

Diplomarbeit

Energieeffizienz in Produktionsbetrieben

Leitfaden zur Identifizierung und Bewertung von Energieeinsparpotentialen in der Produktion

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines

Diplom-Ingenieurs

unter der Leitung von

Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Reinhard Haas

(E370 - Institut für Energiesysteme und Elektrische Antriebe)

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik

von

Christian Salvatori, BSc

0726483 (066 482)

Kapellenstraße 6

6858 Schwarzach in Vorarlberg

Wien, im Mai 2014

Christian Salvatori

Kurzfassung

Diese Diplomarbeit beschäftigt sich mit der Erfassung der energetischen Situation in einem metallverarbeitenden Produktionsbetriebes, der systematischen Findung von Energieoptimierungspotentialen und der wirtschaftlichen Bewertung der zur Erschließung dieser Potentiale notwendigen Maßnahmen. In den ersten zwei Teilen dieser Diplomarbeit geht es um die Analyse der Ist-Energie-Situation des Produktionswerks 4 der Julius Blum GmbH. Dabei wird anhand eines Top-Down- und eines Bottom-Up-Ansatzes die Energieaufteilung auf den einzelnen Unternehmens- bzw. Strukturebenen untersucht. Im ersten Teil wird die Energieaufteilung von der obersten Unternehmensebene, der Konzernebene, über die Werksebene und die Gebäudeebene bis zur Bereichsebene mittels eines Top-Down-Ansatzes analysiert. Dafür werden die Messdaten einer Vielzahl an Energiezähler, welche im Energieverteilungssystem des Werks installiert sind, ausgewertet. Die weitere Aufteilung des so bestimmten und in den Produktionsbereich fließenden Energiestroms ist mit Hilfe des Top-Down-Ansatzes nicht möglich, weshalb die Energieaufteilung unterhalb der Gebäudeebene durch einen Bottom-Up-Ansatz erfolgt. Ausgehend von der Prozessebene bzw. vom Energieverbrauch einzelner auf den Betriebsmitteln ablaufender Prozesse kann der Energieverbrauch je Betriebsmittel ermittelt werden. Durch Summation des Energieverbrauches aller zu einer Produktionstechnologie gehörenden Betriebsmittel ergibt sich der Energieverbrauch der Produktionstechnologien Pressen, Profilieren, Montage oder Pulverbeschichtung. Auf Basis der Erkenntnisse aus dem Top-Down- und Bottom-Up-Ansatz wird ein Energieflussdiagramm erstellt, in welchem die sich über die einzelnen Strukturebenen des Werks 4 verzweigende Energieflüsse dargestellt werden. Basierend auf dieser Ist-Energie-Analyse werden im abschließenden dritten Teil dieser Diplomarbeit einige Abschätzungen über die Größe des Energieoptimierungspotentials der einzelnen Produktionstechnologien gemacht. Am Beispiel der Produktionstechnologie mit dem größten Energieeinsparpotential werden konkrete energieeffizienzsteigernde Maßnahmen untersucht und diese hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit bewertet.

Abstract

This thesis deals with the detection of the energy situation in a metal production plant, the systematic determination of energy optimization potential and the economic evaluation of the actions necessary to develop this potential. The first two parts of this diploma thesis are about the analysis of the current energy situation of manufacturing plant 4 of the company Julius Blum GmbH. Therefore a top-down and a bottom-up approach helps to examine the energy distribution over the individual company or structural levels. In the first part the examination starts from the top company level – the group level – over the plant level and building level down to the section level by using a top-down approach. Therefore data measured from numerous energy meters is evaluated which are installed in the power distribution system. The further classification of the so determined and flowing into the production area of energy flow is not possible using the top-down approach, which is why the energy division takes place below the building level through a bottom-up approach. Starting from the process level respectively on the energy consumption of the individual on the machine running processes, the energy consumption for each machine can be determined. By the summation of the energy consumption of all machines of a production technology yields the energy consumption of the production technologies e.g. press, roll forming machine, automatic assembly machine, powder coating machine. Based on the findings from the top-down and bottom-up approach, an energy flow diagram is created, in which the branching energy flows are represented across the various structural levels of manufacturing plant 4. In the third and final part of this thesis, which is based on the actual energy analysis some estimates about the size of the energy optimization potential of the different production technologies are made. Using the example of production technology with the greatest potential for energy savings specific energy efficiency improvement measures are examined and are evaluated for their cost-effectiveness.

Zusammenfassung

Die vorliegende Diplomarbeit zeigt eine Methodik auf, wie die Energieaufteilung in einem Produktionsunternehmen analysiert, daraus Energieoptimierungspotentiale abgeleitet und die zur Erschließung der Potentiale erforderlichen Optimierungsmaßnahmen bewertet werden können.

Diese zur Analyse des Energieverbrauchs verwendete Methode besteht aus einem Top-Down- und einem Bottom-Up-Ansatz. Der Top-Down-Ansatz verfolgt das Ziel, die Energieflüsse beginnend von der Werksebene über die Gebäudeebene bis auf die Bereichsebene zu analysieren. Dafür können Messdaten von diversen festinstallierten Energiemessstellen im ganzen Werk verwendet werden. Das Ergebnis dieser Top-Down-Analyse ist ein Energieflussdiagramm, welches in Abbildung 24 dargestellt ist. Aus diesem Energieflussdiagramm lässt sich herauslesen, wie viel Energie für die Umwandlung in andere Energieformen und in Energiedienstleistungen im beispielhaft herangezogenen GJ2012/13 aufgewendet wird. Die Differenz des Gesamtenergiestromes des Werks 4 und dem Anteil der für Umwandlungen benötigten Energie ergibt den Energiestrom, welcher sich weiter auf die einzelnen Produktionsbereiche aufteilt. Die Verteilung auf die einzelnen Produktionsbereiche erfolgt mit Hilfe eines Bottom-Up-Ansatzes. Bei diesem erfolgt die Untersuchung rekursiv beginnend mit der Prozessebene über die Betriebsmittelebene und die Technologieebene bis hin zur Bereichsebene, welche die Schnittstelle zum Top-Down-Ansatz ist. Da für den Bottom-Up-Ansatz keine festinstallierten Energiemessstellen zur Verfügung stehen, werden mit mobilen Messgeräten direkt an den Produktionstechnologien Energiemessungen durchgeführt. Die verschiedenen Maschinentypen der Produktionstechnologien Pressen, Profilieren und Pulverbeschichtung werden so vollständig energetisch analysiert. Bei den Montageautomaten können aufgrund ihrer großen Anzahl lediglich ca. 25% dieser Anlagen energetisch untersucht werden. Die Messergebnisse dieser Untersuchung werden daher über ein Regressionsmodell auf die nicht untersuchten Montageanlagen umgelegt. Somit kann der Energieverbrauch jedes Betriebsmittels berechnet und in Folge der

Energieverbrauch der einzelnen Produktionstechnologien bestimmt werden. Die Ergebnisse des Bottom-Up-Ansatzes sind ebenfalls in Form eines Energieflussdiagrammes in Abbildung 41 dargestellt. Der Top-Down- und Bottom-Up-Ansatz lassen sich zwar getrennt voneinander anwenden, führen jedoch nur gemeinsam zur vollständigen Analyse der Energieaufteilung im Werk 4. Dies wird in Abbildung 42: Energieflussdiagramm des Werks 4 der Julius Blum GmbH deutlich dargestellt.

In Kapitel 5: Energieoptimierungsmaßnahmen werden auf Basis der Ergebnisse der Energieanalyse mittels des Top-Down- und Bottom-Up-Ansatzes beispielhaft einige Energieeinsparpotentiale auf den verschiedenen Unternehmensebenen identifiziert und die zur Erschließung dieser Potentiale notwendigen Maßnahmen bewertet. Am Beispiel der vorgestellten, aus dem Top-Down-Ansatz abgeleiteten, organisatorischen Maßnahmen kann gezeigt werden, dass sich hier sehr hohe theoretische Energie- und Kosteneinsparpotentiale ergeben. Für die Grundlastoptimierung der elektrischen Leistung für das Werk 4 ergibt sich ein theoretisches Energieeinsparpotential von 1.047.255 kWh bzw. 97.520 Euro im Geschäftsjahr 2012/13. Durch die beschriebene Spitzenlastoptimierung der elektrischen Leistung würden sich zusätzlich knapp 14.000 Euro pro Jahr einsparen lassen. Durch weitere Untersuchungen könnten ebenso aus dem Teil- bzw. Vollastbereich verschiedene organisatorische oder technische Optimierungsmaßnahmen abgeleitet werden. Selbiges gilt auch für die vier Lastbereiche der Erdgasverbrauches. Hinsichtlich der anzunehmenden Zunahme des Gesamtenergieverbrauches von Blum und einer möglichen Steigerung der Energiepreise, wären weitere Einsparungen durch eine strategische Energiebeschaffung mittels Portfoliomanagement auf dem liberalisierten Strom- und Gasmarkt sehr wahrscheinlich.

Der Fokus der Analyse der Ergebnisse des Bottom-Up-Ansatzes liegt auf den Montageautomaten, da bei diesen das attraktivste Energieoptimierungspotential vermutet wird. Sowohl für den Druckluft- als auch den elektrischen Stromverbrauch dieser Anlagen wird ein Optimierungsbeispiel beschrieben und bewertet. Die Analyse des Optimierungspotentiales des Druckluftverbrauchs der 116 sich im Werk

4 befindlichen Montageautomaten ergibt ein theoretisches Einsparpotential von ca. 51.000 Euro pro Jahr, wenn die vollständige Beseitigung der Leckagen gelingt. Von diesem würden sich fast 30 Prozent allein durch den Einbau von Magnetventilen in die Wartungseinheiten erschließen lassen. Die wirtschaftliche Bewertung dieser Maßnahme zeigt allerdings, dass sich diese Investition lediglich für 18 von 116 Montageautomaten binnen der ersten 3 Jahre amortisieren würde. Die Analyse des elektrischen Stromverbrauches zeigt, dass die Investition in neue und energieeffiziente Komponenten – wie hier am Beispiel des Austausches eines Lampen- gegen ein Dioden-Laserschweißgerät vorgeführt – nicht rentabel ist. Trotz der Möglichkeiten einer großen Einsparung bei den Energiekosten amortisiert sich diese Investition nur sehr langsam. Grund dafür sind in diesem Fall die mit neuen Technologie verbundenen höheren Instandhaltungskosten. Konkret sind die Kosten für die Verschleißteile des Diodenlasers (Pumpmodul und Luftaufbereitungsmodul) trotz des längeren Wartungsintervalls immer noch deutlich höher als beim Lampen-Laserschweißgerät und wirken daher stark amortisierungsverlängernd. Es zeigt sich in diesem Zusammenhang, dass alleine die Betrachtung der Lebenszykluskosten ein verlässliches Instrument für die Bewertung solcher Investitionen ist.

Durch die im Bottom-Up-Ansatz verwendete Methode zur Berechnung des Energieverbrauchs je Betriebsmittel mit Hilfe der Dauer und des Leistungsbezugs pro Betriebsmittelzustand war es erst möglich ein vom Betriebsmittel- und Hauptnutzungsgrad abhängigen Energieverbrauch pro Maschine zu berechnen. Der dabei auftretenden Fehler ist methodenbedingt und wird durch die Verdichtung von 30 schon verdichteten Stillstandsgründe auf nur 3 Betriebsmittelgründe verursacht, da sich nicht jeder Stillstandsgrund eindeutig auf die Betriebsmittelgründe 1, 2 oder 3 zuordnen lässt. Zusätzlich zu diesem Modellfehler kommt noch der durch die Regressionsanalyse verursachte Fehler. Wie im Kapitel 4.2 zu erkennen ist, streuen die Messwerte der durchgeführten elektrischen Leistungs- bzw. Druckluftvolumenstrommessung um deren Regressionsgerade mehr oder weniger stark. Die über die Regressionsgerade berechneten Werte von elektrischer Leistung bzw. Druckluftvolumenstrom entsprechen nicht dem genauen Verbrauch jeder nicht gemessenen Anlage, sondern sind vielmehr als Richtwert zu verstehen.

Durch den bei Blum gelebten kontinuierlichen Verbesserungsprozess werden Prozesse und Technologien ständig untersucht und durch organisatorische und technische Maßnahmen wie beispielsweise der Ausstattung neuer Montageautomaten mit dem Hardwarekonzept 2.0 oder der Reduzierung des Pumpendruckes in nichtwertschöpfenden Zeiten bei Pressen und Profilieranlagen optimiert.

Abschließend kann gesagt werden, dass das derzeit sehr aktuelle Thema der Energieeffizienz auch auf der Abnehmerseite im industriellen Kontext seine Aufmerksamkeit unbedingt verdient hat.

Sperrvermerk

Auf Wunsch der Firma Julius Blum GmbH ist die vorliegende Diplomarbeit für die Dauer von 5 Jahren für die öffentliche Nutzung gesperrt.

Veröffentlichung, Vervielfältigung und Einsichtnahme sind ohne ausdrückliche Genehmigung der Firma Julius Blum GmbH und des Verfassers bis 01.05.2019 nicht gestattet.

Höchst im April 2014

Dr. Johannes Berger

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre hiermit ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Masterarbeit selbstständig angefertigt habe. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit wurde bisher keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht veröffentlicht.

Wien im April 2014

Christian Salvatori, BSc

Vorwort

Die Julius Blum GmbH hat es mir ermöglicht diese Diplomarbeit im Zuge eines halbjährigen Industriepraktikums in der Abteilung für Prozesstechnik im Werk 4 zu erarbeiten. Besonderen Dank gilt dabei den Initiatoren des Projektes DI Dr. Wolfgang Haller, Mario Berberoglu, Manfred Gorbach und Pascal Grosskopff MSc. sowie allen Mitarbeitern, welche am Projekt mitgewirkt haben. Auf universitärer Seite gilt mein Dank Prof. Reinhard Haas sowie seinem Universitätsassistenten Mag. Michael Hartner, welche sich mit ihrer Offenheit gegenüber neuen Themen für die wissenschaftlichen Betreuung dieser Arbeit bereit erklärt haben. Außerdem möchte ich mich bei meiner lieben Familie bedanken, welche mich stets unterstützt hat.

Diese Diplomarbeit widme ich meinem Vater

*Kurt Johann Salvatori
(15.05.1950 – 31.12.2003)*

Inhaltsverzeichnis

1	Aufgabenstellung der Diplomarbeit	1
1.1	Motivation	1
1.2	Zielsetzung	3
1.3	Methodik	4
1.3.1	Top-Down- und Bottom-Up-Ansatz	4
1.3.2	Allgemeine Theorie der Regressionsanalyse	6
1.3.3	Bewertung von Energieoptimierungsmaßnahmen	15
2	Die Julius Blum GmbH	17
2.1	Das Werk 4	17
2.2	Produktionstechnologien im Werk 4	19
2.2.1	Pressen	19
2.2.2	Profilieranlagen	22
2.2.3	Montageautomaten	23
2.2.4	Pulverbeschichtungsanlagen	24
3	Energieanalyse mittels Top-Down-Ansatz	25
3.1	Energieanalyse auf Konzernebene	25
3.2	Energieanalyse auf Werksebene	28
3.2.1	Lastgangkurve der elektrischen Leistung	30
3.2.2	Lastdauerkurve der elektrischen Leistung	31
3.2.3	Wochenlastgang	33
3.2.4	Lastgangkurve von Erdgas	35
3.2.5	Lastdauerkurve von Erdgas	36
3.3	Energieanalyse auf Gebäudeebene	37
3.3.1	Heizbedarf im Werk 4	39

3.3.2	Kühlbedarf im Werk 4	40
3.3.3	Beleuchtungsbedarf im Werk 4.....	43
3.3.4	Druckluftbedarf im Werk 4	45
3.3.5	Wärmerückgewinnung im Werk 4	47
3.3.6	Energieflussdiagramm der Gebäudeebene	49
4	Energieanalyse mittels Bottom-Up-Ansatz	51
4.1	Stillstandszeitverdichtung auf Betriebsmittelzustände.....	55
4.1.1	Verdichtungsschema der Stillstandszeiten	56
4.1.2	Gesamtnutzungs- und Hauptnutzungsgrad	57
4.1.3	Auswertung nach Betriebsmitteltechnologien	59
4.2	Leistungsanalyse der Betriebsmittelzustände	62
4.2.1	Leistungsanalyse der Pressen.....	64
4.2.2	Leistungsanalyse der Profilieranlagen	67
4.2.3	Leistungsanalyse der Montageanlagen	71
4.2.4	Leistungsanalyse der Pulverbeschichtungsanlagen	120
4.3	Energieverbrauch der Produktionstechnologien.....	121
4.3.1	Energieverbrauch der Pressen	122
4.3.2	Energieverbrauch der Profilieranlagen	123
4.3.3	Energieverbrauch der Montageautomaten	124
4.3.4	Energieverbrauch der Pulverbeschichtungsanlagen.....	126
4.3.5	Energieflussdiagramm auf Bereichsebene	128
4.4	Energieflussdiagramm Werk 4	131
4.5	Energiekosten der Produktionstechnologien	132
4.5.1	Energiekosten der Pressen	132
4.5.2	Energiekosten der Profilieranlagen.....	133
4.5.3	Energiekosten der Montageautomaten.....	134

4.5.4	Energiekosten der Pulverbeschichtungsanlagen	136
5	Energieoptimierungsmaßnahmen	138
5.1	Energieoptimierung mittels Top-Down-Ansatz	138
5.1.1	Einsparpotential durch Grundlastreduktion	138
5.1.2	Einsparpotential durch Spitzenlastreduktion	139
5.2	Energieoptimierung mittels Bottom-Up-Ansatz.....	140
5.2.1	Druckluftoptimierung von Montageautomaten	141
5.2.2	Elektrische Leistungsoptimierung von Montageautomaten.....	144
6	Schlusskapitel	148
6.1	Weitere gefundene Potentiale	148
6.2	Kritische Betrachtung der verwendeten Methodik	150
6.3	Schlussfolgerungen.....	152

1 Aufgabenstellung der Diplomarbeit

Um die Wettbewerbsfähigkeit eines produzierenden Betriebes langfristig zu sichern, ist die Steigerung der Energieeffizienz heutzutage ein nicht mehr zu vernachlässigender Faktor. Zielsetzung ist die effiziente Fertigung von Produkten, weshalb laufend Verbesserungen mittels Kaizen oder dem kontinuierlichen Verbesserungsprozess (KVP) umgesetzt werden. Neben den Leistungs- und Qualitätsverbesserungen in der Produktion hat somit die Optimierung des Energieverbrauches einen immer höheren Stellenwert. Um jedoch gezielt Energieoptimierungen umsetzen zu können, bedarf es der Kenntnis über die aktuelle energetische Betriebssituation. Erst wenn die bestehenden Energie- und Stoffflüsse analysiert sind, können die größten Verbraucher lokalisiert und konkrete Energieoptimierungsmaßnahmen wirtschaftlich bewertet und umgesetzt werden.

Im ersten Schritt soll die Energieaufnahme vom Werk 4 erfasst und die Energieaufteilung auf die Werksbereiche analysiert werden. Anschließend soll die weitere Aufteilung der Energieflüsse auf die in der Fertigung eingesetzten Technologien untersucht und somit die Ist-Energie-Situation vom Werk 4 festgehalten werden. Abschließend soll auf Basis der Ist-Energie-Situation diejenige Produktionstechnologie mit dem attraktivsten Energieoptimierungspotential hinsichtlich möglicher Energieoptimierungsmaßnahmen untersucht und diese bewertet werden.

1.1 Motivation

In der klassischen Ökonomie wird der Konsum bis heute als das Ende der ökonomischen Kette angesehen. Ein Produkt wird schon alleine durch hohe Absatzzahlen zu einem guten Produkt. Der englische Kunst- und Sozialkritiker John Ruskin betrachtete dies schon Mitte des 19. Jahrhunderts als Irrglauben und behauptete:

„Weiser Verbrauch ist eine weitaus schwierigere Kunst, als weise Produktion“.

John Ruskin (1819 – 1900), englischer Kunst- und Sozialkritiker

Das in weiten Teilen der heutigen Welt geltende Verständnis für ökonomisches Handeln orientiert sich an der klassischen Ökonomie und nicht am ökonomischen Ansatz von John Ruskin. Als Folge dieses Denkens und Handelns entstanden die großen Herausforderungen dieses Jahrhunderts wie der Klimawandel, die Ressourcenknappheit und ein ständig steigender Energiebedarf. Erst im Dezember 2008 hat sich die Europäische Union auf ein *Richtlinien- und Zielpaket für Klimaschutz und Energie* geeinigt, welches ambitionierte Zielvorgaben zur Bewältigung des steigenden Energiebedarfes bis 2020 enthält. Diese Zielsetzungen werden auch als die "20-20-20-Ziele" bezeichnet und beabsichtigen bis zum Jahr 2020 eine Reduzierung der Treibhausgasemissionen um 20% gegenüber dem Jahr 1990, eine Steigerung des Anteils der erneuerbaren Energien auf 20% gemessen am Gesamtenergieverbrauch sowie eine Energieeffizienzsteigerung um 20%. Als Instrument zur Verbesserung der energiebezogenen Leistung (Energieeffizienz, Energieeinsatz und –verbrauch) von Organisationen wurde im Juni 2011 von der Internationalen Organisation für Normung (ISO) die ISO 50001 – Energiemanagementsysteme – veröffentlicht. Die ISO 50001 baut wie auch die ISO 9001 (Qualitätsmanagementsysteme) und die ISO 14001 (Umweltmanagementsysteme) auf dem PDCA- Zyklus (Plan – Do – Check – Act) auf, welcher eine Systematik zur kontinuierlichen Verbesserung beschreibt. Ein systematisches Energiemanagement beruht auf der Erfassung der Energieflüsse in einem Unternehmen (Energiequellen, Energieeinsatz, Energieverbraucher) und der Bewertung des Standes der Energieeffizienz. Besonderes Augenmerk wird dabei auf die für den gesamten Energieverbrauch bedeutsamsten Anlagen und Prozesse gelegt. Mit dieser Methodik wird die Grundlage für die Umsetzung sowohl technischer als auch organisatorischer Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz geschaffen. Die ISO 50001 enthält als Norm alle Elemente, die ein Energiemanagementsystem enthalten sollte, um wirksam sein zu können. Sie ist absichtlich allgemein gehalten, um auf jedes Unternehmen und jede Organisation angewendet werden zu können. Der Kern der Norm ist die energetische Bewertung und Analyse der energieverbrauchenden Maschinen und Anlagen. Dieser Abschnitt bildet die Ausgangsbasis für die Erarbeitung von Vorschlägen und Lösungen, die dem Unternehmen dazu verhelfen können, die in der Norm beschriebene

„energiebezogene Leistung“ und die darin enthaltene Energieeffizienz zu verbessern. In diesem Sinne wurde in der vorliegenden Diplomarbeit die energetische Situation des Produktionswerks 4 der Julius Blum GmbH sowohl mittels eines Top-Down-, als auch eines Bottom-Up-Ansatzes systematisch analysiert. Einzelne Maschinen und Anlagen wurden betrachtet und deren Energieverbrauch mittels Messungen erhoben. Daraus wurden konkrete Energieoptimierungspotentiale abgeleitet und die zur Erschließung dieser Potentiale notwendigen Maßnahmen wirtschaftlich bewertet.

