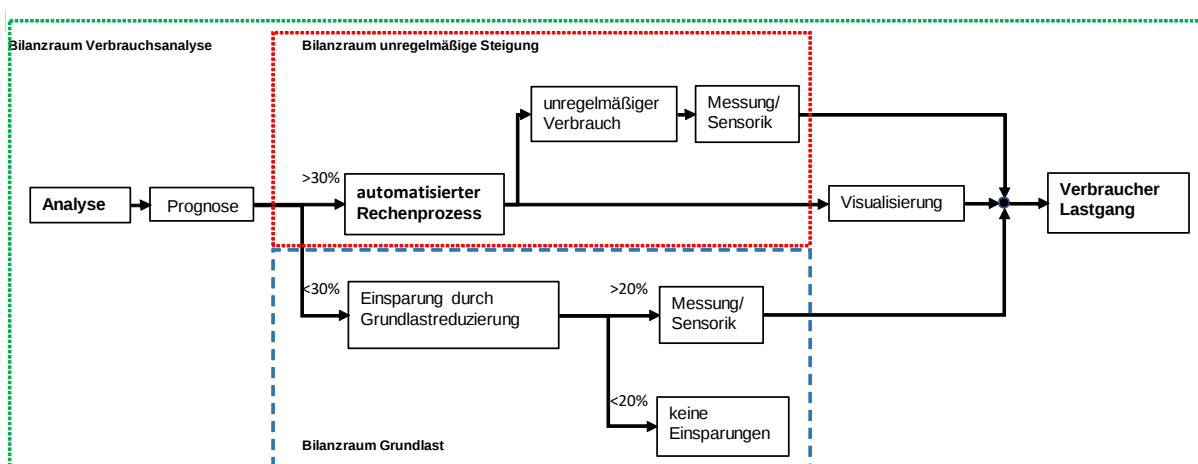


Abb. 5 Definition der Bilanzgrenzen und der Bilanzräume der automatisierten Energiedatenauswertung

Die Abbildung 5 verdeutlicht das folgende Anwendung nicht einem durchgängigen Datenverarbeitungsverlauf folgt. An vordefinierten Knotenpunkten ist die Automatisierung der Anwendung auf Hilfsanlagen (Messtechnik/Sensorik) angewiesen.

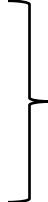
5.1 Bilanzraum – Verbraucheranalyse –

Die vom EVU übermittelten Daten sind im csv. Format. Sie liefern die Energiedaten des gesamten Jahres 2016. Das entspricht 35.040 Leistungsmittelwerte. Daraus ergibt sich ein Diagramm der Leistung in Abhängigkeit zur Zeit.

Die Auswertung erfolgt anhand eines repräsentativen Non Food Unternehmens.

Die Öffnungszeiten sind mit 10:00 Uhr -20:00 Uhr angegeben.

Auflistung der potenziellen Großverbraucher:

- Beleuchtung
 - Lüftung
 - Pumpen
 - Untertischgeräte
- 
- identifiziert durch Begehung -

Das Annäherungsverfahren hat die gesamte Beleuchtungsleistung aus dem Produkt der Anzahl (N) der Leuchtmittel und der Summe der Leistungen (P) all dieser Leuchtmittel mit der allgemeinen Summenberechnung auf 81,78 [kW] festgelegt.

Im weiteren Verlauf, muss der Lastgang durch eine Wochentag Anzeige erweitert werden.

Namentlich (basierend auf einer numerischen Formel):

$$\left[=\text{WENN} (\text{F21}=1;"\text{Montag}"; \text{WENN} (\text{F21}=2;"\text{Dienstag}"; \dots 0)) \right]$$

Der untersuchte Standort ist an Sonntagen geschlossen und wird daher im Durchschnitt nur die Grundlast aufzeigen. (vgl. Püschel [8])

Die Grundlast im Verhältnis zur Lastspitze (höchster ermittelter Leistungswert im Jahr), liefert eine erste Einsparprognose und gibt Aufschluss zur weiteren Analyse.

Hinweis: Tage, Wochen oder Monate verlaufen nicht regelmäßig, und weisen nicht ausschließlich die Grundlast auf. Eine Bildung des Mittelwertes aller Grundlasten

inklusive der Werktage würde eine erheblich größere Messungenauigkeit verursachen als nur die der Sonntage.

Die Summe aller Leistungswerte (P) von allen Sonntagen wird durch deren Anzahl (N) dividiert. Daraus folgt der arithmetische Mittelwert aller Sonntagswerte, wodurch sich eine anzunehmende Grundlast herleiten lässt. (vgl. Rudolph und Wagner [17] S. 305) (*Anomalien bereinigt*):

$$\bar{P}_{\text{Grundl.}} = \frac{1}{N} * \sum_{x=1}^N P_i$$

In der Definition der Bilanzräume (Abb. 5) ist der Übergang von Bilanzraum-Grundlast zu Bilanzraum-unregelmäßige Steigung durch das Verhältnis Grundlast/Spitzenlast auszumachen. Bei einem Verhältnis von < 30 [%] ist die Einsparung in der Grundlastreduzierung zu identifizieren. Ist das Verhältnis > 30 [%] folgt zunächst ein automatisierte Rechendurchlauf.

5.2 Bilanzraum – Grundlast –

Bei der Grundlastreduzierungsrechnung wird der Lastgang nach dem niedrigsten und dem höchsten Grundlastwert untersucht. Der niedrigste Wert ist der kleinste mögliche Leistungsmittelwert des Jahres. An diesem Wert sollte sich die optimale Grundlast orientieren. Das Verhältnis zeigt, ob Einsparungen wirtschaftlich gerechtfertigt sind.

Um Anomalien des Lastgangs zu reduzieren, empfiehlt es sich, den Lastgang

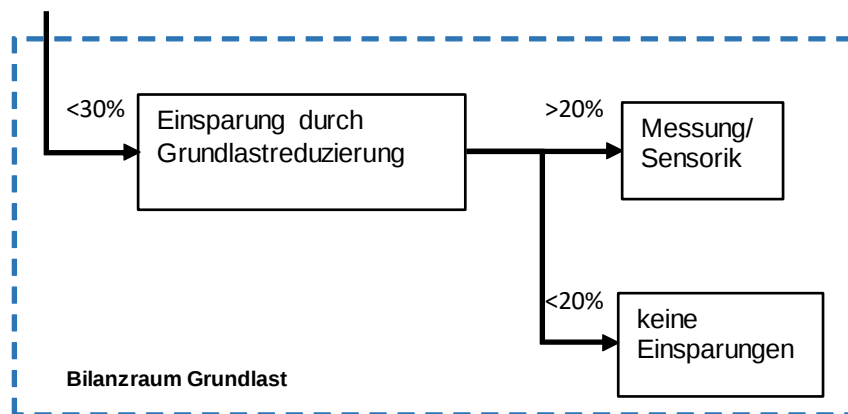


Abb. 6 Bilanzraum Grundlast

automatisiert von derartigen "Ausreißern" zu filtern. Mögliche Fehlerquellen sind u.a.

fehlerhafte Lastgänge (Leistungskurve zeigt einmalig 0 [kW] an). Folgende Anwendung wird durchgeführt, wenn die Anomalie auftritt:

`[=WENN(C25>$I$14;C25;"")]`

C25 – 15 Minutenwert

I14 – festgelegter Wert der erwarteten Grundlast

Ist das Verhältnis niedrigster Grundlastwert zu höchstem Grundlastwert positiv (>20[%]), lässt sich die Aufschlüsselung aufgrund des relativ durchgängigen Leistungsverbrauchs nur durch Messtechnik/Sensorik ermöglichen.

Ist die Grundlast im Rahmen der eingestellten erwarteten Grundlast gleichbleibend (<20[%]), ist bei Unternehmen keine wirtschaftlich vertretbare Einsparung feststellbar.

5.3 Automatisierter Rechendurchlauf

Ist das Verhältnis Grundlast/Spitzenlast > 30[%], ist davon auszugehen, dass es regelmäßige Veränderungen im Lastgang gibt, die eine hohe Differenz aufweisen.

Die Anwendung sucht nach der regelmäßigen Veränderung und ermittelt daraus die Steigung zwischen zwei aufeinander folgenden Leistungswerten. Die direkte Steigung (vgl. [18]) von Leistungsmittelwerten erzeugt übers Jahr gesehen eine neue Datengrundlage.

$$m = \frac{\Delta x}{\Delta y} = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$$

$$m = \frac{\Delta [\text{kW}]}{\Delta [\text{Zeitwerte}]} = \frac{119,5 - 26,6}{2 - 1}$$

$$\underline{m = 92,9 [\text{kW}]}$$

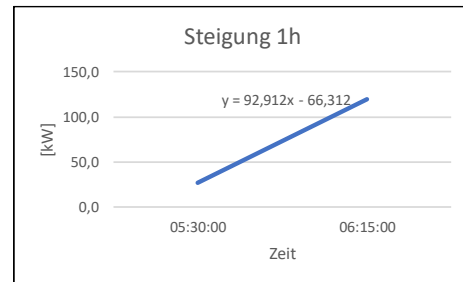


Abb. 7 Steigung nach 1 Stunde

Die Steigung wird klassifiziert und in z.B. 4 Bereiche eingeteilt. Ausgangspunkt ist die höchste ermittelte Steigung im Jahr. Je nach gesuchtem Verbraucher wird nun die Anzahl der Einschaltungen festgelegt.

Da der Tageslastgang eine signifikante Steigung und eine vergleichbare negative Steigung (Ausschaltzeitpunkt) aufweist, werden die Schaltzeiten auf täglich festgelegt. Da Sonn- und Feiertags geschlossen ist und auch keine Steigung aufweist, ist die Anzahl der Einschaltungen 304 Tage (Abb. 2).

