Planung und Konzeptionierung eines Energiemonitoring-Systems zur Auslegung eines nachhaltigen Energieversorgungskonzeptes

Studienarbeit T3_3100

des Studienganges Elektrotechnik Automation

an der Dualen Hochschule Baden-Württemberg Ravensburg

von

Julian Peglow, Daniel Wolf und Fabian Singler

15. Januar 2024

Bearbeitungszeitraum	9. Oktober 2023 bis 15. Januar 2024
Matrikelnummer, Kurs	6262574, 7722637, 6642643, TEA 21
Gutachter	Prof. Dr.-Ing. Tobias Frank

Erklärung zur Eigenleistung

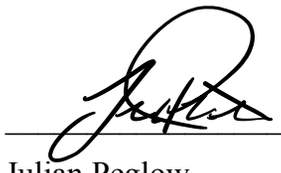
gemäß Ziffer 1.1.13 der Anlage 1 zu §§ 3, 4 und 5 der Studien- und Prüfungsordnung für die Bachelorstudiengänge im Studienbereich Technik der Dualen Hochschule Baden-Württemberg vom 29.09.2017.

Wir versichern hiermit, dass wir unsere Projektarbeit mit dem Thema:

Planung und Konzeptionierung eines Energiemonitoring-Systems zur Auslegung eines nachhaltigen Energieversorgungskonzeptes

selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt haben. Wir versichern zudem, dass die eingereichte elektronische Fassung mit der gedruckten Fassung übereinstimmt.

Friedrichshafen, den 10.01.2024



Julian Peglow



Daniel Wolf



Fabian Singler

Zusammenfassung

Aufgrund des Ziels der nahhaltigen Energieversorgung der industriellen Produktionsanlage des PTZ untersucht diese Studienarbeit die Planung und Implementierung eines Energiemonitoring-Systems zur Entwicklung eines nachhaltigen Energieversorgungskonzepts. Die Hypothese ist, dass durch die präzise Überwachung und Analyse des Energieverbrauchs in industriellen Systemen, effektivere und nachhaltigere Energieverbrauchsstrategien in Unternehmen entwickelt werden können.

Die Methodik stützt sich auf die Anwendung der DIN EN ISO 50001 und 50015 Normen, welche die Grundlage für die Etablierung eines Energiemonitorings in Unternehmen und die Messung sowie Verifizierung der Energieeffizienz bieten.

Im technologischen Bereich wurden verschiedene Komponenten von Energiemonitoring-Systemen untersucht, inklusive Sensortechnologien, Datenspeicher- und Verarbeitungsmöglichkeiten sowie Methoden der Datenvisualisierung. Die Analyse umfasste auch die Bewertung von Lastprofilen und die Dynamik des Energiebedarfs in Abhängigkeit von unterschiedlichen Abtastraten.

Für die Konzeptentwicklung des Monitoringsystems wurden mehrere Ansätze betrachtet, einschließlich einer industriellen Variante und einer Datenlogger-Variante, deren Vor- und Nachteile gegenübergestellt wurden. Die Auswahl des geeigneten Ansatzes basierte auf einer umfassenden Ist-Analyse, der Definition technologischer Strukturen und der Festlegung von Monitoringbereichen.

Die Ergebnisse zeigen, dass eine maßgeschneiderte Anwendung von Energiemonitoring-Systemen, die auf die spezifischen Bedürfnisse und Prozesse eines Unternehmens zugeschnitten sind, zu einer signifikanten Verbesserung der Energieeffizienz führen kann. Dies wird durch die Betrachtung des Systems in einem industriellen Kontext demonstriert, wobei besonderes Augenmerk auf die wirtschaftliche und technische Machbarkeit gelegt wurde. Die Studienarbeit schließt mit einer Reflexion der erreichten Ergebnisse und einem Ausblick auf zukünftige Verbesserungen und Forschungsfelder in diesem Bereich ab.

Inhaltsverzeichnis

Erklärung zur Eigenleistung II
Zusammenfassung III
Inhaltsverzeichnis IV
Abkürzungsverzeichnis VI
Autorenverzeichnis VII
Abbildungsverzeichnis VIII
Tabellenverzeichnis X
Formelverzeichnis und Größen XI
1 Einführung 1
1.1 Motivation 1
1.2 Gesamtprojekt 2
1.3 Vorausgehende Problemstellung 3
1.4 Gegenstand und Ziel der Arbeit 4
2 Grundlagen 6
2.1 Elektrische Wechselgrößen 6
2.1.1 Signalverlauf von Wechselgrößen 7
2.1.2 Phasenverschiebung 8
2.1.3 Wirk-, Blind- und Scheinleistung 9
2.1.4 Kompensation 10
2.2 Drehstrommotoren 10
2.3 Messen elektrischer Größen 13
2.3.1 Strommessung mittels Shunt Widerstand 14
2.4 Abtastung 16
2.5 Modbus TCP 16
3 Definition der Anforderungen 18
3.1 Normative Grundlagen eines Energiemanagementsystems 18
3.1.1 Energiemanagement nach DIN 50001 19
3.1.2 DIN EN ISO 50015 21
3.2 Zusammenfassung der Anforderungen 22
4 Stand der Technik 24
4.1 Definition 24

4.2 Technische Komponenten von Energiemonitoring-Systemen....24
4.2.1 Sensorik....24
4.2.2 Datenspeicherung....25
4.2.3 Datenverarbeitung....26
4.3 Erkenntnisse bisheriger Forschung....29
4.3.1 Lastprofile....29
4.3.2 Dynamik von Anlagen und Sytemen....30
4.3.3 Auswirkung von Abtastraten....31
4.3.4 Ermittelte Abtastraten....34
5 Planung und Konzeptionierung eines Energiemonitoring-Systems....37
5.1 Ist-Analyse....38
5.1.1 Bestandsliste....38
5.1.2 Technologische Struktur....40
5.1.3 Bisherige Erfahrungen....41
5.2 Monitoringbereiche....41
5.2.1 Maßstab der Monitoringbereiche....42
5.2.2 Umfang des Monitoringsystems....49
5.2.3 Vergleich von Monitoring über Maschinendaten und kontinuierlicher Messung 51
5.3 Konzeptmethoden....55
5.3.1 Industrielle Variante....56
5.3.2 Datenlogger Variante....58
5.3.3 Gegenüberstellung und Bewertung der Varianten....60
6 Ausblick und Fazit....64
6.1 Reflexion....65
6.1.1 Kritische Betrachtung....65
6.1.2 Erreichter Mehrwert....67
6.2 Ausblick....68
Literaturverzeichnis....69

Abkürzungsverzeichnis

CO_2 ..... *Kohlenstoffdioxid*
DHBW ..... *Duale Hochschule Baden-Württemberg*
EnB ..... *Energetische Ausgangsbasis*
EnPI ..... *Energy Performance Indicator*
ERP ..... *Enterprise Resource Planning*
IP ..... *Internet Protocol*
IWT ..... *Institut für Wirtschaft und Technik*
M&V ..... *Messung und Verifizierung*
PDCA ..... *Plan-Do-Check-Act*
PTZ ..... *Produktionstechnisches Zentrum*
RTU ..... *Remote Terminal Unit*
Schuko ..... *Schutzkontakt*
TCP ..... *Transmission Control Protocol*

Autorenverzeichnis

Die vorliegende wissenschaftliche Arbeit repräsentiert das Ergebnis einer kollaborativ erstellten Ausarbeitung, bei der mehrere Autoren ihre individuellen Fachkenntnisse und Fähigkeiten eingebracht haben. Jeder Autor spielte eine entscheidende Rolle in verschiedenen Phasen des Prozesses, was zu einem ganzheitlich umfassenden Verständnis der Konzeptionierung eines Energiemonitoring-Systems führte. Das Autorenverzeichnis bietet einen Überblick über die beteiligten Personen und ihre spezifischen Beiträge.

Peglow, Julian (6262574):	Kapitel: 1 Einführung (S.1)
	Kapitel: 2.3 Messen elektrischer Größen (S.13)
	Kapitel 2.4 Abtastung (S.16)
	Kapitel: 4.3.3 Auswirkung von Abtastraten (S.31)
	Kapitel: 5.2 Monitoringbereiche (S.41)
Singler, Fabian (6642643):	Kapitel: 2 Grundlagen (S.6)
	Kapitel: 2.1 Elektrische Wechselgrößen (S.6)
	Kapitel: 2.2 Drehstrommotoren (S.10)
	Kapitel: 3 Definition der Anforderungen (S.18)
	Kapitel: 5 Planung und Konzeptionierung eines Energiemonitoring-Systems (S.37)
	Kapitel: 5.1 Ist-Analyse (S.38)
	Kapitel: 6 Ausblick und Fazit (S.64)
Wolf, Daniel (7722637):	Abstract (S. III)
	Kapitel: 2.3.1 Strommessung mittels Shunt Widerstand (S.14)
	Kapitel: 2.5 Modbus TCP (S.16)
	Kapitel: 4 Stand der Technik (S.24)
	Kapitel: 5.2.3 Vergleich von Monitoring über Maschinendaten und kontinuierlicher Messung (S.51)
	Kapitel: 5.3 Konzeptmethoden (S.55)

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Stromverbrauch je Einwohner in TWh [3] 1
Abbildung 2: Beispiele für zeitliche Verläufe einer Wechselgröße [12] 7
Abbildung 3: Zeigerdarstellung mit Bezug zu zeitabhängigem Liniendiagramm [15] 8
Abbildung 4: Leistungsdreieck [17] 9
Abbildung 5: Anlaufkurve für Strom und Drehmoment [22] 11
Abbildung 6: Stromfehler- und Spannungsfehlerschaltung 13
Abbildung 7: Messschaltung mit Leistungsmessgerät 14
Abbildung 8: Messchaltung mit Shunt-Widerstand 15
Abbildung 9: PDCA-Zyklus von Demming (in Anlehnung an [33]) 20
Abbildung 10: PDCA-Zyklus mit dem Modell nach ISO 50001 in Anlehnung an [30] 21
Abbildung 11: Sankey-Diagramm zur beispielhaften Darstellung des Flusses elektrischer Energie in einem Unternehmen (in Anlehnung an [45]) 27
Abbildung 12: Darstellung verschiedener EnPIs als Säulendiagramm [9, p. 61] 28
Abbildung 13: Darstellung des Energieverbrauches über die Zeit [46, p. 51] 28
Abbildung 14: Beispielhafter Lastgang einer Produktionsanlage für einen Produktionsprozess [9, p. 71] 29
Abbildung 15: Unterabtastung eines fiktiven Leistungsprofiles mit hoher Dynamik 31
Abbildung 16: Anwendung des Abtasttheorems zur Erfassung eines fiktiven Leistungsprofiles mit mäßiger Dynamik 33
Abbildung 17: „Zielkonflikt zwischen Messgenauigkeit und Wirtschaftlichkeit“ [9, p. 48] ... 34
Abbildung 18 Bestandsliste der Einzelkomponenten 39
Abbildung 19: Hierarchisches Ebenenmodell zur Gliederung von Fertigungsanlagen (in Anlehnung an [54]) 43
Abbildung 20: Hypothetisches Lastprofil der Anlagenebene 44
Abbildung 21: Hypothetische Lastprofile der Stationsebene 46
Abbildung 22: Lastprofile der Stationsebene mit zeitlicher Verschiebung 47
Abbildung 23: Angepasstes hierarchisches Ebenenmodell zur Gliederung von Fertigungsanlagen (in Anlehnung an [54]) 49
Abbildung 24: Sankey-Diagramme für umfassenden und reduzierten Monitoringumfang 50
Abbildung 25: Möglichkeiten zur Erstellung eines zustandsabhängigen Lastprofils auf Basis von Maschinendaten in Abhängigkeit des energetischen Verhaltens [9, p. 88] 52

Abbildung 26: Beispielhaftes Lastprofil der Beladestation des PTZ 53
Abbildung 27: Schaltbild der industriellen Lösung 56
Abbildung 28: Siemens SENTRON PAC 3220 [55] 57
Abbildung 29: Variante mit Datenlogger für die Strommessung 59

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Auflistung der Daten nach Ebenen, dynamischen Verhalten und den ermittelbaren Parametern [50, pp. 1-10] 35
Tabelle 2: Auflistung der Teilekosten für die industrielle Lösung?.....58
Tabelle 3: Auflistung der Teilekosten für das Konzept mittels Datenlogger 60
Tabelle 4: Gewichtete Entscheidungsmatrix zur Bewertung beider Konzeptvarianten.....61

Formelverzeichnis und Größen

Es konnten keine Einträge für ein Abbildungsverzeichnis gefunden werden.

Formelzeichen	Einheit	Bezeichnung
TWh	TWh	Terrawattstunden
ω	$^1/_s$	Winkelgeschwindigkeit
P	W	Wirkleistung
S	VA	Scheinleistung
Q	var	Blindleistung
λ	1	Leistungsfaktor
cos(φ)	1	Wirkfaktor
U	V	Gleichspannung
I	A	Gleichstrom
n	$^1/_{min}$	Drehzahl
p(t)	W	Zeitabhängige Wirkleistung
u(t)	V	Zeitabhängige Spannung
i(t)	A	Zeitabhängiger Strom
R	Ω	Elektrischer Widerstand
R_L	Ω	Lastwiderstand
R_S	Ω	Shunt Widerstand
$i_q(t)$	A	Zeitabhängiger Quellenstrom
$u_s(t)$	V	Spannungsabfall über Shunt Widerstand
f_{ab}	$^1/_s$	Abtastfrequenz
fg	$^1/_s$	Grenzfrequenz des Messsignals
Wh	Wh	Wattstunde
VAh	VAh	Voltamperestunde
THD	%	Total Harmonic Distortion
PF	1	Leistungsfaktor
t	s	Zeit
T	s	Periodendauer
S/s	$^1/_s$	Samplerate

Symbol	Zehnerpotenz	Präfix
n	10^{-9}	Nano
M	10^{-6}	Mikro
m	10^{-3}	Milli
c	10^{-2}	Zenti
d	10^{-1}	Dezi
	10^{0}	Eins
da	10^{1}	Deka
h	10^{2}	Hekto
K	10^{3}	Kilo
M	10^{6}	Mega
G	10^{9}	Giga
T	10^{12}	Tera

1 Einführung

1.1 Motivation

Die Problematik steigender Kosten für elektrische Energie ist im Jahr 2023 wohl brisanter denn je zuvor. Da Strompreise in Deutschland nicht zuletzt aufgrund ambitionierter Klimaziele eine signifikante Steigerung erfahren, drohen Industriebetriebe mit besonders hohem Energiebedarf derweil mit Abzug der Standorte in Länder, die aus energetischer Sicht preislich attraktiver sind. Sogar Forderungen für industrielle Strompreisvergünstigungen bestehen [1]. Neben steigenden Strompreisen ist auch die Dringlichkeit des Umweltschutzes beziehungsweise drohender CO_2-Steuern ein elementarer Faktor, der Unternehmen verstärkt dazu zwingen wird, ihren Stromverbrauch zu senken [2]. Nachfolgende Grafik der International Energy Agency zeigt jedoch, dass der globale Trend zu steigender Nachfrage an elektrischer Energie tendiert.

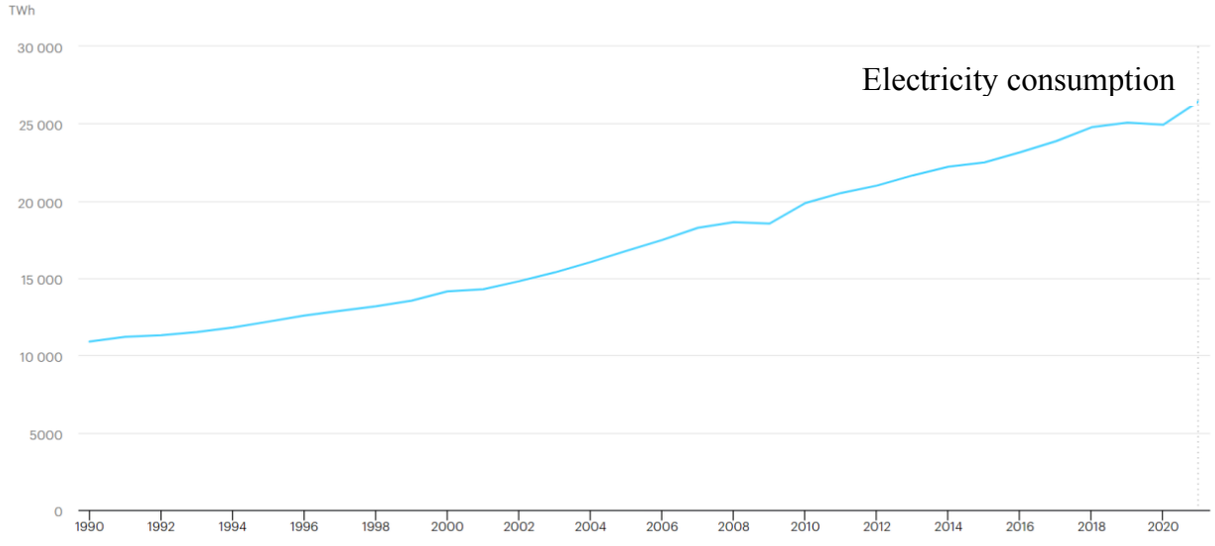


Abbildung 1: Stromverbrauch je Einwohner in TWh [3]

Abbildung 1 zeigt den Anstieg des globalen Verbrauchs elektrischer Energie in Terrawatt-stunden vom Jahr 1990 bis zum Jahr 2021. Bis auf zwei marginale Einbrüche, die wahrscheinlich mit der Weltwirtschaftskrise im Jahr 2008 und die Coronapandemie im Jahr 2020 zu erklären sind, ist ein anhaltendes Wachstum im Verbrauch elektrischer Energie zu erkennen. Unter der Annahme, dass auch die Strompreise bei wachsender Nachfrage weiter steigen, kann die Schlussfolgerung getroffen werden, dass der Bedarf sowohl an Lösungen zur autarken Energieversorgung als auch zur Reduzierung des Stromverbrauches derzeit sehr hoch

ist. Eine wirksame Maßnahme zur Reduzierung des Stromverbrauchs ist die systematische Überwachung beziehungsweise vielmehr die sich daraus ermöglichende Analyse des Energiebedarfs. Unternehmen können dadurch sowohl ihre laufenden Betriebskosten senken als auch ihren ökologischen Fußabdruck verbessern [4].

1.2 Gesamtprojekt

Diese Studienarbeit bildet einen integralen Bestandteil im diesjährigen Gesamtprojekt der Zukunftsfabrik Bodensee. Die Zukunftsfabrik Bodensee ist Bestandteil des produktionstechnischen Zentrums (PTZ) am Campus Friedrichshafen der DHBW Ravensburg und bildet ein Netzwerk mit der Lernfabrik des Instituts für Wirtschaft und Technik (IWT) [5]. Die Vision dieses Netzwerks besteht darin, ein variables "Smart Product" in unterschiedlichen Ausführungen herzustellen und gleichzeitig die Prinzipien der Kreislaufwirtschaft zu berücksichtigen. Dies schafft die Basis für praxisnahe Forschung in verschiedenen industriellen Schlüsselbereichen in einem modernen und realitätsnahen Smart-Factory-Umfeld [5], [6]. Zentraler Bestandteil dieser miniaturisierten Industrie 4.0 Fertigung bildet ein hochmodernes Bandsystem, welches sowohl über zahlreiche smarte als auch konventionelle Sensoren verfügt. Dieses Bandsystem gewährleistet den reibungslosen Transport des zu fertigenden Produkts zwischen den einzelnen Stationen. Der Prozess beginnt mit der Identifikation der benötigten Variante mithilfe eines QR-Code-Scanners am Eingang der Produktionsstraße. Anschließend übernimmt ein kollaborativer Roboter die Verlagerung des Werkstücks vom Transportträger auf den Werkstückträger, welcher sich auf dem Förderband befindet. Im darauffolgenden Schritt wird der Werkstückträger an der zweiten Station mit den der bestellten Variante entsprechenden Bolzen beladen. An Station drei befindet sich sowohl die Vormontage als auch die Endmontage der Fertigungssequenz. Bei dieser Station handelt es sich um einen ergonomisch optimierten manuellen Arbeitsplatz, bei dem ein durch Bilderkennung unterstütztes Werkerassistenzsystem mittels Live-Darstellung Montageanweisungen visualisiert. Am Ende der Fertigungssequenz erfolgt die kamerabasierte Überprüfung des Werkstücks, gefolgt von der Verladung auf das fahrerlose Transportsystem, welches das Werkstück zum nächsten Fertigungsabschnitt in der Lernfabrik des IWT transportiert. Dort erfolgt letztlich die Endmontage sowie die abschließende Qualitätskontrolle am End of Line. Wie bereits erläutert, handelt es sich um eine Kreislaufwirtschaft. Nach Fertigstellung des Produktes erfolgt daher die Einschleusung in den Demontageprozess zur Wiederherstellung des ursprünglichen Zustands [6].

Während der Fokus der Studienarbeiten im vergangenen Jahr hauptsächlich auf der Inbetriebnahme und Errichtung des Produktionsnetzwerks lag, steht in diesem Jahr vor allem die Optimierung im Vordergrund des Gesamtprojektes. Diese Optimierungen beinhalten sowohl den Ausbau als auch die Ergänzung des Produktionssystems, um den gesamten Fertigungsprozess zu verbessern. Konkrete Themen, die in diesem Zusammenhang behandelt werden, umfassen beispielsweise die Einführung eines ERP-Systems, die Erweiterung des Digitalen Zwillings sowie die normgerechte Anpassung des Schaltschranks inklusive Erstellung eines Schaltplanes. Eine übergeordnete Fragestellung der Zukunftsfabrik im Gesamtkontext der diesjährigen Erweiterungs- und Optimierungsprojekten ist, wie das Produktionssystem zukünftig mit erneuerbaren Energien versorgt werden kann. Um den Wandel hin zur Green Factory zu beschreiten soll geprüft werden, ob eine Versorgung mit der campuseigenen Photovoltaikanlage möglich ist, die zum momentanen Zeitpunkt lediglich die E-Bike-Ladestation versorgt. Um eine Aussage darüber treffen zu können, ob die Versorgungsleistung der Photovoltaikanlage tatsächlich ausreichend ist, soll in einem ersten Schritt, im Rahmen dieser Studienarbeit, die Planung und Konzeptionierng eines Energie-monitoring-Systems durchgeführt werden, welches letztlich fundierte Aussagen über den energetischen Bedarf der Zukunftsfabrik ermöglichen soll.

1.3 Vorausgehende Problemstellung

Der Begriff Green Factory impliziert die vollständige Dekarbonisierung des Fertigungsprozesses [7]. Da die Energieversorgung aus regenerativen Quellen ein elementarer Bestandteil der Green Factory ist, wird dahingehend, wie bereits in Kapitel 1.2 aufgeführt, angestrebt, die Fertigung im produktionstechnischen Zentrum am Campus Friedrichshafen mit Solarenergie zu versorgen. Unabhängig von der Fragestellung, ob dies mittels des bereits vorhandenen Photovoltaikpanels möglich ist, kann als grundlegende Problematik der solaren Energieerzeugung festgehalten werden, dass die Leistung maßgeblich von den Umgebungsbedingungen abhängig ist. Bei sonnigem Wetter erreicht die Energieproduktion ihren Höhepunkt, jedoch unterliegt sie beträchtlichen Schwankungen, insbesondere im Verlauf eines Tages [8]. Dies bedeutet, dass während sonnenreicher Perioden eine signifikante Menge an Energie erzeugt wird, aber die Verfügbarkeit dieser Energie möglicherweise nicht immer mit den Lastspitzen in der Fertigung korreliert. Darin besteht wiederum das wesentliche Problem, welches den Ausgangspunkt dieser Studienarbeit darstellt. Unvorhersehbare Lastspitzen, die innerhalb der Fertigungsumgebung auftreten können. Diese Spitzenlasten

treten typischerweise in Situationen auf, in denen Maschinen oder Anlagen in Betrieb genommen werden oder in der simultanen Nutzung mehrerer energieintensiver Prozesse [9]. Solche Ereignisse erfordern eine kurzfristige und erhebliche Erhöhung der Stromversorgung, welche eventuell nicht allein durch die Photovoltaikanlage abgedeckt werden kann. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt liegt allerdings kein repräsentatives Lastprofil der Zukunftsfabrik Bodensee vor. Es besteht somit völlige Unkenntnis über das Vorhandensein oder den Umfang von Lastspitzen. Ebenso ist unklar, wie groß die kontinuierliche Grundlast der Fertigungslinie ist. Folglich besteht auch Unsicherheit darüber, ob der Strombedarf auf gleichzeitige Prozesse, Anlaufströme oder andere Einflussgrößen zurückzuführen ist. Es fehlt ebenfalls eine ausführliche Bestandsliste, welche die verwendeten elektrischen Komponenten dokumentiert und grundlegende Angaben zu deren Leistungsanforderungen enthält. Die genaue Identifizierung und Analyse der aufgeführten Aspekte ist jedoch grundlegend notwendig, um eine Aussage zu Versorgungsmöglichkeiten der Fertigung treffen zu können.

1.4 Gegenstand und Ziel der Arbeit

Primäres Ziel dieser Studienarbeit ist es einen Beitrag zu leisten, der als Lösungsansatz für die zuvor umfassend beschriebene Problemstellung herangezogen werden kann. Grundlage dieser Zielsetzung ist die Ambition, den Wandel hin zu einer Green Factory zu beschreiten.
Gegenstand dieser Arbeit ist daher die Planung und Konzeptionierung eines Energiemonitoring-Systems zur Auslegung eines nachhaltigen Energieversorgungskonzeptes. In einem ersten Schritt soll daher eine Untersuchung erfolgen, welche Energiemonitoring-Möglichkeiten es gibt beziehungsweise mit welchen Komponenten ein Energiemonitoringkonzept realisiert werden kann. Da weder Schaltplan noch Dokumentationsunterlagen vorhanden sind, soll hierfür zu Beginn eine vollumfängliche Ist-Analyse in der Zukunftsfabrik durchgeführt werden, die Aufschluss darüber gibt, welche Verbraucher sich im Bestand der Produktionsanlage befinden und wie diese zusammenhängen. Dabei soll auch Berücksichtigt werden, mit welcher Abtastrate die Momentanleistung der Anlage erfasst werden muss, um das Vorhandensein möglicher Lastspitzen zu detektieren. Anhand der erlangten Erkenntnisse sollen Anforderungen an das zu installierende Energiemonitoring-System abgeleitet werden, sodass eine systematische Evaluierung der Umsetzungsmöglichkeiten durchgeführt werden kann. Diese soll ebenfalls Bestandteil dieser Studienarbeit sein und sich sowohl an industriellen Standards orientieren, als auch die Interessen der Stakeholder miteinbeziehen. Unter Berücksichtigung finanzieller Zielvorgaben soll zudem auch geprüft werden, wie und in welchem Umfang das

ausgewählte Energiemonitoring-System installiert werden soll. Hierbei soll eine Untersuchung durchgeführt werden, die Aufschluss darüber gibt, ob und in welchem Umfang es sinnvoll ist, Stationen oder anderweitige Verbrauchergruppen in energetische Gruppen zu gliedern, die im Monitoringsystem als separate Einheit erfasst werden. Ergänzend zu dieser Zielsetzung soll auch die Ausarbeitung eines Messdatenkonzeptes erfolgen, sodass ein repräsentatives Lastprofil erstellt werden kann.