1.2 Zielsetzung

Das Ziel dieser Masterarbeit ist es eine Methodik zu erarbeiten, mit welcher es möglich sein soll, Energieeinsparpotentiale in der Produktion systematisch zu finden und diese anschließend zu bewerten. Der erste Schritt hierzu ist eine globale Aufnahme der Ist-Energie-Situation und deren Verbrauchsstruktur im Werk 4 der Julius Blum GmbH. Wie in der folgenden Abbildung dargestellt, erfolgt die Energieverteilung über die Gebäude-, Bereichs- und Technologieebene.

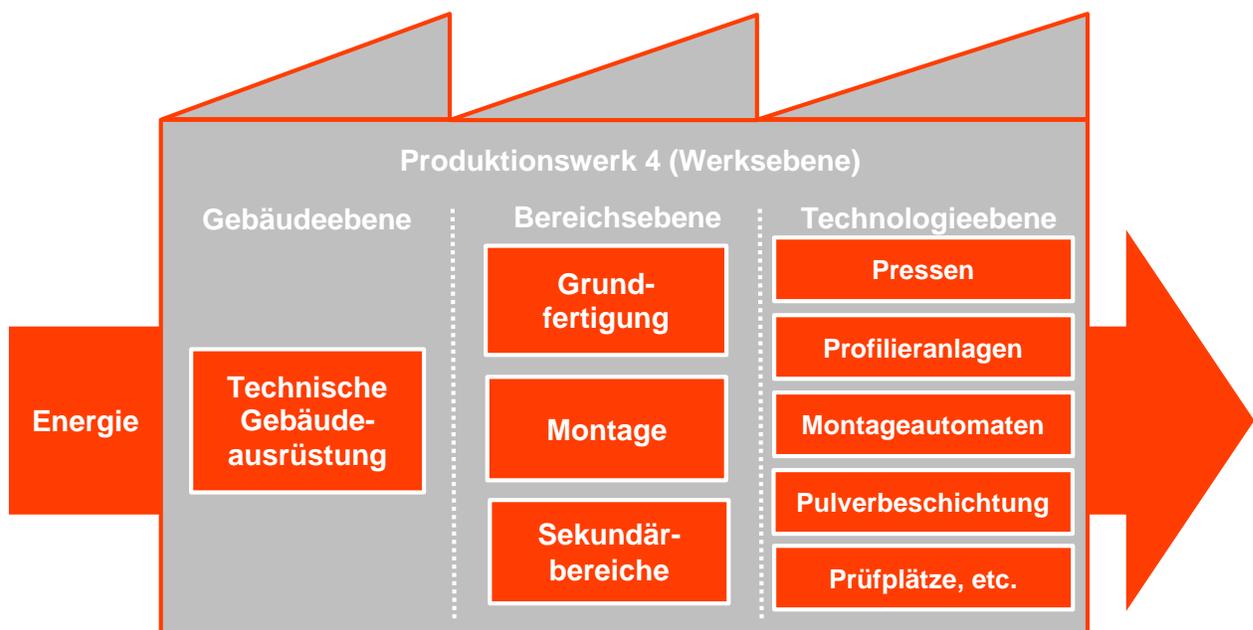


Abbildung 1: Schematische Übersicht des Werks 4 der Julius Blum GmbH

Auf der Gebäudeebene wird der Anteil des Gesamtenergiestromes ermittelt, welcher von der technischen Gebäudeausrüstung zur Umwandlung in andere Energieformen (z.B. Druckluft, etc.) bzw. in andere Energiedienstleistungen (z.B. Heizen, Kühlen, etc.) benötigt wird. Auf der Bereichsebene soll der von der Produktion benötigte Energiestrom in den Produktionsbereichen Grundfertigung und Montage analysiert werden. Des Weiteren soll der von den Produktionsbereichen benötigte Anteil der Gesamtenergie weiter auf die im Werk 4 eingesetzten Produktionstechnologien Pressen, Profilier-, Montage- und Pulverbeschichtungsanlagen aufgeteilt werden. Auf Basis dieser Ist-Energie-Analyse soll der Technologiebereich mit dem attraktivsten Energieoptimierungspotential gefunden, hinsichtlich konkreter Energieoptimierungsmaßnahmen untersucht und diese bewertet werden.

1.3 Methodik

Abhängig davon, auf welcher Unternehmensebene die energetische Analyse durchgeführt wird, wird ein Top-Down-Ansatz bzw. ein Bottom-Up-Ansatz verwendet.

1.3.1 Top-Down- und Bottom-Up-Ansatz

Die folgende Abbildung zeigt die einzelnen Strukturebenen eines Unternehmens sowie die zwei verwendeten methodischen Ansätze und deren Eingliederung in dieses Stufenmodell eines Unternehmens.

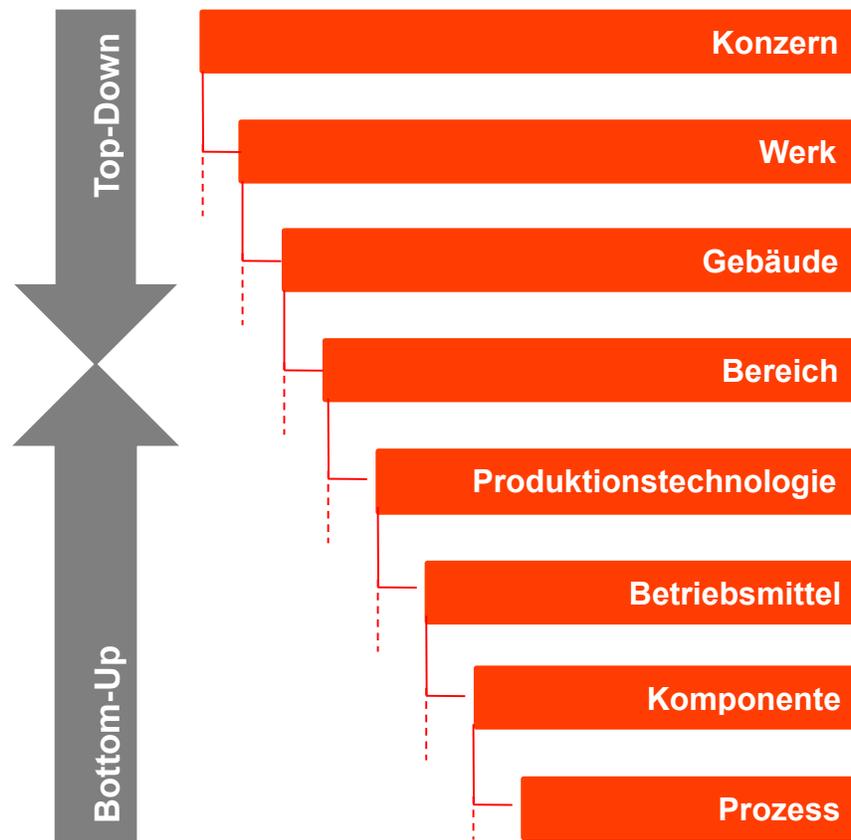


Abbildung 2: Top-Down- und Bottom-Up-Ansatz bei der energetischen Analyse eines Produktionsbetriebes

Die obige Abbildung zeigt die einzelnen Strukturebenen eines Unternehmens, sowie die bei dieser energetischen Analyse verwendeten methodische Ansätze. Beginnend bei der Konzernebene lässt sich das Strukturmodell weiter in Werksebene und die Gebäudeebene unterteilen. Auf diesen oberen drei Ebenen kommt der Top-Down-Ansatz zur Anwendung, mit welchem die Energieaufteilung beginnend von der Konzernebene über die Werksebene bis zur Gebäudeebene analysiert wird. Die im Energieverteilungssystem installierten Energiezähler erlauben keine weitere Anwendung dieses Ansatzes auf der nächsttieferen Ebene, der Bereichsebene. Der Anwendung des Top-Down-Ansatzes zur Energieanalyse der oberen Unternehmensebenen wird in Kapitel 3: Energieanalyse mittels Top-Down-Ansatz ausführlich beschrieben.

Im zweiten Teil bzw. im Kapitel 4: Energieanalyse mittels Bottom-Up-Ansatz erfolgt die Untersuchung der Energieaufteilung unterhalb der Gebäudeebene. Ausgehend

von der Prozessebene bzw. vom Energieverbrauch einzelner auf den Betriebsmitteln ablaufender Prozesse kann der Energiebedarf je Betriebsmittelkomponente ermittelt werden. Durch Aufaddieren des Energieverbrauches aller zu einem Betriebsmittel gehörenden Komponenten lässt sich der Gesamtenergieverbrauch eines Betriebsmittels bestimmen. Durch Summation aller Betriebsmittel einer Produktionstechnologie ergibt sich deren Gesamtenergieverbrauch. Die Anwendung des Bottom-Up-Ansatzes wird im Kapitel 4: Energieanalyse mittels Bottom-Up-Ansatz beschrieben.

Die Schnittstelle beider Ansätze liegt auf der Bereichsebene. Auf Basis dieser Erkenntnisse ist es möglich, die sich über die einzelnen Strukturebenen eines Unternehmens verzweigenden Energieflüsse nachzuvollziehen. Aus dieser Analyse lässt sich ein Energieflussdiagramm erstellen, welches die Verteilung der Energie im Werk 4 zeigt.

Bei der Anwendung des Bottom-Up-Ansatzes wird die Regressionsanalyse eingesetzt, um die Messergebnisse der untersuchten Montageautomaten, über Ähnlichkeitsmerkmale, auf die nicht untersuchten Montageautomaten umzulegen. Die Theorie zur Regressionsanalyse wird in folgendem Unterkapitel beschrieben.

1.3.2 Allgemeine Theorie der Regressionsanalyse

Bei der Regression der Leistungsmessungen von Montageautomaten handelt es sich um ein deskriptives Regressionsproblem. Dabei wird versucht, aus empirischen Daten (Messwerte) eine Beziehungen zwischen einer abhängigen und einer oder mehreren unabhängigen Variablen festzustellen. Ein lineares Regressionsmodell, bei dem mehrere Variablen zur Erklärung einer anderen Variable herangezogen werden, wird als multiples oder multivariates lineares Regressionsmodell bezeichnet. Im generellen Fall von k unabhängigen Variablen und n Beobachtungen liegt folgende Matrixschreibweise der Regressionsgleichung vor:

$$y = X\beta + u = \begin{bmatrix} y_0 \\ \dots \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1+x_{11}+\dots+x_{k1} \\ \dots+\dots+\dots+\dots \\ 1+x_{1n}+\dots+x_{kn} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \dots \\ \beta_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_0 \\ \dots \\ u_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \beta_0+\beta_1x_{11}+\dots+\beta_kx_{k1}+u_1 \\ \dots+\dots+\dots+\dots+\dots \\ \beta_0+\beta_1x_{1n}+\dots+\beta_kx_{kn}+u_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

Die Variable y heißt Regressand oder abhängige Variable und die Variable x heißt Regressor oder unabhängige Variable. Die Variable u ist der Fehler der Gleichung und im Gegensatz zu x oder y ist u nicht beobachtbar. Die unbekannte Konstante β_0 heißt Regressionskonstante und stellt den theoretischen (systematischen) Wert von Y dar, wenn X gleich null ist. Die unbekannt Konstanten β_i werden als Koeffizienten bezeichnet und sind die eigentlich gesuchten Werte. Der Koeffizient beschreibt die marginale Reaktion der Variable y auf Änderungen der Variablen X . Außer diesen Koeffizienten sind der multiple Korrelationskoeffizient r , das Bestimmtheitsmaß R^2 , das adjustierte Bestimmtheitsmaß R^2_{adj} , der Standardfehler, die F-Statistik und die Quadratsummen wichtige Parameter hinsichtlich der Qualität der Regressionsanalyse.

Das lineare Regressionsproblem besteht darin, eine lineare Kurve, also eine Gerade, so durch die „Punktwolke“ zu legen, dass der Abstand der Punkte zur Gerade insgesamt klein ist, damit die Gerade den Verlauf der Punktwolke gut beschreibt. Dafür werden die vertikalen (lotrechten) Abstände zwischen den Punkten und der Gerade quadriert und aufaddiert. Diese Summe wird minimiert und die daraus resultierenden Koeffiziente bestimmten die gesuchte Regressionsgerade. Diese Methode der Bestimmung einer Regressionsgeraden heißt OLS (engl. ordinary least squares). Für stochastische lineare Regressionsmodelle gelten folgende Modellannahmen, die notwendig sind, um den Gebrauch der OLS-Schätzung im stochastischen Regressionsmodell rechtfertigen zu können.

1. Die Beobachtungen entsprechen dem linearen Modell wie in Gleichung (1).
2. Nicht alle beobachteten Werte X sind gleich.
3. Die Fehler u_i sind Realisierungen von Zufallsvariablen U_i , wobei gelten möge, dass $E(U_i)=0$ mit $\forall i$.
4. Die erklärende Variable X_i ist nicht stochastisch. Die Werte $x_i, i=1, \dots, n$ sind gegeben.

5. Alle Fehler U_i sind identisch verteilt mit endlicher Varianz σ^2 bzw. Annahme der Homoskedasti. $\rightarrow \text{var}(U_i) = E(U_i^2) = \sigma^2$
6. Die Fehler U_i sind voneinander statistisch unabhängig.
7. Die Stichprobe muss größer sein als die Anzahl der zu schätzenden Regressionskoeffizienten.
8. Alle Fehler U_i sind normalverteilt. (Kunst, 2014)

Bezüglich der Annahme 7 muss erwähnt werden, dass diese nichts über die Repräsentativität der Stichprobe aussagt. Statt von Repräsentativität zu sprechen ist es in der Fachterminologie üblich das Konzept des Stichprobenfehlers bei der Beurteilung des Stichprobenumfangs n ins Spiel zu bringen (Lippe, 2011). Die Berechnung des mindestens erforderlichen Stichprobenumfangs n erfolgt mit folgender mathematischen Beziehung nach Lippe, 2011 berechnet:

$$n \geq \frac{z^2 \cdot \sigma^2}{e^2} = \frac{z^2 \cdot V^2}{e^{*2}} \quad \text{mit } V = \frac{\sigma}{\bar{x}} \quad \text{und } e^* = \frac{e}{\bar{x}} \quad (2)$$

In der obigen Formel ist z Ausdruck der Sicherheit, wie beispielsweise 90% oder 95%, bzw. $(1-z)$ die Irrtumswahrscheinlichkeit, was 10% oder 5% entsprechen würde. Der Zusammenhang zwischen der Sicherheit z , der Irrtumswahrscheinlichkeit und dem Konfidenzniveau wird durch die folgende Tabelle beschrieben. Der Betrachtung liegt in der Regel die Normalverteilung zugrunde:

Konfidenzniveau	Irrtumswahrscheinlichkeit	Sicherheit
90%	10%	1,6449
95%	5%	1,96
99%	1%	2,5758

Tabelle 1: Konfidenzniveau, Irrtumswahrscheinlichkeit $[\alpha]$ und Sicherheit $[z]$

In der obigen Formel beschreibt σ^2 die Varianz und e^2 der zu erwartende Fehler. Die Bestimmung des mindestens erforderlichen Stichprobenumfangs n , fällt mit dem relativen Fehler r^* und dem Variationskoeffizienten V einfacher, da sich beide Größen auf den Mittelwert der Grundgesamtheit beziehen und dimensionslos sind (Lippe, 2011). Der Variationskoeffizient V ist ein relatives Streuungsmaß, hängt

somit nicht von der Maßeinheit der Zufallsvariable ab und berechnet sich aus dem Quotienten von Standardabweichung und Erwartungswert E , welcher jedoch durch der Mittelwert der Beobachtungen ersetzt wird. Soll bei einer gegebenen Konfidenzintervalllänge der benötigte Stichprobenumfang n ermittelt werden, so ist der absolute Fehler von Bedeutung. Der absolute Fehler eines symmetrischen zweiseitig begrenzten Intervalls $e_{abs}=2 \cdot e$ ist ein Maß für die Genauigkeit der Schätzung.

Das Ziel dieser Regressionsanalyse ist die Ableitung von mathematischen Beziehungen, welche den Einfluss der Regressoren (X-Variablen) auf den Regressand (Y-Variable) beschreiben. Die formale Prüfung eines Regressionsansatzes erfolgt grundsätzlich in zwei Stufen (Selhausen, 1976):

1. Prüfung, ob der Zusammenhang jeder einzelnen unabhängigen Variable x_i und der abhängigen Variable y statistisch gesichert ist.
2. Prüfung, ob der ganze Regressionsansatz statistisch gesichert ist.

Die zur formalen Überprüfung des Regressionsansatzes benötigten Kenngrößen, werden vom jeweiligen Statistikprogramm in einer dreiteiligen Regressionsstatistik ausgegeben.

Im ersten Teil der Tabelle werden bestimmte Regressionsstatistiken wie der multiple Korrelationskoeffizient r , das Bestimmtheitsmaß R^2 , das adjustierte Bestimmtheitsmaß R^2_{adj} , der Standardfehler und die Anzahl an Beobachtungen n dargestellt.

Im zweiten Teil werden die durch die Regression erklärte Quadratsumme, die insgesamt zu erklärende Quadratsumme und deren Differenz, nämlich die nicht durch die Regression zu erklärende Quadratsumme, angegeben. Aus dem Quotienten der erklärenden Quadratsumme und der insgesamt erklärenden Quadratsumme, lässt sich das Bestimmtheitsmaß R^2 berechnen. Außerdem werden die Anzahl der Freiheitsgrade, der Wert der F-Statistik und der kritische Wert der F-Statistik (F_{krit}) angegeben.

Im dritten und letzten Teil der Regressionsstatistik werden die Statistiken bezüglich der Regressionskoeffizienten dargestellt. Dabei werden die Regressionskonstante und die unabhängigen Variablen durch den Wert ihrer Koeffizienten β_i und Standardfehler sowie ihrer t-Statistik und p-Werte beschrieben.

Um die im nächsten Unterkapitel folgenden Regressionsstatistiken richtig interpretieren zu können, wird in den folgenden Punkten auf die Definition der in der Regressionsstatistik vorkommenden statistischen Kenngrößen eingegangen.

- **Multipler Korrelationskoeffizient r**

„Mit dem Korrelationskoeffizienten nach Bravais-Pearson, der in der Literatur auch häufig als Produkt-Moment-Korrelation oder kurz als Korrelation nach Pearson bezeichnet wird, kann die Stärke eines linearen Zusammenhanges bestimmt werden. Für die Herleitung des Korrelationskoeffizienten nach Pearson muss zunächst die sogenannte Kovarianz bestimmt werden. Sie ist als Maßzahl für die quadrierte durchschnittliche Abweichung aller Beobachtungspunkte vom Mittelwert definiert und wird folgendermaßen berechnet:“ (Cleff, 2008)

$$\text{cov}(x,y)=S_{xy}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y})=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n x_i y_i - \bar{x}\bar{y} \quad (3)$$

Ist die Kovarianz positiv, kann der Zusammenhang zwischen zwei metrischen Variablen bestenfalls positiv sein. Ist die Kovarianz negativ, ist der Zusammenhang negativ – niemals aber positiv. Liegt die Kovarianz nahe bei null, besteht zwischen den beiden Variablen tendenziell kein linearer Zusammenhang. Bei der Kovarianz ist also zunächst einmal nur das Vorzeichen von Interesse. Die Kovarianz ist zwar in der Lage, die Richtung des Zusammenhanges tendenziell durch ihre positive bzw. negative Größe anzugeben, allerdings hängt ihre Größe auch von der verwendeten Maßeinheit ab. Durch Division durch die Standardabweichungen der

Variablen x und y wird dieses Problem behoben. Dies ergibt den dimensionslosen Korrelationskoeffizienten nach Pearson: (Cleff, 2008)

$$r = \frac{S_{xy}}{S_x S_y} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2\right) \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2\right)}} \quad \text{mit } -1 \leq r \leq +1 \quad (4)$$

Seine Werte liegen immer zwischen -1 und $+1$. Je näher der Korrelationskoeffizient sich dem Wert $+1$ nähert, umso stärker ist der lineare positive Zusammenhang zwischen den beiden betrachteten Variablen. Liegen alle Beobachtungspunkte auf einer ansteigenden Geraden, nimmt der Korrelationskoeffizient genau den Wert $r=+1$ an. Je mehr sich der Korrelationskoeffizient dem Wert minus eins nähert, umso mehr ist der lineare Zusammenhang negativ. Liegen alle Beobachtungspunkte genau auf einer abfallenden Geraden, nimmt der Korrelationskoeffizient exakt den Wert $r=-1$ an. Nimmt der Korrelationskoeffizient Werte nahe null an, so kann auf einen fehlenden linearen Zusammenhang geschlossen werden. (Cleff, 2008)

Die Größe des Korrelationswertes bestimmt somit wie stark der lineare Zusammenhang zwischen Regressionsmodell und den Beobachtungspunkten ist.