Ähnlich wie dem unter 4.1 kurz geschildertem Ansatz von Schneider sind Mo.-Fr. andere Tagentypen als Sa. oder So.. Da hier wiederkehrende Rechenanwendungen durchgeführt werden, wird die Datengrundlage auf Mo.-Fr. beschränkt. Daraus folgt, dass sich die Ein/Ausschaltungen auf 252 Tage reduziert.

Die höchste exakt ermittelte Steigung tritt mit hoher Wahrscheinlichkeit nur einmal auf.

Energiedatenauswertung

Dieser Wert wird durch Zielwertsuche oder je nach Datenmenge, manuell, solange der Klassifizierung angepasst bis die Einschaltzeit betrachtete Steigungen ≈ 252 entspricht.

		Ausschaltung		Einschaltung	
Max. Steigung	4	122,81		125,75	
			Δ Steigung		Δ Steigung
	3	60,81	62	100,41	25
	2	-1,19		75,07	
	1	-63,19		49,73	
Ausschaltzeiten/ signifikante Leistungssteigerung					
252		100%		252	
Einschaltzeiten/ signifikante Leistungssteigerung					
251		100%		252	

Tab. 1 Auszug aus der Excel Anwendung (Δ Steigung)

Somit wird bei jedem Steigungswert, welcher sich in dem errechneten Differenzbereich (Δ Steigung = 62 bzw. 25) zur höchsten Steigung befindet, die Uhrzeit angezeigt.

Einschaltzeit m = 100,41-125,75 [kW] => Uhrzeit

Ausschaltzeit m = 60,81-122,81[kW] => Uhrzeit

Es werden 252 Uhrzeiten bei signifikanter Steigung angezeigt.

Durch die Funktion der Maximalwertsuche und Minimalwertsuche wird die höchste bzw. niedrigste Einschaltzeit des Jahres berechnet.

Die jeweils höchste (Maximalwert) und niedrigste (Minimalwert) Uhrzeit der Einschaltzeit, bestimmt im Mittel die durchschnittliche Einschaltzeit.

Parallel zum vorherigen Rechendurchlauf für Einschaltungen, wird der Prozess für die Ausschaltungen durchgeführt.

Tendenziell ist die Abweichung des höchsten und niedrigsten Ein-/ Ausschaltwertes nicht größer 1h. Eine Plausibilitätsprüfung ist hier sinnvoll. Dadurch lässt sich unter anderem feststellen, ob eine regelmäßige Unternehmensverbrauchsstruktur vorhanden ist.

Durch Festlegung des Nutzungsprofils des gesuchten Verbrauchers, wird die weitere Vorgehensweise bestimmt.

Die als Großverbraucher identifizierte Beleuchtung ist weder gedimmt noch über Bewegungsmelder gesteuert. Daraus folgt die Auslastung liegt bei 100%, -bedarfs bezogener Nutzung-.

Die Auslastung ist nach dem Einschalten gleichbleibend – kW schwankt nicht –.

Veranschaulicht durch einen Tageslastgang:

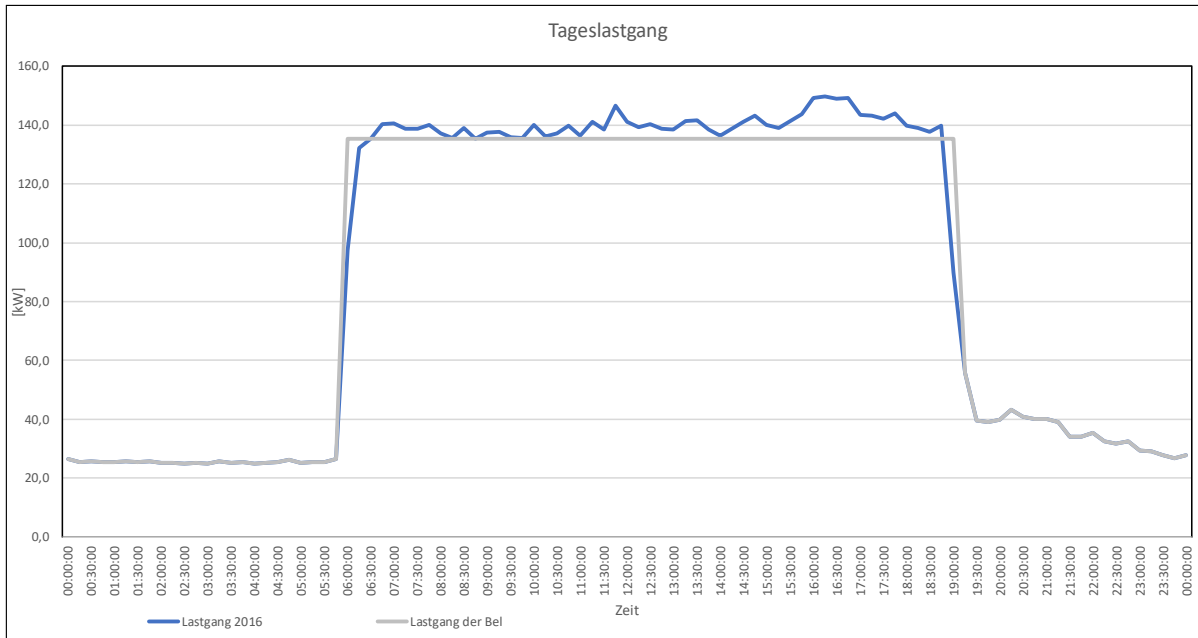


Abb. 8 Tagesverlauf und Beleuchtungsverlauf

Die Abbildung 8 veranschaulicht neben einem Tageslastgang auch den Lastgang der Beleuchtung. Das gewählte Zeitintervall ist hier die berechneten Jahresschaltzeiten. Festgelegt durch den höchsten Jahreseinschaltwert 8:15 Uhr und den niedrigsten Jahresausschaltwert 18:45 Uhr. Eine Darstellung der exakten Mittelwerte ist beim EVU Tageslastgang nicht möglich.

$$(\bar{t}_{\text{Einschaltzeit}} = \frac{8:00 \text{ [Uhr]} + 8:15 \text{ [Uhr]}}{2} = 8:08 \text{ [Uhr]})$$

Um die Tageslastgänge individuell aussagekräftig darzustellen, wird zusätzlich der Mittelwert pro Tag ermittelt. Anschließend wird eine "wenn/oder" Verknüpfung erstellt. Der Beleuchtungslastgang, wie dargestellt, wird dadurch an den jeweiligen Tag anpasst. Der genaue Beleuchtungsverlauf ist somit dann, wenn Lastgangwert im zeitlichen Jahresintervall ist oder größer dem Tagesmittelwert.

$$=WENN(ODER(F28=1;C28>\$N\$25);\$N\$6;C28)$$

1 – Zeitintervall erfüllt
N25 – Mittelwert des Tageslastgang
N6 – Minimalwert des Zeitintervalls
C28 - Lastgangwert

5.3.1 Schaltzeitverzögerung

Auf das ganze Jahr bezogen, ist die Leistungssteigerung zu den ermittelten Schaltzeitpunkten, die durchschnittliche Leistung der Beleuchtung. Da es keine automatisierten Schaltvorgänge sind, ist auch ein zeitgleiches (innerhalb der 15 Minuten) Einschalten anderer Verbraucher möglich.

Die Aufschlüsselung der Beleuchtung muss daher konkretisiert werden. Es wird ausschließlich die Beleuchtung der Verkaufsfläche betrachtet. Diese kann, je nach Unternehmensstruktur in verschiedene Bereiche aufgeteilt sein. Infolgedessen sind die

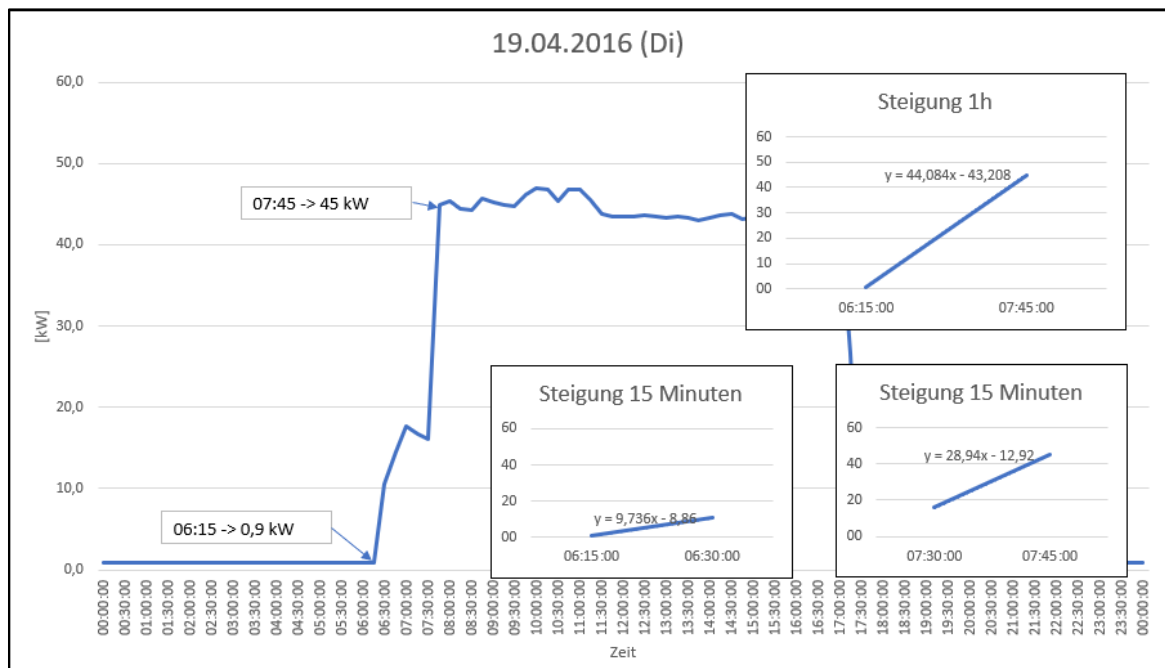


Abb. 9 Tagesverlauf und Steigungsklassifizierung

Schaltzeiten der Bereiche nicht zwangsläufig die gleichen. Eine Verzögerung der Schaltzeiten kann die Steigungsberechnung verfälschen.