Die Installation und Inbetriebnahme des geplanten Energiemonitoring-Systems soll im Rahmen einer weiterführenden Arbeit umgesetzt werden, die auf das hier erarbeitete Konzept konkret aufbaut und an die dargelegten Erkenntnisse anknüpft.

Auch die abschließende Beantwortung der Frage, ob das Produktionssystem mit der Photovoltaikanlage der E-Bike-Station tatsächlich versorgt werden kann, soll nicht Bestandteil dieser Arbeit sein und wird daher als Ausblick betrachtet.

2 Grundlagen

In diesem Kapitel wird näher auf die Grundlagen im Themenfeld dieser Arbeit eingegangen und damit das theoretische Fundament für die nachfolgenden Abschnitte der Studienarbeit gelegt. Es zielt darauf ab, grundlegende elektrotechnische und automatisierungstechnische Aspekte zu erläutern, die für die zielgerichtete Umsetzung entscheidend sind. Dabei zielt der erste Abschnitt der Grundlagen, Kapitel 2.1, Elektrische Wechselgrößen auf die Vertiefung des Verständnisses der Phasenverschiebung, sowie der Wirk- Schein- und Blindleistung ab. Anschließend gibt Abschnitt 2.2 einen Überblick über Drehstrommotoren und Abschnitt 2.3 vertieft das Messen elektrischer Größen. Hierbei wird auf das Abtasttheorem, die Messgenauigkeit und die Messtechniken allgemein eingegangen. Abschließend fokussiert sich der Abschnitt 2.4 auf Modbus TCP (Transmission Control Protocol).
Es ist von Wichtigkeit zu betonen, dass dieses Kapitel als Einführung und Überblick fungiert. Für detaillierte Informationen und eine umfassende Auseinandersetzung mit den angeschnittenen Themen wird auf die im Literaturverzeichnis angeführten Quellen verwiesen.

2.1 Elektrische Wechselgrößen

In diesem Abschnitt des Kapitels der Grundlagen werden die essenziellen Bestandteile der elektrotechnischen Kenntnisse, die für die Planung und Implementierung eines Energiemonitoring-Systems von entscheidender Relevanz sind, behandelt. Hierbei werden spezifische Aspekte elektrischer Wechselgrößen bearbeitet, die eine grundlegende Bedeutung für das Verständnis und die Quantifizierung des elektrischen Energieverbrauchs in industriellen Anwendungen haben. Im Fokus dieses Abschnittes stehen zunächst die Wechselgrößen. Diese werden durch veränderliche Spannungs- und Stromwerte repräsentiert. Anschließend wird das Verständnis der Phasenverschiebung vertieft, wobei die zeitliche Abweichung zwischen verschiedenen Wechselgrößen und die Auswirkungen auf Leistungsfaktoren erläutert wird. Danach werden in Abschnitt 2.1.3 die verschiedenen Arten der Leistung aufgezeigt. Dabei wird darauf eingegangen, was welche Art der Leistung widerspiegelt und warum dieses Verständnis wichtig für die präzise Analyse des Energieverbrauchs ist. Abschließend wird im letzten Abschnitt dieses Kapitels die Kompensation der Blindleistung behandelt, wodurch die Effizienz des Energieverbrauchs gesteigert und die Stabilität des elektrischen Systems verbessert werden kann.

2.1.1 Signalverlauf von Wechselgrößen

Als Wechselgrößen wird prinzipiell eine physikalische Größe mit Augenblickswerten, die einem periodischem Zeitverlauf folgen, benannt. Diese sich zeitlich wiederholenden Schwankungen oder auch Schwingungen, liegen häufig in Sinusform vor, sind jedoch nicht ausschließlich darauf beschränkt. Insbesondere in der Elektrotechnik hat diese Definition für Spannungen, Wechselspannungen und Ströme, Wechselströme, eine große Bedeutung. Im Gegensatz dazu steht die sogenannte Gleichgröße, die einen zeitlich konstanten Verlauf mit einem Gleichwert zeigt. Im Bereich der Elektrotechnik werden diese als Gleichspannung und Gleichstrom bezeichnet [10]. Diese Unterscheidung zwischen Wechsel- und Gleichgrößen bildet eine grundlegende Klassifizierung elektrischer Größen, die in diversen Anwendungen, insbesondere in der Analyse und Optimierung von Energieverbrauchssystemen, von zentraler Bedeutung ist. Dies ist abhängig von der effektiven Methode mit Hilfe von Wechselgrößen elektrische Energie von der Erzeugungseinheit zu den Verbrauchern transportieren zu können [11]. In der folgenden Abbildung 2 sind Beispiele für den Verlauf von Wechselgrößen aufgezeigt.

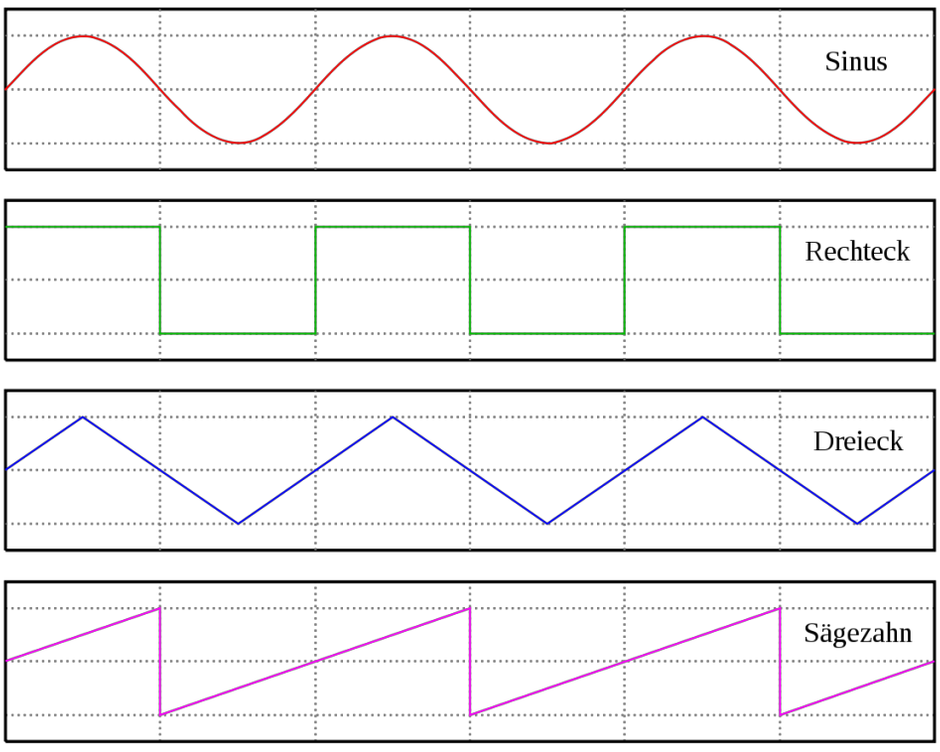


Abbildung 2: Beispiele für zeitliche Verläufe einer Wechselgröße [12]

In Abbildung 2 wird als erstes ein Sinussignal dargestellt, anschließend ein Rechtecksignal, der dritte Verlauf stellt ein Dreiecksignal dar und abschließend ist ein Sägezahnsignal dargestellt. Um ein tieferes Verständnis der Wechselgrößen entwickeln zu können und zu verstehen, wie diese Wechselgrößen entstehen und was weitere Anwendungen und Funktionen dieser sind wird an dieser Stelle auf folgende Literatur verwiesen: Grenzgebiete der Elektrotechnik, Band 2, von Führer, Arnold; Heidemann, Klaus; Nereter, Wolfgang [13, pp. 1-29].

2.1.2 Phasenverschiebung

Die Phasenverschiebung stellt ein fundamentales Konzept im Kontext der elektrischen Wechselgrößen dar. Sie beschreibt die zeitliche Verschiebung zwischen verschiedenen Wechselgrößen, insbesondere zwischen Strom und Spannung in einem Wechselstromsystem. Diese zeitliche Differenz wird in Grad oder Radiant gemessen und ist von entscheidender Bedeutung für die Analyse und Charakterisierung von Wechselstromschaltungen [14]. Die Phasenverschiebung resultiert aus der Verzögerung oder dem Vorgriff des Stroms im Vergleich zur Spannung. Diese zeitliche Asynchronität kann durch kapazitive oder induktive Elemente in der Schaltung entstehen. In kapazitiven Elementen eilt der Strom der Spannung voraus, während in induktiven Elementen der Strom der Spannung nachläuft. Um den Phasenwinkel deutlicher darstellen zu können eignet sich die Zeigerdarstellung.

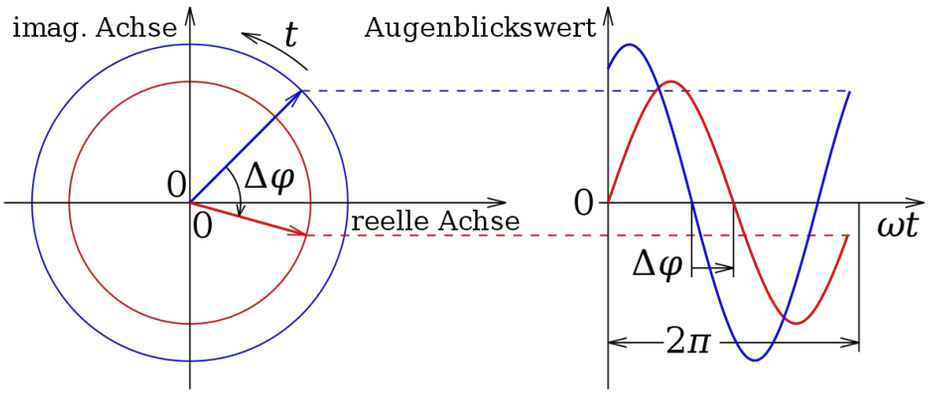


Abbildung 3: Zeigerdarstellung mit Bezug zu zeitabhängigem Liniendiagramm [15]

Dies ist eine Projektion des Liniendiagramms auf einen Kreis. Dabei hat der Kreis als Radius den Scheitelwert (Spitzenwert) der jeweiligen Wechselgröße. Für sinusförmige Wechselgrößen rotiert der Phasenwinkel nun gegen den Uhrzeigersinn mit konstanter Winkelgeschwindigkeit

Omega ω. Die Phasenverschiebung lässt sich dadurch als Differenz der beiden Winkel einfach ablesen [16].

2.1.3 Wirk-, Blind- und Scheinleistung

Im Bereich elektrischer Wechselgrößen nimmt die Analyse der Leistung, unterteilt in Wirk-, Blind- und Scheinleistung, eine fundamentale Rolle ein. Diese Unterscheidung der Leistung ermöglicht eine präzise Charakterisierung des Energieverhaltens in Wechselstromsystemen.
Die Wirkleistung P repräsentiert die tatsächliche, in Arbeit umgewandelte elektrische Leistung und wird in Watt [W] gemessen. Sie steht in direktem Zusammenhang mit dem effektiven Energieverbrauch, da sie die Leistung darstellt, die die mechanische Arbeit verrichtet oder in andere Formen, wie Licht oder Wärme umwandelt.
Die Blindleistung Q hingegen ist die Leistung, die nicht direkt in mechanische Arbeit umgewandelt wird, sondern in Voltampere reaktiv [var] gemessen wird. Diese Leistung ist erforderlich, um magnetische und elektrische Felder aufrecht zu erhalten und den Energiefluss in elektrischen Netzwerken zu gewährleisten.
Die Scheinleistung S stellt die scheinbare Leistung dar, die die vektorielle Summe von Wirk- und Blindleistung ist. Sie wird in Voltampere [VA] gemessen und gibt die scheinbare Größe der elektrischen Leistung an. Die Scheinleistung ist relevant, da sie die maximale Leistung darstellt, die in einem Wechselstromsystem fließen kann. Das Verhältnis von Wirk- und Scheinleistung, bekannt als λ Leistungsfaktor, ist entscheidend für die Effizienz eines elektrischen Systems [17], [18]. Um diesen Zusammenhang zu verdeutlichen, hilft das auf dem Satz des Pythagoras basierende Leistungsdreieck, welches in der nachfolgenden Abbildung dargestellt ist:

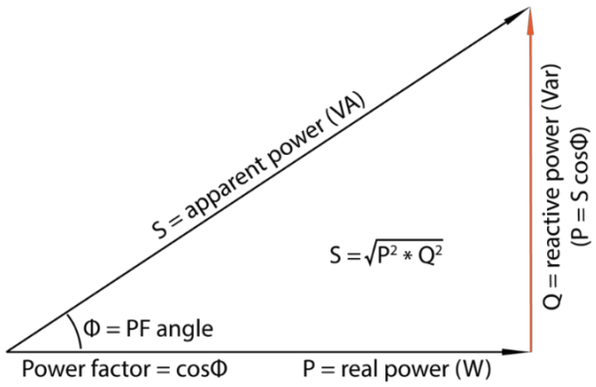


Abbildung 4: Leistungsdreieck [17]

2.1.4 Kompensation

Der sogenannte Blindwiderstand begrenzt die Entstehung von Wechselstrom (bei einer Spule) oder Wechselspannung (bei einem Kondensator) durch die Erzeugung einer Gegenspannung oder eines Gegenstroms. Diese verursachen die Phasenverschiebung zwischen Spannung und Strom, wie bereits in Kapitel 2.1.2 beschrieben. Die Größe des Blindwiderstands ist sowohl von der Frequenz des Wechselstroms, als auch von den elektrischen Eigenschaften der Spule oder des Kondensators abhängig. Im Gegensatz zu ohmschen Widerständen verbrauchen Blindwiderstände, abgesehen von Verlusten, im Mittel keine Energie. Dennoch wird durch diese Blindwiderstände das Netz belastet, da das Kraftwerk durch mehr Blindleistung die Widerstände kompensieren muss, um die nachgefragte Wirkleistung zu liefern. Deshalb müssen Großverbraucher für diese Blindenergie bezahlen [18]. Die Blindleistungs-kompensation ist ein häufig angewandtes Verfahren zur Reduktion der Strombelastung von Leitungen, insbesondere bei induktiven Lasten wie Elektromotoren. Durch den gezielten Einsatz von Kondensatoren oder Kompensationsdrosseln wird die Blindleistung optimiert, um einen höheren Wirkfaktor zu erreichen. Dies dient nicht nur der Minimierung der Energieverluste, sondern hat zusätzlich Auswirkungen auf die Spannungshaltung. Die Entscheidung für oder gegen Blindleistungskompensation erfordert eine sorgfältige Abwägung der ökonomischen und technischen Aspekte, wobei insbesondere bei größeren Lasten betriebswirtschaftliche Überlegungen eine Rolle spielen [19].

2.2 Drehstrommotoren

In diesem Kapitel liegt der Fokus auf den technischen Aspekten und dem Betriebsverhalten von Drehstrommotoren. Dabei wird der Wirkfaktor *cos(φ)*, sowie die verschiedenen Anschlussarten und die Motorstromkurve, vor allem im Einschaltvorgang näher betrachtet.

Der Wirkfaktor, beziehungsweise Leistungsfaktor, eines Drehstrommotors ist das Verhältnis zwischen der Wirkleistung P und der Scheinleistung S in einem elektrischen System. Dabei bedeutet ein *cos(φ)* von eins, dass die gesamte elektrische Leistung für effektive Arbeit verwendet wird, während ein *cos(φ)* kleiner eins auf einen Anteil von Blindleistung hinweist, der nicht für die tatsächliche Arbeit verwendet werden kann. Die Analyse des Leistungsfaktors ist entscheidend, um die Effizienz und die tatsächliche Leistungsaufnahme von Drehstrom-motoren zu bewerten [20]. Der Anschluss eines Drehstrommotors erfolgt in der Regel durch zwei grundlegende Schaltungsarten: Die Stern- oder die Dreieckschaltung. Die Wahl der

Schaltungsart hängt von der auf dem Typenschild des Motors angegebenen Spannung ab. Generell gilt, dass bei zwei angegebenen Spannungen auf dem Typenschild die Sternschaltung für die höhere und die Dreieckschaltung für die geringere Spannung zu verwenden ist. Die Sternschaltung auch Y-Schaltung genannt stellt eine gängige Methode zur Verbindung von Drehstrommotoren mit dem Stromnetz dar. Jeder Spulenanschluss der drei Spulen ist mit einem Leiter verbunden, während die anderen drei Spulenanschlüsse am gemeinsamen Punkt zusammentreffen. Die Dreieckschaltung dagegen stellt eine weitere Möglichkeit dar Drehstrommotoren mit dem Stromnetz zu verbinden. Hier sind drei unterschiedliche Anschlusspunkte erkennbar, und es liegt weder eine Reihen- noch eine Parallelschaltung vor. Die Drehstrommotoren können entweder direkt oder durch eine Stern-Dreieck-Schaltung gestartet werden. Letztere wird nur bei leistungsstärkeren Motoren eingesetzt [21].

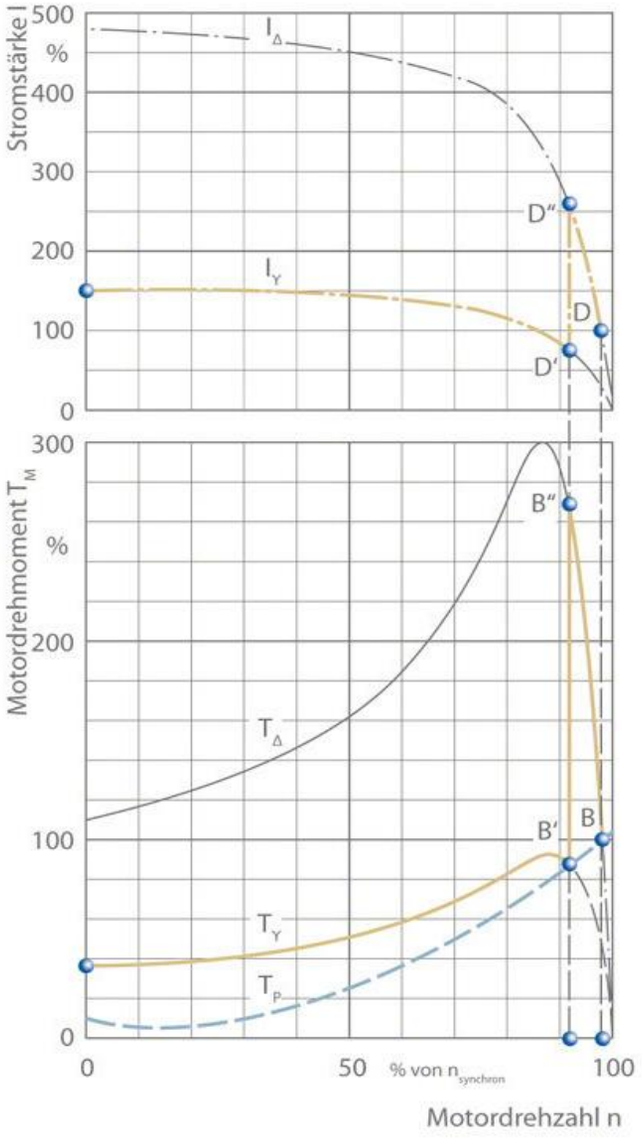


Abbildung 5: Anlaufkurve für Strom und Drehmoment [22]

Die Einschaltkurve beschreibt den zeitlichen Verlauf des Stroms beim Einschalten eines Drehstrommotors. In der Abbildung 5 ist diese Einschaltkurve in dem oberen Diagramm sowohl in der Stern-(I_Δ), Dreieck-(I_Y) und in der Stern-Dreiecksschaltung (gelbe Kurve) dargestellt. Hierbei ist die Stromstärke *I* auf der Y-Achse und die Motordrehzahl *n* auf der X-Achse dargestellt. Darunter befindet sich die Darstellung des Drehmomentes im Verlauf der Motordrehzahl. Anhand dieser beiden Diagramme ist eine gründliche Analyse der Einschaltkurve des Motorstroms machbar. Hierbei ist in beiden Anschlussmöglichkeiten sichtbar, dass der Strom anfangs sprunghaft ansteigt und anschließend allmählich auf den Nennstrom abflacht, wenn der Motor die Nenndrehzahl erreicht hat.

Ist der Drehstrommotor in der Dreieckschaltung angeschlossen, so wird deutlich, dass die anfängliche Stromstärke und das Motordrehmoment deutlich höher sind, als bei der Sternschaltung. Durch den hohen Stromverbrauch, resultiert eine hohe Belastung. Bei der Sternschaltung dagegen ist der anfänglich benötigte Strom deutlich geringer, was von großem Vorteil ist. Anhand dieser Abbildung wird durch die gelb markierte Kurve zusätzlich deutlich, weshalb es sinnvoll ist, eine Dreiecksschaltung nicht direkt an das Netz anzuschließen, sondern dies über eine Stern-Dreieckschaltung zu tätigen. Hier wird deutlich, dass der Motor wie bereits erwähnt anfangs in der Stern-Schaltung zum Anlaufen deutlich weniger Strom benötigt. Ist die maximale Drehzahl in der Stern-Schaltung erreicht, so wird in die Dreiecksschaltung umgeschaltet. Dadurch steigt zwar der Stromverbrauch etwas, aber auch die Drehzahl des Motors deutlich. Hierbei sind die Vorteile, dass der Motor deutlich weniger Strom und damit Energie verbraucht, als dies bei einem direkten Anschluss der Dreiecksschaltung der Fall wäre. Dieser angesprochene Anlaufspitzenstromwert ist entscheidend für die Auslegung der elektrischen Infrastruktur und die Auswahl von Schutzvorrichtungen.

Die detaillierte Analyse der Einschaltkurve ermöglicht die richtige Dimensionierung von Schaltgeräten und trägt dazu bei, Überlastungen zu vermeiden und die Lebensdauer des Motors zu optimieren. Deshalb ist es wichtig, die jeweilige Anschlussart des verwendeten Motors zu kennen und den dazugehörigen Stromverlauf der Einschaltkurve zu wissen [22], [23].

2.3 Messen elektrischer Größen

Bei der messtechnischen Umsetzung des Energiemonitorings ist es von grundlegender Bedeutung zu verstehen, dass sich die Leistung als das Verhältnis der aufgebrachten elektrischen Arbeit zur entsprechenden Zeitdauer definiert. Unter Berücksichtigung des Zusammenhangs

$$P(t) = u(t) \cdot i(t) \tag{1}$$

kann zudem festgehalten werden, dass die Bestimmung der Leistung in einfachen elektrischen Netzwerken, die keine komplexen Bauteile enthalten, durch die Messung von Spannung und Strom möglich ist. Gemäß des Zusammenhangs (1) ist für die einfachste Form der Leistungsmessung in einem Netzwerk mit rein reellen Verbrauchern, deren Widerstandswert nicht bekannt ist, lediglich ein Amperemeter für die Strommessung sowie ein Voltmeter zur Messung des Spannungsabfalls erforderlich. Dabei wird häufig auf eine der beiden folgenden Messschaltungen zurückgegriffen.

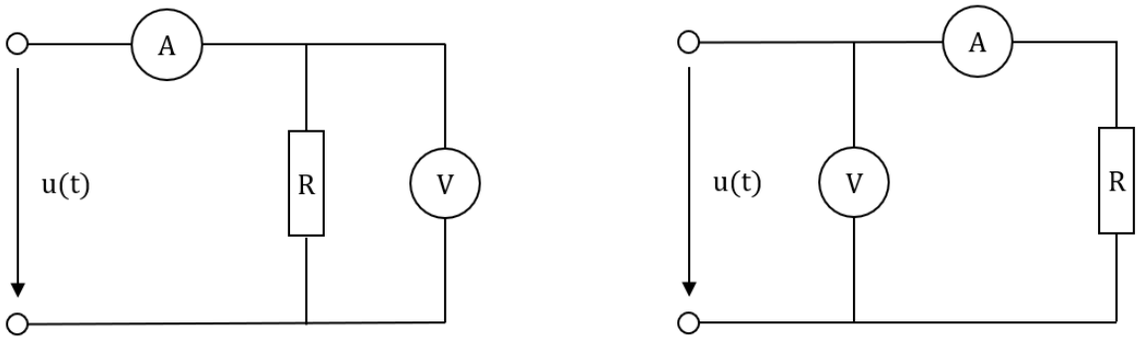


Abbildung 6: Stromfehler- und Spannungsfehlerschaltung

Der Verbraucher, dessen Leistung durch eine der beiden Messschaltungen bestimmt werden kann, ist in Abbildung 6 als reeller Widerstand *R* dargestellt. Bei der Stromfehlerschaltung (links) wird das Spannungsmessgerät parallel zur Last geschalten, wohingegen sich das Strommessgerät in Reihe dazu befindet. Trotz des hohen Innenwiderstandes fließt ein geringer Strom durch das Spannungsmessgerät. Dies wiederum hat zur Folge, dass der mit dem Amperemeter gemessene Strom größer ist als der Strom, welcher tatsächlich durch die Last fließt. Bei der Spannungsfehlerschaltung (rechts) wird das Strommessgerät in Reihe zur Last geschalten, wodurch sich ein Spannungsteiler aus Lastwiderstand und Innenwiderstand des

Strommessgerätes ergibt. Dies hat wiederum zur Folge, dass der tatsächliche Spannungsabfall an der Last geringer ist als der gemessene Wert. Um der Problematik der Beeinflussung des Stromkreises durch das Strommessgerät entgegenzuwirken, kann die Verwendung einer Strommesszange als Messmittel in Betracht gezogen werden. Ein signifikanter Vorteil der Strommesszange besteht darin, dass der Stromkreis für die Messung nicht unterbrochen werden muss. Darüber hinaus bewirkt die Einfügeimpedanz der Zange, die aufgrund induktiver Kopplung besteht, lediglich eine geringfügige Beeinflussung des Stromkreises. Auch Strommessungen in Gleichstromkreisen sind bei Strommesszangen mit Hall-Sensor möglich [24].
Ein wesentliches Problem der beschriebenen Messschaltungen liegt jedoch darin, dass sie in komplexen Systemen mit unbekannter Phasenverschiebung lediglich die Messung der Scheinleistung ermöglichen. Eine verbesserte Methode besteht daher in der direkten Leistungsmessung mittels Wattmeter gemäß Abbildung 7.

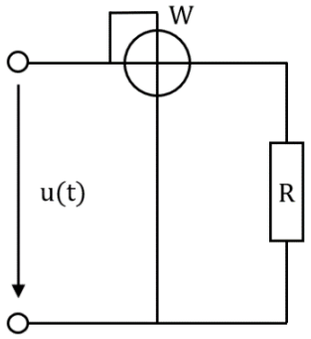


Abbildung 7: Messschaltung mit Leistungsmessgerät

Leistungsmessgeräte können beispielsweise auf elektrodynamischen Messwerken basieren, die nicht nur Schein-, sondern auch Wirkleistung messen können, woraus sich wiederum Phasenverschiebung und Blindleistung ermitteln lassen [25]. Da das Energiemonitoring im Rahmen dieser Arbeit im Umfeld einer industriellen Fertigung mit Motoren für Förderbänder und Roboterantrieben durchzuführen ist, kann unter Berücksichtigung der in den vorherigen Unterpunkten von Kapitel 2.2 geschilderten Aspekte festgehalten werden, dass eine direkte Messung der Leistung gemäß Abbildung 7 prinzipiell zu bevorzugen ist.