In der Literatur wird häufig folgende Aufstellung verwendet (Cleff, 2008):

- $|r| < 0,5$ schwacher linearer Zusammenhang
- $0,5 \leq |r| < 0,8$ mittlerer linearer Zusammenhang
- $|r| \geq 0,8$ starker linearer Zusammenhang

- **Bestimmtheitsmaß R^2**

Das Bestimmtheitsmaß beschreibt die Anpassungsgüte (engl.: goodness-of-fit) des Regressionsmodells an die Beobachtungspunkte. Dieses entspricht im vorliegenden bivariaten Fall genau dem Quadrat des Korrelationskoeffizienten r , ist aber auch bei mehreren unabhängigen X -Variablen anwendbar. Aufgrund der Quadrierung nimmt R^2 nur Werte

zwischen null und eins an: R^2 ist null, wenn die Anpassungsgüte der Regressionsgeraden an die Beobachtungspunkte ungenügend ist und R^2 ist eins, wenn die Anpassungsgüte perfekt ist. Das Bestimmtheitsmaß R^2 einer multivariaten Regression berechnet sich im Allgemeinen wie folgt (Cleff, 2008):

$$R^2 = \frac{S_{\hat{y}}^2}{S_y^2} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (5)$$

- **Adjustiertes Bestimmtheitsmaß R^2_{adj}**

In der Praxis wird häufig ein korrigiertes Bestimmtheitsmaß (engl.: adjusted R^2) berechnet, das die Überparametrisierung eines Modells bestraft. Mit jeder weiteren hinzugenommenen Variablen erhöht sich der „Bestrafungsabschlag“. Bezeichnet man n als Anzahl der Beobachtungen und als k die Anzahl der im Modell berücksichtigten Variablen (inklusive der Konstanten), berechnet sich das korrigierte Bestimmtheitsmaß wie folgt. (Cleff, 2008)

$$R^2_{adj} = R^2 - \frac{(1-R^2)(k-1)}{(n-k)} = 1 - (1-R^2) \frac{n-1}{n-k} \quad (6)$$

Es lohnt sich nur dann eine zusätzliche Variable in das Modell aufzunehmen, wenn der dadurch zusätzlich gewonnene Erklärungswert größer als der „Bestrafungsabschlag“ des korrigierten Bestimmtheitsmaßes ist. Bei der Konstruktion von Modellen sollte die Hinzunahme neuer Variablen dann beendet werden, wenn das korrigierte Bestimmtheitsmaß nicht mehr gesteigert werden kann. Das korrigierte Bestimmtheitsmaß eignet sich also zum Vergleich von Regressionsmodellen mit einer unterschiedlichen Anzahl von Regressoren und einer unterschiedlichen Anzahl von Beobachtungen. Durch die „Bestrafung“ geht allerdings die ursprüngliche Interpretation von R^2 – der Anteil der Varianz der Y-Variablen, der durch die Varianz der X-

Variablen erklärt wird – verloren. Hierzu muss nach wie vor der nichtkorrigierte R^2 -Wert herangezogen werden. In ungünstigen Fällen (R^2 ist null) kann das korrigierte Bestimmtheitsmaß sogar negative Werte annehmen. (Cleff, 2008)

- **Standardfehler**

Der Standardfehler beschreibt die Standardverteilung der Residuen ($y-y'$). Je größer das Bestimmtheitsmaß R^2 wird, desto kleiner wird relativ dazu der Standardfehler des Regressionsmodells. Ist $R^2=1$, so hat der Standardfehler sein Minimum erreicht.

- **F-Statistik**

Durch einen F-Test kann die Gültigkeit des ganzen Regressionsansatzes, also die Gültigkeit aller Regressionskoeffizienten zusammen geprüft werden. Hier wird getestet, ob das Bestimmtheitsmaß des Regressionsansatzes null ist. Wenn diese Hypothese abgelehnt wird, kann daraus schließen, dass das gewählte Regressionsmodell einen Erklärungswert für den Regressanden y besitzt.

- **t-Statistik und p-Wert**

Die t-Statistik und der p-Wert testen in der linearen Regressionsanalyse jeden Regressionskoeffizienten, unter der Annahme normalverteilter Störgrößen, ob dieser der Nullhypothese $H_0: \beta_i = 0$ entspricht und in Folge die zu diesem gehörende unabhängige Variable aus dem Regressionsmodell weggelassen werden kann. Dies wäre der Fall, wenn der Betrag der t-Statistik kleiner als die Sicherheit z und der p-Wert größer als die Irrtumswahrscheinlichkeit α des jeweiligen Konfidenzintervalls ist. Die Werte für die Sicherheit und die Irrtumswahrscheinlichkeit für das 90%, 95% und 99% Konfidenzintervall können aus Tabelle 1 entnommen werden.

Es kann unter Umständen auch der Fall eintreten, dass der t-Test zu den üblichen Signifikanzniveaus keinen signifikanten Einfluss der einzelnen Regressoren festgestellt hat, der F-Test allerdings die Signifikanz des Gesamtmodells feststellt. Die Wahrscheinlichkeit, dass F-Test und t-Test unterschiedliche Ergebnisse liefern, steigt mit der Anzahl der Freiheitsgrade.

In der folgenden Tabelle ist das Ergebnis der Regressionsanalyse der Messwerte der elektrischen Leistungsmessung von LTS-CI- Montageautomaten mit stromintensiven Technologien im Betriebsmittelzustand 1 abgebildet. Anhand der zuvor beschriebenen statistischen Größen und am Beispiel dieser Regressionsstatistik wird gezeigt, wie dieses Ergebnis diskutiert wird.

<i>Regressionsstatistik</i>	
r	0,991
R ²	0,983
R ² _{adj}	0,966
Standardfehler	4,665
Beobachtungen	11

	<i>Freiheitsgrade</i>	<i>Quadratsummen</i>	<i>Mittlere Quadratsumme</i>	<i>F-Wert</i>	<i>F_{krit}</i>
Regression	5	6226,525	1245,305	57,212	0,000
Residuen	5	108,832	21,766		
Gesamt	10	6335,357			

	<i>Koeffizienten</i>	<i>Standardfehler</i>	<i>t-Statistik</i>	<i>P-Wert</i>
Schnittpunkt	54,511	7,472	7,296	0,001
Elektromotoren	-1,681	0,119	-14,138	0,000
LSG.	57,539	5,178	11,112	0,000
WSG.	64,590	6,931	9,319	0,000
Hydraulik-Aggr.	31,047	4,098	7,576	0,001
Roboter	49,146	6,776	7,252	0,001

Tabelle 2: Exemplarische Darstellung einer Regressionsstatistik

Die oberen zwei Teile der Tabelle beantworten die Frage, ob das Modell signifikant ist. Der Korrelationskoeffizient r des Regressionsmodells ist größer als $r \geq 0,8$, wodurch eine starke lineare Abhängigkeit zwischen dem Modell und den Messpunkten bestätigt wird. Die Anpassungsfähigkeit des Regressionsmodells ist mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2=0,98$ ebenfalls fast 1 und somit sehr gut. Die

Abweichung des adjustierten Bestimmtheitsmaßes R^2_{adj} vom Bestimmtheitsmaß R^2 ist sehr gering, wodurch gezeigt werden kann, dass das Modell nicht überparametrisiert ist. Trotz des großen Standardfehlers von 4,665 hat dieser bei dem gegebenen Bestimmtheitsmaß R^2 von beinahe 1 sein Minimum erreicht. Insgesamt wurden für diese Regression 11 Messwerte (Beobachtungen) verwendet. Der Nullhypothese des F-Tests (R^2 ist null) kann sicher verworfen werden, da der kritische Wert F_{krit} bei einem Signifikanzniveau von 99% kleiner als die Irrtumswahrscheinlichkeit von 1% ist. Somit wird ein signifikanter Zusammenhang zwischen dem Regressionsmodell und den Messwerten der elektrischen Leistungsmessung bestätigt.

Der dritte Teil der Tabelle beantwortet die Frage, ob die einzelnen Modellteile, nämlich die Regressanden, signifikant sind. Hier ist zu erkennen, dass die t-Statistiken aller unabhängigen Variablen oberhalb der Grenze der Sicherheit eines 99%-Konfidenzniveaus von $z = 2,5758$ liegen und somit die Hypothese, dass die Koeffizienten dieser Variablen null sind, verworfen werden kann. Dies wird durch die vorhandenen p-Werte bestätigt, da alle kleiner als die Irrtumswahrscheinlichkeit von 1% bei einem 99%- Konfidenzintervall sind.

Da die im Kapitel 4.2.3: Leistungsanalyse der Montageanlagen durchgeführten Regressionen ähnlich dem obigen Beispiel sind, wird auf eine derartig ausführliche Beschreibung dieser verzichtet.

1.3.3 Bewertung von Energieoptimierungsmaßnahmen

Basierend auf dieser Ist-Energie-Situation kann der Energieverbrauch aller Produktionstechnologien bestimmt und Abschätzungen über deren Energieoptimierungspotential gemacht werden. Im dritten Teil bzw. Kapitel 5 werden konkrete energieeffizienzsteigernde Maßnahmen zur Erschließung der mittels Top-Down und Bottom-Up-Ansätze gefundenen Energieeinsparpotentiale beschrieben und bewertet.

Die Wirtschaftlichkeitsberechnung dieser Maßnahmen erfolgt unter Berücksichtigung der Lebenszykluskosten und somit in Abhängigkeit von fixen

Anschaffungs- und Inbetriebnahmekosten sowie von variablen Instandhaltungs- und Energiekosten. Die Instandhaltungs- und Energiekosten werden wiederum durch die Betriebsart der Betriebsmittel beeinflusst.

2 Die Julius Blum GmbH

Die Firma Julius Blum GmbH ist ein weltweit tätiges Unternehmen, das auf die Herstellung von Möbelfunktionsbeschlägen spezialisiert ist. Die Hauptproduktgruppen sind Klappen-, Scharnier- und Auszugssysteme für Möbel sowie die Verarbeitungshilfen dafür. Gegründet wurde das Unternehmen 1952 von Julius Blum. Heute, in der zweiten Generation, wird das Familienunternehmen von Herbert und Gerhard Blum geleitet. Der Hauptsitz des unter dem Kurznamen Blum bekannten Unternehmens befindet sich in Höchst, einer Gemeinde im österreichischen Bundesland Vorarlberg. Blum besitzt aktuell über 27 Tochtergesellschaften und Repräsentanzen und liefert regelmäßig in über 100 Länder der Erde. Hauptproduktionsstandort ist Österreich mit insgesamt 7 Produktionswerken in Vorarlberg. Daneben produziert Blum auch in den USA, Brasilien und Polen in je einem Werk.

Das Unternehmen ist nach Siemens der zweitfleißigste Patentanmelder Österreichs und hat Niederlassungen in 80 Ländern der Welt. Blum wird regelmäßig für sein innovatives Produktdesign und die hohe Produktqualität ausgezeichnet. Kunden von Blum sind Möbel- und Küchenhersteller weltweit, weshalb Blum ca. 97% seiner Güter exportiert. (Chancenland Vorarlberg, 2014)

Blum Österreich ist, gemessen an der Zahl der Arbeitnehmer, der größte Arbeitgeber Vorarlbergs und befindet sich vollständig in Familienbesitz. Das Unternehmen beschäftigt ca. 6000 Mitarbeiter weltweit, von denen fast 4800 Mitarbeiter in Vorarlberg beschäftigt sind.

2.1 Das Werk 4

Das Produktionswerk 4 ist mit einer Produktionsfläche von 90.582 m² das größte Produktionswerk der Julius Blum GmbH und liegt im Brachsenweg 35 in 6900 Bregenz. Das Werk ist in einzelnen Bauetappen (BE) entstanden und besteht heute aus einem Altbau (1. – 7. BE), einem Neubau (8. – 12. BE) und einem im Jahr 2000 übernommenen Fabrikgebäude. Alt- und Neubau sind durch eine öffentliche Straße

voneinander getrennt. Um den Materialfluss zwischen Alt- und Neubau zu gewährleisten, sind diese über einen unterirdischen Tunnel miteinander verbunden.

In der folgenden Abbildung ist das Werk 4 aus der Vogelperspektive zu erkennen. Altbau, Neubau und der Tunnel sind als solche beschriftet und das übernommene Fabrikgebäude, welches in unmittelbarer Nähe des alten Betriebsgeländes steht, ist orange hinterlegt.

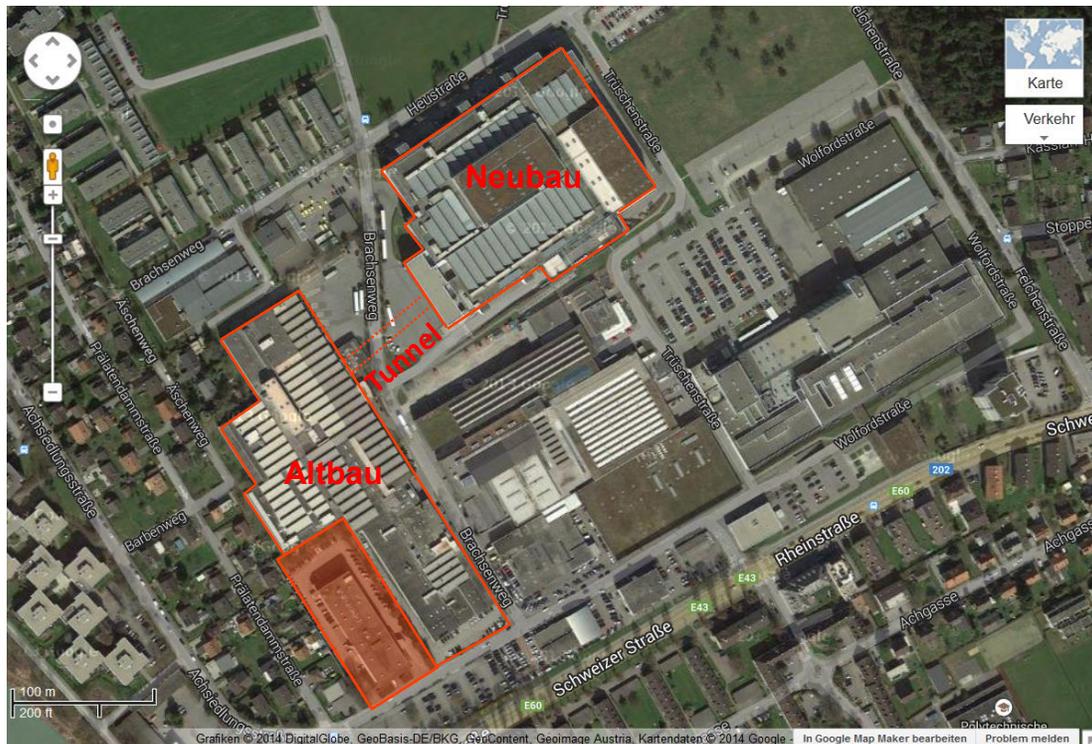


Abbildung 3: Werk 4 der Julius Blum GmbH aus der Vogelperspektive (Google, 2014)

Die schon erwähnte Produktionsfläche von 90.582 m² teilt sich mit 33.016 m² auf den Altbau und 52.066 m² auf den Neubau auf. Das unmittelbar neben dem Altbau stehende Fabrikgebäude verfügt über eine Nutzfläche von 5.500 m² und dient als Lager. Außer dem Fabrikgebäude verfügt das Werk 4 über vier Lager im Alt- und Neubau. Für die Herstellung der im Werk 4 produzierten Produktpalette werden Pressen, Profilieranlagen, Montageanlagen und Pulverbeschichtungsanlagen eingesetzt.

2.2 Produktionstechnologien im Werk 4

Die Produktionstechnologien sind der treibende Faktor für den Gesamtenergieverbrauch in den Produktionswerken von Blum. In diesem Kapitel werden die im Werk 4 eingesetzten Produktionstechnologien beschrieben, um die Grundlagen für deren in Kapitel 4.2 folgende Leistungsanalyse zu schaffen.

2.2.1 Pressen

Die bei Blum eingesetzten Pressen lassen sich nach der Art des Antriebs zwischen hydraulische Pressen, Exzenter- und Kurbelpressen sowie Servopressen unterscheiden. Eine hydraulische Presse arbeitet kraftgebunden nach dem hydrostatischen Prinzip. Bei hydrostatischen Pressen wird die im Druckmedium gespeicherte Energie durch Zylinderkolben in mechanische Energie umgewandelt. Exzenter- und Kurbelpressen sind weggebundene Umformmaschinen, deren Antrieb durch einen Schubkurbeltrieb gekennzeichnet ist. Der Antrieb von Servopressen erfolgt direkt über Torquemotoren.

Unabhängig von der Antriebsart sind diese Pressen als Schnellläuferpressen ausgeführt. Merkmale von Schnellläuferpressen sind kleine Hübe, steife Gestelle, schnelllaufende Kupplungs-Brems-Systeme, kleinste Lagerspiele und hochgenaue Stößelführungen. Da solche Anlagen in Verbindung mit automatisierten Materialzu- und abführsystemen eine hohe Wirtschaftlichkeit aufweisen, werden sie häufig in der Großserienfertigung eingesetzt. (Weck, 2005)

Die folgende Abbildung zeigt das Funktionsschema einer Schnellläuferpresse bzw. Transferpresse mit Servoantrieb und Bandanlage.

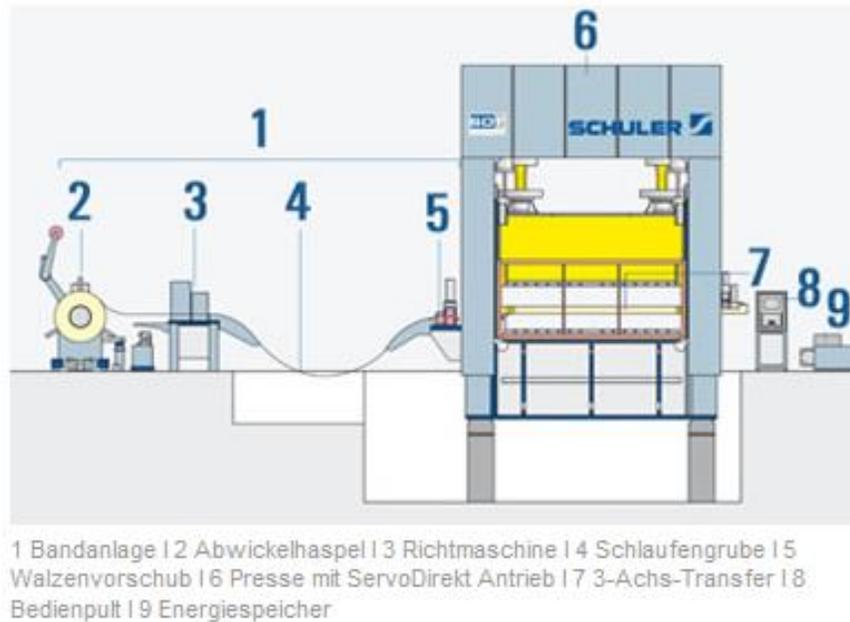


Abbildung 4: Funktionsschema einer Transferpresse mit Servoantrieb und Bandanlage (Schuler, 2014)

Das Bandmaterial wird der Presse von einer Haspel über eine Richtmaschine und eine Schlaufe zugeführt, wobei die Bandlaufgeschwindigkeit an der Haspel automatisch über den Schlaufendurchhang geregelt wird. Als Bandvorschubsystem wird ein Walzenvorschub verwendet, der von einem NC-gesteuerten Servoantrieb angetrieben wird. Oft wird auch die Exzenterwelle über ein formschlüssiges Kurvenschaltgetriebe zum Antrieb des Walzenvorschubes genutzt. Zur wirtschaftlichen Fertigung des Blechteiles werden die erforderlichen Einzeloperationen in einer Presse zusammengefasst. Die Anzahl der Werkzeuge entspricht dann der Anzahl der Arbeitsstufen, die zur Herstellung eines Stufenziehteils erforderlich sind. (Weck, 2005)

Die folgende Abbildung zeigt den Werkzeugeinbauraum einer Transferpresse.

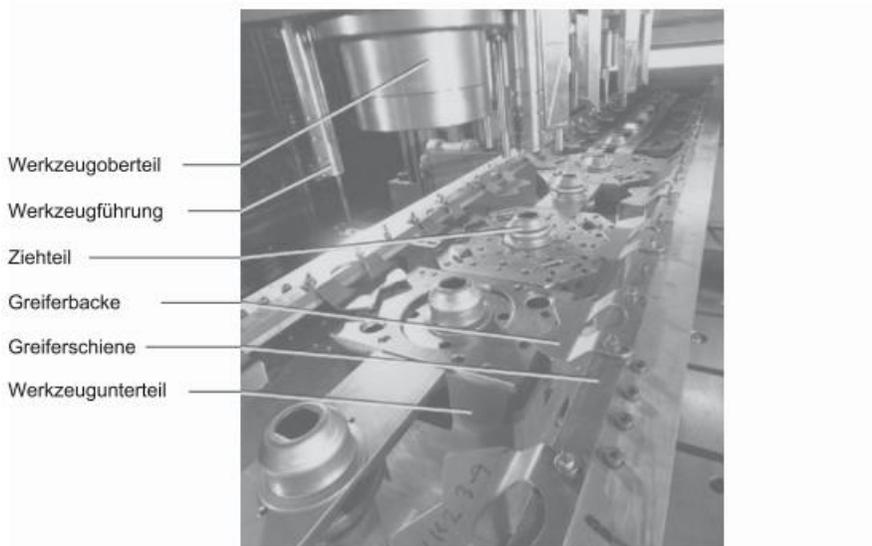


Abbildung 5: Werkzeugeinbauraum einer Transferpresse (Weck, 2005)

Der Werkstücktransport von einem Werkzeug zum anderen erfolgt in der Großteiltransferpresse über einen Greiferschiene-Transfer. In folgender Abbildung ist das Funktionsprinzip eines solchen Greiferschiene-Transfers dargestellt.

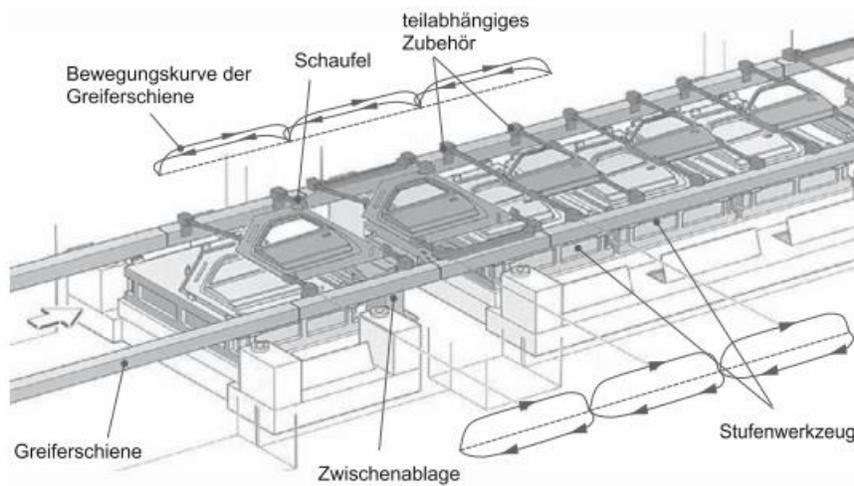


Abbildung 6: Greiferschiene-Transfer der Großteiltransferpresse (Weck, 2005)

Stufenpressen ermöglichen hohe Produktionsleistungen, da alle zur Herstellung eines Werkstückes erforderlichen Fertigungsschritte gleichzeitig durchgeführt werden. Mit jedem Stößelhub wird ein Teil fertiggestellt, unabhängig davon, wie viele Arbeitsstationen zur Herstellung im Einzelfall erforderlich sind.

2.2.2 Profilieranlagen

Eine Profilieranlage vereint zwei verschiedene Fertigungsverfahren in einer Maschine, nämlich das Rollprofilieren und das Nibbeln bzw. Stanzen.

