

**Intelligentes Energiemanagement im industriellen
Umfeld durch Auswertung relevanter Daten
zur vorausschauenden Regelung**

Masterarbeit

Fakultät für Ingenieurwissenschaften
Lehrstuhl für Energietechnik
Universität Duisburg-Essen
Campus Duisburg

Erstprüfer: Prof. Heinzl
Zweitprüfer: Dr. Jürgen Roes
Betreuer (Uni): Dipl. Ing. Othmar Verheyen
Betreuer (Unternehmen): Dipl. Ing. Michael Pauli

Autor: Alexander Kudrass
Matrikelnummer: 3049452
Studiengang: Wirtschaftsingenieurwesen, M. Sc.

Anmeldung: 07.05.2018
Abgabe: 27.09.2018

AUFGABENSTELLUNG

Masterarbeit

Intelligentes Energiemanagement im industriellen Umfeld durch Auswertung relevanter Daten zur vorausschauenden Regelung

Seit Einführung der DIN ISO 50001 sind Unternehmen verpflichtet, ein Energiemanagementsystem einzuführen. Absicht der Bundesregierung ist es, damit den Energieverbrauch in Deutschland zu senken. Um diese Entwicklung weiter zu forcieren, werden vom Förderprogramm „Energieeinsparzähler“ Unternehmen gefördert, welche Energieeinsparung messbar machen.

Die Masterarbeit erfolgt in Zusammenarbeit mit einem Energieberatungshaus in Köln, welches am Förderprogramm partizipiert. Auf Basis installierter, eigener Messgeräte und eigener Analysesoftware soll untersucht werden, wie sich die Geschäftstätigkeit über die Förderung hinaus weiterentwickeln lässt. Der Fokus soll dabei auf der Entwicklung einer vorausschauenden Regelung von Maschinen und Anlagen liegen, indem eine Brücke zu Produktionsplanungsdaten geschlagen wird. Ziel ist es, bislang unbeachtete Einsparpotenziale aufzudecken.

Drei Kunden des Beratungshauses, mittelständische Unternehmen aus Produktion und Dienstleistung, haben sich bereit erklärt, Daten aus ihrem PPS/ERP* System für eine Auswertung zur Verfügung zu stellen. Mit den vorhandenen Daten sollen die Potenziale einer vorausschauenden Regelung zur Energieeinsparung, aber auch weitergehende Optimierungen geprüft werden.

Eine überschlägige Rechnung beim ersten und kleinsten Unternehmen zeigte bereits, dass sich das Einsparpotenzial allein durch vorausschauende Regelung auf über 5 % des Gesamtenergiebedarfs beläuft. Diese Erkenntnis soll an den beiden anderen Unternehmen validiert werden.

Die Arbeit ist unter Berücksichtigung der einschlägigen Normen sowie unter Beachtung der Hinweise der Mitarbeiter des Lehrstuhls für Energietechnik bezüglich der Bearbeitung von Bachelor- und Masterarbeiten anzufertigen.

** PPS Produktionsplanungs- und Steuerungssystem, ERP-Systeme umfassen zusätzlich die Planung personeller und finanzieller Ressourcen*

Versicherung an Eides Statt

Ich, Alexander Kudrass, Waldeckerstraße 42, 51065 Köln, Matrikelnummer 3049452 versichere an Eides Statt durch meine Unterschrift, dass ich die vorstehende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe angefertigt und alle Stellen, die ich wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten oder nicht veröffentlichten Schriften entnommen habe, als solche kenntlich gemacht habe und mich auch keiner anderen als der angegebenen Quellen oder sonstiger Hilfsmittel bedient habe.

Ich versichere an Eides Statt, dass ich die vorgenannten Angaben nach bestem Wissen und Gewissen gemacht habe und dass die Angaben der Wahrheit entsprechen und ich nichts verschwiegen habe.

Mir ist bekannt, dass

- Zuwiderhandlungen angezeigt werden,
- in einem solchen Falle die vorgelegte Arbeit mit 5,0 bewertet wird und
- ich von der Teilnahme an weiteren Prüfungen an der Fakultät für Ingenieurwissenschaften ausgeschlossen oder exmatrikuliert werden kann,
- § 63 Abs. 5 des Hochschulgesetzes NRW eine Geldbuße von bis zu 50.000 € zur Abschöpfung ökonomischer Vorteile durch das Plagiat vorsieht.

Auch ist mir die Strafbarkeit einer falschen eidesstattlichen Versicherung bekannt, namentlich die Strafandrohung gemäß § 156 StGB von bis zu drei Jahren Freiheitsstrafe oder Geldstrafe bei vorsätzlicher Begehung der Tat bzw. gemäß § 163 Abs. 1 StGB bis zu einem Jahr Freiheitsstrafe oder Geldstrafe bei fahrlässiger Begehung.

Duisburg, den _____
(Datum)

(Unterschrift des/der Studierenden)

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	IV
Abkürzungsverzeichnis.....	VI
Abbildungsverzeichnis.....	VII
Tabellenverzeichnis.....	VIII
1 Einleitung.....	1
2 Grundlagen.....	3
2.1 Das Beratungshaus.....	3
2.2 Technische und wirtschaftliche Ausgangslage	3
2.3 Förderprogramm Einsparzähler.....	4
2.4 Messtechnik	5
2.5 Abgrenzung von Lastmanagement und Energiemanagement	6
2.6 DSM und DSRM.....	7
2.7 Vorausschauende Regelung	9
2.8 Weitere Literatur.....	9
3 Konzept der vorausschauenden Regelung	11
3.1 Technische Umsetzung.....	11
3.2 Datensicherheit und -qualität.....	12
3.3 Wirtschaftlichkeit	14
3.3.1 Lastprognose	14
3.3.2 Flexibilität	14
3.3.3 Vorausschauende Regelung	15
3.3.4 Condition Monitoring	15
3.4 Messkonzept und Auswertungsmethode.....	16
4 Unternehmensdarstellung.....	18
4.1 Das Unternehmen MRS	18
4.2 Produktionsablauf und -planung.....	18
4.3 Messstellen	19
4.4 Referenzmessung	20
4.5 Analyse	20
4.5.1 Unternehmensdaten.....	20
4.5.2 Lastdaten	21
4.5.3 Abgleich zwischen Produktions- und Lastdaten.....	24
4.6 Auswertung	25

4.6.1	Allgemeines	25
4.6.2	Messstelle Große Presse und Kran Große Presse	27
4.6.3	Messstelle UV neue Halle	30
4.7	Zusammenfassung	32
5	Umsetzung der vorausschauenden Regelung an der bestehenden großen Presse	36
5.1	Elektrotechnische Anbindung	36
5.2	Physikalische Grenzen	37
5.3	Entwicklung des mathematischen Modells	40
5.3.1	Übersicht	40
5.3.2	Heizen	42
5.3.3	Betrieb und Standby	42
5.3.4	Kühlung	43
5.3.5	Wärmeverluste	43
5.3.6	Kombinationen	44
5.4	Umsetzung in der Simulation	44
5.5	Interface	45
5.6	Lastprognose	46
5.7	Optionen für die Regelung	48
5.7.1	Übersicht	48
5.7.2	Diskussion Option 1	50
5.7.3	Diskussion Option 2 und 3	52
5.8	Programmablauf	57
5.9	Wirtschaftliche Bedeutung	61
5.10	Optimierungspotential	61
6	Fazit	63
7	Literatur	66
8	Anhang	68

Abkürzungsverzeichnis

<i>BAFA</i>	<i>Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle</i>
<i>BDE</i>	Betriebsdatenerfassung
<i>ERP</i>	Enterprise Ressource Planing
<i>EnMS</i>	Energiemanagementsystem
<i>EVU</i>	Energieversorgungsunternehmen
<i>PPS</i>	Produktionsplanungssystem
<i>KMU</i>	Kleine und mittelständische Unternehmen
<i>DSM</i>	Demand-Side-Management
<i>DSRM</i>	Demand-Side-Response-Management
<i>VPN</i>	Virtual Private Network, virtuelles Netzwerk innerhalb dessen Daten verschlüsselt durch ein anderes Netz übertragen werden können
<i>OPC</i>	Open Platform Communications, Schnittstelle zur Datenübertragung
<i>SPS</i>	Speicherprogrammierbare Steuerung

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1: mE 180 Messcontroller.....	5
Abb. 2.2: Demand-Side-Management	7
Abb. 3.1: Technische Systembeschreibung mit Regelkreis	11
Abb. 3.2: Prinzip der Datenübertragung	13
Abb. 4.1: Betriebsablauf MRS ab Oktober 2018	19
Abb. 4.2: Messstellen der MRS, Stand September 2017	19
Abb. 4.3: Lastverlauf an der Netzentnahmestelle in der Referenzwoche	21
Abb. 4.4: Überlagerung der Tages-Lastgangs an der Netzentnahmestelle	22
Abb. 4.5: Aufteilung des Energieverbrauchs der MRS	22
Abb. 4.6: Lastgang der Messstelle UV neue Halle.....	23
Abb. 4.7: Lastgang der Messstelle Große Presse.....	24
Abb. 4.8: Abgleich der Wertschöpfungszeiten	27
Abb. 4.9: Cashflow aus dem Projekt MRS	33
Abb. 5.1: Verschaltung der vorhandenen Siemens SPS mit neuer mE SPS.....	36
Abb. 5.2: Viskosität zweier ähnlicher Öle für Hydraulikanlagen (vgl.[Fuc18], [Fuc16])	38
Abb. 5.3: Lebenserwartung eines Öls in Abhängigkeit von der Temperatur	39
Abb. 5.4: Komponenten der großen Presse.....	41
Abb. 5.5: Simulierter Temperaturverlauf über die Referenzwoche mit und ohne Heizung.....	45
Abb. 5.6: MS Outlook als vorläufiges Planungstool	46
Abb. 5.7: Simulation bei durchschnittlicher Last und im Vergleich bei realen Schwankungen...	47
Abb. 5.8: Temperaturverlauf über langes Wochenende.....	48
Abb. 5.9: Integral zwischen Außentemperatur und Öltemperatur.....	53
Abb. 5.10: Energieverbrauch für versch. Parameter um die Zeit der Außentemperaturmaxima	55
Abb. 5.11: Temperaturverlauf für Außentemperaturmaximum	56
Abb. 5.12: Grundsätzlicher Programmablauf	58
Abb. 5.13: Ablauf der Simulation	59
Abb. 8.1: Auftragsdaten der Großen Presse für KW 34, 2017	68
Abb. 8.2: Last an Netzentnahme in KW 34, 2017	69
Abb. 8.3: Last und Aufträge der Große Presse und Kran Große Presse in KW 34, 2017.....	71
Abb. 8.4: Last an großer Presse, einzelne Tage übereinander, in KW 34, 2017	72
Abb. 8.5: Last an Dosenpresse mit Arbeitszeiten in KW 34, 2017	73
Abb. 8.6: Last an Messstelle UV neue Halle in KW 34, 2017.....	75
Abb. 8.7: Errechneter Rest in KW34, 2017	77

Tabellenverzeichnis

Tab. 3.1: Prognoseabweichungen zwischen Erzeugung und Verbrauch (vgl. [tra18]).....	14
Tab. 4.1: Abweichung der Hochrechnung vom abgerechneten Wert	25
Tab. 4.2: Abgleich der Arbeitszeiten aus BDE-System und Energiedatenerfassung.....	26
Tab. 4.3: Vergleich der Heizzyklen	27
Tab. 4.4: Ersparnis durch Reduktion der Heizzyklen	28
Tab. 4.5: Mögliche Ersparnis bei Nutzung von Stillstandzeiten.....	30
Tab. 4.6: Jährliche Kosten bei Fehlfunktion der Absauganlage	30
Tab. 4.7: Optimierte Absauganlage	31
Tab. 4.8: Einsparpotenziale der MRS zusammengefasst	32
Tab. 5.1: Kombinationsmöglichkeiten beim Betrieb der Anlage	44
Tab. 5.2: Lastdurchschnitt bei Betrieb	47
Tab. 5.3: Energetischer Vergleich der Maßnahmen.....	50
Tab. 5.4: Vergleich der Lebensdauern zweier Öle bei 53 °C und 68 °C.....	51
Tab. 5.5: Faktoren für die Kostenermittlung	52

1 Einleitung

Mit steigenden Energiepreisen, der gesetzlichen Verpflichtung zur Energieeinsparung und zunehmenden Umweltschutzauflagen rücken kleine und mittlere Unternehmen des industriellen Sektors zunehmend in den Fokus energetischer Ziele der Bundesregierung. Es steigt der Druck auf die Unternehmen und man befürchtet wettbewerbliche Nachteile durch höhere Kosten. Eine entsprechende Energieeinsparung würde den Kosten entgegenwirken, kann aber nur mit dem nötigen Wissen effektiv umgesetzt werden welches intern nicht immer vorhanden ist. Daher werden oftmals externe Energieberater eingesetzt um den gesetzlichen Bestimmungen Sorge zu tragen.

Das Beratungshaus manageE vereint Kompetenzen in der Energieberatung mit Automatisierungs- und Prozessoptimierungsexpertise. Ihre Eigenentwicklung eines Verbrauchsmessgerätes und einer Energiemanagementsoftware stellt den zentralen Punkt der vorliegenden Arbeit dar. Über die Messung hinaus soll mit dem System der Eingriff auf Anlagensteuerungen ermöglicht werden, um diese extern und automatisiert mit einer vorausschauenden Regelung zu optimieren. Man erhofft sich dadurch weitere Einsparpotenziale und dringt in den Bereich der Vernetzung von Systemen vor. Das Konzept fällt damit unter den Begriff des IIOT, des industrial internet of things, als Teil der Industrie 4.0.

Eine externe Anlagensteuerung wurde bereits in den 1980er Jahren unter anderem unter dem Begriff des Demand-Side-Response-Management bekannt. Es baut auf dem klassischen Lastmanagement auf, also einer Lastverschiebung, welche Spitzenlasten vermeidet und damit Kosten auf der Verbraucherseite verringert. In dieser Arbeit soll ein EnMS um die Daten aus einem PPS/ERP-System erweitert werden, um nicht nur Lasten zu glätten, sondern tatsächlich Energie einzusparen. Eine praktische Anwendung des Konzepts mit Wetterdaten an einer Eislaufbahn in Liechtenstein zeigt, dass die Kombination aus Energiemessung und einer vorausschauenden Regelung bislang ungenutzte Einsparpotenziale aufdeckt und sich somit für einen Vorsprung im Bereich der Energieberatung eignet. (vgl. [Wie16])

Aktuell wird die Erarbeitung des Konzepts durch das Förderungsprogramm „Energieeinsparzähler“ der BAFA unterstützt. Die BAFA fördert Unternehmen, „die bei Dritten (Kunden) Energieeinsparungen bewirken“ [BAF1]. Das Beratungshaus konnte als eines von wenigen Unternehmen eine Zulassung zum Förderprogramm erreichen. In der vorliegenden Thesis sollen auf Basis des bestehenden Geschäftsmodells, also mit der Förderung durch die BAFA, die folgenden Fragestellungen geklärt werden

- ob das bestehende Messsystem des Beratungshauses erfolgreich um die aktive Aufgabe der Regelung erweitert werden kann
- bei welchen Anlagen oder Anlagentypen mit den gegebenen Daten aus Umwelt und Planung eine intelligente Fahrweise ermöglicht wird und
- Eine Abschätzung der Wirtschaftlichkeit soll zeigen, ob das Konzept für das Beratungshaus und seine Kunden einen Anreiz darstellt.

Dazu sollen zuerst die technischen Voraussetzungen untersucht werden und welche Änderungen am bestehenden System nötig sind. Der Hauptteil der Arbeit liegt in der Analyse des Unternehmens, seiner Last- und Auftragsdaten und seiner Struktur, um geeignete Anlagen zu

identifizieren und ihr Potenzial abzuschätzen. Dabei sollen sowohl energetische, als auch wirtschaftliche Aspekte betrachtet werden. Im Anschluss wird anhand einer geeigneten Anlage die Umsetzung einer vorausschauenden Regelung konkretisiert, indem ein mathematisches Modell zur Beschreibung des Maschinenzustandes erstellt wird. Es ergeben sich Handlungsoptionen, welche diskutiert und informationstechnisch zur Entscheidungsfindung herangezogen werden. Die Entscheidungsfindung wird anhand eines Programmablaufplanes erläutert. Es wird außerdem dargestellt, wie eine Anbindung zwischen zusätzlicher und vorhandener Steuerung ausgestaltet werden kann. Zum Abschluss werden die Ergebnisse kritisch zusammengefasst.

Bei den Ausführungen kann nicht im Einzelnen auf informationstechnische Details eingegangen werden und auch regelungstechnische Aspekte werden sich auf einige praktische Ausführungen beschränken. Der Fokus dieser Arbeit soll auf der Machbarkeit und der wirtschaftlichen Sinnhaftigkeit im betrieblichen Kontext liegen.

2 Grundlagen

2.1 Das Beratungshaus

Die manageE GmbH & Co. KG ist ein im Jahr 2013 gegründeter IT- und Automatisierungsdienstleister, welcher seine Kompetenzen im Bereich des Energiemanagements und der Entwicklung von Energiemanagementsoftware konzentriert. Das junge Unternehmen bearbeitet Aufträge aus verschiedenen Bereichen der Informations- und Elektrotechnik. Mit Sonderlösungen für gewerbliche und auch städtische Kunden kann sich das Unternehmen im Bereich der Optimierung von IT-Strukturen, der Anbindung von ERP-Systemen und mit Automatisierungslösungen profilieren. Darüber hinaus ist das Unternehmen bei der Bundesstelle für Energieeffizienz gelisteter Anbieter von Energiedienstleistungen.

Das Herzstück des Unternehmens ist die Eigenentwicklung eines mehrphasigen Strom- und Spannungsmessgerätes mE180, welcher sich durch eine sehr kompakte Bauform und die Bereitstellung einer eigenen Website auszeichnet. Die Messdaten können auch ohne separate Analysesoftware und vor allem über vorhandene Netzwerk-Infrastruktur ausgewertet werden. Ein Verlegen eines proprietären Bussystems, wie etwa beim M-Bus, ist nicht nötig. Für weitergehende Analysen und die gleichzeitige Auswertung mehrerer Zähler bietet das Unternehmen ein Cloud-basiertes EnMS an.

Um auch in Zukunft konkurrenzfähig zu bleiben, soll das EnMS um die Komponenten Lastprognose und Lastregelung erweitert werden. Um eine Regelung umsetzen zu können, soll das bestehende Messnetz um aktive Regelelemente in Form eines Eingriffs in die Maschinensteuerung erweitert werden. Außerdem muss ein Zugriff auf das unternehmenseigene Produktionsplanungssystem ermöglicht werden. Ziel soll eine automatisiert ablaufende Datenauswertung und daraus hervorgehend eine Sollwertbeeinflussung sein.

2.2 Technische und wirtschaftliche Ausgangslage

Um die Energiewende zu meistern spielt die Nutzung von Flexibilitätspotenzialen eine ebenso entscheidende Rolle, wie die Reduktion des Energieverbrauchs selbst. Die bislang gängige Lösung für eine Nutzung vorhandener Flexibilität bei Kleinkraftwerken oder großen Anlagen liegt im Pooling, dem gemeinschaftlichen Anbieten von Sekundär und Minutenreserve in Form eines virtuellen Kraftwerkes.¹ Die angebundenen Anlagen wie BHKW, Kühlhäuser, Biogasanlage, etc. haben Leistungen deutlich über ca. 100 kW. Für Kleinanlagen, Industriegebäude oder Produktionsmaschinen gibt es bislang keine geeigneten Anbindungsmöglichkeiten, obwohl nach Moog „50% des gesamten industriellen Potenzials für Demand-Side-Management [...] bei Technologien der Produktionsinfrastruktur verortet“ [Moo17] sind.

Allerdings haben die Anlagen einer Produktion für ein Regelernergieangebot zu geringe Einzelleistungen, zu lange Reaktionszeiten, erfüllen nicht die Mindest-Bereitschaftszeiten und vor allem werden sie nicht ausschließlich zur Regelleistungsbereitstellung genutzt, sondern erfüllen vorrangig ihre Aufgabe in der Fertigung. Für diese Anlagen kommt daher nur die Reduktion des Regelleistungsbedarfes in Frage, statt selbst Regelleistung bereit zu stellen. (vgl. [Kam12b]) Allerdings fehlt es bislang an einer Tarifstruktur für dieses Potenzial. Daher wird es wohl ohne

¹ Vgl. das Geschäftsmodell z.B. von Next Kraftwerke GmbH, RheinEnergie AG, etc.

eine deutliche Modernisierung der Tarifmodelle und günstigere Regelungstechnik in nächster Zukunft kaum gehoben.

In der Roadmap Demand Side Management der dena werden konkrete Vorschläge zur technischen Umsetzung gegeben, wie eine Anpassung des Marktes und der technischen Voraussetzungen aussehen kann. Jedoch wird auch klar, dass derart umfängliche Änderungen an die neuen Gegebenheiten noch einige Jahre in Anspruch nehmen werden, wenn nicht sogar über den Atomausstieg 2020 hinaus zu diskutieren sind. (vgl. [Sei16])

Zum Heben von Einsparpotenzialen sind konventionelle Ansätze inzwischen nur noch bedingt geeignet, da mit der Einführung des Energiedienstleistungsgesetzes im April 2015 Unternehmen verpflichtet sind, je nach Größe ein Energieaudit nach DIN EN 16247 durchzuführen oder ein Energiemanagementsystem nach DIN EN ISO 50001 einzuführen. Die sogenannten „low hanging fruits“ wurden daraufhin von internen wie externen Beauftragten abgearbeitet. Selten wird darüber hinaus die vorhandene Datengrundlage genutzt oder ausgebaut, um langfristige Energieeinsparungen zu generieren. Die nötigen Investitionen in Messtechnik und Optimierung sind aktuell nicht mit den niedrigen Energiepreisen und der guten Konjunktur vereinbar. Maßnahmen mit Amortisationszeiten von mehr als zwei Jahren werden kaum in Betracht gezogen und ein Eingriff in den Fertigungsprozess wird konsequent abgelehnt. Somit beschränken sich aktuelle Möglichkeiten zur Verbrauchsreduktion auf Peripherieprozesse und vor allem solche Maßnahmen, die dem wirtschaftlich getriebenen Unternehmen den größten Nutzen bringen. Oftmals sind die Unternehmer aber sogar trotz nachgewiesener Wirtschaftlichkeit zögerlich. (vgl. [Win14])

Unter diesen schwierigen Randbedingungen fokussiert sich das Beratungshaus vorerst auf die Möglichkeit Energie einzusparen, da dies im oben vorgestellten Pilotprogramm Einsparzähler staatlich gefördert wird und den Einstieg in die Unternehmen erleichtert. Der Weg zum Nachweis von Einsparungen verläuft über die Integration von Prozessdaten in die energetische Analyse. Hieraus gewonnen Erkenntnisse sollen für weitere Angebote genutzt werden.

2.3 Förderprogramm Einsparzähler

Das Pilotprogramm Einsparzähler des BAFA fördert seit dem 21. Mai 2016 Unternehmen, welche nachweislich „unter Zuhilfenahme von Einsparzählern und Mehrwertdiensten Energieeinsparungen bei einem [...] Endkunden initiiert und diese Energieeinsparungen [...] misst und quantifiziert“ [BAF2]. Kann eine Energieeinsparung zweifelsfrei vorgelegt werden, wird die eingesparte Energiemenge dem Antragssteller mit mindestens 15 Cent/kWh vergütet. Darüber hinaus gibt es Zuschläge jeweils in Höhe von 2 Cent/kWh für folgende Zusatzoptionen:

- „Smart Meter Gateway“, wenn das geförderte System ein Smart Meter Gateway als Kommunikationsschnittstelle beinhaltet und dieses eine Zertifizierung durch das Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik erfährt
- „Lastmanagement-ready“, wenn die Möglichkeit besteht, strombetriebene Geräte oder Anlagen stromnetzdienlich steuern zu können
- „Mehrwertdienste / Open Source“, wenn alle oder wesentliche Teile von Verbrauchsdaten, Einsparungen etc. veröffentlicht werden, oder der Quellcode des Projektes als Open Source bereitgestellt wird.

Von der gesamten Fördermenge pro Unternehmen von einer 1 Mio. € können 500.000 € auf Basis zuwendungsfähiger Kosten als Projektkostenunterstützung ausgezahlt werden. Zuwendungsfähig sind jeweils bis zu 50 % der Gesamtprojektkosten. Die andere Hälfte der Fördermenge kann auf Basis nachgewiesener Einsparungen gemäß dem oben genannten Vergütungsmodell bis zu einer Laufzeit von maximal fünf Jahren ausgezahlt werden. Hinzu kommen bis zu 200.000 € Förderung für Marketing und Personal mit einer Förderquote von 80 %. (vgl. [BAF2])

Das Beratungshaus plant, mit einem modifizierten EnMS die Energieeinsparung nachzuweisen, indem ein durchschnittlicher Lastgang der Vergangenheit mit dem Lastverlauf nach einer Optimierung verglichen wird. Die eingesparte Energiemenge kann als Differenz zwischen den Kurven berechnet und damit nachgewiesen werden. Für die Zeit nach dem Förderprogramm soll die vorliegende Thesis das Potenzial eines neuen Geschäftsmodells überprüfen.

2.4 Messtechnik

Für die Analyse von Stromverbräuchen ist eine umfangreiche Datengrundlage und damit eine hohe Anzahl an Messstellen unerlässlich, da nur mit ihr eine allgemeine Transparenz des Unternehmens erzeugt werden kann. Marktübliche Energiemesstechnik erfordert eigene Schaltschränke in den Strom-Unterverteilungen der Unternehmen, von wo aus die Maschinen versorgt werden. Auf Grund des Alters vieler Unternehmen und deren Stromverteilungen ist dort kaum Platz, was eine nachträgliche Installation kompliziert macht. Die Technik des Beratungshauses erfordert keine zusätzlichen Schaltschränke, sondern kommt mit dem vorhandenen Bauraum in bestehenden Verteilungen aus.

Durch die zentrale Installation innerhalb der Unterverteilung ist man in der Lage viele Messstellen parallel aufzunehmen. Die Messstellen sind Klapp-Wandler, welche um die Adern der Maschinenzuleitung gelegt werden und mit der Sekundärseite an den Controller angeschlossen werden. Ein Messkabel verbindet sie mit dem Controller. Der Controller verarbeitet und sammelt die Daten. Der mE180, gezeigt in Abb. 2.1, ist ein Messcontroller, der eine dreiphasige Spannungsmessung ermöglicht und gleichzeitig auf 18 Kanälen Ströme messen kann. Falls in der Unterverteilung kein Platz vorhanden ist, die Installation nicht sicher durchzuführen ist oder ein Zugang zu den Messgeräten auch von elektrotechnischen Laien gewährleistet sein soll, kann die Installation auch teilweise außerhalb der Schaltschränke erfolgen.

Abb. 2.1: mE 180 Messcontroller



An den Eingängen des Controllers können pro Kanal bis zu 1 Ampere verarbeitet werden. Die Wandler werden entsprechend ausgelegt. Mittels Klappwandlern muss für die Installation die zu messende Leitung nicht getrennt werden. Die Zuordnung von Eingangskanal, Anlage und Wandlerverhältnis kann im Nachgang erfolgen. Die Installation erfolgt durch die Mitarbeiter des Beratungshauses, wodurch Konzeptionierung, Projektierung, Lieferung, Einbau, Wartung und Energiemanagement aus einer Hand erfolgen kann. Der Controller stellt über eine Netzwerkschnittstelle eine Visualisierung der Messdaten bereit. Die Verbindung zur zentralen, externen Datenbank wird über eine VPN-Verbindung hergestellt. Da die Energiewerte sekundlich berechnet und an die Datenbank übertragen werden, stehen eine große Menge Daten in hoher Auflösung für eine Auswertung zur Verfügung. Vorhandene IT-Infrastruktur kann für die Übertragung genutzt werden.

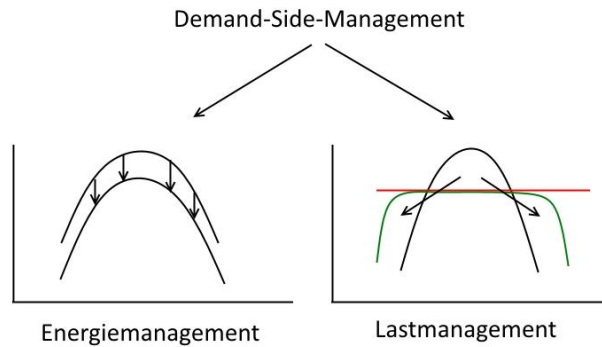
Die Auswahl der relevanten Messstellen in der Elektro-Unterverteilung richtet sich nach der Struktur des Unternehmens. Die Einrichtung beginnt bei der Netzentnahmestelle, also dem Anschlusspunkt des Netzbetreibers. Von dort aus setzt sich die Verteilung üblicherweise in einer Baumstruktur bis zu den Einzelverbrauchern fort. Von der *Netzentnahme* ausgehend werden die Abgänge zu den Unterverteilungen aufgenommen und dort die Maschinen, Stromschienen, Beleuchtung und weitere Kleinverbraucher gemessen. Je nach Anzahl erforderlicher Messstellen werden innerhalb der Verteilungen mehrere Controller installiert. Um die Installation wirtschaftlich zu gestalten, fokussiert man sich bei der Messung auf die Großverbraucher, welche üblicherweise dreiphasig versorgt werden. Der Abgriff von Stromschienen mit einer Vielzahl von angeschlossenen Maschinen ist unproblematisch, da jede Maschine ihre eigene Lastcharakteristik aufweist und sich daher unter einer geringen Anzahl Maschinen identifizieren lässt.

In der Energiemanagementsoftware mE2020 besteht die Möglichkeit Analysen anzufertigen. Das System enthält neben einer Messstellenverwaltung auch eine Dokumentation, eine Echtzeitdarstellung des Energieflusses, ermöglicht den Export der Daten und es lässt sich um Daten der Produktionsplanung und -Steuerung erweitern. Daraus ergibt sich eine Unterstützung für die Produktionsleitung bzw. der Unternehmensführung und es eröffnen sich weitere Möglichkeiten der Analyse.

2.5 Abgrenzung von Lastmanagement und Energiemanagement

Der Begriff des Energiemanagements unterscheidet sich deutlich vom Lastmanagement. Wie Abb. 2.2 verdeutlicht liegt beim Energiemanagement der Fokus auf der Reduktion des Energieverbrauchs, wohingegen das Lastmanagement eine Verschiebung von Lasten bewirken will. Beides bewirkt eine Veränderung der Lastkurve beim Kunden, weswegen an dieser Stelle erwähnt sei, dass die synonyme Verwendung von Lastmanagement und Demand-Side-Management nicht dem eigentlichen Sprachverständnis entspricht. Der Begriff des Demand-Side-Managements wurde bereits in den 1980er Jahren unter anderem von C. W. Gellings für die grundsätzliche Beeinflussung der Last auf Verbraucherseite verwendet, also inklusive Energiemanagement und Lastmanagement. (vgl. [Gel85]) Heute findet man das DSM oftmals als Synonym für Lastmanagement, weshalb es in der vorliegenden Arbeit entsprechend verwendet wird.

Abb. 2.2: Demand-Side-Management²



Wirtschaftlich bestehen unterschiedliche Interessen an den beiden Thematiken. Vom Energiemanagement, besser von einer Steigerung der energetischen Effizienz, profitiert der Unternehmer in Form von geringeren Energiekosten. Geilhausen et. al. beziffern allein das Potenzial durch das Bewusstsein für Energieverbräuche und Effizienz mit bis zu 10 % des Gesamtverbrauchs. Mit technischen Eingriffen seien sogar 30 % möglich. (vgl. [Gei16]) Vom Lastmanagement profitiert zwar auch der Unternehmer, indem Spitzenlasten gekappt werden, aber in zweiter Instanz haben auch die Beteiligten an der Stromerzeugung und dem Transport ein Interesse an einer gleichmäßigen Netzbelastung.

2.6 DSM und DSRM

Die Entwicklung unseres Stromnetzes hin zu einem smartGrid soll die Verbraucherseite mit der Erzeugerseite in Verbindung bringen. Es gilt nicht mehr ausschließlich das Lastfolge-Prinzip. In Unternehmen wird mit Blockheizkraftwerken und Photovoltaikanlagen teilweise mehr als nur die eigene Versorgung sichergestellt und auch der klassische Konsument wird mit Photovoltaikanlagen auf dem Hausdach immer häufiger zum „Prosumer“³, da er aktiv Strom ins Netz einspeist. Im Zuge dieser Weiterentwicklung wird nach Ausgestaltungsmöglichkeiten einer Kommunikation zwischen Erzeuger und Verbraucher gesucht. Es geht darum, die gewonnene Flexibilität auf eine gemeinsame Basis zu stellen, um unser Stromnetz für den Einzug weiterer erneuerbarer Energie zu rüsten. Für die Regelung des Stromnetzes steht neben Regelenergie und abschaltbaren Lasten auch das Lastmanagement zur Verfügung, welches Eingriff in bestehende Lasten vornimmt. Im Haushaltsbereich soll dieser Eingriff zukünftig durch smarte Geräte in einem Heimnetzwerk, einem smart-Home erfolgen. Im industriellen Bereich kann über ein Prozessleitsystem Eingriff auf Maschinen- und Anlagensteuerungen genommen werden. Je nach Tiefe des Eingriffs und dem Ziel werden zwei Arten von Lastmanagement in industriellen Bereich unterschieden.

Das Demand-Side-Management, auch als klassisches Lastmanagement bezeichnet, dient zur Glättung des Energieverbrauchs eines Unternehmens, indem es Lasten verschiebt oder Spitzen kappt. Die Maßnahmen führt zu einer Egalisierung des Strombedarfs, reduziert aber nicht die abgenommene Menge. Für den Kunden ist dies dennoch positiv, da die Lieferverträge vom EVU üblicherweise neben dem Netznutzungsentgelt und dem Arbeitspreis einen Leistungspreis beinhaltet, der sich nach der maximalen abgenommenen 1/4-Stunden Entnahme eines Jahres richtet. Da durch die Jahreshöchstlast das gesamte Netzentgelt steigt, besteht für die

² In Anlehnung an [Gel85]

³ Vgl. u.a. <https://www.transnetbw.de/de/welt-der-energie/smart-system>

Unternehmen ein Interesse, diese Höchstlast möglichst niedrig zu halten. Insbesondere in der Stahlerzeugung werden daher seit langem DSM-Systeme eingesetzt. (vgl. [Dör15, Kel14, Rag05, Gel85, Sch15a])

Das Demand-Side-Response-Management flexibilisiert diesen Ansatz und versucht, die Last der Erzeugungssituation anzupassen. Dabei steht nicht mehr nur der eigene Nutzen im Vordergrund. Die Anpassung ist notwendig um überhaupt den zukünftigen Lasten durch erneuerbare Energien begegnen zu können. Für den Übertragungsnetzbetreiber hat dieses nebenbei netzdienliche Verhalten den Vorteil, dass weniger Kapazität für asynchrones Handeln der Industrie vorgehalten werden muss. Eine Last, die der Erzeugung erneuerbarer Energien folgt, sorgt dafür, dass die Residuallast geglättet wird und damit Grundlastkraftwerke weniger oft ausgeregelt werden müssen. Das senkt die Betriebskosten und erhöht die Wirtschaftlichkeit der Grundlastkraftwerke. (vgl. [Stb08])

Für die Netzbetreiber ergeben sich unter anderem Vorteile durch eine bessere Netzauslastung, Netzstabilität, sowie durch ein flexibles Lastmanagement genauere und umfangreichere Prognosen zum Verbraucherverhalten und dadurch einen geringeren Bedarf an Regelenergie. Durch die Lastverschiebung wird teure und teilweise ineffiziente Spitzenlast vermieden und damit die Bereitstellung von Spitzenlastkraftwerken oder gedrosselten Backup-Kraftwerken reduziert. Außerdem kann das EVU im Falle von Störungen oder drohenden Netzausfällen schnell und präzise auf die Last Einfluss nehmen. (vgl. [Sch15b, Kam12a, Pal11, Str08]) Für den Erzeuger bedeutet diese Glättung einen gleichmäßigeren Fahrplan der Kraftwerke, was direkt Einfluss auf deren Lebensdauer und damit unseren Strompreis hat.