Die Abbildung 9 verdeutlicht, bei verhältnismäßig großen Abständen der Bereichseinschaltungen, zwischen 6:15 [Uhr] und 7:45 [Uhr], die Notwendigkeit einer klaren Schaltzeit. Die Anwendung wird bei Berechnung der signifikanten Steigung zwei Werte anzeigen (9,736 und 28,94), die jeweils unter die Steigungsklassifizierung fallen könnten. Daraus folgt, der Wert der 252 Schaltungen ist nicht ausschließlich auf Tage begrenzt, da zwei Steigungen an einem Tag erfolgen würden.

Das errechnete Steigungsintervall muss angepasst und erhöht werden, um zu exakten Schaltzeiten zu führen.

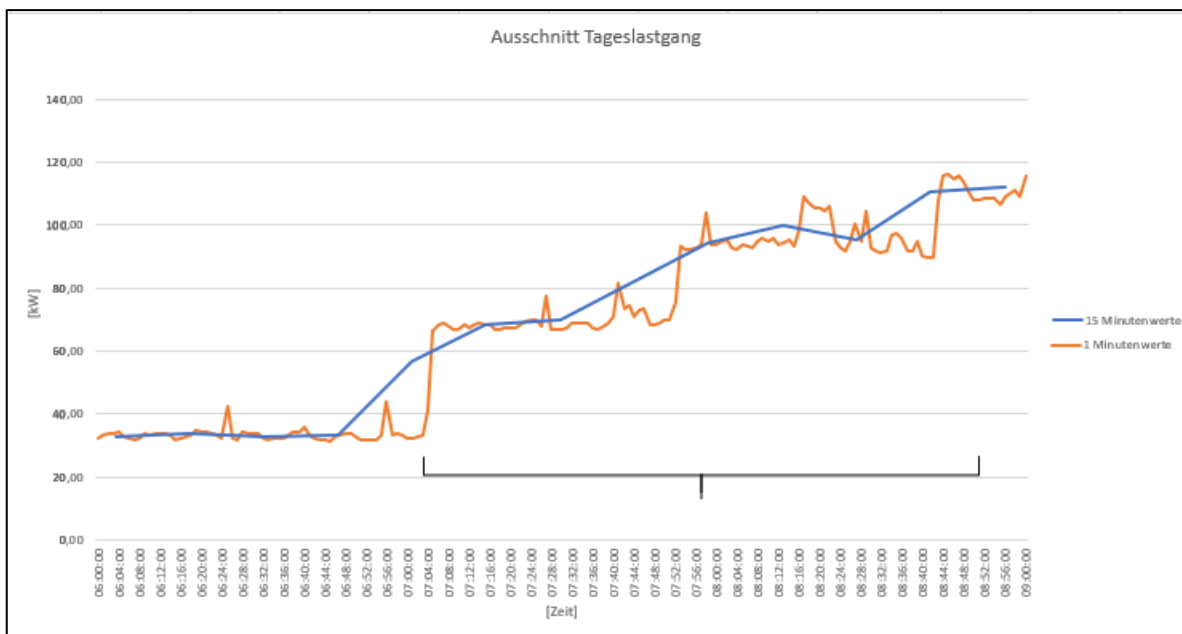


Abb. 10 Vergleich der Intervalle (Schaltverzögerung)

Daraus folgt, dass auch ein Verkleinern des Intervalls (1 Minute) nicht zu gravierenden Unterschieden führt. Da die Beleuchtung ein bedarfsbezogenes Nutzungsprofil aufweist und nicht zwangsläufig einer einmaligen Ein-/ Ausschaltung pro Tag unterliegt, ist die Notwendigkeit eines niedrigeren Intervalls nicht gegeben.

5.4 Ergebnis des Rechendurchlaufs

Laut der Energieagentur hat die Beleuchtung ein Einsparpotential von bis zu 60 [%]. Der errechnete Mittelwert der Leistungswerte (Tab.2) liegt bei 92 [kW].

Beleuchtungsleistung EIN	
Mittelwert aller Steigungswerte	105 kW
Beleuchtungsleistung AUS	
Mittelwert aller Steigungswerte	78 kW
Mittelwert der Leistungswerte	92 kW

Tab. 2 Auszug aus der Excelanwendung (Ø Leistungssteigerung)

$$P_{\text{Prognose}} = \frac{[\text{kW}] \cdot [\%]}{[\%]} \quad P_{\text{Prognose}} = \frac{92 [\text{kW}] \cdot 60 [\%]}{100 [\%]} \quad P_{\text{Prognose}} = 55,2 [\text{kW}]$$

Der Energieagentur zur Folge, lassen sich somit bis zu 55,2 [kW] von der elektrischen Beleuchtungsleistung einsparen.

Im Fall eines einstündigen Steigungsintervalls (siehe Schaltverzögerung), lässt sich die tatsächliche Beleuchtungsleistung ermitteln. Hier wird der Mittelwert aller Leistungen zu den Schaltzeiten bestimmt, wobei die Steigung zu den Ein- und Ausschaltzeiten vorerst separat berechnet wird und dann anschließend aus den beiden Mittelwerten der endgültige Durchschnittswert gebildet wird. Eine fehlerhafte Berechnung wird so durch Plausibilitätskontrolle nahezu ausgeschlossen.

Das gleiche Verfahren wie bei der hinreichend genauen Leistungssteigerung wird bei den Betriebsstunden angewandt. Aus beiden Mittelwerten werden die Betriebsstunden pro Tag ermittelt und auf das Jahr hochgerechnet.

$$t_{\text{Anwen.}} = \frac{\Delta t_{\text{Zeit}}}{\text{Tag}} * \frac{\text{Tage}}{\text{Woche}} * n_{\text{Wochen}}$$

$$t_{\text{Anwen.}} = \frac{\Delta t}{T} * \frac{T}{W} * n_{\text{Wochen}}$$

$$t_{\text{Anwen.}} = \frac{(19,65 [\text{h}] - 8,17 [\text{h}])}{1} * \frac{5}{1} * 52 = 2985 [\text{h/a}]$$

5.4.1 Varianzen der Anwendungen

Welche Aussagekraft die durchgeführte Berechnung hat, ist anhand von bereits durchgeführten Maßnahmen erkennbar. Die Maßnahme, eine Installation von LED-Beleuchtung wurde am vorliegenden Standort bereits durchgeführt und kann somit als

Fallbeispiel gesehen werden. Die nachfolgenden Varianzen Betriebsstunden, Leistung des Annäherungsverfahrens und Leistung der Umsetzung werden mit den Ergebnissen der Anwendung verglichen.

Um der Analyse/Anwendung die nötige Aussagekraft zu geben wurde die Auswertung an insgesamt 5 Standorten des Unternehmens durchgeführt.

Vergleich von 5 Standorten

Pos.		t_{Abwei}	P_{Abwei1}	P_{Abwei2}	Einsparung _{nach Umsetzung}
1	Standort A	11%	11%	51%	29%
2	Standort B	1%	18%	7%	59%
3	Standort C	17%	12%	52%	29%
4	Standort D	18%	8%	2%	63%
5	Standort E	1%	2%	66%	22%
		9%	10%	36%	40%

Tab. 3 Zusammenfassung der Ergebnisse der Excelanwendung

Zunächst ist die Aussagekraft der Betriebsstunden zu prüfen. Da das Annäherungsverfahren so zulässig ist, sollte die Varianz von Annäherungsverfahren zur Anwendung nicht signifikant hoch ausfallen.⁴

$$t_{\text{Abwei}} = 1 - \frac{t_{\text{Anwen}}}{t_{\text{Annäh}}} = 1 - \frac{2.985 \text{ [h/a]}}{3.380 \text{ [h/a]}} = 11,7 \text{ [%]}$$

Die Errechnung der Betriebsstunden ist im Durchschnitt zu 91[%] genau. Da es keine festgelegten Einschaltzeiten im Unternehmen gibt und das Annäherungsverfahren als Basis dient, welches die internen Arbeitszeiten (7:00 [Uhr] -20:00 [Uhr]) verwendet, ist eine Abweichung von durchschnittlich 9[%] plausibel.

$$P_{\text{Abwei 1}} = 1 - \frac{P_{\text{Annäh}}}{P_{\text{Anwen}}} = 1 - \frac{92 \text{ [kW]}}{81,78 \text{ [kW]}} = 11,1 \text{ [%]}$$

Die errechnete durchschnittliche Leistung der Beleuchtung weicht um 11 % von dem durch Begehung identifizierten Wert ab, sie ist um 90% genau.

⁴ Die folgenden Abweichungen werden auf Basis der allgemeinen Prozentsatzregeln angewendet. [19]

Da die Betriebsstunden und die Berechnung der installierten Beleuchtungsleistung eine hohe Genauigkeit aufweisen, sind die errechneten Werte für weitere Analysen verwendbar.