Nach DIN 8586 gehört das Rollprofilieren zur Gruppe der Fertigungsverfahren „Biege-Umformen mit drehender Werkzeugbewegung“. Beim Profilieren wird ein Blechband durch eine Reihe von Umformstationen mit mindestens je einem Rollenpaar transportiert. Dabei entsteht nach und nach die gewünschte Profilform. Der wichtigste Vorteil ist die hohe Produktionsleistung und Prozesssicherheit und damit verbunden eine hohe Wirtschaftlichkeit. Die folgende Abbildung zeigt die stufenweise Umformung eines Blechbandes durch die gezielte Anordnung und Geometrie der Rollenkörper. (Dreistern, 2014)

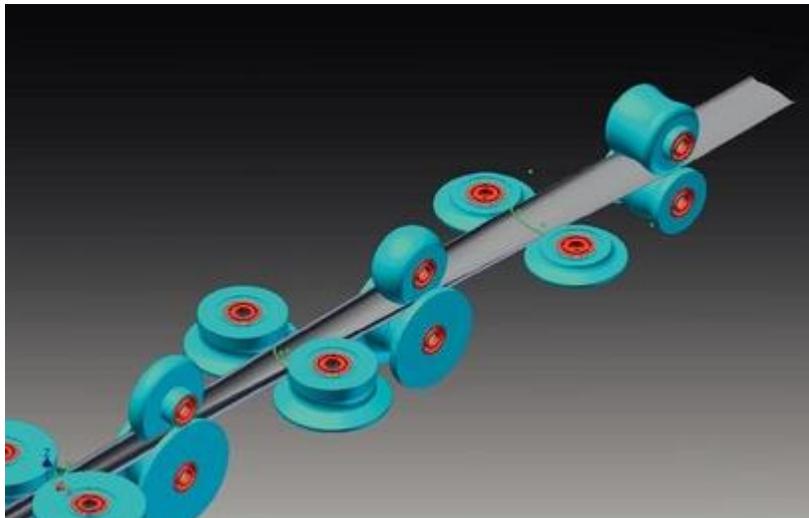


Abbildung 7: Walzprofilieren (PLM IT Business, 2014)

Anschließend wird das umgeformte Blechband mit der Hilfe von Stempeln in mehreren Schritten gestanzt. Bei dieser Art der Materialbearbeitung handelt es sich um ein spanloses Fertigungsverfahren nach DIN 8580 der Hauptgruppe 2 (Umformen) und Hauptgruppe 3 (Trennen). Im Anschluss an das Stanzen wird das Blechband an einer definierten Stelle getrennt. Somit kann abhängig von der Anordnung und Geometrie der Rollensätze und Stempel nahezu jede erdenkliche Profilform in den unterschiedlichsten Längen hergestellt werden.

2.2.3 Montageautomaten

Ein Montageautomat hat den Zweck, die in der Grundfertigung hergestellten Einzelteile zu fertigen Beschlägen bzw. Schubladenführungen zusammenzubauen.

Die Anlagen umfassen alle erforderlichen Zuführungs-, Verkettungs- und Handhabungsvorrichtungen. Zur Verkettung und Handhabung sind auch Roboter im Einsatz. Die Anlagen umfassen typischerweise alle Herstellungsschritte und Fügeprozesse wie Einpressen, Schrauben, Mikroschweißen, Umformen oder Kleben, Magnetisieren und Befetten, Prüfschritte sowie elektrische Sicherheits- und Funktionsprüfungen. Eine solche Maschine bietet somit eine Komplettlösung mit Zuführsystemen, Materiallogistik, Montage- und Prozessmodulen und dem passenden Verkettungssystem. Entsprechend den Produktionserfordernissen reicht das Spektrum der bei Blum eingesetzten Montageautomaten von unverketteten Handarbeits- oder Prozessmodulen über flexible Montagezellen bis hin zu lose oder starr verketteten Hochleistungsautomaten. In der folgenden Abbildung sind solche Montageautomaten, wie sie auch bei Blum eingesetzt werden, dargestellt.



Abbildung 8: Montageautomaten (PC Control, 2014)

2.2.4 Pulverbeschichtungsanlagen

Das Pulverbeschichten ist ein Beschichtungsverfahren, bei dem ein elektrisch leitfähiger Werkstoff mit Pulverlack beschichtet wird. Eine typische Beschichtungsanlage besteht aus Oberflächenvorbehandlung, Wassertrockner, Pulvertrockner und Pulverkabinen. Die Werkstücke werden an sogenannten Gehängen aufgehängt und durch ein kettenbetriebenes Fördersystem durch die gesamte Pulverbeschichtungsanlage transportiert. In der folgenden Abbildung wird das Anlagenlayout einer Pulverbeschichtungsanlage dargestellt.

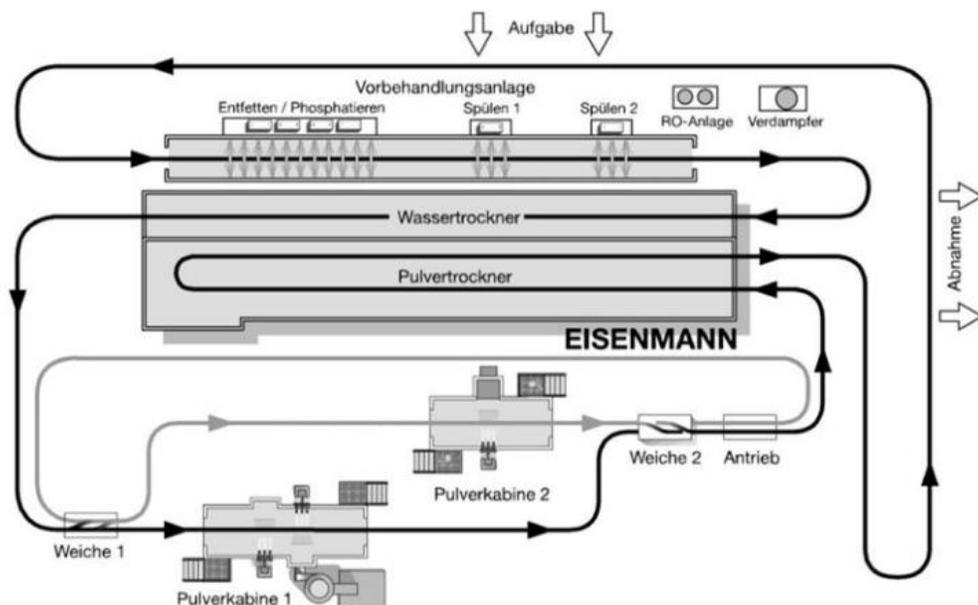


Abbildung 9: Anlagenlayout einer Pulverbeschichtungsanlage (Pietschmann, 2013)

Die zu beschichtenden Teile werden bei der Aufgabe auf die Gehänge aufgehängt und zuerst einer Reinigung in der Vorbehandlungsanlage unterzogen und anschließend in einem Wassertrockner von Flüssigkeitsrückständen befreit. In der nächsten Prozessstufe wird der Pulverlack in den Pulverkabinen auf die gereinigten Blechteile aufgebracht. Anschließend erfolgt das Einbrennen des aufgetragenen Pulverlacks im Pulvertrockner. Um die elektrische Leitfähigkeit zwischen den Gehängen und den unbeschichteten Werkstücken zu garantieren, müssen die Gehänge zwischen der Abnahme und Aufnahme neuer Werkstücke in einer Entlackungsanlage von eingebranntem Pulverlack befreit werden.

3 Energieanalyse mittels Top-Down-Ansatz

Im ersten Unterkapitel Energieanalyse auf Konzernebene wird im Sinne des in Abbildung 2 dargestellten Top-Down-Ansatzes mit einer Energieverbrauchsanalyse von Blum Österreich auf der Konzernebene für den Zeitraum von 2000 bis 2013 begonnen. Diese stellt den Gesamtenergieverbrauch mit dem erwirtschafteten Umsatz ins Verhältnis und beschreibt somit, wie energieintensiv die Umsatzgenerierung war. Anschließend wird im Kapitel Energieanalyse auf Werksebene durch selbige Analyse auf Werksebene gezeigt, wie sich der jährliche Energieverbrauch vom Werk 4 parallel zu dem von Blum Österreich im selben Zeitraum entwickelt hat. Die folgende Energieanalyse wird für das betrachtete Geschäftsjahr (GJ) 2012/13 durchgeführt. Ausgangspunkt dabei sind die von den Energieversorgungsunternehmen (EVU) bezogenen Verbrauchswerte für die Nutzenergieformen elektrischer Strom und Erdgas. Daraus werden Lastgang- und Lastdauerkurve von Strom und Erdgas des Werks 4 für das GJ2012/13 gebildet, welche Aufschluss über den genauen zeitlichen Verlauf der Höhe des Energiebezuges liefern. Im Kapitel Energieanalyse auf der Gebäudeebene wird untersucht, wie viel der verbrauchten Energie für benötigte Energiedienstleistungen wie Heizen, Kühlen, Beleuchtung, aber auch für die Erzeugung von anderen für die Produktion notwendigen Energieformen, wie z.B. Druckluft, eingesetzt wurde.

3.1 Energieanalyse auf Konzernebene

Mit dem stetig wachsenden Umsatz von Blum steigt auch der für die Produktion benötigte Energiebedarf. Das Verhältnis des Energieverbrauches zur Umsatzentwicklung ist ein Maß für die Energieeffizienz und wird für diese Branche als Energieintensität von Gütern und Dienstleistungen bezeichnet. Eine nachhaltige Entwicklung verlangt, dass die von Produktionsbetrieben ausgehenden Umweltbelastungen und -risiken minimiert sowie die Energie- und Materialflüsse optimiert werden. Folglich muss es ein Ziel sein, für die Produktion einer bestimmten Menge von Gütern und Dienstleistungen möglichst wenig Energie aufzuwenden. (Statistik Schweiz, 2014)

Auf der Ebene der Energienachfrager spricht man von der Endenergieeffizienz, welche das Verhältnis interpretiert, wie viel Energie für die Befriedigung energierelevanter Bedürfnisse, d.h. letztlich für ein bestimmtes Maß an Energie- oder Mobilitätsdienstleistungen benötigt wird (W. Irrek, 2008). Eine Steigerung der Endenergieeffizienz bedeutet demnach, weniger Energie für dasselbe Maß an Dienstleistung einzusetzen. Die Steigerung kann durch technische, organisatorisch-institutionelle bzw. Struktur verändernde oder auch verhaltensbezogene Maßnahmen erreicht werden. Unabhängig davon auf welcher Ebene das Thema Energieeffizienz diskutiert wird, beruht eine Steigerung der Energieeffizienz auf einem Substitutionsprozess (Pehnt, 2010). Beispielsweise wird beim Energiemanagement Energie durch Humankapital substituiert, da ein erhöhter Planungs- Kontroll- und Koordinationsaufwand zu einem Energiespareffekt, oder genauer gesagt zu einer Energieeffizienzsteigerung, führen soll.

Die folgende Abbildung zeigt die Entwicklung von Umsatz und Energieverbrauch von Blum Österreich (BAU) vom Jahr 2000 zum Jahr 2013.

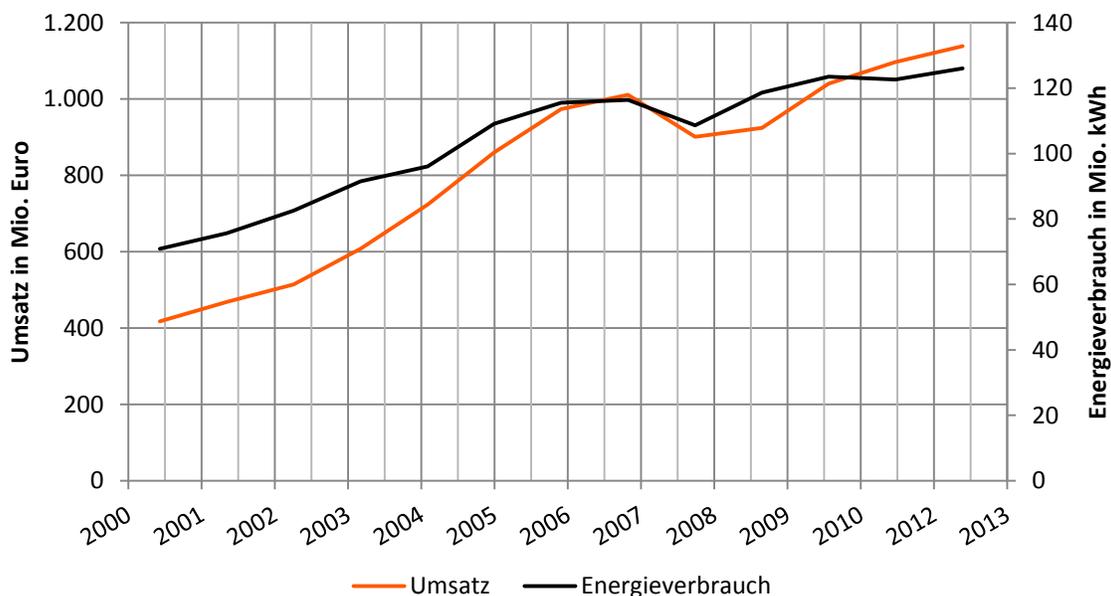


Abbildung 10: Umsatzentwicklung vs. Energieverbrauch der Julius Blum GmbH

Folgende Tabelle zeigt sowohl die Energieintensität von Gütern und Dienstleistungen von Blum, als auch den in Abbildung 10 dargestellten Verlauf von Umsatz und Energiebedarf von Blum Österreich in Zahlen.

Geschäftsjahr (GJ)	Umsatz (U)	ΔU	Energieverbrauch	Energieintensität (EI)	ΔEI
GJ2000/01	417.400.000 €		70.929.086 kWh	0,170 kWh/€	
GJ2001/02	468.300.000 €	5,7%	75.665.991 kWh	0,162 kWh/€	-2,5%
GJ2002/03	514.100.000 €	4,7%	82.525.354 kWh	0,161 kWh/€	-0,3%
GJ2003/04	607.600.000 €	8,3%	91.518.706 kWh	0,151 kWh/€	-3,2%
GJ2004/05	723.600.000 €	8,7%	96.066.275 kWh	0,133 kWh/€	-6,3%
GJ2005/06	860.200.000 €	8,6%	109.119.064 kWh	0,127 kWh/€	-2,3%
GJ2006/07	973.900.000 €	6,2%	115.517.751 kWh	0,119 kWh/€	-3,4%
GJ2007/08	1.011.400.000 €	1,9%	116.407.531 kWh	0,115 kWh/€	-1,5%
GJ2008/09	900.900.000 €	-5,8%	108.601.997 kWh	0,121 kWh/€	2,3%
GJ2009/10	924.100.000 €	1,3%	118.613.414 kWh	0,128 kWh/€	3,1%
GJ2010/11	1.040.100.000 €	5,9%	123.542.324 kWh	0,119 kWh/€	-3,9%
GJ2011/12	1.097.200.000 €	2,7%	122.657.241 kWh	0,112 kWh/€	-3,0%
GJ2012/13	1.139.000.000 €	1,9%	126.068.063 kWh	0,111 kWh/€	-0,5%

Tabelle 3: Entwicklung der Energieintensität seit dem Geschäftsjahr 2000/01

Im Sinne der Nachhaltigkeit ist die abnehmende Energiemenge für die Erarbeitung eines Umsatzes von einem Euro als positiv zu bewerten.

In der obigen Abbildung bzw. Tabelle ist zu sehen, dass der Umsatz vom GJ2000/01 bis zum GJ2006/07 jährlich mit mindestens 4,7% anstieg. Mit der zunehmenden Nachfrage an Produkten stieg auch der Umsatz und in Folge der für die Produktion benötigte Energiebedarf bzw. die Energiekosten. Allerdings stiegen die Energiekosten im Verhältnis zum Umsatz nicht so stark, wodurch sich eine negative Energieintensität (ΔEI) zum jeweiligen Vorjahr ergibt. Im folgenden GJ2007/08 stieg der Umsatz im Vergleich zum Vorjahr um lediglich 1,9%. Dies ist auf die Vorläufer der Wirtschaftskrise zurückzuführen, welche in Europa im Herbst 2008 zu bewältigen war und führte zu einem Umsatzverlust von 5,8% im GJ2008/09. Die Folge für die Produktion waren stark reduzierte Auftragszahlen. In dieser Zeit fiel der Energiebedarf aber nicht so stark, was auf die Entscheidung einer verlangsamten Produktion zurückzuführen ist und sich in einem Anstieg der Energieintensität um 2,3% zum Vorjahr niederschlug. Die in dieser Krise freigewordenen Personalkapazitäten wurden eingesetzt, um technische und organisatorische Optimierungen an den Produktionsprozessen durchzuführen. Nach nur einem Krisenjahr konnte der Umsatzrückgang gestoppt und das GJ2009/10 mit einem

Umsatzplus von 1,3% zum GJ2008/09 abgeschlossen werden, hingegen verschlechterte sich die Energieintensität zum Vorjahr um 3,1%. Im Folgejahr 2010/11 kam es zu einer sehr starken Umsatzsteigerung von 5,9% und zu einer Reduzierung der Energieintensität zum Vorjahr um 3,9%. In den vergangenen zwei Geschäftsjahren 2011/12 und 2012/13 konnten Umsatzsteigerungen von 2,7% bzw. 1,9% erzielt sowie die Energieintensitäten um 3% bzw. 0,5% verbessert werden.

3.2 Energieanalyse auf Werksebene

Wie in diesem Kapitel schon einleitend erwähnt, wird durch die Energieanalyse auf Werksebene gezeigt, wie sich der jährliche Energieverbrauch vom Werk 4 parallel zu dem von Blum Österreich entwickelt hat. Außerdem wird durch die Analyse der von den Energieversorgungsunternehmen (EVU) bezogenen Verbrauchswerte für elektrischen Strom und Erdgas gezeigt, wie deren Verbrauch mit dem im Werk 4 verwendeten Arbeitszeitmodell zusammenhängt. Die folgende Abbildung zeigt die Verbrauchsentwicklung von Strom, Erdgas und Heizöl im Werk 4 (W4) in Bezug zum Gesamtenergieverbrauch von Blum Österreich (BAU) von 2000 bis 2013.

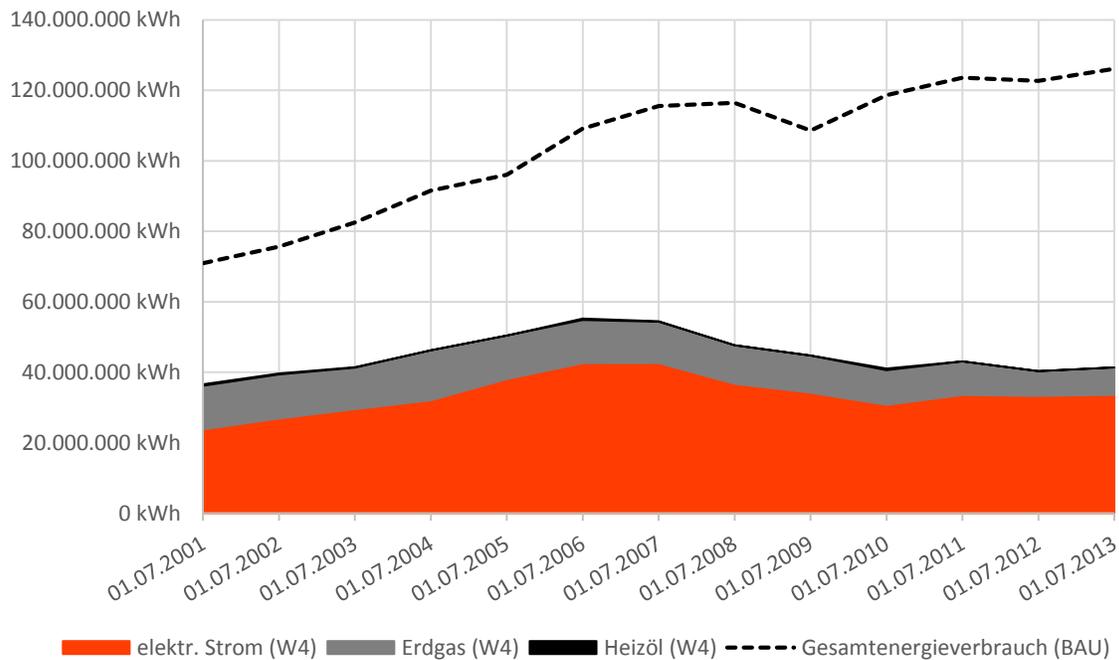


Abbildung 11: Verbrauchsentwicklung der Energieträger vom Werk 4

Aus der Verbrauchsentwicklung der Energieträger im Werk 4 ist zu sehen, dass der Verbrauch von Heizöl im Vergleich zum Verbrauch von elektrischem Strom und Erdgas über den gesamten Betrachtungszeitraum marginal ist. Der Verbrauch von Erdgas ist bis zum GJ2005/06 nahezu konstant und entwickelt sich anschließend geringfügig rückläufig. Eine bis zum GJ2004/05 nahezu parallele Entwicklung des Energiebedarfes vom Werk 4 und dem Gesamtenergiebedarf von BAU ist auf den elektrischen Stromverbrauch zurückzuführen. Dieser stieg bis zu diesem Geschäftsjahr stetig an, stagnierte dann für ein Jahr und nahm vom GJ2006/07 bis zum GJ2009/10 ab. Hier sind ebenso die Auswirkungen der Wirtschaftskrise wie in Abbildung 10 zu erkennen. In diesem Zeitraum entwickelte sich der Gesamtenergieverbrauch von BAU allerdings, gegenläufig zu dem vom Werk 4, nach oben. Ab dem GJ2009/10 kam es erneut zu einem leichten Anstieg des elektrischen Stromverbrauches, welcher bis heute anhält.

Im Folgenden richtet sich der Fokus der Arbeit auf das vergangene und damit bereits abgeschlossene Geschäftsjahr 2012/13. Mit Hilfe der von den Energieversorgungsunternehmen (EVU) bezogenen Verbrauchswerten für elektrischer Strom und Erdgas lässt sich nun zeigen, wie der Energieverbrauch des Werks 4 vom verwendeten Arbeitszeitmodell abhängt.

Das österreichische Tarifsysteem für Netznutzungsentgelte sieht bei Verbrauchern ab einem Verbrauch von jährlich 100.000 kWh eine ¼-stündlich registrierende Leistungsmessung (in kW) vor. Bei Erdgas erfolgt eine stündlich registrierende Energiemessung (kWh) der bezogenen Erdgasmenge ab einem Jahresverbrauch von 1,5 Mio kWh. Auf diese Weise ist zwar noch lange keine verursachergerechte Analyse der Energieströme möglich, aber diese Daten liefern erst wichtige Informationen über

- Gesamtenergieverbrauch
- Verbrauchsmuster (Jahr, Monat, Woche, Tag)
- maximale, minimale und Durchschnittslasten

Kombiniert mit Produktionsdaten lassen sich daraus bereits erste kausale Rückschlüsse zwischen Produktion, Wetter und Energieströmen ableiten. (Hesselbach, 2012)

Mit diesen Daten lassen sich Lastgang- und Lastdauerkurven des bezogenen elektrischen Stromes und des bezogenen Erdgases über einen beliebigen Zeitraum darstellen.