Für den Endverbraucher respektive den Industriekunden ist die Lage weniger eindeutig. Zwar trägt er durch eine Glättung die Vorteile einer geringeren Spitzenlast, aber offensichtlich erleidet dieser durch externen Einfluss auf seine Anlagen eine Einschränkung seiner Freiheit, was oftmals zu Bedenken hinsichtlich der Produktqualität führt. Die Eingriffe werden daher auf Anlagen reduziert, die nicht direkt Einfluss auf die Wertschöpfung haben. Eine weitergehende Beeinflussung des Produktionsplanungssystems würde zu massiven Konflikten mit dem bestehenden Zielsystem der Produktion führen oder wäre bei Vollauslastung sogar unmöglich. (vgl. [Sch17]) Um diese Nachteile aufzuwiegen ist neben viel Überzeugungsarbeit eine angemessene Vergütung anzusetzen, die nur selten bei KMUs durch flexible Verträge ermöglicht wird. Bislang wird teilweise durch veraltete Verträge sogar netzasynchrones Verhalten gefördert. (vgl. [Kel14, DEN16])

Genügend große Unternehmen, wie Stahlwerke und Aluminiumverarbeiter beziehen über einen flexiblen Vertrag mit dem EVU ihren Strom direkt von der Strombörse. (vgl. [Sch15a]) Ein darauf angepasstes DSRM-System bezieht den Strom börsenpreisabhängig und verschiebt energieintensive Prozesse in niedrig-Preis Zeiten. Die zusätzlichen Kosten für das DSRM-System, Prognosen und die kalkulatorischen Kosten für die Nutzung der Flexibilitätspotenziale des Unternehmens werden durch die niedrigeren Bezugspreise aufgewogen. Für KMU mit geringem Stromverbrauch lohnt ein Strombezug über die Börse nicht, da die Einrichtungs- und Betriebskosten des Systems bislang den Nutzen übersteigen. Ein günstiges DSRM-System mit weitestgehend automatisierter Datenverarbeitung in Kombination mit einem flexiblen Energieliefervertrag könnte hier eine Möglichkeit darstellen, zusätzliche Einnahmen mit bestehender Flexibilität zu generieren oder gezielt Kosten zu senken.

2.7 Vorausschauende Regelung

Um mittels DSRM Energie einzusparen, bedarf es einer intelligenten Anpassung des Lastverlaufs an äußere Bedingungen. Dazu ist es wichtig den aktuellen Maschinenstatus und auch Umgebungsbedingungen zu kennen und in die Zukunft prognostizieren zu können, um daraus Handlungsoptionen abzuleiten. Damit geht das Konzept über die reine Erfassung von Lastzuständen hinaus. Die nötige Beeinflussung der Maschinensteuerungen kann über eine werksseitig vorhandene Schnittstelle erfolgen, über welche neue Sollwerte von einer zusätzlichen Steuerung vorgegeben werden. Damit bleibt die vorhandene Steuerung weitestgehend unberührt. Die zusätzliche Steuerung integriert zusätzliche Informationen und übernimmt einen Teil der bestehenden Steuerungsaufgabe.

Das bei Bestandskunden bereits installierte Energiemanagementsystem mE2020 wird zur Zeit der Erstellung dieser Arbeit derart modifiziert, dass es Einsparungen direkt nachweisen kann. Es ermöglicht damit nach Implementierung der zusätzlichen Steuerung sogar eine Förderung des Projektes innerhalb des Pilotprojektes Einsparzähler mit der Option „Lastmanagement-Ready“. Die folgenden zwei Beispiele verdeutlichen das Konzept.

Man stelle sich etwa ein Freibad vor, welches bislang eine konstante Wassertemperatur aufrechterhält. In der Voraussicht eines nahenden Unwetters und damit ausbleibender Kunden fährt die Steuerung die Wassertemperatur automatisch für die Dauer des Unwetters herunter und senkt damit Heizkosten. Noch vor Ende des Unwetters wird die Heizung wieder automatisiert angefahren, sodass das Wasser für die ersten Kunden wieder temperiert zur Verfügung steht.

Aber auch in mittelständischen Unternehmen kann das System angewendet werden. Man stelle sich ein produzierendes Unternehmen vor, welches neben Maschinen auch über ein Produktionsplanungssystem verfügt. Für den Betrieb der Maschinen müssen Nebenprozesse, wie Druckluftbereitstellung, Kühlung oder Temperierung bereits abgeschlossen sein. Um die Nebenaggregate zu starten, kommt ein Mitarbeiter extra früher oder diese laufen gar dauerhaft. Als Grund, warum nicht eine Zeitschaltuhr verbaut wird, wird oftmals auf die mangelnde Flexibilität verwiesen. Eine Zeitschaltuhr wisse ja nicht, an welchem Tag welche Maschine in welcher Schicht benötigt wird. Eine händische Änderung von Woche zu Woche komme nicht in Frage.

An dieser Stelle kann eine automatische Regelung mit Zugriff auf das PPS die Anlagen genau nach Bedarf vorbereiten. Das heißt, dass vor allem Peripheriegeräte im Fokus der Betrachtung stehen und bei diesen die Laufzeit verkürzt wird, um ihren Energieverbrauch auf ein Minimum zu reduzieren. Die Problematik besteht im Finden geeigneter Anlagen und dem Ausloten von Grenzen. Temperaturschwellen müssen beachtet und auch ein ungeplanter Einsatz sollte mit möglichst wenig Vorlaufzeit möglich sein.

2.8 Weitere Literatur

Für das Konzept der externen Ansteuerung von Geräten gibt es im Haushaltsbereich bereits Lösungen mit der Vernetzung von Elektrogeräten zu einem Smart Home. Die Geräte verfügen dazu über eine werksseitige Schnittstelle, welche den eigenen Zustand und gewisse Freiheitsgrade für die zukünftige Nutzung im Netzwerk freigibt. So kann etwa eine Waschmaschine ihre Bereitschaft signalisieren, wird aber erst eingeschaltet, wenn ein äußeres Signal eingeht. Das Prinzip ist beliebig auf Kühlschränke, Trockner, Heizung etc. erweiterbar und

bereits teilweise in Anwendung.⁴ Es erfolgt aber bislang kaum eine automatische Regelung, wie es zum Beispiel für die Reduzierung oder Verschiebung des Energiebedarfs nötig wäre. Dabei zeigt Thron in einer Simulationsrechnung, dass mit einer vorausschauenden Regelung von Fußbodenheizungen bei der die Trägheit des Heizsystems mit einfließt bis zu 9 % Energie eingespart werden können. Erstaunlich ist dabei, dass ihre berechneten relativen Einsparungen mit zunehmendem Dämmstandard und mit zunehmender Trägheit des Systems sogar noch wachsen. (vgl. [Thr01])

Die Untersuchungen von Kamper und Schmeck an einer großen Anzahl von Wohneinheiten haben gezeigt, dass in der grundsätzlichen Systematik einer externen Steuerung ein Potenzial für den fast vollständigen Ausgleich von Schwankungen in einem Bilanzkreis liegt und damit der Bedarf von Ausgleichsenergie sinkt. (vgl. [Kam12b, Sch15b])

Für den industriellen Bereich, welcher im Fokus dieser Arbeit liegt, gibt es bislang wenige übergreifenden Lösungen zur Vernetzung von Maschinen. Die Ansätze für eine Smart Factory oder Smart Production haben sich auf zwei Bereiche fokussiert. Zum einen die Produktionsplanung, welche Flexibilitätspotenziale in der Anordnung der Fertigungsaufträge bietet und außerdem die Maschinensteuerung selbst, welche vor allem im Bereich der Peripherie Potenziale für Einsparung und Flexibilität bietet.

Im Bereich der energieoptimierten Fertigungsplanung stellt Rager ein Konzept zur Maschinenbelegungsplanung bei vielen identischen Maschinen vor. Das Konzept zielt auf die „Reduktion entscheidungsrelevanter Kosten“ [Rag06] ab. Eine solche Lösung ist inzwischen bei Produktionsleitsystemen in der Großindustrie verfügbar⁵. Für KMU mit ihren stark unterschiedlichen Maschinen, geringeren Verbräuchen und oftmals unterschiedlichen Aufträgen steigt der Aufwand allerdings erheblich, während das Einsparpotenzial sinkt.

Keller und Reinhart betrachteten das Produktionsplanungssystem aus Sicht der Prognostizierbarkeit und der Flexibilitätspotenziale. Sie binden Energiedaten in ein ERP-System ein, können damit Lasten prognostizieren und weisen fünf Prozent Energieeinsparung aus. Die Anpassung der Produktionsplanung an energetische Randbedingungen wird auf Grund wichtigerer Randbedingungen aktuell nicht angewendet. Die Arbeit zeigt aber, dass die Prognose von Lasten prinzipiell funktioniert und damit ein Zwischenschritt dieser Arbeit, nämlich eine Lastprognose erreichbar ist. (vgl. [Kel16])

Das Werk Energieziel 2050 stellt detailliert die Potenziale in Haushalten und KMU vor. Insbesondere Wärmepumpen, Klimageräte, Elektromobilität, aber eben auch die industriellen Prozesse bieten ein Potenzial, dessen Hebung bei der Energiewende hilfreich ist. Hiernach waren 2010 erst 20 % des Lastverschiebungspotenzials angebunden. Entsprechend waren es 80 % noch nicht, wovon ein Großteil auch heute noch zu heben ist. Es wird deutlich, dass die Einbindung von Privathaushalten durch ihren geringeren Verbrauch und ihr geringes Lastverschiebungspotenzial nur in Summe eine Bedeutung hat. Die dazu notwendige Anbindung jedes einzelnen Haushaltes ist kaum wirtschaftlich darstellbar. (vgl. [Kla10])

⁴ Vgl. z.B. Home Connect System von Bosch, Produkte von Viessmann, Junkers-Bosch

⁵ Informationen zum ABB Ability Electrical Distribution Control System und cmpPlus Energy Manager
z.B. in ABB review 3/15

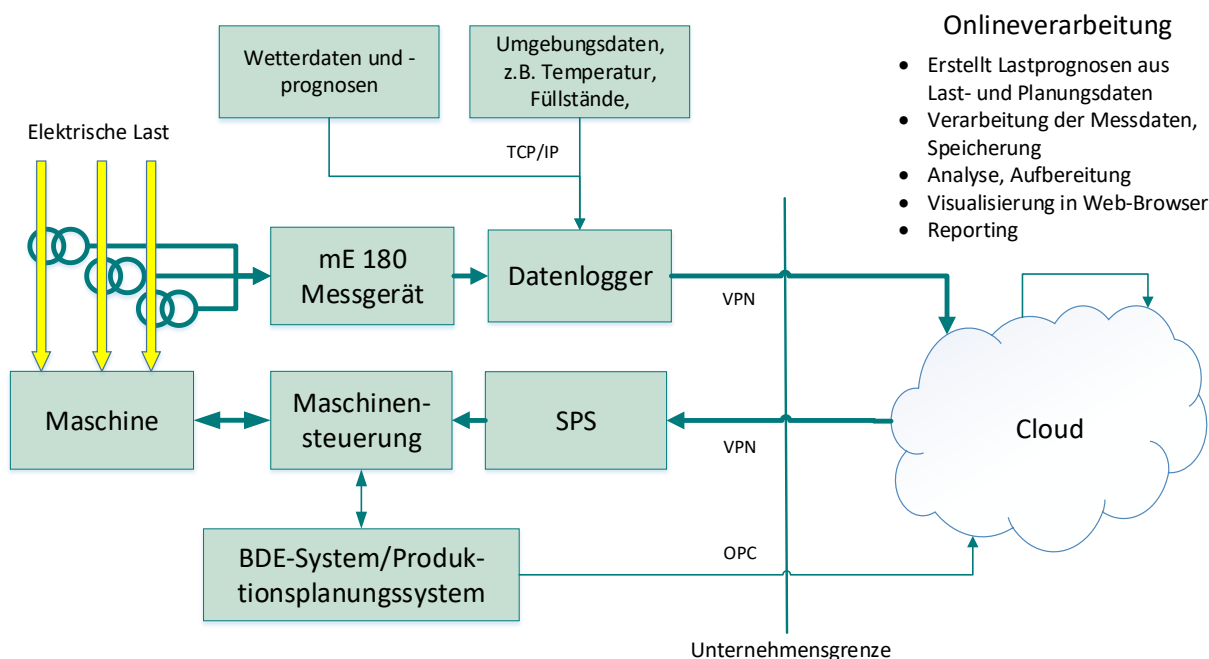
3 Konzept der vorausschauenden Regelung

3.1 Technische Umsetzung

Der Kern der Arbeit liegt in der Vervollständigung eines Regelkreises, in Form einer Observer-Controller-Architektur (O/C-Architektur). Dabei kann auf Erfahrungen mit der Vernetzung von SPS-Steuerungen und dem Abruf von Daten aus PPS und ERP-Systemen zurückgegriffen werden. Die Anforderungen an das Vorhaben lässt sich in einem Systemaufbau nach Abb. 3.1 erfüllen. Eine vergleichbare O/C- Architektur nutze auch Kamper erfolgreich, um in einer Simulation Schwankungen der Erzeugung mit einem Pool von Verbrauchern zu kompensieren. (vgl. [Kam12b])

In der Darstellung werden Lastdaten vom Strom- und Spannungsmessgerät mE180 sekundlich aufgezeichnet und über ein vorhandenes Netzwerk an einen gemeinsamen Logger gesendet, welcher Daten verschiedener Messgeräte bündelt. Auch Maschinendaten und Umgebungsbedingungen, wie Füllstände, Temperatur oder Wetterdaten können im Logger zusammenfließen.

Abb. 3.1: Technische Systembeschreibung mit Regelkreis



Dieser übermittelt die gesammelten und komprimierten Daten über eine gesicherte VPN Verbindung an einen Server. Bei Datenverlust auf dem Weg vom Messgerät zur Cloud sorgt er für das Nachreichen der Daten. Damit ist das System auch bei störungsbehafteter Internetverbindung noch bedingt reaktionsfähig. Um eine vollständige offline-Fähigkeit herzustellen ist hier auch eine unternehmensinterne Kopplung von Datenlogger und SPS denkbar. In diesem Fall könnte die SPS die Berechnungen auf Basis von Ersatzwerten durchführen.

Außerdem werden über eine OPC Schnittstelle auch Daten aus dem Produktionsplanungssystem an den Server übermittelt. Interessant für eine Auswertung sind vor allem die geplanten Einsatzzeiten der Maschinen und Auftragsdaten.

Auf Basis der Ist- und Plandaten soll das erweiterte EnMS eine Lastprognose erstellen, die Daten auf einer Web-Oberfläche visuell darstellen und Reporte generieren. Über die Web-Oberfläche soll der Benutzer Parameter ändern können und den Einfluss auf die Maschinensteuerung manuell beeinflussen können. Die Kombination von Last- und Produktionsdaten soll sich gemeinsam ausgeben lassen, um Anhängigkeiten zu zeigen und mögliche Flexibilität zu erkennen.

Die Befehle aus dem erweiterten EnMS werden wiederum über VPN an eine hauseigene SPS gesendet, welche aktiv Einfluss auf die Sollwerte der Maschinensteuerung nimmt. Dabei soll der eigentliche Fertigungsprozess nicht beeinflusst werden, sondern nur die Potenziale der Peripherie ausgenutzt werden.

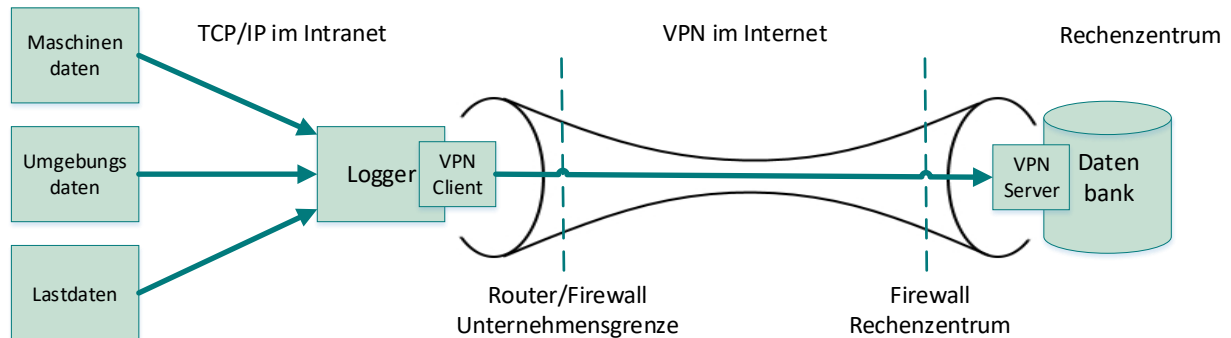
3.2 Datensicherheit und -qualität

Seit sich in jüngster Zeit die Skandale über Datenmissbrauch häufen, ist die Auslagerung von sensiblen Produktionsdaten ins Internet bei vielen Unternehmen schwer zu vermitteln. Gerade für KMU stellen ihre Produktionsdaten oftmals den Kern des Unternehmens dar und die Angst vor unerlaubten Eingriffen in die Produktion ist groß. Für das dargestellte System müssen also Kriterien für den Datenaustausch festgelegt werden, welche zum einen Rückschlüsse auf Maschinendaten oder Produktionsdaten möglichst nicht zulassen. Zum anderen muss die manuelle Beeinflussung der Maschinen immer den Vorrang gegenüber der automatischen Regelung haben, um im Falle eines Angriffs auf den Regelkreis manuell steuern zu können. Dabei ergibt sich ein Dilemma. Die Verschleierung von Produktions- und Maschinendaten zur Übermittlung ist nur durch eine Verschlüsselung oder eine sehr grobe Aufnahme von Messdaten möglich. Zwar würde eine grobe Messdatenaufzeichnung bei einer geringen verfügbaren Bandbreite diese schonen, es steht aber in direkter Konkurrenz zum Ziel einer detaillierten energetischen Analyse des Unternehmens. Es gilt also einen Kompromiss zwischen Übertragungssicherheit, Nutzung vorhandener Bandbreite und der nötigen Datenqualität zu finden. Regelungsseitig müssen die Parameter für die Maschinensteuerung in einer Weise übertragen werden, die vor Zugriffen geschützt ist. Eine zusätzliche Sicherheit bietet die maschinenseitige Überprüfung der Solldaten auf ihre Plausibilität. Ein solches Sicherheitssystem wird auch bei Produktionsleitsystemen der Chemieindustrie eingesetzt, um Schaden durch Fehlbedienung zu verhindern.

Eine Lösung besteht in einer Datenübertragung mittels VPN-Verbindung in Kombination mit einem Logger nach Abb. 3.2 und unterschiedlichen Übertragungsintervallen je Messgröße, um die Datenmenge zu reduzieren. Die wichtigste Information, welche auch am stärksten schwankt, ist das Lastsignal. Es wird daher sekundlich aufgezeichnet und an den Logger geschickt. Umgebungsdaten, wie Temperatur, Füllstand, Druck sind weniger schwankend und können z.B. im 10-Sekunden- oder Minuten-Takt aufgezeichnet und dem Logger geschickt werden. Eine Wettervorhersage oder Daten aus dem PPS dagegen ändern sich kaum. Eine Übertragung pro Stunde reicht meist aus. Der Logger kann unabhängig von den Übertragungsintervallen der Messstellen die Daten bündeln und als Paket an die Datenbank senden. Das gezeigte Prinzip hat

den Vorteil, dass innerhalb des Unternehmens das vorhandene Intranet genutzt werden kann um die Bandbreite des Internetanschlusses zu schonen. Durch den gesammelten Versand zur Datenbank wird beispielsweise nur einmal pro Minute ein Daten-Paket verschickt, was das Übertragungsvolumen nicht wesentlich einschränkt und damit den eigentlichen Wertschöpfungsprozess nicht stört.

Abb. 3.2: Prinzip der Datenübertragung



Mit der aktuellen Version von S/4HANA forciert SAP die Cloud-Verarbeitung deutlich. Dies macht sich in einer zunehmenden Akzeptanz bei KMU und Großunternehmen bemerkbar. Man kann davon ausgehen, dass sich der Trend zur zentralen Datenverarbeitung in Rechenzentren noch deutlich verstärken wird.

Lehnt der Kunde eine externe Auswertung beispielsweise aus Sicherheitsgründen ab, so ist auch eine vollständig interne Lösung umsetzbar, bei der die VPN-Verbindung lediglich eine Beobachtung und den Eingriff von außerhalb ermöglicht. Durch die sekundliche Aufzeichnung und Übermittlung von 18 Strömen, 18 Werten für den $\cos(\varphi)$, 18 Wirkleistungen, 3 Spannungen und 3 Frequenzen generiert eine einzige Messstelle jedoch über 31 Gigabyte Daten pro Jahr. Darin ist schon berücksichtigt, dass die Sekundenwerte lediglich einen Monat und die 10-Sekunden-Werte ein Jahr lang gespeichert werden. In einem mittelgroßen Unternehmen mit beispielsweise 8 Controllern und 60 Messstellen bedeutet dies fast zwei Terabyte Daten pro Jahr. Der finanzielle Aufwand für entsprechend große und leistungsfähige Server, deren Betrieb, Wartung, ggf. Reparaturen und das Personal ist beträchtlich. Die entstehenden Kosten sollten kundenindividuell den Kosten einer externen Lösung gegenübergestellt werden, bei denen sich der Anbieter um den gesamten Service kümmert.

3.3 Wirtschaftlichkeit

3.3.1 Lastprognose

Die Verbindung von Produktionsplanung und Energiemanagement hat das Potenzial, Lasten präzise vorhersagen zu können. Tab. 3.1 zeigt an fünf beispielhaften Tagen im Februar 2018, dass die tatsächlichen 15-Minuten Lasten in Deutschland im Schnitt über 5 Tage um rund 5,5 % von der Prognose abweicht.

Datum	01.02.2018	02.02.2018	03.02.2018	04.02.2018	05.02.2018	Durchschnitt
Min.Δ [%]	0,09	0,07	4,33	1,57	3,26	
Max.Δ [%]	5,91	4,45	10,00	18,46	8,81	
MittelΔ [%]	3,28	1,94	7,21	9,07	6,25	5,55

Tab. 3.1: Prognoseabweichungen zwischen Erzeugung und Verbrauch (vgl. [tra18])

Wenn es gelänge, den Lastverlauf noch deutlich präziser vorherzusagen, könnte die Information einen Wert besitzen. Voraussetzung ist, dass sich aus den Produktionsplanungsdaten und dem aktuellen Stromverbrauch eine bedeutend bessere Prognose erzeugen lässt und dass dies flächendeckend für relevante Verbraucher möglich ist. Die Schwierigkeit an dieser Stelle wird durch die Ausführung und Anbindung des ERP/PPS Systems und die Qualität der Datenbasis gegeben. Insbesondere die Planbarkeit des Prozesses stellt in vielen kleineren und mittleren Produktionen ein Problem dar. Durch unvorhergesehene Ereignisse wie Defekte, Wartezeiten, aber auch variable Pausenzeiten lassen sich Energieverbräuche nur bedingt vorhersagen.

3.3.2 Flexibilität

Für die Vermarktung von Flexibilität im Energiemarkt fehlt aktuell die gesetzliche Grundlage. „Ein angemessener regulatorischer Rahmen ist essentiell für die Optimierung der Vorteile von Speicherung und DSM“ [Str08]. Gemeint ist damit die Nutzung von Stromspeichern, wie sie künftig vermehrt durch Elektroautos und aktuell bereits durch Hausspeicher vorhanden sind. Deren flexibles be- und entladen soll dem SmartGrid dienlich sein.

Eine andere Betrachtung, wie sie Fuller anstellt, zeigt, dass Speicher in vielerlei Formen in nahezu jedem Haushalt und vielen Industrieunternehmen vorhanden sind. Darunter fallen thermische Speicher wie Kühlschränke, Kühlhäuser, Hydraulikaggregate, Kühlflüssigkeitsbehälter, etc. aber auch die angesprochenen elektrischen Speicher. Sie verfügen typischer Weise über eine Ober- und Untergrenze der Befüllung und bieten damit Flexibilität ohne den nachfolgenden Prozess zu beeinflussen. Kern seiner Arbeit ist nicht das Nutzen der Speicher als Ausgleichselement im Netz, welches nach G. Strbac aktuell auf ein Vergütungsmodell wartet, sondern als zusätzliche zeitliche Variable für den Strombezug. (vgl. [Ful11]) Für den Endkunden bedeuten diese Speicher also eine Möglichkeit Strom dann zu beziehen, wenn er günstig ist. Das dazu notwendige Preissignal wird von der Strombörse stets aktuell im Internet veröffentlicht. Eine vertragliche Grundlage ist bei vielen EVUs möglich und auch die technische Realisierung eines Informationsabgriffs und der Verarbeitung in einer Steuerung ist Stand der Technik.

Da keine Energieeinsparungen generiert werden, ist das Modell für eine Förderung im Rahmen des Pilotprojektes Einsparzähler wenig interessant. Wohl ist aber eine Kostenreduktion beim Kunden erreichbar, zu dessen Realisierung sich die Installation von Hardware vergüten ließe.

3.3.3 Vorausschauende Regelung

Für den Begriff der vorausschauenden Regelung gibt es zwei Bedeutungen, die sich deutlich unterscheiden. In der Elektrotechnik bezeichnet man mit der Modellbasierten Prädiktiven Regelung (MPR) einen aktiven Eingriff in einen Regelalgorithmus um dessen Reaktionsgeschwindigkeit zu erhöhen. (vgl. [Dit06]) In der vorliegenden Arbeit geht es aber um die vorausschauende, intelligente Regelung von Anlagen und um deren Energieverbrauch. In Liechtenstein wurde eine Eislaufbahn bereits mit einer intelligenten „Meteo-Steuerung“ ausgestattet, die die Kälteerzeugung der Witterung anpasst. Das Projekt zeigte, dass sich mit der vorausschauenden Anpassung einer Maschinensteuerung an äußere Gegebenheiten Einsparungen von bis zu 50 % erzielen lassen. (vgl. [Wie16]) Selbst die aktuelle S-Klasse von Mercedes verfügt optional über ein aktives, vorausschauendes Fahrwerk, welches den Komfort erhöht indem es den Untergrund erkennt. Im Haushaltsbereich gibt es mit der Einführung von smarten Geräten Ansätze im Bereich der Heizungssteuerung. Ziel der Systeme von z.B. Viessman oder innogy ist die Anpassung der Heizleistung an die individuellen Gewohnheiten der Bewohner wie Anwesenheitszeiten, seltener an äußere Gegebenheiten, wie die Außentemperatur oder Sonneneinstrahlung. Neben der Aufnahme der aktuellen Raum- und Außentemperatur kann der Bewohner z.B. seinen Urlaub vormerken, für dessen Dauer die Heizung heruntergeregelt wird. (vgl. [Thr01])

Im Bereich der Industrie sind solche Lösungen wenig etabliert, obwohl das Potenzial deutlich höher ist. Wochenendabschaltungen werden typischer Weise über Zeitschaltuhren gesteuert, welche aber Feiertage und produktionsfreie Brückentage nicht erkennen können, geschweige denn einen wechselnden Schicht-Betrieb. Das sich ergebende Potenzial muss allerdings Firmen- und Anlagenindividuell ermittelt werden. Eine erste Begutachtung zeigt, dass selbst bei einem kleinen Unternehmen eine vorausschauende Regelung zu beachtlichen Einsparungen führen kann.

Durch die effektive Energieeinsparung lässt sich das Modell bereits jetzt mit den Zuschüssen des Pilotprojektes Einsparzähler vergüten. Darüber hinaus senken die selteneren Einschaltzyklen die Wartungs- und Instandhaltungskosten.

3.3.4 Condition Monitoring

Die Zustandsüberwachung von Maschinen hat lange Tradition und ist eng mit der Predictive Maintenance, der vorausschauenden Wartung, verknüpft. Der Ansatz geht deutlich über die vorbeugende und reaktive Wartung hinaus, da durch die Analyse von Produktions- und Maschinendaten das Wartungsintervall flexibel gestaltet ist. Gerade große Unternehmen mit hohem Automationsgrad haben mit ihrer Vielzahl von Antrieben in Fördersystemen und Maschinen einen Bedarf an Condition Monitoring erkannt, um Stillstandzeiten zu minimieren. Aber auch in modernen Autos richtet sich das Wartungsintervall schon nach der Qualität des Öls. Ein Randeffekt der prädiktiven Wartung ist auch ein geringerer Energieverbrauch, da beschädigte Teile für Verluste sorgen und rechtzeitig getauscht werden. (vgl. [Vog16])

Die Datenbeschaffung gestaltet sich je nach Messaufgabe schwierig, weshalb neuerdings auch das EnMS für Condition Monitoring erprobt wird. Hintergrund ist, dass jede Veränderung des Maschinenzustandes sich in ihrem Energieverbrauch niederschlägt. Der Einzelabgriff von Antrieben lässt dann eine grobe Lokalisierung der Problemstelle zu. Ein Vergleich mit dem ERP-System gibt weitere Auskunft über die Laufzeit, produzierte Stückzahl und Betriebsbedingungen. Der Einbau von Stromzählern an den Maschinen lässt sich dabei deutlich leichter realisieren, als beispielsweise Temperatursensoren in Lagern. Über Algorithmen ist auch ein EnMS in der Lage, kleine Abweichungen zu erkennen.

3.4 Messkonzept und Auswertungsmethode

Der Messaufbau richtet sich nach der vorhandenen Struktur des Unternehmens von grob nach fein. Beginnend bei der Netzentnahmestelle wird bis auf Maschineneben herunter aufgelöst, wobei sich die Installation auf die wichtigsten Verbraucher konzentriert. Es ist nicht nötig alle Verbraucher zu erfassen, da üblicherweise rund 10 - 15% der Verbraucher für rund 80 % des Verbrauchs verantwortlich sind. Es findet sich das Pareto-Prinzip wieder. (vgl. [Gei15])

Das Unternehmen soll hinsichtlich folgender Punkte untersucht werden:

- Lastprognose
- Lastflexibilisierung
- Vorausschauende Regelung
- Einsparpotenziale

Ein optionaler Punkt Einsparpotenziale vervollständigt die Analyse in der Hinsicht, als dass Erkenntnisse, welche nicht zu den oben genannten Punkten gehören trotzdem zu einer Energieeinsparung führen können. Auch diese sollen in der Arbeit ihren Platz finden und damit die energetische Analyse abrunden.

Die zu einer Analyse notwendigen Auswertungen der Daten erfolgt mit MS Excel. Das Programm ist weit verbreitet, die Berechnungen lassen sich leicht nachvollziehen und ohne ausführliche Programmierkenntnisse erweitern. Hierin ist auch eine Simulation von Abläufen oder Temperaturen möglich.

Seitens des Unternehmens liegen Daten der Produktion in unterschiedlicher zeitlicher Auflösung und in unterschiedlicher Qualität vor. Teilweise werden Daten auch nicht erfasst. Lediglich die Lastdaten lassen sich einheitlich aus der Datenbank extrahieren. Um dem Rechnung zu tragen soll vorab eine Bestandsaufnahme der Unternehmensdaten, sowie der Lastdaten erfolgen und erst im zweiten Schritt, wenn möglich, ein Abgleich zwischen Produktions- und Lastdaten. Die Analyse folgt damit dem Top-Down Prinzip, also einer Analyse vom Groben zum Feinen. Die Unternehmensdaten werden unter anderem darauf überprüft, ob die Daten:

- Vollständig sind
- Plausibel sind
- Lücken aufweisen
- Mit den Pausen- und Arbeitszeiten übereinstimmen
- Arbeits- und Ferientage beinhalten

- Ob es Planungsdaten sind, oder sie im Nachhinein gesammelt werden.

Die Lastdaten lassen weiterhin Aussagen zu folgenden Punkten zu:

- Grundlast und Grundlastverursacher
- Spitzenlasten und dessen Verursacher
- Wochenend-Lastverläufe und „stille“ Verbraucher
- Lastverteilung im Unternehmen
- Potenziale zur Verbrauchsreduktion
- Bedarf weiterer Messstellen

Der Abgleich zwischen Produktions- und Lastdaten bietet Anhalt für folgende Punkte:

- Zeitliche Übereinstimmung von Last und Buchung im ERP-System/PPS
- Qualität der Planung
- Bildung von Kennzahlen zwischen Energie und Wertschöpfung
- Potenzial für vorausschauende Regelung
- Flexibilisierungspotenzial
- Lastprognosemöglichkeit

Die oben genannten Punkte dienen nur als Anhaltspunkte und grundsätzlich hat auch das Fehlen von Informationen einen informativen Wert, da es zeigt, wo Verbesserungsbedarf besteht oder ein Fehler aufgetreten ist. Die Entscheidung für eine Auswertung der Lastdaten in kW folgt der Praxis. Sie erleichtert eine Umrechnung in kWh und damit auch in eine monetäre Bewertung.

4 Unternehmensdarstellung

4.1 Das Unternehmen MRS

Die Metall Recycling Service GmbH & Co. KG, kurz MRS, in Willich am Niederrhein hat sich auf die Weiterverarbeitung von Aluminiumschrott spezialisiert. Der Betrieb hat im Jahr 2017 mit 16 Mitarbeitern einen Einnahmenüberschuss von 44.781 € erwirtschaftet. (vgl. [JAB17]) Der Umsatz geht aus dem Jahresabschluss nicht hervor. Von den Mitarbeitern wird im 2-Schicht-Betrieb angeliefertes Material getrennt, sortenrein sortiert, zu Würfeln verpresst und wieder verladen. Der Kern des Unternehmens ist eine große Schrottpresse, welche aus losem Metallschrott feste Ballen herstellt. Zum Oktober 2018 wird eine baugleiche, weitere Presse in Betrieb genommen. Der Pressprozess mit der PP III 4040 Presse von RS Maschinenbau stellt den Hauptenergieverbraucher des Unternehmens dar. Ein eigener elektro-hydraulisch betriebener Kran befüllt die große Presse. Darüber hinaus gibt es eine Sortieranlage, welche eisenhaltige Metalle und Kunststoffe abtrennt, eine kleine Presse, Dosenpresse genannt, eine Rotorschere zur Zerkleinerung großer Teile und einen Kran, der die Rotorschere befüllt. Der Transport der Materialien über den Innenhof und Lagerplatz des Unternehmens erfolgt teilweise mit elektrischen Staplern, teilweise mit Diesel betriebenen Baggern und Radladern. Eine neue Halle im hinteren Teil des Areals wird zur Lagerung staubiger Materialien genutzt und verfügt über eine Absauganlage mit Filter. Büros, eine Pforte, Waage und Sozialräume befindet sich im Eingangsbereich des Areals.

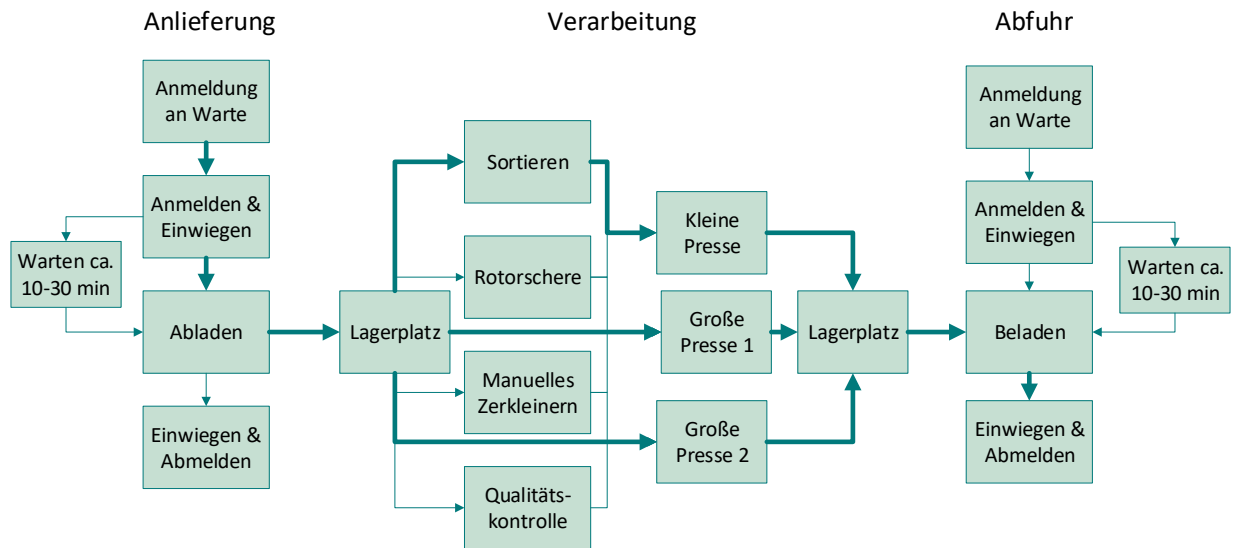
4.2 Produktionsablauf und -planung

Bei Anlieferung der Rohstoffe meldet sich der Fahrer bereits von unterwegs oder beim Eintreffen bei der Warte. Er wird gewogen und wartet auf die Freigabe zum Abladen. Je nach freier Kapazität wird ihm ein Abladeplatz zugewiesen. Dieser liegt entweder direkt an der Maschine oder in einer der Boxen auf dem Hof. Der häufigere und gewünschte Fall ist aber ein Abladen direkt vor der Presse, um die Verarbeitungswege kurz zu halten. Ein Abladen auf dem Hof zieht immer einen zusätzlichen Transport von der Box zur Maschine nach sich. Das Material wird nach Abb. 4.1 entweder gleich verpresst oder erst sortiert und gegebenenfalls zerkleinert. Die bislang zwei, zukünftig drei Pressen verarbeiten dann das Rohmaterial zu Würfeln, welche erst wieder zwischengelagert oder gleich verladen werden.