2.3.1 Strommessung mittels Shunt Widerstand

In der Messung elektrischer Ströme spielt der sogenannte Shunt Widerstand eine zentrale Rolle. Ein Shunt Widerstand ist ein spezieller Widerstand, welcher einen außerordentlich kleinen

Widerstandswert aufweist. Die Funktion des Shunt Widerstands basiert darauf, dass durch diesen geringen Widerstandswert lediglich eine minimale Spannung abfällt, die gemäß dem Ohm´schen Gesetz direkt proportional zum durch ihn fließenden Strom ist. Diese resultierende kleine Messspannung muss allerdings verstärkt werden, um für Messinstrumente nutzbar zu sein. Dies geschieht durch den Einsatz einer Verstärkerschaltung, die das schwache Spannungssignal in ein messbares Signal umwandelt.

In der Praxis weisen Widerstände jedoch immer parasitäre Kapazitäten auf, wodurch bei der realen Messung ein entsprechender Messfehler entsteht. Diese Messfehler sind zwar minimal, aber dennoch vorhanden und können durch gezielte Schaltungsoptimierungen weitestgehend verhindert werden. In dieser Arbeit wird allerdings nicht weiter auf solche Optimierungsmethoden eingegangen, da die Erläuterung des Shunt Widerstands nur dem grundlegenden Verständnis der elektrischen Messverfahren dient um die nachfolgende Arbeit zu verstehen. Für weitere Informationen zur Optimierung wird hierbei auf die Literatur verwiesen [26, pp. 409-413].

Zur Veranschaulichung wird in Abbildung 8 ein beispielhaftes Schaltbild aufgezeigt.

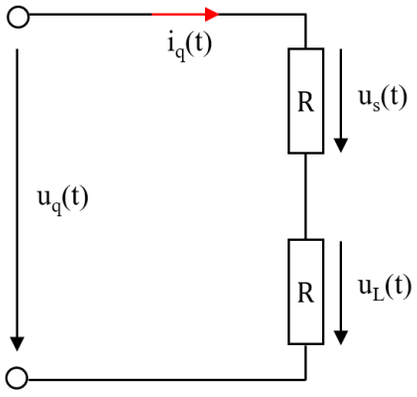


Abbildung 8: Messchaltung mit Shunt-Widerstand

Hierbei wird der Shunt Widerstand R_S in Reihe zur Last R_L geschalten. Da der Widerstandswert des Shunts im Gegensatz zur Last sehr klein ist, beeinträchtigt er die Last nur in einem vernachlässigbar kleinen Maß. Durch den Strom i_q, welcher durch den Shunt fließt, fällt an ihm eine Spannung u_S ab, welche wie bereits beschrieben sehr klein, aber bei richtiger Optimierung proportional zum Strom ist. Diese Spannung kann nun abgegriffen und mit einer Verstärkerschaltung verstärkt werden. Das Verstärkte Signal kann dann über ein Messgerät interpretiert werden.

2.4 Abtastung

Die Abtastung von Messdaten ist ein zentraler Vorgang in der Erfassung und Analyse dynamischer Größen und stellt den Übergang von analogen zu digitalen Signalen dar. In vielen technischen Anwendungen ist die präzise Digitalisierung analoger Daten entscheidend, da nur so die weitere Verarbeitung und Analyse durch digitale Systeme ermöglicht wird [27]. Bei der Abtastung wird ein kontinuierliches analoges Signal in regelmäßigen Zeitabständen gemessen, um eine diskrete Folge von Werten zu erzeugen. Dieser Prozess ist grundlegend für die Signalverarbeitung, da digitale Systeme kontinuierliche Signale nicht direkt verarbeiten können. Die Qualität der Abtastung, insbesondere die Wahl der Abtastrate, ist entscheidend für die Genauigkeit, mit der das ursprüngliche analoge Signal rekonstruiert und analysiert werden kann [27], [28]. Um Unterabtastung zu vermeiden, sollte das allgemeine Abtasttheorem (2) berücksichtigt werden.

$$f_{ab} > 2 \cdot f_g \tag{2}$$

Gemäß des Abtasttheorems (2) kann festgehalten werden, dass die Abtastrate f_{ab}, welche auch als Messfrequenz aufgefasst werden kann, mehr als doppelt so hoch sein sollte wie die höchste Frequenzkomponente f_g im kontinuierlichen Analogsignal. In der Praxis wird häufig eine Abtast- beziehungsweise Messfrequenz gewählt, die der vier- oder mehrfachen Frequenz f_g entspricht [28]. In Kapitel 4.3.3 soll die Bedeutung der Abtastrate im Kontext des Energiemonitorings näher ausgeführt werden.

2.5 Modbus TCP

Modbus TCP ist ein Kommunikationsprotokoll, das auf dem älteren Modbus-RTU-Protokoll (Remote Terminal Unit) basiert und für die Anwendung in modernen TCP/IP Netzwerken angepasst wurde. Es ermöglicht die Übertragung von Modbus-Nachrichten über TCP/IP basierte Netzwerke, was eine einfache Integration in vorhandene Ethernet-Netzwerke ermöglicht.

Das Protokoll nutzt das Client-Server-Modell, wobei der Modbus TCP Client Anfragen an den Modbus TCP Server sendet. Hierbei agiert der Modbus TCP Client als Master, wobei der

Modbus TCP Server die Aufgabe des Slaves übernimmt. Es können mehrere Modbus TCP Clients in einem Netzwerk vorhanden sein und mit den Modbus TCP Servern interagieren.
Mittels Modbus TCP können alle gängigen Ethernet-Topologien genutzt werden um die einzelnen Komponenten zu verbinden.
Im Gegensatz zu Modbus RTU, das auf serielle Kommunikation beschränkt ist, bietet Modbus TCP den Vorteil einer höheren Übertragungsgeschwindigkeit [29].

3 Definition der Anforderungen

Die Einführung eines effektiven Energiemanagementsystems in produzierenden Unternehmen erfordert ein tiefgehendes Verständnis der normativen Grundlagen, die als Rahmen für die Entwicklung und Umsetzung solcher Systeme dienen. Dieses Kapitel widmet sich der eingehenden Analyse verschiedener Normen und Richtlinien, die im Kontext des Energiemanagements von entscheidender Bedeutung sind. Ein zentraler Bestandteil dieses Kapitels ist die Norm DIN EN ISO 50001[30], die als essenzieller Eckpfeiler im Bereich des Energiemanagements fungiert.
Neben der DIN 50001 werden zusätzlich spezifische Aspekte der Norm DIN EN ISO 50015 [31] betrachtet. Diese Norm erweitert und vertieft die Anforderungen an das Energiemanagement-System, wodurch präzisere Ausrichtungen auf spezifische Aspekte ermöglicht werden. Ein weiterer Fokus liegt auf den technischen Anforderungen an ein zeitgemäßes Energiemonitoring-System.
Abschließend erfolgt eine Zusammenfassung der normativen Grundlagen und technischen Anforderungen. Diese Zusammenfassung dient der geplanten Zielerreichung und bietet einen Überblick über die im weiteren Verlauf der Arbeit zu erarbeitenden Schritte zur Entwicklung und Konzeptionierung eines effizienten Energiemonitoring-Systems.

3.1 Normative Grundlagen eines Energiemanagementsystems

Dieses Kapitel bildet die Grundlage für die präzise Planung und Konzeptionierung eines Energiemonitoring-Systems. Die Entwicklung und Implementierung eines solchen Systems erfordert eine sorgfältige Berücksichtigung von Normen und Richtlinien, um die Effektivität, Zuverlässigkeit und Konformität mit etablierten Standards sicherzustellen. Die Normen und Richtlinien im Bereich des Energiemanagements spielen eine entscheidende Rolle, um die Struktur und Funktionen des Monitoringsystems angemessen zu gestalten. Insbesondere die DIN-Normen für das Energiemanagement, die DIN EN ISO 50001, bieten einen Leitfaden für die systematische Umsetzung von energieeffizienten Maßnahmen [30].
Des Weiteren spielen zusätzliche DIN-Normen, wie beispielsweise die DIN EN ISO 50015 zur Messung und Verifizierung der Leistung eines Energiemonitoring-Systems eine entscheidende Rolle für die Konzeptionierung. Die Einhaltung solcher Normen gewährleistet nicht nur eine effiziente Überwachung des Energieverbrauchs, sondern stellt zusätzlich sicher, dass die

ermittelten Daten als verlässliche Grundlage für weitere energieeffizienzsteigernde Maßnahmen dienen können [31].
Aufgrund dessen wird in diesem Kapitel auf die bereits genannten Normen und deren Anforderungen genauer eingegangen, diese sollen im weiteren Verlauf dieser Arbeit als Grundlage für die normgerechte Konzeptionierung eines Energiemonitoring-Systems dienen [32].

3.1.1 Energiemanagement nach DIN 50001

Die internationale DIN EN ISO 50001 [30] wurde konzipiert, um unabhängig von der Unternehmensgröße oder der Branche auf vielfältige Organisationen anwendbar zu sein. Ihre Bestimmungen und Richtlinien sind deshalb bewusst allgemein formuliert, aus diesem Grund obliegen detaillierte Spezifikationen dem einzelnen Nutzer. Infolgedessen legt diese Norm primär Anforderungen und Rahmenbedingungen fest, die es zu erfüllen gilt.
Der explizite Zweck dieser Norm besteht darin, Organisationen in die Lage zu versetzen, Systeme und Prozesse zu etablieren, die auf die Verbesserung der energiebezogenen Leistungen abzielen, einschließlich Aspekte wie Energieeffizienz, Energieeinsatz und Energieverbrauch. Die Norm stellt ein Energiemanagement vor, das als die Gesamtheit miteinander verbundener oder interagierender Elemente definiert ist, die zur Einführung einer Energiepolitik und strategischer Energieziele sowie von Prozessen und Verfahren zur Erreichung dieser Ziele dienen. Das übergeordnete Ziel ist die kontinuierliche Verbesserung der energiebezogenen Leistung. Hierbei umfasst dieser Begriff messbare Fortschritte in Bezug auf Energieeffizienz, Energieeinsatz und Energieverbrauch.
Die strukturelle Basis für das in dieser Norm abgebildete Energiemanagementsystem bildet der PDCA-Zyklus (Plan-Do-Check-Act) von Deming, dieser ist in Abbildung 9 dargestellt.

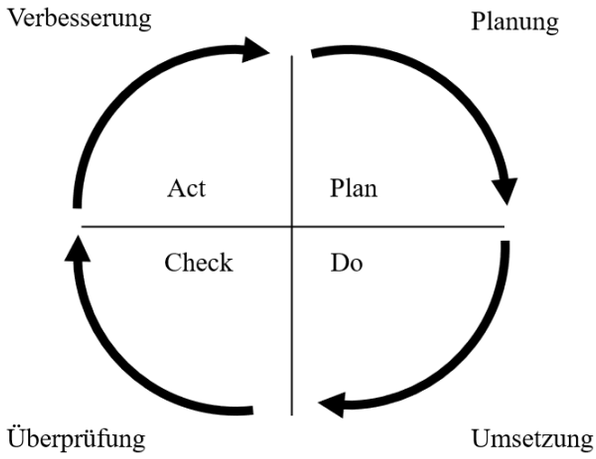


Abbildung 9: PDCA-Zyklus von Demming (in Anlehnung an [33])

Dieser Zyklus stellt den kontinuierlichen Verbesserungsprozess dar, welcher für beliebige Situationen angewendet werden kann. Im Folgenden werden die nacheinander folgenden Schritte näher erläutert.

In der ersten Phase, der Planungsphase (Plan) erfolgt die Messung und Analyse der energetischen Leistungskennzahlen. Auf Basis dessen werden anschließend Energieziele definiert und Aktionspläne abgeleitet, die zur Erreichung der festgelegten Ziele erforderlich sind.

Die Ausführungsphase (Do) beinhaltet die Umsetzung der in der Planungsphase entwickelten Aktionspläne. Des Weiteren werden die Abläufe des Managementsystems eingeführt und aufrechterhalten.

In der Überprüfungsphase (Check) werden die Prozesse und deren Leistungsdaten überwacht, analysiert und dokumentiert.

Die letzte Phase, die Verbesserungsphase (Act) dient dazu, um eine weitere Steigerung der Leistung zu erreichen. Außerdem sollen in dieser Phase neue Möglichkeiten zur Verbesserung der Prozesse abgeleitet werden und dabei neue Ziele definiert werden. Ist die letzte Phase abgeschlossen, so beginnt der Zyklus erneut. Dadurch kann eine stetige Verbesserung der Prozesse erreicht werden, es wird ein kontinuierlicher Verbesserungsprozess erstellt.

Dieser strukturierte Aufbau ermöglicht eine Integration in bereits bestehende Management-systeme. Um eine kontinuierliche Verbesserung zu erzielen ist es von großer Bedeutung das System in den operativen Alltag einzubinden [30], [34].

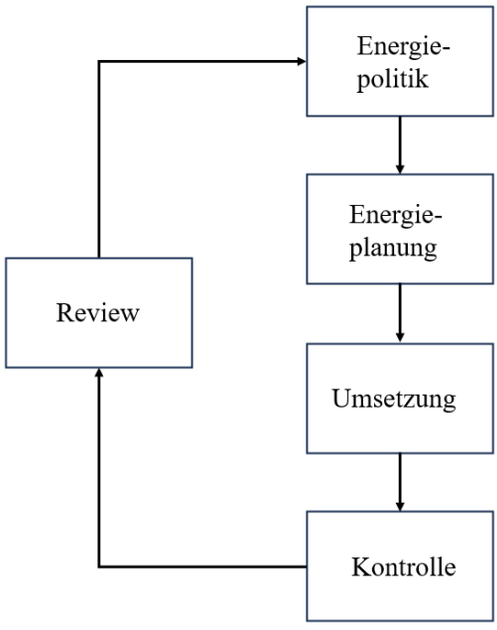


Abbildung 10: PDCA-Zyklus mit dem Modell nach ISO 50001 in Anlehnung an [30]

Abbildung 10 zeigt die Module der DIN EN ISO 50001. Die Definition der Energiepolitik etabliert dabei die grundlegende Ausrichtung, in die sich das Unternehmen entwickeln soll. Durch die im nächsten Schritt folgende Energieplanung wird die Energiepolitik konkretisiert, hierbei sollen bereits konkrete Maßnahmen hervorgehen. Anschließend sollen in der Umsetzungsphase die Einführung und Umsetzung dieser Pläne und ausgearbeiteten Maßnahmen erfolgen. Eine kontinuierliche Kontrolle dieser Prozesse stellt eine sichere Zielerreichung dar. Aus den Ergebnissen der Überwachung, Analyse und dem Review gehen neue Optimierungsmöglichkeiten hervor und der Zyklus beginnt von vorne [35, p. 13ff.], [9, p. 10ff.].

3.1.2 DIN EN ISO 50015

Die DIN EN ISO 50015 [31] etabliert Grundsätze und Leitlinien für die Messung und Verifizierung (M&V) der energiebezogenen Leistung von Organisationen. Das Ziel dieser Norm besteht darin, ein gemeinsames Fundament für den M&V-Prozess zu schaffen, um Vertrauen in die Glaubwürdigkeit der berichteten Ergebnisse zu fördern und zur Verbesserung der energiebezogenen Leistung beizutragen. Die Norm ist auf den Prozess der Messung und Verifizierung der energiebezogenen Leistung einer Organisation anwendbar.

Die Grundsätze dieser Norm sind die angemessene Genauigkeit und Handhabung von Unsicherheiten. Das bedeutet, dass die Unsicherheit der Ergebnisse auf angemessenem Niveau gehandhabt werden muss, es werden dennoch keine genauen Angaben gemacht, da dies für jede Anwendung individuell definiert werden muss. Des Weiteren schreibt die Norm vor, dass der M&V-Prozess sorgfältig dokumentiert werden muss, um Transparenz und Reproduzierbarkeit sicherzustellen. Außerdem ist eine weitere Vorgabe innerhalb dieser Norm, dass der M&V-Prozess durchzuführende die relevanten Anforderungen erfüllen und seine Kompetenzen angeben sollte. Dies bedeutet, dass beispielsweise eine Schulung oder sonstige Einweisungen für die Messung und Verifizierung erforderlich sind.
Zusammenfassend bietet die DIN EN ISO 50015 eine systematische Grundlage für die M&V der energiebezogenen Leistung und betont Prinzipien wie Genauigkeit, Transparenz und Kompetenz, um die Effektivität von Energiemanagementsystemen zu fördern [31], [36].

3.2 Zusammenfassung der Anforderungen

Anhand der in den vorherigen Kapiteln eingeführten und erläuterten Normen lassen sich schließlich die Anforderungen an ein Energiemanagementsystem ableiten. Die Schwerpunkte für ein Energiemanagement liegen darin die Energiedatenerfassung, sowie deren Interpretation und die Energiebedarfsmodellierung und Optimierung der Anlagen und Prozesse durchzuführen, um die angestrebten Ziele dadurch erreichen zu können. Um ein Energiemanagementsystem erfolgreich in eine Anlage zu integrieren ist es wichtig sich an die Normen und deren Richtlinien zu halten. In den vorhergehenden Kapiteln wurden zwei von vielen weiteren Normen beschrieben und erläutert. Bei Betrachtung dieser Normen wird deutlich, wie die Anforderung gezielt gesetzt werden müssen, um einen erfolgreichen Ablauf integrieren zu können. Dabei ist es immer sinnvoll die aktuelle Situation der Anlage zu betrachten, also die aktuellen Energiedaten und den aktuellen Energieverbrauch zu messen oder erstmalig grob zu berechnen. Diese Messungen und Berechnungen sollten von Personen durchgeführt werden, welche mit diesem Thema vertraut sind, oder bereits Erfahrungen in dieser Thematik gemacht haben. Dadurch wird die aktuelle Situation deutlich. Anschließend folgt die nächste Phase, in der der Plan für eine Verbesserung oder sogar mehrere Verbesserungen hervor geht. Danach wird dies versucht einzuführen und umzusetzen, dabei muss eine ständige Überwachung des Systems vorhanden sein, um sicher gehen zu können, dass diese Verbesserung wirklich eine Verbesserung ist. Wenn dies der Fall ist, so beginnt der Zyklus wieder von vorne und neue Ziele, beziehungsweise Verbesserung, können in das System

eingebracht werden. Während dieser Abfolge an Schritten muss zusätzlich eine ständige Dokumentation stattfinden, um die aktuelle Situation jederzeit einsehen zu können, aber auch die einzelnen Verbesserungen der Anlage zu sehen. Wie genau diese Messungen und Dokumentationen stattfinden, muss für jede einzelne Anlage und jeden Prozess selbst definiert werden. Hierfür gibt es keine konkrete Norm, welche vorschreibt wie genau die Messungen sein müssen und wie sorgfältig die Dokumentation handgehabt werden muss [30], [31].

4 Stand der Technik

4.1 Definition

Der Begriff Energiemonitoring beschreibt die Darstellung der verbrauchten Energie eines Systems über die Zeit [37]. Als Beispiel kann das Monitoring von Energieerzeugern in Form des Verbrauchs von elektrischer Energie herangezogen werden. Hierbei wird die von einem Unternehmen verbrauchte elektrische Energie über einen Stromzähler gemessen. Diese wird dem Unternehmen dann in bestimmten Abständen, welche meistens ein Jahr umfassen, in Rechnung gestellt. Durch diese Abrechnung kann das Unternehmen den Energieverbrauch pro Jahr darstellen. Der hierdurch dargestellte Energieverbrauch lässt jedoch wenig Spielraum um die Ursachen und mögliche Einsparungspotentiale zu finden. Aus diesem Grund sollten Energiemonitoring-Systeme unter der Verwendung gewisser Normen und den Erkenntnissen bisheriger Forschungen konzeptioniert werden. Diese Arbeit handelt von der Konzeptionierung eines Energiemonitoring-Systems für eine Produktionsanlage. Daher wird hier nur auf die für diese Arbeit relevanten Punkte eingegangen.

4.2 Technische Komponenten von Energiemonitoring-Systemen

In diesem Kapitel sollen die grundlegenden Komponenten eines Energiemonitoring-Systems erläutert werden. Hierbei handelt es sich um die Sensorik zum Messen der Energie, die Datenspeicherung und die Datenverarbeitungsmöglichkeiten, welche auch die Visualisierung der Daten umfassen. Hierzu werden die grundlegenden Gegebenheiten aufgeführt und erläutert.

4.2.1 Sensorik

Die Sensorik in einem Energiemonitoring-System hat die Aufgabe, die benötigten Größen zu Messen um die verbrauchte Leistung zu bestimmen. Hierzu wird die Momentanleistung in Form der Scheinleistung ermittelt. Wie in Kapitel 2 bereits erläutert, entspricht die Scheinleistung S der Leistung, die der Komponente vom Netz bereitgestellt werden muss. Hierzu wird die Frequenz, die Spannung, die an der Messleitung anliegt und der Strom, der durch die Messleitung fließt, gemessen [38]. Die Sensoren unterscheiden sich zum einen in den grundlegenden Messverfahren, auf welche im Folgenden nicht eingegangen wird und aufgrund verschiedener Parameter, welche im Folgenden aufgelistet sind [39].

- Messbereich
- Messgröße
- Auflösung
- Genauigkeit
- Schnittstelle

4.2.2 Datenspeicherung

Die Datenspeicherung dient zum einen zur Speicherung der ermittelten Messdaten und zum anderen zur Speicherung der verarbeiteten Messdaten. Hierzu muss ein für die Applikation geeignetes Speichermedium gewählt werden, welches den Ansprüchen der Datenmenge und der Zugreifbarkeit entspricht. Diese geht bei erwerbbaren Gesamtsystemen mit der zugehörigen Monitoringsoftware einher [40].

Für eigens entwickelte Systeme können die ermittelten Daten auf einem beliebigen Medium gespeichert werden. Hierzu können die Daten beispielsweise lokal an einem Leitstand gespeichert werden, welcher die Zentrale Steuerungs- und Verarbeitungseinheit des Energiemonitoring-Systems darstellt. Hierbei stellt sich jedoch der Nachteil ein, dass die erhobenen Daten nur lokal am Leitstand abgerufen und verarbeitet werden können. Ein externer Zugriff auf die Daten ist dadurch nicht möglich.

Eine weitere Möglichkeit der Datenspeicherung ist die Speicherung auf einer Datenbank. Diese kann Unternehmensintern, oder jedoch Cloud basiert durch einen Anbieter verwaltet werden. Ferner ist zu beachten, dass die erhobene Datenmenge von der Granularität des Messsystems und dessen Messintervallen abhängt. Hierbei steht die Granularität für die Anzahl der Sensoren eines Systems. Soll lediglich der Energieverbrauch einer Anlage betrachtet werden, ist es ausreichend den Energieverbrauch über die Zuleitung zu messen. Soll jedoch der Energieverbrauch einzelner Teilbereiche der Anlage ermittelt werden, muss jeder einzelne Teilbereich der Anlage gemessen werden. Der Messintervall steht für die Abtastrate, was bedeutet in welchem zeitlichen Intervall die Messwerte ermittelt werden.

Die Vor- und Nachteile und letztlich die Verwendung des geeigneten Speichermediums hängen stark von dem System, der geplanten Zielerreichung durch das System, der Anlage und der Unternehmensstruktur ab.

4.2.3 Datenverarbeitung

Die Datenverarbeitung bei Energiemonitoring ist ein wichtiger Punkt um eine sinnvolle Nutzung der erhobenen Daten zu gewährleisten. Auch das Ausmaß der Datenverarbeitung hängt wie die Speicherung der Messdaten sowohl von dem verwendeten Energiemonitoring-System, der Anlage, der Zielsetzung, sowie von der Unternehmensstruktur ab.
Die Datenverarbeitung kann in drei Hauptbereiche eingeteilt werden. Hierbei entsteht folgende Aufzählung, auf die im folgenden Verlauf genauer eingegangen wird [40], [41]:

- Berechnung der geforderten Kennwerte
- Visualisierung von Daten
- Ermittlung von Abweichungen

Die Festlegung der geforderten Kennwerte basiert auf dem Ziel und der Granularität des Energiemonitoring-Systems. Hierdurch können durch die erhobenen Messdaten Kennwerte berechnet werden, welche für die weitere Analyse der Anlage notwendig sind. Ist die Anlage granular mit Sensorik zur Leistungsbestimmung ausgestattet, lassen sich so beispielsweise die Grundlast der Anlage und der Energieverbrauch einzelner Funktionen bzw. Produktionsschritte ermitteln. Dies bietet die Möglichkeit den Energiebedarf der Anlage verschiedenen Produkte, Chargen oder Zeiteinheiten zuzuordnen [9].
Zusätzlich lassen sich dadurch Energieleistungskennzahlen ermitteln, welche Notwendig sind um die Effizienz der umgesetzten Energie zu bestimmen. Diese Kennzahlen sind die EnPI (Energy Performance Indicator), welche laut ISO 50001 wie folgt definiert werden [42]:

> *„Messbare Ergebnisse bezüglich Energieeffizient, Energieeinsatz und Energieverbrauch.“* [42]

Die EnPI lassen sich dadurch berechnen, dass sie den Energieverbrauch in das Verhältnis einer Bezugsgröße setzen. Hierbei muss die Bezugsgröße sinnvoll gewählt werden, da sie Variablen beinhalten sollen, welche den Energieverbrauch beeinflussen.
Durch den Vergleich der EnPI mit der EnB (Energetische Ausgangsbasis) können Steigerungen in der effizienten Nutzung von Energie ermittelt werden. Die EnB stellt den Bezugswert des Vergleichs dar. Hierbei kann sich der EnB auf den Energieverbrauch, den Energieeinsatz oder die Energieeffizienz beziehen. Er wird aus einem Durchschnittswert der Bezugsgröße über eine

frei wählbare Zeiteinheit gebildet. Beispielsweise könnte der EnB aus dem durchschnittlichen Energieverbrauch einer Anlage pro Monat basierend auf das letzte Jahr definiert werden [9], [42], [43].

Die Visualisierung von Daten ermöglicht eine bessere Analyse und Bewertung der ermittelten Kennwerte [44]. In der folgenden Analyse werden die in der Literatur zum Energiemanagement etablierten Visualisierungsmethoden für verschiedene Kennwerte detailliert betrachtet.
Es lassen sich beispielsweise Energieflüsse auf verschiedenen Ebenen darstellen, wodurch die Verteilung der Energie innerhalb eines Systems sichtbar wird. Ein System kann hierbei das gesamte Unternehmen, eine Produktionshalle, eine Anlage, oder eine Maschine sein. Hierzu eignet sich das Sankey-Diagramm welches Beispielhaft in Abbildung 11 dargestellt wird.