Als Lastgangkurve bezeichnet man die individuellen Energieverbrauchswerte über einen bestimmten Zeitraum hinweg. Trägt man diese über einer Zeitachse in ein Diagramm ein, so erhält man eine Kurve, die den Maximal- und Minimalverbrauch darstellt. Ideal ist eine Kurve mit niedrigen Spitzen und einem gemäßigten Gesamtniveau. (RheinEnergie, 2014)

Die Lastdauerkurve beschreibt die stündlich pro Jahr vorkommenden Lasten. Für die in dieser Arbeit angestellten Überlegungen entspricht dieser Zeitraum dem Geschäftsjahr 2012/2013 der Firma Blum, welches von Juli 2012 bis Juni 2013 andauerte. Mit Hilfe der folgenden Lastgang- und Lastdauerkurve der bezogenen Nutzenergieformen der Energieversorgungsunternehmen, kann der zeitlich von der Produktionsauslastung abhängige Energiebedarf für das Geschäftsjahr 2012/2013 veranschaulicht und untersucht werden.

Die Nutzenergieform des elektrischen Stromes ist die in der verarbeitenden Industrie am meisten eingesetzte Energieform, da die meisten Querschnittstechnologien mit dieser betrieben werden. Die vorangegangene Abbildung 11 zeigt, dass dies auch für das Produktionswerk 4 der Julius Blum GmbH gilt.

3.2.1 Lastgangkurve der elektrischen Leistung

In der folgenden Abbildung 12 ist der elektrische Jahreslastgang der bezogenen elektrischen Leistung vom gesamten Werk 4 verteilt über das Wirtschaftsjahr 2012/13 dargestellt.

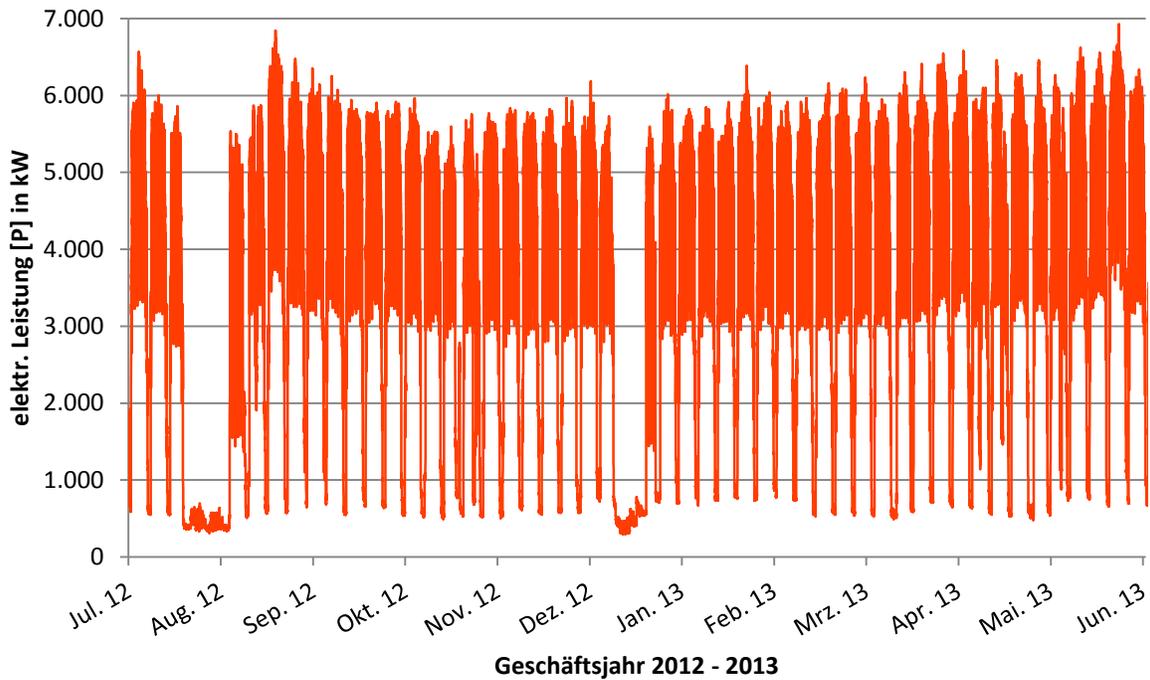


Abbildung 12: Jahres-Lastgangkurve der elektrischen Leistung vom Werk 4

Aus dem Verlauf dieser Leistungskurve ergibt sich eine prinzipielle Einteilung in die folgenden vier Lastbereiche:

- Grundlastbereich
- Teillastbereich
- Volllastbereich
- Spitzenlastbereich

Die Ermittlung dieser vier Lastbereiche erfolgt grafisch mit Hilfe einer Tangentenkonstruktion und wird im Folgenden am Beispiel der aus der Lastgangkurve gewonnenen Lastdauerkurve beschrieben.

3.2.2 Lastdauerkurve der elektrischen Leistung

Löst man die Leistungswerte von ihrer chronologischen Ordnung und reiht diese ihrer Größe nach absteigend an, so gelangt man zur Lastdauerkurve. Diese zeigt

welche elektrische Leistung über wie viele Stunden pro Jahr bezogen wurde und wird in folgender Abbildung dargestellt.

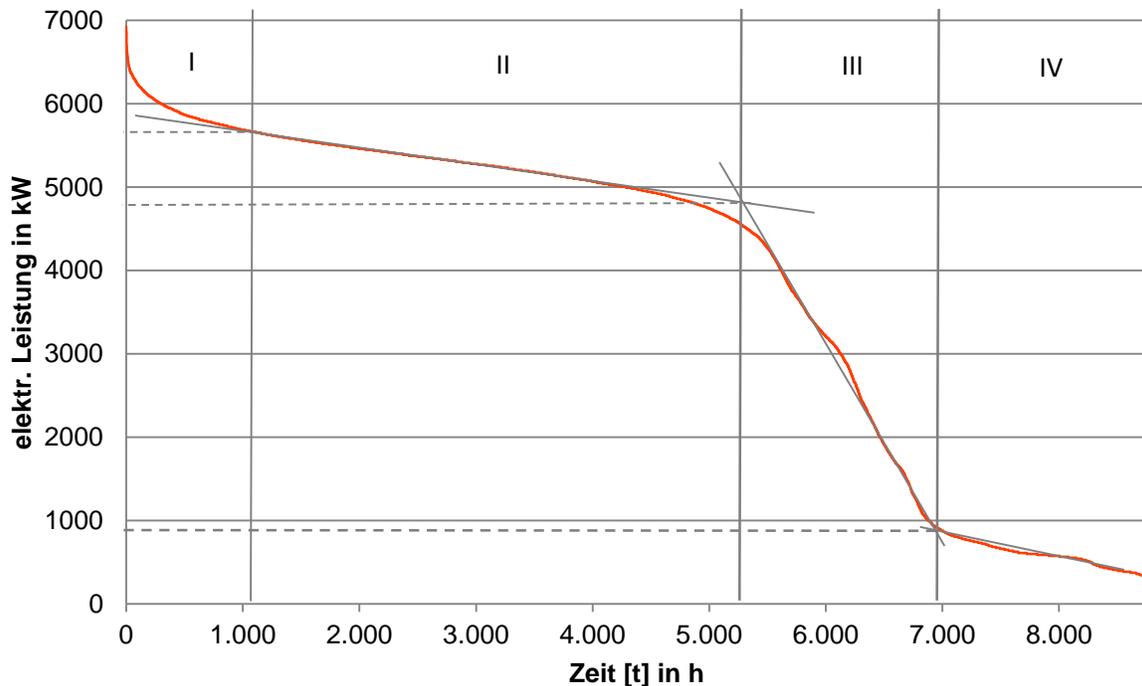


Abbildung 13: Jahres-Lastdauerkurve der bezogenen elektrischen Leistung vom Werk 4 für das Geschäftsjahr 2012/13

Bei genauerer Betrachtung der obigen Abbildung fallen besonders die Wendepunkte der Jahres-Lastdauerkurve auf. Durch Verlängerung der Tangenten an den Wendepunkten ergeben sich Schnittpunkte, welche die Lastdauerkurve in vier Lastbereiche einteilen. Die folgende Tabelle fasst diese vier Bereiche zusammen.

Bereich	Bezeichnung	Leistungsbereich	Stunden p.a.
I	Spitzenlast	$P \geq 5750 \text{ kW}$	797
II	Volllast	$4900 \text{ kW} \leq P < 5750 \text{ kW}$	3828
III	Teillast	$900 \text{ kW} \leq P < 4900 \text{ kW}$	2352
IV	Grundlast	$0 \text{ kW} \leq P < 900 \text{ kW}$	1783

Tabelle 4: Lastbereiche der elektrischen Lastdauerkurve

Die **Grundlast** ist die während betriebsfreien Zeiten, also während des Betriebsurlaubs, Feiertagen, oder an Wochenenden bezogene elektrische Wirkleistung. Die Grundlast liegt im Leistungsbereich bis 0 bis 900kW und wurde 1783 Stunden im Geschäftsjahr 2012/13 erreicht. Die **Teillast** ist der in Pausenzeiten

und während Störungen durch eingeschaltete Maschinen verursachte Leistungsbedarf. Dieser beträgt zwischen 900 und 4900 kW und wurde im Geschäftsjahr 2012/13 über 2352 Stunden benötigt. Der größte Teil des Jahres, nämlich 3824 Stunden, befindet sich das Werk 4 im Volllastbetrieb. Die **Volllast** beschreibt die während den Produktionszeiten zusätzlich zur Grund- und Teillast benötigte elektrische Wirkleistung und variiert, je nach Produktionsauslastung, zwischen 4900 und 5750kW. Wie bei der Lastgangkurve kann somit auch aus der Lastdauerkurve auf einen Dreischichtbetrieb zurückgeschlossen werden. Während des Volllastbetriebs kommt es zu extremen Lastspitzen, die größer sind als 5750kW. Diese werden als **Spitzenlasten** bezeichnet und treten am seltensten auf.

3.2.3 Wochenlastgang

Der Verlauf der Lastgangkurve über die vier beschriebenen Lastbereiche ist produktionsabhängig und lässt sich besonders gut am Beispiel eines Wochenlastganges beschreiben. Die folgende Abbildung zeigt den Verlauf der bezogenen elektrischen Leistung vom Werke 4 der Kalenderwoche 28 im Jahr 2012.

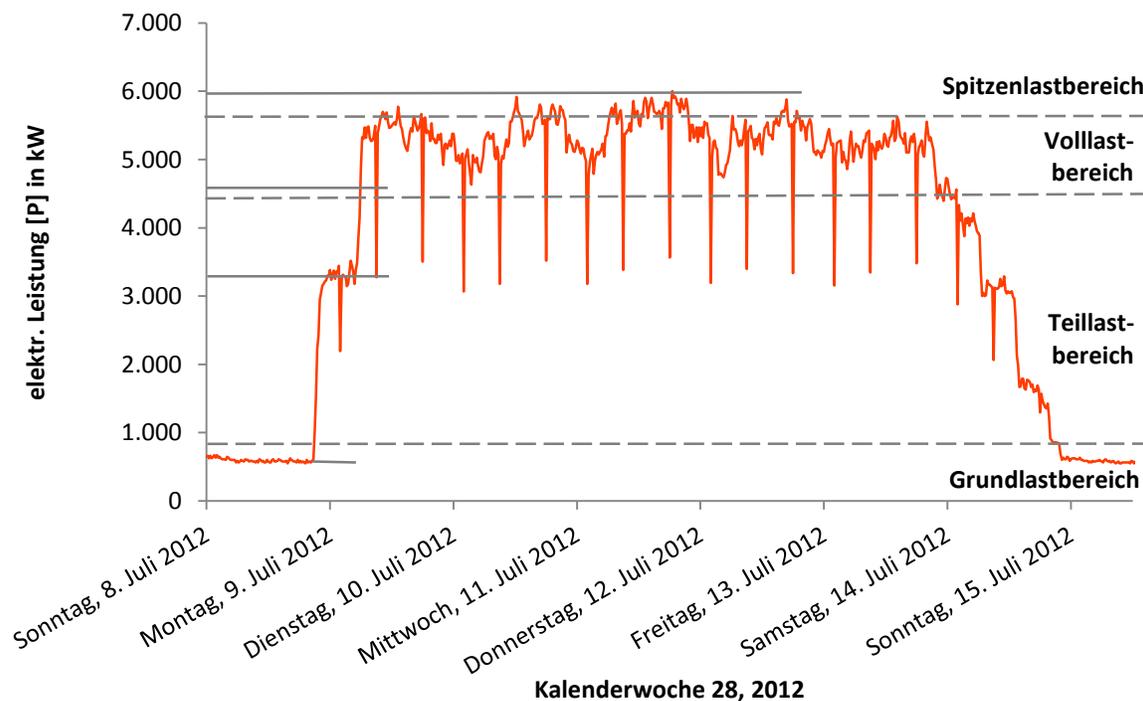


Abbildung 14: Elektrische Lastgangkurve vom Werk 4 (08.07. - 15.07.2012)

Aus Abbildung 14 lässt sich die Abhängigkeit des elektrischen Leistungsbedarfes vom Produktionsplan erkennen. Die Produktion verläuft über 5 Arbeitstage pro Woche nach einem Dreischichtmodell. Die einzelnen Schichten werden als Früh-, Spät- und Nachtschicht bezeichnet. Dieses Schichtmodell startet am Montag mit der Frühschicht und endet am Freitag mit der Spätschicht. Bei durchschnittlicher Auslastung wird in 15 Schichten pro Woche produziert, wobei bis zu 18 Schichten pro Woche möglich sind. Bei einer Produktion in 15 Schichten pro Woche gilt das Wochenende, von Freitagabend ab 22:00 Uhr bis Montagfrüh um 06:00 Uhr, als produktionsfrei. Der folgenden Tabelle kann der Beginn, die Pausenzeit und das Ende der Früh-, Spät- und Nachtschicht entnommen werden.

	Beginn	Pause	Ende
Frühschicht (Mo - Fr)	06:00	09:00 - 09:15	14:00
Spätschicht (Mo - Fr)	14:00	18:00 - 18:15	22:00
Nachtschicht (Mo - Fr)	22:00	02:00 - 02:15	06:00

Tabelle 5: Arbeitszeit-Schichtmodell vom Werk 4

Bei genauer Betrachtung der obigen Abbildung 14 lässt sich erkennen, dass sich der elektrische Leistungsbedarf des Werks 4 am Arbeitszeitmodell orientiert.

Am Sonntagabend gegen 22:00 Uhr läuft die Produktion an und durch Anlageneinschaltungen steigt die Lastgangkurve von der Grundlast von ca. 650kW sprunghaft auf eine Teillast von ca. 3300kW an. Dieser Wert wird über wenige Stunden gehalten. Dabei werden die Anlagen für die Produktion vorbereitet, welche um 02:00 Uhr in der Nacht voll anläuft und somit die Lastgangkurve sprunghaft von der Teillast auf die Spitzenlast ansteigt. Diese Spitzenlast pendelt sich auslastungsabhängig für die kW 28 bei einem durchschnittlichen Wert von ca. 5300kW ein. Nur während den Pausen fällt die Wochen-Lastgangkurve auf die Teillast von ungefähr 3300kW ab. Am Freitag in der Nacht, am Ende der Spätschicht, beginnt der Bedarf an elektrischer Leistung wieder zu fallen und erreicht am Samstag gegen 22:00 Uhr wieder das Grundlastniveau. Der verzögerte Fall der Leistungskurve von Freitagnachmittag bis Samstagabend ist dadurch bedingt, dass die Produktion etappenweise zum Stillstand kommt.

3.2.4 Lastgangkurve von Erdgas

Im Produktionswerk 4 wird Erdgas sowohl zum Heizen der beiden Produktionsgebäude als auch zum Betreiben der Pulverbeschichtungsanlagen benötigt. Analog zum elektrischen Stromverbrauch, können Lastgang- und Lastdauerkurve auch für den Erdgasverbrauch erstellt werden.

In der folgenden Abbildung 15 ist die Lastgangkurve für das gesamte bezogene Erdgas vom Werk 4 im Geschäftsjahr 2012/13 dargestellt.

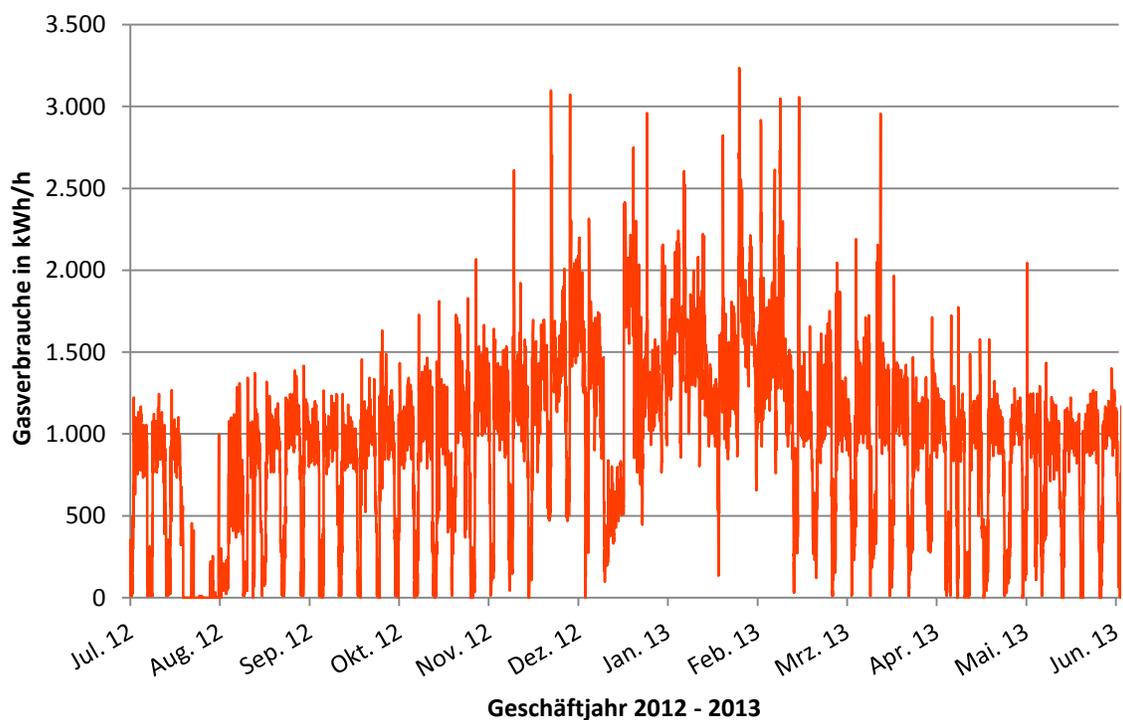


Abbildung 15: Lastgangkurve des bezogenen Erdgases des Werks 4

In der obigen Abbildung 15 ist zu erkennen, dass in den Sommermonaten Juli bis Mitte August während der Produktionszeiten durchschnittlicher Energiebedarf an Erdgas von ca. 1.000 kWh/h bestand. Dieser fiel während der Wochenenden und während des Betriebsurlaubes auf ein Minimum von wenigen Kilowattstunden ab. Nach dem Betriebsurlaub und bis zum Beginn der kalten Wintermonate stieg der Erdgasbedarf erneut auf ca. 1.000 kWh/h an. Mit den ersten kalten Tagen Mitte Oktober stieg der Bedarf um den Heizbedarf der Produktionshallen auf ca. 1.500

kWh/h an. Bis auf den Weihnachtsurlaub im Dezember 2012 zeichnet sich ein ähnliches Erdgasverbrauchsprofil über den gesamten Winter ab. Erst ab April reduzierte sich der durchschnittliche Energiebedarf an Erdgas wieder auf ca. 1.000 kWh/h. Die Großverbraucher des Erdgases sind die Pulverbeschichtungsanlagen und die Heizung. Während der Sommermonate besteht kein Heizbedarf, wodurch anzunehmen ist, dass die Pulverbeschichtungsanlagen einen durchschnittlichen Energiebedarf an Erdgas von 1.000 kWh/h haben. Folgerichtig wird, wie in Abbildung 15 gezeigt, der über die Wintermonate ansteigende Bedarf an Erdgas durch die Heizung verursacht. Durch Bereinigen der obigen Lastgangkurve des Erdgases um den für die Beschichtung benötigten Erdgasbedarf gelangt man zum Jahresheizbedarf des Werks 4, welcher in Unterkapitel 3.3.1 beschrieben wird.

3.2.5 Lastdauerkurve von Erdgas

Wie auch schon bei der elektrischen Energie lässt sich auch aus der Lastgangkurve von Erdgas eine Lastdauerkurve erzeugen. Diese weist einen der Elektrizität ähnlichen Verlauf auf und ist in der folgenden Abbildung dargestellt.

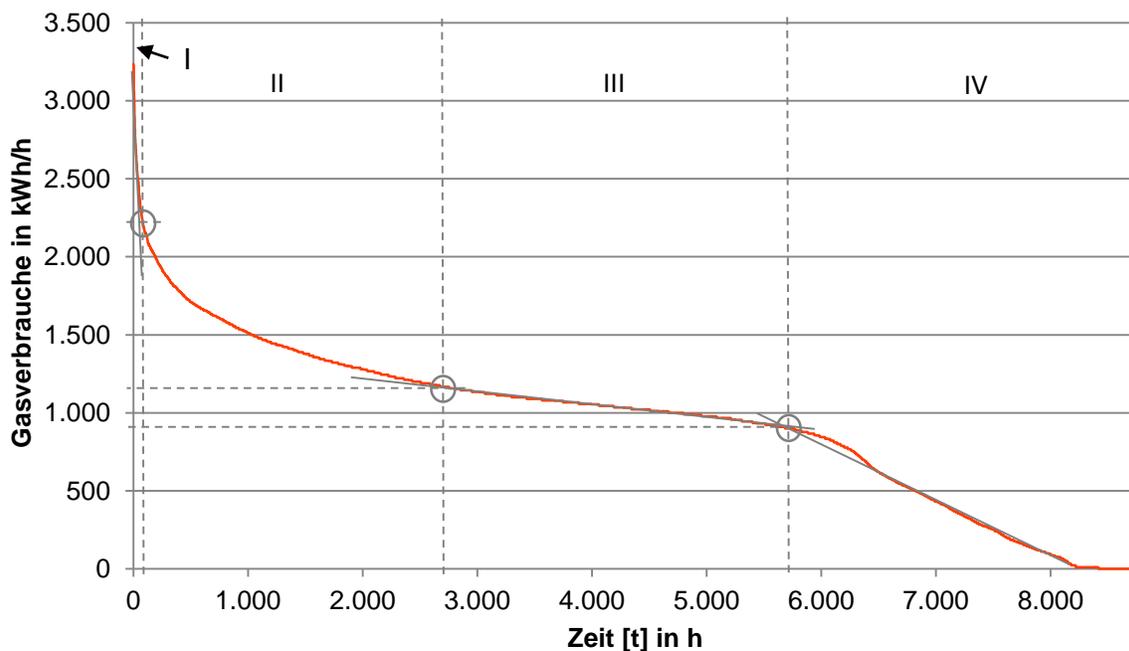


Abbildung 16: Lastdauerkurve des bezogenen Erdgases vom Werk 4

Die obige Lastdauerkurve des Erdgasverbrauches vom Werk 4 hat einen ähnlichen Verlauf wie die Lastdauerkurve der elektrischen Leistung. Durch eine Tangentenkonstruktion lässt sich auch diese in 4 Lastbereiche einteilen, welche der folgenden Tabelle zu entnehmen sind.