Die MRS verwendet keine detaillierte Auftragsplanung, da die Verarbeitung der angelieferten Rohstoffe sofort mit dem Abladen beginnt und das Eintreffen der LKW kaum vorhersagbar ist. Bei Eintreffen der Ware wird eine Chargennummer generiert, die zur Auftragsnachverfolgung dient und auf die sich die Prozesse buchen lassen. Zum Bearbeitungsende lässt sich somit der Bearbeitungsprozess minutengenau nachvollziehen. Über die Auslastung der Maschinen wird erst im Nachhinein eine Auswertung erstellt.

Die Zeit zwischen der Anmeldung an der Warte und dem Abladen variiert zwischen 10 Minuten und 30 Minuten je nach Auslastung der Maschinen und der Anzahl freier Abladeplätze auf dem Hof. Die Qualitätskontrolle des angelieferten Materials erfolgt als Sichtkontrolle zu Beginn der Bearbeitung. Um die Flexibilität und den Durchsatz zu steigern und die Wartezeiten zu verringern wird zum Herbst 2018 eine zweite Große Presse in Betrieb genommen.

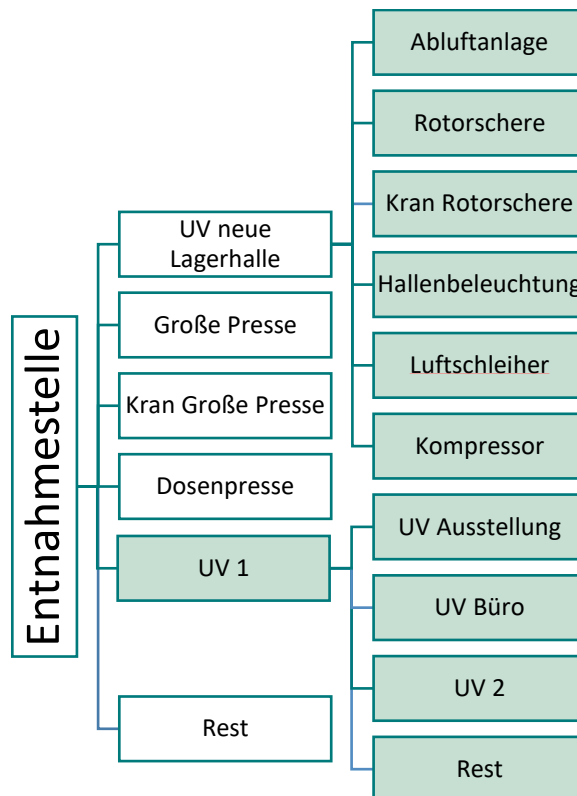
Abb. 4.1: Betriebsablauf MRS ab Oktober 2018



4.3 Messstellen

Die Messstellen, also Controller, Wandler, Kabel, etc. werden vom Beratungshaus gestellt und montiert. Sie decken zur Zeit der Referenzmessung bereits die wesentlichen Verbraucher der MRS nach Abb. 4.2 ab, hier in weiß gekennzeichnet. Die zusätzlich aufgeführten Verbraucher in grün stellen den Stand zur Zeit der Auswertung dar. Bislang sind 3 Controller und 15 Messstellen montiert.

Abb. 4.2: Messstellen der MRS, Stand September 2017



Die Messstelle *Rest* ist lediglich eine rechnerische Größe aus der Messstelle *Netzentnahme* minus der Summe der übrigen Messstellen. Auf diese entfallen im Wesentlichen die Verwaltung, aber auch Teile der Beleuchtung. Zum Zeitpunkt der Anfertigung dieser Arbeit ist eine weitere Messstelle *UV1* eingerichtet, welche die Verbräuche am Rest deutlich weiter aufteilt in *UV Büro Neubau*, *UV Ausstellung* und *UV2*. Außerdem sind seit Juni 2018 die Verbraucher der *UV neue Lagerhalle* um die Messstellen *Absauganlage*, *Kompressor*, *Luftschleier*, *Rotorschere* und *Beleuchtung* erweitert. Somit ergibt sich zum Zeitpunkt der Auswertung ein deutlich detaillierteres Bild als noch zur Referenzzeit.

4.4 Referenzmessung

Der Zeitraum der Referenzmessung in KW 38 im Jahr 2017 wurde zufällig gewählt. In der Woche lag bereits die aktuelle Messstellenkonstellation vor. Die Roh-Messdaten der Stromaufnahme besitzen sekundliche Auflösung. Die Analyse von Sekundendaten erwies sich allerdings als nicht zweckmäßig, da die Buchungssätze der Maschinenbelegung in Minutenauflösung an der Chargennummer hinterlegt werden. Diese Auflösung erwies sich als ausreichend präzise für die Auswertung. Die Anzahl von Messwerten konnte in akzeptabler Zeit in MS Excel ausgewertet werden. Die Referenzmessung umfasst eine volle Arbeitswoche inklusive Samstag und Sonntag und somit 10.080 Minuten-Werte. Die Arbeitszeiten der MRS sind variabel, je nach Auftragslage. Im Referenzzeitraum beträgt sie von 6:00 Uhr bis 23:00 Uhr in 2 Schichten. Die Arbeitszeit am Samstag beginnt um 7 Uhr und umfasst eine Schicht bis 17 Uhr. Die Pausen werden je nach Arbeitsaufkommen eingelegt. Sie liegen üblicherweise für die Mittagspause um etwa 13 Uhr und für die Kaffeepause etwa um 9:00 Uhr. Pausen werden aber abhängig von der Auftragslage eingelegt und sind daher nicht planbar. Zur Auswertung wurden die Messstellen *Netzentnahme*, *Große Presse 1*, *Kran Große Presse*, *Kran Dosenpresse* und *Unterverteilung neue Halle* herangezogen. Die Messdaten lagen bis auf kleinere Aussetzer vor. Fehlende Werte wurden linear interpoliert. Der aktuelle Strompreis liegt für das Unternehmen bei 18 Cent/kWh. Seine Zusammensetzung aus Arbeits- und Leistungspreis ist nicht bekannt.

Für die Messstelle *Große Presse 1* wurden Auftragsdaten für den Referenzzeitraum in Echtzeit von einem ERP-System erfasst. Die Buchungen im ERP-System werden generiert, wenn sich der Mitarbeiter aktiv auf eine Chargennummer anmeldet und die Bearbeitung auf einer Maschine anmeldet/abschließt/unterbricht oder ähnliches. Ein entsprechender Zeitstempel in Minutenauflösung wird hinterlegt. Für den Zeitraum von Mittwoch, 8:30 Uhr bis Donnerstag, 13 Uhr lag ein Maschinendefekt der Presse vor. Zu dieser Zeit lief weder die große Presse noch der Kran der großen Presse.

4.5 Analyse

4.5.1 Unternehmensdaten

Die vom Unternehmen bereitgestellten Auftragsdaten für den Referenzzeitraum umfassen 34 Datensätze mit

- Bearbeitungsbeginn und Bearbeitungsende
- Chargennummer
- teilweise Gewicht

- teilweise gepresste Länge

in minutengenauer Auflösung. Es liegen Auftragsdaten für die Große Presse 1 vor. Andere Anlagen sind nicht an das BDE-System angeschlossen. Die Datensätze, wie sie im Anhang in Abb. 8.1 hinterlegt sind, weisen unregelmäßige Lücken zwischen den Aufträgen auf. Die Pausenzeiten gehen aus den Auftragsdaten nicht hervor und müssen nachträglich zur Analyse herausgerechnet werden. Wie eingangs beschrieben werden Pausen unregelmäßig je nach Auftragslage eingelegt. Die Arbeitszeiten, Feiertage oder Ferienzeiten sind den Auftragsdaten nicht zu entnehmen. Auswertungen werden im Nachhinein erstellt.

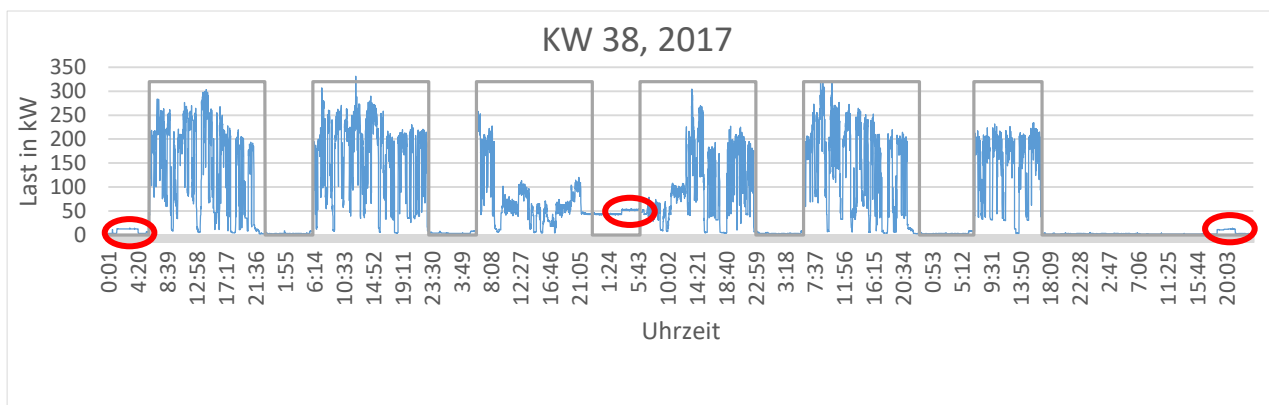
Die später für die Auswertung verwendeten Wetterdaten entstammen der nahegelegenen privaten Wetterstation Neersen. Sie liegt in Willich in einer Entfernung von rund 2 km Luftlinie vom Gelände des Unternehmens. Aktuelle Daten und Aufzeichnungen sind unter [bbs18] erreichbar.

4.5.2 Lastdaten

Vom EVU wurde im Jahr 2017 ein Gesamtverbrauch des Unternehmens von 636.804 kWh abgerechnet. Für den Referenzzeitraum liegen konsistente Lastdaten im Sekundentakt mit nur wenigen Unterbrechungen vor. Die Auswertung erfolgt wie eingangs erwähnt in Minutenauflösung. Die Lastdarstellung der Messstelle *Netzentnahme* findet sich in Abb. 4.3 und in höherer Auflösung im Anhang unter Abb. 8.2. Die Lastdaten der *Großen Presse* sind unter Abb. 4.7 dargestellt. Eine höhere Auflösung mit einer Überblendung der Lastdaten des Krans, sowie den Aufträgen der großen Presse findet sich im Anhang unter Abb. 8.3. Die Last der Messstelle *Dosenpresse* findet sich im Anhang in Abb. 8.5 und die Last der Messstelle *Unterverteilung neue Halle* im Anhang unter Abb. 8.6.

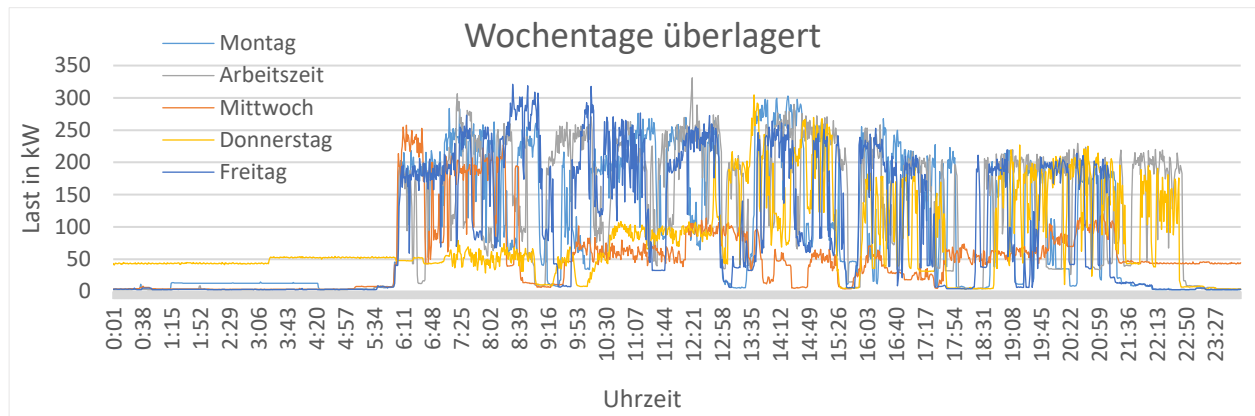
Der Lastverlauf der Messstelle *Netzentnahme* in Abb. 4.3 zeigt eine Grundlast von ca. 3,1 kW und rot markiert einen dreimaligen Anstieg der Last um ca. 9,5 kW über ca. 3 Stunden am Montag, Donnerstag und Sonntag. Zwischen dem Arbeitsende am Mittwoch und Donnerstagmorgen liegt eine zusätzlich deutlich erhöhte Last von durchschnittlich 43,5 kW an. Am Donnerstagmorgen erreicht die Last bei Überlagerung sogar 53 kW. Die Spitzenlast im Wochenverlauf liegt bei rund 330 kW, die durchschnittliche Last liegt zwischen 200 kW und 250 kW.

Abb. 4.3: Lastverlauf an der Netzentnahmestelle in der Referenzwoche



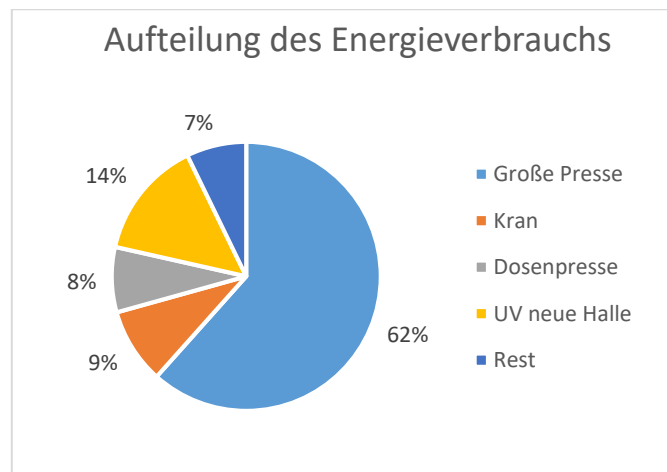
Legt man die Wochentage für die Messstelle *Netzentnahme* wie in Abb. 4.4 übereinander erkennt man wenig Symmetrie, was für einen sehr unterschiedlichen Arbeitsablauf spricht und die Aussagen des Geschäftsführers zu unregelmäßigen Arbeits- und Pausenzeiten belegt. Aus der Grafik ist entnehmbar, dass der Arbeitsbeginn regelmäßig auf 6:00 Uhr und am Sonntag auf 7:00 Uhr fällt. Das Arbeitsende variiert stark, je nach Auftragslage. Es gilt das Prinzip, dass eingehende Aufträge möglichst sofort abgearbeitet werden, um ein Zwischenlagern auf dem Hof zu vermeiden. Dadurch werden die Pausen sehr unregelmäßig eingelegt.

Abb. 4.4: Überlagerung der Tages-Lastgangs an der Netzentnahmestelle



In der Referenzwoche teilt sich der Energieverbrauch an der Messstelle *Netzentnahme* nach Abb. 4.5 auf. Hiernach liegt ein deutlicher Fokus auf der Großen Presse, aber auch der nicht gemessene Rest von 7 % ist beachtlich. Dieser ist ein Indiz, dass ein größerer Verbraucher noch nicht erfasst wird. Eine spätere Begutachtung zeigte, dass die Rotorschere, welche der Zerkleinerung und Sortierung von größeren Teilen dient, in der Datenaufnahme vom Jahr 2017 nicht erfasst wurde. Gemessen an ihrer Anschlussleistung kann sie für den großen Rest nahezu alleinverantwortlich sein.

Abb. 4.5: Aufteilung des Energieverbrauchs der MRS

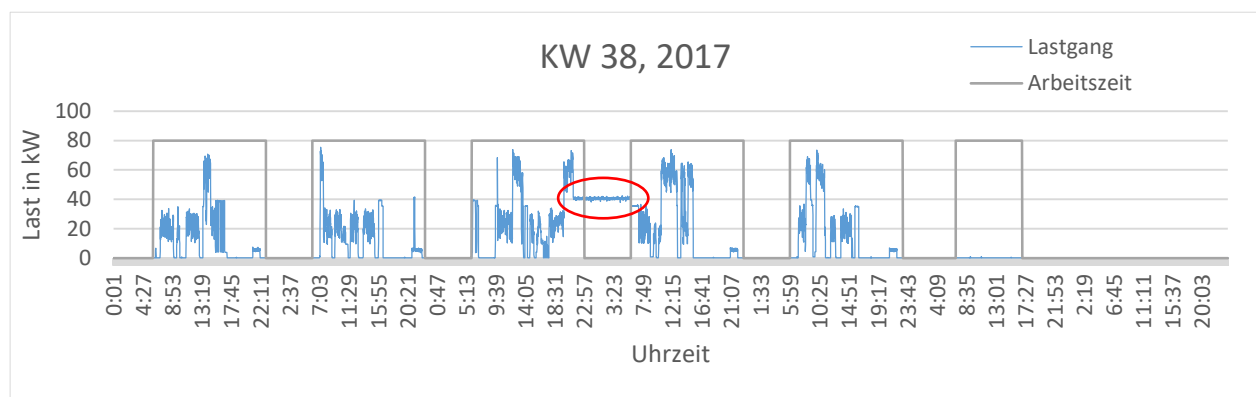


Die im Anhang unter Abb. 8.5 gezeigten Daten der Messstelle *Dosenpresse* sind unauffällig. Die Maschine weist eine Grundlast von rund 40 Watt auf. Die verbauten Antriebe haben eine Leistung von 45 kW. Hinzu kommen noch einige Förderbänder mit zusammen rund 3 kW. Die gesamte Leistung wird laut Lastgang aber nur selten ausgenutzt. Die durchschnittliche Last liegt zusammen bei ca. 30 kW. Lediglich ein auffällig gleichmäßiges Lastplateau bei 14 kW am

Mittwochnachmittag zwischen 16:21 Uhr und 17:08 Uhr fällt auf. Die zu dieser Zeit konsistente Datenlage schließt eine Interpolationerscheinung aus. Eine wertschöpfende Verwendung der Energie scheint aber fraglich und auch das Unternehmen konnte nicht mehr sagen, ob gegebenenfalls eine Wartung dieses Plateau verursacht hat. Für die Berechnung von Einsparpotenzialen sei diese Erscheinung ausgeklammert.

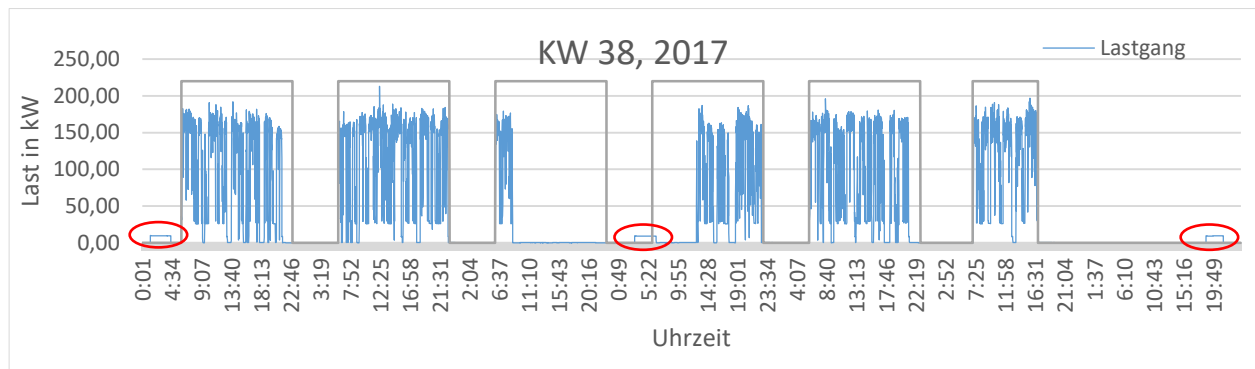
Die Messstelle *UV neue Halle*, dargestellt in Abb. 4.6, weist eine unauffällige Grundlast von rund 135 Watt auf, was etwa dem Standby Verbrauch zweier Maschinensteuerungen entspricht. Die Lastkurve weist zwei verschiedene Muster auf, welche auf die vorhandenen Maschinen zurück zu führen sind. Das eine Muster ist ein zackiger Verlauf mit 10 kW bis 30 kW Last, was dem Kran der Rotorschere zuzuweisen ist. Die Rotorschere selbst wurde trotz einer Nennleistung von 60 kW zum Referenzzeitpunkt noch nicht aufgenommen. Der gleichmäßige Lastverlauf bei rund 35 kW bis 40 kW passt zur frequenzgeregelten Absauganlage, welche sich durch eine Lichtschranke bei zu hoher Staubbelastung selbstständig einschaltet. Sie lief von Mittwoch auf Donnerstag die Nacht durch (rot markiert). Ein täglich auftretendes Lastplateau von 5,5 kW ab 21:00 Uhr gehört ebenfalls zur Absauganlage. Hierbei handelt es sich um einen Reinigungszyklus der Filter, indem mittels Druckluft die Filterpatronen ausgeblasen werden. Dazu wird ein Schraubenkompressor gestartet. Auffällig ist, dass dieser Zyklus unabhängig von den täglichen Benutzungsstunden der Absauganlage immer gleich lang ist und damit unabhängig von der Beladung der Filter.

Abb. 4.6: Lastgang der Messstelle *UV neue Halle*



Die Lastdaten der Messstelle *Große Presse 1* in Abb. 4.7 zeigen eine Last bei Betrieb von rund 160 kW. Die vier baugleichen Antriebe leisten zusammen maximal 220 kW. Die Lastkurve der Anlage weist einen dreimaligen Anstieg um 9,5 kW aus. Eine Begehung der Anlage ergab, dass die Hydraulik der Presse über eine Heizung verfügt, welche das vorrätige Hydrauliköl regelmäßig von 25 °C auf 30 °C aufheizt. Bei einer Temperatur von 53 °C schaltet sich ein Freikühler zur Ölkühlung ein, welcher das Öl wieder auf 45 °C heruntergekühlt. Der Kühler ist auf Grund der verhältnismäßig geringen Leistung von rund 15,5 kW im Lastverlauf nicht eindeutig zu erkennen. Die Heizung ist jedoch deutlich durch ein Rechteck-Signal zu sehen. Innerhalb dieses Temperaturbandes von 25 °C - 45 °C wird eine permanente Einsatzbereitschaft der Presse ermöglicht.

Abb. 4.7: Lastgang der Messstelle Große Presse



Die Analyse des nicht gemessenen, sondern errechneten *Rest* in Abb. 8.7 im Anhang ist in der Hinsicht auffällig, als dass sich eine Grundlast von rund 2,9 kW für ein kleines Unternehmen im oberen Bereich des Normalen befindet. Man darf davon ausgehen, dass sich dieser Rest aus den elektrischen Verbrauchern der Verwaltung, Außenbeleuchtung, Server, Labore etc. zusammensetzt. Die starken Schwankungen sind auf den Messungenauigkeiten beim Betrieb der großen Presse zurück zu führen, das zeigt ein Vergleich mit der Betriebszeit der Presse.

4.5.3 Abgleich zwischen Produktions- und Lastdaten

Da nur für die Messstelle *Große Presse* Produktionsdaten vorliegen, erfolgt deren Abgleich an den Lastdaten der Messstelle *Große Presse* und dem *Kran Große Presse* nach Abb. 8.3 im Anhang. Der Abgleich mit den Auftragsdaten weist Auffälligkeiten in der zeitlichen Übereinstimmung wie folgt auf.

Montag:

- Fehlende Auftragsbuchungen zwischen 6:00 Uhr und 8:34 Uhr, zwischen 9:28 Uhr und 10:08 Uhr und von ca. 20:15 Uhr bis 21:27 Uhr, dann Arbeitsende
- Pause zwischen 9:04 Uhr und 9:15 Uhr wird auf die Charge 19238 gebucht, Pause zwischen 17:57 Uhr und 18:40 Uhr wird auf die Charge 19220 gebucht
- Pausen zwischen 12:56 Uhr und 13:37 Uhr und zwischen 15:33 Uhr und 15:49 Uhr sind gut im Lastgang zu erkennen

Dienstag:

- Fehlende Auftragsbuchung zwischen 6:00 Uhr und 8:44 Uhr
- Pause zwischen 8:49 Uhr und 9:11 Uhr wird auf die Charge 19244 gebucht, Pause zwischen 15:38 Uhr und 15:53 Uhr wird auf die Charge 19209 gebucht, Pause zwischen 17:59 Uhr und 18:30 Uhr wird auf die Charge 19273 gebucht
- Scheinbare Pausen zwischen 19:51 Uhr und 20:10 Uhr, sowie 20:48 Uhr bis 21:04 Uhr. Buchung auf Charge 19273
- Eine Pause gegen 13 Uhr lässt sich in den Lastdaten nicht erkennen

Mittwoch:

- Arbeitsende um 8:35 Uhr, Buchung läuft weiter bis 10:29 Uhr

Donnerstag:

- Teil der Pause von 15:23 Uhr bis 15:34 Uhr wird auf Charge 19260 gebucht, Teil der Pause von 17:44 Uhr bis 18:07 Uhr wird auf Charge 19264 gebucht
- Pause zwischen 21:32 Uhr und 21:50 Uhr wird auf die Charge 19264 gebucht

Freitag:

- Pause zwischen 9:22 Uhr und 9:44 Uhr und zwischen 17:29 Uhr und 18:19 Uhr
- Pause zwischen 11:28 Uhr und 11:45 Uhr bei laufender Presse
- Arbeitsende um 21:19 Uhr

Samstag:

- Fehlende Aufträge von 07:05 Uhr bis 08:15 Uhr und von 09:41 Uhr bis 17:00 Uhr, dann Arbeitsende
- Pause zwischen 09:22 Uhr und 09:40 Uhr wird auf die Charge 19215 gebucht

Zusammenfassend zeigen die Buchungen im BDE-System fast täglich Abweichungen von den Arbeitszeiten, wie sie aus dem Lastgang eindeutig erkennbar sind. Die deutlichsten Abweichungen finden sich in der Buchung von Pausenzeiten, zu Arbeitsbeginn am Morgen und am Samstag. Auf Nachfrage beim Unternehmen hieß es dazu, dass morgens lediglich die Nacharbeit des Vortages erledigt werde und Samstagsarbeit die Ausnahme sei.

4.6 Auswertung

4.6.1 Allgemeines

Datenqualität

Eine Hochrechnung des Energieverbrauchs der Referenzwoche auf ein ganzes Jahr (52 Wochen) nach Tab. 4.1 zeigt nur geringe Abweichungen von rund 2,3 % zu den Abrechnungsdaten des EVU. Das zeigt im Wesentlichen, dass die Referenzwoche einer typischen Woche entspricht und sich als Referenz für ein ganzes Jahr eignet. Die Hochrechnung ist sogar besser als die vom EnMS ausgegebene Jahressumme, welche eine Abweichung von über 6,5 % ausweist. Die relativ hohe Abweichung der Zählersumme des mE-Zählers an der Netzentnahme ist allerdings der Installationssituation geschuldet. Der Zähler des EVU befindet sich auf der Mittelspannungsseite der Versorgung, die Zähler des Beratungshauses auf der Niederspannungsseite. Es werden also die Trafoverluste als Messabweichung des mE Zählers ausgewiesen.

<i>kWh in 2017</i>	<i>ganzes Jahr</i>	<i>Abweichung</i>	<i>Woche</i>
	<i>[kWh]</i>		<i>[kWh]</i>
<i>Hochrechnung aus Woche</i>	622.049	2,32%	11.962
<i>mE Zähler</i>	595.248	6,53%	
<i>Abgerechnet</i>	636.804	0,00%	

Tab. 4.1: Abweichung der Hochrechnung vom abgerechneten Wert

BDE Abweichungen

Die BDE-System Informationen werden zur nachträglichen Auswertung genutzt und nicht zur Planung. Mit Abweichungen innerhalb der gesamten Arbeitswoche, wie sie aus Tab. 4.2 und Abb. 4.8 hervorgehen, ist eine Verwendung des BDE-Systems als Datengrundlage zur Auswertung grundsätzlich in Frage zu stellen. Hier können die Energiedaten eine deutliche Verbesserung der Auswertungsqualität bewirken, da sie Abweichungen durch fehlerhafte oder verzögerte Buchungen nicht zulassen. Außerdem kann mit ihnen ein wesentlicher Kostentreiber, die Energiekosten, direkt pro Auftrag abgerechnet werden. Dargestellt ist ein Vergleich zwischen BDE- und EnMS-Daten hinsichtlich des Anteils produktiver Zeit an den Arbeitsstunden eines Tages. Das ist der Anteil der Arbeitszeit, an dem die der Mitarbeiter, hier der Bediener der Presse, auch wirklich einer wertschöpfenden Tätigkeit nachgeht, also produktiv ist. Der Anteil wird als Produktivität bezeichnet. Als Richtwert hierfür findet man in der Literatur Werte zwischen 6 Stunden und 7,25 Stunden bei 8 Stunden Arbeitszeit, also 75 % - 91 %. (vgl. [ten18])

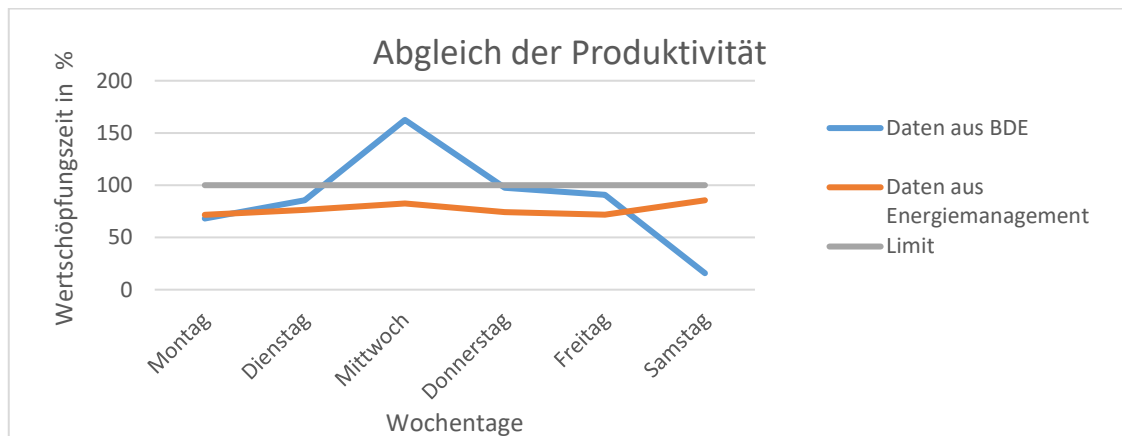
<i>Arbeitszeit</i>	<i>Beginn</i>	<i>Ende</i>	<i>Pause [Std.]</i>	<i>Arbeitszeit [Std.]</i>	<i>laut BDE [Std.]</i>	<i>%</i>	<i>Betriebszeit Presse [Std.]</i>	<i>%</i>
<i>Montag</i>	06:00	21:21	01:00	14,35	9,78	68	10,28	72
<i>Dienstag</i>	06:00	22:49	01:00	15,82	13,53	86	12,07	76
<i>Mittwoch</i>	06:00	08:40	00:00	2,67	4,33	163	2,20	83
<i>Donnerstag</i>	12:45	22:42	01:00	8,95	8,73	98	6,63	74
<i>Freitag</i>	06:00	21:18	01:00	14,30	12,97	91	10,28	72
<i>Samstag</i>	07:05	16:58	01:00	8,88	1,4	16	7,60	86
<i>Durchschnitt</i>						87		77

Tab. 4.2: Abgleich der Arbeitszeiten aus BDE-System und Energiedatenerfassung

Am Donnerstag verbuchte das BDE- System beispielsweise Aufträge von 8,73 Stunden bei einer Arbeitszeit abzüglich gesetzlicher Pausen von 8,95 Stunden. Das entspräche einer Produktivität von 98 % und ist unrealistisch hoch. Gemessen an der elektrisch gemessenen Betriebszeit der Presse liegen 6,63 Arbeitsstunden vor, was einer Produktivität von 74% entspricht, ein durchaus realistischer Wert. Samstags wird die Abweichung noch deutlicher, das BDE-System weist eine Produktivität von nur 16 % auf, obwohl aus den Energiedaten eine deutliche Tätigkeit der Maschine hervorgeht. Die Analyse der Lastdaten bestätigt eine Produktivität von 86 %. Mittwoch ergibt das BDE-System sogar 163 % produktive Zeit, was durch eine fehlerhafte Buchung ausgelöst wird. Die Lastdaten weisen ca. 83 % Produktivität aus.

Eine Darstellung der Abweichungen zwischen den Werten über die Referenzwoche zeigt Abb. 4.8. Darin wird deutlich, dass die produktive Zeit gemessen am BDE-System eine deutlich höhere Volatilität aufweist, als die des Energiemanagementsystems und teilweise unplausibel ist. Außerdem weist das Energiemanagement eine geringere durchschnittliche Produktivität aus, als das BDE-System. Auch eine Auswertung der verarbeiteten Massen oder gepressten Längen wäre denkbar. Hier ist allerdings die Datengrundlage stark lückenhaft.

Abb. 4.8: Abgleich der Wertschöpfungszeiten



Die Abweichungen haben für das Controlling des Unternehmens große Bedeutung, da sich die Auslastung der Maschinen bislang nur durch die Buchungszeiten des BDE-Systems berechnet. Diese sind offenbar durch die Methode der Datenerhebung, also das händische Buchen an Terminals, fehlerbehaftet. Die Daten des Energiemanagementsystems zeigen ein wesentlich genaueres, da unverfälschtes Bild des Unternehmens und von dessen Abläufen und sollten langfristig als Ergänzung zur bisherigen Datenerhebung in Betracht gezogen werden.

4.6.2 Messstelle Große Presse und Kran Große Presse

Temperaturabhängigkeit der Heizzyklen

Die Dauer der Heizzyklen ist in erster Näherung durch die Ölmenge von 5,5 m³, die Temperaturdifferenz der Schwellwerte und durch die Wärmekapazität festgelegt. Ein Abgleich der drei Heizzyklen in Tab. 4.3 zeigt zum einen, dass die gemessene Dauer der Heizzyklen schwankt und zum anderen, dass bei höherer Außentemperatur der Heizzyklus kürzer ist. Aus der Tabelle lässt sich die jeweilige Heizdauer entnehmen. Die Heizleistung ist mit 9,5 kW konstant. Daraus errechnen sich folglich auch unterschiedliche Energieaufnahmen und damit unterschiedliche Kosten.

Ölheizung	Heizbeginn	Dauer [min]	AußenT [°C]	Energie [kWh]	Kosten [Euro]
Montag	01:15	188,00	7,20	30	5,36
Donnerstag	03:20	196,00	7,20	31	5,59
Sonntag	18:40	158,00	16,10	25	4,50
Woche				86	15
Jahr				4462	803

Tab. 4.3: Vergleich der Heizzyklen

Setzt man die gleiche Temperaturdifferenz von 5 Kelvin für alle drei Heizzyklen voraus, so bedeutet dies, dass für die Überbrückung der gleichen Temperaturspanne unterschiedlich viel Energie aufgewendet werden muss. Als Grund für diese Unterschiede kommt nur unterschiedliche Wärmeverluste in Frage, welche durch die unterschiedliche Außentemperatur bedingt sind. Eine Nachfrage beim Unternehmen und eine folgende Besichtigung bestätigt, dass der Behälter nicht isoliert ist. Um die Wärmeverluste zu beheben, empfiehlt sich eine einfache

Isolierung des Stahlbehälters, beispielsweise mit AF-Platten, wie sie in der Chemieindustrie standardmäßig eingesetzt werden.