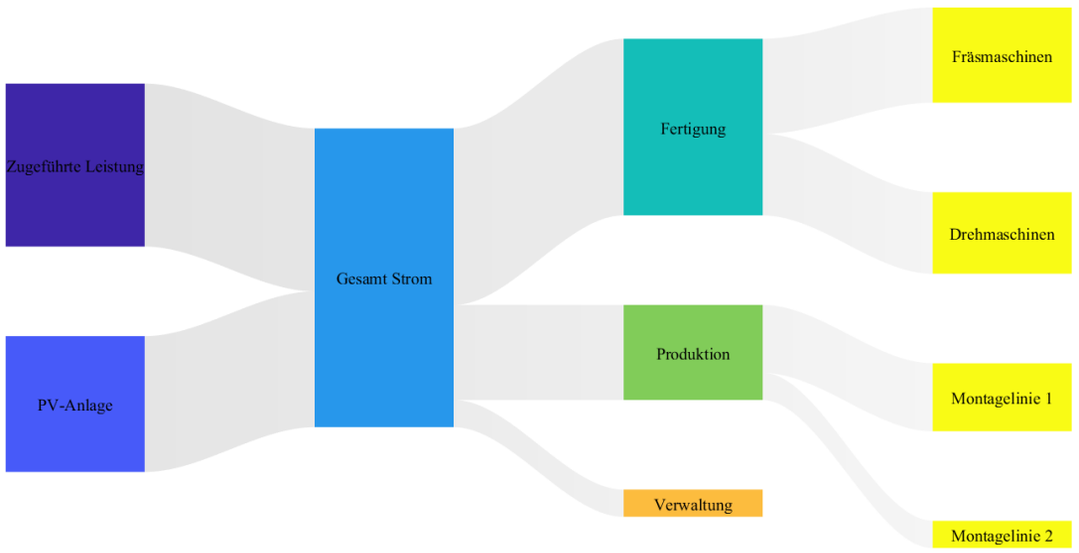


Abbildung 11: Sankey-Diagramm zur beispielhaften Darstellung des Flusses elektrischer Energie in einem Unternehmen (in Anlehnung an [45])

Das in Abbildung 11 gezeigte Sankey-Diagramm zeigt, wie sich die gesamte verbrauchte Energie innerhalb des Systems, welches hier dem Unternehmen entspricht, verteilt. So können Bereiche ermittelt werden, in denen ein hoher Energiebedarf notwendig ist. Im Weiteren können diese Energieintensiven Bereiche näher untersucht werden, um gegebenenfalls Maßnahmen zur Energieeinsparung einzuleiten [9].
Ein möglicher Nutzen stellt sich in der Vergleichbarkeit ein. Werden die Diagramme immer über ein bestimmtes Zeitintervall gebildet, können diese gegenübergestellt und verglichen werden. Hierdurch können Schwankungen in der verbrauchten Energiemenge über die definierten Zeitintervalle ermittelt werden.

Eine weitere Visualisierungsform ist das Säulendiagramm welches sich besonders für die Darstellung und Gegenüberstellung der EnPI eignet.

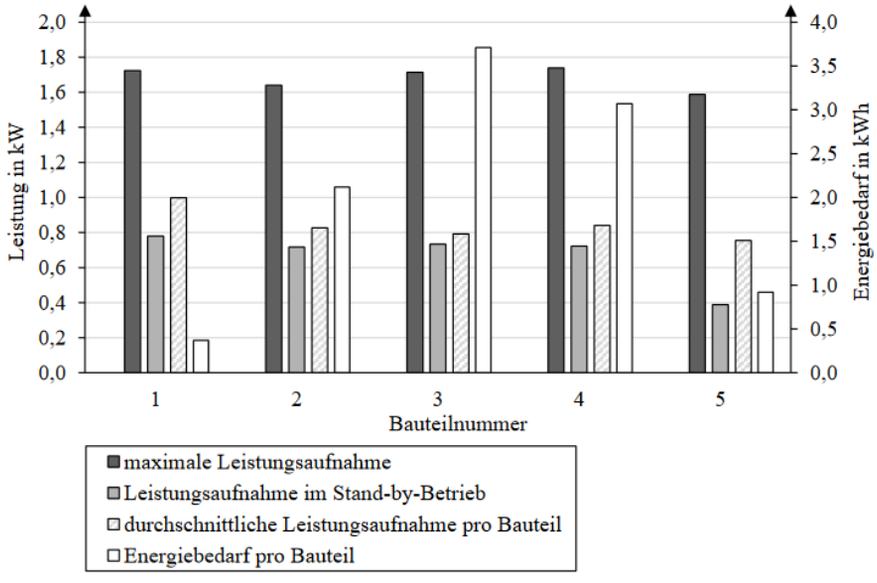


Abbildung 12: Darstellung verschiedener EnPIs als Säulendiagramm [9, p. 61]

Die Darstellung als Säulendiagramm gibt Aufschluss über die zeitliche Veränderung der EnPIs. Hierdurch bietet sich die Möglichkeit die effiziente Nutzung der Energie auf beispielsweise einzelne Arbeitstage zu bewerten. So kann der Optimierungsbedarf an prozessfehlerbedingter, ineffizienter Nutzung von Energie sichtbar gemacht werden.

Eine weitere hilfreiche Visualisierung stellt das Zeitdiagramm der aufgenommenen Leistung eines Systems dar. Ein solches Diagramm wird in Abbildung 13 dargestellt.

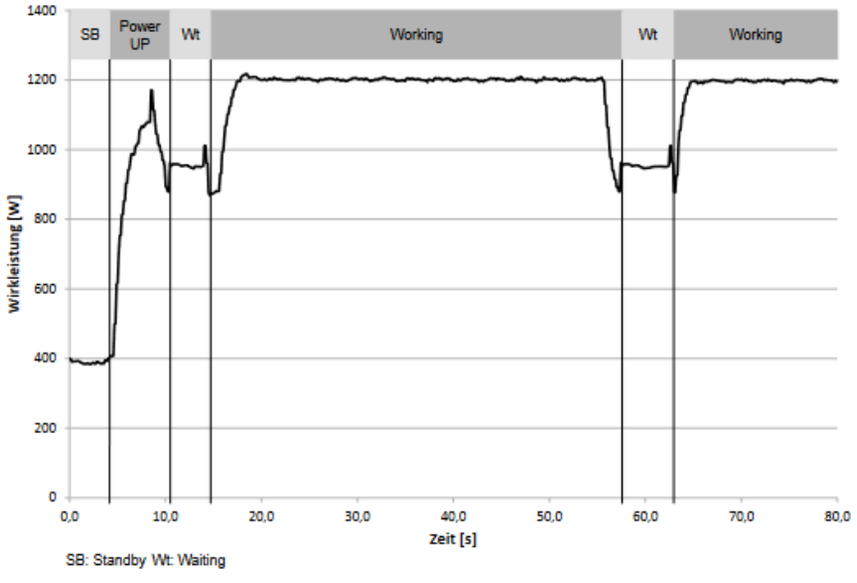


Abbildung 13: Darstellung des Energieverbrauches über die Zeit [46, p. 51]

Mittels eines Zeitdiagramms auf dem die Leistung über die Zeit aufgezeigt ist, können Stillstandszeiten bzw. Stand-by Zeiten energetisch ermittelt werden. Hierbei bietet sich die Möglichkeit zu prüfen, ob eine Umstrukturierung der Prozesse der Produktionsanlage zu einer besseren energetischen Auslastung und damit zu einer effizienteren Nutzung der Energie führt [40].

Abschließend ist zu erwähnen, dass die hier dargestellten Visualisierungsmethoden nicht zwingend anzuwenden sind. Sie bieten jedoch eine gute Möglichkeit die erhobenen Messdaten übersichtlich darzustellen.

Die Ermittlung von Abweichungen kann mittels der Visualisierung der Messdaten und Bewertung durch einen Menschen erfolgen. Jedoch besteht ebenfalls die Möglichkeit entstandene Abweichungen Softwarebasiert zu detektieren. Hierzu bieten einige Hersteller von Gesamtsystemen eine Softwareplattform, welche auf definierte Abweichungen reagiert, diese Auswertet und Meldungen ausgibt [41], [47].

4.3 Erkenntnisse bisheriger Forschung

In diesem Kapitel sollen die Erkenntnisse der bisherigen Forschung zum Thema Energiemonitoring-Systeme, in kurzer Form, dargelegt und erläutert werden

4.3.1 Lastprofile

Ein Lastprofil beschreibt die aufgenommene Leistung eines Systems über der Zeit. Dieses Lastprofil dient zur Darstellung des energetischen Bedarfs dieses Systems. Das Lastprofil dient vor allem dazu, eine Lastoptimierung vorzunehmen. Zur Erläuterung wird in Abbildung 14 ein beispielhaftes Lastprofil einer Anlage dargestellt [48], [49].

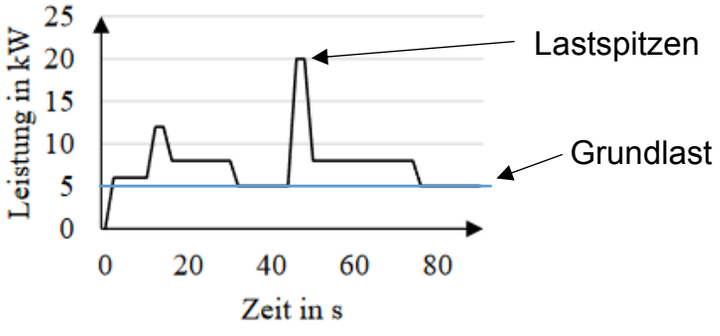


Abbildung 14: Beispielhafter Lastgang einer Produktionsanlage für einen Produktionsprozess [9, p. 71]

Abbildung 14 zeigt die aufgenommene Leistung eines Produktionsprozesses über der Zeit. Hierbei kann die Kennlinie in zwei Bereiche unterteilt werden. Zum einen die Grundlast, welche die Anlage kontinuierlich benötigt und zum anderen die Lastspitzen, welche kurzzeitig eine hohe Leistung aufnehmen [48], [49]. Die Grundlast wird durch Verbraucher erzeugt, welche kontinuierlich und unabhängig des Maschinenzustandes eine konstante Leistung aufnehmen. Die Lastspitzen hingegen werden von Verbrauchern erzeugt, welche eine Leistung aufnehmen, die abhängig des Maschinenzustandes ist und somit einen dynamischen Charakter aufweisen.

Durch die Bestimmung von Lastprofilen können einerseits die Prozessabläufe der Anlage überprüft werden, ob durch eine Umstrukturierung dieser die Lastspitzen gesenkt werden können. Zum anderen kann durch den Vergleich der Einzellastprofile verschiedener Anlagen und dem Lastprofil des gesamten Unternehmens, untersucht werden, ob eine Umstrukturierung der verschiedenen Anlagen zu einer Senkung der Spitzenlasten führen.

4.3.2 Dynamik von Anlagen und Sytemen

In der Fertigungsindustrie spiegelt die energetische Dynamik von elektrischen Systemen die Veränderungen der aufgenommenen Leistung über die Zeit wider. Eine hohe Dynamik ist durch häufige Leistungsänderungen gekennzeichnet, während eine niedrige Dynamik seltenere Veränderungen bis hin zu statischem Verhalten zeigt. Unternehmen können in drei Ebenen zur Leistungsmessung unterteilt werden: Fabrikebene (Factory-Level), Abteilungsebene (Department-Level) und Prozessebene (Unit Process-Level). Jede dieser Ebenen erfordert unterschiedliche Dynamikbereiche des Messinstruments [9], [50, pp. 1-10]. Auf der Abteilungs- und Prozessebene können sich die Dynamiken stark unterscheiden. Zum Beispiel zeigt eine spanende Fertigungsmaschine ein sehr dynamisches Verhalten, da viele Motoren innerhalb kurzer Zeit ein- und ausgeschaltet werden und ihre Drehzahlen sich häufig ändern. Im Gegensatz dazu hat ein Lüftungssystem in einem Laborraum eher ein statisches Verhalten, da der Motor konstant mit gleicher Drehzahl betrieben wird.

Die Abtastrate des Messinstruments muss entsprechend der Dynamik des jeweiligen Systems angepasst werden. Eine höhere Abtastrate ist erforderlich, um die schnellen Leistungsänderungen in dynamischen Systemen zu erfassen, während für statischere Systeme eine niedrigere Abtastrate ausreichen kann.

Zusätzlich zu den genannten Aspekten ist die genaue Erfassung des Energieverbrauchs auf den verschiedenen Ebenen entscheidend für ein effizientes Energiemanagement und die

Optimierung der Energieeffizienz in der Fertigungsindustrie. Die Wahl der richtigen Messtechnologie und -strategie, basierend auf der spezifischen Dynamik der Prozesse, ermöglicht es Unternehmen, die Energieeffizienz zu steigern und den Gesamtenergieverbrauch zu reduzieren [9], [50, pp. 1-10].

4.3.3 Auswirkung von Abtastraten

Die Abtastrate im Kontext des Energiemonitorings bezieht sich vorrangig auf die Messfrequenz, also darauf, wie oft Energieverbrauchsdaten oder Leistungsmessungen innerhalb eines bestimmten Zeitraums erfasst beziehungsweise verarbeitet werden [9]. Die Frequenz, mit der Messungen durchgeführt werden, spielt eine wesentliche Rolle für die Genauigkeit und Aussagekraft der erhobenen Daten. Bei einer hohen Abtastrate werden Messdaten in kurzen Intervallen erfasst, was eine detailliertere Ansicht des Energieverbrauchs ermöglicht. Dies ist besonders nützlich, um Spitzen im Energieverbrauch zu identifizieren oder um das Verhalten von Geräten und Systemen genau zu analysieren. Im Gegensatz dazu bedeutet eine niedrigere Abtastrate, dass Daten weniger häufig erfasst werden. Dies kann für Anwendungen ausreichend sein, bei denen der Energieverbrauch relativ konstant ist oder nur mäßig variiert. Kurzzeitige Lastspitzen oder dynamische Schwankungen im Leistungsprofil, deren Änderungsrate höher ist als die Messfrequenz, würden so allerdings nicht erfasst werden [9]. Diese Problematik wird anhand der nachfolgenden Abbildung 15 verdeutlicht.

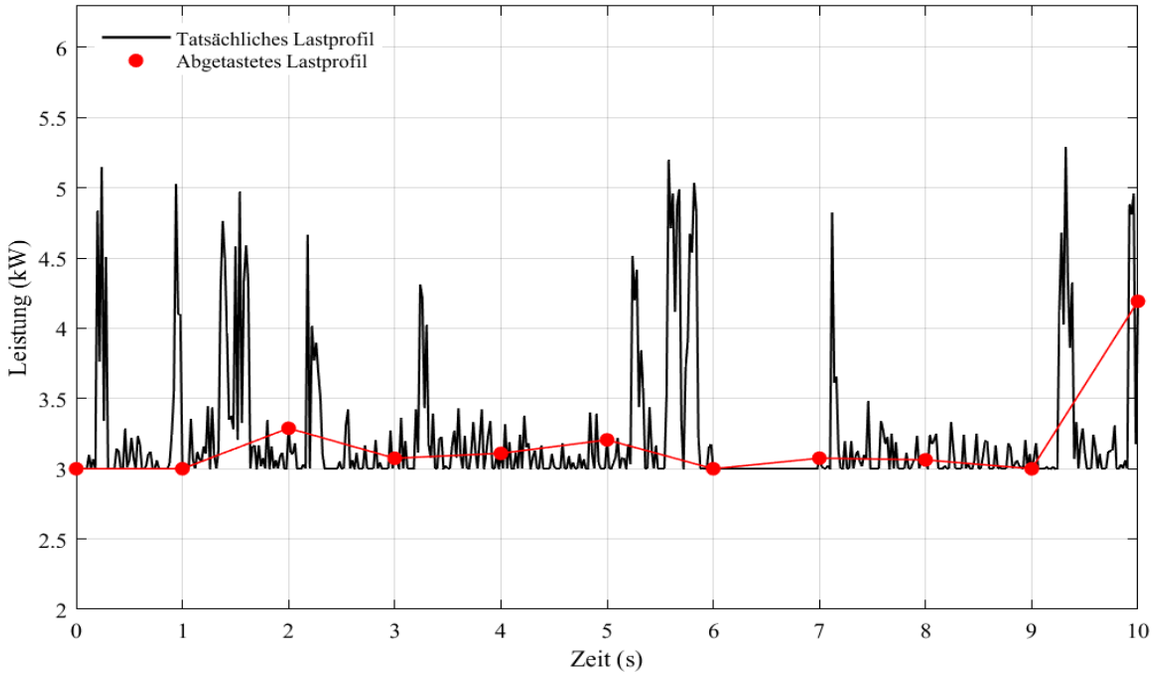


Abbildung 15: Unterabtastung eines fiktiven Leistungsprofiles mit hoher Dynamik

Die der Abbildung 15 zu entnehmende schwarze Kennlinie zeigt ein hypothetisches Leistungs-Zeit-Diagramm einer fiktiven Produktionsanlage mit einer vergleichsweise hohen Dynamik, in dem kurzzeitige Leistungsspitzen von über 5 kW ersichtlich sind. Die roten Punkte symbolisieren die Messpunkte der momentanen Leistung, während die rote Linie das daraus resultierende abgetastete Lastprofil repräsentiert. Aus der Abbildung geht hervor, dass die Messung in Ein-Sekunden-Zyklen durchgeführt wird. Demgegenüber steht die Änderungsrate des tatsächlichen Lastprofils (schwarze Kennlinie), die ein Vielfaches höher ist als die Abtastrate von 1 Hz. Dies führt zu einer signifikanten Diskrepanz zwischen dem tatsächlichen und dem gemessenen Lastprofil. Die zahlreichen Lastspitzen, die kurzzeitig mehr als 5 kW betragen, bleiben dabei völlig unerkannt. Auch der Verlauf der Kennlinien beziehungsweise die Kontur der beiden Lastprofile stimmt aufgrund der unzureichenden Abtastrate nicht überein. Folglich ist die Messung für die Beurteilung der tatsächlichen Lastsituation ungenügend und nicht aussagekräftig. Hinsichtlich der in dieser Arbeit verfolgten Fragestellung, ob die Produktionsanlage des PTZ mit der vorhandenen Photovoltaikanlage versorgt werden kann, wäre eine mit Abbildung 8 vergleichbare Messung somit kritisch. Zu begründen ist dies mit der Feststellung, dass das abgetastete Lastprofil fälschlicherweise den Eindruck erweckt, dass die Maximallast weniger als 4,5 kW beträgt. Daraus abgeleitete Folgerungen hinsichtlich der erforderlichen Leistung der Photovoltaikanlage könnten demnach Versorgungsprobleme verursachen.

Um das Problem der Unterabtastung, wie es in der vorherigen Abbildung 15 dargestellt wurde, zu vermeiden, soll nachfolgend gemäß Formel (2) aus Kapitel 2.4 das Abtasttheorem als methodischer Ansatz herangezogen werden. Dieses besagt, dass die Messfrequenz mehr als doppelt so hoch sein sollte wie die höchste Frequenzkomponente.

Anhand der nachfolgenden Abbildung soll die Anwendung des Abtasttheorems und der daraus resultierende Mehrwert im Kontext der Abtastung eines Leistungsprofils anschaulich dargestellt werden. Auch hierbei soll wie zuvor in Abbildung 15 ein hypothetisches Leistungs-Zeit-Diagramm einer fiktiven Produktionsanlage betrachtet werden. Im Gegensatz zum vorherigen Beispiel soll jedoch aus Gründen der besseren Veranschaulichung ein Leistungsprofil mit wesentlich geringerer Änderungsrate beziehungsweise Dynamik betrachtet werden.

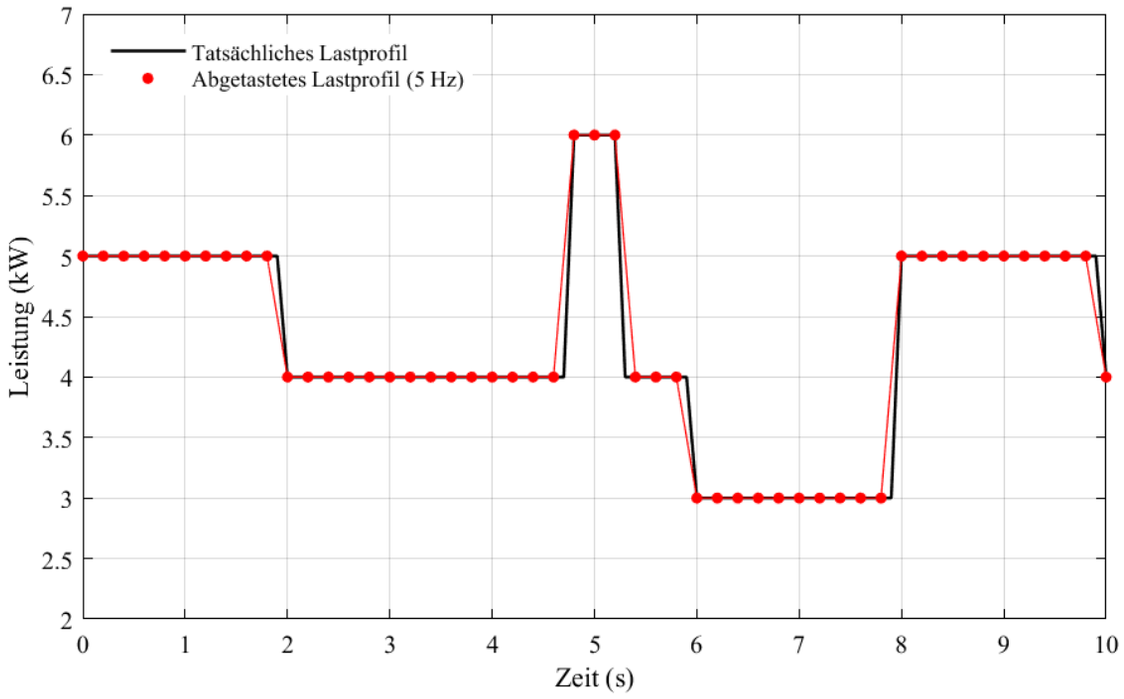


Abbildung 16: Anwendung des Abtasttheorems zur Erfassung eines fiktiven Leistungsprofiles mit mäßiger Dynamik

Auch in Abbildung 16 wird das tatsächliche Leistungs-Zeit-Profil durch die schwarze Kennlinie repräsentiert, während die Abtastung durch Punkte und die daraus resultierende Kennlinie in Rot dargestellt sind. Es ist unmittelbar ersichtlich, dass die beiden Kennlinien weitgehend übereinstimmen und nahezu keine Abweichungen vorliegen. Daraus lässt sich somit schließen, dass in diesem Fall eine fundierte Bewertung und Interpretation des Lastprofils ermöglicht wird und Lastspitzen abgebildet werden. Des Weiteren ist ebenfalls erkennbar, dass die Anzahl der Messpunkte aufgrund der höheren Abtastrate von 5 Hz signifikant höher ist als im vorherigen Beispiel entsprechend Abbildung 15.

Nach Erkenntnissen von [9] kann diesbezüglich festgehalten werden, dass durch die höhere Messfrequenz zwar eine detailliertere Analyse und Interpretation möglich ist, aber dadurch auch Datenmengen und somit der Speicherbedarf steigen. Aufgrund dieser Erkenntnis und auf Basis der Feststellung, dass für detailliertere Messungen auch performantere Sensorik notwendig ist, unterstreicht [9] die konfliktäre Korrelation zwischen Wirtschaftlichkeit und Messgenauigkeit mit der nachfolgenden Abbildung 17.

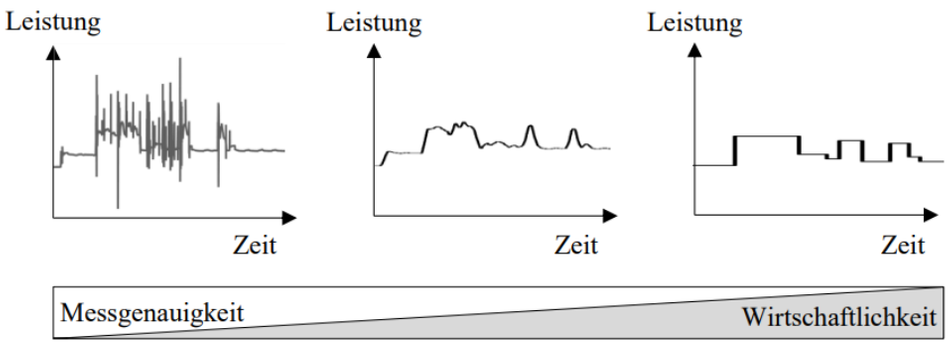


Abbildung 17: „Zielkonflikt zwischen Messgenauigkeit und Wirtschaftlichkeit“ [9, p. 48]

Als Schlussfolgerung dieses Kapitels lässt sich aufgrund der konfliktären Gegenüberstellung von Wirtschaftlichkeit und Messgenauigkeit wie in Abbildung 17 dargestellt festhalten, dass es im Rahmen dieser Arbeit zu klären gilt, welche Genauigkeit bei der Erfassung des Leistungsprofils des PTZ angestrebt werden soll.

4.3.4 Ermittelte Abtastraten

In diesem Kapitel sollen aufbauend auf die Erkenntnisse aus dem Kapitel 4.3.2 und 4.3.3 sowie auf Basis der Arbeiten [9] und [50, pp. 1-10] die benötigten Abtastraten für das Energiemonitoring, bezüglich der energetischen Dynamik, dargestellt und erläutert werden.
Die hierzu auf Basis von [50, pp. 1-10] ermittelten Daten werden in der nachfolgenden Tabelle den Ebenen Fabrikebene, Abteilungsebene, Prozessebene zugeordnet und mit den zu erfassenden Parametern aufgelistet. Hierzu werden zunächst die Abkürzungen der Parameter erläutert.

Wh: Wh steht für Wattstunde und ist ein Maß für die Aufgenommene Leistung pro Stunde.

VAh: VAh beschreibt die Voltampere-Stunde und ist ein Maß für die Aufgenommene Scheinleistung pro Stunde.

THD: THD (Total Harmonic Distortion) ist ein Maß für das Verhältnis der Leistung der Oberwellen zur Leistung der Grundwelle [51].

PF: PF (Power Factor) steht für das Verhältnis der Aufgenommenen Wattstunde zu der aufgenommenen Voltampere-Stunde

	Auflösung				
Ebene	Statisch	Leicht Dynamisch	Hoch dynamisch	Parameter	Abtastfrequenz f_S
Fabrikebene	30 s bis 15 min	-	-	Wh, VAh, THD, PF	0,033Hz – 0,0011 Hz
Abteilungs-ebene	1 min bis 30 min	-	-	Wh, PF	0,017 Hz - 0,00056 Hz
	-	30 s bis 5 min	-	Wh, VAh, PF	0,033 Hz – 0,0033 Hz
	-	-	1 s bis 1 min	Wh, VAh, PF	1 Hz – 0,017 Hz
Prozess-ebene	-	1 s bis 5 min	-	Wh, VAh, PF, THD	1 Hz – 0,0033 Hz
	-	-	10 ms bis 1 min	Wh, VAh, PF, THD	100 Hz – 0,017 Hz

Tabelle 1: Auflistung der Daten nach Ebenen, dynamischen Verhalten und den ermittelbaren Parametern [50, pp. 1-10]

Die in der Tabelle 1 aufgelisteten Zeitbereiche welche der Auflösung und damit der Periodendauer der Abtastung entsprechen, können durch die Formel 3 in die Abtastfrequenz f_{ab} umgerechnet werden.

$$f_{ab} = \frac{1}{T} \tag{3}$$

Der Tabelle kann entnommen werden, dass sich die Abtastfrequenzen bezüglich der Dynamik stark unterscheiden. Bei statischen Prozessen in der Fabrikebene werden Abtastfrequenzen von 0,0011 Hz bis 0,033 Hz empfohlen. Bei statischen Prozessen in der Abteilungsebene sollten Frequenzen von 0,00056 Hz bis 0,017 Hz. Innerhalb einer Abteilung kann das energetische

Verhalten jedoch auch leicht- oder hoch dynamisch sein, wodurch beim leicht dynamischen Prozess Abtastraten zwischen 0,0033 Hz und 0,033 Hz und bei hoch dynamischen 0,017 Hz bis 1 Hz empfohlen werden. Innerhalb der Prozessebene werden bei leicht dynamischen Prozessen 0,0033 Hz bis 1 Hz und bei hoch dynamischen Prozessen 0,017 bis 100 Hz empfohlen.
Abschließend kann zusammengefasst werden, dass die Spanne der Frequenzbereiche nach der Zuordnung zur Ebene und dem energetischen Verhalten sehr groß ist, daher muss die zu wählende Abtastrate innerhalb der Vorgaben anhand des vorliegenden Prozesses abgeschätzt werden.