In der weiterführenden Berechnung werden Tageswerte verwendet. Das durchschnittliche Jahresintervall zwischen Ein- und Ausschaltzeit und die "wenn/oder" Verknüpfung, generiert den Beleuchtungslastgang (Abb. 8). Der niedrigste Leistungswert in diesem Zeitrahmen ist die maximale Leistung der Beleuchtung, da sie nach Einschaltung dauerhaft in diesem Intervall eingeschaltet ist.

Diese maximale Beleuchtungsleistung beträgt am Beispieltag 136 [kW]. Da zur besseren Berechnung und Visualisierung die Grundlast Teil des dargestellten Beleuchtungslastgang ist, wird die Leistungsreduzierung an diesem Lastgang vorgenommen. Die prozentuale Reduzierung um angenommene 60% erfolgt dennoch auf die errechneten 92[kW] Jahresbeleuchtungsleistung.

Die Prognose 2016 wird mit dem Jahr 2019, in dem die Maßnahme bereits umgesetzt wurde, verglichen.

$$P_{\text{Abwei 2}} = 1 - \frac{P_{\text{Umsetz.}}}{P_{\text{Prog.}}} = 1 - \frac{27 \text{ [kW]}}{55 \text{ [kW]}} = 51 \text{ [\%]}$$

Im Durchschnitt aller 5 Standorte liegt die Abweichung bei 36[%]. Die Tabelle zeigt allerdings deutlich die Unterschiede bei den Standorten. An 2 von 5 Standorten ist eine Einsparung von 60[%] umgesetzt worden, wodurch sich der Ansatz der Energieagentur von bis zu 60[%] Einsparung bestätigt.

Standort A:

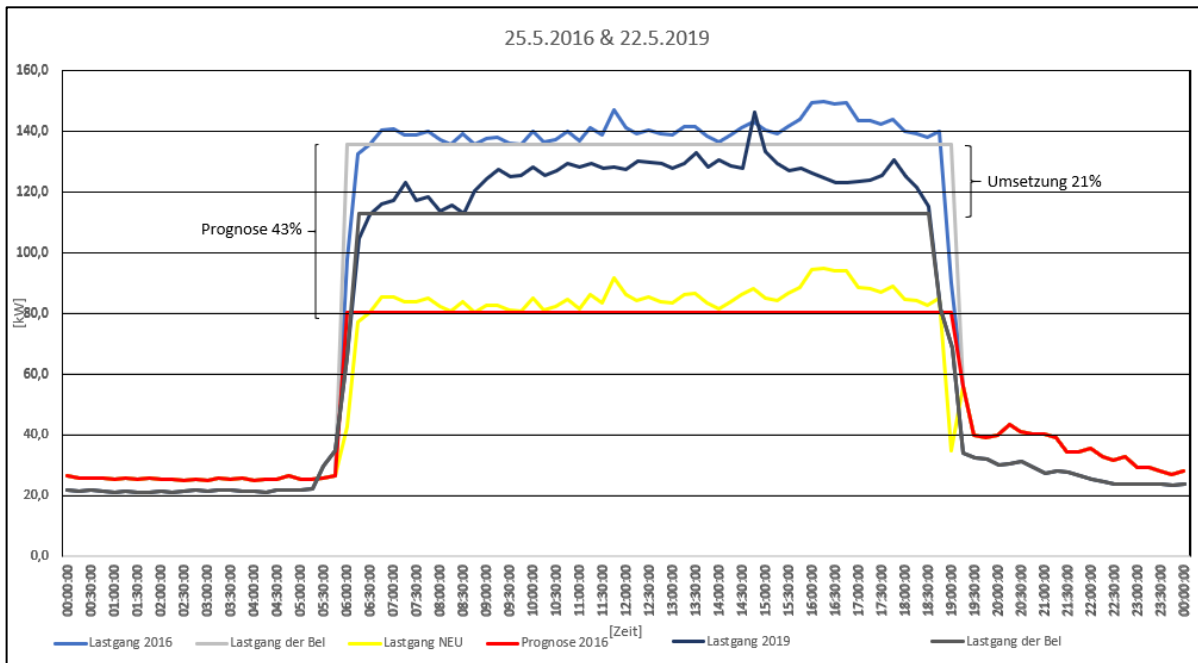


Abb. 11 Visueller Vergleich von Prognose zu Umsetzung

Am Fallbeispiel ist bei Überlagerung der Lastgänge erkennbar welche Prognose (43[%]) durch die 2016 Daten erstellt wurde.

Die prognostizierte Einsparung bezieht sich auf die ermittelte durchschnittliche Jahresbeleuchtungsleistung 92 [kW], daher die prozentuale Abweichung der Tagesleistungseinsparung.

Zum ungefähr gleichen Tag des Jahres 2019, nach der Umsetzung, ist die Leistung der Beleuchtung nur um 21[%] gesunken.

5.5 Einsparungsrichtwerte

Die in der Anwendung errechnete Prognose weicht am Standort A von der endgültigen Umsetzung um 51[%] ab.

Der Wert liegt deutlich über einer plausiblen Toleranz.

Die Annahme der Einsparpotenziale unterliegt zum Großteil der Annahme der Energieagentur, die prognostiziert, dass die Energie der Beleuchtung bis zu 60[%] eingespart werden kann. Das wird vor allem dadurch gestützt, dass die Energieagenturen den spezifischen Energiebedarf [w] von mehreren Unternehmen verschiedenster Branchen untersucht und klassifiziert haben. Die Anwendung zeigt jedoch gerade in der

Prognose und in den Umsetzungsvarianzen, dass die Prognose nicht auf pauschalisierten Werten beruhen sollte.

Non-Food-Unternehmen haben laut dem Energieinstitut⁵ einen spezifischen Energiebedarf von im Mittel 123 [kWh/m²].

Die Berechnung bei einer Verkaufsfläche von 3719 [m²] und einem Energieverbrauch (Strom) von 440.887 [kWh]

$$w = \frac{W_{\text{Gesamt}}}{A} = \frac{440.887 \text{ [kWh]}}{3719 \text{ [m}^2\text{]}} = 118,55 \left[\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2} \right]$$

weisen eine Abweichung vom Energiebedarfsrichtwert von 5% auf.

$$w = \frac{W_{\text{Bel.}}}{A_{\text{Bereich}}} = \frac{131.913 \text{ [kWh]}}{3719 \text{ [m}^2\text{]}} = 35,47 \left[\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2} \right]$$

Ebenso gibt das Energieinstitut für die Beleuchtung 57 [kWh/m²] an. Somit liegt der Energiebezug der Beleuchtung 38 [%] niedriger als die Durchschnittsangabe der Energieagentur.

Die grobe Betrachtung statistischer Werte von einer Vielzahl an Unternehmen und die daraus resultierenden Kennzahlen sind, wie verdeutlicht, Richtwerte.

Die Richtwerte sind ein ergänzendes Hilfsmittel zur genauen Einschätzung des Einsparpotenzials. Durch sie lassen sich die angegebenen 60 [%] Einsparung unternehmensspezifisch anpassen. Da die 60 [%] einen entscheidenden Anteil an der Prognose der zukünftigen Beleuchtungseinsparung haben, ist es zwingend erforderlich, die Datenbank des spezifischen Energiebedarfes kontinuierlich zu aktualisieren.

5.6 Tagesauswertung

Ein weiteres Ergebnis der Varianzen ist die Aussagekraft eines einzelnen Tageslastgang. Die Visualisierung eines ganzen Kalenderjahres ist optisch nicht aussagekräftig. Zudem lässt sich die Berechnung des Beleuchtungslastgangs, über ein Jahr, nicht effizient darstellen. Dennoch sind die notwendigen Durchschnittswerte (Schaltzeiten,

⁵ www.energieinstitut.net/de/system/files/0903_final_dienstleistungsgebaude_20120530.pdf [15]

Leistungssteigungen) und Intervallgrenzen, Ergebnisse, die nur bei Ganzjahresbetrachtung erfolgen können.

Das Einsparpotential/ die Prognose wird allerdings anhand eines Tages betrachtet. Das Verfahren⁶ (DIN 16001), die Hochrechnung von Energiedaten (Strom), lässt sich auf die Tageswerte anwenden.

Um die Berechnung plausibel darzustellen, wird der Vergleich des Standortes B verwendet.

Summe 2016	Jahr (berechnet)	Summe 2019	Jahr (berechnet)
451 kWh/Tag	113.692 kWh/a	237 kWh/Tag	59.711 kWh/a
	IST Summe		IST Summe
	125.711 kWh/a		51.427 kWh/a
Abweichung	10%		14%

Tab. 4 Vergleich Tageswerte zu Jahreswerte (Hochrechnung)

Am Standort B weicht die Berechnung der elektrischen Energie 2019 von 252 Tagen von der tatsächlichen elektrischen Energie um 14[%] ab.

Das ist vor allem dadurch zu begründen, dass das Unternehmen eine konstante Energieverbrauchstruktur aufweist.

5.7 Bilanzraum – unregelmäßige Steigung –

Davon ausgehend, dass der Großteil (Verkaufsfläche) der Beleuchtung identifiziert wurde, ist es naheliegend, mit gleicher Methode die weiteren Großverbraucher zu identifizieren.

Die Lüftung dieses Unternehmens ist ein weiterer Großverbraucher, welcher bereits bei der Begehung als solcher erfasst wurde. Der Verbraucher ist wissentlich dauerhaft eingeschaltet. Die Einsparungsberechnung ist daher über die Grundlastreduzierung durchzuführen. Eine optische und messbasierte Lastganganalyse ist nicht ohne Erweiterung möglich.