Zu beachten ist aber, dass die Kühlleistung durch Strahlung und Konvektion mit einer Dämmung merklich gesenkt wird. Der Behälter wird sich schneller aufheizen, langsamer abkühlen und die Einschaltdauer der Kühlung wird sich erhöhen. Dieser Effekt muss mit dem gewählten Regelungskonzept in Einklang gebracht werden und kann je nach Dicke der Dämmung sogar zu zusätzlichen Kosten durch häufigeres Einschalten des Kühlers führen. Eine Simulation des Temperaturverlaufs kann über die energetische Entwicklung Aufschluss geben und die optimale Dicke der Dämmung berechnen.

Vorausschauende Regelung

Aus der Referenzwoche Tab. 4.3 geht hervor, dass eine typische Woche rund 3 Einschaltzyklen der Ölheizung aufweist, was einen jährlichen Energiebedarf von rund 4462 kWh entspricht. Das Einschalten der Heizung pro Woche wurde nach Unternehmensangaben bereits Mitte 2017 optimiert, in dem man den unteren Schwellwert der Regelung gesenkt hat. Davor wurde nach Unternehmensangaben rund doppelt so oft geheizt. Trotzdem bestehen aber sowohl Heizbedarf bei Nichtbenutzung als auch Kühlbedarf bei Betrieb der Presse. Der genaue Kühlbedarf ist nicht bekannt. Der Heizbedarf wird durch die Inbetriebnahme der zweiten Presse und damit einhergehend höheren Stillstandzeiten, aber tendenziell steigen. Eine Isolierung in Kombination mit einer vorausschauenden Regelung kann den Heizbedarf nahezu auf null absenken. Nimmt man eine Reduktion des Heizbedarfs um 90 % entsprechend Tab. 4.4 an, entspricht das einer jährlichen Einsparung von über 4 MWh bei der vorhandenen, bereits optimierten großen Presse.

	Zyklen/ Wo.	T _h	T _l	dT	%	kWh	kWh im Jahr	€	€ im Jahr
Heizung vorher	3	30	25	15	100,00	86	4462	15,45	803
Heizung nachher	0,3	20	15	1,5	10,00	9	446	1,54	80
Ersparnis							4016		723

Tab. 4.4: Ersparnis durch Reduktion der Heizzyklen

Die neue große Presse hat noch keine Optimierung bekommen. Wenn sie mit der gleichen Steuerung wie die alte Presse installiert wird, so kann bei ihr von rund dem doppelten Potenzial ausgegangen werden, also etwa 8 MWh. Zusätzlich werden sich durch die Aufteilung der Aufträge die Stillstandzeiten pro Presse erhöhen. Mit längerem Stillstand sinkt die Wärmezufuhr pro Presse. Resultat wird ein insgesamt niedrigeres Temperaturniveau sein, was zu häufigerem elektrischem Nachheizen führt, wenn dies nicht durch eine intelligente Regelung verhindert wird.

Im Rahmen einer vorausschauenden Regelung können Heiz- und Kühlzyklen auf den absolut notwendigen Bedarf reduziert werden. Die Rahmenbedingungen ergeben sich sowohl aus thermodynamischen Gesichtspunkten, als auch aus den Stoffeigenschaften des Öls. Für das untere Temperaturlimit muss laut dem Ölhersteller bei Betrieb der Taupunkt und die Viskosität des Öls beachtet werden. Bei Absinken der Temperatur unter den Taupunkt kondensiert Luftfeuchtigkeit am kälteren Öl und bildet Tropfen. Bei Betrieb bildet sich dann durch die Hochdruckpumpen eine Emulsion. Der Kontakt mit feuchter Luft ist bei Betrieb durch den

ständigen Luftaustausch im Vorratsbehälter gegeben. Bei jedem Pressvorgang wird Öl heraus und wieder herein gepumpt. Das Volumen wird mit feuchter Umgebungsluft ausgeglichen. Im Stillstand findet kein Austausch mit Umgebungsluft statt, weshalb ein Unterschreiten des Taupunktes bei Nichtbenutzung der Anlage kein Problem darstellt. Die Viskosität steigt außerdem bei sinkender Temperatur des Öls deutlich an. Sie muss mit den Herstellerspezifikationen der Hochdruckpumpen abgeglichen werden. Damit ergibt sich ein weiterer fixer Grenzwert, unter dem die Anlage nicht betrieben werden kann.

Beim elektro-hydraulischen Kran zur Beschickung der Rotorschere hat sich vermutlich durch Wassereinlagerung bereits eine Emulsion gebildet. Er ist der Witterung ungeschützt ausgeliefert, verfügt über keine Heizung, lediglich eine Kühlung. Das muss bei der Ölmenge der großen Presse unbedingt verhindert werden. Schäden an der Anlage durch Emulsionsbildung führen zu Kavitation und langfristig zu Rost. Bei welcher Temperatur der Taupunkt liegt, ist abhängig von Luftdruck und Luftfeuchtigkeit und lässt sich aus meteorologischen Daten entnehmen. Für das Jahr 2017 lag der Taupunkt in Willich am Niederrhein zwischen 0 °C und 15 °C. (vgl. [bbs18])

Das obere Temperaturniveau von aktuell 53 °C ist beliebig gewählt. Laut Ölhersteller sind in der Praxis regelmäßig Temperaturen von 60 °C - 80 °C anzutreffen, wenn auch mit Einbußen bei der Standzeit. Der Anlagenhersteller bestätigt dies und versichert, dass sich aktuelle Anlagen bis zu einem Schwellwert von 68 °C aufheizen. Es gilt die Regel, dass sich die Standzeit des Öls bei einer Erwärmung um 10 °C jeweils halbiert. Für das Unternehmen bedeutet das also, dass eine Kühlung bei Temperaturen bei 53 °C technisch nicht zwingend notwendig ist. Eine Erhöhung des Schwellwertes wäre möglich und müsste lediglich auf seine Wirtschaftlichkeit hin geprüft werden.

Regelungstechnisch bedarf das Konzept einer groben Einsatzplanung der Presse, der IST-Temperatur des Öls, einigen Maschinenparametern und Temperaturdaten aus den Wetterdaten. Der Gradient der Abkühlung bei Stillstand lässt sich bereits aus den Lastdaten abschätzen, wenn man zum Arbeitsende ein Erreichen des oberen Temperaturniveaus voraussetzt und die Zeit bis zum nächsten Heizzyklus misst. Der Abkühlungsgradient ist abhängig von der Temperaturdifferenz zwischen Öl und Umgebung. Die Ist-Temperatur kann der Maschinensteuerung entnommen werden. Der jeweils aktuelle Taupunkt und die Temperaturprognose wird von Wetterdiensten online zur Verfügung gestellt und kann automatisiert in einer Datenbank abgelegt werden. Mit der Ist-Temperatur des Tanks, der Außentemperatur und dem Temperaturgradienten sollte eine Aussage über den Temperaturverlauf möglich sein.

Standby-Strom der Presse

Ein Abgleich zwischen den Lastdaten der Großen Presse und den Lastdaten des Krans der Großen Presse zeigt, dass es signifikant viele Zeiten gibt, in denen der Kran nahezu ohne Last ist, die Große Presse aber auf einem Niveau von rund 26 kW Standby-Last betrieben wird. In der Referenzwoche trifft dies auf über 6,3 Stunden zu. Für die Zeiten, in denen der Kran der Großen Presse nahezu unbelastet ist, weist Tab. 4.5 die durchschnittlichen Lasten der Großen Presse und des Krans der Großen Presse aus. Da die Große Presse vom Kran befüllt wird, kann es sich bei den ausgewiesenen Zeiten nur um Warte- oder Pausenzeiten handeln, in denen die Anlage nicht zur Wertschöpfung beiträgt. Setzt man eine Reduktion dieser Zeiten um 90 % und einen Strompreis von 18 Cent/kWh an, ergibt sich eine Einsparpotenzial von 1400 € jährlich. Das Potenzial lässt sich auf einfache Weise mit einer Arbeitsanweisung heben. Die Einhaltung kann vom Energiemanagementsystem überwacht werden, indem die getätigte Auswertung regelmäßig

wiederholt wird. Die Präsentation der Ergebnisse vor der Geschäftsführung im Juni 2018 führte zu einer kurzfristigen Umsetzung der Arbeitsanweisung.

<i>Abgleich Kran/Presse</i>	<i>Zeit[min]</i>	<i>mittlere Last Presse [kW]</i>	<i>mittlere Last Kran [kW]</i>	<i>Einsparung um 90% [kWh]</i>	<i>Ersparnis [Euro]</i>
<i>Montag</i>	59,00	26,09	0,11	23	4,2
<i>Dienstag</i>	102,00	26,61	0,08	41	7,3
<i>Mittwoch</i>	15,00	26,30	0,07	6	1,1
<i>Donnerstag</i>	48,00	26,39	0,08	19	3,4
<i>Freitag</i>	92,00	26,96	0,08	37	6,7
<i>Samstag</i>	63,00	26,57	0,07	25	4,5
<i>Woche</i>	379,00			151	27,2
<i>Jahr (52 Wo.)</i>	19.706			7.854	1.413,7

Tab. 4.5: Mögliche Ersparnis bei Nutzung von Stillstandzeiten

4.6.3 Messstelle UV neue Halle

Absauganlage

Eine Verschmutzung der Lichtschranke war der Grund dafür, dass die Absauganlage von Mittwoch, 21:20 Uhr bis Donnerstagmorgen auf Vollast bei rund 40 kW lief. Dies verursachte einmalige Stromkosten nach Tab. 4.6 in Höhe von rund 70 €. Das Problem ist allerdings bekannt und tritt häufiger auf. Unter der Annahme, dass das Problem zehnmal pro Jahr auftritt, lägen die Kosten bei über 700 € pro Jahr. Darüber hinaus gab es Schäden an der Halle. Durch die Fehlfunktion wurde in dem geschlossenen Gebäude ein so starker Unterdruck erzeugt, dass der Mitarbeiter am nächsten Morgen die Tür zur Halle nicht allein öffnen konnte um die Anlage abzuschalten. Das Hallentor wurde durch den Unterdruck massiv eingedrückt und ließ sich ebenfalls nicht mehr öffnen. Eine gleiche Fehlfunktion bei zusätzlicher Schneelast auf dem Dach hätte die Stabilität der Halle insgesamt beeinträchtigen können. Wäre im Falle eines Brandes der Zutritt versperrt, sind die Folgekosten kaum abzuschätzen. Der Fehlfunktion wurde daher erhöhte Aufmerksamkeit zugeschrieben.

<i>Beschreibung</i>	<i>Dauer [Min]</i>	<i>Energie [kWh]</i>	<i>Kosten [Euro]</i>	<i>Kosten pro Jahr [Euro]</i>
<i>Absauganlage läuft über Nacht</i>	593,00	394	70,85	708,50

Tab. 4.6: Jährliche Kosten bei Fehlfunktion der Absauganlage

Bei der Diskussion von Lösungen kam heraus, dass die Lichtschranke zum Einschalten der Absauganlage nicht den Staubgehalt der Luft, sondern das Einfahren von Fahrzeugen in die Halle detektiert. Man ging davon aus, dass immer beim Abkippen eines LKWs Staub entsteht. Die Laufzeit der Anlage wurde in der Steuerung vorgegeben. Damit wurde augenscheinlich die Ursache der Staubbelastung erfasst, aber zwei Fälle außer Acht gelassen. Zum einen fahren regelmäßig auch andere Fahrzeuge in die Halle, welche die Abluftanlage unnötig auslösen, zum

anderen entsteht nicht bei jedem Abkippen von Material Staub. Zur Behebung der Fehlfunktion wurde der Einsatz eines Partikelmessgerätes vorgeschlagen. Dieses ließe sich direkt in der Halle positionieren und wäre unabhängig von einfahrenden Fahrzeugen. Damit würde der Staub detektiert und nicht nur das Indiz dafür, wann Staub entsteht. Die Geräte sind allerdings teuer.

Eine andere Option wäre eine zweite Lichtschranke zu installieren und beide weiter innen und höher in der Halle. Diese würde dann nur bei einem wirklich kippenden LKW auslösen, nicht schon bei einfahrenden Fahrzeugen. Gegen eine erneute Fehlfunktion kann eine regelmäßige Reinigung in den Wartungsplan übernommen werden und die Anlage an das Produktionsplanungssystem angeschlossen werden. So kann die Absauganlage nur dann in Betrieb gehen, wenn auch gearbeitet wird. Das schließt eine Fehlfunktion durch äußere Einflüsse weitestgehend aus. Die Redundanz der Lichtschranken würde außerdem eine gegenseitige Kontrolle ermöglichen. Löst etwa nur eine Lichtschranke aus, die andere nicht, könnte eine Reinigungshinweis per E-Mail verschickt werden. Durch die dann geringeren Einschaltzeiten reduziert sich auch die Filterreinigung beträchtlich. Die Lösung lässt sich mit einer einfachen SPS zu geringen Kosten von rund 2000 € umsetzen.

Die Filterreinigung der Absauganlage findet täglich und unabhängig von der Einschaltdauer der Absauganlage statt. Kriterium für einen Reinigungszyklus scheint nur der generelle Betrieb der Absauganlage zu sein. In Tab. 4.7 sind die Betriebsdauer der Absauganlage und die Dauer der Reinigungsintervalle gegenüberstellt. Man sieht, dass die Dauer der Reinigung konstant ist, sich die Betriebszeiten aber deutlich unterscheiden. Die Reinigung am Dienstag wurde durch ein Einschalten unterbrochen, danach aber neu gestartet. Diese Fahrweise der Filter sichert zwar deren Beständigkeit, ist aber energetisch nicht optimal. Für die Reinigung der Filtersäcke, werden diese mit Druckluftstößen rückgespült. Die elektrische Last resultiert aus der Stromaufnahme des Kompressors.

<i>Absauganlage</i>	<i>Laufzeit [min]</i>	<i>Reinigung [min]</i>	<i>Last bei Reinigung [kW]</i>	<i>Energieersparnis bei 60 % [kWh]</i>	<i>Ersparnis [Euro]</i>
<i>Montag</i>	120,00	66,00	5,50	4	0,65
<i>Dienstag</i>	79,00	64,00	5,50	4	0,65
<i>Mittwoch</i>	416,00	0,00	5,50	0	0,00
<i>Donnerstag</i>	648,00	66,00	5,50	4	0,65
<i>Freitag</i>	161,00	66,00	5,50	4	0,65
<i>Jahr (220 Tage)</i>				749	135

Tab. 4.7: Optimierte Absauganlage

Die Mögliche Einsparung bei einer Adaption der Filterreinigung auf die Betriebszeit der Absauganlage ist nur schwer abzuschätzen, da die Filterbeladung über die Zeit nicht bekannt ist. Bei einer angenommenen Verkürzung der Reinigungsdauer um 60 % betrüge die Kosteneinsparung rund 135 € im Jahr. Eine Verringerung der Einschaltzeiten der Absauganlage ist noch nicht berücksichtigt. Bei der Begehung der Anlage zeigte sich, dass die Reinigung mit einem Eingriff in die vorhandene Anlagensteuerung für rund 500 € anpassbar ist.

4.7 Zusammenfassung

In den vergangenen Abschnitten wurde deutlich, dass das Unternehmen MRS trotz eines bislang relativ kleinen Maschinenparks ein wesentliches Einsparpotenzial besitzt, welche zum Zeitpunkt der Auswertung auf das Jahr 2017 bezogen mindestens 24,58 MWh ausmacht. Das entspricht rund 3,86 % des Gesamtstrombedarfs von 2017 und rund 4426 €. Die Einsparung teilt sich nach Tab. 4.8 auf. Die beiden größten Anteile entfallen auf die alte und neue Presse, ihr Regelverhalten und die Standby-Verbräuche. Bemerkenswert ist, dass die Senkung von Standby-Verbräuchen rund ein Drittel der Einsparung ausmacht. Rund die Hälfte des Gesamtpotenzials entfällt auf die Änderung der Regelcharakteristik. Das Verhindern einer Fehlfunktion der Abluft macht energetisch nur rund 16 % des Potenzials aus, wobei Sicherheitsaspekte und mögliche Schäden noch nicht betrachtet sind. Die Optimierung der Filterreinigung ist auf Grund der geringen Last wenig attraktiv. Nicht betrachtet ist die Umstellung auf LED-Beleuchtung, welche noch aussteht, sowie eine Beleuchtungssteuerung mittels Helligkeitssensoren.

	<i>Einsparung</i>			<i>Kosten</i>	<i>Amortisationszeit</i>
<i>Einsparung</i>	kWh	€	%	€	
<i>Standby Presse</i>	7.854	1.414	31,94%	0	0,0
<i>Abluft (10x im Jahr)</i>	3.937	709	16,01%	2.000	2,8
<i>Filterreinigung</i>	749	135	3,05%	500	3,7
<i>Ölheizung Presse 1</i>	4.016	723	16,33%	5.000	6,9
<i>Ölheizung Presse 2</i>	8.032	1.446	32,67%	5.000	3,5
<i>Alle Maßnahmen</i>	24.588	4.426		12.500	2,8

Tab. 4.8: Einsparpotenziale der MRS zusammengefasst

Bei vollständiger Umsetzung der dargestellten Maßnahmen würden die Kosten des Unternehmens MRS um den oben genannten Betrag sinken und damit im gleichen Maße die Gewinne steigen. Bei einem Jahresüberschuss von 44.781 € im Jahr 2017 (vgl. [JAB17]) entspräche dies einer Gewinnsteigerung um 9,88 %.

Die entstehenden Kosten für den Umbau der Regelcharakteristik beider Öltanks wird vom Beratungshaus auf rund 10.000 Euro geschätzt. Die Erstellung einer Arbeitsanweisung kann monetär nicht beziffert werden. Die Adaption der Filterreinigung erfordert Arbeitsleistung in Höhe von rund 500 €. Die Staubdetektion durch eine zweite Lichtschranke kann für rund 2000 € in Betrieb genommen werden. Es ergeben sich Gesamtkosten von rund 12.500 € für eine vollständige Umsetzung. Nach Formel (4.1) errechnet sich die Amortisationszeit der Maßnahmen in Summe zu 2,8 Jahren.

$$\frac{12.500\text{€}}{4426\frac{\text{€}}{\text{Jahr}}} = 2,8 \text{ Jahre} \quad (4.1)$$

Bezüglich der Standby-Zeiten ist zu sagen, dass die mögliche Einsparung von rund 1400 € im Jahr sicherlich nicht unbedeutend ist, es aber sinnvoller wäre in der Zeit wirtschaftlich zu arbeiten und die Presse auszulasten. Geht man davon aus, dass die Presse als Bottleneck der Verarbeitung den Umsatz und damit den Gewinn limitiert, wirkt sich eine Erweiterung der Kapazität sofort positiv auf den Gewinn aus. In den genannten unproduktiven Zeit von 19.708 Minuten pro Jahr, das entspricht rund 328,5 Stunden oder 22,3 Tagen mit 2-Schicht-Betrieb

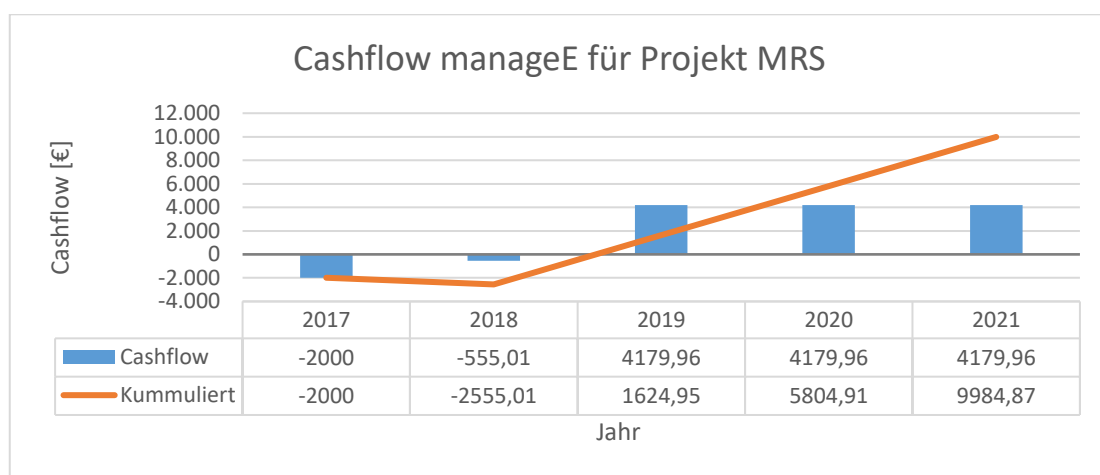
(14,75 Arbeitsstunden) entgeht dem Unternehmen nach Formel (4.2) ein Gewinn von fast 4.540 €. Das sind 10,1 % des Jahresgewinns von 2017 und in einer Maßnahme mehr, als durch alle oben genannten Einsparungen zusammen erreicht werden kann. Zu Grunde liegt der Jahresgewinn im Jahr 2017 von 44.781 € (vgl. [JAB17]) und eine Schätzung von regulär 220 Arbeitstagen im Jahr.

$$44781 \text{ €} * \frac{22,3 \text{ Tage}}{220 \text{ Tage}} = 4539,2 \text{ €} = 10,1 \% \text{ v. Jahresgewinn 2017} \quad (4.2)$$

Über die energetische Analyse wurde außerdem ein ganzheitlicher Umbau der vorhandenen HQL-Leuchten auf LED-Beleuchtung angestoßen, welcher während der Erarbeitung der Thesis gerade durchgeführt wird. Außerdem wird die Regelung der LEDs zukünftig mittels Helligkeitssensor erfolgen, statt wie bisher in Handsteuerung. Die HQL Leuchten werden bislang den Tag hindurch im Dauerbetrieb betrieben.

Für das Beratungshaus bedeutet eine Einsparung von 24.588 kWh jährlich beim Kunden eine Förderung seitens der BAFA in Höhe von 4.180 € jährlich für die verbleibenden Jahre, in denen die Einsparung nachgewiesen werden kann. Als Grundlage sei nach Kapitel 2.3 eine Förderung von 17 Cent/kWh angesetzt. Die Installation kann frühestens Oktober 2018 erfolgen, was für das Jahr 2018 eine maximale Förderung von 3/12 der Jahressumme bedeutet. Ab 2019 kann mit der vollen Förderung gerechnet werden. Mit der Installation von 3 Controllern und 15 Messstellen musste das Beratungshaus mit rund 4000 Euro Material- und Lohnkosten bereits 2017 in Vorleistung treten. Diese wurden im gleichen Jahr zu 50 % erstattet. Dazu kommen Personalkosten für die Auswertung, Planung und Betreuung des Umbaus im Jahr 2018 von ca. 8000 Euro, welche zu 80 % im gleichen Jahr gefördert werden. Nebenkosten wie Fahrtkosten und Verwaltungsaufwand seien vernachlässigt. Daraus ergibt sich ein Cashflow nach Abb. 4.9, welcher erstmalig im Jahr 2019 positiv ist.

Abb. 4.9: Cashflow aus dem Projekt MRS



Summiert man den Cashflow für das Projekt auf, so geht aus der Tabelle hervor, dass der Break-even ebenfalls im Jahr 2019 liegt. Hier sind erstmalig die kumulierten Einnahmen höher als die kumulierten Ausgaben, es wird also ein Gewinn erwirtschaftet. Die Auszahlung des Förderungsbetrages seitens der BAFA erfolgt end-jährlich. Es kann also von einer

Amortisationszeit von rund 2,5 Jahren seit der Installation der Messgeräte im Jahr 2017 ausgegangen werden.

Vorausschauende Regelung

Das Modell der vorausschauenden Regelung bietet sich zunächst bei der Großen Presse, aber nach Inbetriebnahme auch bei der neuen Großen Presse an, da diese

- mit ihren Heizkurven eine feste Temperaturschwelle zur Inbetriebnahme voraussetzen, die Grenze also bislang statisch ist
- sie mit dem bestehenden Heizkonzept viel Energie verbrauchen
- ihr Einsatz gut planbar ist

Als Einsatzbedingung einer vorausschauenden Regelung ist lediglich das Vorhandensein einer Planung zu nennen, was bei der MRS auf Grund der Unternehmensgröße bislang nicht nötig war. Eine Erweiterung der vorhandenen Datenbank des EnMS um eine Auflistung der Arbeitszeiten ähnlich einem Kalender scheint technisch problemlos und relativ kostengünstig mit bewährter Technik umsetzbar.

Um eine vergleichbare Aussage zum gesamten Potenzial einer vorausschauenden Regelung geben zu können, ist es notwendig, die bereits getätigte Optimierung heraus zu rechnen. Bei einem berechneten Potenzial von rund 4000 kWh jährlich für eine bereits optimierte Presse, läge das Potenzial für zwei unberührte Pressen bei rund 16 MWh jährlich. Unter der Annahme, dass der Energieverbrauch des Unternehmens vorerst nicht signifikant steigt, entspräche das einem Potenzial von knapp 2,52 % des Gesamtjahresenergieverbrauchs von 2017.

Lastprognose

Für eine präzise Lastprognose fehlen dem Unternehmen derzeit ein funktionierendes Produktionsplanungssystem, sowie einzuhaltende Pausen- sowie Arbeitszeiten. Mit dem aktuellen BDE-System kann nur im Nachhinein eine Auswertung erfolgen. Die Referenzwoche zeigt, dass zwar ein regelmäßiger Betriebsbeginn der großen Presse um 6:00 Uhr zu erwarten ist, die genaue Uhrzeit jedoch keineswegs sicher ist. Wohl ist der Maschinendefekt an der Presse am Mittwoch eher die Ausnahme, aber auch der Übernacht-Betrieb der Absauganlage sollte die Ausnahme sein, sowie die Samstagsschicht. Das gemeinsame Auftreten in einer zufälligen Woche fällt auf und erschwert eine zuverlässige Lastprognose.

Generell reicht für eine Lastprognose eine einfache Produktionsplanung mit einem Kalender bereits aus. Um dem Unternehmen einen zusätzlichen Mehrwert zu schaffen sollte das Planungsinstrument auch Aufgaben einer Auftragsplanung übernehmen können. Das kann aber in den nächsten Optimierungsschritten erfolgen. Wesentlich, dass Defekte schlecht vorhersehbar sind, könnte so doch ein grobes Lastprofil mit Durchschnittswerten prognostiziert werden. Ist die Auslastung durch ein Planungsinstrument bekannt, würde es sowohl dem Unternehmen, als auch dem Kunden Sicherheit bei der Planung geben. Mit einer präziseren Planung könnten Wartezeiten von LKW an der Einfahrt minimiert werden, weil die aktuellen Prozesse besser terminiert werden können. Die Kombination mit einer schlanken Lagerplatzverwaltung und der Inbetriebnahme der zweiten Presse könnte das Abladen auf dem Hof vollständig vermeiden helfen.

Lastflexibilisierung

Lastflexibilisierungspotenzial besteht bei dem Unternehmen in mehreren Bereichen. Die Ölheizung der beiden großen Pressen aktiviert sich aktuell temperaturgesteuert. Bereits jetzt lässt sich mit einem Temperaturabgriff an der Maschinensteuerung nicht nur die Zeit bis zum Einschalten der Heizung prognostizieren, der Temperaturverlauf gibt auch einen Freiraum, wie lange und wann zu geheizt werden kann. Dies wäre ein Ansatz für eine Lastverschiebung im Sinne des Lastmanagements. Mit einer Einzel-Heizleistung von nur jeweils 9,5 kW ist das alleinige Potenzial jedoch als klein einzustufen. Die zeitliche Differenz liegt bei einigen Stunden.

In der Benutzung der Großen Presse liegt bislang kaum Potential, da die Aufträge umgehend bei Eingang der Ware abgearbeitet werden. Eine Flexibilisierung nach den Ansprüchen eines Netzbetreibers würde mit den entstehenden Wartezeiten zu Lasten der Lkw-Fahrer gehen oder die Lagerhaltung erhöhen. Das entspricht nicht den Zielen des Unternehmens.

Mit der Inbetriebnahme der zweiten Großen Presse ist eine gemeinsame Maximalleistung von 440 kW installiert. Bei gleichzeitigem Betrieb werden Lastspitzen erzeugt, was zu einer Erhöhung des Leistungspreises pro kWh führen wird. Mit der vorhandenen Mess- und Regeltechnik könnte eine Taktung der beiden Pressen erfolgen, um die Spitzenlast zu senken.

Die Dosenpresse eignet sich zur Lastflexibilisierung, da sie mit einer durchschnittlichen Leistung von 20 kW über den Tag verteilt genutzt wird. Ihr Einsatz richtet sich bislang flexibel nach dem Auftragseingang, was eine Planung erschwert. Eine flexible Benutzung ließe sich mit einem Vorlauf von rund einem Tag jedoch planen.

Der Einsatz einer Lastflexibilisierung wird durch den aktuell gewählten EVU allerdings nicht unterstützt, was eine weitere Beschäftigung mit dem Thema nahezu ausschließt.

5 Umsetzung der vorausschauenden Regelung an der bestehenden großen Presse

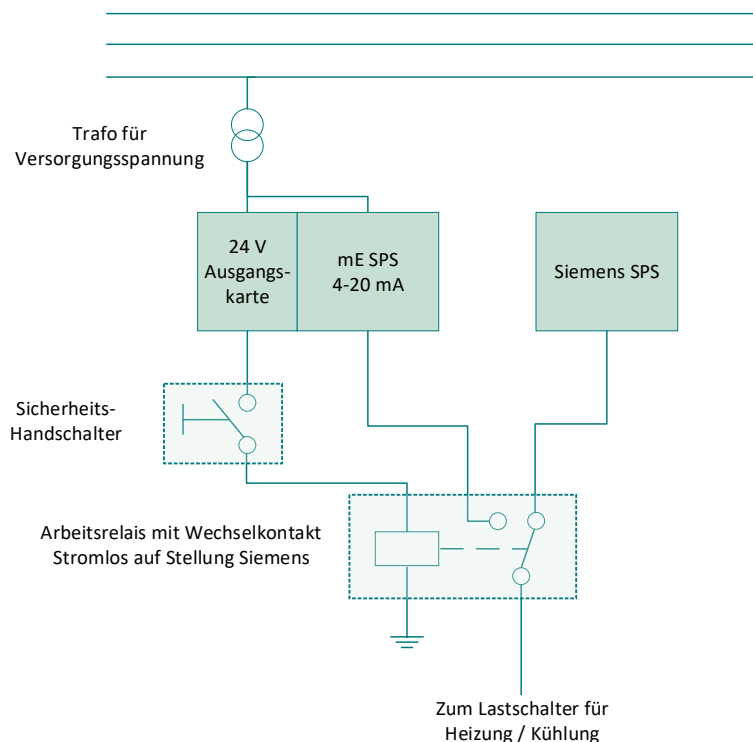
5.1 Elektrotechnische Anbindung

Auf Basis der Konzeptionierung in Kapitel 3.1 stellt sich die Frage, wie eine zweite SPS Eingriff auf einen Regelkreis einer anderen Steuerung nehmen kann. Dazu folgende Randbedingungen und Informationen:

- Die vorhandene SPS der großen Presse ist eine Siemens S7-300
- Eingriff auf die vorhandene Steuerung zu nehmen bedeutet ein Erlöschen der Gewährleistung des Herstellers für die gesamte vorhandene Maschinensteuerung
- Die Kommunikation zwischen SPS-Steuerungen bedeutet in jedem Fall einen hohen Aufwand für Konzeptionierung und Programmierung
- Bei Fehlern in der Programmierung kann die Maschine vollständig ausfallen, was einem Produktionsausfall gleichkäme
- Die Temperatur des Tanks wird vom Temperatursensor mit einem digitalen 4-20 mA Signal an die Siemens SPS gesendet
- Für die Außentemperatur liegen an der Maschine keine Messwerte vor

Um die nötige Betriebssicherheit herzustellen, soll die parallele Installation einer hauseigenen SPS nach Abb. 5.1 erfolgen.

Abb. 5.1: Verschaltung der vorhandenen Siemens SPS mit neuer mE SPS



Eine parallele Installation bedeutet, dass eine Entscheidung getroffen werden muss, wann welche SPS den Zugriff auf Heizung bzw. Kühlung bekommt. Aus Sicherheitsgründen sollte bei Ausfall der mE SPS die vorhandene Steuerung einspringen. Sie hat ihre Funktion bereits seit Jahren unter Beweis gestellt, somit wäre ein Ausfall der mE SPS für den Betrieb der Maschine folgenlos. Elektrotechnisch bedeutet das, dass die mE SPS nur eingreift, wenn sie funktionstüchtig ist. Außerdem soll der Bediener die Möglichkeit bekommen, auch bei korrektem Betrieb beider SPS zwischen diesen wechseln zu können.

Als Eingriffsmöglichkeit bietet sich die Niederspannungsseite der jeweiligen Schaltung von Heizung und Kühlung an. Diese werden jeweils über ein Schütz zugeschaltet, welches mit einer Spannung von 24 V angesteuert wird. Diese Steuerspannung kann über ein Relais mit Wechselkontakt jeweils von der vorhandenen Siemens SPS oder der nachgerüsteten mE SPS kommen. Die Ansteuerung des Relais erfolgt über eine Erweiterung der mE SPS. Fällt die mE SPS aus, würde das Relais zur Sicherheit auf die Stellung „Siemens SPS“ zurückfallen. Die Ansteuerung durch die mE SPS kann aber auch händisch unterbrochen werden, indem der Bediener den Handschalter betätigt.

Durch die vollständig separierte Bauart entfällt der Eingriff in die vorhandene Steuerung und die gesetzliche Gewährleistung auf die Programmierung der Siemens-Steuerung bleibt unberührt. Technisch ist die Erweiterung unkompliziert, da lediglich ein Relais für die Kühlung, sowie eines für die Heizung nachgerüstet werden müssen. Als Handschalter kann ein klassischer Tastschalter verwendet werden, mit dem zugleich die Regelung für Kühlung und Heizung unterbunden werden können.

5.2 Physikalische Grenzen

Die Funktion der Großen Presse wird durch Randbedingungen beschränkt. Jeder der Parameter hat Einfluss auf die Maschine und muss daher in der Regelungstechnik Anklang finden.

Der **Taupunkt** ist wie eingangs erwähnt die Temperatur, bei der Wasser aus der Umgebungsluft an der temperierten Oberfläche, das kann auch das Öl sein, auskondensiert. Er stellt einen der unteren Grenzen der Regelung dar, da ein Auskondensieren bei Betrieb der Anlage zu Schäden führen würde. Bei Stillstand der Anlage kann der Taupunkt unterschritten werden. Der Taupunkt lässt sich aus Wetterdaten berechnen und ist im Wesentlichen abhängig von der Temperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit. Seine Berechnung erfolgt anhand der Magnus-Formel nach Formel (5.1). Die eingesetzten Parameter a und b sind temperaturabhängig und hier für den Bereich größer 0 °C angegeben.

$$Taupunkt [^{\circ}C] = \frac{b * v}{a - v}$$

$$mit v(r, T) = \log_{10} \left(\frac{Dampfdruck(r, T)[hPa]}{6,1078} \right), \quad (5.1)$$

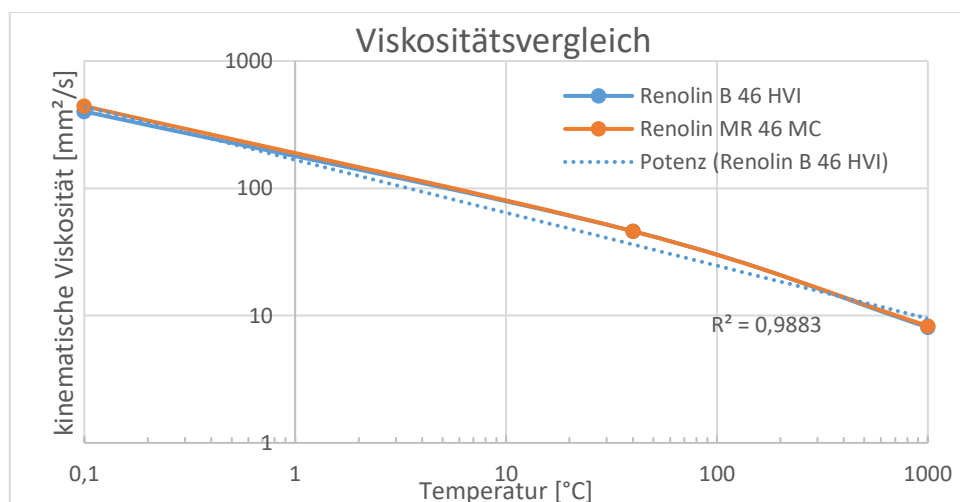
$$a = 7.5, \quad b = 237.3 \quad \text{für } T \geq 0$$

Die **Wasseraufnahme** des Öls aus der Umgebungsluft bei niedriger Temperatur ist ein Effekt, der auftritt, wenn der Taupunkt unterschritten wird. Durch den ständigen Luftaustausch im Vorratsbehälter der Presse besteht bei Betrieb intensiver Kontakt zwischen Öl und feuchter Luft. Das verwendete Öl hat laut Hersteller eine Wasser-Aufnahmefähigkeit von rund 500 ppm. Darüber hinaus neigt das Öl zum Demulgieren, das Wasser wird ausgeschieden. Das ermöglicht eine Wasserabtrennung mittels Wasserabscheider. Bei mechanischer Beanspruchung in einer Pumpe bleibt eine Emulsionsbildung dennoch nicht vollständig aus. Es wird daher für eine zusätzliche Trocknung des Öls gesorgt. Bei Ansammlung größerer Mengen Feuchtigkeit ist mit Schäden an der hydraulischen Anlage zu rechnen. Dazu zählen insbesondere Oxidation und Kavitation an Pumpen und Leitungsübergängen. Rost an den Ventilen würde zu einem Verlust der Steuerungsfähigkeit der Maschine führen. Wasser trägt außerdem zur chemischen Alterung des Öls bei.