5 Planung und Konzeptionierung eines Energiemonitoring-Systems

Das vorliegende Kapitel widmet sich der essentiellen Phase der Planung und Konzeptionierung eines Energiemonitoring-Systems. In der Gestaltung und Umsetzung eines solchen Systems liegt die Schlüsselkomponente im Rahmen des Energiemanagements. Dieses Kapitel unterteilt sich in mehrere Abschnitte, die gemeinsam einen umfassenden Blick auf die Ist-Analyse, die energetischen Cluster, sowie die Konzeptmethoden bieten.

Im Mittelpunkt der Ist-Analyse, im Kapitel 5.1, steht die Bestandsliste, welche eine detaillierte Aufstellung der vorhandenen Ressourcen und ihrer aktuellen Leistungsfähigkeit beinhaltet. Diese Bestandsaufnahme bietet einen ersten Einblick in den aktuellen Status quo und bildet die Grundlage für nachfolgende Überlegungen zur Effizienzsteigerung.

Anschließend folgt die Einbeziehung der energetischen Monitoringbereiche in Kapitel 5.2. Hierbei wird ein Überblick der Bereichs-Einteilungs-Methoden und eine Gegenüberstellung der Vor- und Nachteile, aufgezeigt. Außerdem folgt eine detaillierte Analyse, welche Einteilungsvariante speziell für unsere Konzeptionierung am sinnvollsten ist. Dieser Abschnitt beleuchtet somit die strategische Dimension bei der Konzeption eines Energiemonitoring-Systems.

Die Konzeptmethoden, Abschnitt 5.3, setzen einen weiteren Schwerpunkt und präsentieren verschiedene Varianten, um die angestrebten Ziele zu erreichen. Hierbei erfolgen eine detaillierte Darstellung und Bewertung der verschiedenen Ansätze, um eine Grundlage für die Auswahl der optimalen Methode zu schaffen.

Zusammenfassend gibt dieses Kapitel Einblicke in die grundlegenden Überlegungen und Strategien, die im Rahmen der Planung und Konzeptionierung eines Energiemonitoring-Systems von Bedeutung sind.

5.1 Ist-Analyse

Das vorliegende Kapitel umfasst die Ist-Analyse im Rahmen des Energiemonitoring-Systems der Anlage im PTZ. Die zentrale Zielsetzung besteht darin, eine detaillierte Bestandsaufnahme der aktuellen technologischen Infrastruktur, des Energieverbrauchs und organisatorischer Strukturen vorzunehmen. Durch eine systematische Erfassung der relevanten Informationen wird nicht nur der aktuelle Status des Energiemanagements aufgezeigt, sondern auch eine Grundlage für die Identifikation von Potenzialen zur Energieeffizienzsteigerung und Schwachstellen geschaffen.

Das erste Kapitel beinhaltet die Erstellung einer umfassenden Bestandsliste sämtlicher relevanter Anlagen und Geräte. Dabei wird neben der Identifikation des aktuellen Stromverbrauchs zusätzlich der rechnerische Verbrauch für Anlagen ohne bisherige Messungen berücksichtigt. Anschließend wird im weiteren Verlauf des Kapitels die Lage der einzelnen Komponenten der Anlage betrachtet. Daraus ist zu schließen, in welchen Bereichen der Anlage in etwa die meiste Last verbraucht wird, um dadurch Rückschlüsse auf die folgende Konzeptentwicklung schließen zu können. Dieser Aspekt soll dazu dienen, zu wissen an welcher Stelle der Anlage wird was für ein Typ an Sensor benötigt, um ein optimales Leistungsprofil erstellen zu können. Abschließend werden in diesem Kapitel die bisher gesammelten Erfahrungen des Ablaufs der Anlage betrachtet. Hierbei soll es darum gehen, wie flüssig läuft die Anlage ab, was könnten verschiedene Probleme beim Ablaufen der Anlage für Schwankungen mit sich bringen und wie relevant sind diese letztendlich für die Erstellung des Konzeptes für das Energiemonitoring-System [52].

5.1.1 Bestandsliste

Um eine ordentliche Konzeptionierung eines Energiemonitoring-Systems für eine Anlage ausarbeiten zu können, müssen die Komponenten der Anlage klar sein. Da vor dieser eigenerstellen Bestandsliste keine Bestandsliste und Schaltplan der Anlage vorhanden war, galt diese Erstellungen als erste Priorität. Die folgende Abbildung zeigt die komplette Bestandsliste der gesamten Anlage, darin sind alle Sensoren, Aktoren, sowie die einzelnen Stationen aufgezeigt. Hierbei sind die Komponenten der Bestandsliste in sieben Stationen eingeteilt, dies hat den Vorteil der Übersichtlichkeit. Auf Nachfrage auf diese Arbeit ist eine Zustellung der kompletten Bestandsliste mit weiteren Informationen, welche hier nicht aufgelistet sind, möglich. Dies würde ansonsten den Rahmen dieses Kapitels überschreiten. Auf dieser

Abbildung sind die Komponenten anhand deren Aufgaben, Typ, Anzahl des jeweilig verbauten Bestandteils, die typische Leistung, die maximale Leistung und die gesamte Leistung mit Einbezug von der Anzahl der jeweilig verbauten Komponenten. Alle hier angegebenen Leistungswerte sind in der Grundeinheit, in Watt, angegeben.

Aufgabe	Typ	Anzahl	P typ	P max	P max mit Anzahl
HMI Schaltschrank	MTP1500 Unified Comfort	1	17	31	31
Leitungsschutzschalter	5SL6110-6 MCB B10	1	1,6		1,6
Leitungsschutzschalter	5SY4106-7 MCB C6	1	1,6		1,6
Netzteil 24V / 10A	Weidmüller Pro ECO 240W 24V 10A	1	267	3450	3450
Netzteil 24V / 5A	ifm DN4012 AC100-120 / 200-240V	1	267	690	690
SPS	Simatic S7-1500 1516-3 PN/DP 6ES7 516-3AN01-0AB0	1	20,4	58	58
SPS Ansteckmodul	DI32x 24V DC 521-1BL10-0AA0	1	2,85		2,85
SPS Ansteckmodul	DI16x 24VDC 521-1BH10-0AA0	1	2,85		2,85
SPS Ansteckmodul	DQ15x 24VDC 522-1BH10-0AA0	1	195		195
Netzwerk Hub	Siemens SCALANCE XB008	2	5,8		11,6
Hub	Inhub HUB-GM100	1	48		48
Profinet IO	ifm V SE 150	1	48		48
Leitungsschutzschalter	EATON FRBm6-B16/3N/003A	1	3,6		3,6
Motorschutzschalter	SIEMENS SIRIUS 3RV2011-0FA25	4	5,5		22
Schütz	SIEMENS SIRIUS 3RT2015-1BB41	4	8		32
PC für Condition Monitoriung	Intel NUC BOXNUC7PJYHN2	1	65		65
Roboter für Greifer	Universal Robots, UR5e	1	150	325	325
Kleinteilgreifer	Schunk EGK-50-MB-M-B	1	12,24	27,84	27,84
Profilsensor	ifm OPD101	2	2		4
Reflexions-Lichttaster	Sick WTB2S-2P3130	1	1,2		1,2
Farbkamera	Lucid TRI032S-CC	1	3,1		3,1
3D Kamera	Lucid HTP003S-001	1	12	30	30
Bedienrechner (Netzeteil)		1	600		600
Monitor	HP Z24i	1	36	55	55
Lichtschranke	ifm, O6P700 - O6PL-FPKG	2	2,4		4,8
Monitor	iiyama, prolite T2252MSC	1	161		161
2D/3D Kamera	ifm Mate 2D/3D Camera	1	460		460
Robotor	UR3/CB3	1	125	250	250
Greifer	Schunk EGP 25-N-N-B	1	24		24
Monitor für MIKADO	HP ZR2440w	1	48	59	59
Monitor Dell	DELL 1908FPb	1	230		230
Micrometer	KEYENCE TM-065T	1	13,2		13,2
Analysebox - Kamera Entenso N	Mikado Controller	1	650		650
Kamera	Entenso N45	1			0
Pick and Place	UR5, 20205501410	1	2070		2070
Greifer	Schunk, 1327885	1	48		48
Kapazitive Erkennung	ifm, KQ5100	1	2,4		2,4
Bandmotor	Rexroth, 3842519244	4	90		360
Pneumatikversorgung	Festo, CPV10-VI	1	0,6		0,6
Reflexions-Lichttaster	Sick, WT2S-P211	7	1,2		8,4
Lichttaster	Sick, WTB2S-2P3130	5	1,2		6
Induktiver Sensor	Balluff, BES-516-371-G-S49-C	6	4,8		28,8

Abbildung 18 Bestandsliste der Einzelkomponenten

Anhand dieser Abbildung lassen sich nun einige Rückschlüsse auf den gesamten Energieverbrauch der Anlage im Mittel, und nach Herstellerangaben schließen. Die Leistung der einzelnen Komponenten ist entweder direkt über den Hersteller gegeben oder sie wird über die Formel:

$$P = U \cdot I \tag{4}$$

berechnet [53]. Dadurch lässt sich eine Aussage über die gesamt benötigte Leistung der Anlage tätigen. Die typische Leistung der Anlage liegt bei etwa 5.707 W. Die minimale und maximale Leistung dagegen befindet sich bei etwa 5.619 W und bei 10092 W. Die Spanne zwischen der minimalen und der maximalen Leistung liegt bei circa 5.000 W, was ein großer Unterschied macht. Dennoch lässt sich durch diese Liste nun besser erkennen, in welchem Bereich der Leistungsverbrauch der Anlage liegt. Zudem ist durch diese Erkenntnis nun auch klar, dass die einzelnen Komponenten auf jeden Fall in Untergruppen, sogenannte Stationen untergliedert werden müssen, beispielsweise so wie es bereits in der letzten Abbildung dargestellt ist. Auf diese Gruppierung wird im folgenden Kapitel näher eingegangen.
Außerdem lässt sich durch die vollständige Auflistung aller Werte (Strom und Spannung), welche sich im Anhang befindet, der maximale Stromverbrauch erkennen. Der typische Stromverbrauch der gesamten Anlage liegt laut Herstellerangaben, bei etwa 24,82 A. Der minimale und maximale Stromverbrauch dagegen liegt bei 24,43 A und 43,88 A. Da der minimale und maximale Stromverbrauch sehr weit auseinander liegen, etwa 20 A, ist es ohne Messungen schwer zu sagen wie viel Strom die Anlage während des Betriebes wirklich verbraucht. Um dies genauer feststellen zu können wären vertiefte Messungen notwendig.

5.1.2 Technologische Struktur

Anhand der in Kapitel 5.1 aufgezeigten Bestandsliste wird deutlich, dass die einzelnen Komponenten der Anlage gruppiert werden müssen. Hierfür gibt es mehrere Aufteilungsmöglichkeiten, welche im folgenden Kapitel 5.2 näher beschrieben werden. Durch die Bestandsliste kann dadurch geschaut werden, wie eine mögliche Bereichsaufteilung der Anlage stimmig und sinnvoll ist. Die Komponenten sind in dieser Abbildung 18 nach den jeweiligen Orten aufgelistet und abgegrenzt. Dies dient hauptsächlich für die Übersichtlichkeit der Notierung der einzelnen Bestandteile der Anlage. Hierbei wird klar, dass der erste Abschnitt der Bestandsliste, die meiste Leistung verbraucht, da dort die meisten Bauteile verbaut sind. Außerdem wird dadurch deutlich, welche einzelnen Komponenten die meiste Leistung,

beziehungsweise Stromaufnahme, haben. Dies sind vor allem die drei integrierten Universal Robots (UR5, UR5e, UR3). Hierbei benötigt jeder dieser Roboter eine Leistung von etwa 300 bis 2.000 W. Dieser Leistungsverbrauch ist so unterschiedlich, da die jeweiligen Roboter ein unterschiedliches Baujahr haben und sich dadurch die verbauten Technologien unterscheiden. Ein weiteres Bauteil, welches besonders viel Leistung benötigt, ist das 5 A beziehungsweise vor allem das 10 A Netzteil mit über 3.000 W. Anhand dieser Leistungskennzahlen der einzelnen Komponenten und anhand der Position, an der die Komponenten eingebaut sind, lässt sich nun eine strukturierte Aufteilung in bestimmte Bereiche, der Bauteile machen. Dies folgt wie bereits erwähnt in Kapitel 5.2, der Monitoringbereiche

5.1.3 Bisherige Erfahrungen

Aktuell ist die Anlage zwar theoretisch aktionsbereit, dennoch gibt es häufiger Situationen, in denen die Anlage stockt oder ein Roboterarm nicht so funktioniert, wie er eigentlich sollte. Daher könnte es während den Messungen, welche im nächsten Teil der Arbeit behandelt werden zu unvorhergesehenen Schwankungen im Energieprofil kommen. Inwiefern dies letztendlich ein Einfluss auf den gesamten Energieverbrauch der Anlage hat, muss bisher noch abgewartet werden. Derzeit wird die Anlage zudem noch von anderen Teams bearbeitet. Diese Veränderungen könnten zusätzlich Einfluss auf die Leistungen haben, in dem eventuell zusätzliche Sensoren oder Aktoren in die Anlage integriert werden. Deshalb sollte zu den in den vorherigen Kapiteln genannten Anforderungen das jeweilige Konzept so aufgestellt werden, dass solche Änderungen, beziehungsweise Schwankungen, an der Anlage berücksichtigt werden.

5.2 Monitoringbereiche

Bei der Planung und Konzeptionierung von Energiemonitoring-Systemen ist eine der grundlegenden Fragen, in welchem Umfang das Monitoringsystem konkret implementiert werden soll. Diese Entscheidung erfordert eine zielorientierte Strategie, die nicht nur die technische Umsetzung des Energiemonitorings beziehungsweise die hierfür erforderlichen Messkomponenten oder Sensoren festlegt, sondern auch in einem vorangegangenen Planungsschritt definiert, auf welcher Ebene innerhalb der Fertigungsanlage und in welchem Maßstab das Energiemonitoring umgesetzt werden soll.

Das langfristige Ziel des Energiemonitorings in diesem Kontext ist es, die Frage zu klären, ob die Fertigungsanlage des produktionstechnischen Zentrums mit Strom aus der bereits

vorhandenen Photovoltaikanlage versorgt werden kann. Wie bereits in der Einleitung dieser Arbeit ausführlich dargelegt, soll das Energiemonitoring zunächst eine systematische Überwachung der momentanen Leistungsaufnahme ermöglichen. Auf Basis dieser Überwachung soll eine präzisere Analyse des Lastprofils der gesamten Fertigungsanlage sowie der einzelnen Fertigungsschritte durchgeführt werden, sodass gegebenenfalls der Fertigungsablauf zur Optimierung des Energiebedarfs angepasst werden kann. Aus diesem Grund sollen in den nachfolgenden Unterkapiteln folgende Aspekte beziehungsweise Fragen näher betrachtet werden:

- Welche Auswirkung hat der Maßstab des Energiemonitoring-Systems auf die Analysierbarkeit des Lastprofils?
- In welchem Umfang muss das Energiemonitoring-System implementiert werden und wie ist dies wirtschaftlich zu bewerten?
- Ist es Sinnvoll das Monitoring über Maschinendaten ohne konstante reale Messung zu betreiben?

5.2.1 Maßstab der Monitoringbereiche

In Anlehnung an [9] und [54] ist unter dem Begriff „Maßstab“ im Kontext dieser Arbeit und vordergründig in diesem Kapitel die zu betrachtende Ebene gemeint, auf welcher das Energiemonitoring durchgeführt werden soll. Im industriellen Umfeld lässt sich eine Unterteilung in verschiedene Produktionsebenen vornehmen, die hierarchisch strukturiert sind. Diese Ebenen beinhalten wiederum verschiedene Untergruppierungen, die sich je nach Rang der jeweiligen Ebene unterscheiden. In Anlehnung an [54] soll dieses Strukturmodell zunächst im Allgemeinen näher erläutert werden.

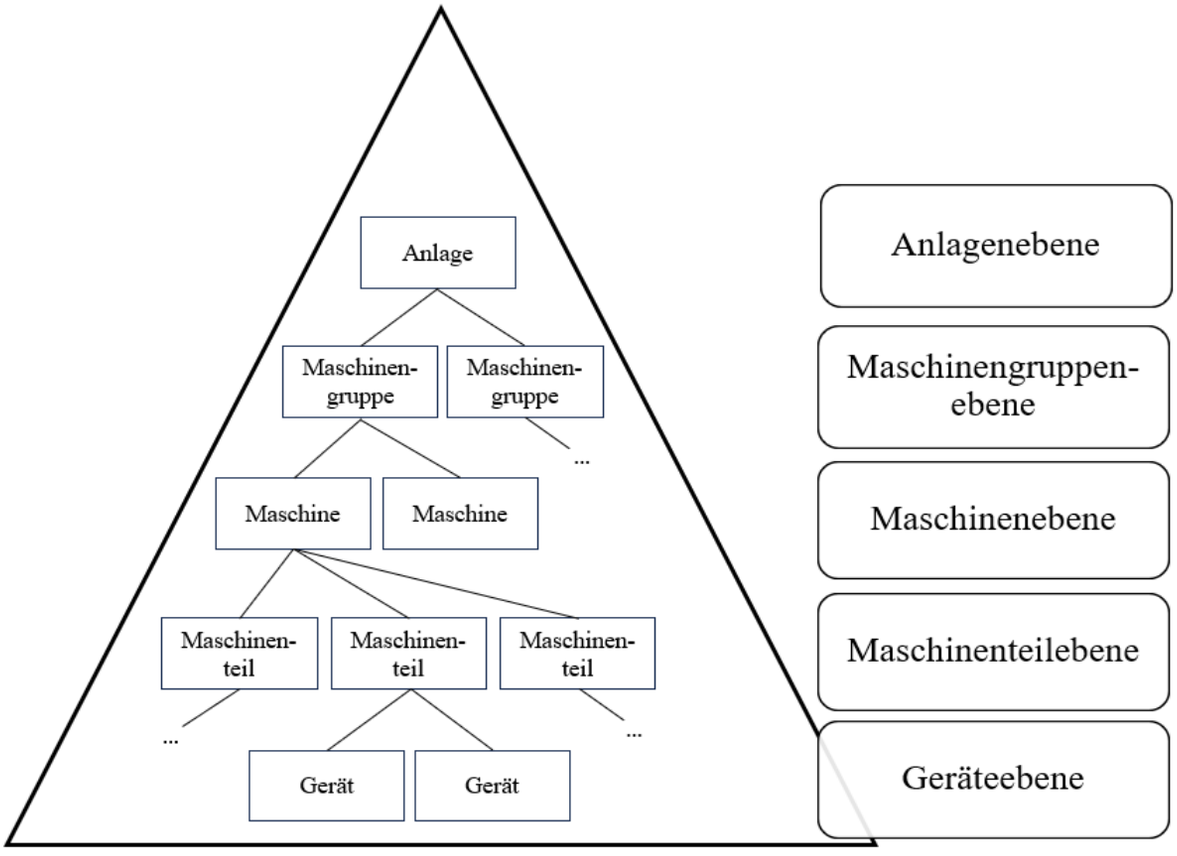


Abbildung 19: Hierarchisches Ebenenmodell zur Gliederung von Fertigungsanlagen (in Anlehnung an [54])

Aus Abbildung 19 geht hervor, dass die höchste Ebene im Rahmen des Energiemonitorings die Anlagenebene ist, welche die gesamte Anlage mit all ihren Komponenten umfasst und somit als übergeordneter Betrachtungsmaßstab verstanden werden kann. Diese Ebene kann, abhängig von Art und Größe der Anlage, in verschiedene Maschinengruppen unterteilt werden. Innerhalb dieser Maschinengruppenebene werden Maschinen zusammengefasst, die entweder vom gleichen Typ sind oder dieselbe Funktionsgruppe bilden, wodurch die Maschinenebene definiert wird. Des Weiteren lässt sich auch eine einzelne Maschine, wie beispielsweise ein industrieller Gelenkarmroboter, in kleinere Einheiten gliedern. Dies führt zur Betrachtung der Maschinenteilebene, welche in diesem Beispiel die übergeordneten Bestandteile des Roboters umfasst. Diese Bestandteile bestehen weiter noch aus verschiedenen Geräten, welche auf der Geräteebene letztlich den kleinsten Betrachtungsmaßstab des vorliegenden Strukturmodells darstellen.

Für das im Rahmen dieser Arbeit zu planende Energiemonitoring-System soll nachfolgend analysiert werden, wie das zuvor erläuterte Ebenenmodell angepasst werden muss, um Gruppen zu strukturieren, die als separate Energiesegmente erfasst werden können. Im konkreten Fall

der Zukunftsfabrik Bodensee kann die Fertigungslinie des PTZ als eine zusammenhängende Anlage definiert werden, wodurch auch hier die Anlagenebene als höchste Ebene beziehungsweise übergeordneter Maßstab betrachtet werden kann. Da sich das Energiemonitoring in dieser Arbeit auf die elektrische Leistung beziehungsweise den Bedarf elektrischer Energie bezieht, ist auf Grundlage der Bestandsliste aus elektrotechnischer Sicht festzustellen, dass der Schaltschrank hierbei der Anlagenebene zuzuordnen ist. Vergleichbar mit dem Stromzähler in einem Hausanschlusskasten wäre somit die Einspeisung der Zuleitung des Schaltschrankes als übergeordneter Messpunkt zu betrachten. Da in diesem Kapitel untersucht werden soll, welche Auswirkung der Maßstab des Energiemonitoring-Systems auf die Analysierbarkeit des Lastprofils hat, soll anhand der nachfolgenden Abbildung erläutert werden, welche Problematik auftreten kann, wenn das Energiemonitoring-System allein auf der übergeordneten Anlagenebene umgesetzt wird.

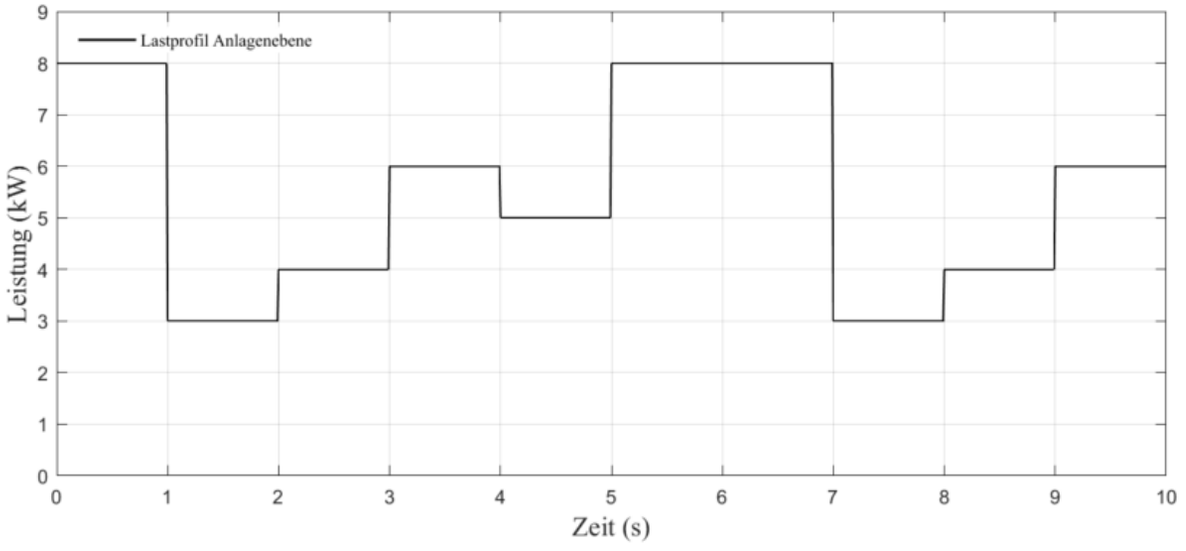


Abbildung 20: Hypothetisches Lastprofil der Anlagenebene

In Abbildung 20 ist ein vereinfachtes, fiktives Lastprofil der übergeordneten Anlagenebene dargestellt, welches zu illustrativen Zwecken verwendet wird und somit keinem reellen Verlauf entspricht. Es ist zu entnehmen, dass die Leistungsaufnahme der gesamten Anlage im betrachteten Zeitraum von 0 bis 10 s zwischen 3 und 8 kW schwankt. Diese Variationen im Lastprofil werden durch die Annahme begründet, dass während des Betrachtungsintervalls verschiedene Fertigungsschritte durchgeführt werden, wodurch unterschiedliche Aktorik angesteuert wird, was letztlich durch die angenommenen Lastschwankungen repräsentiert werden soll.

Ein wesentliches Problem der Darstellung des Lastprofils im Maßstab der Anlagenebene, insbesondere im Kontext der Zukunftsfabrik Bodensee, ist die Unterteilung der Produktionslinie in einzelne Stationen. In diesen Stationen werden verschiedene Fertigungsschritte simultan ausgeführt. Dem zugrundeliegenden Leistungs-Zeit-Diagramm kann somit nicht direkt entnommen werden, wie die einzelnen Fertigungsschritte das Lastprofil konkret beeinflussen, was letztlich eine nähere Interpretation des Diagramms hinfällig werden lässt.

Zu begründen ist dies damit, dass aus dem Leistungs-Zeit-Diagramm auf Anlagenebene beispielsweise nicht hervorgeht, ob die Lastspitze von 8 kW aus mehreren parallelen Fertigungsschritten mit mittlerem Leistungsaufwand oder überwiegend aus einem einzelnen Schritt mit hohem Leistungsaufwand resultiert. Diese Fragestellung ist insbesondere unter dem Anspruch, die Produktionsanlage mit einer Photovoltaikanlage zu versorgen von Bedeutung, da hierbei die maximale erforderliche Leistung relevant ist. Um diese Fragestellung entsprechend klären zu können, lässt sich als Anpassung des dargestellten Ebenenmodells [54] in diesem Zusammenhang eine Stationsebene definieren, wodurch letztlich das Ziel verfolgt wird, ein Lastprofil für eine gesamte Arbeitsstation zu erfassen.

Besonders verdeutlicht wird die Notwendigkeit der Stationsebene ebenfalls anhand des in der Abbildung 20 dargelegten Lastprofils. Wie zu erkennen ist, wiederholt sich der zum Zeitpunkt null beginnende Profilverlauf nach sechs Sekunden, wodurch bei Betrachtung dieses Zehn-Sekunden-Anschnitts die Schlussfolgerung getroffen werden könnte, dass die Zykluszeit eines Fertigungsdurchlaufes entsprechend sechs Sekunden beträgt. Diese Annahme muss allerdings unter Bezugnahme der nachfolgenden Abbildung 21 widerlegt werden. Es soll fortan davon ausgegangen werden, dass das zuvor dargestellte Leistungs-Zeit-Diagramm auf Anlagenebene aus zwei Stationen resultiert, deren Leistungsprofil Abbildung 21 zu entnehmen ist und aus demonstrativen Gründen ebenfalls fiktiv ist.