⁶ DIN EN 16001:2009-08 [20], Anleitung zur Anwendung dieser Europäischen Norm: A.3 Planung A.3.1 Ermittlung und Überprüfung von Energieaspekten: c) Eine Abschätzung des erwarteten Energieverbrauchs während der nachfolgenden Periode. – Die Abschätzung kann sich auf vorhandene Daten stützen, ...-

Im ungeregelten Zustand ist die Lüftung mit einem Dauerläufer gleichzusetzen und weist keine signifikanten Leistungsveränderungen auf. In einem solchen Fall liegt die Einsparung darin eine Regelung zu installieren.

In Betrieben, in denen eine Regelung vorliegt, ist die Identifizierung der Leistung zu prüfen.

Voraussetzung ist eine Leistungsänderung durch regelmäßiges Ein/Ausschalten oder durch Veränderung der Leistungsstufen.

Der Lastgang wird von der bereits identifizierten Beleuchtung getrennt und neu analysiert. Erneuter Durchlauf der Steigungsberechnung.

Je nach Regelung ist durch die Begehung bekannt, welchen statischen Leistungsverbrauch die Lüftung aufweist -Typenschilder-.

Dadurch kann das angewendete Verfahren im bereinigten Lastgang nach einer solchen Steigung suchen. Der Differenzbereich (Δ Steigung) zur gesuchten Steigung ist somit ≈ 0 .

Das ist mit den EVU-Daten nicht möglich, die exakte (bezogen auf die Zeit) Leistungssteigerung kann durch die Leistungsmittelwerte nicht identifiziert werden. (siehe Abb. 4)

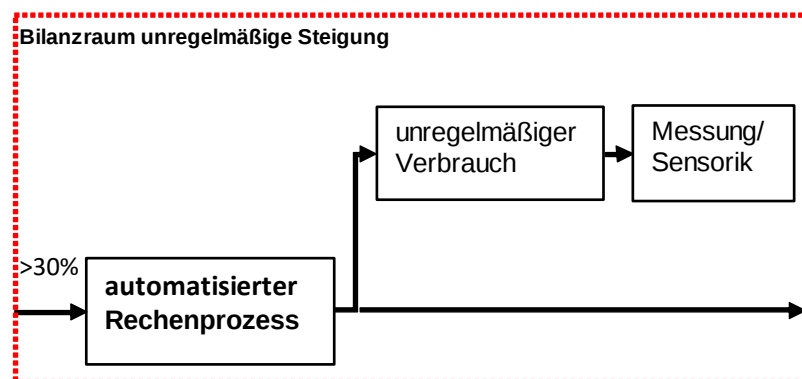


Abb. 12 Bilanzraum unregelmäßige Steigung

6 Spezifizierung der Energiedaten

Die genaue Analyse der Grundlastverbraucher sowie der Verbraucher mit irregulärer Steigung, kann schlussfolgernd aus der durchgeführten Anwendung, theoretisch mit spezifischerem Intervall identifiziert werden.

Der Standard von 15 Minuten ist bereits das niedrigste Intervall, welches die Energieversorger zur Verfügung stellen.

Wirtschaftlich gesehen, ist ein spezifischeres Intervall für Unternehmen auch nicht ratsam, da es zu einer erhöhten Energiekostenrechnung führen kann. Die tatsächliche Lastspitze liegt über den Mittelwertspitzen, daraus folgt ein höheren Leistungspreis. Der Leistungspreis orientiert sich am, im Rahmen des Intervalls, höchsten Wert. (vgl. Leitfaden für den Einsatz von Energieoptimierungssystemen [21]).

Ein Messkonzept, welches in der Lage ist, parallel zur EVU-Zählung Energiedaten zu erfassen und diese in jedem gewünschten Intervall zu versenden, ermöglicht es exaktere Ein-/Ausschaltzeiten zu ermitteln. Die Installation eines solchen Systems ist nicht zwangsläufig ein direktes Eingreifen in bestehende Installationen und kann durchaus auch temporär erfolgen.

Hierbei sollte die Prognose des Verhältnisses von Grundlast zu Spitzenlast bedacht werden und deutlich positiv ausfallen. Eine Messung unabhängig von der Dauer ist bereits ein wirtschaftlicher Kostenfaktor.

Ergebnis einer solchen Messung ist, die Visualisierung von min. Minutenwerten. (niedrigere Intervalle (Sekunden) sind als Datenmenge zu hoch).

Bei der Suche nach einer Steigung die aufgrund des Leistungsmittelwertes über 15 Minutenwerte „zerstreut“ wird, ist die exakte Steigung nicht feststellbar.

6.1 Energiedatenintervall (2)

Wie in 3.2.1 beschrieben, lässt sich eine präzisere Darstellung zur Leistungsverlaufskurve treffen als beim Standard Intervall. Für die Darstellung eines Jahresverlaufs mit 525.600 Minutenwerten wird enorme Rechenleistung benötigt. Es ist zu prüfen, ob dadurch das Ergebnis konkretere Aussagen über die Einsparung trifft.

Eine Jahresmessung liegt in dieser Ausarbeitung nicht vor. Zur weiteren Veranschaulichung wird das Prinzip mit Tageswerten verdeutlicht.

Eine Visualisierung eines Tages mit 1.440 Minutenwerten (Anzahl der Minuten/Tag), statt 94 15 Minutenwerten (Anzahl der 15 Minuten/Tag), lässt sich sowohl graphisch als auch rechnerisch gut verarbeiten.

Zur Nachweisbarkeit der dargestellten Ergebnisse, wurde bereits eine Messung durchgeführt und sowohl der Lastgang als auch die Lüftungen wurden separat erfasst.

Trotz des leicht schwankenden/modulierenden Leistungsverlaufs der Lüftung, hat die Lüftung einen relativ konstanten Verlauf.

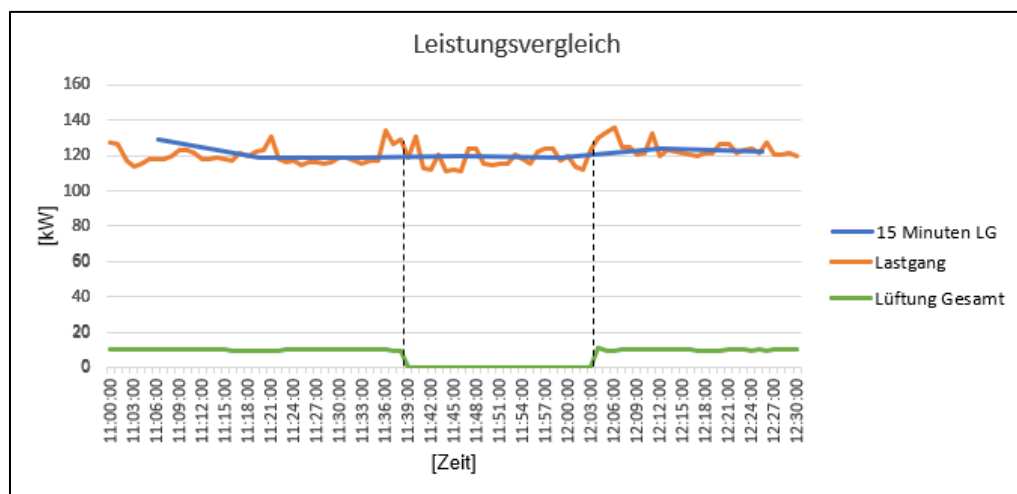


Abb. 13 Leistungsvergleich beim Schaltvorgang der Lüftung

Welche Auswirkung das Abschalten der Lüftung auf den Gesamtleistungsverlauf hat, gibt Aufschluss darüber, welchen Nutzen Messungen von einzelnen Großverbrauchern haben. Im vorliegenden Tageslastgang ist zum Zeitpunkt der Abschaltung die Leistungskurve gesunken. Die Leistung fällt um den Leistungswert der Lüftung. Zum Vergleich der 15 Minutenlastgang schwankt nicht.

Ein erneuter Suchlauf nach exakt diesen Wert, wurde an einem anderen Tag durchgeführt. Trotz der erneuten Abschaltung zeigt der Lastgang nicht dieselbe Reduzierung wie zuvor. Das Ergebnis zeigt, dass diese Leistung nicht die regelmäßige Abschaltzeit ist.

Ursache kann das Lüftungssystem selbst sein, das bei Abschaltung die Leistung anderer Komponenten drosselt. Die Abschaltung kann auch stufenweise erfolgen und verzerrt damit die Steigung (Schaltverzögerung).

Auch das Eingrenzen zwischen zwei Leistungswerten ist keine zuverlässige Identifizierung der Lüftung. Die Steigungen treten in diesem Beispiel häufiger auf als die tatsächliche Ausschaltung (Abb.13).

Einen Durchschnittswert der Schaltzeiten zu ermitteln, bei exakt diesen Steigungen, würde zu keinen realistischen Schaltzeiten führen. Die Steigung hat nicht die notwendig hohe Signifikanz wie Beispielsweise die Beleuchtung.