Die **Eigenschaften des Öls** sind ebenfalls temperaturabhängig. Bei niedriger Öltemperatur steigt die Viskosität exponentiell an, bis beim sogenannten Pourpoint, der Stocktemperatur bei etwa -45 °C , das Öl definitionsgemäß nicht mehr fließt. Die Hersteller der Hydraulikpumpen weisen in ihren Betriebsanleitungen darauf hin, dass die Pumpe nur in der Lage ist, den erforderlichen Betriebsdruck aufzubauen, wenn die Hydraulikölviskosität nicht über einem bestimmten Wert liegt. Damit liegt eine weitere Bedingung für die Mindesttemperatur des Öls bei Beginn der Arbeiten vor. Vom Hersteller der Anlage wird eine Untergrenze von 20 °C bei Bearbeitung vorgegeben.

Eine hohe Viskosität gewährleistet die Ausbildung eines tragfähigen Schmierfilms, der eine gleichbleibende Funktion der Hydraulik und eine ausreichende Abdichtung des Druckölsystems ermöglicht. Eine niedrige Viskosität durch zu hohe Temperatur führt zu einem Abreißen des Schmierfilms und damit zu Schäden an den beweglichen Teilen der Pumpen. Vom Ölhersteller wurden die Daten für das Diagramm in Abb. 5.2 geliefert. Der Maschinenhersteller liefert die Presse mit einem Fuchs Renolin B 46 HVI Mineralöl aus. Als Option mit ähnlichem Viskositätsverlauf bietet der Ölhersteller ein synthetisches Öl an, Renolin MR 46 MC, dessen Fließeigenschaften dem Mineralöl ähneln.

Abb. 5.2: Viskosität zweier ähnlicher Öle für Hydraulikanlagen (vgl. [Fuc18], [Fuc16])

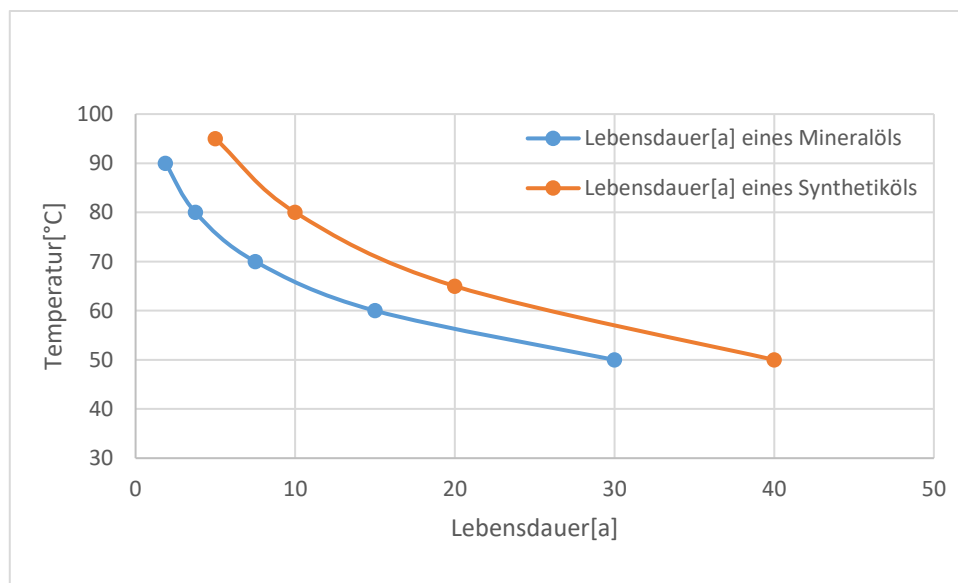


Aus dem Diagramm geht hervor, dass die Anforderungen der Anlage mit den zwei verschiedenen Ölen nahezu gleich gut erfüllbar sind. Das hier blau gekennzeichnete Öl ist das aktuell

verwendete Gruppe 1-Öl, also ein einfach destilliertes Mineralöl, welches mit einem Preis von rund 2 € pro Liter bereits eine relativ hohe Viskosität bis in hohe Temperaturen aufweist. Das Vergleichbare höherwertige Öl, hier rot dargestellt, ist ein vakuumdestilliertes Gruppe 3-Öl mit einer um den Faktor 4 verbesserten Haltbarkeit bei einem Preis von rund 3 € pro Liter. Die Darstellung der Viskosität erfolgt doppellogarithmisch in einem Ubbelohde-Walter Diagramm. (vgl. [Her14]) Der Viskositätsabfall wird hierin linearisiert dargestellt.

Die Qualität des Öls spielt bei seiner **Standfestigkeit** eine entscheidende Rolle. Wie oben beschrieben kann bei vergleichbaren physikalischen Eigenschaften eine deutlich gesteigerte Lebenserwartung erreicht werden. Aktuell wird das vorhandene Öl jährlich auf seine verbleibende Qualität hin überprüft und gegebenenfalls gereinigt. Ein Austausch fand seit der Inbetriebnahme der Anlage im Jahr 2010 nicht statt. Bezüglich der Alterung von Öl muss zwischen einer Verunreinigung mit Fremdstoffen, wie Abrieb oder Wasser, und einer chemischen Alterung unterschieden werden. Vorhandene Partikel im Öl können herausgefiltert werden, was aktuell jährlich geschieht. Gegen die chemische Alterung des Öls hilft nur eine niedrige Temperatur. Als Faustformel wird eine Halbierung der Lebensdauer bei Erhöhung der Betriebstemperatur um 10 °C, oberhalb von 50 °C angenommen. Unterhalb von 50 °C findet keine nennenswerte Ölalterung statt, da die dazu nötige Reaktion mit Sauerstoff erst darüber einsetzt. Beim Synthetiköl findet eine Halbierung der Standzeit erst bei jeweils 15 °C Temperaturerhöhung statt. Für die Verwendungsdauer eines Öls ist die Art und Höhe der Beanspruchung maßgeblich. Je höher die Beanspruchung des Öls, desto geringer wird seine Einsatzdauer ausfallen. (vgl. [Win12]) Bei der Großen Presse mit relativ moderatem Druck von nur 380 bar und niedrigen Temperaturen bis maximal 53 °C sind Fremdstoffe der lebensdauerbegrenzende Faktor. Werden Partikel jährlich durch Reinigung entfernt, kann die Einsatzdauer des Öls 30 Jahre und mehr erreichen. Grafisch ergibt sich eine Lebenserwartung des Öls nach Abb. 5.3. Auf Basis der Kosten eines Austauschs des Öls kann eine Temperaturerhöhung monetär bewertet werden.

Abb. 5.3: Lebenserwartung eines Öls in Abhängigkeit von der Temperatur



Die Lebensdauer des Mineralöls lässt sich nach Formel (5.2) beschreiben. Die Lebensdauer des Synthetiköls wird durch Formel (5.3) wiedergegeben. (vgl. [Win12]) Vom Hersteller der Anlage wird eine reguläre Maximaltemperatur von 68 °C angegeben.

$$\text{Lebensdauer [a]} = 30 * 0,5^{(\text{Temperatur}-50)/10} \quad (5.2)$$

$$\text{Lebensdauer [a]} = 30 * 0,5^{(\text{Temperatur}-50)/15} \quad (5.3)$$

5.3 Entwicklung des mathematischen Modells

5.3.1 Übersicht

Auf Basis der physikalischen Gegebenheiten kann ein mathematisches Modell zur Beschreibung des Verlaufs der Öltemperatur erstellt werden. Dieses wird innerhalb der SPS benötigt, um zu entscheiden, ob und wann geheizt oder gekühlt werden soll. Die Modellierung erfolgt vorerst als Makro in MS Excel. Die verwendete Programmiersprache VBA ist leichtverständlich und bietet durch die Anzeigen in MS Excel eine sofortige Auswertung der Ergebnisse. Wenn später neben den Stromdaten auch Temperaturdaten aufgezeichnet werden, können sie im Nachgang zur Verbesserung des Modells beitragen.

Im ersten Schritt der Entwicklung ging es darum, die Parameter zur Beschreibung des Maschinenzustandes aus gegebenen Daten zu ermitteln. Im Einzelnen ging es um die Temperaturgradienten und die Kosten in den möglichen Zuständen:

- Heizen
- Betrieb
- Kühlen
- Standby
- Umgebungsverluste

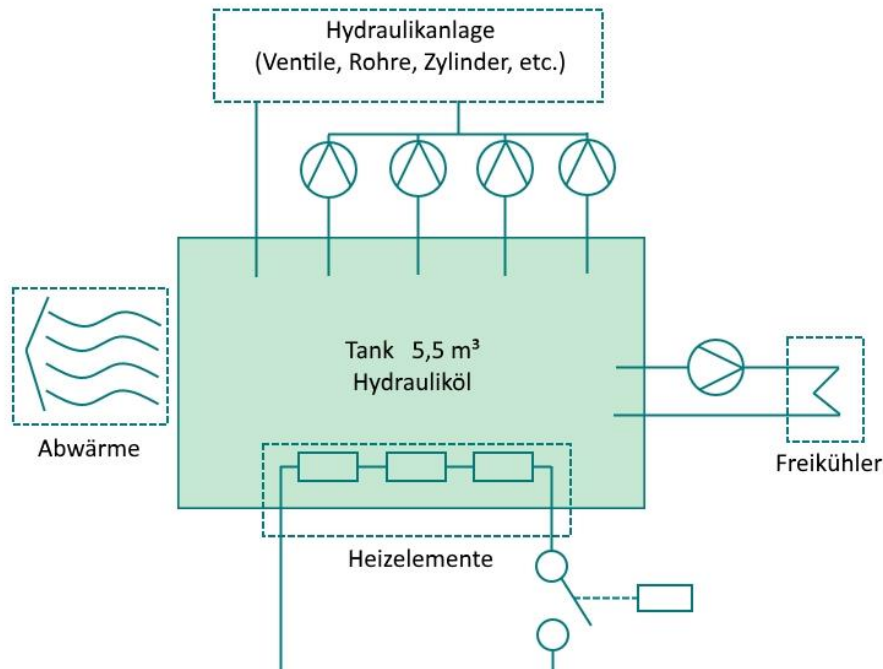
Das System Große Presse, also die gesamte Anlage, verfügt über mehrere Hundert Meter Rohrleitungen, Zylinder unterschiedlicher Größe und diverse andere hydraulische und elektrische Komponenten. Um das thermische Verhalten der Anlage zu beschreiben, soll daher eine Vereinfachung in die 5 wesentlichen Anlagenteile bzw. die Einflussfaktoren auf die Temperatur nach

Abb. 5.4 erfolgen. Das sind der Hydrauliköltank, die Heizung, die Kühlung, die gesamte Hochdruck-Anlage und die Wärmeverluste.

Die Heizung mittels drei keramischer Heizelemente befindet sich im Tank und wird elektrisch über ein Relais angesteuert, wenn die Temperatur des Öls unter einen Schwellwert fällt. Die elektrische Heizleistung liegt bei 9 kW, der Wirkungsgrad ist nicht bekannt.

Die Kühlung erfolgt über einen Freikühler, welcher die Temperaturdifferenz zur Umgebungsluft nutzt. Das gesonderte System erfordert zwei eigene Umwälzpumpen und einen Lüfter mit zusammen 15,5 kW. Das Kühlsystem wird erst bei einer Temperatur von 53 °C aktiviert.

Abb. 5.4: Komponenten der großen Presse



Bei Betrieb der Anlage werden die Hochdruckkomponenten, hier als Hydraulikanlage bezeichnet, von 4 Hochdruckpumpen mit jeweils 55 kW versorgt. Im Standby laufen die Pumpen im Leerlauf bei 25 kW und das Öl wird über einen Bypass zurück in den Tank geleitet.

Durch die große Oberfläche des Tanks und der Leitungen findet ein stetiger Austausch von Wärme mit der Umgebung statt. Die genaue Oberfläche aller Komponenten ist nicht bekannt und auch nicht, wie stark die Anteile von Wärmeleitung, Strahlung und Konvektion sind. Abschätzbar sind lediglich die Strahlungsverluste am Tank.

Das zentrale Element der Anlage ist ein Hydrauliköltank mit 5,5 m³ Hydrauliköl. Seine Stahlhülle hat eine Oberfläche von rund 25,5 m². Aus ihm wird bei Betrieb Öl entnommen, in die Zylinder gepumpt und wieder zurückgeführt. Damit schwankt der Pegel bei Betrieb ständig. Bei Stillstand befindet sich nahezu das gesamte Öl im Tank. Die thermische Masse des Öls lässt sich nach Formel (5.4) aus dem Volumen von 5,5 m³, der Dichte von 0,879 kg/l und der spezifischen Wärmekapazität von 1,85 kJ/(kg*K) zu 8944 kJ/K bestimmen. (vgl. [Fuc16])

$$5,5 \text{ m}^3 * 879 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 1,85 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} * \text{K}} = 8944 \frac{\text{kJ}}{\text{K}} \quad (5.4)$$

Die im folgenden Abschnitt berechneten Gradienten beziehen sich auf die gesamte Menge Öl in der Anlage.

5.3.2 Heizen

Für den Heizzyklus ist bekannt, dass er eine Temperaturerhöhung von 5 Kelvin in durchschnittlich 3,01 Stunden bewirkt. Das geht aus Tab. 4.3 hervor. Nach Formel (5.5) ergibt das einen positiven Temperaturgradienten von 1,66 Kelvin pro Stunde. Darin ist bereits ein Ausgleich der Wärmeverluste enthalten. Weiterhin ist bekannt, dass bei den drei in der Referenzwoche aufgezeichneten Heizzyklen eine durchschnittliche Heizenergie von 28,61 kWh benötigt wurde. Setzt man einen Strompreis von aktuell durchschnittlich 18 Cent/kWh voraus, darin sind Arbeits- und Leistungspreis enthalten, dann entspricht das nach Formel (5.6) Kosten von 1,03 € pro Kelvin Temperaturerhöhung.

$$\text{Grad. Heizen} = \frac{5 \text{ K}}{3,01 \text{ h}} = 1,66 \frac{\text{K}}{\text{h}} \quad (5.5)$$

$$\frac{28,61 \text{ kWh}}{5 \text{ K}} = 5,72 \frac{\text{kWh}}{\text{K}} * 0,18 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 1,03 \frac{\text{€}}{\text{K}} \quad (5.6)$$

5.3.3 Betrieb und Standby

Bei Betrieb der Anlage, also bei einer wertschöpfenden Tätigkeit, liegt die durchschnittliche Leistung der Gesamtanlage für die Referenzwoche bei 119,39 kW. Den weitaus größten Anteil daran haben die 4 Hochdruckpumpen. Die Abschätzung eines Hydraulikaggregate-Herstellers besagt, dass rund 15 % der eingesetzten elektrischen Energie in Wärme umgesetzt werden. Das wurde vom Hersteller der Presse bestätigt. Nach Formel (5.7) führt die durchschnittliche Leistung von 119,39 kW zu einer mittleren Verlustleistung von 17,9 kW. Ein solcher Energieeintrag auf die thermische Masse des Öls erzeugt einen positiven Temperaturgradienten nach Formel (5.8) von 7,2 Kelvin pro Stunde.

$$0,15 * 119,39 \text{ kW} = 17,9 \text{ kW} \quad (5.7)$$

$$\text{Grad. Betrieb} = 17,9 \text{ kW} * \frac{3600 \frac{\text{kJ}}{\text{kWh}}}{8944 \frac{\text{kJ}}{\text{K}}} = 7,2 \frac{\text{K}}{\text{h}} \quad (5.8)$$

Im Standby, also im Leerlauf der Hochdruckpumpen, hat die Anlage eine verbleibende Leistung von ca. 25 kW. Setzt man die überschlägige Berechnung der Heizleistung an, so ergibt sich nach Formel (5.9) eine Heizleistung von 3,75 kW, was einen Temperaturgradienten nach Formel (5.10) in Höhe von rund 1,51 Kelvin pro Stunde entspricht. In der Simulation ist der Standby-Betrieb lediglich eine Spezialform der Arbeit, da der Anteil abgeführter Wärme mit 15 % bei beiden Zuständen identisch ist. Eine weitere Unterscheidung zwischen den Zuständen findet nicht statt. Da sich die Anschlussleistung im Betrieb ständig ändert, wird der Temperaturgradient für jeden Messwert neu berechnet.

$$0,15 * 25 \text{ kW} = 3,75 \text{ kW} \quad (5.9)$$

$$\text{Grad.Standby} = 3,75 \text{ kW} * \frac{3600 \frac{\text{kJ}}{\text{kWh}}}{8944 \frac{\text{kJ}}{\text{K}}} = 1,51 \frac{\text{K}}{\text{h}} \quad (5.10)$$

5.3.4 Kühlung

Für die Kühlung steht ein Freikühler mit einer Kühlleistung von rund 60 kW thermisch zur Verfügung, bei einer Temperaturdifferenz von 20 Kelvin zwischen Öl und Umgebung. Damit übersteigt die Kühlleistung die maximal erzeugte Verlustleistung der Maschine. Im Betrieb ergibt sich die Kühlleistung aus den beiden Temperaturen von Öl und Umgebung nach Formel (5.11). Im Modell wird der Temperaturgradient für jeden Messwert neu errechnet, da sich die Temperaturen ständig ändern. Legt man den Strompreis von 18 Cent/kWh zugrunde, entstehen nach Formel (5.12) bei Betrieb der Kühlung Kosten von 2,79 € pro Stunde. Die Gesamtleistung von 15,5 kW setzt sich aus der Lüfterleistung von 2,5 kW und zwei Pumpen mit zusammen 13 kW, zusammen.

$$\text{Grad.Kühlen} \left[\frac{\text{K}}{\text{h}} \right] = 60 \text{ kW} * \frac{T_{\text{Maschine}} - T_{\text{außen}}}{20} * \frac{3600 \frac{\text{kJ}}{\text{kWh}}}{8944 \frac{\text{kJ}}{\text{K}}} \quad (5.11)$$

$$15,5 \text{ kW} * 0,18 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 2,79 \frac{\text{€}}{\text{h}} \quad (5.12)$$

5.3.5 Wärmeverluste

Wie eingangs erwähnt sind die Wärmeverluste der Gesamtanlage unbekannt. Nur die Abstrahlung des Tanks ist abschätzbar. Verluste an Leitungen und durch Konvektion fließen später als Faktor 1,25 in die Simulation ein. Dieser Faktor ist geschätzt und muss später an die Messwerte angepasst werden.

Zur Berechnung der Strahlungsleistung wird das Stefan-Boltzmann-Gesetz herangezogen. Dieses besagt, dass der abgestrahlte Wärmestrom in der vierten Potenz abhängig ist von der Temperaturdifferenz zwischen Körper und Umgebung. Nimmt man folgende Randbedingungen an,

- einen Emissionsgrad ϵ von 0,75, Stahltank, blau lackiert,
- eine Oberfläche A des Tanks von 25,5 m² (2,5m x 2m x 1,5m), Leitungen nicht betrachtet,
- eine mittlere Temperatur des Tanks T_i von 35 °C,
- eine Außentemperatur T_a von 13,7 °C, mittlere Temperatur in der Referenzwoche,

so errechnet sich unter Verwendung der Stefan-Boltzmann-Konstante eine Abstrahlungsleistung nach Formel (5.13) von fast 2,5 kW. Der sich daraus ergebende Temperaturgradient liegt nach Formel (5.14) bei knapp einem Kelvin pro Stunde. Da sich sowohl die Temperatur innerhalb, als auch außerhalb des Tanks ständig ändern, wird im Modell für jeden Minutenwert der Gradient neu berechnet.

$$\begin{aligned}
P &= A * e * \sigma * (T_i^4 - T_a^4) \\
&= 25,5 \, m^2 * 0,75 * 5,67 * 10^{-8} \frac{W}{m^2 * K^4} * [(273,15 + 35)^4 \\
&\quad - (273,015 + 13,7)^4] K^4 = 2437,06 \, W
\end{aligned}
\tag{5.13}$$

$$\text{Grad.Strahlung} = 2437,06 \, W * \frac{3600000 \frac{kJ}{Wh}}{8944 \frac{kJ}{K}} = 0,983 \frac{K}{h}
\tag{5.14}$$

5.3.6 Kombinationen

In der Praxis treten die unterschiedlichen Gradienten selten allein auf. Je nach Betriebszustand setzt sich der resultierende Gradient aus mehreren Gradienten zusammen. Der Betriebszustand lässt sich aus dem Strombedarf der Anlage und der aktuellen Temperatur ableiten. Es gibt aber Einschränkungen in der Kombination möglicher Gradienten. Kühlen und Heizen können auf Grund der festen Temperaturbereiche nicht zusammen auftreten. Außerdem sind im Gradienten der Heizung bereits die Wärmeverluste enthalten, weshalb hier kein weiterer Abzug der Wärmeverluste erfolgen darf. Tab. 5.1 zeigt die möglichen Kombinationen von Gradienten, wobei die passenden Vorzeichen bereits für eine spätere Verrechnung hinterlegt sind. Im Betrieb bei einer Temperatur unter 53 Grad Celsius errechnet sich der Gradient beispielsweise aus dem negativen Gradienten der Strahlung und dem Positiven des Betriebs. Bei einer Temperatur über 53 Grad, bei Betrieb und bei Kühlung werden die Gradienten der Kühlung und der Strahlung negativ und der Gradient des Betriebes positiv gezählt.

<i>Gradient Strahlung</i>	<i>Gradient Kühlung</i>	<i>Gradient Heizung</i>	<i>Gradient Betrieb</i>	<i>Zustand</i>
Temperatur unter 53 Grad Celsius, Kühlung aus				
-1				Maschine aus (P<8kW)
		1		Maschine heizt (8kW<=P<10kW)
-1			1	Maschine in Betrieb (P>=10kW)
Temperatur über 53 Grad Celsius, oder Kühlung ein				
-1	-1			Maschine kühlt nach, kein Betrieb
-1	-1		1	Maschine kühlt, in Betrieb

Tab. 5.1: Kombinationsmöglichkeiten beim Betrieb der Anlage

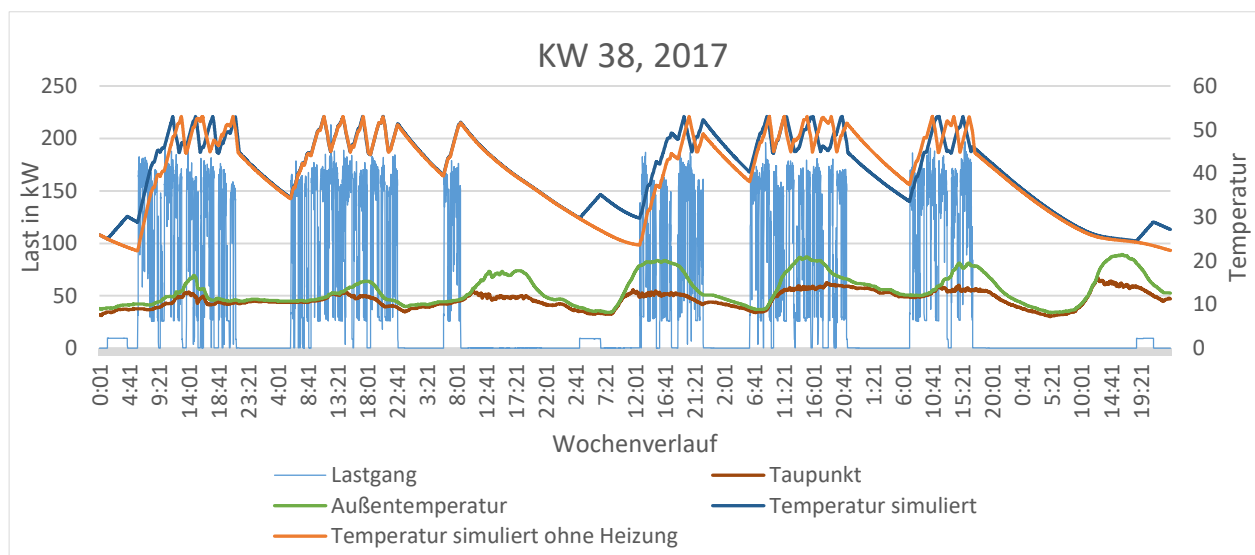
Die gezeigten fünf Kombinationsmöglichkeiten finden sich in der Simulation wieder. Aus den Last- und Temperaturdaten lässt sich erkennen, in welchem Zustand sich die Maschine gerade befindet aber bislang nicht, ob die Kühlung eingeschaltet ist. Dazu ist eine weitere Messstelle erforderlich, die im Laufe der Validierung nachinstalliert werden kann. Mit dieser können die Gradienten dann entsprechend korrigiert werden. Bis dahin muss auf Erfahrungswerte und Angaben des Herstellers Bezug genommen werden.

5.4 Umsetzung in der Simulation

Zum Zeitpunkt der Auswertung ist bekannt, dass die Kühlung bei 53°C eingeschaltet wird und bei 45° C abschaltet. Außerdem weiß man, dass die Heizung bei 25 °C einschaltet und bei 30 °C

abschaltet. Mit der Außentemperatur (grün) aus den Wetteraufzeichnungen der Referenzwoche, dem Lastgang (hellblau) und den damit errechneten Gradienten lässt sich ein Temperaturverlauf (dunkelblau) nach Abb. 5.5 rekonstruieren. In der Darstellung findet sich außerdem ein simulierter Temperaturverlauf, wenn die Heizung nicht eingeschaltet wird (orange). Es fällt auf, dass in der Referenzwoche selbst ohne Heizung ein ausreichender Abstand zur Taulinie (rot) gegeben ist. Der niedrigste Abstand zwischen Taupunkt- und Öltemperatur findet sich jeweils bei Betriebsbeginn am Morgen. Die Temperatur fällt auch ohne Heizung nicht unter 20 °C, was bedeutet, dass jederzeit ein Einschalten möglich gewesen wäre und damit ein Heizzyklus, wie er aktuell verwendet wird, nicht nötig war. Außerdem sieht man, dass der Verlauf der Taupunkttemperatur der Außentemperatur folgt. Steigt die Außentemperatur, so steigt auch die Taupunkttemperatur. Der Anstieg erfolgt allerdings erst nach dem Betriebsbeginn um 6:00 Uhr, weshalb gerade bei Betriebsbeginn der für die Regelung kritische Abstand zur Taulinie erreicht wird.

Abb. 5.5: Simulierter Temperaturverlauf über die Referenzwoche mit und ohne Heizung



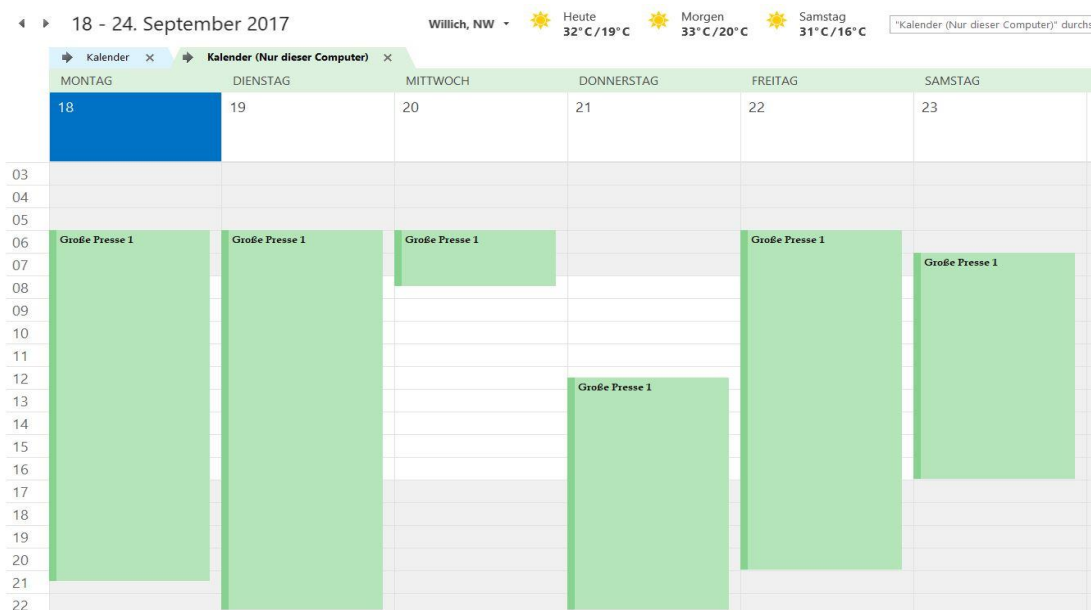
In der Abbildung zeigt sich allerdings auch, dass mit getroffenen Annahmen die Simulation noch nicht optimal funktioniert. Zu Beginn des Heizzyklus am Montagmorgen beträgt die Öltemperatur 25 °C. In der Simulation wird diese Temperatur zu Beginn der zweiten Heizphase am Donnerstagmorgen um rund 5 °C überschritten. Zu Beginn der dritten Heizphase am Sonntagabend hingegen wird die Temperatur von 25 °C fast genau erreicht.

5.5 Interface

Da die Firma MRS bislang über kein Produktionsplanungsinstrument verfügt, ist es Teil der Entwicklungsleistung, dieses bereit zu stellen. Der Umfang des Tools soll begrenzt sein, um die Entwicklungskosten niedrig zu halten. Für die Regelung sind mindestens Informationen über geplante Arbeitszeiten notwendig. Die Terminierung von Aufträgen würde die Regelung präzisieren, ist aber mit dem aktuellen Arbeitsablauf nicht vereinbar. Die Daten sollen über eine Schnittstelle in die gleiche Datenbank laufen, in der auch die Lastdaten des Unternehmens gespeichert werden.

Um die Aufgaben zu erfüllen reicht prinzipiell eine Kalenderanwendung, wie beispielsweise MS Outlook. Recherchen haben ergeben, dass ein Kalender, welcher bei MS Exchange⁶ angelegt wird mit einem Export-Programm⁷ in eine frei wählbare Datenbank überführt werden kann. So ergibt sich für den Benutzer der Vorteil einer ihm bekannten, intuitiven Arbeitsumgebung und die Anwendung muss nicht neu entwickelt werden, was die Entwicklungskosten senkt. Die Eintragung der Arbeitszeiten kann wie in Abb. 5.6 gezeigt anhand von Terminen erfolgen. Die maßgebliche Information, welche hieraus gewonnen werden kann, ist die die Dauer des geplanten Einsatzes und die Dauer bis zum nächsten Einsatz der Maschine, welche für die im Folgenden dargestellten Berechnungen notwendig ist. Der Kalender lässt sich beliebig auch um die Einsatzzeiten der Rotorschere oder der zweiten Großen Presse erweitern.

Abb. 5.6: MS Outlook als vorläufiges Planungstool



5.6 Lastprognose

Um eine intelligente Regelung zu ermöglichen, muss zuerst auf Basis des oben beschriebenen Modells eine Vorhersage über den Temperaturverlauf der Maschine gegeben werden. Für die Berechnung stehen an der Maschinensteuerung die aktuelle Öltemperatur, Umgebungstemperatur, Vorhersage der Umgebungsbedingungen und seitens der Datenbank die geplanten Einsatzzeiten zur Verfügung. Eine minutengenaue Vorhersage der Last während der Arbeitszeiten ist aber auf Grund der wechselnden Auslastung und unregelmäßigen Pausenzeiten nicht möglich. Um dennoch den Wärmeeintrag durch den Arbeitsprozess hinreichen genau abzubilden, soll die durchschnittliche Last als Ersatzwert herangezogen werden.

Tab. 5.2 weist für die Referenzwoche tageweise die gemessene Arbeitszeit, die gemessene Energie, den errechneten Mittelwert der Last und die errechnete Abweichung vom Gesamt-Lastmittelwert in Prozent aus. Am Montag beispielsweise wurde 15:21 Stunden gearbeitet und während dessen eine Energie von 1549 kWh verbraucht. Daraus errechnet sich eine durchschnittliche Last von 100,8 kW, was um 5,2 % niedriger liegt, als der Durchschnitt über alle Tage von 106,3 kW.

⁶ Microsoft Exchange, gängige Datenbankanwendung für Email-Anwendungen

⁷ OLXCalendarExport Agent von Gangli Dienstleistungen

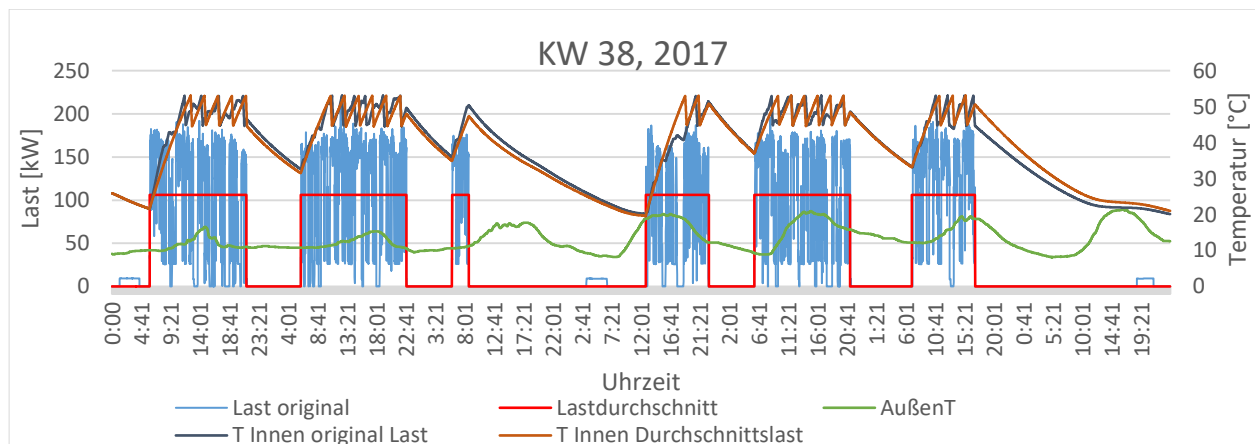
	Betriebs- beginn	Betriebs- ende	Dauer [hh:mm:ss]	Energie [kWh]	Last- Mittelwert [kW]	Abweichung vom Last- Mittelwert
Montag	06:00:00	21:21:00	15:21:00	1549	100,8	-5,2%
Dienstag	06:00:00	22:45:00	16:45:00	1837	109,6	3,0%
Mittwoch	06:00:00	08:37:00	02:37:00	322	122,3	15,0%
Donnerstag	13:00:00	22:45:00	09:45:00	884	90,6	-14,8%
Freitag	06:00:00	21:10:00	15:10:00	1513	99,7	-6,2%
Samstag	07:00:00	17:00:00	10:00:00	1152	115,0	8,2%
Gesamt				1209	106,3	

Tab. 5.2: Lastdurchschnitt bei Betrieb

Aus der Tabelle geht hervor, dass die Durchschnittslast während der Betriebsdauer nur begrenzt zwischen den Tagen schwankt. Das legt die Annahme nahe, dass sich das Verhalten der Anlage auch mit einer konstanten Last in Höhe der Durchschnittslast über die Arbeitsstunden des Tages beschreiben lässt. Die durchschnittliche Last in der Arbeitszeit aller Tage lag im Referenzzeitraum bei rund 106,3 kW. Diese Last ist von dem in Abschnitt 5.3.3 genannten Durchschnittswert zu unterscheiden, da die hier in Tab. 5.2 gezeigte Last auch Pausen- und Standby-Zeiten einschließt.