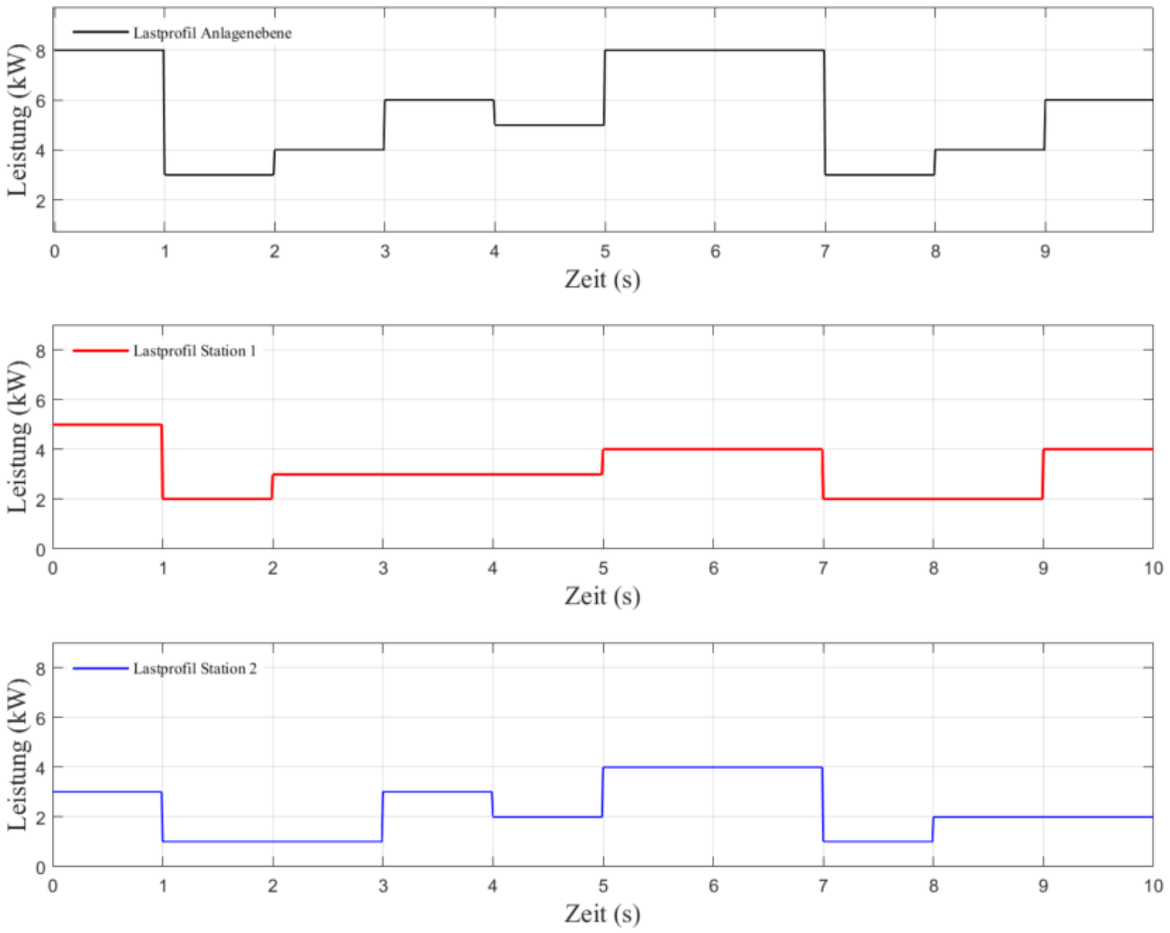


Abbildung 21: Hypothetische Lastprofile der Stationsebene

Wie anhand der Abbildung ersichtlich ist, ergibt sich das bereits betrachtete Lastprofil der Anlagenebene durch Addition der beiden Lastprofile auf Stationsebene. Durch das Einführen des kleineren Maßstabs auf Stationsebene ist nun zu erkennen, dass sich der Fertigungsprozess nicht wie angenommen alle sechs Sekunden zyklisch wiederholt und die vorherige These somit nicht zutrifft. Unter Bezugnahme der Lastprofile auf Stationsebene ist nun ebenfalls die Interpretation des übergeordneten Lastprofils im Anlagenmaßstab möglich. So kann auch die vorherige Fragestellung bezüglich der Lastspitze von 8 kW geklärt werden. Wie der Abbildung 21 entnommen werden kann, ist die Lastspitze im Intervall 0 s bis 1 s verstärkt auf die Leistungsaufnahme von Station eins (rote Kennlinie) zurückzuführen, wohingegen die Lastspitze im Zeitraum 5 s bis 7 s auf beide Stationen gleichermaßen zurückzuführen ist.

Aus dieser detaillierteren Betrachtung können nun Möglichkeiten zur Prozessoptimierung aus energetischer Sicht abgeleitet werden. Auf Grundlage der zuvor dargelegten Erkenntnis hinsichtlich der Lastspitzenproblematik kann beispielsweise festgehalten werden, dass die erforderliche Maximallast von 8 kW auf 7 kW reduziert werden kann, wenn der Prozessablauf

von Station zwei (blaue Kennlinie) bezüglich Station eins (rote Kennlinie) um 2 s verzögert ist. Dies soll anhand der nachfolgenden Abbildung veranschaulicht und belegt werden. Hierbei wird die Annahme getroffen, dass die Lastprofile zyklisch sind und die Periodendauer 10 s beträgt. Die rote Kennlinie ist verglichen mit Abbildung 21 folglich um 2 s nach rechts verschoben.

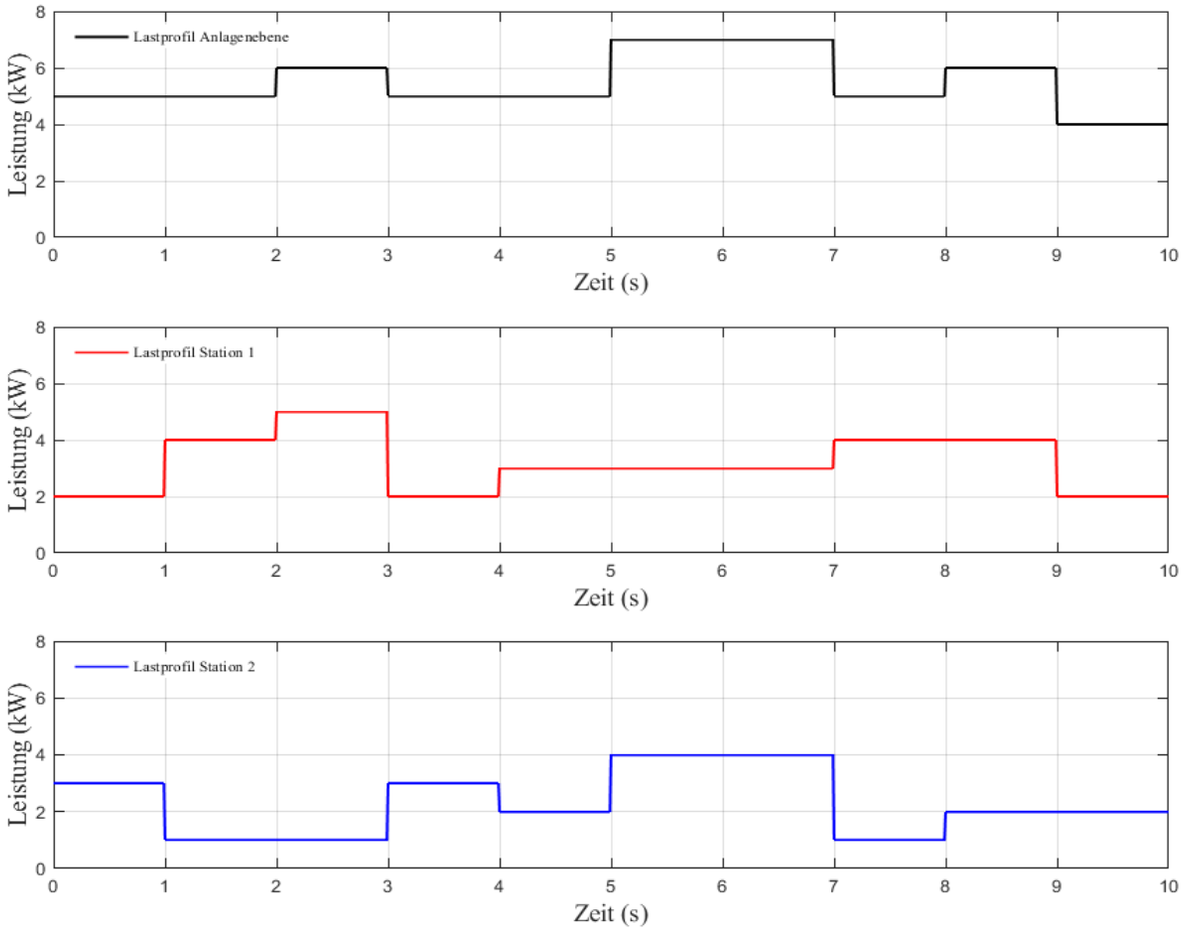


Abbildung 22: Lastprofile der Stationsebene mit zeitlicher Verschiebung

Der in Abbildung 22 dargestellte Verlauf der schwarzen Kennlinie veranschaulicht, verglichen mit Abbildung 21, wie die zeitliche Verschiebung der Lastprofile auf Stationsebene unmittelbar das Gesamtlastprofil der Anlage beeinflusst. In diesem Beispiel resultiert dies, wie bereits erwartet, in einer reduzierten maximalen Gesamtleistungsaufnahme, die nun einen Spitzenwert von 7 kW erreicht. Im Vergleich zum vorherigen Leistungs-Zeit-Diagramm stellt dies eine Reduktion um 1 kW dar. Diese Verringerung wirkt sich direkt auf die erforderliche Versorgungsleistung der Photovoltaikanlage aus und ist daher aus energetischer Sicht als vorteilhaft zu bewerten. Aufgrund der klareren Interpretierbarkeit der Kennlinien kann es

folglich als nachgewiesen angesehen werden, dass das Monitoring auf Stationsebene eine energetische Prozessoptimierung ermöglicht. Aus den dargelegten Erkenntnissen dieses Kapitels folgt zudem, dass insbesondere die kombinierte Betrachtung von Stations- und Anlagenebene sinnvoll ist. Diese ganzheitliche Erfassung erlaubt es unmittelbar, Aussagen über die erforderliche Versorgungsleistung zu treffen. Im Rahmen der Umsetzung des Energiemonitoring-Systems in der Zukunftsfabrik sollten demnach beide Ebenen berücksichtigt werden.

Die einzelnen Stationen der Fertigungslinie des PTZ sind jeweils über separate Schuko Stecker an den Lastkreis des Schaltschranks angeschlossen. Obwohl, wie in Kapitel 1.4 erläutert, die tatsächliche Installation des Energiemonitoring-Systems nicht Bestandteil dieser Arbeit ist, lässt sich im Rahmen der Planung die Empfehlung aussprechen, diese Schuko Stecker beziehungsweise die entsprechenden Steckdosen als Messpunkte auf der Stationsebene zu nutzen.

Abschließend soll bewertet werden, ob die Notwendigkeit besteht, der Stationsebene eine weitere Ebene unterzuordnen. Da sich eine Station aus dem Zusammenschluss mehrerer Geräte ergibt, kann begrifflich auch hier gemäß des Ebenenmodells [54] eine Geräteebene als kleinster Maßstab definiert werden. In diesem Zusammenhang bezieht sich der Begriff „Gerät“ auf verschiedene elektrische Bauteile innerhalb der Stationen, darunter Motoren, Sensoren und sonstige elektrotechnische Komponenten. Gemeint sind somit alle elektrischen Verbraucher innerhalb einer Station. Die ausführlich hergeleitete Erkenntnis, dass anhand der Stationsebene das Lastprofil der Anlagenebene besser interpretierbar beziehungsweise analysierbar ist, kann analog dazu auch auf den Zusammenhang zwischen Stations- und Geräteebene übertragen werden. Durch Leistungs-Zeit-Diagramme einzelner Geräte innerhalb einer Station könnten dementsprechend energetische Optimierungsmaßnahmen bezüglich des Lastprofils auf Stationsebene abgeleitet werden, welche sich wiederum auf die Anlagenebene auswirken.

In diesem Kapitel wurden verschiedene Ebenen hergeleitet, die für die Fragestellung welchen Einfluss der Maßstab des Energiemonitoring-Systems auf die Analysierbarkeit des Lastprofils hat – von Bedeutung sind. Abschließend sollen diese Ebenen nun als grafisches Modell zusammengefasst werden. Dabei wird das in Abbildung 19 vorgestellte allgemeine Ebenenmodell in einer modifizierten Form aufgegriffen, welche die Erkenntnisse dieses Kapitels und Gegebenheiten der Zukunftsfabrik Bodensee berücksichtigt. Diese visuelle

Zusammenfassung (Abbildung 23) soll die Struktur und die Beziehungen zwischen den verschiedenen Ebenen des Energiemonitoring-Systems deutlich machen.

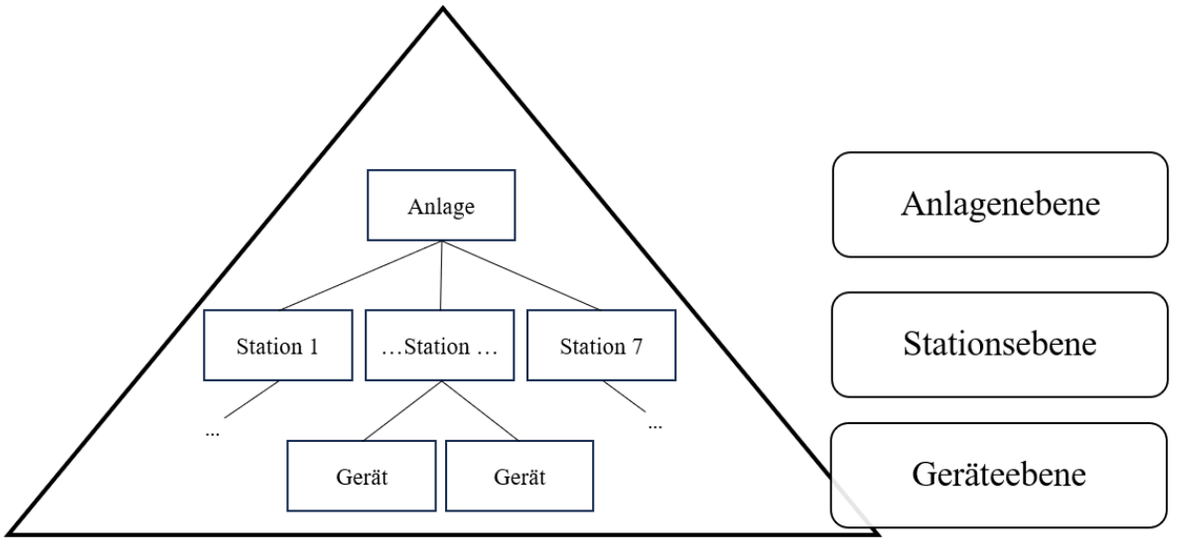


Abbildung 23: Angepasstes hierarchisches Ebenenmodell zur Gliederung von Fertigungsanlagen (in Anlehnung an [54])

5.2.2 Umfang des Monitoringsystems

Im Gegensatz zum vorherigen Kapitel, in welchem anhand definierter Ebenen dargelegt wurde, welcher Maßstab erforderlich ist, um eine qualitative Analyse des Lastprofils zu ermöglichen, soll nachfolgend bewertet werden, welcher Umfang erforderlich ist. Konkret soll also die Frage geklärt werden, wie viele spezifische Messpunkte innerhalb der festgelegten Ebenen erforderlich sind. Hierbei liegt der Fokus darauf, den Umfang des Energiemonitoring-Systems so auszulegen, dass eine qualitative Analyse der Energieflüsse beziehungsweise der Lastverteilung möglich ist. Dadurch soll im Zusammenspiel mit den Erkenntnissen des vorherigen Kapitels (Maßstab der Monitoringbereiche) das Ziel verfolgt werden, weitere energetische Optimierungsmaßnahmen für die Fertigungslinie im PTZ ableiten zu können. Ohne konkret zu berücksichtigen, welches Energiemonitoring-System letztlich verwendet werden soll, soll auch die Wirtschaftlichkeit berücksichtigt werden.

Wie bereits in Kapitel 5.2.1 erörtert, stellt die Einspeisung der Zuleitung in den Schaltschrank einen geeigneten übergeordneten Messpunkt dar, um die Gesamtleistungsaufnahme der Anlage zu erfassen. Auf der Stationsebene ergibt sich jedoch die Fragestellung, ob es notwendig ist, alle Stationen einzeln zu erfassen oder ob aus wirtschaftlichen Überlegungen heraus eine

Erfassung nur weniger Stationen sinnvoller wäre. Diese Entscheidung muss unter Berücksichtigung des Gleichgewichts zwischen einer detaillierten Datenerfassung für präzise Analysen und der Wirtschaftlichkeit der Implementierung eines umfassenden Energiemonitoringsystems getroffen werden. Zur Klärung dieser Fragestellung soll die nachfolgende Abbildung 24 herangezogen werden.

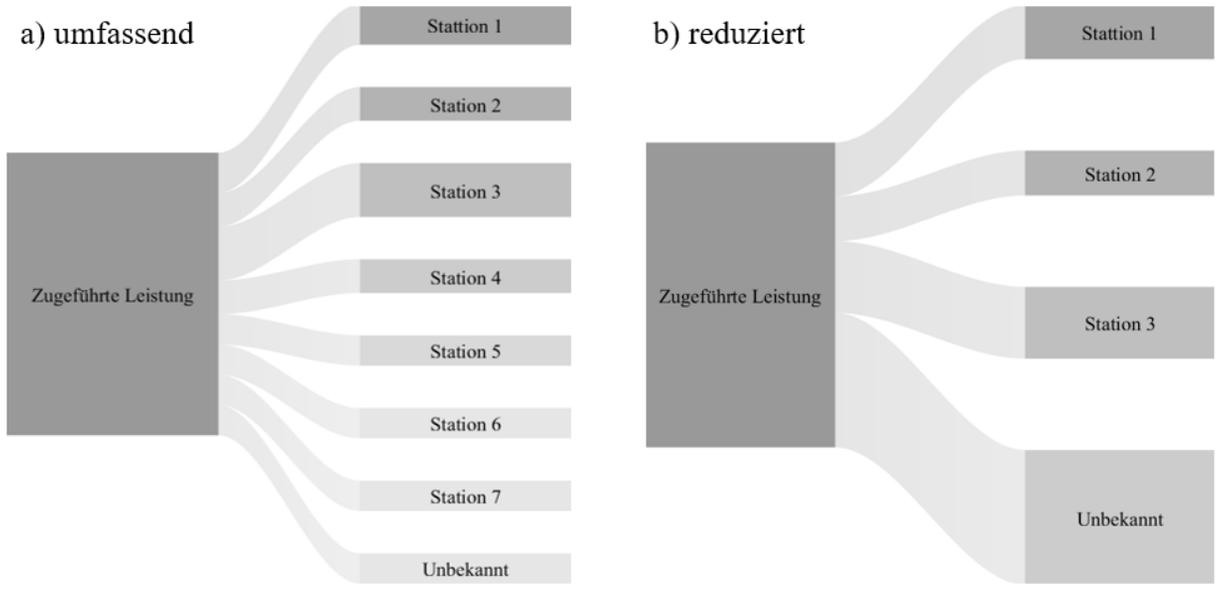


Abbildung 24: Sankey-Diagramme für umfassenden und reduzierten Monitoringumfang

Die in der Abbildung dargestellte Analyse veranschaulicht den Zusammenhang zwischen dem Umfang des Energiemonitoring-Systems und der Transparenz der Lastverteilung. Durch die Messung auf Anlagenebene wird die Gesamtleistung erfasst. Wie die Gegenüberstellung der beiden Sankey-Diagramme zeigt, ist die Transparenz in der Unterverteilung der Last im Fall eines umfassenden Monitorings entsprechend „a“ deutlich detaillierter. Hier wird jede der sieben vorhandenen Fertigungsstationen in der Zukunftsfabrik Bodensee einzeln erfasst, was eine genaue Aufschlüsselung der Last auf die einzelnen Stationen ermöglicht.

Im Fall „b“ hingegen beschränkt sich der Umfang des Monitorings auf die ersten drei Stationen, die mit geeigneter Sensorik zur Leistungsmessung ausgestattet sind. Das rechte Sankey-Diagramm zeigt, dass ein erheblicher Teil der Lastverteilung nicht zugeordnet werden kann und somit „unbekannt“ bleibt. Auch im linken Diagramm ist allerdings zu sehen, dass selbst bei detaillierterer Erfassung ein gewisser Anteil der Last keiner der sieben Stationen zugeordnet werden kann. Dies ist beispielsweise auf die separate Versorgung der Anlagensteuerung oder auch des Gleichstromkreises zurückzuführen. Der Unterschied zum reduzierten Umfang des

Monitorings in Fall „b“ ist jedoch, dass hier nicht nur die Steuerung und der Gleichstromkreis Teil der unbekannten Last sind, sondern auch die Stationen vier bis sieben. Es ist daher fraglich, ob ein derart reduzierter Umfang für eine qualitative, energetische Analyse ausreichend ist. Für das in der Zukunftsfabrik Bodensee zu implementierende Energiemonitoring-System wird daher empfohlen, jede Station separat zu erfassen.

Da es sich um ein Projekt in einer Lernfabrik handelt, welches letztlich Erkenntnisse liefern soll, die auf größere industrielle Umgebungen übertragbar sind, ist es wichtig festzuhalten, dass es sich hierbei lediglich um logische Schlussfolgerungen aus theoretischen Zusammenhängen handelt. Diese sollen daher in einer weiterführenden Arbeit durch praktische Messungen und entsprechende Analysen verifiziert werden.

Um die hier getroffene Schlussfolgerung zu vervollständigen und die Frage zu klären, in welchem Umfang das Energiemonitoring-System konkret umgesetzt werden soll, muss abschließend geklärt werden, in welchem Umfang die Geräteebene erfasst werden soll. Wie im vorherigen Kapitel dargelegt wurde, ist das Energiemonitoring auf der Geräteebene wichtig, um eine energetische Optimierung des Stationslastprofils zu ermöglichen und dieses gegebenenfalls besser interpretieren zu können. Es muss jedoch unabhängig vom tatsächlichen Monitoringsystem festgehalten werden, dass der Messaufwand bei einer umfänglichen Messung, die jedes Gerät separat berücksichtigt, unverhältnismäßig hoch ist. Aus wirtschaftlichen Gründen wird es daher als sinnvoll erachtet, nur die vier Förderbandmotoren separat als Teil der Geräteebene zu erfassen. Diese Selektion ist damit zu begründen, dass die Motoren gemäß Kapitel 2.2 ein besonderes Einschaltverhalten aufweisen, welches hinsichtlich der zu erwartenden Lastprofile als interessant erachtet wird und da beabsichtigt wird, die Blindleistung näher zu betrachten.

5.2.3 Vergleich von Monitoring über Maschinendaten und kontinuierlicher Messung

In diesem Punkt soll die bereits erläuterte Ebenen Aufteilung und der damit einhergehende Aufwand des Monitorings aller Einzelgeräte aufgegriffen werden und die Möglichkeit der Vereinfachung durch die Einbeziehung der Maschinen und Prozessdaten diskutiert werden. In den Arbeiten [9] und [46] wurde die Möglichkeit der Erstellung eines Lastprofiles von Anlagen und Komponenten, durch die Verwendung von Prozessdaten behandelt, wobei die Anlage in diesem Fall der Stationsebene und die Komponente der Maschinenebene entspricht.

Da es sich bei den einzelnen Stationen der Stationsebene, der Fertigungslinie des PTZ, um entweder konstante Prozesse oder dynamische Prozesse handelt, welche sich zyklisch wiederholen, kann durch ein Basislastprofil der Station, unter Hinzunahme und Berücksichtigung der zeitlich aufgelisteten Maschinendaten, eine zustandsabhängiges Lastprofil erzeugt werden. Das Basislastprofil beschreibt hierbei das durch reale Messung erstellte Lastprofil einer Station oder einer Maschine. Dies ist in Abbildung 25 nochmals dargestellt.

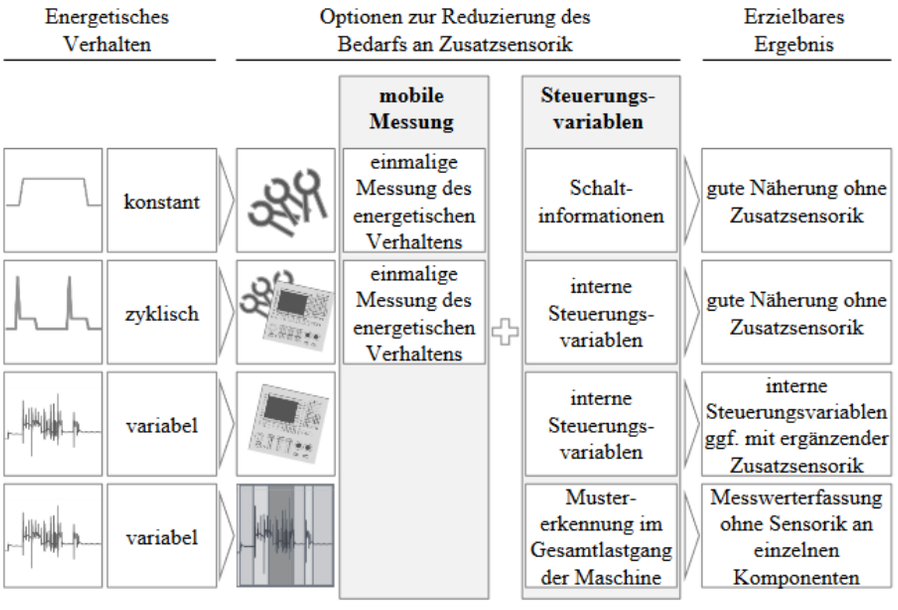


Abbildung 25: Möglichkeiten zur Erstellung eines zustandsabhängigen Lastprofils auf Basis von Maschinendaten in Abhängigkeit des energetischen Verhaltens [9, p. 88]

Abbildung 25 zeigt, dass sich eine gute Näherung an das Lastprofil erzielen lässt, wenn sich das energetische Verhalten konstant oder variable und zyklisch verhält und die Maschinendaten mit der einmaligen, realen Messung Energieverbrauchsmessung verknüpft werden.
Dies ist möglich, da durch die Kopplung des real gemessenen Lastprofils und den dazugehörigen Maschinendaten, diesen Zuständen eindeutige Leistungsaufnahmen zugeordnet werden können. Somit besteht die Möglichkeit, dass das Lastprofil während des Prozesses durch die Steuerung berechnet wird.
Dies soll kurz anhand eines beispielhaften Lastprofils in Abbildung 26 erläutert werden.