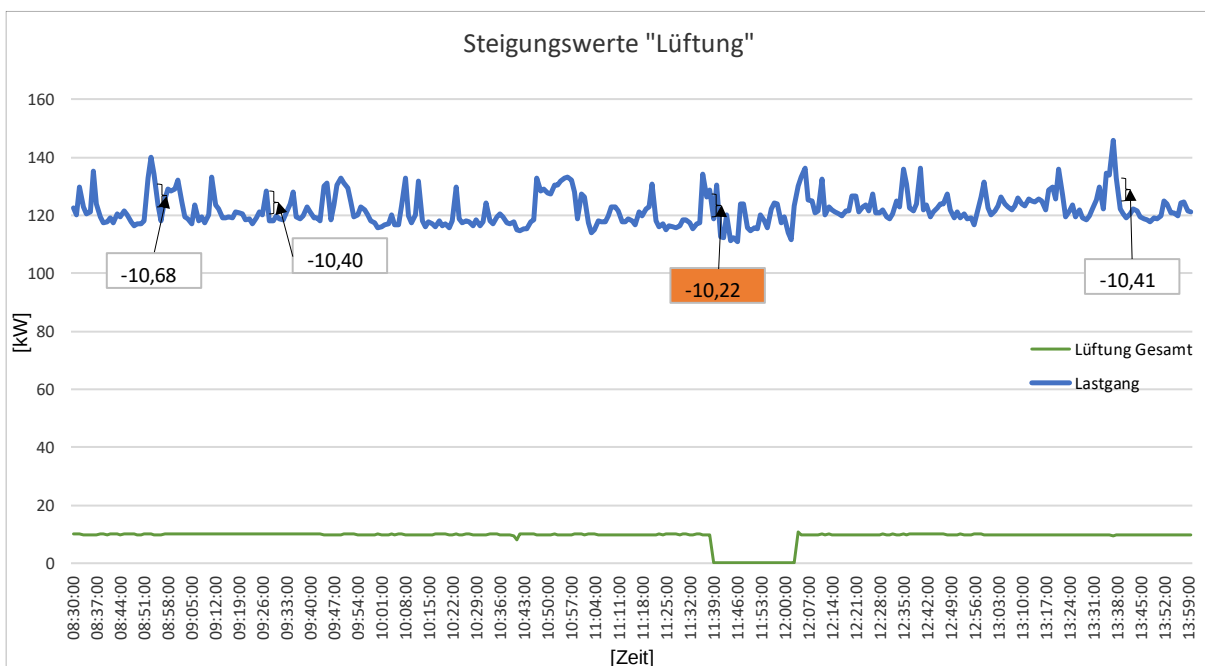


Abb. 14 Steigungswerte "Lüftung"

Erschwerend hinzu kommen die unterschiedlichen elektrischen Antriebsarten. Die negative Steigung der Abschaltung kann zur Einschaltung deutlich höher liegen. Grund hierfür ist u.a. der Anlaufstrom.

Notwendige Kriterien für eine Identifizierung von Großverbrauchern, sind exakte und regelmäßige Schaltzeiten. Eine Umkehrung der Anwendung zur exakten Leistungssuche ist somit nicht aussagkräftig genug, um die Lüftung aus dem Lastgang zu extrahieren.

-Eine separate Erfassung der Daten durch Messung oder Sensorik ist im Falle modulierender Verbraucher zwingend erforderlich.-

Bei vorangegangener Begehung des Unternehmens und Berechnung des Grundlast-Spitzenlast-Verhältnisses kann bereits ermittelt werden, dass die Einsparung von modulierenden Großverbrauchern hoch ist.

Die Minutenwerte visualisieren den Verbrauch präziser, allerdings sind sie bei der Energiedatenauswertung von modulierenden Verbrauchern nicht von entscheidender Bedeutung. Tendenzen lassen sich erkennen, aber für eine automatisierte Auswertung sind sie ohne große Relevanz.

6.2 Zusammenfassung der Anwendung

Die Anwendung mit den EVU-Daten lässt eine fundierte Analyse ohne vorheriges Eingreifen in die bestehende Installation zu. Allerdings basiert die rechnerische Anwendung auf signifikanten Steigungen. Treten diese regelmäßig auf, ist es möglich, daraus den durchschnittlichen Leistungsanstieg zu erfassen und einem Großverbraucher zuzuordnen.

Treten Steigungen in unregelmäßigen Abschnitten auf oder werden in der Grundlast keine signifikanten Steigungen verzeichnet, ist es notwendig Verbraucher nach deren Leistung zu identifizieren. Ist eine Steigung dann um ein Vielfaches höher als die Grundlast, lässt sich die Leistung auch wiederkehrend ermitteln. Folge dessen ist auch ein Aufschlüsseln möglich.

Des Weiteren ist die in der Aufgabenstellung erwähnte Aussagekraft des zeitlichen Intervalls für die Auswertung zunächst zweitrangig. Ohne Messtechnik/Sensorik, welche die exakte Schaltzeit ermittelt, ist ein genaueres Energiedatenintervall unnötig.

7 Effiziente Technologien – Sensorik –

Grundsätzlich ist es die Technologie und der effiziente Umgang damit der die Einsparungen generiert. Die Sensorik wird hier als Hilfsanlage betrachtet und soll dem Unternehmen ergänzend zur Anwendung nicht ausschließlich Einsparpotentiale aufzeigen. Für die Implementierung einer effizienten Sensorik ist es für Unternehmen wirtschaftlich ratsam einen geeigneten Mehrwert außer der Erfassung der Schaltzeiten zu erhalten.

7.1 Beleuchtung

Die Beleuchtung ist aufgrund ihrer vielfältigen Einsetzbarkeit differenziert zu betrachten. Die Reduzierung der Leistung ist nur ein Teil des effizienten Umgangs mit der Beleuchtung.

Im betrachteten Unternehmen spielt vor allem die Lichtausbeute eine gewichtige Rolle. Die Leistungseinsparung bei verbesserter Beleuchtungsstärke und gleichbleibender Helligkeit, ist ein weiterer Planungsprozess, den es zu optimieren und automatisieren gilt. Die automatisierte Anwendung muss in der Lage sein Lichtkonzepte in die Prognose einfließen zu lassen.

Ein Lichtkonzept ist bereits statistisch in die 60[%] inkludiert.

Folgende Werte basieren auf dem durchgeführten Lichtkonzept (Planung und Installation) eines externen Fachunternehmens.

Zur Vereinfachung wird hier nur ein Bereich des Unternehmens betrachtet.

Austausch der Beleuchtung (Leuchtstoffröhren) 1-zu-1 mit neuen LED-Leuchtmitteln.

Leuchtstoffröhren:

▪ Anzahl (N):	216	[Stück]
▪ Leistung (ohne Vorschaltgerät)	58	[W]
▪ Gesamte el. Leistung	12.528	[W]

LED-Leuchten:

▪ Anzahl (N):	216	[Stück]
▪ Leistung (ohne Vorschaltgerät)	33,2	[W]
▪ Gesamte el. Leistung	7.171	[W]

Einsparung: **5.357 [W]** **43%**

Da die Helligkeit Lumen (Φ) bei beiden Leuchttypen ungefähr bei ≈ 5000 [lm] liegt, ist die erhöhte Beleuchtungsstärke Lux (E) der Bestandssituation erstmal unabhängig vom Leuchttyp. Entscheidend ist hier die Anzahl der verwendeten Leuchten.

Daraus folgt:[vgl.[22]]

$$E = \frac{\Phi}{A} = \frac{5000 \text{ [lm]} * 216 \text{ [Stück]}}{816 \text{ [m}^2\text{]}} = 1323,53 \text{ [Lx]}$$

Die Beleuchtungsstärke ist beim 1-zu-1 Austausch und beim gegenwärtigen Zustand um ein Vielfaches höher als es die DIN-Norm für Verkaufsflächen vorsieht. Laut DIN 12464-1⁷ liegt die empfohlene Beleuchtungsstärke bei ≈ 500 [Lx].

Durch die Umkehrung der Formel wird die Lampenanzahl bestimmt:

$$\Phi = E * A \Rightarrow \text{Anzahl} * [\text{Lm}] = [\text{Lx}] * [\text{m}^2] \Rightarrow \text{Anzahl} = \frac{[\text{Lx}] * [\text{m}^2]}{[\text{Lm}]}$$

$$\text{Anzahl} = \frac{500 \text{ [Lx]} * 819[\text{m}^2]}{5000 \text{ [Lm]}} = 81,9 \text{ [Stück]}$$

Die Anzahl ist weiterhin unabhängig vom Leuchttyp, denn 81 Leuchtstofflampen führen zur ungefähr gleichen Beleuchtungsstärke wie die LED-Lampen.

Eine Reduzierung der vorhandenen Leuchtstoffröhren ist dennoch nicht die effizienteste Herangehensweise. Der Reduzierung der Leuchtmittel folgt weiterhin ein höherer Energieverbrauch als bei LED.

Die Einsparung der Leistung ist damit zu begründen, dass die LED-Technologie mehr Lumen pro Watt aufweist. Daraus folgt: für die gleiche Helligkeit benötigt die LED weniger

⁷ DIN EN 12464-1 [23] www.shbv.de/schiedsrichter/infothek/Hallenbeleuchtung.pdf

Leistung. Mit der Gleichung der Lichtausbeute lässt sich im Umkehrschluss die notwendige Leistung der zu installierenden Leuchtmittel ermitteln: [22]

$$\eta_{\text{Bel}} = \frac{\Phi}{P_{\text{el}}} \quad \Rightarrow \quad P_{\text{el}} = \frac{\Phi}{\eta_{\text{Antr}}} = \frac{5000 \left[\frac{\text{Lm}}{\text{W}} \right]}{165 \left[\frac{\text{Lm}}{\text{W}} \right]} = 30,3 \text{ [W]}$$

Die Einsparidentifizierung muss somit nicht ausschließlich über die Steigung erfolgen. Der Abgleich eines jeden Unternehmens mit der genormten und branchenbezogenen Beleuchtungsstärke ist ein Anzeichen für mögliche Einsparungen.

Installation von Messsensoren, die Lux erfassen, haben somit nicht ausschließlich eine exakte Einschaltzeit zur Folge. Sie erfüllen auch die Funktion der stetigen Überwachung der Beleuchtungssituation. Sensoren, sogenannte Luxmeter, erfassen punktuell die Beleuchtungsstärke.