Bereich	Bezeichnung	Leistungsbereich	Stunden p.a.
I	Spitzenlast	$V_{EG} \geq 2100 \text{ kWh/h}$	100
II	Volllast	$1150 \text{ kWh/h} \leq V_{EG} < 2100 \text{ kWh/h}$	2550
III	Teillast	$900 \text{ kWh/h} \leq V_{EG} < 1150 \text{ kWh/h}$	3050
IV	Grundlast	$0 \text{ kWh/h} \leq V_{EG} < 900 \text{ kWh/h}$	3060

Tabelle 6: Lastbereiche der Lastdauerkurve von Erdgas

Man kann erkennen, dass über die max. Produktionszeit von 5640 Stunden pro Jahr mindestens 900kWh Erdgas pro Stunde benötigt wurde. Dies ist vor allem auf den konstanten Betrieb der Pulverbeschichtungsanlagen zurückzuführen. Außerdem ist zu erkennen, dass für ca. 500 Stunden pro Jahr kein Erdgas verbraucht wird.

3.3 Energieanalyse auf Gebäudeebene

Bei der Energieanalyse auf Gebäudeebene bzw. auf Versorgungsebene wird untersucht, wie viel von der bezogenen Nutzenergie von der technischen Gebäudeausrüstung (TGA) in Energiedienstleistungen oder andere Energieformen umgewandelt werden. Die technische Gebäudeausrüstung bzw. die Gebäudetechnik ist ein Teilgebiet der Versorgungstechnik, welche wie folgt definiert ist:

Unter Versorgungstechnik fasst man heute alle technischen Maßnahmen zusammen, die in Räumen und Gebäuden, aber auch Betriebsstätten und Einrichtungen, die keine Gebäude sind, der energetischen Versorgung (d.h. beispielsweise Beheizung und Beleuchtung) sowie der stofflichen Versorgung (Wasser, Luft) und der Entsorgung aller Abfallprodukte (Abwasser, Müll) dienen. (Wikimedia Foundation Inc., 2013)

Ohne die Ver- und Entsorgungssysteme der betrieblichen Infrastruktur ist der Transformationsprozess zur Erbringung von Hauptnutzungsanteilen nicht denkbar. Die Versorgungs- bzw. Infrastruktursysteme stellen vor allem technische Medien wie

Wasser, Strom, Erdgas, Wärme/Kälte, Druckluft, Kühlschmierstoffe, technische Gase usw. für die Produktion zur Verfügung. Die Anforderungen werden hauptsächlich von den Produktionssystemen vorgegeben. Daneben stellen die Produktionsumgebung und das Produkt selbst weitere Anforderungen, z.B. an Beleuchtung, Reinheit und Klima. (Fraunhofer, 2013)

Technischen Medien für die im Werk 4 eingesetzten Produktionsmaschinen sind:

- elektrischer Strom,
- Erdgas und
- Druckluft

Die vom Produktionssystem vorgegebenen Anforderungen werden durch die folgenden von der technischen Gebäudeausrüstung bereitgestellten Energiedienstleistungen erfüllt:

- Heizen,
- Kühlen,
- Licht,
- etc.

Die diesbezügliche Optimierung wird im Bereich der Versorgungssysteme nur an einzelnen Stellen oder Systemen betrieben. Eine vernetzte Sichtweise bezüglich der Versorgungssysteme existiert kaum. Alle Versorgungssysteme und -strukturen werden heute zum größten Teil unabhängig von anderen Versorgungs- oder Produktionssystemen projektiert. Um weitere Steigerungen der Energieeffizienz in diesem Bereich zu erzielen, muss ein systematischer Ansatz zur ganzheitlichen Planung und Optimierung der Versorgungssysteme und -strukturen entwickelt werden. Ziel dabei ist es, ein gesamtheitliches Optimum über die Nutzung von Synergien zu erreichen, um energieeffiziente Versorgungs- und Produktionsstrukturen in Fabriken aufzubauen. Die Steigerung der Energieeffizienz durch lokale Optimierungen einzelner Systeme und Strukturen weist bereits beachtliche Einsparpotentiale auf. Die vernetzte Analyse, Planung und Konzeption stellt den nächsten logischen Schritt dar. (Fraunhofer, 2013)

Mit der folgenden Ist-Analyse soll der Grundstein für eine vernetzte Analyse der Energieaufteilung und -umwandlung auf der Versorgungsebene gelegt werden. Im Folgenden wird aus energetischen Gründen zwischen der technischen Gebäudeausrüstung in Alt- und Neubau unterschieden und diese anhand des Verbrauchs der jeweiligen Energieformen und -dienstleistungen untersucht.

3.3.1 Heizbedarf im Werk 4

Wie schon erwähnt, wird die Heizung des Alt- und Neubaus mit Erdgas betrieben. Alternativ dazu wäre auch ein Betrieb mit Heizöl möglich. Die folgende Abbildung 17 zeigt den Heizbedarf im Geschäftsjahr 2012/2013 von Alt- und Neubau, sowie den Verlauf der Jahresaußentemperatur des Standorts des Werks 4 in Bregenz.

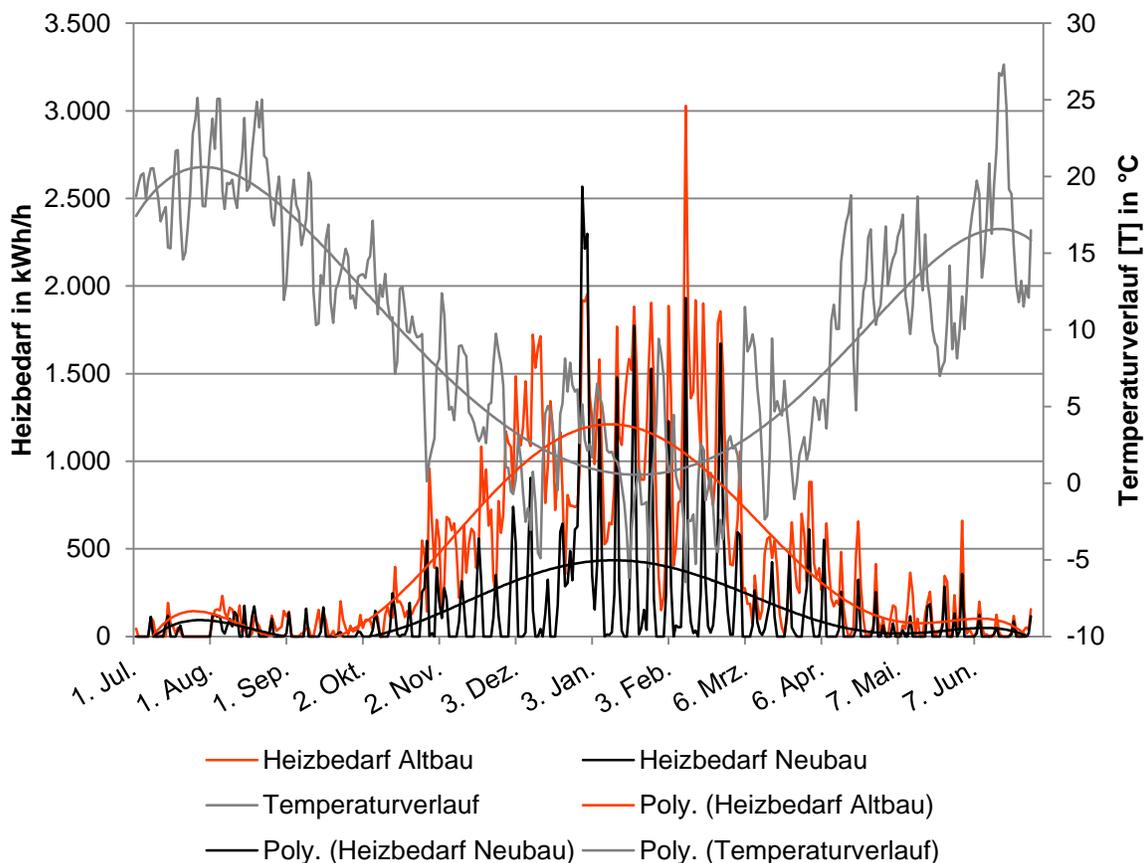


Abbildung 17: Heizbedarf im Werk 4 und Jahrestemperaturverlauf

Hier ist zu erkennen, dass der erhöhte Gasbedarf, welcher in Abbildung 15 gegen Ende Oktober 2012 verzeichnet wurde, auf den Heizbedarf zurückzuführen ist. Ende Oktober 2012 war das erste Mal ein Temperatursturz auf ca. 0°C zu verzeichnen, weshalb in Abbildung 17 ein Anstieg des Heizbedarfes von Alt- und Neubau zu erkennen ist. Außerdem wird deutlich, dass der Heizbedarf im Altbau (orange Kurve) größer ist als der im Neubau (schwarze Kurve). Beim Vergleich des zu beheizenden Raumvolumens vom Alt- und Neubau, wäre ein wesentlich höherer Heizbedarf im Neubau zu erwarten. Aufgrund des unterschiedlichen Alters der beiden Gebäude und dem damit einhergehenden technischen Stand der Gebäudehülle wird der Verlauf der Heizbedarfskurven aber verständlich. Der Altbau stammt aus den 70er Jahren und der Neubau wurde in mehreren Bauetappen in den Jahren 1999 bis 2001 gebaut. Dadurch besitzt der Neubau eine sehr viel modernere Gebäudehülle, was dessen Heiz- bzw. Kühlbedarf entscheidend beeinflusst. Zusätzlich besitzt der Neubau über ein Niedrigtemperatur-Wärmerückgewinnungssystem, in welches ein Großteil der Betriebsmittel eingebunden ist. Dieses ermöglicht es, die an den Maschinen entstehende Abwärme für Heizzwecke zu nutzen, oder diese gezielt abzuführen. Der Kühlbedarf im Werk 4 wird im folgenden Unterkapitel analysiert.

3.3.2 Kühlbedarf im Werk 4

Der Kühlbedarf ergibt sich aus der dem Alt- und Neubau zur Einhaltung der vorgegebenen Raumtemperatur zu entziehenden Wärmemenge. Diese Wärmemenge entsteht zum größten Teil aufgrund der Abwärme der Produktionsanlagen. Mit Hilfe von Klimageräten, Lüftungsgeräten und der Grundwasserkühlung wird die überflüssige Wärmemenge abgeführt. Diese Geräte werden unter dem Begriff der Haustechnik zusammengefasst und benötigen, je nach geforderter Kühlleistung, mehr oder weniger elektrischen Leistung. Die für Kühlzwecke im Neubau eingesetzte elektrische Energie wird in der folgenden Abbildung 18 durch die orange Kurve beschrieben. Die schwarze Kurve zeigt, wie auch in Abbildung 17, den zum Heizen des Neubaus benötigten Erdgasbedarf im GJ2012/13.

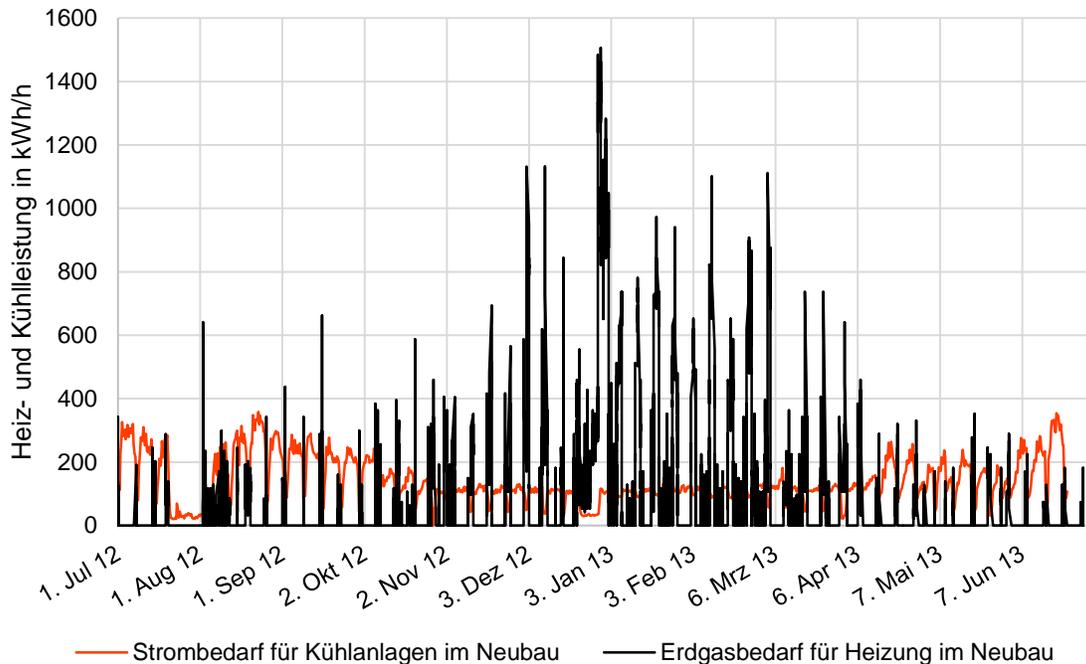


Abbildung 18: Heiz- und Kühlleistung im Neubau

Zu sehen ist, dass im Sommer ein erhöhter Kühlbedarf besteht, jedoch ist auch über die Wintermonate eine mittlere Kühlleistung von ca. 100 kW zu verzeichnen. Der Kühlbedarf während der Wintermonate ist hauptsächlich auf die von den Betriebsmitteln verursachte Abwärme zurückzuführen. Während des Betriebs- und Weihnachtsurlaubes liegt die Kühlleistung bei ca. 35 kW.

Berücksichtigt man nun, dass eine Kilowattstunde Elektrizität ca. 0,09 Euro und diejenige von Erdgas nur 0,035 Euro kostet, so wird deutlich, dass die Energiedienstleistung „Kühlen“ wesentlich teurer als die des „Heizen“ ist. Diese Tatsache wird jedoch sehr stark von der Effizienz des jeweiligen Kühlprinzips beeinflusst. Für die Abfuhr überschüssiger Wärme im Werk 4 werden Trockenrückkühler, Kühltürme und eine Grundwasserkühlung eingesetzt, welche über elektrische Pumpen und Motoren betrieben werden. Somit variieren die Kosten für die Energiedienstleistung „Kühlen“, abhängig vom Kühlbedarf und der Effizienz der unterschiedlichen Systeme, mehr oder weniger stark.

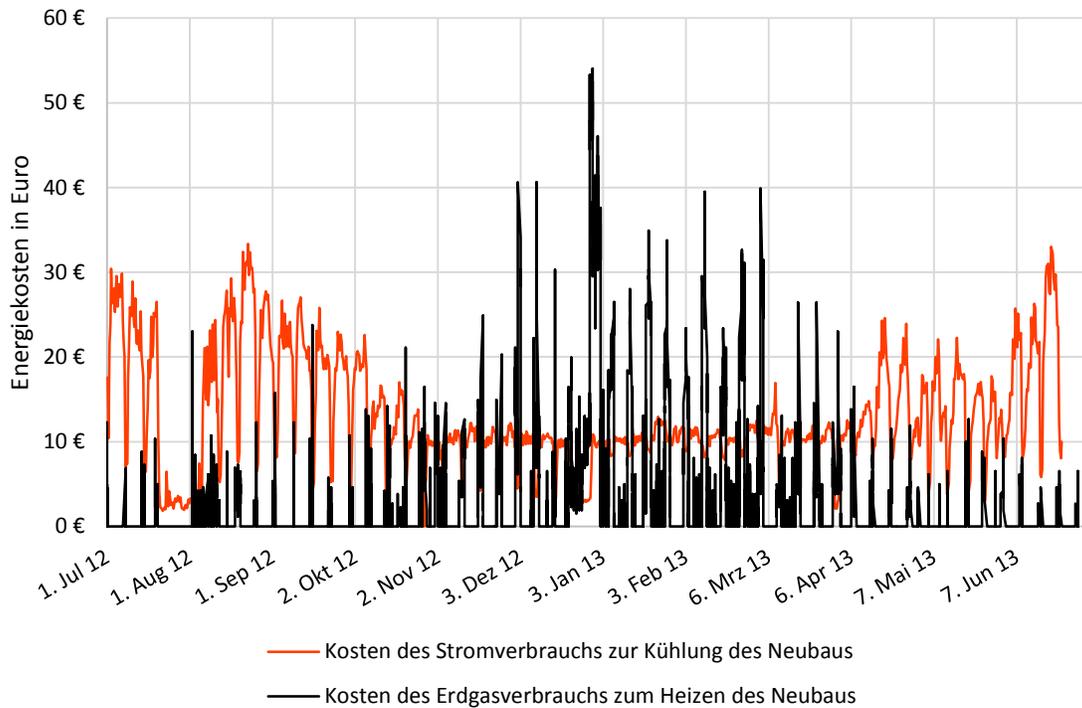


Abbildung 19: Kosten für Heizen und Kühlen im Neubau

Da es für den Altbau keine elektrische Leistungserfassung der Haustechnik gibt, kann der Kühlbedarf für diesen nicht erfasst werden. Durch die alte Gebäudehülle und durch den Betrieb der Pulverbeschichtungsanlagen im Altbau ist aber davon auszugehen, dass der Kühlbedarf für diesen um einiges größer ist als im Neubau. Für den Altbau wird ein ähnlicher Verlauf von Heiz- und Kühlbedarf erwartet, wie sie in Abbildung 17 für den Neubau beschrieben wurde.

Eine Abschätzung des Kühlbedarfes des Altbaus wird somit über das Verhältnis des Heizbedarfes zwischen Alt- und Neubau gebildet. Im Geschäftsjahr 2012/13 lag der Heizbedarf im Altbau mit 1.644.859 kWh_{Gas} um 2,95-mal höher als im Neubau, bei welchem der Heizbedarf bei 556.851 kWh_{Gas} lag. Multipliziert man die den Kühlbedarf des Neubaus mit diesem Verhältnis, so ergibt sich ein theoretischer Kühlbedarf des Altbaus von 3.504.306 kWh_{Strom}. Folgende Tabelle beschreibt die Ermittlung des Kühlbedarfes des Altbaus.

Heizbedarf Altbau	1.644.859 kWh _{Gas}
Heizbedarf Neubau	556.851 kWh _{Gas}
Verhältnis Heizbedarf	2,95
Kühlbedarf Neubau	1.186.349 kWh _{Strom}
Kühlbedarf Altbau	3.504.306 kWh _{Strom}

Tabelle 7: Hochrechnung des Kühlbedarfes für den Altbau

Neben dem Heizungs- und Kühlbedarf wird auch für die Beleuchtung sehr viel Energie aufgewendet, dies im Folgenden untersucht wird.

3.3.3 Beleuchtungsbedarf im Werk 4

Es gibt unterschiedliche Beleuchtungsanforderungen für Räume (Bereiche), Aufgaben und Tätigkeiten. Die Energieanalyse auf der Versorgungsebene beschäftigt sich jedoch nur damit, wie viel elektrische Energie für Beleuchtungszwecke im Allgemeinen aufgewendet worden ist. Die folgende Abbildung 20 zeigt den Verlauf des elektrischen Stromverbrauchs für die Beleuchtung im Neubau.

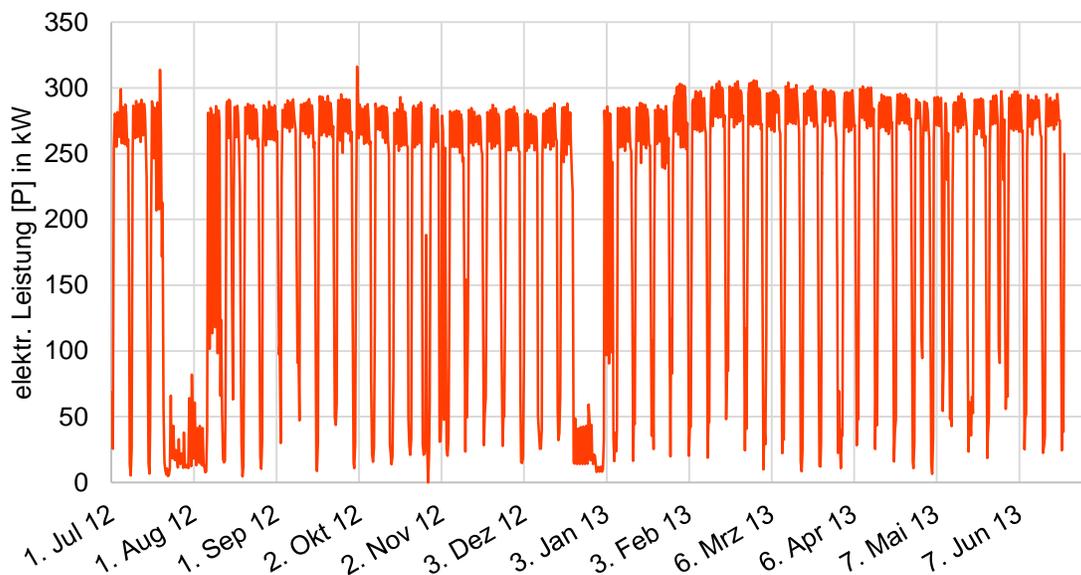


Abbildung 20: Stromverbrauch für Beleuchtung im Neubau

Grundsätzlich zählt die Beleuchtung zu den konstanten Energieverbrauchern. Die während den Produktionszeiten bezogene elektrische Leistung für die Beleuchtung des Neubaus liegt bei durchschnittlich 275 kW. Im Betriebs- und Weihnachtsurlaub

sowie an den Wochenenden ist ein starker Abfall der elektr. Leistung auf durchschnittlich 25 kW zu verzeichnen.

Die Darstellung eines solchen elektrischen Leistungsverlaufs für die Beleuchtung ist aus messtechnischen Gründen für den Altbau nicht möglich. Um eine Abschätzung des Beleuchtungsbedarfes für den Altbau machen zu können, wird der Beleuchtungsbedarf des Neubaus mittels der installierten Beleuchtungsleistung im Altbau auf diesen umgelegt. Aus der folgenden Inventarliste geht hervor, wie viel Leuchten mit welcher Leistung in welcher Bauetappe (BE) installiert sind. Somit ist eine Trennung zwischen Altbau (1. – 7. BE) und Neubau (8. – 12. BE) möglich, wobei die 12. Bauetappe in der folgenden Liste noch nicht berücksichtigt ist. Dadurch dass es sich hierbei nur um einen kleineren Bürotrakt handelt, ist mit keinem großen Fehler zu rechnen. Folgende Abbildung 21 Abbildung zeigt die Inventarliste der Beleuchtung im Werk 4.