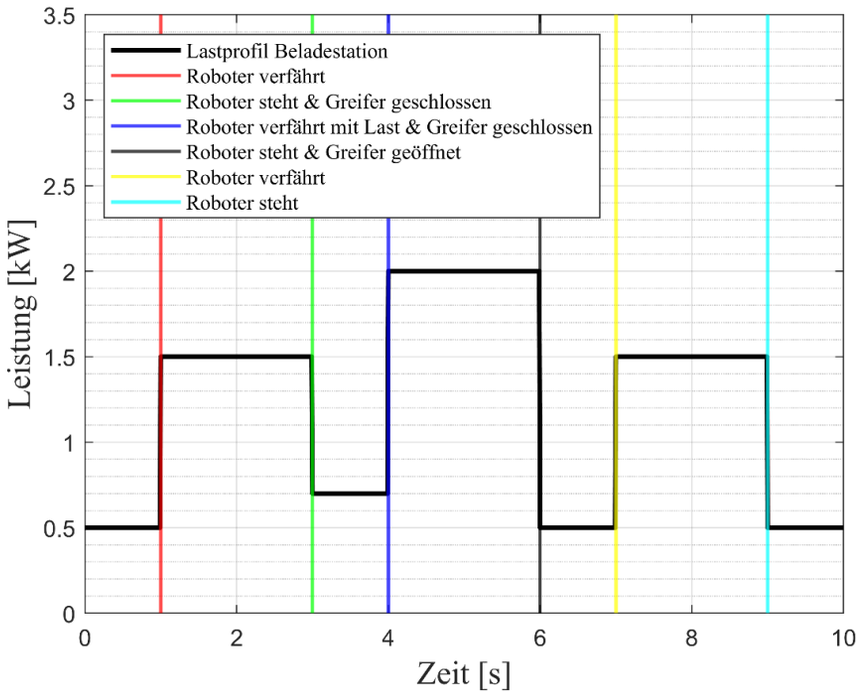


Abbildung 26: Beispielhaftes Lastprofil der Beladestation des PTZ

Die vorliegende Abbildung soll beispielhaft den Arbeitsprozess der Beladestation der Produktionslinie des PTZ darstellen. Die senkrechten Linien entsprechen den Maschinendaten, welche durch die Steuerung ausgegeben werden.

Der Grafik ist zu entnehmen, dass die Station eine Grundlast von 0,5 kW aufweist, welche sich durch die kontinuierliche Versorgung der Steuerungseinheit des Roboters einstellt. Zum Zeitpunkt t = 1s soll der Roboter von seiner Ruhelage an die Position des aufzunehmenden Bauteils verfahren. Hierbei ist der Greifer nicht betätigt und nimmt somit keine Leistung auf, wodurch sich für das Verfahren des Roboters eine Last von 1 kW festlegen lässt. Bei t = 3s befindet sich der Roboter im Stillstand über dem Bauteil und schließt den Greifer. Dem geschlossenen Greifer kann somit eine Leistung von 0.2 kW zugewiesen werden. Im Anschluss soll der Roboter bei t = 4s mit dem Bauteil aus der Ruhelage zum Förderband verfahren. Nun summiert sich die dynamische Leistung der Station durch den Roboter mit 1,3 kW und dem Greifer mit 0,2 kW. Der Roboter benötigt nun 0,3 kW mehr, da er beim Verfahren in diesem Arbeitsschritt ein Bauteil bewegt, welches ein zusätzliches Gewicht in das System bringt. Bei t = 6s wird der Greifer wieder geöffnet und der Roboter fährt bei t = 7s zurück an seinen Ausgangspunkt. Hierbei zeigt sich, dass die dynamische Last der Station mit geöffnetem Greifer wieder 1 kW beträgt.

Aus dieser Betrachtung kann der Rückschluss getroffen werden, dass sich aufgrund des Ermittelten Lastprofils und der gleichzeitigen Ermittlung der Maschinendaten, diesen erhobenen Maschinendaten in dieser Betrachtung eindeutige Leistungsverbräuche zuordnen lassen. Jedoch wird in dieser Betrachtung ein idealisiertes Modell, ohne Berücksichtigung aller realen Parameter herangezogen. Dadurch muss berücksichtigt werden, dass sich Maschinenzustände, welche eine Auswirkung auf die Leistungsaufnahme haben können, kontinuierlich ändern können. Diese können beispielsweise die Temperatur, die Viskosität des Öls in einem Hydraulikaggregat, oder der Austausch eines defekten Bauteils, welches nun ein anderes Lastprofil aufweist, sein. Aus diesen Änderungen des Maschinenzustandes kann es zu einer Abweichung zwischen dem Lastprofil, welches durch die Maschinendaten errechnet wird und dem real vorliegenden Lastprofil kommen.

Nun kann jedoch die Fragestellung aufgebracht werden, warum Energiemonitoring nicht generell über die Leistungsbestimmung durch Maschinendaten vollzogen wird. Dies soll anhand verschiedener Vor- und Nachteile in Anlehnung an [9] und [46] betrachtet werden.

Hierbei können folgende Vorteile aufgezählt werden:

- Geringere Anschaffungskosten durch Einsparung von Sensorik
- Keine Erhöhung der allgemeinen Leistungsaufnahme durch zusätzliche Sensorik

Gegenübergestellt werden die folgenden Nachteile:

- Hoher Aufwand bei der Ermittlung des Lastprofils und der Zuordnung der Leistungsaufnahme zu den Einzelkomponenten
- Erhöhter Rechenaufwand für die Steuerungseinheit
- Das Lastprofil bezieht sich nur auf den Maschinenzustand bei dem dieses ermittelt wurde
- Neue Erstellung eines Lastprofils nach Austausch Leistungsstarker Komponenten

Im Anschluss wird das Monitoring über die kontinuierliche Messung durch Leistungsmessgeräte betrachtet.

Hierbei können folgende Vorteile aufgezählt werden:

- Einfachere Implementierung
- Aktueller Maschinenzustand fließt in die Messung ein
- Keine regelmäßige Ermittlung neuer Lastprofile

Gegenübergestellt werden die folgenden Nachteile:

- Hohe Anschaffungskosten durch die Anzahl der Messgeräte
- Hoher Platzbedarf durch die Messgeräte
- Die Leistungsaufnahme wird durch die Messgeräte erhöht

Abschließend kann gesagt werden, dass sich das Monitoring durch die Maschinenzustände aufgrund des hohen Aufwandes zur Ermittlung der Lastprofile nur bei Anlagen und Systemen lohnt, bei denen durch die Anschaffung der Sensorik sehr hohe Kosten entstehen, oder wenn es sich um konstante oder gering dynamische Prozesse handelt, welche sich zyklisch wiederholen und sich die Parameter, welche Auswirkungen auf die Leistungsaufnahme haben gut bestimmen und berücksichtigen lassen.
Gemäß den Erkenntnissen von [46] lässt sich schlussfolgern, dass die kontinuierliche Erfassung von Daten durch den Einsatz von Sensoren als die präziseste und effizienteste Methode für das Energiemonitoring angesehen werden kann.

5.3 Konzeptmethoden

In diesem Kapitel sollen die bisherigen Erkenntnisse aufgegriffen werden und aufbauend auf diese eine kurze Zusammenfassung der Übertrag dieser erläutert werden. Das Energiemonitoring-System im PTZ soll dazu dienen, das Lastprofil der Produktionsanlage zu bestimmen und Spielraum für die Optimierung dieses Lastprofils zu schaffen. Dies soll dem Zweck dienen die Anlage im PTZ mit einer alternativen Energieform zu versorgen. Dazu wird die Produktionsanlage zunächst in verschiedene Ebenen eingeteilt, welche die Anlagenebene, die Stationsebene und die Maschinenebene umfassen. Anschließend wird festgelegt, dass die Stationsebene eine hohe Transparenz bedarf, wodurch es Notwendig ist jeder Station einen eigenen Messpunkt zuzuordnen. Innerhalb der Maschinenebene werden die vier Drehstrommotoren, welche das Förderband antreiben, als wichtig erörtert, wodurch jeder Motor ebenfalls einen eigenen Messpunkt erhält. Da es sich auf der Stationsebene im PTZ meist um

dynamische Prozesse handelt, welche jedoch das Potential aufweisen, sowohl gering- als auch hochdynamisch zu sein, wird die Abtastfrequenz auf größer 1 Hz festgelegt.
Bei der Betrachtung ob das Monitoring über Maschinendaten oder einer realen Messung stattfinden soll, kann aufgrund der dynamischen Prozesse und der Tatsache, dass die Produktionsanlage im PTZ einer ständigen Optimierung und umbauten unterliegt entschieden werden, dass das Monitoring über die reale Messung betrieben wird. Dies hat den Grund, dass die Bestimmung eines neuen Lastprofiles und die Zuordnung des Energiebedarfs zu den Maschinendaten bei jedem Umbau und jeder Optimierung neu anfällt.

Im Zuge dieses Projektes werden zwei Konzepte entworfen, welche in den beiden folgenden Unterpunkten genauer erläutert werden.

5.3.1 Industrielle Variante

Bei der industriellen Variante handelt es sich um Systemkomponenten des Herstellers Siemens. Dieser Hersteller wird ausgewählt, da die übrigen Steuerungskomponenten der Anlage ebenfalls von diesem Hersteller sind und somit eine Systemkompatibilität sicher gewährleistet werden kann. Auf Basis der in Kapitel 5.2.1 und 5.2.2 vorgenommenen Ebenengliederung wird in Abbildung 27 das System als Schaltbild dargestellt.

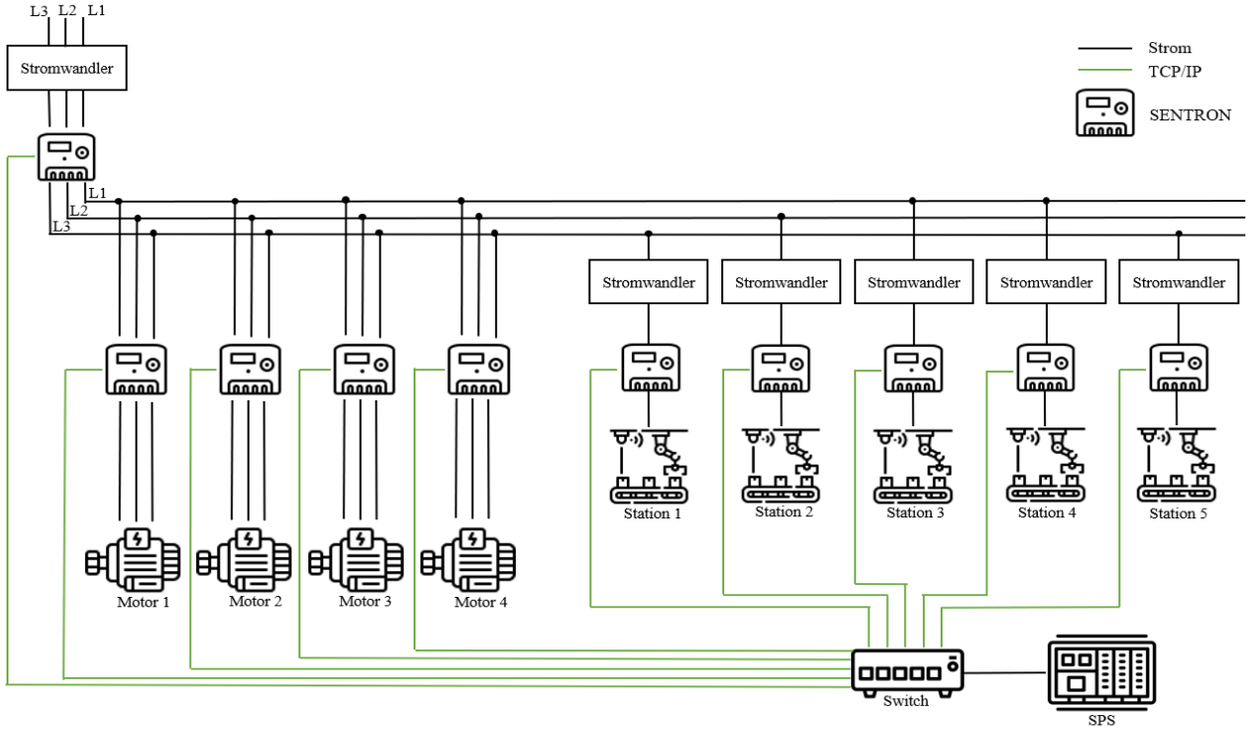


Abbildung 27: Schaltbild der industriellen Lösung

Aus Abbildung 27 ist zu entnehmen, dass die gesamt aufgenommene Leistung der Anlagenebene über das Messgerät a1 gemessen wird. Die einzelnen Stationen der Stationsebene werden über die Messgeräte b1, b2, b3, b4 und b5 gemessen. Die einzelnen Drehstrommotoren und damit die Maschinenebene werden über die Zähler c1, c2, c3 und c4 gemessen.

Als Messgeräte werden die Leistungsmessgeräte SENTRON PAC 3220 von Siemens gewählt. Dies hat zum einen den Hintergrund, dass diese Messgeräte sowohl die Motoren mit drei Phasen, als auch die Stationen mit nur einer Phase messen können und zum anderen eine Ausreichend hohe Abtastrate vorliegt. Das SENTRON PAC 3220 soll kurz in Abbildung 28 gezeigt werden.



Abbildung 28: Siemens SENTRON PAC 3220 [55]

Die Abtastraten sind den Datenblättern nicht zu entnehmen, jedoch konnte über den technischen Support von Siemens in Erfahrung gebracht werden, dass das ausgewählte Messgerät das Messsignal mit einer Abtastrate von 2,1 MHz abtastet. Innerhalb des Messgerätes findet dann eine Mittelung der Messwerte statt, was zu einer Auslesbaren Samplerate von 64 S/s führt. Welche die Anforderung an die Abtastrate von größer 1 Hz erfüllt.

Zusätzlich werden Stromwandler benötigt, da die Messgeräte nur für einen Wandler Anschluss von x/1 A oder x/5 A geeignet sind. Hierbei steht die Variable x für den Primärstrom. Das bedeutet, dass der Primärstrom 1 A oder 5 A, was im Messgerät Parametriert werden kann, nicht überschreiten darf. Dazu Wandelt der Stromwandler den ihn durchfließenden Strom in einen kleineren Strom um, welcher jedoch proportional zum Primärstrom ist [56]. Betrachtet man beispielsweise den Primärstrom der Stationen, welcher durch die Leitungsschutzschalter auf 16 A begrenzt ist, so müssen dort Stromwandler eingesetzt werden, welche die 16 A Primärstrom zu 1 A oder 5 A wandeln um diese an das Messgerät anzuschließen.

Das ausgewählte Messgerät bietet zudem eine Modbus TCP Schnittstelle, welche es ermöglicht diese über einen Switch mit der SPS oder einem PC zu verbinden. In diesem Fall soll das Monitoring vorerst über die SPS erfolgen, da die Anschaffung einer geeigneten Software auf Basis des vorliegenden Lastprofils und der damit einhergehenden Möglichkeiten zur Optimierung erfolgen soll [55].
Die Unterbringung der Messgeräte soll im Schaltschrank der Produktionsanlage im PTZ auf den vorliegenden Hutschienen durchgeführt werden.

Die zu erwarteten Teilekosten des Systems werden in Tabelle 2 aufgelistet [55], [57], [58].

Bauteil	Anzahl	Stückkosten [€]	Rabatt [%]	Gesamtkosten [€]
SENTRON PAC 3220	10	451,78	50	3011,89
Ethernet Switch	1	167,44	0	167,44
Stromwandler Einspeisung	1	114,69	0	114,69
Stromwandler Station	5	23,91	0	119,55
Gesamtkosten				3413,57

Tabelle 2: Auflistung der Teilekosten für die industrielle Lösung?

Die für dieses Konzept zu erwartenden Teilekosten der industriellen Lösung belaufen sich auf 3413,57 €. Hierbei ist der Rabatt von Siemens für die Leistungsmessgeräte von 50% zu berücksichtigen, welcher eine enorme Kostenersparnis in dem Hauptkostenträger dieses Konzepts verursacht.

5.3.2 Datenlogger Variante

A Bei der Datenlogger Variante soll ein weiteres Konzept entwickelt werden, welche eine feinere Analyse bei hochdynamischen Systemen ermöglicht. Dies soll durch eine höhere Abtastrate gewährleistet werden, wodurch der Verlust von Artefakten, welche sich zum Beispiel in sehr kurzen aber hohen Lastenspitzen ausdrücken, verhindert werden soll. Diese Artefakte geben ggf. tieferen Aufschluss auf das energetische Verhalten des Systems und können dadurch zur besseren energetischen Optimierung dienen.
Um die aufgenommene Leistung zu berechnen, bedarf es der Ermittlung des Stroms, der Spannung und der Phasenverschiebung dieser beiden Größen zueinander. Im nachfolgenden

Konzept wird vorerst nur die Messung des Stromes behandelt, welches in Abbildung 29 dargestellt ist.

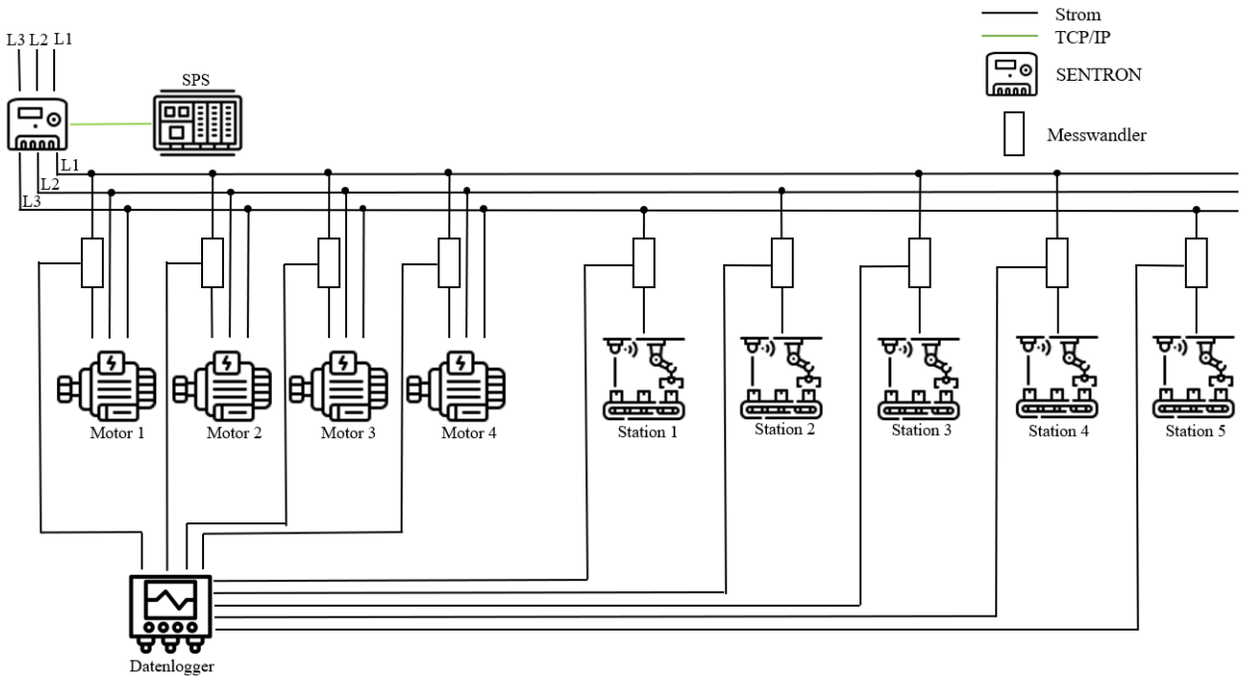


Abbildung 29: Variante mit Datenlogger für die Strommessung

Diesem Konzept ist zu entnehmen, dass auch die Anlagenebene durch das SENTRON PAC 3220 gemessen werden soll. Das ist möglich, da in der Anlagenebene kein hoch dynamisches Verhalten erwartet wird und somit ebenfalls die Samplerate von 64 S/s als ausreichend eingestuft wird. Der Strom der Stationsebene und der Maschinenebene wird in diesem Konzept über Messwandler in ein Normsignal gewandelt, welches Anschließend von einem Datenlogger mit einer Frequenz von 1 kHz und einer Genauigkeit von 0,15 % abgetastet wird. Als Datenlogger wird der *Mehrkanal-Datenlogger NOVUS FieldLogger 512k 24V – 8812120004* verwendet.

Der Datenlogger ermöglicht die Speicherung der Messwerte auf einem externen Speichermedium in Form eines USB Sticks, Festplatte oder einer SD Karte. Zudem kann er über Modbus RTU an eine Steuerung angeschlossen werden an der die Daten direkt ausgelesen werden können [59].

Für die benötigten Messwandler der Stationen werden die Stromwandler AP 50 B10 von LEM verwendet, welche eine Bandbreite von 2 kHz aufweisen. Diese Bandbreite ist notwendig um das bereits erläuterte Abtasttheorem ein zu halten. Diese Stromwandler wandeln das

Primärsignal mit einer Genauigkeit von 1 % des Istwertes in ein Normsignal um, welches vom Bediener zwischen 0 – 5 V und 0 – 10 V gewählt werden kann [60].
Bei den Messwandlern für die Motoren, werden die MU2000K vom Hersteller Ziehl verwendet, welche eine Bandbreite von 400 Hz aufweisen und ebenfalls das Primärsignal mit einer Genauigkeit von 0,3 % des Endwertes in ein Normsignal wandeln [61]. Die Auflistung der Kosten ist in Tabelle 3 dargestellt [55], [59], [60], [61].

Bauteil	Anzahl	Stückkosten [€]	Rabatt [%]	Gesamtkosten [€]
SENTRON PAC 3220	1	451,78	50	225,89
Datenlogger	1	1220,35	0	1220,35
Stromwandler Motoren	4	189,99	0	759,96
Stromwandler Stationen	5	185,24	0	926,20
Gesamtkosten				3132,40

Tabelle 3: Auflistung der Teilekosten für das Konzept mittels Datenlogger

Hierbei belaufen sich die Teilekosten auf 3132,40 €. Auch in diesem Konzept wird das Leistungsmessgerät von Siemens mit einem Rabatt von 50% verrechnet. Jedoch wird hierbei nur ein Messgerät benötigt, wodurch sich die Kostenersparnis nicht mehr so stark auswirkt wie bei der industriellen Lösung.

Abschließend zu diesem Kapitel ist zu sagen, dass für eine korrekte Bestimmung der Leistungswerte zusätzlich die Spannung und die Phasenverschiebung notwendig sind. Für die Spannungsmessung kann das System mit der Änderung, dass aller Messwandler den MU2000K entsprechen dupliziert werden. Die Phasenverschiebung kann anhand der Spannungs- und Strommessung berechnet werden.

5.3.3 Gegenüberstellung und Bewertung der Varianten

Die Auswahl des umzusetzenden Konzeptes beruht auf einer Entscheidungsmatrix welche im folgenden auf Basis der bisherigen Arbeit aufgestellt wird. Als Gewichtungsfaktoren werden Werte zwischen 1 und 3 genutzt. Hierbei wird der Preis mit einem Gewichtungsfaktor von 1 versehen, da der Preis im Laufe des Projektes als weiche Anforderung definiert wurde. Die Kriterien Analytische Möglichkeiten, Systemkompatibilität, Abtastfrequenz und die

Stakeholder werden mit dem Gewichtungsfaktor 2 versehen. Dies hat den Hintergrund, dass zum einen die technischen Kriterien bei beiden Konzepten erfüllt werden können und zum anderen die Stakeholder das Ziel haben, dass das Konzept Energiemonitoring ermöglicht, was ebenfalls beide Konzepte aufweisen. Die Kriterien Erweiterbarkeit des Systems, und Bedienbarkeit hingegen werden mit dem Faktor 3 gewichtet, da wie in der Arbeit zuvor bereits erläutert die Produktionsanlage einem stetigen Wandel unterliegt. Hierdurch soll gesichert sein, dass das Energiemonitoring keine Hürde bei neuen Projekten und Umbauten darstellt. Zugleich soll das System von unterschiedlichen Personen betrieben werden können ohne sich in komplexe Systeme und Programmabläufe einarbeiten zu müssen.
Zur Bepunktung werden Werte von 1 bis 5 verteilt, wobei 1 der schlechtesten Erfüllung und 5 der besten Erfüllung entspricht.

		Industrielle Variante		Datenlogger Variante	
Kriterium	Gewichtung	Punkte	Gewichtete Punkte	Punkte	Gewichtete Punkte
Analytische Möglichkeiten	2	3	6	5	15
Systemkompatibilität	2	5	10	2	4
Erweiterbarkeit des Systems	3	5	15	1	3
Bedienbarkeit	3	4	12	3	9
Abtastfrequenz	2	3	6	5	10
Preis	1	4	4	1	1
Stakeholder	2	5	10	1	2
Gesamtpunktzahl			63		44

Tabelle 4: Gewichtete Entscheidungsmatrix zur Bewertung beider Konzeptvarianten

Die Bepunktung der einzelnen Varianten soll im folgenden kurz erläutert werden.
Für das Kriterium Analytische Möglichkeiten wird die Industrielle Variante aufgrund der Samplerate von 64 S/s mit 3 Bepunktet. Durch die Abtastfrequenz von 2,1 MHz werden zwar alle Artefakte detektiert, jedoch werden diese gemittelt und können ggf. im gemittelten Wert verschleiert werden. Bei der Variante mittels Datenlogger wird das Signal nicht gemittelt und

mit 1 kHz abgetastet, wodurch die Artefakte sichtbar bleiben. Daher wird diese Variante in diesem Kriterium mit 5 bepunktet.
Die Systemkompatibilität wird in der industriellen Variante gegeben, da die Systemkomponenten vom gleichen Hersteller sind und diese auch als System erhältlich sind, wodurch diese Lösung mit 5 bepunktet wird. Die Variante Mittels Datenlogger hingegen bietet die benötigten Schnittstellen, jedoch muss die Kommunikation selbst programmiert werden, wodurch dieses Kriterium mit 2 bewertet wird.
Die Erweiterbarkeit des Systems wird bei der industriellen Variante mit 5 bepunktet, da das System einfach durch den Zukauf eines neuen Messgerätes erweitert werden kann. Bei der Variante mittels Datenlogger muss ein neuer Datenlogger gekauft und in das System eingebunden werden, da bei diesem System bereits alle Analogen Anschlüsse belegt sind. Diese Einbindung bedarf einem höheren Maß an Softwareanpassungen als bei der industriellen Variante wodurch diese mit 1 bewertet wird.
Das industrielle System wird bei der Bedienbarkeit mit 4 bewertet, da es sowohl über das Bedienpanel als auch über die Tasten an den Messgeräten Parametrieren lässt. Die Variante des Datenloggers hingegen benötigt ggf. Anpassungen über die Software oder Hardware-anpassungen über die Messwandler wodurch dieses System mit 3 bewertet wird.
Die Abtastfrequenz wird beim industriellen System mit 3 bewertet, da die Samplerate zwar deutlich über der Anforderung liegt, jedoch den vollen Analysebereich bei hoch dynamischen Systemen mit bis zu 100 Hz nicht voll abdeckt. Hingegen deckt der Datenlogger den hoch dynamischen Bereich mit seiner Abtastrate von 1 kHz voll ab, wodurch hier mit 5 bepunktet wird.
Der Preis als weiche Anforderung wird bei der industriellen Variante mit 4 bewertet, da der Rabatt des Herstellers von 50% für den höchsten Kostenträger einen signifikanten Kostenvorteil bringt. Bei der Variante mit Datenlogger wurde nur die Messung des Stromes betrachtet. Für die Ermittlung der Spannung muss das System mittels anderer Messwandler nochmals beschafft werden. Zusätzlich muss bei der Erweiterung des Systems jeweils ein neuer Datenlogger beschafft werden, wodurch dieses Kriterium hier mit 1 bepunktet wird.
Das Kriterium Stakeholder umfasst die Entscheidung von den Leitern des PTZ. Hierbei wurde die industrielle Variante von den Stakeholdern mit 5 bewertet, wohingegen das System mittels Datenlogger mit 1 bewertet wurde.

Durch die Entscheidungsmatrix wird das System der industriellen Variante mit 63 Punkten und die Lösung mittels Datenlogger mit 44 Punkten bewertet.