Die [Lux]- Werte werden je nach Unternehmensbedürfnissen entsprechend verarbeitet. Es werden die eingestellten min.- und max.- Werte erfasst und Abschaltungen bzw. Einschaltungen der Beleuchtung bei Abweichung der eingestellten Werte vorgenommen. Ein solcher Fall ist z.B. in Verkaufsbereichen, in denen relativ viel natürliches Licht von außen eintritt. An sonnigen Nachmittagen kann in betroffenen Bereichen die Beleuchtung ausgeschaltet werden, wohingegen dunklere Bereiche eingeschaltet bleiben.

Da es in erster Linie darum geht, Potentiale zu erkennen, ist der Mehrwert dieser Umsetzung anfangs zweitrangig. Dennoch ist die Implementierung der ergänzenden Variablen [Lx] und [Lm] in die Anwendung ein Faktor, der nachfolgend zur Aufschlüsselung der Verbraucher beiträgt.

7.2 Elektrische Antriebsmotoren

Eine Identifizierung von elektrischen Antrieben kann u.a. aufgrund des verhältnismäßig geringen Energieverbrauchs kostspielig sein. Zudem ist es nicht selten, dass die Antriebe Dauerläufer sind oder durch unregelmäßige Stufenschaltungen keine durchschnittliche Steigung aufweisen.

Unter 6.1 wurden bereits die Schwierigkeiten beschrieben und darauf verwiesen, dass trotz bekannter Leistung, die Analyse überwiegend durch Messung ergänzt werden muss.

Eine exakte Prognose der Energieagentur kann nicht pauschal für ein automatisiertes Verfahren genutzt werden. Die unterschiedlichen Anwendungsgebiete von Antriebsmotoren (u.a. Lüftung, Arbeitsmaschinen, Aufzügen, Kompressoren) sind zu umfangreich, um pauschalisierte Energiekennzahlen zu bilden.

Allenfalls kann durch, ähnlich der frühzeitigen Großverbraucheridentifizierung (Begehung), der Antriebsmotor vorab klassifiziert werden. Da bereits Aussagen zur Lüftung getroffen wurden, werden im Weiteren die elektrischen Antriebe von Lüftungsmotoren betrachtet.

Um eine notwendige Optimierung der elektrischen Antriebe zu gewährleisten, ist das gegenwärtige Motorensystem zu analysieren.

Die Entwicklung der elektrischen Antriebssysteme ist stetig wachsend. Die Wirkungsgradklasse ist, in Bezug auf die Energiekosten, eine der einflussreichsten Komponenten. Die unter der NORM-IEC 60034-30:2008 definierten IE1-IE4 Klassen gelten für Niederspannungs-Drehstrommotoren als Grundlage der Energieeffizienz (vgl. www.js-technik.de [24]).

Bereits ein relativ kleiner Prozentsatz im Leistungsverhältnis ist ausreichend, um eine effizientere und kosteneinsparende Lüftungsanlage zu betreiben.

Ausgehend von der elektrischen Leistungsaufnahme von $P_{el} = 10$ [kW] und einem angenommenen Wirkungsgrad eines IE2-Motors und dem eines IE4-Motors ergibt sich, folgende Einsparung.

Wirkungsgrad IE-2: 86 [%]

Wirkungsgrad IE-4: 90 [%]

$$P_{el} = \frac{P_{mech}}{\eta_{Antr}} \Rightarrow P_{mech} = P_{el} * \eta_{Antr}$$

$$P_{mech} = P_{el} * \eta_{Antr} = 10 \text{ [kW]} * 0,86 = 8,6 \text{ [kW]}$$

Es wird angenommen, dass die mechanische Leistung des Motors weiterhin benötigt wird. Der Austausch durch effizientere Motoren hat eine elektrische Leistungsaufnahme von:

$$P_{el} = \frac{P_{mech}}{\eta_{Antr}} = \frac{8,6 \text{ [kW]}}{0,9} = 9,5 \text{ [kW]}$$

Beim standortbezogenen Lüftungsdauerläufer sind die 5 [%] Leistungseinsparung erheblich.

Es ist nicht unüblich, die Ventilatoren einer Lüftung als Dauerläufer zu betreiben. Dadurch laufen die Motoren mit konstanter Drehzahl, um den maximalen Volumenstrom zu erhalten.

Die Steuerung des Volumenstroms durch u.a. Drosselklappen (mechanische Volumenstromregelung) hat den Effekt des Dauerbetriebs des Motors. Für die automatisierte Analyse von elektrischen Antriebsmotoren ist es notwendig, zu ermitteln, welchen Leistungsverlauf (konstant, stufenweise, Ein/Ausschaltung) die Motoren haben. Zudem ist eine effiziente Regelung durch gezielte Leistungsaufnahme bei Betrieb erforderlich (vgl. www.baulinks.de [25]).

Bei konstanter Drehzahl, unabhängig von der Auslastung des Motors, ist auch von einer konstanten Leistungsaufnahme auszugehen. Dass der Volumenstrom nicht in konstanter Höhe vorliegen muss, wird bereits deutlich durch die bisherige Anwendung von Drosselklappen.

Eine Drehzahlregelung durch Frequenzumrichter reduziert die Drehzahl und dadurch die elektrische Leistungsaufnahme des Motors.

Nach den proportionalgesetzten (vgl.[30]) für Ventilatoren lässt sich berechnen, dass die Antriebsleistung kubisch von der Drehzahl abhängt.

Der Druck bei Drehzahlregelung reduziert sich quadratisch zur reduzierten Drehzahl.

$$\frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{n_{d1}}{n_{d2}} \right)^2 \Rightarrow p_2 = \frac{n_{d2}^2}{n_{d1}^2} * p_1$$

Daraus folgt bei Drehzahlregelung eine Reduzierung des Drucks auf 25 [%]. Bei der Drosselregelung steigt der Differenzdruck zunächst aufgrund des reduzierten Förderquerschnitts.

Gleichzeitig wird die Antriebsleistung auf 12,5[%] reduziert.

$$\frac{P_{Antr1}}{P_{Antr2}} = \left(\frac{n_{d1}}{n_{d2}} \right)^3 \Rightarrow P_{Antr2} = \frac{n_{d2}^3}{n_{d1}^3} * P_{Antr1}$$

Bei einer angenommenen Drehzahl von 1500 [s⁻¹] und der elektrischen Antriebsleistung von 10 [kW] ist der rechnerische Nachweis bei Halbierung der Drehzahl folgender:

$$P_{Antr2} = \frac{750 [s^{-1}]_{d2}^3}{1500 [s^{-1}]_{d1}^3} * 8,6[kW] = 1,075 [kW]$$

Die Drehzahlregelung reduziert somit den Druck am Gebläse, die Antriebsleistung an der Welle und den Volumenstrom. Die Drosselregelung ist bei hinreichend konstanter Drehzahl weniger effizient und hat somit großen Einfluss auf den Wirkungsgrad des Ventilators.

Bei der Drehzahlreglung statt der Steuerung durch Drosselklappen ist zu beachten, dass bei Regelung der Drehzahl der Motor weiterhin in der Nähe des Nenndrehmoments läuft. In unmittelbarer Nähe des Nenndrehmoments erreicht der Wirkungsgrad des Motors sein Maximum.-*optimaler Betriebspunkt*- (vgl. Riefenstahl [26] S. 58)

Das Einsparpotential von Motoren ist somit durch zwei Komponenten realisierbar (Wirkungsgradklassen, Drehzahlregelung).

Abgesehen davon, dass es sich relativ leicht festlegen lässt, ob bereits Frequenzumrichter installiert sind oder welche Effizienzklasse der Motor besitzt, ist den Unternehmen der Kosten-Nutzen-Vergleich vorzulegen.

Hierfür sind weiterhin die Betriebsstunden des Anlagensystems erforderlich.

Zum Vergleich, elektrische Maschinen eines Metallverarbeitungsunternehmens lassen sich optimieren, sind aber aufgrund ihrer relativ niedrigen Betriebsstundenanzahl wirtschaftlich nicht relevant -kein durchgängiger Betrieb-.

Bei vorliegenden Unternehmen und bei Lüftungsmotoren allgemein, ist von einer deutlich höheren Betriebsstundenanzahl auszugehen.

Die Installation einer direkten Messung der elektrischen Leistungsaufnahme (wie sie bei der Lüftung bereits durchgeführt wurde) ist nur eine Variante entsprechende Daten zu erhalten. Diese Variante setzt allerdings voraus, dass notwendige Bedingungen des elektrischen Verteilernetzes erfüllt sind. Ist die Lüftung elektrisch vom restlichen Stromverbrauch getrennt, kann die Installation von Zählen alle notwendigen Daten liefern.

Körperschall-Messung durch Beschleunigungssensoren ist eine weitere Variante die Schaltzeiten zu erfassen und zu visualisieren. Hierbei wird die Ausbreitung transients elastischer Wellen innerhalb eines Festkörpers festgestellt (vgl. monarch.qucosa.de [27]). Der meist zugrunde liegende Piezoeffekt beschreibt bei elastischer Verformung die elektrische Spannung an Festkörpern. Oder, wie für vorliegenden Fall relevant, das Verformen von Materialien beim Anlegen einer elektrischen Spannung (inverser/reziproke Piezoeffekt) (vgl. www.keramverband.de [28]).

Wie bei der Installation von Luxmetern, werden neben den exakten Schaltzeiten auch weitere wirtschaftlich relevante Eigenschaften abgedeckt.

Beschleunigungssensoren werden unter anderem eingesetzt, um Abweichungen des regulären Zustandes zu erfassen. In erster Linie ist die Eigenschaft der Materialanalyse von Rissbildung, Risswachstum und Brüchen vorgesehen.