1. BE					
W	W	W	W	W	W
58	36	18	49	14	
STK	STK	STK	STK	STK	STK
613	30	29	428	36	
35554	1080	522	20972	504	

5. BE					
W	W	W	W	W	W
58	36	18	35	54	11
STK	STK	STK	STK	STK	STK
852	146	0	12	12	13
49416	5256	0	420	648	143

8. BE							
W	W	W	W	W	W	W	W
58	36	18	250	32	26	18	11
STK	STK	STK	STK	STK	STK	STK	STK
829	203	0	24	172	52	56	33
48082	7308	0	6000	5504	1352	1008	363

2. BE					
W	W	W	W	W	W
58	36	18	49	100	
STK	STK	STK	STK	STK	STK
76	3	6	244	4	
4408	108	108	11956	400	

6. BE					
W	W	W	W	W	W
58	36	18	54	250	11
STK	STK	STK	STK	STK	STK
48	2	0	130	76	2
2784	72	0	7020	19000	22

9. BE							
W	W	W	W	W	W	W	W
58	36	18	32				
590	146	0	192				
34220	5256	0	6144				

3. BE						
W	W	W	W	W	W	W
58	36	18	250	80	49	
STK	STK	STK	STK	STK	STK	STK
284	33	0	15	15	262	
16472	1188	0	3750	1200	12838	

7. BE					
W	W	W	W	W	W
58	36	18	250	11	
STK	STK	STK	STK	STK	STK
902	15	12	70	14	
52316	540	216	17500	154	

10. BE						
W	W	W	W	W	W	W
58	36	18	26	32	13	
STK	STK	STK	STK	STK	STK	STK
2275	57	0	46	110	66	
131950	2052	0	1196	3520	858	

4. BE				
W	W	W	W	W
58	36	18	49	
STK	STK	STK	STK	STK
323	7	0	382	
18734	252	0	18718	

11. BE					
W	W	W	W	W	W
58	36	18	35		
STK	STK	STK	STK	STK	STK
1185	1	0	56		
68730	36	0	1960		

Altbau	269.557	W
Neubau	325.539	W
Werk 4	595.096	W

Abbildung 21: Inventarliste der Beleuchtung im Werk 4

Für den Altbau ergibt sich eine kumulierte Beleuchtungsleistung von fast 270 kW und für den Neubau ca. 325 kW. Die für die Beleuchtung des Neubaus benötigte elektrische Energie belief sich im GJ2012/13 auf 1.814.772 kWh. Dividiert man diese Energiemenge durch die im Neubau installierte Beleuchtungsleistung, so ergeben sich die theoretischen Volllaststunden der Beleuchtung im Neubau. Wie in Abbildung 20 zu sehen ist, ist die Beleuchtung im Neubau stark von den Produktionszeiten abhängig. Selbiges wird auch für die Beleuchtung im Altbau angenommen, wodurch weiter angenommen werden kann, dass die Beleuchtung von Alt- und Neubau gleich viele Volllaststunden benötigt. Multipliziert man somit die 5.575 Volllaststunden mit der kumulierten Beleuchtungsleistung des Altbaus von 325.529 Watt, so erhält man den gesamten Strombedarf für die Beleuchtung des Altbaus für das GJ2012/13. In der anschließenden Tabelle sind die Ergebnisse für die Hochrechnung des Beleuchtungsbedarfs für den Altbau zusammengefasst.

Gemessener Beleuchtungsbedarf Neubau	1.814.772 kWh
Installierte Leuchtenleistung Neubau	326 kW
Theoretische Volllaststunden der Beleuchtung im Neubau	5.575 h
Installierte Leuchtenleistung Altbau	270 kW
Beleuchtungsbedarf Altbau	1.502.691 kWh

Tabelle 8: Hochrechnung des Beleuchtungsbedarfs für den Altbau

Die Umlegung des Beleuchtungsbedarfes des Neubaus über die Volllaststunden der installierten Beleuchtungsleistung ergibt für den Altbau einen Beleuchtungsbedarf von 1.502.691 kWh.

3.3.4 Druckluftbedarf im Werk 4

Neben Heizbedarf, Kühlbedarf und Beleuchtungsbedarf besteht im Werk 4 auch ein großer Bedarf an Druckluft. In sehr vielen Betriebsmitteln ist eine Vielzahl an Druckluftanwendungen wie beispielsweise Druckluftzylinder verbaut. Besonders die Montageautomaten sind mit einer Vielzahl an Druckluftzylindern ausgestattet, weshalb diese einen sehr großen Druckluftbedarf haben. Für die Druckluftherzeugung werden in Alt- und im Neubau Schraubenkompressoren eingesetzt. Die folgende Abbildung zeigt den Verlauf der elektrischen Leistungskurve der Kompressoren im Neubau über das Geschäftsjahr 2012/13.

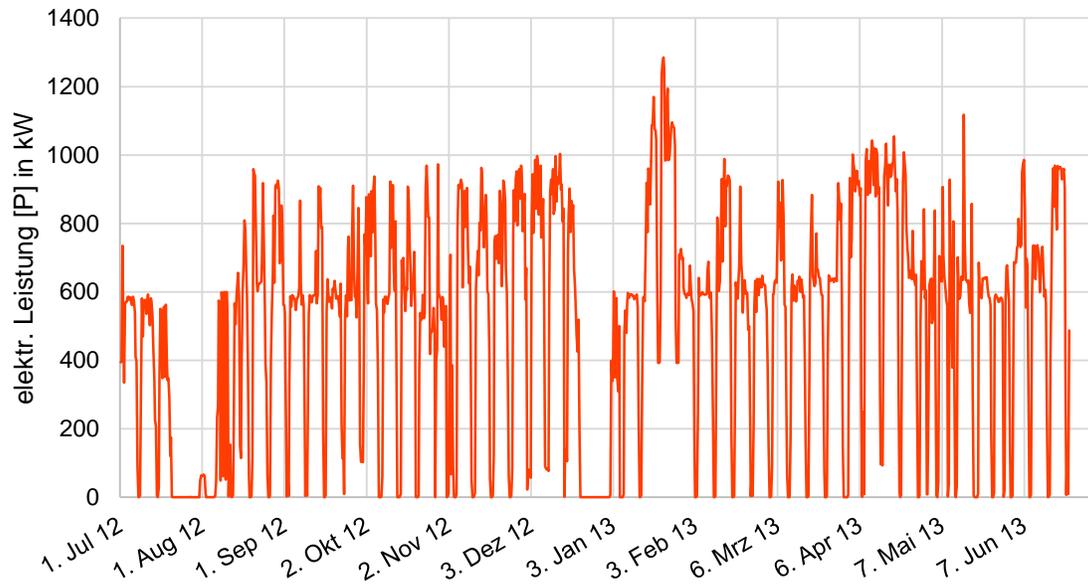


Abbildung 22: Strombedarf der Kompressoren im Neubau

Für die Druckluftherzeugung im Neubau wurden im Geschäftsjahr 2012/13 insgesamt 4.327.261 kWh_{Strom} für die Verdichtung von 40.290.970 m³_{DL} Luft auf einen Druck von 8 bar aufgewendet. Daraus ergibt sich eine mittlere Energieintensität von 0,10740 kWh_{Strom}/m³_{DL} bzw. eine mittlere spezifische Leistung P_{spez} von 0,00179 kW/m³/min für diese Kompressoren.

Im Vergleich zum Neubau ist im Altbau keine bedarfsbezogene elektrische Leistungsüberwachung der Kompressoren möglich, weshalb sich der elektrische Leistungsbedarf der Kompressoren im Altbau nicht aufzeichnen lässt. Diese verfügen aber über eine an die Hausleittechnik angeschlossene Steuerung, aus welcher die charakteristischen Betriebsparameter ausgelesen werden können. Diese können aus der folgenden Tabelle für jeden einzelnen der vier Kompressoren im Altbau separat entnommen werden.

	Kompressor 1	Kompressor 2	Kompressor 3	Kompressor 4
Kompressor-Typ	DC515	ZR4-2	ZR3-1	ZR4-3
Förderleistung	42 m ³ /min	25 m ³ /min	19 m ³ /min	58 m ³ /min
Leistung Leerlauf	51 kW	25 kW	24 kW	62 kW
Leistung Lastbetrieb	273 kW	162 kW	119 kW	372 kW
Laufzeit Gesamt	3.934 h	2.776 h	1.686 h	6.698 h
Laufzeit Lastbetrieb	3.600 h	1.252 h	663 h	6.411 h

Tabelle 9: Charakteristische Betriebsparameter der Kompressoren im Altbau

Aus diesen Betriebsparametern lassen sich die Verbrauchswerte des jeweiligen Kompressors für das Geschäftsjahr 2012/13 rückwirkend hochrechnen. Die folgende Tabelle 10 fasst die Ergebnisse dieser Berechnung zusammen.

	Kompressor 1	Kompressor 2	Kompressor 3	Kompressor 4
Kompressor-Typ	DC515	ZR4-2	ZR3-1	ZR4-3
Förderleistung / Jahr	9.169.200 m ³	1.878.000 m ³	739.908 m ³	22.310.280 m ³
Energie Leerlauf	17.034 kWh	38.100 kWh	24.552 kWh	17.794 kWh
Energie Lastbetrieb	799.200 kWh	202.824 kWh	78.897 kWh	2.384.892 kWh
SUMME Energie	816.234 kWh	240.924 kWh	103.449 kWh	2.402.686 kWh

Tabelle 10: Hochrechnung der Verbrauchswerte der Kompressoren im Altbau

Dividiert man die Gesamtenergie aller Kompressoren durch die Summe der verdichteten Kubikmeter, so erhält man eine mittlere Energieintensität aller im Altbau arbeitenden Kompressoren von 0,10450 kWh_{Strom}/m³_{DL} bzw. einer mittleren spezifischen Leistung von 0,00174 kW/m³/min.

Die Druckluftnetze von Alt- und Neubau sind über eine Druckausgleichsleitung miteinander verbunden. Die soeben ermittelten Leistungswerte der Kompressoren für beide Produktionshallen dürfen somit gemittelt werden. Der folgenden Tabelle sind die betriebsabhängigen Leistungswerte der Kompressoren von Alt- und Neubau, sowie deren Mittelwerte zu entnehmen.

	mittlere Energieintensität	mittleren spezifischen Leistung
Kompressoren Altbau	0,10450 kWh/m ³	0,00174 kW/m ³ /min
Kompressoren Neubau	0,10740 kWh/m ³	0,00179 kW/m ³ /min
Mittelwert	0,10595 kWh/m³	0,00177 kW/m³/min

Tabelle 11: Leistungswerte der Kompressoren von Alt- und Neubau

3.3.5 Wärmerückgewinnung im Werk 4

Im Werk 4 gibt es zwei Wärmerückgewinnungssysteme mit unterschiedlichen Temperaturniveaus, mit welchen die Wärmeenergie im Werk verteilt wird und die über Sensoren der Hausleittechnik überwacht werden. Im Alt- und im Neubau gibt es sowohl ein Hochtemperatur-Wärmerückgewinnungssystem (HT-WRG) mit dem Temperaturniveau 60/40°C als auch ein Niedrigtemperatur-Wärmerückgewinnungssystem (NT-WRG) mit dem Temperaturniveau 40/30°C. Die

Heizungssysteme von Alt- und Neubau sind nicht miteinander verbunden, wodurch kein Austausch von Wärmeenergie zwischen Alt- und Neubau möglich ist.

Das HT-WRG versorgt vorwiegend Lüftungsanlagen und Brauchwarmwasserboiler sowie die Vorbehandlungsbäder der Pulverbeschichtungsanlagen im Altbau. Mit dem NT-WRG werden primär Lüftungsanlagen versorgt, welche auf die geringere Vorlauftemperatur ausgelegt sind. Die Systeme sind jeweils so nacheinander geschaltet, dass die Restwärme vom HT-WRG durch das NT-WRG genutzt werden kann. Wenn die Druckluftkompressoren in Betrieb sind, wird das System 60/40°C in Alt- und Neubau zur Kühlung der Druckluftkompressoren verwendet, um das bis auf 70°C erwärmte Wasser des Kühlkreislaufes der Kompressoren zu kühlen. Aufgrund der sehr konstant verlaufenden Produktion und dem sich daraus ergebenden konstanten Druckluftbedarf, können die Bäder das ganze Jahr über mit Hilfe der Wärme aus dem HT-WRG des Altbaus beheizt werden. Das NT-WRG im Neubau kann zusätzlich mit zurückgewonnener Energie aus dem Kühlsystem der Betriebsmittel versorgt werden. Nur wenn der Wärmebedarf nicht von der WRG abgedeckt werden kann, kommen zusätzliche Heizkessel zum Einsatz, welche mit Erdgas und Heizöl betrieben werden. Diejenige Wärmeenergie, die von den Beschichtungsanlagen und von den haustechnischen Anlagen nicht genutzt werden kann, weil der Bedarf geringer ist als das nutzbare Potenzial, wird durch Trockenrückkühler, Kühltürme und eine Grundwasserkühlung an die Umwelt abgegeben.

Die folgende Abbildung zeigt die Wärmerückgewinnungskurven des HT- und NT-WRG-Systems des Neubaus sowie des HT-WRG-System des Altbaus für das Geschäftsjahr 2012/13. Auf die Wärmerückgewinnungskurve des NT-WRG-Systems muss in der folgenden Abbildung verzichtet werden, da keine Messwerte vorhanden sind.

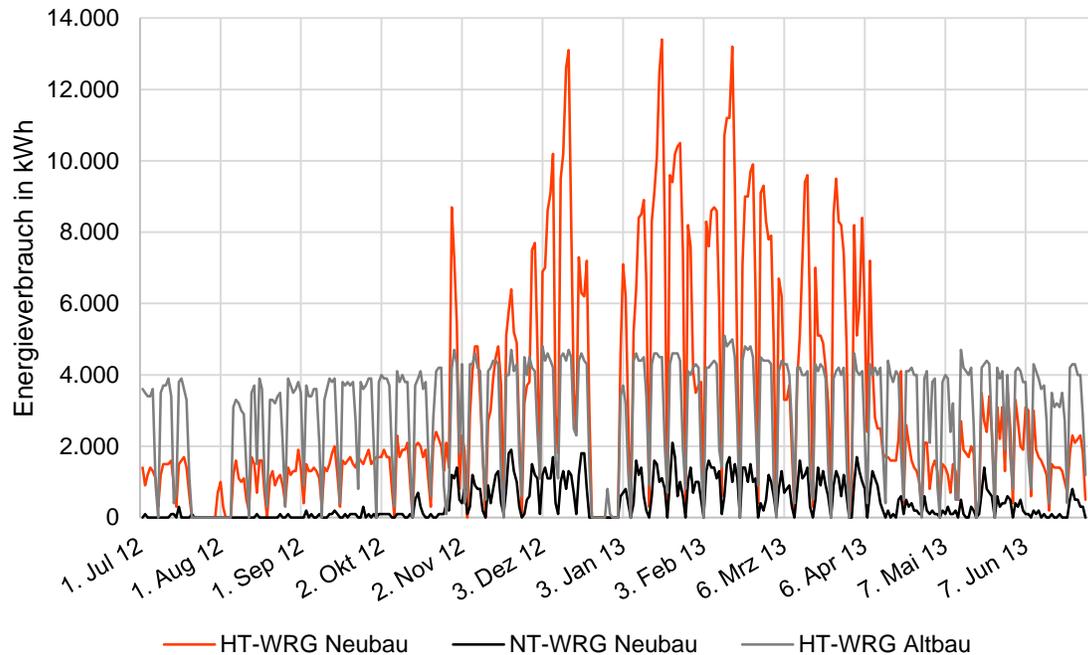


Abbildung 23: Wärmerückgewinnung im Werk 4

3.3.6 Energieflussdiagramm der Gebäudeebene

Im Energieflussdiagramm der Versorgungsebene werden die Bedarfsanalysen der vorherigen Kapitel zusammengefasst und dargestellt. Die technische Gebäudeausrüstung (TGA) von Alt- und Neubau beinhaltet dabei die Energieumwandlungsanlagen wie Heizung, Lüftungs- und Klimageräte, Beleuchtung, Kompressoren und Wärmerückgewinnungsanlagen.

Diese Energieumwandlungsanlagen werden entweder mit elektrischem Strom oder mit Erdgas betrieben und erzeugen verschiedene Energiedienstleistungen wie beispielsweise Heizen, Kühlen oder Licht bzw. wandeln die bezogene Nutzenergie in andere Energieformen um. Dies passiert beispielsweise durch die Kompressoren, welcher die elektrische Energie in pneumatische Energie (Druckluft) umwandeln.

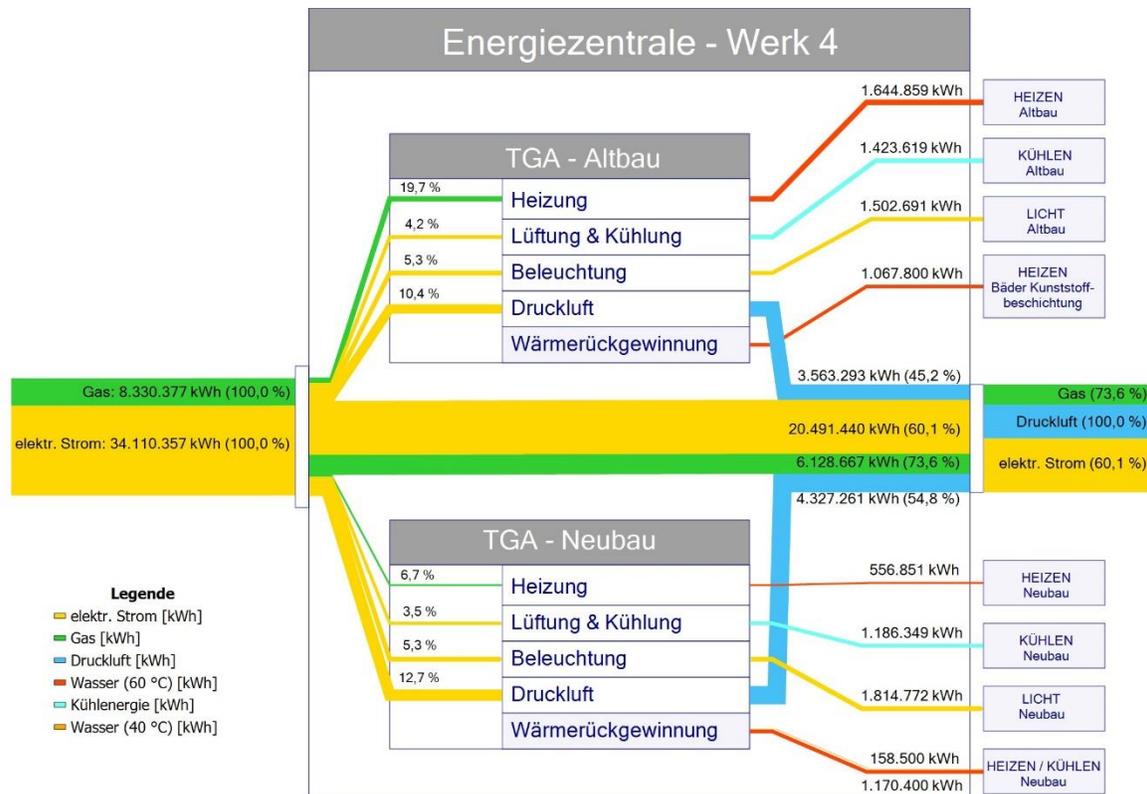


Abbildung 24: Energieflussdiagramm auf Gebäudeebene

Der Anteil des von den Energieversorgungsunternehmen bezogenen elektrischen Stromes und des Erdgases, welcher nicht in der technischen Gebäudeausrüstung (TGA) in andere Energieformen bzw. Energiedienstleistungen umgewandelt wird, wird für den Betrieb der in den einzelnen Werksbereichen stehenden Betriebsmittel benötigt. Im folgenden Kapitel 4 werden die Energieflüsse von elektrischem Strom, Druckluft und Erdgas, welche die Energiezentrale verlassen, weiter auf die einzelnen Werksbereiche aufzuteilen. Aus der energetischen Analyse mittels Top-Down-Ansatz ergeben sich erste Einsparpotentiale, welche am Beispiel einer Optimierung der Grund- und Spitzenlast vom Werk 4 im Kapitel 5 gezeigt werden.

4 Energieanalyse mittels Bottom-Up-Ansatz

Wie schon im Kapitel 1.3: Methodik erwähnt, lassen die installierten Energiemesspunkte lediglich eine Analyse der Energieaufteilung bis zur Gebäudeebene, wie in Abbildung 24 dargestellt, zu. Eine weitere Verästelung des Energieflusses auf der Bereichsebene ist im Werk 4 mit Hilfe der installierten Energiemesspunkte nicht möglich.

Die Energieanalyse auf der Maschinenebene verfolgt das Ziel, die Energieaufteilung für den Werksbereich der Produktion mit Hilfe eines Bottom-Up-Ansatzes zu ermitteln. Dabei wird über eine energetische Analyse der einzelnen Betriebsmittel der Energieverbrauch je Betriebsmittel ermittelt. Anschließend können die Energieverbräuche von den zu einer Produktionstechnologie gehörenden Betriebsmitteln zum Energieverbrauch je Produktionstechnologie zusammengefasst werden.

Für den Betrieb der im Werk 4 eingesetzten Betriebsmittel werden die Energieträger elektrischer Strom, Druckluft und Erdgas benötigt. Die Menge jeder dieser Energieformen pro Zeit, also die Leistungen dieser Energieformen, ändern sich mit der Art der Betriebsmittelnutzung. Betriebsmittel benötigen erwartungsgemäß im Produktionszustand mehr Leistung als im Wartezustand oder im Rüstzustand. Diese unterschiedlichen Zustände werden als Betriebsmittelzustände bezeichnet und bilden die Grundlage für eine im Sinne eines Leitfadens einheitliche Vorgehensweise. Für diese Arbeit werden die folgenden 5 allgemein gültigen Betriebsmittelzustände (BMZ) definiert:

BMZ-Nr.	Bezeichnung	Eigenschaft
BMZ1	Produktionszustand	Betriebsmittel ein und produziert
BMZ2	Wartezustand	Betriebsmittel ein und produktionsbereit
BMZ3	Rüstzustand	Betriebsmittel ein und nicht produktionsbereit
BMZ4	Ruhezustand 1	Maschinensteuerung aus, Wartungseinheit offen
BMZ5	Ruhezustand 2	Maschinensteuerung aus, Wartungseinheit zu

Tabelle 12: Definition der fünf Betriebsmittelzustände

Im Betriebsmittelzustand 1 befindet sich die jeweilige Maschine, wie auch die Bezeichnung verrät, im Zustand der Produktion. Kommt es in diesem Zustand zu einer Störung, wird der Produktionsprozess unterbrochen und die Maschine verfällt in den Wartezustand (BMZ2). Alle elektrischen Antriebe befinden sich in Regelung und alle druckabhängigen Aggregate und Komponenten auf Betriebsdruck, wodurch die Maschine sich im betriebsbereiten Zustand befindet. Nach einer von der jeweiligen Technologie abhängigen Zeit werden die Drücke automatisch reduziert, wodurch sich die Leistungsaufnahme des Betriebsmittels verringert und dieses in den Rüstzustand (BMZ3) wechselt. Wird die Maschine an der Maschinensteuerung abgemeldet und abgeschaltet, befindet sich diese entweder im Betriebsmittelzustand 4 oder 5. Dies ist abhängig davon, ob die jeweilige Maschine eine Wartungseinheit mit oder ohne Magnetventil besitzt. Bei Anlagen, die über eine Wartungseinheit mit Magnetventil verfügen, kappt dieses beim Abschalten der Maschine über die Maschinensteuerung die Druckluftversorgung der Maschine. Bei Maschinen, die nicht über eine mit einem Magnetventil ausgestattete Wartungseinheit verfügen, wird im Betriebsmittelzustand 4 Druckluft zur Kompensation der sich im Druckluftnetz der Maschinen befindlichen Leckagen benötigt. Werden diese Wartungseinheiten von Hand zugedreht, wird die Druckluftversorgung der Maschine ebenfalls unterbunden und die Maschine befindet sich im Betriebsmittelzustand 5 bzw. Ruhezustand 2. Dieser unterscheidet sich somit lediglich durch den Druckluftbedarf vom Betriebsmittelzustand 4 bzw. dem Ruhezustand 1.