In Abb. 5.7 sind nun zwei Simulationen gegenübergestellt. Zum einen der simulierte Temperaturverlauf bei originaler Last und zum andern der simulierte Temperaturverlauf bei Durchschnittslast in Höhe von 106,3 kW. Der Außentemperaturverlauf (grün) ist der Referenzwoche entnommen und für beide Simulationen identisch. Der originale, schwankende Lastverlauf (blau) hat einen wechselhaften Temperaturverlauf (dunkelblau) zur Folge. Der Lastdurchschnitt (rot) weist bei gleichen Arbeitszeiten einen glatten und symmetrischen Temperaturverlauf (braun) auf.

Abb. 5.7: Simulation bei durchschnittlicher Last und im Vergleich bei realen Schwankungen



Die Abweichungen sind insgesamt jedoch gering. Deutliche Abweichungen finden sich am Mittwoch, Donnerstag und Samstag. Am Mittwoch fällt die simulierte Temperatur bei Originallast von einer höheren Temperatur aus ab. Am Donnerstag ist der simulierte Temperaturanstieg bei originaler Last langsamer und am Samstag fällt die simulierte Temperatur bei Originallast von einem niedrigeren Niveau aus ab. Die Abweichungen finden sich gerade dann, wenn auch die Tagesdurchschnitte stark vom Gesamtdurchschnitt abweichen, also der Berechnungsfehler in

Tab. 5.2 besonders groß ist. Eine weitere Erkenntnis ist, dass der Temperaturabfall nach Bearbeitungsende täglich im Kühlband zwischen 45 °C und 53 °C beginnt. Insbesondere Samstag sieht man, dass damit die maximale Abweichung von der Prognose auf die Breite des Kühlbandes von 8 Kelvin beschränkt ist und im Verlauf schmaler wird. Dies sollte an realen Temperaturverläufen unbedingt evaluiert werden, da es bedeutet, dass die Temperaturvorhersagegenauigkeit nach Arbeitsende zunehmen kann, beziehungsweise dass sich Abweichungen selbstständig ausgleichen können.

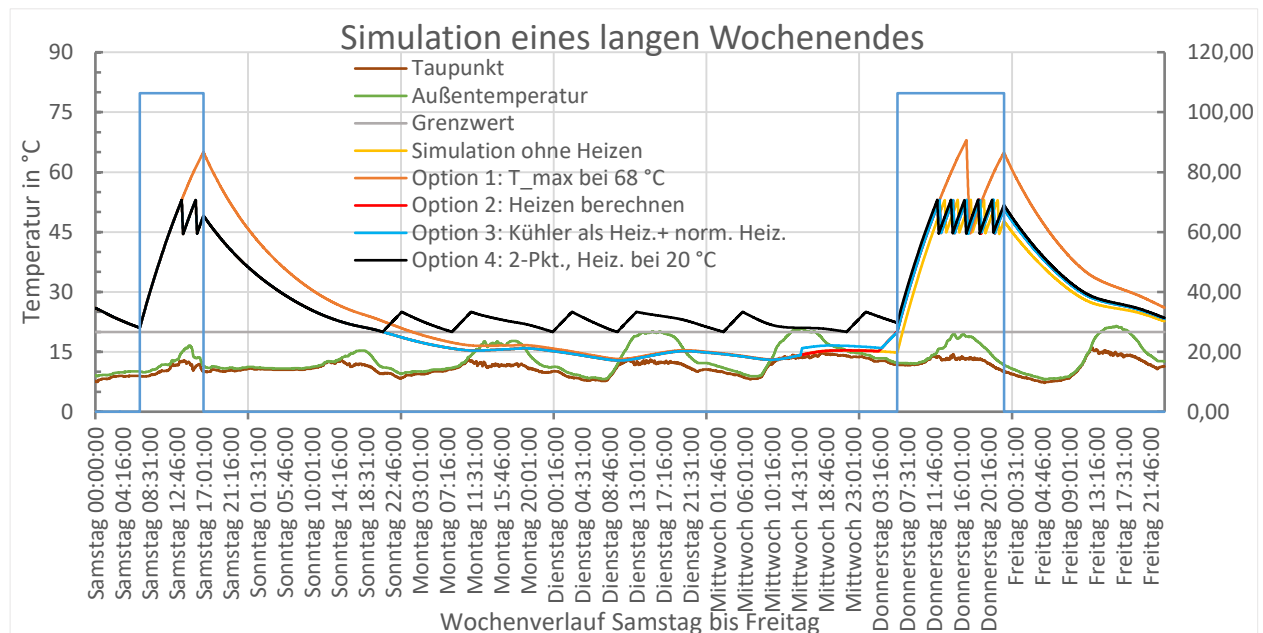
5.7 Optionen für die Regelung

5.7.1 Übersicht

Im Programmablauf müssen regelmäßig Entscheidungen über das weitere Vorgehen getroffen werden, wenn innerhalb einer Stillstandzeit die Temperatur unter den Grenzwert absinkt und damit ein Einschalten nicht sofort möglich ist. Dieser Abschnitt soll die vorhandenen Optionen aufzeigen, erklären und eingrenzen, um die Entscheidungsfindung zu vereinfachen. Der Anspruch an die Regelung ‚intelligent‘ zu sein führt dabei zu der Frage, was ‚intelligent‘ im Sinne einer Entscheidungsfindung zwischen den Optionen ist. Da im Unternehmen alle Entscheidungen einer Kostenbetrachtung unterworfen werden, sollte auch hier die Berechnung des Kostenminimums ausschlaggebend sein.

Zur Erklärung der Möglichkeiten stelle man sich plakativ einen Arbeitsverlauf nach Abb. 5.8 vor. Der Lastgang (hellblau) simuliert die Arbeit an einem kurzen Samstag, dem letzten Arbeitstag, auf den vier arbeitsfreie Tage folgen. Erst am darauffolgenden Donnerstag soll der Betrieb um 6:00 Uhr wieder aufgenommen werden.

Abb. 5.8: Temperaturverlauf über langes Wochenende



Dieser Fall demonstriert einen Extremfall und wird auch bei Inbetriebnahme der zweiten Großen Presse sicherlich selten vorkommen. Jedoch zeigt er einige Fakten, die auch für kürzere Zeiträume relevant sind. Die Außentemperatur (grün) und der Taupunkt (dunkelrot) sind der

Referenzwoche entnommen, nun jedoch tageweise verschoben. Die dargestellten Temperaturverläufe sind Simulationen verschiedener Maßnahmen.

Verfolgt man den Temperaturverlauf ohne Heizung (gelb), so erreicht die Maschinentemperatur den Schwellwert von 20 °C bereits am Folgetag des letzten Betriebs, hier am Sonntagabend. Am nächsten Werktag, Montag um 6:00 Uhr, liegt ohne Heizung bereits eine Öltemperatur von 16,4 °C vor, zu wenig zum Starten der Anlage. Ohne die Heizung ist ein Betrieb also bereits nach einem normalen Wochenende nicht möglich. Nach 4 Tagen Stillstand am Donnerstagmorgen beträgt die Öltemperatur ohne Heizen 14,8 °C, also nur geringfügig weniger als nach 2 Tagen ohne Betrieb. Das bedeutet zum einen, dass bei der aktuellen 2-Punkt-Regelung bereits an einem normalen Wochenende ein bis zwei Heizzyklen zur Überbrückung notwendig sind. Zum anderen bedeutet es, dass bereits an einem normalen Wochenende eine Entscheidung über das Vorgehen notwendig ist, um die Temperatur am nächsten Werktag auf 20 °C zu bringen.

Es muss also mindestens eine Maßnahme eingeleitet werden, um die Untergrenze wieder zu erreichen, bevor der Arbeitsprozess starten soll. Dazu stehen mehrere Möglichkeiten zur Auswahl und auch eine Kombination der Optionen ist möglich.

- Option 1 (orange): Anheben der Spitztemperatur auf 68 °C, wie vom Maschinenhersteller aktuell vorgegeben und späteres Heizen, wenn es nötig ist. Hohe Temperaturen verringern allerdings die Lebensdauer des Öls
- Option 2 (rot): Öl vollständig abkühlen lassen. Heizung erst einschalten, wenn es unbedingt nötig ist, um 20 °C erst zu Arbeitsbeginn zu erreichen
- Option 3 (hellblau): Einschalten des Kühlers im letzten Bereich, in dem die Außentemperatur über der Öltemperatur liegt. Dadurch Nutzen der Außentemperatur. Nach Bedarf elektrisch nachheizen
- Option 4 (schwarz): Wie bisher eine 2-Punkt Regelung, aber mit einer Untergrenze von 20 °C und einer Obergrenze von 53 °C

Ein Anheben der Spitztemperatur nach **Option 1** führt zu einem Erreichen des Schwellwertes von 20 °C am Montagmorgen um 1:44 Uhr. Das ist 4:36 Stunden später als bei den anderen Optionen, reicht aber nicht bis in die Arbeitszeit am Montag und damit nicht für die Überbrückung eines normalen Wochenendes. Um vier arbeitsfreie Tage zu überbrücken, muss vor Arbeitsbeginn zusätzlich 175 Minuten lang geheizt werden. Hingegen entfällt in der Gesamtbetrachtung der Kühlzyklus am Samstag. Am nächsten Werktag wird lediglich ein Kühlzyklus benötigt.

In **Option 2** wird der Heizzyklus auf die letztmögliche Zeitspanne vor Arbeitsbeginn verschoben. In der Stillstandzeit fällt die Maschinentemperatur im Mittel auf Umgebungstemperatur ab und schwankt dort nur noch gering. Dadurch ist die Temperaturdifferenz zum Aufheizen begrenzt. Bemerkenswert ist, dass der Taupunkt nicht wesentlich unterschritten wird. Die tagsüber höheren Temperaturen sorgen für ein zyklisches Aufwärmen des Tanks, welcher in der Nacht wieder abkühlt. Für das einmalige Aufheizen vor Bearbeitungsbeginn läuft die Heizung 177 Minuten lang.

Bei **Option 3** wird der Effekt ausgenutzt, dass die Außentemperatur am Tag höher sein kann, als die Öltemperatur. Durch Einschalten des Freikühlers wird nun das Öl aufgewärmt, statt es wie üblich zu kühlen. Der Effekt kann energetisch sinnvoll genutzt werden, wenn die Temperaturdifferenz zwischen Öl und Umgebung groß ist und außerdem die Dauer bis zum

geplanten Einsatz klein ist. Durch die hohe Temperaturdifferenz wird ein großer Temperaturgradient erzeugt, was die Einschaltdauer reduziert. Die zeitliche Nähe zum Einsatzbeginn sorgt für geringe Temperaturverluste. Selbst mit dieser Maßnahme ist ein Heizen vor Bearbeitungsbeginn nötig. In Summe läuft der Kühler in der optimalen Simulation 14 Minuten lang und die Heizung 147 Minuten lang.

In der **Option 4** wird das Regelkonzept nicht verändert. Die Einschaltsschwelle der Heizung wird lediglich auf 20 °C gesenkt. Der Verlauf ist dem aktuellen Verlauf sehr ähnlich und umfasst zur Überbrückung der viertägigen Betriebsruhe insgesamt 1086 Heizminuten.

In Tab. 5.3 werden die Optionen energetisch bewertet. Die Leistung der Heizung und der Kühlung sind bekannt. Mit der simulierten Betriebszeit lässt sich eine Energiemenge in kWh für jede Option berechnen. Im oberen Teil der Tabelle wird nur die Zeit zwischen den Betriebstagen betrachtet, also vom Abschalten am Samstag bis zum Einschalten am Donnerstag. Daraus geht hervor, dass die Optionen 1 – 3 mit rund 27 kWh energetisch nahezu gleichwertig die Dauer des langen Wochenendes überbrücken. Die Option 4 fällt durch ihren sehr hohen Energieverbrauch von fast 163 kWh auf.

	<i>Option 1</i>	<i>Option 2</i>	<i>Option 3</i>	<i>Option 4</i>
<i>Minuten Heizung vor Arbeitsbeginn</i>	175,00	177,00	147,00	1086,00
<i>Minuten Kühlung vor Arbeitsbeginn</i>	0,00	0,00	14,00	0,00
<i>Energie [kWh]</i>	26,25	26,55	25,67	162,90
<i>Minuten Heizung insgesamt</i>	175,00	177,00	147,00	1086,00
<i>Minuten Kühlung insgesamt</i>	35,00	100,00	114,00	101,00
<i>Energie gesamt [kWh]</i>	35,29	52,38	51,50	188,99

Tab. 5.3: Energetischer Vergleich der Maßnahmen

Im unteren Teil der Tabelle ist die gesamte Woche ausgewertet. Hier fällt besonders Option 1 auf, deren Gesamtenergiebedarf am geringsten ist. Option 4 weist wieder den höchsten Energiebedarf auf und wird daher im Folgenden nicht mehr betrachtet.

5.7.2 Diskussion Option 1

Option 1 zeigt mit der Erhöhung des Kühlbeginns auf die vom Hersteller angegebenen 68 °C, statt der bisherigen Kühlung bei 53 °C, den geringsten Gesamt-Energieverbrauch, da an den Betriebstagen seltener eine Kühlung erforderlich ist. Das eigentliche Ziel, die Überbrückung von arbeitsfreien Tagen, ist allein mit einer Temperaturerhöhung jedoch nicht zu erreichen, da die Öltemperatur zu früh unter 20 °C fällt. Daher darf die Frage gestellt werden, ob eine Temperaturerhöhung allein überhaupt zu nennenswerten Energieeinsparungen führen kann, bzw. wie sich diese Einsparung kostenseitig bemerkbar macht. Dabei sind die zunehmende Effizienz der Kühlung bei höherer Temperatur, die erhöhten Wärmeverluste an der Wandung des Vorratsbehälters und die verminderte Lebensdauer des Öls gegenüberzustellen.

Setzt man eine Durchschnittstemperatur der Woche von 13,7 °C und eine Abkühlung auf 45 °C voraus, so erhöht sich die Effizienz der Kühlung bei höherer Öltemperatur nach Formel (5.15) um rund 21 %. Um den entsprechenden Prozentsatz vermindert sich die Einschaltdauer des Kühlers und damit sein Energiebedarf. In der Referenzwoche lief der Kühler simuliert für 310 Minuten.

Eine Reduktion um 21 % entspricht nach Formel (5.16) einer jährlichen Energieeinsparung von rund 723 kWh, entsprechend 130 €.

Die Wärme-Abstrahlung des Tanks erhöht sich nach Formel (5.17) bei der höheren Spitztemperatur um fast 50 %. Der damit verbundene Gradient ist allerdings nach Formel (5.18) im Verhältnis zum Gradienten der Kühlung mit unter 3 % vernachlässigbar klein.

$$\frac{\text{Grad. Kühlen, } 68 - 45 \text{ °C}}{\text{Grad. Kühlen, } 53 - 45 \text{ °C}} = \frac{60 \text{ kW} * \frac{\frac{68 + 45}{2} - 13,7}{20} * \frac{3600 \frac{\text{kJ}}{\text{kWh}}}{8944 \frac{\text{kJ}}{\text{K}}}}{60 \text{ kW} * \frac{\frac{53 + 45}{2} - 13,7}{20} * \frac{3600 \frac{\text{kJ}}{\text{kWh}}}{8944 \frac{\text{kJ}}{\text{K}}}} = \frac{51,68 \frac{\text{K}}{\text{h}}}{42,63 \frac{\text{K}}{\text{h}}} = 1,21 \quad (5.15)$$

$$\frac{310 - \left(\frac{310}{1,21}\right) \text{ min}}{60 \frac{\text{min}}{\text{h}}} * 15,5 \text{ kW} * 52 * 0,18 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 723 \text{ kWh} * 0,18 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 130 \text{ €} \quad (5.16)$$

$$\begin{aligned} \frac{P_{\text{Strahlung, neu}}}{P_{\text{Strahlung, alt}}} &= \frac{A * e * \sigma * (T_i^4 - T_a^4)}{A * e * \sigma * (T_i^4 - T_a^4)} \\ &= \frac{25,5 \text{ m}^2 * 0,75 * 5,67 * 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 * \text{K}^4} * [(273,15 + 68)^4 - (273,015 + 13,7)^4] \text{ K}^4}{25,5 \text{ m}^2 * 0,75 * 5,67 * 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 * \text{K}^4} * [(273,15 + 53)^4 - (273,015 + 13,7)^4] \text{ K}^4} \\ &= \frac{7346,29 \text{ W}}{4928,44 \text{ W}} = 1,49 \end{aligned} \quad (5.17)$$

$$\frac{\text{Grad. Strahlung}}{\text{Grad. Kühlen}} = \frac{0,983 \frac{\text{K}}{\text{h}} * 1,49}{51,68 \frac{\text{K}}{\text{h}}} = \frac{1,465 \frac{\text{K}}{\text{h}}}{51,68 \frac{\text{K}}{\text{h}}} = 2,84\% \quad (5.18)$$

Demgegenüber steht eine Verkürzung der Lebensdauer des Mineralöls von 24,4 Jahre auf 8,6 Jahre und alternativ des Synthetiköls von 26,1 Jahre auf 13 Jahre nach Tab. 5.4. Die Kosten pro Jahr ergeben sich aus den Kosten für den Austausch geteilt durch die Lebensdauer. Der Austausch von 5,5 m³ Mineralöl kostet das Unternehmen rund 11.000 €, die gleiche Menge Synthetiköl kostet etwa 16.500 €.

	Mineralöl Renolin B 46 HVI 2€/l		Synthetiköl Renolin MR 46 MC 3 €/l	
Temperatur	Lebensdauer in [a]	€/a	Lebensdauer in [a]	€/a
50 °C	30,0	366,67	30,0	550,00
53 °C	24,4	451,42	26,1	631,78
68 °C	8,6	1276,81	13,0	1263,57

Tab. 5.4: Vergleich der Lebensdauern zweier Öle bei 53 °C und 68 °C

Eine Verkürzung der Nutzungsdauer durch Temperaturerhöhung erhöht somit die kalkulatorischen Kosten pro Jahr. Abzüglich der energetischen Einsparungen zeigt Formel (5.19), dass sich die jährlichen Kosten beim Mineralöl um rund 716 € erhöhen, wenn die Temperatur auf 68 °C angehoben wird. Selbst ein Wechsel auf das widerstandsfähigere und langlebigere

Synthetiköl erhöht nach Formel (5.20) die jährlichen Kosten um rund 522 €. Weder mit dem Mineral-, noch dem Synthetiköl können in Summe geringere Gesamtkosten erreicht werden.

$$\Delta K = -\text{Einsparung} + \text{Kosten} = -130 \frac{\text{€}}{\text{a}} + \left(1276,81 \frac{\text{€}}{\text{a}} - 451,42 \frac{\text{€}}{\text{a}} \right) = +716,71 \frac{\text{€}}{\text{a}} \quad (5.19)$$

$$\Delta K = -\text{Einsparung} + \text{Kosten} = -130 \frac{\text{€}}{\text{a}} + \left(1263,57 \frac{\text{€}}{\text{a}} - 631,78 \frac{\text{€}}{\text{a}} \right) = +522,43 \frac{\text{€}}{\text{a}} \quad (5.20)$$

Angesichts dieser drastischen Kostensteigerung kann auch Option 1 aus den möglichen Maßnahmen ausgeschlossen werden, obwohl es in erster Betrachtung die günstigste Alternative zu sein schien.

5.7.3 Diskussion Option 2 und 3

Unter den verbleibenden Optionen 2 und 3 kann eine mathematische Optimierung die kostengünstigste Auswahl treffen. Die Zielgröße Kosten ist demnach eine Summe aus den Stromkosten nach Tab. 5.5. Der Verschleiß kann kaum beziffert werden und fällt deshalb heraus.

	Option 2	Option 3
Beschreibung	Heizen bei Bedarf	Heizen bei Bedarf + Nutzen der Umgebungswärme, wenn sinnvoll
Kosten	Heizen bis T =20 °C	Heizen bis 20 °C Strom für Kühler Strom für Heizung zum Ausgleich der Verluste

Tab. 5.5: Faktoren für die Kostenermittlung

Für Option 2, also ein Heizen kurz vor Bearbeitungsbeginn, bestehen die Kosten nur aus den Heizkosten, welche sich nach Formel (5.6) bereits auf 1,03 €/K beziffern ließen. Aus der momentanen Öltemperatur geht die zu heizende Temperaturdifferenz bis 20 °C jederzeit hervor. Damit stehen die nötige Heizdauer und damit die Kosten fest.

Für Option 3, eine zusätzliche Nutzung der Außentemperatur wird die Rechnung von Option 2 ergänzt um die Energieaufnahme des Freikühlers. Verluste bis zum Arbeitsbeginn müssen zusätzlich ausgeglichen werden.

Damit der Freikühler wirtschaftlicher arbeitet, als die Heizung selbst, ist mit ihm mindestens ein Heizgradient nach Formel (5.21) zu generieren. Dies ist auf die erhöhte Leistungsaufnahme des Aggregates zurück zu führen. Der Gradient lässt sich nach Formel (5.22) erst ab einer um 2,4 Kelvin höheren Außentemperatur gegenüber der Öltemperatur erzeugen. In der Simulation war dies an 972 Minuten an Dienstag und am Mittwoch der Fall.

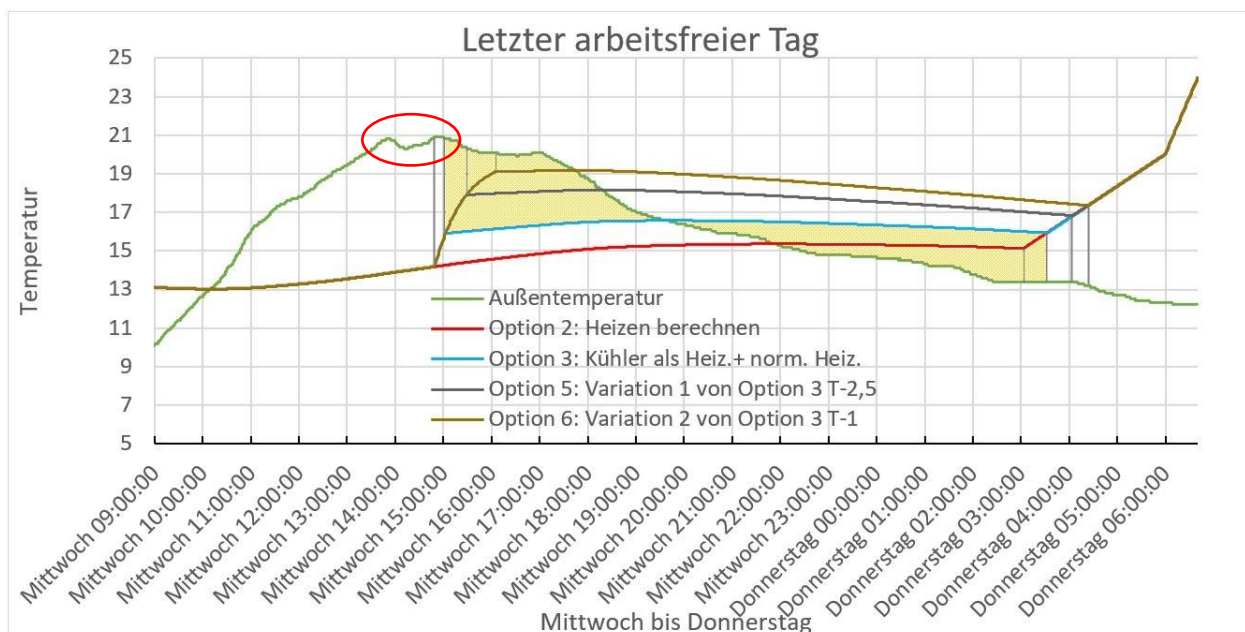
$$\text{Grad. Kühler} \geq \text{Grad. Heizung} * \frac{15,5 \text{ kW}}{9 \text{ kW}} = 1,667 \frac{\text{K}}{\text{h}} * 1,72 = 2,9 \frac{\text{K}}{\text{h}} \quad (5.21)$$

$$\Delta T = T_a - T_u \geq \frac{\frac{2,867 \frac{\text{K}}{\text{h}}}{3600 \frac{\text{kJ}}{\text{kWh}}} * 8943,83 \frac{\text{kJ}}{\text{K}} * 20 \text{ K}}{60 \text{ kW}} = 2,4 \text{ K} \quad (5.22)$$

Es stellt sich daher die Frage, wann die Nutzung des Kühlers am sinnvollsten ist und wie lange er einzusetzen ist. Davon hängt entscheidend die Wirtschaftlichkeit des Einsatzes ab. Da der Einsatz des Kühlers am effizientesten ist, wenn die Temperaturdifferenz zur Umgebung maximal positiv ist, erscheint es sinnvoll, dass er gerade dann eingeschaltet wird. Gleichzeitig sorgt eine lange Dauer zwischen Kühler-Einsatz und Betriebsbeginn für zunehmende Verluste. Eine lange Kühlerlaufzeit sorgt in der Simulation für höhere erreichte Temperaturen und ebenfalls für höhere Verluste.

Am letzten arbeitsfreien Tag, Mittwoch, betrug die Tageshöchsttemperatur 20,9 °C und wurde zwischen 14:49 Uhr und 15:00 Uhr erreicht. Vorher, zwischen 13:49 Uhr und 13:55 Uhr, wurde eine Temperatur von 20,8 °C erreicht. Dazwischen fiel die Außentemperatur kurzzeitig ab. Beide Temperaturmaxima (rot umkreist) kommen grundsätzlich für eine energetische Minimalwertsuche in Frage. Für ein Einschalten am globalen Temperaturmaximum zeigt Abb. 5.9 den simulierten Temperaturverlauf des Öls für verschiedene Abschaltzeitpunkte des Kühlers. Die Angabe des Abschaltzeitpunktes erfolgt im Folgenden als Abstand zur Umgebungstemperatur in Kelvin. Der rote Verlauf zeigt eine Nicht-Nutzung des Kühlers. Der blaue Verlauf heizt bis zum Erreichen von 5 Kelvin Differenz zur Umgebungstemperatur. Der graue Graph zeigt einen Betrieb des Kühlers bis zu 2,5 Kelvin unter Außentemperatur und der Braune bis zu 1 Kelvin unter Außentemperatur. Man sieht, dass der Temperaturverlust bis zum Arbeitsbeginn umso stärker ist, je höher die erreichte Temperatur durch den Einsatz des Kühlers ist.

Abb. 5.9: Integral zwischen Außentemperatur und Öltemperatur



Betrachtet man den Wärm austausch zwischen Umgebung und Öl als Fläche (gelb) zwischen dem Graph der Außentemperatur (grün) und der prognostizierten Maschinentemperatur (blau) zeigt sich, warum eine längere Kühlerlaufzeit nur bedingt Sinn macht. Mit zunehmender, erreichter Temperatur nach Einschalten des Kühlers wird die Fläche oberhalb der Maschinentemperatur kleiner und die Fläche unterhalb wächst überproportional. Das heißt, dass auch die Verluste überproportional wachsen. Verzichtet man auf das Einschalten des Kühlers wie im roten Verlauf, wären die Gewinne durch Einschalten des Kühlers überproportional groß und die Verluste verhältnismäßig klein. Für die spätere Simulation ist es wichtig zu wissen, wo sich das Effizienzmaximum befindet.

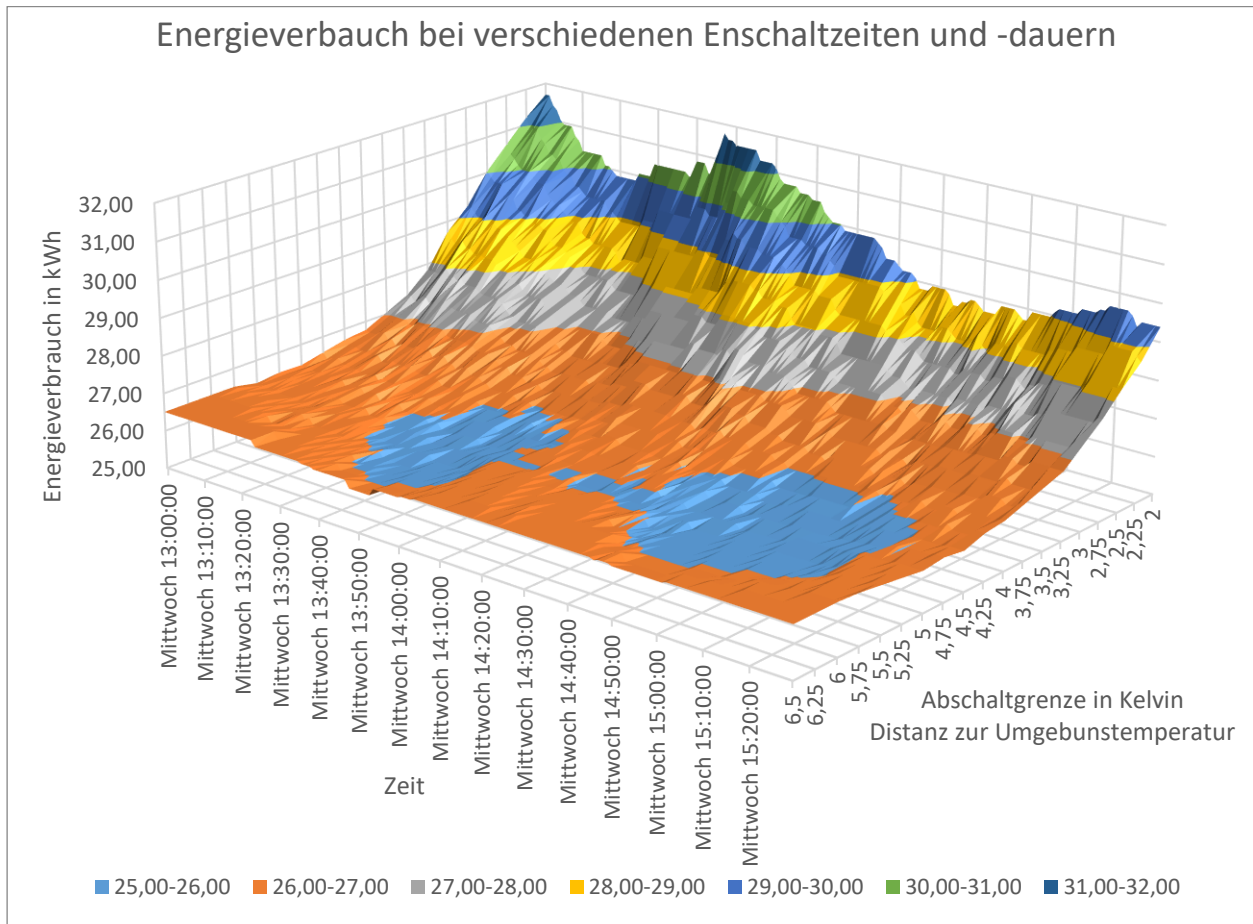
Der Wärm austausch zwischen Öl und Umgebung ist näherungsweise durch den Strahlungsaustausch beschreibbar. Das Integral über den Strahlungsaustausch vom Abschalten des Kühlers bis zum Einschalten der Heizung nach Formel (5.23) wird gerade dann null, wenn das Effizienzmaximum erreicht wird. Dann sind Gewinne und Verluste durch den Strahlungsaustausch gleich hoch. Dies ist gerade bei etwa 5 Kelvin Differenz zur Umgebungstemperatur der Fall, wenn um 14:49 Uhr der Kühler eingeschaltet wird.

$$\text{Verlustleistung} = \int_{\text{Ende Kühlung}}^{\text{Anfang Heizzyklus}} (A * e * \sigma * (T_i^4 - T_a^4)) \quad (5.23)$$

Abb. 5.10 zeigt die Ergebnisse einer energetischen Simulation bei verschiedenen Einstellungen für den Einschalt- und Abschaltzeitpunkt. Zur Erstellung der Grafik wurde der Simulationsablauf für eine Schar von Einschaltzeitpunkten und -dauern für den Bereich um die beiden Maxima des Mittwochs durchgeführt. Für jede Parameterauswahl konnten Heiz- und Kühlbedarf jeweils energetisch summiert und als Datensatz ausgewertet werden.

Die Darstellung zeigt für den gewählten zeitlichen Ausschnitt die Form eines parabolischen Zylinders mit einem lokalen Minimum links und einem globalen Minimum rechts. Das globale Minimum bei 25,69 kWh liegt für den Einschaltzeitpunkt und die Einschaltdauer gerade wieder bei 14:49 Uhr und 5 Kelvin unter Umgebungstemperatur. Das lokale Optimum des Energieverbrauchs liegt zwischen 13:46 Uhr und 13:52 Uhr bei 5,5 Kelvin bis zur Außentemperatur und erreicht einen Wert von 25,79 kWh. Weiterhin zeigt sich, dass der Einfluss des Abstandes zur Außentemperatur deutlich stärker ist, als der zeitliche Versatz des Einschaltens. Daher die Form des parabolischen Zylinders.

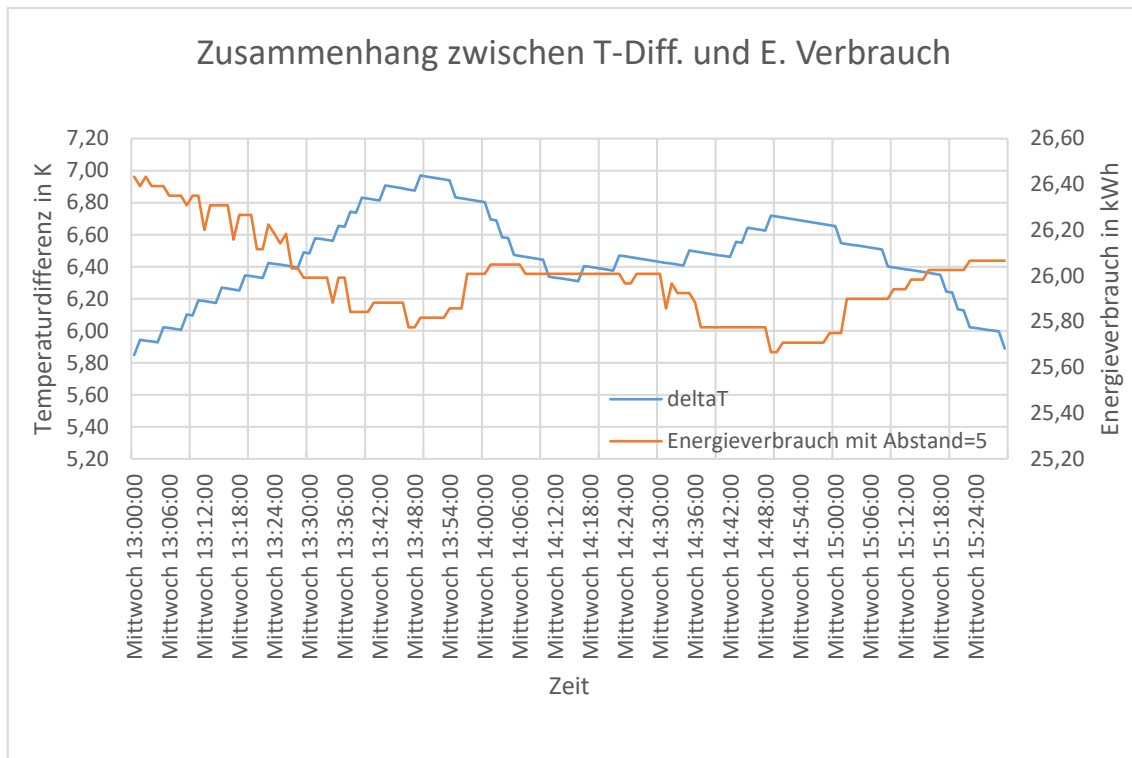
Abb. 5.10: Energieverbrauch für versch. Parameter um die Zeit der Außentemperaturmaxima



Die Ermittlung dieses Optimums kann nur in vereinfachter Form von der geplanten SPS übernommen werden, da diese nicht über die nötige Rechenleistung zur Erstellung umfangreicher Simulationen verfügt. Ziel muss es daher sein, die Suche mit allgemeinen Gesetzmäßigkeiten zu vereinfachen. Dazu zählt, dass die niedrigsten Energieverbräuche offensichtlich gerade zu Beginn der Hochtemperatur-Phasen der Außentemperatur auftreten.

In Abb. 5.1 ist nun der Temperaturunterschied zwischen Umgebung und Öl (blau) und der jeweils nötige Energieverbrauch (orange) gezeigt. Die Zackenform entsteht durch die Auflösung der Temperaturmessung von 0,1 K. Man stellt fest, dass gerade bei Erreichen der größten Temperaturunterschiede auch die Optima der Effizienz liegen. Auffällig ist, dass das globale Effizienzmaximum um 14:49 Uhr nicht die global höchste Temperaturdifferenz aufweist. Dies ist auf den Einfluss der Verluste bis zum Einschalten zurückzuführen. Die Verluste über die Zeit sind beim ersten Maximum höher, als die Effizienzvorteile durch die höhere Temperaturdifferenz.