Die Installation solcher Sensoren unterliegt unter Umständen einer aufwendigen Konfiguration die individuell auf den Motorentyp angepasst werden muss. Eine nachträgliche Installation erfordert genaue Kenntnisse der aktuellen Motorenbeschaffenheit.

Da das Ziel die Visualisierung des Einsparpotenzials ist, ist die Sensorik vorzuziehen, die nur ein geringes Maß an Aufwand (Konfiguration, Installation) benötigt. Des Weiteren

sind der weitere Umgang und Nutzen mit den "Maschinen"-Daten von entscheidender Bedeutung.

Da die Drehzahlregelung einen großen Einfluss auf den Energieverbrauch aufweist, bietet es sich an, diese mittels direkter Sensorik zu erfassen. Exemplarisch sind u.a. Hall-Sensoren fähig, Änderungen im Drehzahlbereich festzustellen.

Die Veränderung von magnetischem Fluss ist die Grundlage dieser Sensorik. Sie ordnet die Zahnriemen so ein, dass ein elektrisches Ausgangssignale eine Magnetfeldänderung entspricht. Diese lässt sich in eine elektrische Größe umsetzen und nach Aufbereitung entsprechend visualisieren (vgl. www.rheintacho.de [29]).

8 Kritische Diskussion

Das Ziel die Energiedatenauswertung zu optimieren, ist in einigen Bereichen aussagekräftig umgesetzt. Die Auswertung der zugrundeliegenden EVU-Daten hat gezeigt, dass eine Begehung theoretisch nicht erforderlich ist, um die Betriebsstunden, die elektrische Beleuchtungsleistung und die daraus schlussfolgernde Energie der Beleuchtung zu erfassen.

Die Ausarbeitung hat das Grundprinzip des NILM-Verfahrens auf für das Unternehmen wirtschaftlichste Weise angewandt und lässt sich in Teilen für Großverbraucher anwenden.

Obwohl die Beleuchtung als Großverbraucher einen hohen Anteil der Energie in Industrie und Handel hat, lässt sich die Analyse durch signifikante Steigung, nur mit Einschränkungen auf andere Verbraucher übertragen. Bei Betrachtung eines Lastgangs ohne Beleuchtung ist es vor allem die Summe der Verbraucher, die die restliche Energie ausmachen. Daher ist es schwierig bei der weiteren Aufschlüsselung einzelnen Verbraucher darzustellen.

Die Analyse mit reduziertem Intervall bietet visuell eine geeignete Grundlage, um u.a. Lastspitzen genau zu identifizieren. Am Beispiel der Beleuchtung und der möglichen Schaltverzögerung ist es allerdings notwendig, 1 Stunde zu betrachten, unabhängig vom Intervall. Bei Betrachtung einer theoretischen gesamt Aufschlüsselung aller Großverbraucher ist die Datengrundlage eines Jahres in einem 1 Minutenintervall wegen der punktuell genaueren Steigung aussagekräftiger.

Um diese theoretische Ausschlüsselung aller Verbraucher zu erlangen, ist es erforderlich, die Anwendung, um ergänzende Messtechnik zu erweitern. Die wirtschaftliche Sicherheit für das Unternehmen, in Messtechnik zu investieren, wird durch die Anwendung (Grundlast/Spitzenlast-Verhältnis und Grundlastreduzierung) gewährleistet. Darauf aufbauend ist die Messtechnik weiterhin individuell dem Unternehmen anzupassen. Die hier fehlende wirtschaftliche (Planung) und technische (Messinstrumente) Automatisierung wird durch die Komponente der Prozessoptimierung (Mehrwert) versucht auszugleichen. Die Implementierung der Messdaten in ein zukünftiges Programm, ermöglicht die Erweiterung des Optimierungsgrads.

Darüber hinaus ist die Implementierung von Messtechnik, sofern sie wirtschaftlich vertretbar ist, nicht ausschließlich zur Identifizierung von Einsparungen zu betrachten. Die Messtechnik sollte sich an der Prozessoptimierung der Industrie 4.0 orientieren und dem Unternehmen somit den Anreiz bieten in Maßnahmen zu investieren, die zu Energieeinsparungen führen und zu einer Effizienzsteigerung beitragen.

Tabellenverzeichnis

Tab. 1 Auszug aus der Excel Anwendung (Δ Steigung)	20
Tab. 2 Auszug aus der Excelanwendung ($\emptyset$ Leistungssteigerung)	24
Tab. 3 Zusammenfassung der Ergebnisse der Excelanwendung	25
Tab. 4 Vergleich Tageswerte zu Jahreswerte (Hochrechnung).....	29

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1 Darstellung von beispielhaften Bilanzräumen (vgl. Keichel [1] S. 28)	6
Abb. 2 Wochenverlauf eines Non Food Unternehmens	8
Abb. 3 Tagesverlauf eines Non Food Unternehmens	9
Abb. 4 Tagesverlauf im Vergleich 1 Minutenwerte zu 15 Minutenwerte	10
Abb. 5 Definition der Bilanzgrenzen und der Bilanzräume der automatisierten Energiedatenauswertung	15
Abb. 6 Bilanzraum Grundlast	17
Abb. 7 Steigung nach 1 Stunde	19
Abb. 8 Tagesverlauf und Beleuchtungsverlauf.....	21
Abb. 9 Tagesverlauf und Steigungsklassifizierung.....	22
Abb. 10 Vergleich der Intervalle (Schaltverzögerung)	23
Abb. 11 Visueller Vergleich von Prognose zu Umsetzung	27
Abb. 12 Bilanzraum unregelmäßige Steigung	30
Abb. 13 Leistungsvergleich beim Schaltvorgang der Lüftung	32
Abb. 14 Steigungswerte "Lüftung"	33

Quellenverzeichnis

- [1] : Keichel C., Methode der grenzwertorientierten Bewertung – Dissertation- Josef Eul Verlag 2011,
1. Auflage
- [2] : Roland G. (Hrsg.), Energiecontrolling - Energiekosten systematisch steuern und senken-, 1.
Auflage 2014
- [3] : Grundlagen der Elektrotechnik, Gert Hagmann, Aula Verlag S. 21
- [4] : www.gih.de/wp-content/uploads/2018/10/AP1u2_Quali_Energieberatung.pdf
- [5] : [www.studocu.com/de/document/hochschule-darmstadt/antriebstechnik/mitschriften/
formelsammlung-eene-kawest/1754845/view](http://www.studocu.com/de/document/hochschule-darmstadt/antriebstechnik/mitschriften/formelsammlung-eene-kawest/1754845/view)
- [6] : Blesl M., Kessler A., Energieeffizienz in der Industrie, Springer Verlag, 2018
- [7] : www.vattenfall.de/geschaeftskunden-was-sind-rlm-slp-zaehler
- [8] : Dr. Püschel W., Energieeffizienz-Steigungspotential in großen Anlagenbeständen -Dissertation-
Papierflieger Verlag 2017, 1. Auflage
- [9] : www.energieeffizienz-im-betrieb.net/energiekosten-unternehmen.html
- [10] : www.energiemanagement-und-energieeffizienz.de/energie-lexikon
- [11] : Endbericht des Projektes „Wissenschaftliche Begleitforschung zu übergreifenden technischen,
ökologischen, ökonomischen und strategischen Aspekten des nationalen Teils der
Klimaschutzinitiative“
- [12] : *EU-Richtlinie 2006/32/EG*
- [13] : Leitfaden Sensorik für Industrie 4.0
- [14] : www.inhaus.fraunhofer.de/de/Geschaeftsfelder/Gebaeudebetrieb/NILM.html
- [15] : www.energieinstitut.net/de/system/files/0903_final_dienstleistungsgebaude_20120530.pdf
- [16] : www.math.uni-konstanz.de/~huynh/Vorkurs2015/Vorlesung_02.pdf, [www.herder-
oberschule.de/madincea/aufg0008/summform.pdf](http://www.herder-
oberschule.de/madincea/aufg0008/summform.pdf)
- [17] : Rudolph M., Wagner U. Energieanwendungstechnik. Springer Verlag, 2008
- [18] : www.fersch.de/pdfdoc/Formelsammlung_Funktionen.pdf, [basics-
mathematik.de/grundwissentest/wordpress/wp-content/uploads/2017/02/LF1.pdf](http://basics-
mathematik.de/grundwissentest/wordpress/wp-content/uploads/2017/02/LF1.pdf)

- [19] : www.formelsammlung-mathe.de/prozentrechnung.html
- [20] : DIN EN 16001:2009-08
- [21] : Leitfaden für den Einsatz von Energieoptimierungssystemen
- [22] : https://www.ciando.com/img/books/extract/3341016392_lp.pdf
- [23] : DIN EN 12464-1: www.shbv.de/schiedsrichter/infothek/Hallenbeleuchtung.pdf
- [24] : www.js-technik.de/die-wirkungsgradklassen-ie1/ie2/ie3
- [25] : www.baulinks.de/webplugin/2006/0309.php4
- [26] : Riefenstahl U., Elektrische Antriebstechnik. B.G. Teubner Stuttgart, Leipzig 2000
- [27] : monarch.qucosa.de/api/qucosa%3A20478/attachment/ATT-0/
- [28] : www.keramverband.de/keramik/pdf/05/sem05_04.pdf,
de.wikipedia.org/wiki/Piezoelektrizit%C3%A4t
- [29] : www.rheintacho.de/basiswissen/drehzahlsensoren
- [30] : Diplomarbeit von Tucholke P.: „Untersuchungen zum Energieeinsparpotential von Radialventilatoren in Lüftungs- und Klimageräten“, www.schweizer-fn.de/lueftung/ventilator/ventilator.php