Abschließen kann zusammengefasst werden, dass beide Systeme ihre Vor- und Nachteile haben, jedoch übertrifft die industrielle Variante durch ihre Systemkompatibilität und Erweiterbarkeit die Lösung mittels Datenlogger. Die ist vor allem von Vorteil, da die Produktionsanlage im PTZ einem ständigen Wandel durch Erweiterungen und neuen Projekten unterliegt. Daher ist das System mit der höheren Erweiterbarkeit und Kompatibilität vorzuziehen, wodurch die Entscheidung auf das industrielle System fällt.

6 Ausblick und Fazit

Das vorliegende Kapitel bildet den Abschluss dieser wissenschaftlichen Arbeit und bildet damit den Schlusspunkt einer detaillierten Untersuchung zur Konzeptionierung und Implementierung eines Energiemonitoring-Systems für die Produktionsanlage im produktionstechnischen Zentrum (PTZ). Ziel dieses Kapitels ist es, eine eingehende Schlussbetrachtung der präsentierten Konzepte vorzunehmen und gleichzeitig einen Blick in die Zukunft und damit in die folgende Studienarbeit zu werfen. Die vorangegangenen Kapitel widmeten sich der methodischen Herangehensweise, der Anlagenstruktur und den konzeptionellen Überlegungen, die das Konzept dieses Systems leiteten. Hierbei wurden zwei vielversprechende Energiemonitoring-Ansätze für industrielle Umgebungen ausgearbeitet. Kapitel sieben fungiert schließlich als Plattform für eine umfassende Reflexion über die gewonnenen Erkenntnisse, die Bewertung der Umsetzung sowie eine Vorschau auf kommende Entwicklungen.

Der erste Abschnitt, Kapitel 6.1, wird der Validierung der ausgearbeiteten Energiemonitoring-Konzepte gewidmet. Durch ihre Integration in reale Produktionsanlagen werden die Systeme einer gründlichen Prüfung auf Praxistauglichkeit unterzogen. Technische Aspekte sowie die Performanz bezüglich Datenqualität, Zuverlässigkeit und Effektivität stehen hierbei im Fokus. Auf Grundlage der Gegenüberstellung erfolgt anschließend die kritische Betrachtung möglicher Optimierungspotenziale. Hierbei spielt der Aspekt, dass diese Konzepte bisher nur Konzepte sind und noch nicht an dieser Anlage getestet worden sind, eine große Rolle. Anschließend an die kritische Betrachtung folgt der mit diesem Projekt erreichte Mehrwert. Hierbei stehen nicht nur die quantifizierbaren Ergebnisse im Fokus, sondern zusätzlich die qualitativen Aspekte wie Prozessverbesserungen, Effizienzsteigerungen, Erweiterungsmöglichkeiten und mögliche Auswirkungen auf die Umwelt.

Das letzte Kapitel dieser Arbeit, Kapitel 6.2, richtet den Blick auf zukünftige Entwicklungen und Potenziale im Bereich des Energiemonitorings der Anlage im PTZ. Hierbei wird kurz aufgeführt, was die nächsten Phasen dieser Studienarbeit sind und um diese sich konkret dreht. Dieser Abschnitt dient als Brücke zwischen der Konzeptionierung und der schlussendlich wirklichen Umsetzung und Integration in das Modell einer echten Produktionsanlage.

6.1 Reflexion

Im vorliegenden Kapitel, die Reflexion, wird eine eingehende Reflexion über die entwickelten Energiemonitoring-Systeme vorgenommen, die in den vorhergehenden Kapiteln detailliert konzipiert, implementiert und angewendet wurden. Dieser Abschnitt widmet sich einer kritischen Betrachtung sowie einer Analyse des erreichten Mehrwertes durch die implementierten Lösungen. Die Reflexion erfolgt in zwei Unterkapiteln, wobei in 6.1.1 eine kritische Auseinandersetzung der technischen Aspekte erläutert wird. Hierbei wird darauf abgezielt, die konzipierten Energiemonitoring-Systeme auf technischer Ebene zu hinterfragen. Dabei werden sowohl die gewählte industrielle Variante als auch die Datenlogger-Variante einer Analyse unterzogen. Insbesondere wird auf die Leistungsmessgeräte SENTRON Pac 3220 von Siemens eingegangen, die als zentrales Element der industriellen Variante dienen.
Im Falle der Datenlogger-Variante erfolgt eine ähnlich kritische Analyse des NOVUS FiledLogger 512k 24V, wobei die höhere Abtastrate und Genauigkeit im Vordergrund stehen. Hierbei wird zusätzlich hinterfragt, inwiefern diese Variante den Anforderungen bei der Anwendung in weniger dynamischen Prozessen nicht gerecht werden könnte.
Der Abschnitt 6.1.2 bearbeitet die Evaluation des erreichten Mehrwerts durch die implementierten Energiemonitoring-Systeme. Hierbei werden wie bereits erwähnt nicht nur quantitative Ergebnisse berücksichtigt, sondern zusätzlich qualitative Aspekte in Betracht gezogen. Dabei wird betrachtet, inwiefern die Systeme dazu beitragen, den Energieverbrauch der Produktionsanlage im PTZ präzise zu erfassen. Ein weiterer Schwerpunkt dieses Kapitels ist die praxisorientierte Anwendung, wobei der Mehrwert für den Anlagenbetreiber im Vordergrund steht. Zusätzlich werden potenzielle Einsparungen durch Lastprofiloptimierungen und effizientere Ressourcennutzung betrachtet. Darüber hinaus wird die Integration der Energiemonitoring-Systeme in den laufenden Betrieb und die Benutzerfreundlichkeit evaluiert.

6.1.1 Kritische Betrachtung

Die kritische Betrachtung in diesem Abschnitt konzentriert sich darauf, die technischen Grundlagen der implementierten Energiemonitoring-Systeme auf präzise Weise zu hinterfragen. Dies beinhaltet eine detaillierte Analyse der gewählten Variante, repräsentiert durch die Siemens SENTRON PAC 3220 Leistungsmessgeräte, sowie der Datenlogger-Variante mit dem Novus FieldLogger 512k 24V.

Hinsichtlich der industriellen Variante liegt der Fokus der kritischen Betrachtung auf den Leistungsmessgeräten SENTRON PAC 3220 von Siemens. Ein zentraler Aspekt, ist die Abtastrate von 2,1 MHz. Diese Frequenz wird als Messignal auf eine auslesbare Samplerate von 64 S/s gemittelt. Diese Mittelung könnte potenziell kurzzeitige, jedoch intensive Lastspitzen verschleiern, die für das Verständnis des energetischen Verhaltens der Produktionsanlage von entscheidender Bedeutung sind. Dennoch erfüllt diese Abtastrate die Anforderung von größer 1 Hz, die für die dynamischen Prozesse in der Stationsebene im PTZ notwendig sind.

Ein weiterer Aspekt der kritischen Bewertung betrifft die Systemkompatibilität der Leistungsmessgeräte im Gesamtkontext der Produktionsanlage. Hierbei spielen Fragen wie Integration, Implementierung und Bedienbarkeit eine wichtige Rolle. Außerdem sind die Optimierung und mögliche Umbauten von entscheidender Bedeutung. Dabei zeigen die Informationen aus Kapitel 5.3, dass die SENTRON-Messgeräte nicht nur Motoren mit drei Phasen, sondern auch Stationen mit nur einer Phase messen können. Außerdem wurde die Verwendung von Stromwandlern als Lösung für die Anpassung an verschiedene Primärströme erläutert. Um genauere Informationen darüber zu erhalten, wird an dieser Stelle auf das Kapitel 5.3 verwiesen.

Die Datenlogger-Variante dagegen verspricht mit der deutlich höheren Abtastrate eine detailliertere Erfassung von hochdynamischen Prozessen. Dies könnte insbesondere bei kurzzeitigen, aber intensiven Lastspitzen von Vorteil sein, indem feinere Details des Energieverhaltens erfasst werden können. Dies ermöglicht möglicherweise eine präzisiere Identifikation von Energieoptimierungspotenzialen. Außerdem bietet diese Variante eine hohe Präzision bei der Datenerfassung von 0,15 %. Allerdings könnten diese Vorteile in weniger dynamischen Fällen, wo eine niedrigere Abtastrate ausreichend wäre, überdimensioniert sein. Diese Überdimensionierung könnte möglicherweise höhere Kosten für die Datenspeicherung und eine erschwerte Datenübertragung und Verarbeitung mit sich bringen.

Alles in allem kann gesagt werden, dass die industrielle Variante die optimalere Entscheidung für das System im PTZ, anhand der angegebenen Daten, ist. Zusätzlich kommen die Aspekte der einfacheren Bedienbarkeit und Integration des Systems hinzu. Da nicht nur Experten an dieser Anlage arbeiten sollen ist es wichtig ein einheitliches und übersichtliches System zu integrieren. In diesen genannten entscheidenden Aspekten für die Auswahl des Konzeptes erfüllt die industrielle Variante die Anforderungen deutlich besser als die Datenlogger-Variante. Um nähere Informationen über diese Gegenüberstellung zu erhalten, wird an dieser Stelle nochmals auf das Kapitel 5.3 verwiesen.

6.1.2 Erreichter Mehrwert

Basierend auf den Erkenntnissen der gesamten wissenschaftlichen Arbeit bietet dieser Abschnitt einen vertieften Einblick in den erreichten Mehrwert des ausgewählten Konzeptes.
Quantitativ betrachtet bringt die gewählte industrielle Variante, insbesondere die Verwendung der Leistungsmessgeräte von Siemens entscheidende Vorteile für die Anlage im PTZ. Die Abtastrate bietet eine ausreichend umfängliche Erfassung des Energieverbrauchs auf verschiedenen Ebenen der Produktionsanlage. Dies bietet die Grundlage für eine objektive Bewertung der technischen Performance.
Qualitativ betrachtet zeigt sich die Systemkompatibilität der industriellen Variante als entscheidender Vorteil, wie bereits in Kapitel 6.1.1 erläutert. Die nahtlose Integration mit den bereits vorhandenen Steuerungskomponenten, welche größtenteils auch von Siemens sind, ermöglicht eine effiziente Anwendung und Skalierbarkeit. Zusätzlich ist die Flexibilität und die Anpassungsfähigkeit an Optimierungen und Umbauten, die in dynamischen Umgebungen wie dem PTZ auftreten können, deutlich hervorzuheben. Diese Aspekte werden besonders durch den gewährten 50 % Rabatt von Siemens für die ausgewählten SENTRON Pac 3220 unterstützt, was nicht nur einen finanziellen Vorteil mit sich bringt, dadurch sind zusätzlich präzisere Messungen durch mehr eingebaute Messgeräte möglich.
Die praxisorientierte Anwendung der industriellen Variante zeigt weitere Vorteile. Die einfache Handhabung und Benutzerfreundlichkeit der SENTRON Pac 3220-Messgeräte erleichtern den Einsatz in der Produktionsanlage. Die Bereitschaft und die gewonnenen Erkenntnisse werden durch die hohe Integration in den laufenden Betrieb positiv beeinflusst.
Zusammenfassend trägt die industrielle Variante entscheidend zum Mehrwert der Produktionsanlage bei, insbesondere durch ihre technische Leistungsfähigkeit, Systemkompatibilität und praxisorientierte Anwendung. Die finanziellen Anreize von Siemens und die klare Unterstützung durch den Hersteller bei der Auswahl der Messgeräte spielten dabei zusätzlich eine entscheidende Rolle.

6.2 Ausblick

Der Ausblick auf zukünftige Entwicklungen im Kontext des Energiemonitorings für die Produktionsanlage im PTZ eröffnet vielversprechende Perspektiven im Hinblick auf technologische Innovationen und nachhaltige Optimierungspotenziale. Im folgenden Bearbeitungsprozess des Energiemonitoring-Systems steht an vorderster Stelle die Integration der Leistungsmesstechnik in die Produktionsanlage. Dieser Prozess erfordert eine präzise Integration in den angeknüpften Schaltschrank, um eine reibungslose Funktionalität und Datenerfassung zu gewährleisten.

Die darauffolgende Phase umfasst die Durchführung der ersten Messungen. Hierbei werden die Leistungsprofile auf Anlagenebene, Stationsebene und Maschinenebene erfasst, um einen detaillierten Einblick in den aktuellen Energieverbrauch der Produktionsanlage zu erhalten. Im Anschluss erfolgt eine eingehende Bewertung der nachhaltigen Versorgung der Anlage. Durch die Analyse der gemessenen Leistungsprofile in Kombination mit den Daten der Photovoltaikanlage wird untersucht, inwiefern eine nachhaltige Energieversorgung realisierbar ist. Dieser Schritt ermöglicht die Identifikation von Optimierungspotenzialen und gegebenenfalls notwendigen Anpassungen.

Der Ausblick schließt mit Überlegungen zur Erweiterung und Verbesserung des Energiemonitoring-Systems ab. Dies könnte die Integration anderer, zusätzlicher Sensorik oder Anpassungen an der Systemarchitektur beinhalten. Dieses kontinuierliche Optimierungspotenzial gewährleistet langfristige Effektivität und trägt zur anhaltenden Energieeffizienz in der Produktionsanlage im PTZ bei.

Literaturverzeichnis

[1] M. Haerder, „Wir stehen vor einer Weichenstellung," WirtschaftsWoche, 3 November 2023. [Online]. Available: https://www.wiwo.de/politik/deutschland/industriestrompreis-wir-stehen-vor-einer-weichenstellung/29479334.html. [Zugriff am 4 November 2023].

[2] T. Schauenberg, „EU beschließt Zoll auf CO2 - eine Revolution für das Klima?," Deutsche Welle, 13 Dezember 2022. [Online]. Available: https://www.dw.com/de/co2-steuer-eu-importe-klimaschutz-europa-cbam-eu-parlament/a-59918233. [Zugriff am 2023 November 4].

[3] IEA Data Services, „Electricity consumption, World 1990-2021," International Energy Agency, o.D. [Online]. Available: https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-statistics-data-browser?country=WORLD&fuel=Energy%20consumption&indicator=TotElecCons. [Zugriff am 4 November 2023].

[4] M. Helfert und P. Schraml, „LEITFADEN: MONITORING VON ENERGIEEFFIZIENZMAßNAHMEN," ETA-Solutions GmbH, Technischen Universität Darmstadt, Darmstadt, o.D.

[5] F. Bulander und T. Dietmüller, „Die Zukunftsfabrik Bodensee setzt auf smarte Produktion," DHBW Ravensburg, 3 Juli 2023. [Online]. Available: https://www.ravensburg.dhbw.de/dhbw-ravensburg/aktuelles/detail/2023/7/die-zukunftsfabrik-bodensee-setzt-auf-smarte-produktion. [Zugriff am 4 November 2023].

[6] M. Gerstner et al., „Condition Monitoring eines Transfersystems," Studienarbeit, Friedrichshafen, 2023.

[7] D. Küpper et al., „The Green Factory of the Future," Boston Consulting Group, o.O., 2020.

[8] V. Wesselak und S. Voswinckel, Photovoltaik – Wie Sonne zu Strom wird, Berlin: Springer Vieweg, 2012.

[9] C. B. Liebl, „Systematische Energiedatenerfassung in der Produktion," Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München, München, 2019.

[10] Robert Fromm, „Robert Fromm," Privacy Statement, o.D. [Online]. Available: http://robert-fromm.info/teaching/vl_et_mtb/kap07_wechsel/#:~:text=Als%20Wechselgr%C3%B6%C3%9Fen%20werden%20in%20der,hat%2C%20der%20eine%20Gr%C3%B6%C3%9Fe%20abbildet.. [Zugriff am 28 Dezember 2023].

[11] StudySmarter, „StudySmarter,“ StudySmarter, o.D. [Online]. Available: https://www.studysmarter.de/studium/ingenieurwissenschaften/elektrotechnik/wechselstromtechnik/. [Zugriff am 28 Dezember 23].

[12] Technik Garage, „Wechselgrößen,“ Technik Garage, o.D. [Online]. Available: https://technik-garage.de/wechselgroessen/wechselgroessen-grundbegriffe/. [Zugriff am 28 Dezember 2023].

[13] A. Führer, K. Heidemann und W. Nereter, Grundgebiete der Eelktrotechnik Band 2, München, Wien: Hanser Verlag, 2022.

[14] Physik für alle, „Physik für alle,“ o.D. [Online]. Available: https://www.cosmos-indirekt.de/Physik-Schule/Phasenverschiebung?utm_content=cmp-true. [Zugriff am 28 Dezember 2023].

[15] Wikipedia, „Wikipedia, Phasenverschiebung,“ Wikipedia, 20 November 2023. [Online]. Available: https://de.wikipedia.org/wiki/Phasenverschiebung. [Zugriff am 28 Dezember 2023].

[16] LeifiPhysik, „Zeigerdiagramme der Wechselstromtechnik,“ LeifiPhysik, o.D. [Online]. Available: https://www.leifiphysik.de/elektrizitaetslehre/wechselstromtechnik/grundwissen/zeigerdiagramme-der-wechselstromtechnik. [Zugriff am 28 Dezember 2023].

[17] DEWESoft, „Leistungsanalyse,“ DEWESoft, o.D. [Online]. Available: https://dewesoft.com/de/blog/was-ist-leistungsanalyse. [Zugriff am 28 Dezember 2023].

[18] Forschungsstiftung Strom und Mobilkommunikation c/o ETH Zürich, „Verknüpfung von elektrischen und magnetischen Feldern,“ Forschungsstiftung Strom und Mobilkommunikation c/o ETH Zürich, o.D. [Online]. Available: https://www.emf.ethz.ch/de/emf-info/themen/physik/verknuepfung-von-elektrischen-und-magnetischen-feldern/wirkleistung-blindleistung-scheinleistung. [Zugriff am 28 Dezember 2023].

[19] R. Paschotta, „RP-Energie-Lexikon,“ Energie-Lexikon, o.D. [Online]. Available: https://www.energie-lexikon.info/blindleistungskompensation.html. [Zugriff am 29 Dezember 2023].

[20] Janitza, „Phasenverschiebung und Blindleistung,“ Janitza, o.D. [Online]. Available: https://www.janitza.de/service-support/phasenverschiebung-und-blindleistung.html#:~:text=Der%20Leistungsfaktor%20(Power%20Factor)%20ist,mit%20zunehmender%20Verzerrung%20der%20Stromkurve.. [Zugriff am 29 Dezember 2023].

[21] Studyfix, „Drehstrommotor,“ Studyfix, o.D. [Online]. Available: https://studyflix.de/elektrotechnik/drehstrommotor-1338. [Zugriff am 29 Dezember 2023].

[22] KSB SE & Co. KGaA, „Anlassverfahren," KSB SE & Co. KGaA, o.D. [Online]. Available: https://www.ksb.com/de-global/kreiselpumpenlexikon/artikel/anlassverfahren-1074938#:~:text=Beim%20Umschalten%20von%20Stern%20auf,wie%20Sanftanlasser%20oder%20Frequenzumrichter%20m%C3%B6glich.. [Zugriff am 29 Dezember 2023].

[23] KEM Automation, „Motorstart: Was beim Einsatz von Drehstrom-Asynchronmotoren zu beachten ist," KEM Automation, 01 Januar 2021. [Online]. Available: https://kem.industrie.de/elektromotoren/motorstart-was-beim-einsatz-von-drehstrom-asynchronmotoren-zu-beachten-ist/. [Zugriff am 29 Dezember 2023].

[24] R. Lerch , Elektrische Messtechnik, Erlangen: Springer Vieweg, 2016.

[25] R. Parthier, Messtechnik, Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn Verlag, 2008.

[26] U. Schlienz, Schaltnetzteile und ihre Peripherie, Reutlingen: Springer, 2019, pp. 409-413.

[27] DEWETRON GmbH, „WAS SIND ABTASTRATE, BANDBREITE UND ÜBERTRAGUNGSRATE?," DEWETRON BLOG NEWS, 30 Mai 2023. [Online]. Available: https://www.dewetron.com/de/2023/05/eine-einfuehrung-in-abtastrate-bandbreite-co/. [Zugriff am 27 Dezember 2023].

[28] W. Plaßmann, Signal- und Systemtheorie. In: Vieweg Handbuch Elektrotechnik, Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn Verlag , 2007.

[29] WACHENDORFF Prozesstechnik GmbH & Co. KG, „WACHENDORFF," WACHENDORFF, o.D. [Online]. Available: https://www.wachendorff-prozesstechnik.de/technologie/industrial-ethernet/modbus-tcp/. [Zugriff am 28 Dezember 2023].

[30] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., DIN EN ISO 50001, Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e. V, 2018.

[31] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., DIN EN ISO 50015, Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e. V, 2014.

[32] S. Niemuth-Engelmann, „WEKA," FutureCamp Climate GmbH, 28 November 21. [Online]. Available: https://www.weka.de/energie/die-normenfamilie-der-din-en-iso-50001/. [Zugriff am 03 Januar 2024].

[33] Kassenärtzliche Vereinigung Nordrhein, „PDCA-Zyklus," Kassenärtzliche Vereinigung Nordrhein, 16 Juni 2020. [Online]. Available: https://www.kvno.de/praxis/qualitaet/qm/pcda-zyklus. [Zugriff am 31 Dezember 2023].

[34] QM-Einfach, „PDCA-Zyklus," QM-Einfach, o.D. [Online]. Available: https://www.qm-einfach.de/pdca-zyklus-

energiemanagement/#:~:text=Die%20Struktur%20der%20ISO%2050001,%2DCheck%2DAct)%20identifizieren.. [Zugriff am 31 Dezember 2023].

[35] R. Mark, „Untersuchung und Konzeption der Einführung," Graz, 2014.

[36] Afnor Group, „Gut Cert," Afnor Group, 16 November 2016. [Online]. Available: https://www.gut-cert.de/news-reader/news-2016-11-messung-und-verifizierung-nach-iso-50015. [Zugriff am 31 Dezember 2023].

[37] W. Redaktion, „WEKA," 25 September 2017. [Online]. Available: https://www.weka.de/energie/energiemonitoring/. [Zugriff am 7 Januar 2024].

[38] Mittelstand-Digital, „Mobiles Energie-Monitoring-System für Maschinen und Anlagen," o.D. [Online]. Available: https://demonstratoren.gfe-net.de/demonstratoren/mobiles-energie-monitoring-system-fuer-maschinen-und-anlagen. [Zugriff am 29 Dezember 2023].

[39] P. S. Mark Helfert, „Monitoring von Energieeffizienzmaßnahmen," ETA Transfer, TU Darmstadt, Darmstadt, o.D.

[40] J. Neher, „Energiedatenerfassung und –auswertung sowie," Fraunhofer IPA, Stuttgart, 2011.

[41] S. Otte, *WERTSCHÖPFUNG MITTELS ENERGIEMONITORING AUFDECKEN,* GOSSEN METRAWATT, CAMILLE BAUER, 2020.

[42] VOREST AG, „VOREST AG," VOREST AG, o.D. [Online]. Available: https://www.vorest-ag.com/Energiemanagement-ISO-50001-Energieaudit-EN-16247/Wissen/Was-Sind-Energieleistungskennzahlen-Enpi-Und-Was-Ist-Die-Energetische-Ausgangsbasis. [Zugriff am 29 Dezember 2023].

[43] Umwelt Bundesamt, „Umwelt Bundesamt," o.D. [Online]. Available: https://www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/wirtschaft-umwelt/umwelt-energiemanagement/energiemanagementsysteme/iso-50005/element-5#undefined. [Zugriff am 29 Dezember 2023].

[44] K. Kolossa, „Handelsblatt," Sapera Studios GmbH, 2 Dezember 2022. [Online]. Available: https://www.handelsblatt.com/adv/firmen/visualisierung-von-daten.html. [Zugriff am 29 Dezember 2023].

[45] KBR Energy Management, „visual energy Dokumentation," KBR Energy Management, o.D. [Online]. Available: https://ve5.kbr.de/docu/de/SK_Diagram.html. [Zugriff am 30 Dezember 2023].

[46] J. Kohl, „Automatisierte Datenerfassung für diskret ereignisorrientierte Simulationen in der energieflexiblen Fabrik," Meisenbach Verlag, Erlangen, 2016.

[47] Steinhaus Informationssysteme GmbH, „steinhaus Informationssysteme," Steinhaus Informationssysteme, o.D. [Online]. Available: https://www.steinhaus-informationssysteme.de/produkte/tebis/. [Zugriff am 30 Dezember 2023].

[48] W. Schellong, Analyse und Optimierung von Energievebundsystemen, Köln: Springer Vieweg, 2016.

[49] WEKA Media GmbH & Co. KG, „Energiemanagement und Energieeffizienz," WEKA Media GmbH & Co. KG, o.D. [Online]. Available: https://www.energiemanagement-und-energieeffizienz.de/energie-lexikon/lastgang/. [Zugriff am 30 Dezember 2023].

[50] G. B. W. L. S. Kara, „Electricity Metering and Monitoring in Manufacturing Systems," in *Glocalized Solutions for Sustainability in Manufacturing*, Braunschweig, Springer, 2011, pp. 1-10.

[51] Deutsche Gesellschaft für EMV-Technologie e.V., „D EMV T," D EMV T, o.D. [Online]. Available: https://www.demvt.de/publish/viewfull.cfm?objectid=ba9bcfea%5Fe081%5F515d%5F740b176acfe63eb6. [Zugriff am 02 Januar 2024].

[52] Optenda, „Energiemonitoring im Unternehmen," Optenda, o.D. [Online]. Available: https://www.optenda.de/ablauf-energiemonitoring-projekt/. [Zugriff am 02 Januar 2024].

[53] Ledkia, „Was ist die elektrische Leistung," Ledkia, o.D. [Online]. Available: https://www.ledkia.com/blog/de/was-ist-elektrische-leistung-und-wie-wird-sie-berechnet/. [Zugriff am 02 Januar 2024].

[54] B. Favre-Bulle et al., „Zukunftstrends der Automatisierungstechnik," *e&i elektrotechnik und informationstechnik,* pp. 172-177, Mai 2006.

[55] Siemens, „Siemens Mall Industrie," Siemens, 1 Januar 2024. [Online]. Available: https://mall.industry.siemens.com/mall/de/de/Catalog/Product/7KM3220-1BA01-1EA0. [Zugriff am 7 Januar 2024].

[56] TML GmbH, „TML-shop," TML GmbH, 3 Januar 2022. [Online]. Available: https://www.tml-shop.de/blog/stromwandler-grundlagen. [Zugriff am 7 Januar 2024].

[57] RS-Components, „RS-online," RS-Components, o.D. [Online]. Available: https://de.rs-online.com/web/p/stromwandler/1718858. [Zugriff am 7 Januar 2024].

[58] Siemens, „mall industry siemens," Siemens, o.D. [Online]. Available: https://mall.industry.siemens.com/mall/de/b1/Catalog/Product/6GK5008-0BA10-1AB2. [Zugriff am 7 Januar 2024].

[59] Automation 24, „Automation 24," Novus, o.D. [Online]. Available: https://www.automation24.de/mehrkanal-datenlogger-novus-fieldlogger-8812130000. [Zugriff am 7 Januar 2024].

[60] LEM, „LEM,“ LEM, o.D. [Online]. Available: https://www.lem.com/en/product-list/ap-50-b10. [Zugriff am 7 Januar 2024].

[61] Ziehl, „Ziehl,“ Ziehl, o.D. [Online]. Available: https://www.ziehl.com/de/Messumformer/detail/MU2000K-110/. [Zugriff am 7 Januar 2024].