Abb. 5.11: Temperaturverlauf für Außentemperaturmaximum



Die Erkenntnis, dass gerade beim Erreichen der höchsten Temperaturdifferenz der optimale Energieverbrauch von Option 3 zu finden ist, hilft bei der Extremwertsuche später im Programm. Für die möglichen Zeitpunkte höchster Temperaturdifferenz muss dann lediglich noch der Abschaltzeitpunkt geprüft werden. Der sich daraus ergebende optimale Verbrauch kann zum Vergleich mit Option 2 herangezogen werden.

Die energetische Betrachtung zeigt außerdem, dass beim Einsatz des Kühlers bis zu einem Abstand von 2,4 Kelvin zur Außentemperatur mit 27,8 kWh nicht das energetische Minimum erreicht wird. Das ist sogar mehr, als wenn der Kühler gar nicht zum Einsatz kommt und damit 26,6 kWh gebraucht werden. Das Optimum liegt bei einem Abstand von 5 Kelvin und 25,7 kWh. Dies scheint verwunderlich, da zuvor die Aussage getroffen wurde, dass ab einer Temperaturdifferenz von 2,4 Kelvin zur Außentemperatur der Kühler effizienter heizt als die Heizung. Die Aussage benötigt daher einer weiteren Erklärung. Für den reinen Betrieb des Kühlers ist die Aussage richtig. Die Simulation ermittelt den Verbrauch allerdings im Zeitkontext und bezieht die entstehenden Verluste mit ein, sie müssen zusätzlich ausgeglichen werden. Diese sind im Vergleich der Gradienten zur Ermittlung der minimalen Temperaturdifferenz nicht enthalten. Daher muss in der Praxis die Temperaturdifferenz größer sein, als 2,4 Kelvin.

5.8 Programmablauf

Grobablauf

Die Konzeptionierung des Programmablaufs sollte sich auf das Wesentliche beschränken, um die Anforderungen an die Rechenleistung der SPS so gering wie möglich zu halten. Dazu seien die Erkenntnisse der vorangegangenen Kapitel kurz zusammengefasst:

- Eine Erhöhung der Öltemperatur lohnt sich nicht zur Überbrückung von Stillstandzeiten, daher entfällt Option 1
- Die momentane Obergrenze von 53 °C kann beibehalten werden
- Die Regelcharakteristik nach Option 4 ist energetisch nicht konkurrenzfähig und entfällt
- Im Stillstand kann die Öltemperatur schadlos beliebig absinken, da kein Austausch von Luft im Tank erfolgt
- Im Betrieb darf die Öltemperatur nicht unter 20 °C, bzw. unter den Taupunkt fallen, da hier ein permanenter Austausch von Luft um Tank erfolgt

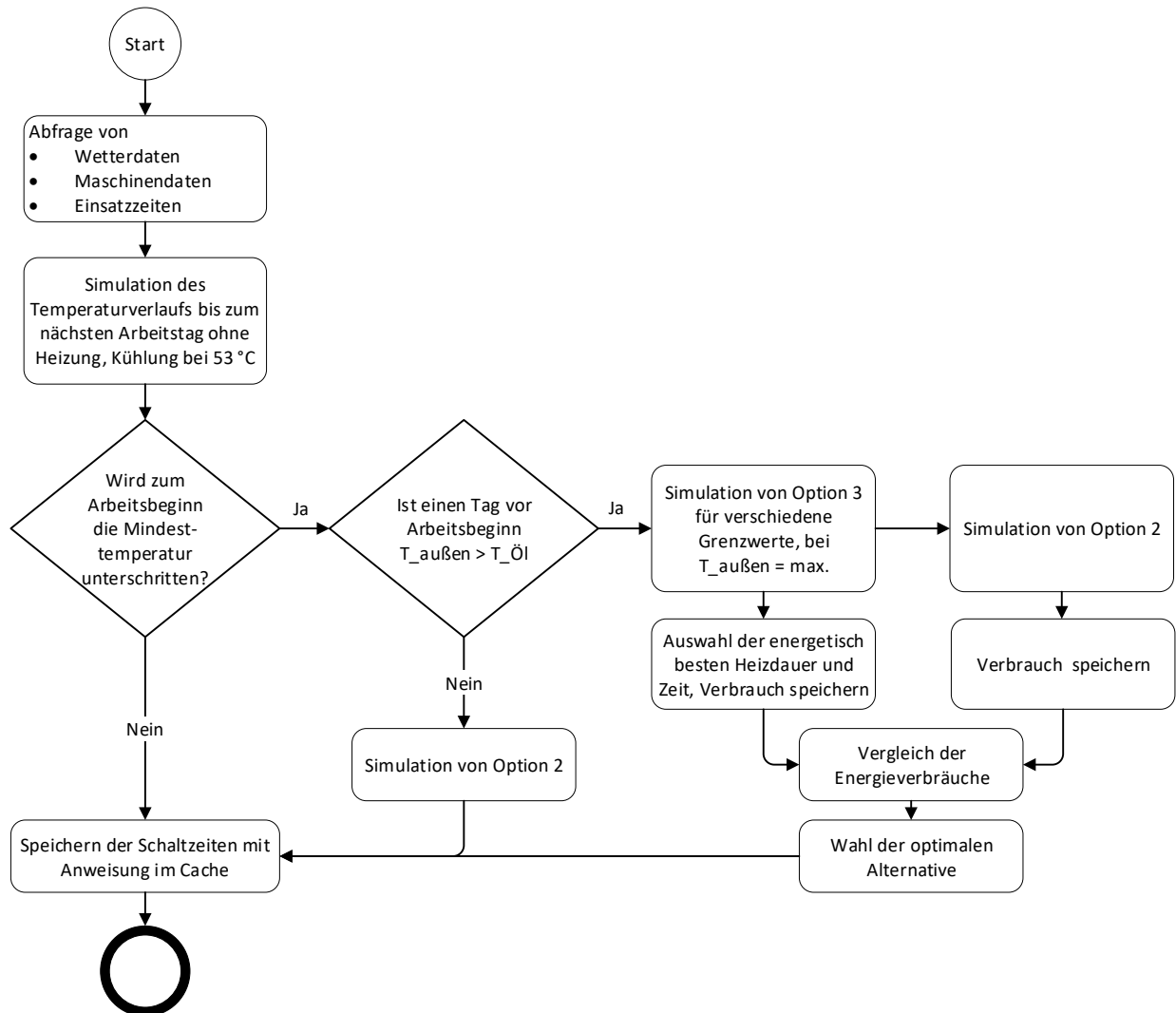
Der Programmablauf sollte bei jeder Änderung der Einsatzzeiten, jede Stunde und bei gravierenden Änderungen in der Wetterprognose neu berechnet werden. Zur besseren Übersicht ist der Programmablauf zweigeteilt dargestellt.

Abb. 5.12 beschreibt den grundsätzlichen Ablauf der Regelung. Der Grobablauf beginnt mit dem Laden von Wetter-, Maschinen- und Planungsdaten- aus Internet, Maschinensteuerung und Datenbank, wenn die Anforderung an eine Neuberechnung gestellt wird. Daraufhin erfolgt eine Simulation über die Dauer bis zum nächsten geplanten Einsatz ohne zusätzliches Heizen und Kühlen. Wird bis zum geplanten Einsatz die Mindesttemperatur von 20 °C unterschritten, so muss eine Maßnahme eingeleitet werden.

Sinkt die Maschinentemperatur unter 20 °C soll eine weitere Abfrage klären, ob in der Zwischenzeit die Außentemperatur höher ist, als die Maschinentemperatur. Dies ermöglicht eine Simulation nach Option 3. Sinkt die Maschinentemperatur nicht unter die Außentemperatur kommt lediglich eine Regelverhalten nach Option 2 in Frage.

Sinkt die Öltemperatur unter die Außentemperatur, werden Simulationen mit verschiedenen Parametern um den Zeitpunkt der maximalen Temperaturdifferenz herum durchgeführt. Die energieärmste Variante wird ausgewählt und für einen Vergleich abgespeichert. Parallel soll Option 2 simuliert werden und dessen Energieverbrauch ebenfalls abgespeichert werden. Der Vergleich zwischen Option 2 und dem besten Ergebnis von Option 3 ermöglicht die Auswahl der kostengünstigsten Variante, welche dann umgesetzt wird.

Abb. 5.12: Grundsätzlicher Programmablauf



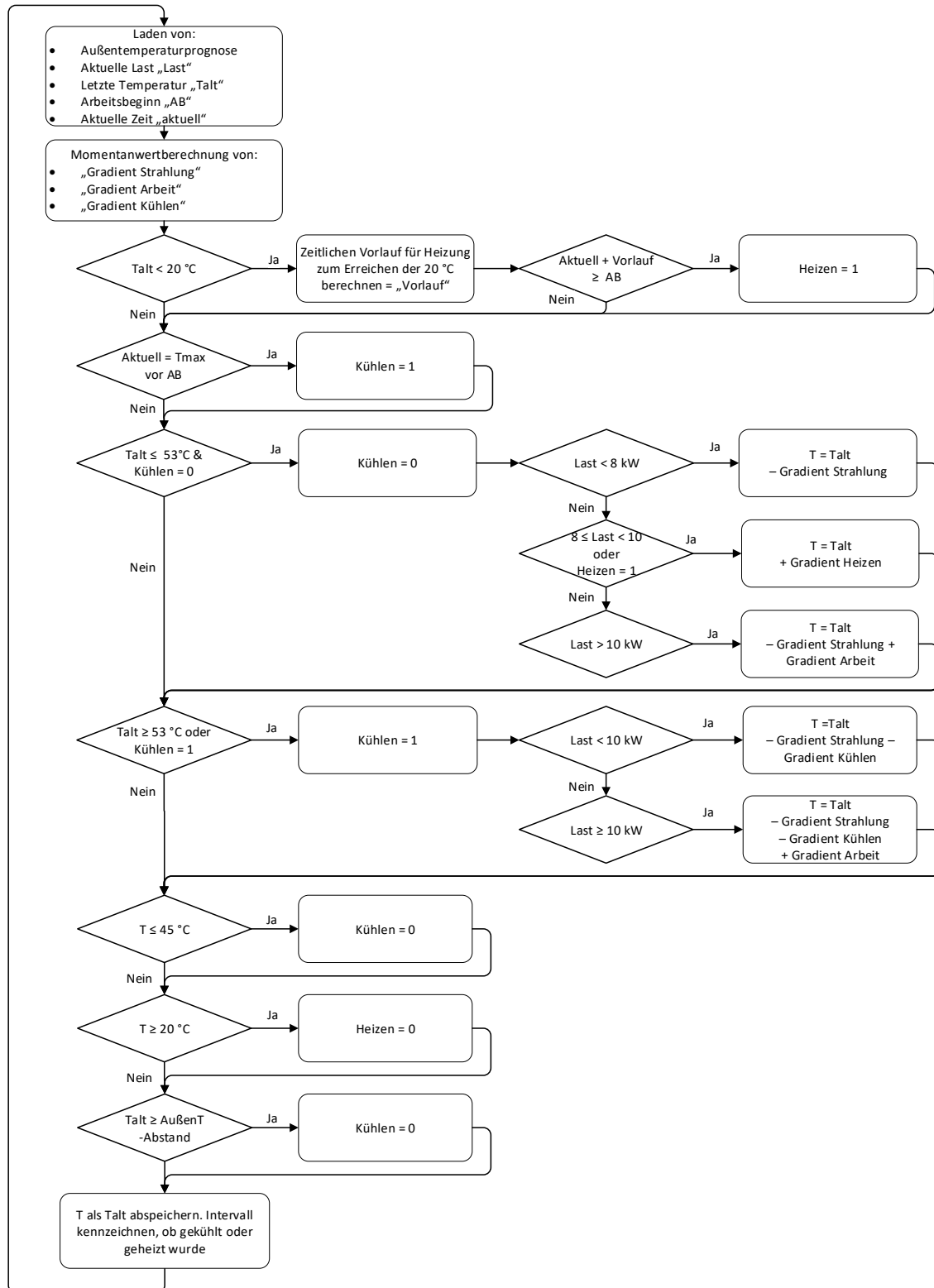
Abarbeiten der Anweisungen im Cache

Simulation

In Abb. 5.13 ist im Detail dargestellt, wie die Simulation abläuft. Wichtig für das Verständnis ist, dass dieser Zyklus für jede Minute der Berechnung erneut abläuft. Die Anzahl der Wiederholungen entspricht dem gewählten Prognosehorizont in Minuten. Unter der „letzten Temperatur“ ist die Temperatur als Ergebnis der letzten Berechnung zu verstehen, also der vorangegangenen Minute. Die Berechnung baut also immer auf dem letzten Ergebnis auf. Ist es die erste Berechnung baut sie auf der Ist-Temperatur des Öls auf.

Der Zyklus beginnt mit dem Laden von Daten. Nun werden aus den Daten der vergangenen Minute die Gradienten für Maschinenstillstand, Arbeitsbelastung und Kühlung berechnet. Eine spätere Verwendung der Gradienten erfolgt je nach aktuellem Lastzustand. Die Gradienten werden nicht alle benötigt, eine Berechnung zu Beginn stellt sie jedoch einheitlich für die folgenden Berechnungen bereit.

Abb. 5.13: Ablauf der Simulation



Die nun folgenden Schritte hängen ausschließlich von der aktuellen Öltemperatur im Tank ab. Sie beginnen mit dem Setzen von sogenannten Signalbits, also einer zusätzlichen Information, welche die Folgeberechnung besser strukturiert. Es folgt die lastabhängige Berechnung der Folgetemperatur. Zum Zyklusende werden die Signalbits wieder auf ihren Ausgangswert gesetzt und die errechneten Werte in die Datenbank geschrieben.

Liegt aktuell eine Öltemperatur unter 20 °C vor, so bedeutet dies, dass ein Einschalten aktuell nicht möglich ist. Aus der Differenz zwischen aktueller Öltemperatur und Grenzwert geteilt durch den Gradienten der Heizung ergibt sich die Dauer, welche zum Erreichen des Grenzwertes geheizt werden muss. Dieser Wert wird aufgerundet als „Vorlauf“ gespeichert. Befindet sich der nächste Einschaltzeitpunkt in geringerer zeitlicher Nähe, als die Vorlaufzeit, so wird das Signalbit „Heizen =1“ gesetzt.

In der nächsten Abfrage wird über eine Maximalwertsuche die Uhrzeit der höchsten Außentemperatur am letzten Tag vor Einschalten gesucht. Ist gerade diese Uhrzeit erreicht, so wird das Signalbit „Kühlen =1“ gesetzt.

Ist die Temperatur unter 53 °C und die Kühlung ausgeschaltet („Kühlen=0“) dann erfolgen die nächsten Schritte lastabhängig. Ist die Last kleiner als 8 kW, so ist die Anlage abgeschaltet. Damit berechnet sich die aktuelle Temperatur aus der Vorherigen abzüglich der Wärmeverluste. Liegt die Last zwischen 8 kW und 10 kW, so ist nur die Heizung aktiv. Damit wird nur der Gradient Heizen hinzugerechnet. In ihm sind die Wärmeverluste bereits enthalten. Liegt die Last über 10 kW, besteht normaler Maschinenbetrieb und es wird von 15 % Verlusten in Form von Wärmeeintrag ins Öl ausgegangen. Die aktuelle Temperatur errechnet sich nun aus der alten Temperatur abzüglich des Gradienten für Strahlung und zuzüglich des Gradienten für Arbeit.

Liegt die Temperatur über 53 °C oder ist das Signalbit Kühlen aktiv („Kühlen =1“), wird die Kühlung eingeschaltet. Das bedeutet, dass bei den nun folgenden Rechnungen immer der Gradient für das Kühlen berücksichtigt werden muss. Da ein Heizen und Kühlen gleichzeitig nicht möglich ist, erfolgt nur die Abfrage ob die Last niedriger oder höher als 10 kW ist. Mit Erreichen einer errechneten aktuellen Temperatur unter 45 °C schaltet die Kühlung ab. Das Signalbit für Kühlen wird gleich null gesetzt und bis in den nächsten Berechnungszyklus gespeichert.

Geheizt wird nur bis zu einer Temperatur von 20 °C, weshalb bei Erreichen der Temperatur das Signalbit („Heizen =0“) gesetzt wird. Für den nächsten Berechnungsablauf ist die Heizung abgeschaltet.

Ist die Kühlung wegen hoher Außentemperatur bislang aktiv und erreicht die aktuell errechnete Temperatur den vorgegebenen Abstand zur Außentemperatur, wie es in Option 3 diskutiert wurde, dann soll die Kühlung abschalten. Dies geschieht indem das Signalbit („Kühlen =0“) gesetzt wird.

Nun werden die errechneten Werte in einer neuen Zeile der Datenbank abgelegt, in der Simulation einer neuen Zeile in MS Excel. Hinterlegt wird die errechnete aktuelle Temperatur, sowie die Information, ob geheizt oder gekühlt wurde. Mit dem Ablegen stehen die Informationen für den nächsten Berechnungsdurchlauf zur Verfügung. Die Berechnungen werden so lange wiederholt bis der Berechnungshorizont erreicht wird. Dieser liegt in der aktuellen Simulation bei einer Woche, also 10.080 Berechnungen. In der Praxis kann die Anzahl an Durchläufen auf die Dauer bis zum nächsten Maschinenstart begrenzt werden, wäre also variabel. Das hat den Vorteil, dass nicht nur eine einzige Berechnung verkürzt wird, sondern bei Option 3 auch die gesamte Anzahl an Simulationen, bis das Optimum gefunden wird.

5.9 Wirtschaftliche Bedeutung

Wie in Abschnitt 5.7.1 gezeigt, sinkt die Temperatur im Tank zwischen dem zweiten und vierten Tag im Stillstand kaum noch weiter ab. Das bedeutet, dass energetisch kaum ein Unterschied zwischen einem normalen Wochenende und einem Langen besteht. Am Montagmorgen um 6:00 Uhr betrug die Temperatur zum Arbeitsbeginn 16,4 °C. Nach Formel (5.24) bedeutet das einen Heizaufwand von rund 20,6 kWh. Der Energiebedarf nach 4 Tagen lag bei 25,7 kWh. Im Jahr 2017 gab es 5 lange Wochenenden mit maximal 3 freien Tagen. Im Verhältnis zur Gesamtzahl von 52 Wochenenden fallen diese kaum ins Gewicht. Das bedeutet nach Formel (5.25), dass bei der überwiegenden Anzahl normaler Wochenenden im Jahr die Kosten zur Temperierung des Öls auf rund 192 € sinken. Die ursprünglichen Kosten vor jeder Optimierung lagen bei 1600 €. Aktuell liegen sie noch bei 800 €.

$$5,72 \frac{kWh}{K} * (20 - 16,4)K = 20,59 kWh \quad (5.24)$$

$$20,59 kWh * 0,18 \frac{€}{kWh} * 52 = 192,74 € \quad (5.25)$$

Mit einer optimalen thermischen Isolierung des Tanks dürfte der Heizbedarf noch weiter sinken oder sogar vollständig entfallen. Damit würde das Unternehmen mindestens die in Kapitel 4.6.3 erwähnte Reduktion der Heizkosten um 720 € erreichen. Geht man von einer Verringerung der Auslastung der Anlage aus und damit geringerem Wärmeeintrag durch den Betrieb, dann wird das Ergebnis gegenüber der aktuellen Regelung sogar noch deutlicher ausfallen.

5.10 Optimierungspotential

Für den gezeigten Berechnungsablauf werden bislang 3 Faktoren als externe Eingaben benötigt. Das sind eine Angabe über die Verluste durch Strahlung, der Wirkungsgrad der Anlage und ein Gradient für das Einschalten der Heizung.

Die Verluste durch Strahlung sind zum einen unklar und lassen sich zum anderen durch eine Isolation deutlich reduzieren. Fraglich ist, ob eine Isolation zu einer Energieeinsparung führen würde oder sich dadurch die Laufzeit des Kühlers übermäßig erhöht. Da der Wärmeverlust direkt von der Dicke der Isolation abhängt, müsste sich über ein Näherungsverfahren die optimale Dicke der Isolation ermitteln lassen, bei der der Gesamtenergiebedarf minimal ist. Dass eine zweite Presse ab Mitte des Jahres 2018 die Auslastung herabsetzen wird, lässt diesen Aspekt interessant erscheinen.

Der Wirkungsgrad der Anlage wurde für die Simulation an Richtwerten angelehnt, kann aber auch anhand von definierten Zyklen während des Betriebes ermittelt werden. Zum Beispiel, indem der Gradient der Temperaturerhöhung bei definierter Last und definierten Wärmeverlusten errechnet wird. Vorteil einer solchen Ermittlung wäre der Rückschluss auf den aktuellen Zustand der mechanischen Komponenten und damit ein Schritt in Richtung einer prädiktiven Wartung und Condition Monitoring.

Ein weiteres Potenzial liegt in der genauen Berechnung des Heizgradienten. Bislang wird von einem festen Wert ausgegangen. Wie in Abschnitt 4.6.2 gezeigt, ist dieser aber ebenfalls

außentemperaturabhängig. Seine Berechnung kann im Programmablauf hinterlegt werden. Die präzisere Ansteuerung der Heizung hätte aber energetisch kaum Vorteile.

Durchaus vorteilhaft könnte im Programmablauf eine Taktung der beiden großen Pressen sein, um die Lastspitzen versetzt entstehen zu lassen. Das ließe sich über die Kommunikation der beiden nachgerüsteten mE SPS lösen und würde die Entstehung von Lastspitzen verhindern helfen. Dadurch sinken die Leistungspreise deutlich und damit die gesamten Energiebezugskosten.

Außerdem wurde bislang die Möglichkeit außer Acht gelassen, den Strompreis an der Börse in die Berechnung mit einfließen zu lassen. Das Unternehmen verhandelt gerade mit seinem EVU über einen börsenpreisabhängigen Strombezug. Sollten die Verhandlungen erfolgreich sein, so müsste die Simulation um den Faktor der Stromkosten erweitert werden.

6 Fazit

Ziel dieser Arbeit war es herauszufinden,

- ob das bestehende Messsystem des Beratungshauses erfolgreich um eine aktive Regelungsaufgabe erweitert werden kann
- bei welchen Anlagen oder Anlagentypen eine intelligente Fahrweise ermöglicht werden kann und
- ob das Konzept für das Beratungshaus und seine Kunden einen Anreiz darstellt.

Bezüglich der technischen Machbarkeit zeigte sich in Abschnitt 3, dass das Messsystem alleine nur als einzelner Baustein einer Regelung gesehen werden kann. Ein vollständiger Regelkreis erfordert zusätzlich ein aktives Element, welches Einfluss auf die Anlage oder den Anlagenteil nimmt. Der mE180 Controller liefert für diesen Regelkreis in sekundlicher Auflösung Energiemesswerte und stellt diese nahezu in Echtzeit zur Verfügung. Diese Basis kann für eine Regelung genutzt werden, wenn die nötige Datenübermittlung und Verarbeitung gelingt. Die Herausforderung besteht in der Übermittlung sekundlicher Messwerte über ein stabiles Netzwerk in eine Datenbank. Dort muss rechtzeitig eine Verarbeitung stattfinden und ein Stellsignal zum Aktor übermittelt werden. Für die Verarbeitung und Speicherung der anfallenden Datenmengen kommen bislang nur Cloud-Dienste in Frage. Die Netzwerkinfrastruktur des Kunden erfüllt teilweise die Anforderungen nicht, weshalb dies in der Vergangenheit gelegentlich zum Engpass der gesamten Datenverarbeitung wurde. Hier zeigt sich auch, dass die IT-Infrastruktur gerade in kleinen Unternehmen bislang eine eher geringe Rolle spielt. Ein zuverlässiges Laden der Daten in hoher Auflösung wird jedoch nicht nur vom Kunden erwartet, es ist für eine präzise energetische Analyse genauso wichtig, wie für eine reibungslose Regelung. Aufwendige Anpassungen des Programmablaufs zur Kompensation von Übertragungsengpässen könnten mit dem Ausbau der IT-Infrastruktur entfallen.

Bei zunehmender Unternehmensgröße und damit auch zunehmender Komplexität der Elektroverteilung nimmt der konzeptionelle Aufwand der Installation und Analyse bedeutend zu. Oftmals basiert die vorhandene Verteilung auf gewachsenen Strukturen aus dem letzten Jahrhundert, die nicht dem heutigen Sicherheitsstandard entsprechen. Aber auch moderne Motorsteuergeräte mit integrierter Blindstromkompensation⁸ erschweren eine Analyse, da die Messwerte nicht dem tatsächlichen Strombedarf entsprechen. Eine korrekte Analyse nimmt dann übermäßig viel Zeit in Anspruch.

Eine weitere technische Schwierigkeit kann in der einseitigen Auslegung des Controllers auf die reine Verarbeitung von Strom- und Spannungssignalen liegen. Wie die Anwendung beim Kunden zeigt, sind weitere Informationen wie Temperaturen und Füllstände notwendig, welche nicht vom Controller aufgenommen werden können. Er lässt sich auch nicht um eine entsprechende Messstelle erweitern. Für diese Problematik muss bislang ein zusätzliches Messgerät verbaut oder eine Verbindung zur Maschinensteuerung hergestellt werden. Das erfordert jedenfalls die zusätzliche Projektierung einer Datenbankschnittstelle.

Angesichts der Schwierigkeiten in der Umsetzung des Konzeptes kann man die erste Fragestellung der Thesis nicht eindeutig positiv beantworten. Die neuen Herausforderungen und der Umfang einer Regelung können kaum als Erweiterung des Messsystems gesehen werden. Vielmehr handelt es sich um ein neues Produkt, dessen Entwicklung eigene Schwierigkeiten und Herausforderungen zu bewältigen hat. Die Datenaufnahme durch den mE180-Controller ist darin

⁸ Siehe hierzu: Siemens Active Line Module

lediglich ein kleiner Teil. Ob die Entwicklung insgesamt positiv verläuft, werden die ersten Lösungen beim Kunden zeigen.

Dank der guten Zusammenarbeit mit den Verantwortlichen der Firma MRS war es möglich einen tiefen Einblick in deren Geschäftsprozesse, deren Maschinen und Anlagen zu erhalten. Die Analyse zeigte, dass unter den vorhandenen Anlagen nur die alte und die neue Große Presse für eine vorausschauende Regelung in Frage kommen. Diese sind gleichzeitig die beiden zentralen Maschinen des Verarbeitungsbetriebes und die Hauptstromverbraucher. Sie besitzen einen großen Vorrat an temperiertem Hydrauliköl und dadurch eine bedeutende thermische Masse. Durch die ständige Temperierung besteht ein hoher Energiebedarf. Die 2-Punkt-Regelung der Anlagen bietet Potential zur Optimierung und der Einsatz der Anlagen ist relativ gut planbar. Außerdem sinken mit der Inbetriebnahme der neuen Großen Presse die Einsatzzeiten beider Anlagen. Durch die dann langen Stillstandzeiten wird der Energiebedarf sehr wahrscheinlich ansteigen. Angesichts dessen sind sie geeignet für eine Optimierung nach dem Konzept der vorausschauenden Regelung, welche nach Kapitel 4.7 bis zu 2,5 % Energieeinsparung gegenüber dem Gesamtenergiebedarf vom Jahr 2017 bewirken kann. Die Bedingung der Einführung eines Produktionsplanungssystems kann mit einfachen Mitteln erfüllt werden, welche der Geschäftsführung nur wenig zusätzliche Arbeit, aber vor allem einen Mehrwert bietet. Dieser Mehrwert beschränkt sich nicht nur auf die bessere Transparenz hinsichtlich der Maschinenauslastung. Die Kombination mit der Darstellung von Lastdaten bietet Potential für weitere Analysen.

Die zweite Fragestellung der Thesis lässt sich mit den Erfahrungen der Firma MRS zwar nur einseitig beantworten, Erfahrungen aus anderen Betrieben bestätigen aber was im Unternehmen zum Vorschein kam. Gerade die Peripherie großer Anlagen kommt für eine vorausschauende Regelung in Frage und hier besonders die energieintensiven Prozesse, wie Heizen und Kühlen.

Wo energieintensive Prozesse deutlich verschlankt oder sogar komplett eingespart werden können, da besteht das Potenzial einer ebenso deutlichen Kostensenkung. Gerade mittelständische Unternehmen, welche unter besonderem Kostendruck durch internationale Konkurrenz stehen, können hier einen entscheidenden Teil zur Wirtschaftlichkeit des Gesamtprozesses beitragen. Über die Optimierung von einzelnen Anlagen hinaus wurden Abläufe und Zusammenhänge im Unternehmen kritisch hinterfragt und dadurch auch weitergehende Potenziale aufgedeckt, die über die energetische Sichtweise hinausgehen. Diesbezüglich sei auf die Abweichung zwischen den Daten des BDE-Systems und Energiedatenerfassung bezüglich der Produktivität verwiesen. Außerdem konnten mit dem Abgleich der Laufzeiten von Kran und Presse weitere Potentiale im Zusammenspiel beider Anlagen nachgewiesen werden. Die Umsetzung der erkannten Potentiale wird die Kosten bei Stillstand senken und damit langfristig zum effizienteren Einsatz von Energie führen. Ein ähnliches Vorgehen ist beim Zusammenspiel von Rotorschere und Kran Rotorschere geplant. Dieses wird die Stillstandzeiten minimieren und dadurch die Produktivität der Anlagen steigern. Das untersuchte Unternehmen profitiert also bereits im Rahmen der Analyse von den Erkenntnissen über den Geschäftsprozess. Daraus hervorgehende Optimierungen betreffen nicht nur die energetische Seite des Fertigungsprozesses, sondern insbesondere die Effizienz der Fertigung und das Zusammenspiel der Prozesse. Das bedeutet für das Unternehmen weniger eine Einsparung von Energiekosten, sondern eine Steigerung der Wirtschaftlichkeit, höheren Durchsatz oder die Vermeidung von Stillstandzeiten. Kapitel 4.6.3 zeigte, dass mit einer einzigen Maßnahme durch die Erhöhung der Wirtschaftlichkeit mehr Gewinn erwirtschaftet werden kann, als mit allen Einsparungen zusammen Kosten reduziert werden können. Die eigentliche

Energieeinsparung rückt damit auch finanziell in den Hintergrund, obgleich es im Rahmen des Einsparzählerprogramms der BAFA das genannte Ziel ist. Andererseits konnte mit dem Konzept der vorausschauenden Regelung eine Lösung für ein beachtliches Einsparpotenzial präsentiert werden, wenn die Anlagen nicht voll ausgelastet sind. Für das Unternehmen hat die Beschäftigung mit deren Anlagen weiterhin den Vorteil, dass auch technisches Knowhow als externe Dienstleistung von einem einzigen Anbieter, dem Beratungshaus, angefordert werden kann. Das verschlankt den Beauftragungsprozess und in der Ausführung kann eine lange Zusammenarbeit zum Abbau von Kontrollmechanismen beitragen.

Für das Beratungshaus und den Verfasser brachte die Zusammenarbeit mit der Firma MRS einen sehr tiefen Einblick in deren Fertigungsprozess, vermittelte ein Verständnis für deren Probleme und ging deutlich über die reine Analyse von Zahlen und Daten hinaus. Das Beratungshaus konnte sich mit dem prozesstechnischen Verständnis als Partner und erster Ansprechpartner für Automatisierungslösungen beweisen. Folgeaufträge gingen über die energetische Sichtweise der BAFA deutlich hinaus. Damit wurde das Unternehmensziel erreicht, über das Förderprogramm einen Einstieg in das Unternehmen zu finden und sich dort für Folgeaufträge zu positionieren. Die wechselnden Anfragen und Anforderungen an das Beratungshaus ermöglichen es, sich breitgefächert mit aktuellen Themen der Energietechnik, aber auch der Automatisierung zu beschäftigen und neue Geschäftsfelder zu erschließen. Als Beispiel sei das Condition Monitoring zu nennen, dessen Vermarktungsmöglichkeiten unter anderem im Automobilbau liegen. Die technischen Voraussetzungen für eine Maschinenüberwachung sind mit der umfangreichen Messtechnik gegeben, lediglich die Einrichtung des Systems und die Analyse der Anlagen erfordern viel Zeit. Als kritisch zu betrachten ist die hohe Vorleistung in Form von Messtechnik und Arbeitsleistung, welche vor jeder Optimierung erbracht werden muss. Diese Hürde wird durch die Förderung durch die Bundesregierung allerdings gesenkt. Damit kann auch die dritte Fragestellung der Thesis positiv beantwortet werden. Sowohl das Unternehmen, als auch das Beratungshaus profitieren von der Zusammenarbeit und die Einsparungen stellen einen Anreiz für das Unternehmen dar.

Insgesamt kann man sagen, dass das Konzept der vorausschauenden Regelung technisch wie wirtschaftlich darstellbar ist. Seine Verbreitung im Mittelstand mag bislang an der technischen Umsetzung, dem Knowhow oder an den Kosten scheitern, der Druck auf die Unternehmen wächst allerdings und zwingt diese zur Veränderung. Das Beispiel der Eislaufbahn in Liechtenstein zeigt aber, dass gerade bei wechselnden Auslastungen von Anlagen mit dem Konzept eine deutliche Energieeinsparung erreichbar ist. Unternehmen wie MRS und viele andere KMU verfügen über nur teilweise ausgelastete Anlagen. Angesichts des großen Anteils von KMU in Deutschland kann eine breite Umsetzung des Konzeptes seinen Teil dazu beitragen, den Energiezielen der Bundesregierung näher zu kommen.

7 Literatur

- [BAF1] Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle, http://www.bafa.de/DE/Energie/Energieeffizienz/Einsparzaehler/einsparzaehler_node.html, letzter Zugriff: 16.04.2018
- [BAF2] Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle, Merkblatt zur Antragsstellung – Pilotprogramm Einsparzähler. http://www.bafa.de/SharedDocs/Downloads/DE/Energie/esz_merkblatt_antragstellung.pdf, letzter Zugriff: 16.04.2018
- [bbs18] Wetterstation Willich, Tabellenarchiv. <http://bbs.wing-willich.de/wetter/web/wetter.php>, letzter Zugriff 08.08.2018
- [Dit06] Dittmar, R.; Pfeiffer, B.-M.: Modellbasierte prädiktive Regelung in der industriellen Praxis. In: Automatisierungstechnik, Jg. 54 (2006), Nr. 12
- [Dör15] Döring, S.: Energieerzeugung nach Novellierung des EEG: Konsequenzen für regenerative und nicht regenerative Energieerzeugungsanlagen, Neuwied, 2015
- [Fuc16] FUCHS SCHMIERSTOFFE GMBH: Produktinformation RENOLIN B HVI - PI 4-1222, Mannheim, 2016
- [Fuc18] FUCHS SCHMIERSTOFFE GMBH: Produktinformation RENOLIN MR MC - PI 4-1221, Mannheim, 2018
- [Ful11] Fuller, J. C.; Schneider, K. P.; Chassin, D.: Analysis of Residential Demand Response and double-auction markets. In: IEEE Power and Energy Society General Meeting, San Diego, CA, Jg. 2011, S. 1-7.
- [Gei15] Geilhausen, M. et. al.: Energiemanagement, Wiesbaden, 2015
- [Gel85] Gellings, C. W.: The Concept of Demand-Side Management for Electric Utilities, in: Proceedings of the IEEE, Jg. 73 (1985), Heft 10, S. 1468-1470, Palo Alto, California.
- [Her14] Herschel, D. In: Will, D.; Gebhardt, N. (Hrsg.): Hydraulik, Berlin et. al., 2014
- [JAB17] Jahresabschluss zum Geschäftsjahr vom 01.01.2017 bis zum 31.12.2017, MRS Metall Recycling Service Willich GmbH & Co. KG, <https://www.bundesanzeiger.de>, letzter Zugriff am 29.08.2018
- [Kam12a] Kamper, A.: Dezentrales Lastmanagement zum Ausgleich kurzfristiger Abweichungen im Stromnetz, Dissertation, KIT, 2012
- [Kam12b] Kamper, A.; Schmeck, H.: Adaptives verteiltes Lastmanagement in Bilanzkreisen. In: Informatik Spektrum, Jg. 35 (2012), Heft 2, S. 102-111
- [Kel14] Keller, F. et. al.: Flexibilisierung des Stromverbrauchs in Fabriken, In: 13. Symposium Energieinnovation, 12. - 14.2.2014, Graz/Austria.
- [Kel16] Keller, F.; Reinhart, G.: Energy Supply Orientation in Production Planning Systems In: Procedia CIRP Jg. 40 (2016), S. 244-249
- [Kla10] Klaus, T. et. al.: Energieziel 2050: 100% Strom aus erneuerbaren Energien, Dessau-Roßlau, 2010
- [Moo17] Moog, D. et al.: Energieflexibilitätspotenziale in der Produktionsinfrastruktur, ZWF, Jg. 112 (2017), Heft 12, S. 852-856, Garching

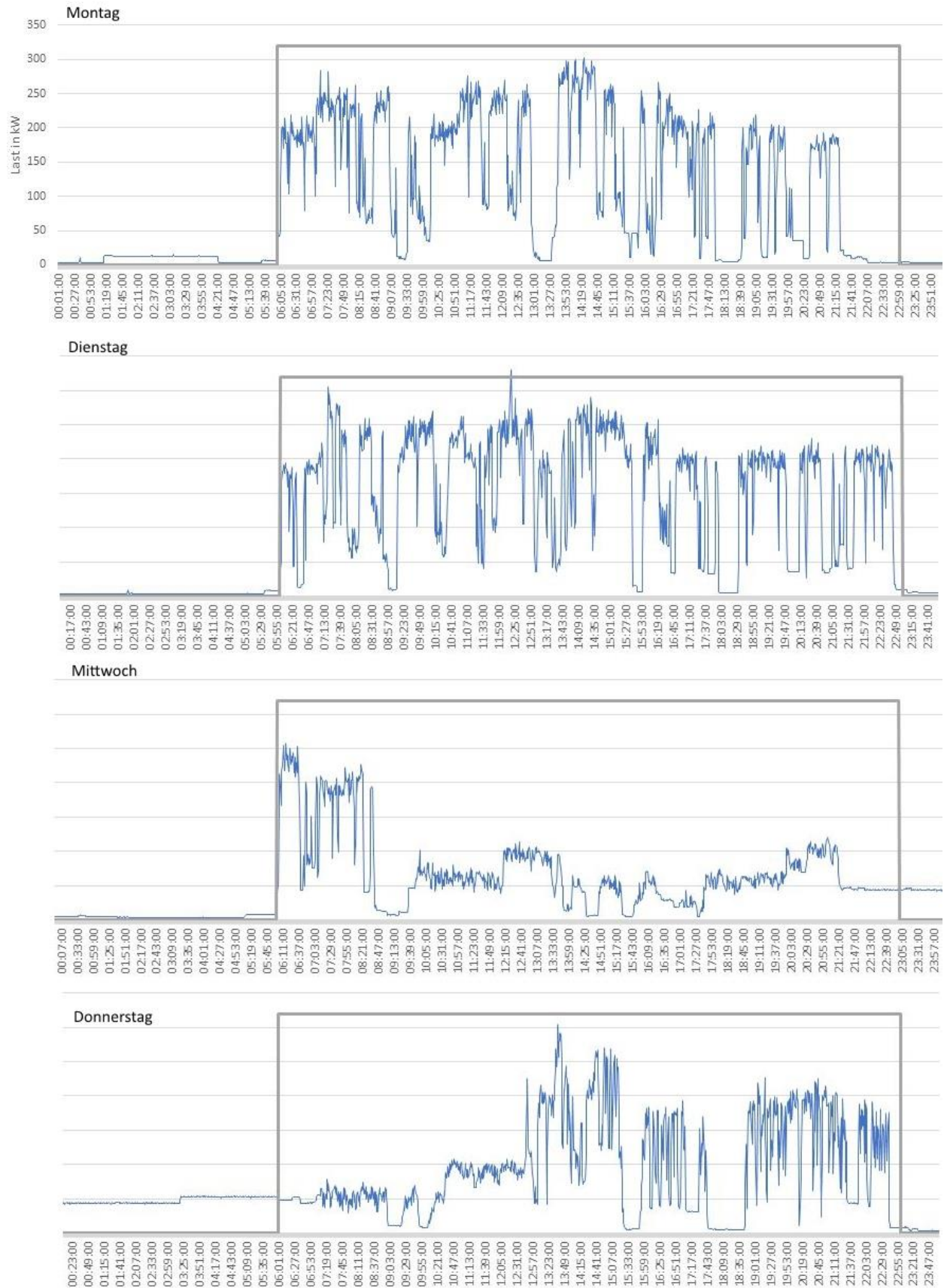
- [Pal11] Palensky, P.; Dietrich, D.: Demand Side Management: Demand Response, Intelligent Energy Systems, and Smart Loads. In: IEEE Transactions on Industrial Informatics, Jg. 7 (2011), Nr. 3, S. 381-387
- [Rag05] Rager, M.: Energieorientierte Produktionsplanung, Dissertation, Universität Augsburg, 2006
- [Sch15a] Schnack, H. et. al.: Regelleistungsbereitstellung und Demand-Side-Management in der Stahlbranche. In: Elektrowärme international, Jg. 2015, Nr. 4, S. 71-78
- [Sch15b] Schellong, W.: Analyse und Optimierung von Energieverbundsystemen, Köln, 2015
- [Sch17] Schuh, G. et. al.: Energieflexible Produktionsplanung und –Steuerung. In: ZWF, Jg. 112 (2017), Heft 12, S. 857-859, Aachen
- [Sei16] Seidel, H. et. al.: Roadmap Demand Side Management - Industrielles Lastmanagement für ein zukunftsfähiges Energiesystem, Berlin, 2016
- [Str08] Strbac, G.: Demand side management: Benefits and challenges. In: Energy Policy, Jg. 36 (2008), S. 4419–4426
- [ten18] TenStep, <http://tenstep.ch/2-arbeitsplan-und-budget-left-17/21-prozesse-left-51/215-produktive-stunden-left-56.html>, letzter Zugriff am 22.08.2018
- [Thr01] Thron, U.: Vorausschauende selbstadaptierende Heizungsregelung für Solarhäuser, Dissertation, Universität Hannover, 2001
- [tra18] <https://transparency.entsoe.eu>, letzter Zugriff am: 14.08.2018
- [Vog16] Vogel-Heuser, B.; Bauernhansl, T.; ten Hompel, M.: Handbuch Industrie 4.0 Bd. 2, München et. al., 2016
- [Wie16] Wiemer, C.: Energiesparendes Eislaufen - Kälteanlage mit „Meteo-Steuerung“. In: KKA, Jg. 2016, Heft 2, S. 48-49
- [Win12] Winkler, H.: Wenn ein Hydrauliköl vorschnell altert, In: fluid Markt 2013, Jg. 46 (2012), S. 112-117
- [Win14] Winter, J.: Intelligentes Energiemanagement in kleinen und mittleren Unternehmen, Dissertation, KIT, 2014

8 Anhang

Abb. 8.1: Auftragsdaten der Großen Presse für KW 34, 2017

Produktionsaufträge Große Presse													
Anfang	Ende	Charge	Sorte	Meter	Gewicht	Minuten	Stunden	Last[kW]	Energie[kWh]	[kWh/m]	[m/Std.]	E. Kosten [€]	[€/m]
Montag 18.09.2017													
08:35	09:27	19238	06-5000 ex Lydall	15	3600	00:52	0,87	90,81	78,71	5,25	17,31	14,17	0,94
10:09	11:41	19257	06-3xxx	53	12500	01:32	1,53	146,93	225,29	4,25	34,57	40,55	0,77
11:45	12:26	19237	06-3000 ex Lydall	18	4660	00:41	0,68	123,03	84,07	4,67	26,34	15,13	0,84
12:31	12:55	19219	06-1005	13	18420	00:24	0,40	128,90	51,56	3,97	32,50	9,28	0,71
13:38	15:32	19219	06-1005	52		01:54	1,90	114,23	217,03	4,17	27,37	39,07	0,75
15:50	20:14	19220	06-5000 Mix	78	17020	04:24	4,40	88,59	389,78	5,00	17,73	70,16	0,90
							9,78						
Dienstag 19.09.2017													
08:45	10:26	19244	06-9670	39	8960	01:41	1,68	102,16	171,97	4,41	23,17	30,95	0,79
10:32	12:58	19263	06-6000-6043	72	16360	02:26	2,43	136,80	332,87	4,62	29,59	59,92	0,83
13:01	13:37	19263	06-6000-6043	11		00:36	0,60	109,90	65,94	5,99	18,33	11,87	1,08
13:39	16:42	19209	06-9690	79	14980	03:03	3,05	116,26	354,59	4,49	25,90	63,83	0,81
16:46	17:46	19245	06-1005	22		01:00	1,00	116,33	116,33	5,29	22,00	20,94	0,95
17:52	21:29	19273	06-6020	78	18360	03:37	3,62	95,74	346,26	4,44	21,57	62,33	0,80
21:39	22:48	19230	06-1020	40		01:09	1,15	139,43	160,34	4,01	34,78	28,86	0,72
							13,53						
Mittwoch 20.09.2017													
06:00	06:57	19230	06-1020		16340	00:57	0,95	106,07	100,77	#DIV/0!	0,00	18,14	#DIV/0!
07:01	08:26	19048	06-6070	45	7320	01:25	1,42	131,66	186,52	4,14	31,76	33,57	0,75
08:31	10:29	19260	06-6020	67		01:58	1,97	#BEZUG!	#BEZUG!	#BEZUG!	34,07	#BEZUG!	#BEZUG!
							4,33						
Donnerstag 21.09.2017													
13:02	14:06	19293	06-6020	27	6580	01:04	1,07	124,23	132,51	4,91	25,31	23,85	0,88
14:10	15:34	19240	06-6020	22	5540	01:24	1,40	69,16	96,83	4,40	15,71	17,43	0,79
15:52	18:07	19260	06-6020	32	9520	02:15	2,25	54,08	121,67	3,80	14,22	21,90	0,68
18:43	22:07	19264	06-5000 Mix	97	19280	03:24	3,40	118,19	401,84	4,14	28,53	72,33	0,75
22:09	22:46	19274	06-5000 Mix	17		00:37	0,62	#BEZUG!	#BEZUG!	#BEZUG!	27,57	#BEZUG!	#BEZUG!
							8,73						
Freitag 22.09.2017													
06:03	07:38	19051	06-6070		6880	01:35	1,58	144,04	228,06	#DIV/0!	0,00	41,05	#DIV/0!
07:39	07:40	19053	06-6070	0	12700	00:01	0,02	26,68	0,44	#DIV/0!	0,00	0,08	#DIV/0!
07:50	09:23	19312	06-6020	40	8780	01:33	1,55	100,10	155,15	3,88	25,81	27,93	0,70
09:43	10:18	19242	06-1000	17	4080	00:35	0,58	111,49	65,04	3,83	29,14	11,71	0,69
10:23	11:28	19274	06-5000 Mix	27	10040	01:05	1,08	83,99	90,99	3,37	24,92	16,38	0,61
11:44	12:55	19311	06-3000	43	12560	01:11	1,18	131,02	155,04	3,61	36,34	27,91	0,65
13:08	13:31	19311	06-3000	1	0	00:23	0,38	33,29	12,76	12,76	2,61	2,30	2,30
13:38	13:48	19215	06-1015 ex Agfa	2		00:10	0,17	74,55	12,42	6,21	12,00	2,24	1,12
13:49	14:39	19201	06-1015	23	6750	00:50	0,83	100,36	83,63	3,64	27,60	15,05	0,65
14:51	15:16	19310	06-5xxx	10	17980	00:25	0,42	97,78	40,74	4,07	24,00	7,33	0,73
15:20	17:31	19275	06-5005	41	10020	02:11	2,18	77,16	168,46	4,11	18,78	30,32	0,74
18:18	21:17	19310	06-5xxx	61	0	02:59	2,98	#BEZUG!	#BEZUG!	#BEZUG!	20,45	#BEZUG!	#BEZUG!
				265	89790		12,97						
Samstag 23.09.2017													
08:16	09:40	19215	1218 - MVG		9100	01:24	1,40						
		19218	1218 - MVG		17780								
		19265	1212 - Oekotech		6460								
			1844 - Sortech										
		19251	Recycling		15480								
		19276	1916 - Otto Pape		15200								
							1,40						

Abb. 8.2: Last an Netzentnahme in KW 34, 2017



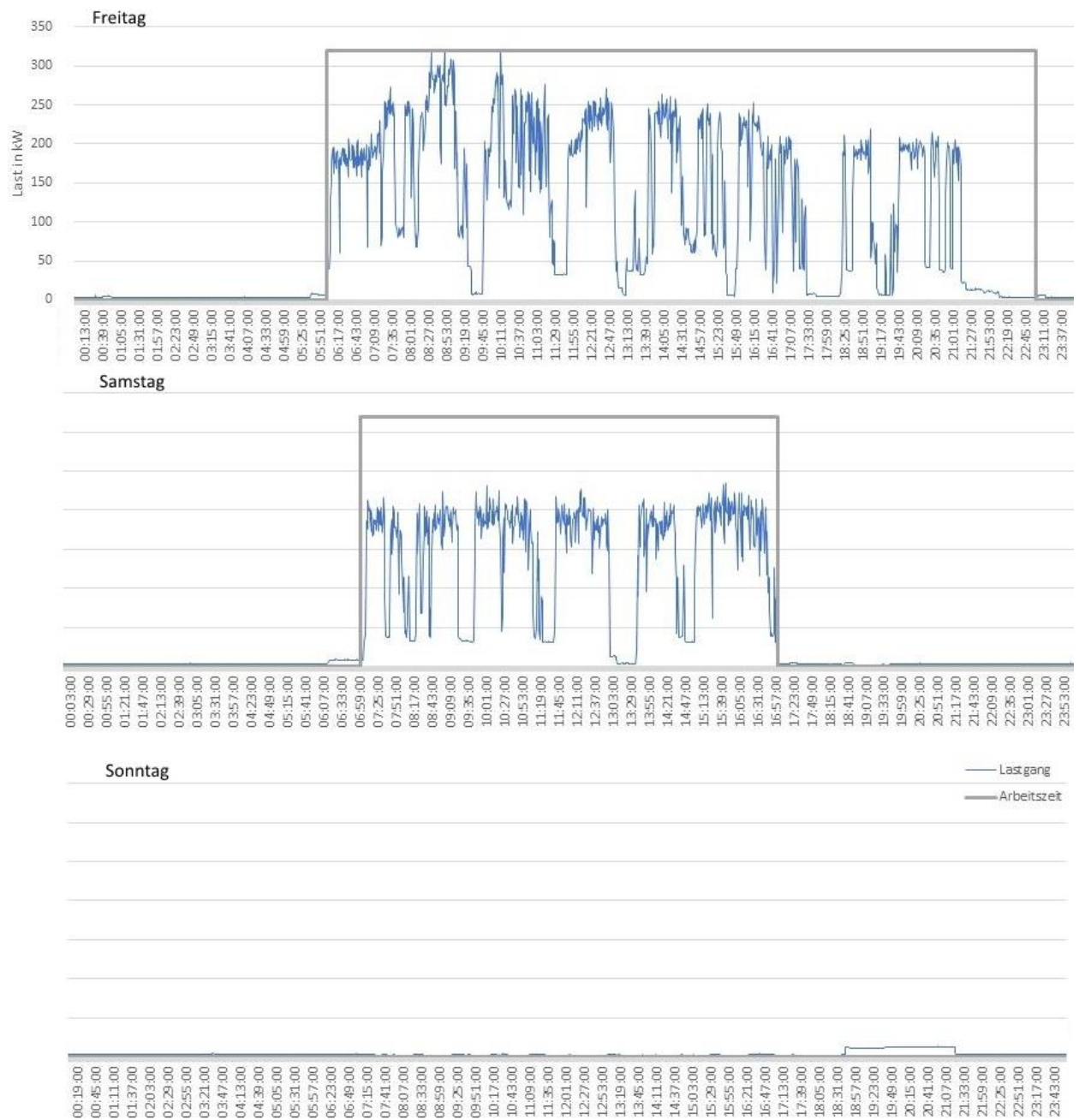


Abb. 8.3: Last und Aufträge der Große Presse und Kran Große Presse in KW 34, 2017

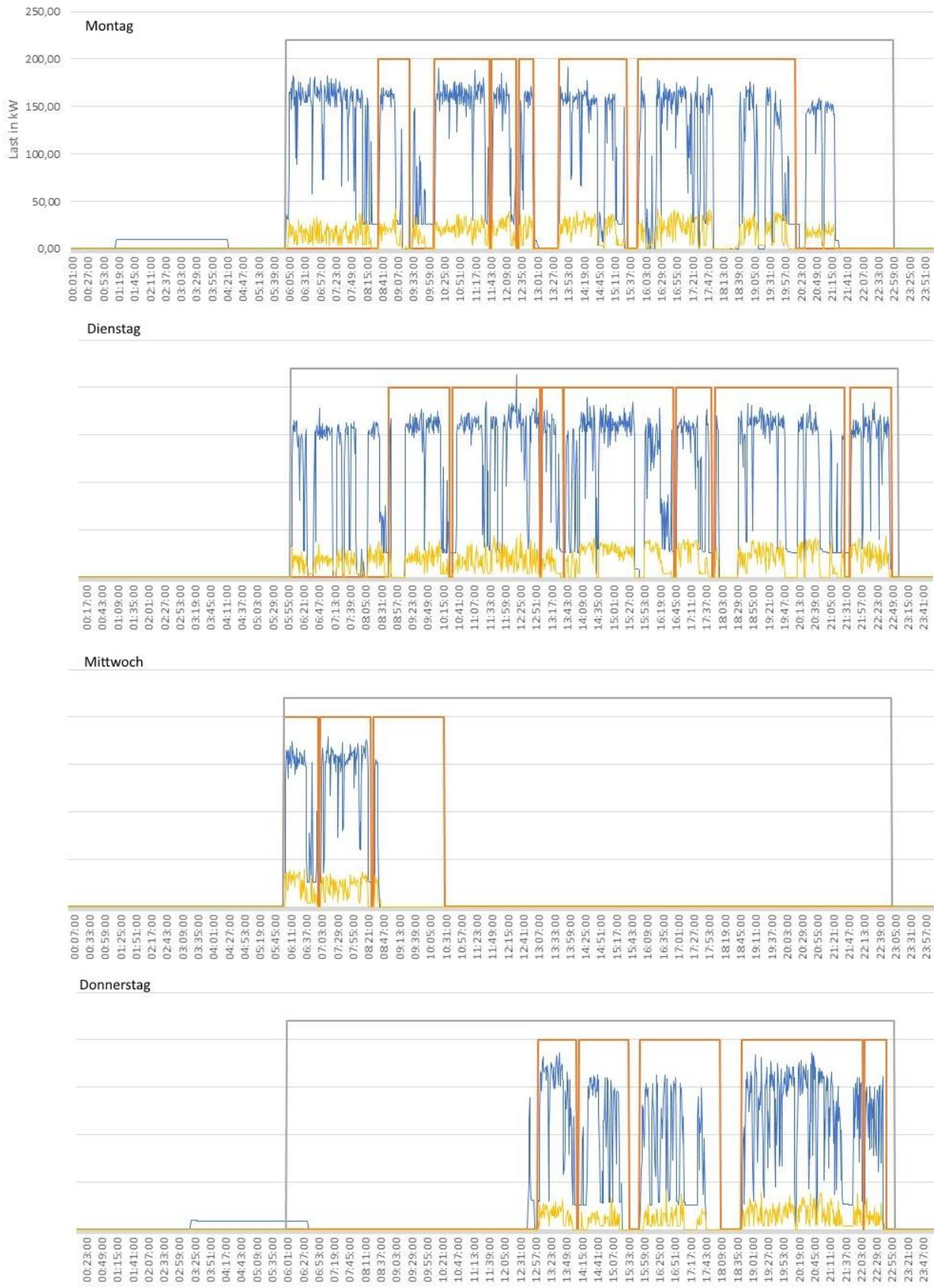




Abb. 8.4: Last an großer Presse, einzelne Tage übereinander, in KW 34, 2017

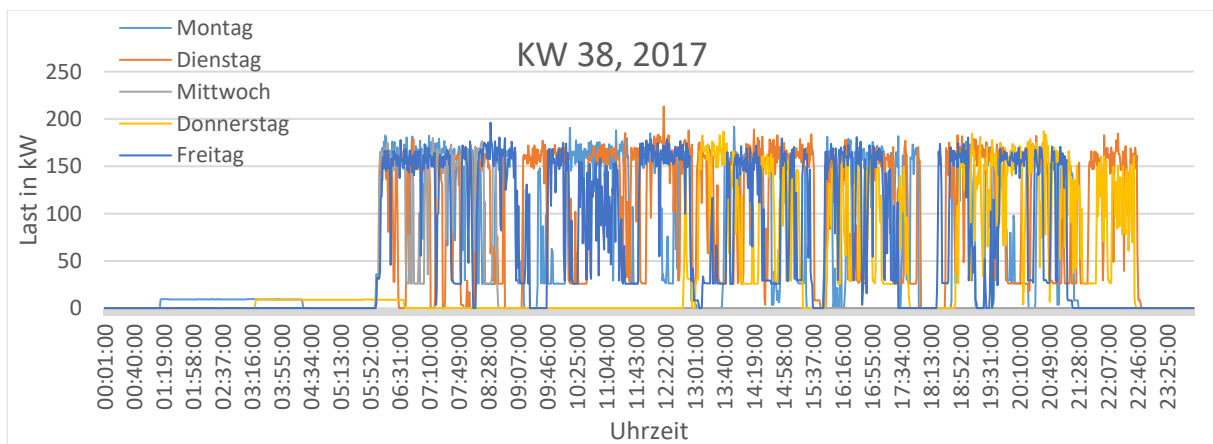
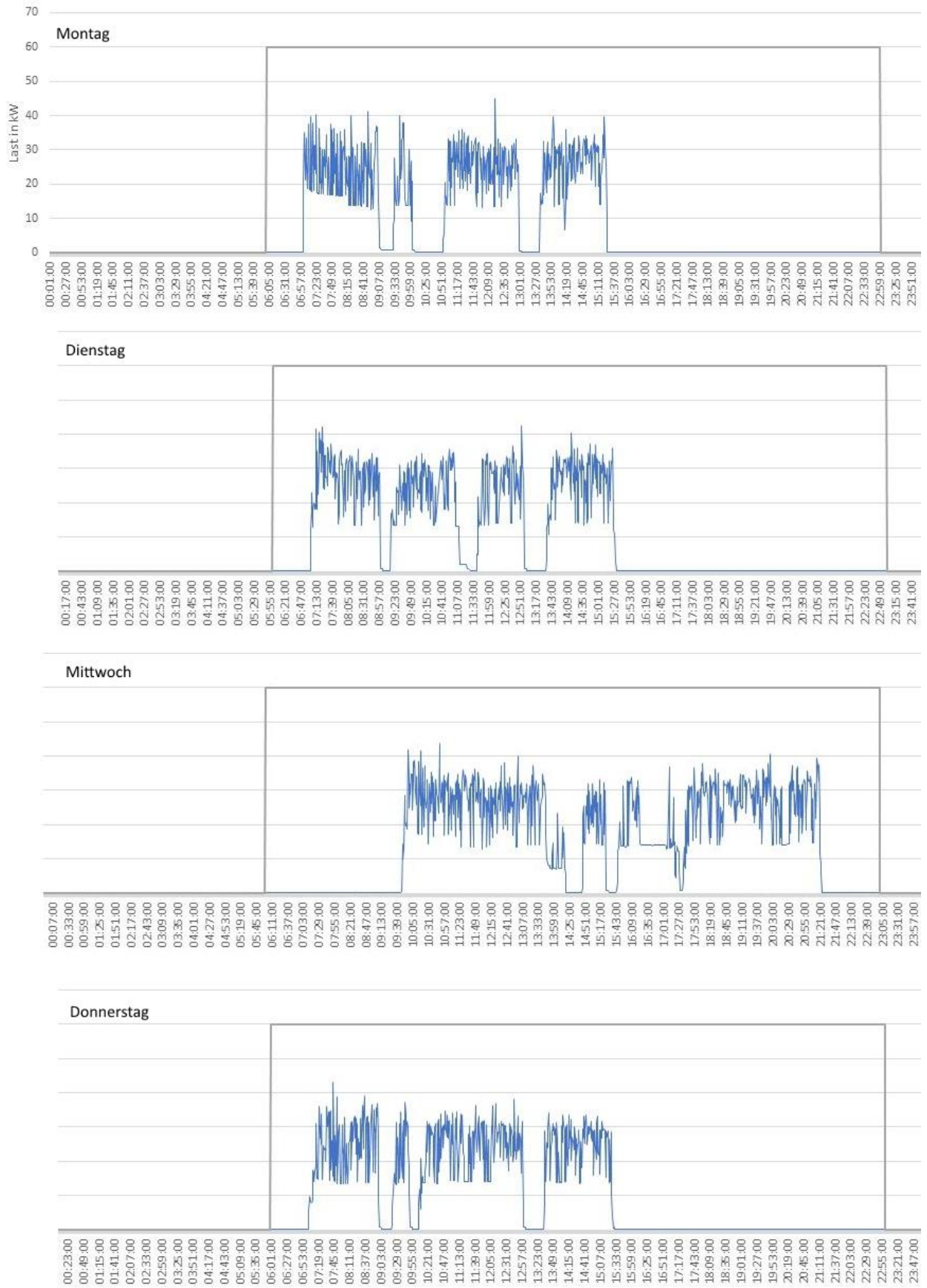


Abb. 8.5: Last an Dosenpresse mit Arbeitszeiten in KW 34, 2017



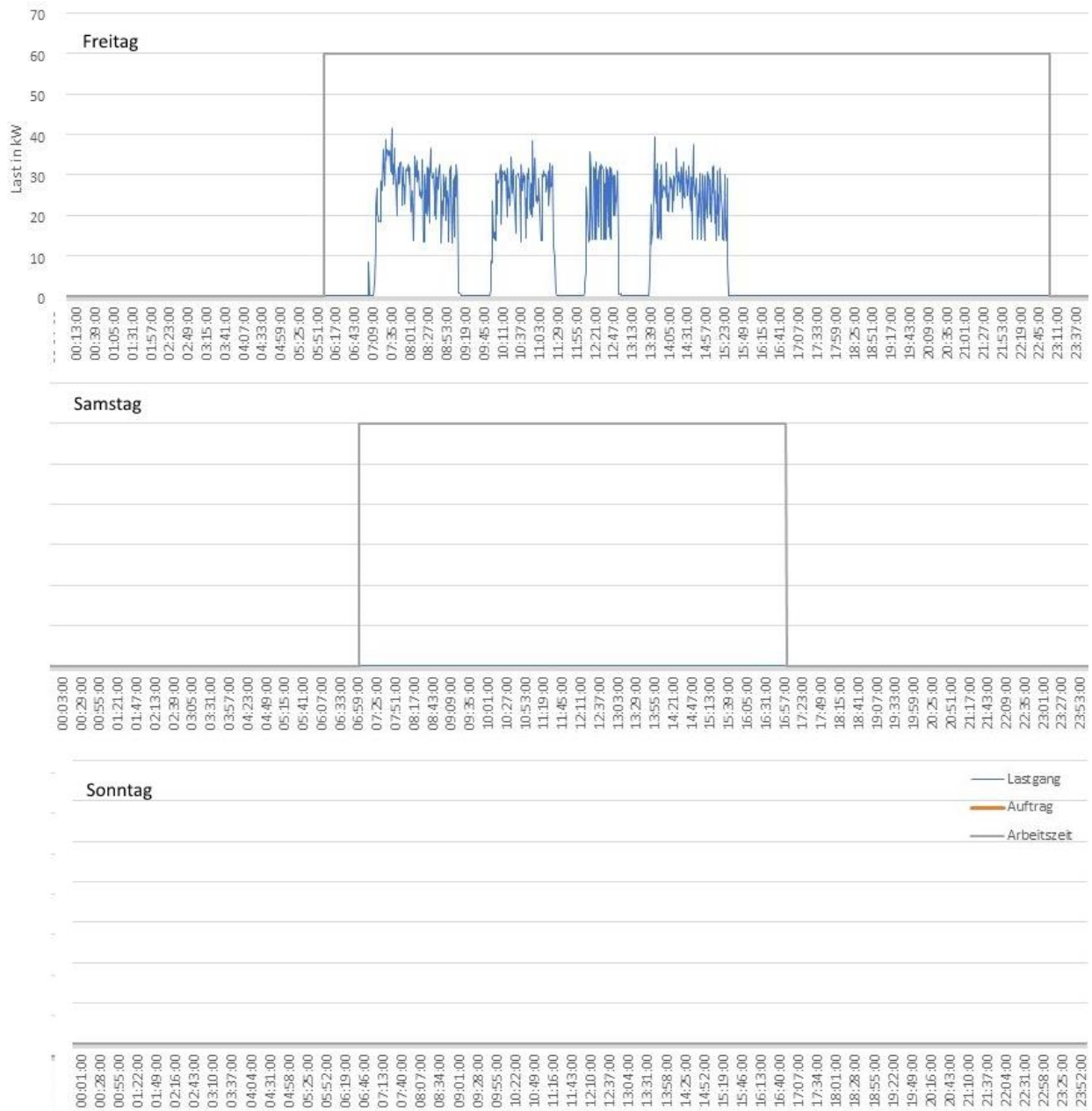
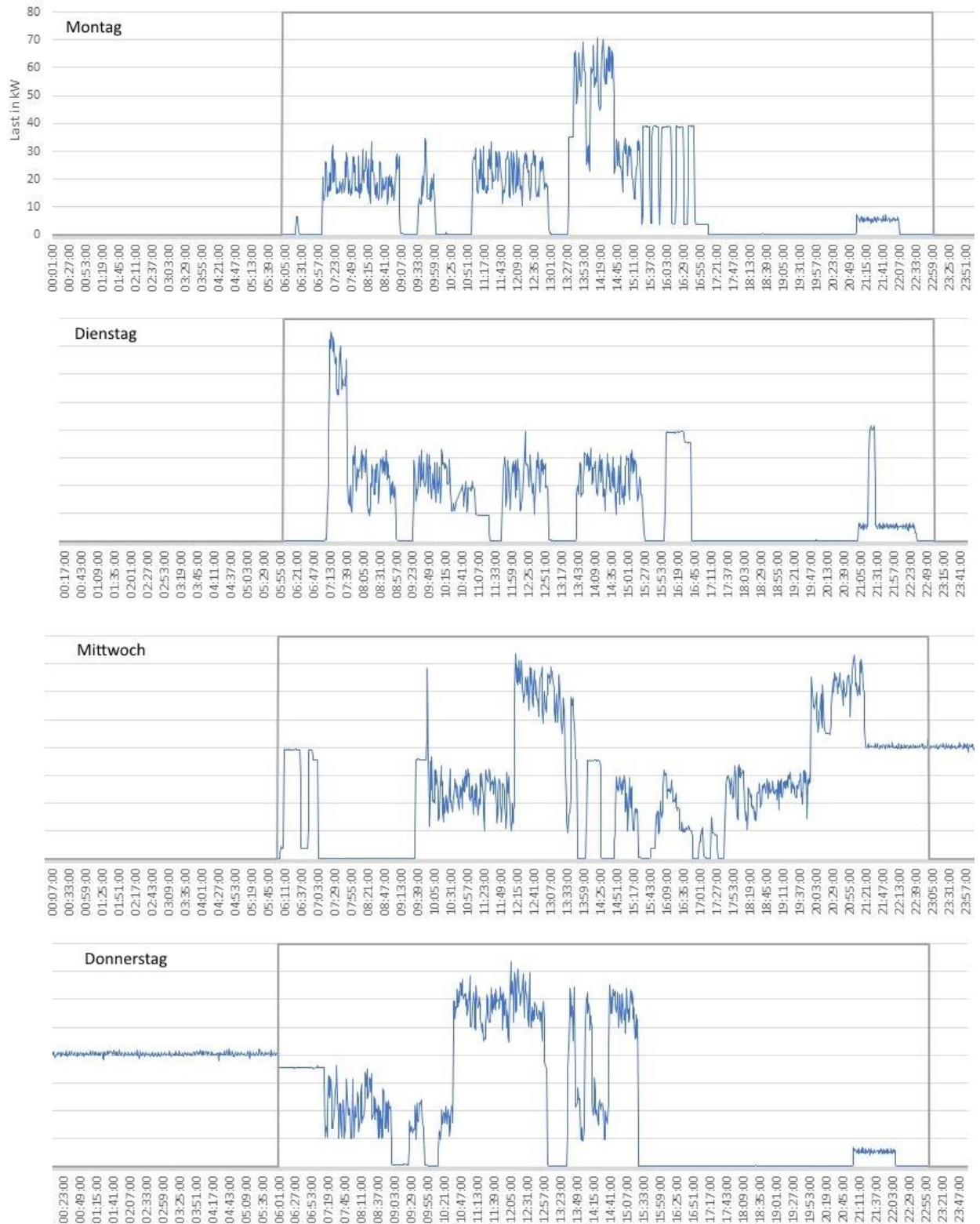


Abb. 8.6: Last an Messstelle UV neue Halle in KW 34, 2017



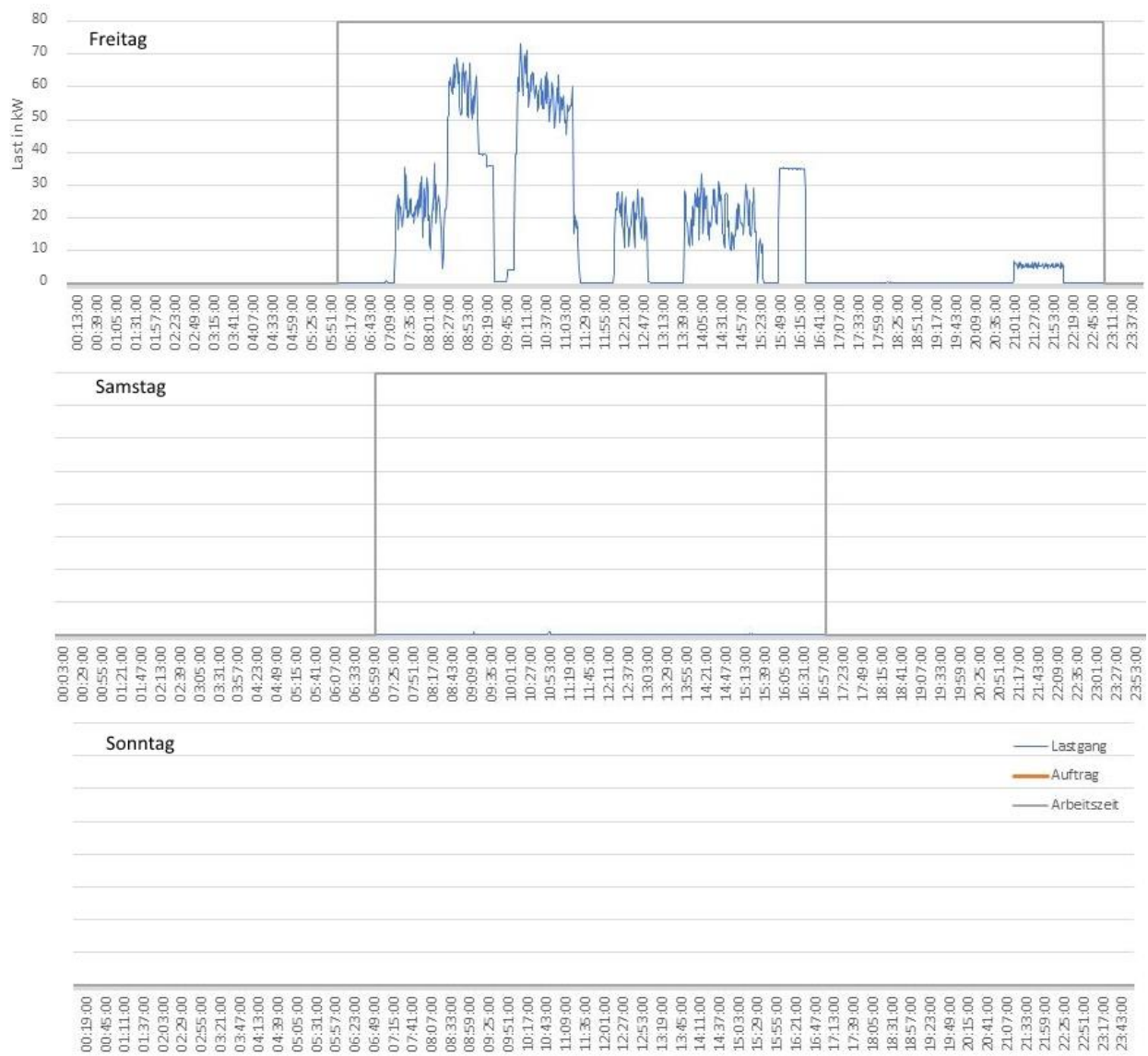


Abb. 8.7: Errechneter Rest in KW34, 2017