Für die energetische Analyse wurden, abhängig von den untersuchten Betriebsmitteln, die folgenden Verbrauchs- und Leistungswerte für jeden dieser fünf Betriebsmittelzustände gemessen:

- Elektrische Wirkleistung [P] in kW
- Volumenstrom an Druckluft [V_{DL}] in m³/h
- Volumenstrom an Erdgas [V_{EG}] in m³/h

Die Betriebsmittel der Produktionstechnologien Pressen, Profilieren und Kunststoffbeschichten wurden aufgrund ihrer niedrigen Anzahl messtechnisch

komplett erfasst. Für die Betriebsmittel der Montage soll der gemessene Energieverbrauch einiger Betriebsmittel als Basis für ein Regressionsmodell dienen, mit Hilfe dessen der Verbrauch auf alle restlichen Betriebsmittel umgelegt wird. Ausgangspunkt dieses Vorhabens ist die Definition der Energie selbst, welche wie folgt lautet:

$$\text{Energie [E]} = \text{Leistung [P]} * \text{Zeit [t]}$$

Durch die Anbindung von nahezu jedem Betriebsmittel des Werks 4 an das Betriebsdatenkommunikationssystem (BDK-System) kann die Dauer eines jeden Betriebsmittelzustandes erfasst werden. Dies erfolgt durch eine Verdichtung der 30 für alle Produktionstechnologien geltenden und somit allgemeingültigen Stillstandsgründe aus dem BDK-System auf die Betriebsmittelzustände „Produktionszustand (BMZ1)“, „Wartezustand (BMZ2)“ und „Rüszustand (BMZ3)“. Wichtig dabei ist es zu erwähnen, dass unter dem Begriff Stillstandsgründe alle Maschinezustände und somit auch der Produktionszustand (BMZ1) zusammengefasst werden. Als Synonym für die Stillstandsgründe wäre der Begriff Maschinezustände angebracht, wobei dies in der Praxis so nicht angewandt wird.

In Abhängigkeit der jeweiligen Produktionstechnologie kann somit bestimmt werden, welches Betriebsmittel wie viele Stunden im Betriebsmittelzustand BMZ1, BMZ2 oder BMZ3 in einem beliebigen Betrachtungszeitraum verbracht hat. Die Betriebsmittelzustände „Ruhezustand 1 (BMZ4)“ und „Ruhezustand 2 (BMZ5)“ ergeben sich aus den Jahresstunden (insgesamt 8760h) abzüglich der Summe der Stunden, in welchen das jeweilige Betriebsmittel im BDK-System angemeldet war. Dies ist somit diejenige Zeit, in der das Betriebsmittel nicht am BDK-System angemeldet war. Diese Zeit wird in dieser Arbeit zu je 50% auf den Ruhezustand 1 (BMZ4) und den Ruhezustand 2 (BMZ5) aufgeteilt, da angenommen wird, dass die Wartungseinheiten zu 50% nach dem Abschalten der Maschinen manuell zuge dreht werden. Der Betriebsmittzustand 4 soll die Zeit der Betriebsmittel darstellen, in der diese nicht richtig abgeschaltet wurden und einen unnötig erhöhten Druckluftverbrauch aufgrund von Leckagen aufweisen. Der Betriebsmittelzustand 5

unterscheidet sich vom Betriebsmittelzustand 4 dadurch, dass die Wartungseinheit der Maschinen geschlossen ist und der Druckluftverbrauch somit gleich Null ist.

Durch die Kenntnis der Dauer eines jeden der fünf Betriebsmittelzustände pro Betriebsmittel und dem Wissen über den Leistungsbezug der Betriebsmittel in jedem der fünf Betriebsmittelzustände kann der Energieverbrauch je Betriebsmittelzustand (E_{BMZ}) folgendermaßen berechnet werden.

$$E_{BMZ_i} = P_i * t_i \quad (7)$$

Anschließend kann der Gesamtenergieverbrauch je Betriebsmittel (E_{BM}) über den Energieverbrauch je Betriebsmittelzustand (E_{BMZ}) folgendermaßen ermittelt werden:

$$E_{BM} = \sum_{i=1}^5 E_{BMZ_i} = E_{BMZ_1} + E_{BMZ_2} + E_{BMZ_3} + E_{BMZ_4} + E_{BMZ_5} \quad (8)$$

Die Summe des Energieverbrauchs aller Betriebsmittelzustände, ergibt den Gesamtenergieverbrauch je Betriebsmittel (E_{BM}). In Folge können alle zu einer Produktionstechnologie gehörenden Betriebsmittel zusammengefasst werden, wodurch der Energieverbrauch je Produktionstechnologie (E_{PT}) bestimmt wird.

$$E_{PT} = \sum_{i=1}^n E_{BM} \quad (9)$$

Die Bestimmung des Gesamtenergieverbrauches aller Pressen-, Profilier-, Montage und Pulverbeschichtungsanlagen ermöglicht somit die Aufteilung des Energieflusses auf die Produktionstechnologien

- Pressen,
- Profilieren,
- Montage und
- Kunststoffbeschichtung.

In den folgenden zwei Unterkapiteln wird auf die technologieabhängige Verdichtung der 30 allgemeingültigen Stillstandszeiten und das Erfassen der für das Regressionsmodell benötigten Leistungszustände der energetisch analysierten Betriebsmittel, aufgeteilt nach Produktionstechnologien, eingegangen.

4.1 Stillstandszeitverdichtung auf Betriebsmittelzustände

Die Verdichtung der Stillstandszeiten durch Verdichtung der Stillstandsgründe, ist eine der wesentlichen Ergebnisse dieser Arbeit. Die 30 allgemeingültigen Stillstandsgründe des Betriebsdatenkommunikationssystems (BDK-System) lassen sich technologieabhängig auf die ersten drei Betriebsmittelzustände BMZ1, BMZ2, und BMZ3 verdichten. Wichtig dabei ist es zu erwähnen, dass unter dem Begriff Stillstandszeiten alle Maschinenzeiten und somit auch die Zeit in welcher sich das Betriebsmittel im Produktionszustand (BMZ1) befindet. Als Synonym für die Stillstandszeiten wäre der Begriff Zustandszeiten angebrachter, wobei dieser in der Praxis nicht angewendet wird.

Die Zuordnung der 30 allgemeingültigen Stillstandsgründe des BDK-Systems ist technologieabhängig, da sich aus energetischer Sicht nicht jede Technologie in jedem der 30 Stillstandsarten gleich verhält. Während die Technologien Pressen, Profilieren und Montieren im Produktionszustand (BMZ1) am meisten Energie benötigen und somit auf Volllast betrieben werden, wird die Kunststoffbeschichtung nur auf Teillast betrieben. Wie bereits erwähnt können die 30 allgemein gültigen Stillstandsgründe und somit die Stillstandszeiten für jedes Betriebsmittel über das BDK-System abgerufen werden. Das BDK-System beschreibt das von BLUM eingesetzte Enterprise-Resource-Planning-System) (ERP-System), welches der funktionsbereichsübergreifenden Unterstützung sämtlicher in einem Unternehmen ablaufenden Geschäftsprozesse dient.

Durch die unternehmensweite Konsolidierung der Daten ist eine Unterstützung der Planung über sämtliche Unternehmensebenen hinweg (von der Konzernebene über verschiedene Werke, Sparten und Abteilungen bis hin zu einzelnen Lagerorten) möglich. (Gabler Wirtschaftslexikon, 2014)

Solange die Betriebsmittel am BDK-System angemeldet sind, können Informationen zwischen Betriebsmittel und dem BDK-System ausgetauscht werden. Die Anmeldung an diesem ist aber keine Vorbedingung für die Inbetriebnahme der Betriebsmittel. Die Betriebsmittel haben einen Pool von ca. 255 Stillstandsgründen zur Verfügung, um dem BDK-System ihren derzeitigen Zustand zu beschreiben. Erst im BDK-System werden diese Gründe mit einem Zeitstempel versehen und weiterverarbeitet. Nicht alle dieser 255 Stillstandsgründe können für jede Technologie gleich verwendet werden. Manche sind speziell für einen bestimmten Zustand einer bestimmten Technologie definiert. Diese 255 Stillstandsgründe lassen sich aber je nach Technologie in unterschiedlicher Weise auf 30 Stillstandsgründe verdichten, welche für alle Betriebsmittel gleich sind. Dies geschieht im BDK-System aufgrund der hohen Datenmenge nach 3 Monaten automatisch. Diese verdichteten Stillstandsgründe sind dann über Jahre hinweg abrufbar, weshalb sie auch für die in dieser Arbeit durchgeführte Betrachtung des Geschäftsjahres 2012/13 herangezogen werden.

4.1.1 Verdichtungsschema der Stillstandszeiten

Wie schon einleitend erwähnt, müssen 30 verdichtete Stillstandsgründe auf die ersten drei energetischen Betriebsmittelzustände „Produktionszustand (BMZ1)“, „Wartezustand (BMZ2)“ und „Rüztzustand (BMZ3)“ weiterverdichtet werden. In den Betriebsmittelzuständen „Ruhezustand 1 (BMZ4)“ und „Ruhezustand 2 (BMZ5)“ besteht keine Kommunikation zwischen Betriebsmittel und BDK-System, weshalb diese Maschinenrückmeldezeiten nicht auf diese Betriebsmittelzustände verdichtet werden können. Die folgende Tabelle beschreibt die von der jeweiligen Produktionstechnologie abhängige Verdichtung der 30 allgemein gültigen Stillstandsgründe auf die drei Betriebsmittelzustände Produktionszustand (BMZ1), Wartezustand (BMZ2) und Rüztzustand (BMZ3).

Nr.	Stillstandsgründe	Pressen	Profilieren	Montage	KB
0	Maschine läuft	BMZ1	BMZ1	BMZ1	BMZ 1
1	Beschicken	BMZ2	BMZ2	BMZ2	BMZ 3
2	Prüfen laut PPL	BMZ1	BMZ1	BMZ2	BMZ 1
3	Entsorgen	BMZ1	BMZ1	BMZ2	BMZ 3
4	Materialprobleme	BMZ2	BMZ2	BMZ2	BMZ 3
5	Prozesskorrektur	BMZ2	BMZ2	BMZ2	BMZ 3

Nr.	Stillstandsgründe	Pressen	Profilieren	Montage	KB
6	Werkzeugreparatur / Störung	BMZ3	BMZ3	BMZ3	BMZ 3
7	Sonderauftrag	BMZ1	BMZ1	BMZ2	BMZ 3
8	Probelauf	BMZ1	BMZ1	BMZ2	BMZ 3
9	Betriebsmittelreparatur / Störung	BMZ3	BMZ3	BMZ3	BMZ 3
10	Brachzeit	BMZ2	BMZ2	BMZ2	BMZ 3
11	Auftragswechsel	BMZ2	BMZ2	BMZ2	BMZ 3
12	Rüsten	BMZ3	BMZ3	BMZ3	BMZ 3
13	Anfahren	BMZ2	BMZ2	BMZ2	BMZ 2
14	Warten/Reinigen	BMZ3	BMZ3	BMZ3	BMZ 3
15	Kein Auftrag	BMZ3	BMZ3	BMZ3	BMZ 3
16	Kein Primärpersonal	BMZ2	BMZ2	BMZ3	BMZ 3
17	Kein Werkzeug	BMZ3	BMZ3	BMZ3	BMZ 3
18	Kein Material	BMZ3	BMZ3	BMZ3	BMZ 3
19	Kein Sek. Personal	BMZ2	BMZ2	BMZ3	BMZ 3
20	Stillstand durch Anlagenverbund	BMZ2	BMZ2	BMZ2	BMZ 3
21	Frei	-	-	-	
22	Frei	-	-	-	
23	Betriebsmittelrevision	BMZ3	BMZ3	BMZ3	BMZ 3
24	Werkzeugrevision	BMZ3	BMZ3	-	BMZ 3
25	Pause	BMZ2	BMZ2	BMZ3	BMZ 3
26	Sonstiges	BMZ2	BMZ2	BMZ2	BMZ 3
27	Keine Schicht	BMZ3	BMZ3	BMZ3	BMZ 3
28	Keine Angabe	NV	NV	BMZ2	BMZ 3
29	BDK Fehler	BMZ2	BMZ3	BMZ2	BMZ 1

Tabelle 13: Verdichtungsschema der 30 allgemein gültigen Stillstandsgründe

Die Dauer dieser Betriebsmittelzustände beschreibt die Art der Nutzung der Betriebsmittel und somit deren Lastkollektiv für einen Betrachtungszeitraum, welcher das Geschäftsjahr 2012/13 ist. Mit Hilfe der Betriebsmittelzustände Produktionszustand (BMZ1), Wartezustand (BMZ2), Rüstzustand (BMZ3) und der theoretisch möglichen Produktionszeit pro Jahr lassen sich Leistungszahlen bilden, welche die Betriebsweise der Betriebsmittel ausdrücken. Diese Leistungszahlen bzw. KPIs (Key Performance Indicators) werden im Folgenden beschrieben.

4.1.2 Gesamtnutzungs- und Hauptnutzungsgrad

Der Begriff Key Performance Indicator (KPI) bzw. Leistungskennzahl bezeichnet in der Betriebswirtschaftslehre Kennzahlen, anhand derer der Fortschritt oder der Erfüllungsgrad hinsichtlich wichtiger Zielsetzungen oder kritischer Erfolgsfaktoren innerhalb einer Organisation gemessen und/oder ermittelt werden kann.

Ein möglicher KPI ist die Gesamtanlageneffektivität (GAE) und ist definiert als eine ganzheitliche Fertigungskennzahl, die die Verfügbarkeit, die Maschinenleistung und

den Qualitätsgrad zur Bewertung einer Anlage verknüpft. Die GAE einer Anlage wird durch das Produkt von Verfügbarkeitsfaktor, Leistungsfaktor und Qualitätsfaktor berechnet und liegt zwischen 0% und 100%. Der Verfügbarkeitsfaktor ist ein Maß für Verluste durch ungeplante Anlagenstillstände. (OEE Help, 2014)

Für energetische Betrachtungen ist es jedoch nicht von Bedeutung, ob ein Anlagenstillstand geplant oder ungeplant passiert. Lediglich die Dauer des Stillstandes und die dabei bezogene Leistung der jeweiligen Energieform sind für eine solche Betrachtung von Bedeutung. Für diese Arbeit werden daher die KPIs Gesamtnutzungs- und Hauptnutzungsgrad eingeführt, um das energetische Lastkollektiv jedes Betriebsmittels zu beschreiben.

Der Gesamtnutzungsgrad gibt an wie stark die verfügbare Kapazität insgesamt genutzt wird (M. Ventzislavova, 2013). Er berechnet sich aus der Summe von Haupt- und Nebennutzungs- sowie der Unterbrechungszeit dividiert durch die theoretische Einsatzzeit pro Jahr. Die Summe aus Haupt- und Nebennutzungs- sowie der Unterbrechungszeit wird durch die Zeit beschrieben, in welcher das Betriebsmittel am BDK-System angemeldet ist.

$$\begin{aligned} \text{Gesamtnutzungsgrad} &= \frac{\left(\begin{array}{c} \text{Hauptnutz-} \\ \text{ungszeit} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{Nebennutz-} \\ \text{ungszeit} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{Unterbrech-} \\ \text{ungszeit} \end{array} \right)}{\text{theoretische Einsatzzeit}} & (10) \\ &= \frac{\text{Produktionszustand} + \text{Wartezustand} + \text{Rüstzustand}}{\text{theoretische Einsatzzeit}} \end{aligned}$$

Der Hauptnutzungsgrad pro Betriebsmittel ist das Verhältnis der Hauptnutzungszeit (die Zeit die zur geplanten Bearbeitung benötigt wird) zur theoretischen Einsatzzeit pro Jahr. (M. Ventzislavova, 2013)

$$\text{Hauptnutzungsgrad} = \frac{\text{Hauptnutzungszeit}}{\text{theoretische Einsatzzeit}} = \frac{\text{Produktionszustand}}{\text{theoretische Einsatzzeit}} \quad (11)$$

Für die Berechnung der theoretischen Einsatzzeit wird angenommen, dass bei einer Schichtdauer von 8 Stunden und durchschnittlich 15 Schichten pro Woche sowie

durchschnittlich 47 Wochen pro Jahr 5640 Stunden pro Jahr produziert werden könnte. Da, wie in Kapitel 3.2.3 erwähnt, eine Produktion bis zu 18 Schichten pro Woche möglich ist, kann es passieren, dass der Gesamtnutzungsgrad einen Wert von über 100% erreicht. Nur die gleichzeitige Betrachtung beider Faktoren ermöglicht eine Aussage über die effiziente Nutzung eines Betriebsmittels. Aus dem Gesamtnutzungsfaktor lässt sich in Prozent erkennen, wie gut ein Betriebsmittel belegt war. Aus diesem KPI lässt sich aber nicht erkennen, wie wertvoll das betrachtete Betriebsmittel für die Produktion ist. Bei einem Betriebsmittel-Gesamtnutzungsgrad von 80% kann lediglich gesagt werden, dass dieses entsprechend lange am BDK-System angemeldet war. Es lässt sich aber nicht erkennen, ob sich dieses im wertschöpfenden Produktionszustand oder dem nichtwertschöpfenden Wart- bzw. Rüstzustand befand. Nur die zusätzliche Betrachtung des Hauptnutzungsgrades lässt eine Aussage über die effiziente Nutzung des jeweiligen Betriebsmittels zu.

4.1.3 Auswertung nach Betriebsmitteltechnologien

Im Folgenden sind die Zeiten der Betriebsmittelzustände BMZ1 bis BMZ5 während des Geschäftsjahres 2012/13 je Produktionstechnologie und BMZ aufgelistet.

4.1.3.1 Auswertung – Pressen

BM-Bez.	Abt.	BMZ1	BMZ2	BMZ3	BMZ4	BMZ5	Gesamtnutzungsgrad	Hauptnutzungsgrad
P107G	RS1	0 h	0 h	0 h	4.380 h	4.380 h	0,00%	0,00%
P108G	RS1	82 h	84 h	10 h	4.292 h	4.292 h	3,12%	1,46%
P109G	RS1	426 h	659 h	503 h	3.586 h	3.586 h	28,14%	7,55%
P111G	RS1	296 h	595 h	304 h	3.782 h	3.782 h	21,20%	5,25%
P112G	RS1	405 h	500 h	210 h	3.823 h	3.823 h	19,75%	7,18%
P113G	RS1	277 h	289 h	131 h	4.031 h	4.031 h	12,36%	4,92%
P114G	RS1	319 h	345 h	353 h	3.871 h	3.871 h	18,03%	5,66%
P123G	RS1	1.906 h	546 h	807 h	2.750 h	2.750 h	57,80%	33,80%
P124G	RS1	1.930 h	444 h	852 h	2.767 h	2.767 h	57,20%	34,23%
P136G	RS1	394 h	654 h	550 h	3.581 h	3.581 h	28,33%	6,98%
P179G	RS8	3.080 h	588 h	1.587 h	1.753 h	1.753 h	93,17%	54,60%
P189G	RS8	1.568 h	502 h	1.369 h	2.661 h	2.661 h	60,97%	27,79%
P196G	RS8	3.269 h	681 h	1.564 h	1.623 h	1.623 h	97,77%	57,96%
P200G	RS8	2.219 h	823 h	2.430 h	1.644 h	1.644 h	97,01%	39,34%
P205G	RS8	3.104 h	570 h	1.881 h	1.602 h	1.602 h	98,50%	55,04%

Tabelle 14: Gesamtnutzungs- und Hauptnutzungsgrad – Pressen

4.1.3.2 Auswertung – Profilieranlagen

BM-Bez.	Abt.	BMZ1	BMZ2	BMZ3	BMZ4	BMZ5	Gesamtnutzungsgrad	Hauptnutzungsgrad
P127G	RS3	427 h	281 h	554 h	3.749 h	3.749 h	22,38%	7,57%
P145G	RS3	1.518 h	985 h	1.663 h	2.297 h	2.297 h	73,87%	26,91%
P146G	RS3	1.140 h	960 h	1.931 h	2.364 h	2.364 h	71,49%	20,22%
P147G	RS8	2.388 h	1.360 h	1.737 h	1.637 h	1.637 h	97,26%	42,33%
P154G	RS3	2.177 h	995 h	2.031 h	1.779 h	1.779 h	92,25%	38,61%
P155G	RS3	1.151 h	1.242 h	2.474 h	1.947 h	1.947 h	86,29%	20,40%
P156G	RS3	1.170 h	526 h	1.385 h	2.840 h	2.840 h	54,61%	20,74%
P160G	RS1	906 h	1.222 h	2.475 h	2.079 h	2.079 h	81,61%	16,07%
P161G	RS1	2.087 h	1.074 h	1.749 h	1.925 h	1.925 h	87,05%	37,00%
P162G	RS8	1.147 h	1.542 h	2.948 h	1.561 h	1.561 h	99,96%	20,34%
P165G	RS1	2.043 h	1.156 h	1.987 h	1.787 h	1.787 h	91,96%	36,22%
P169G	RS8	1.095 h	1.500 h	2.760 h	1.703 h	1.703 h	94,94%	19,41%
P173G	RS1	2.011 h	1.173 h	2.021 h	1.778 h	1.778 h	92,28%	35,65%
P184G	RS8	2.337 h	1.064 h	1.401 h	1.979 h	1.979 h	85,14%	41,44%
P188G	RS8	1.789 h	1.175 h	2.825 h	1.486 h	1.486 h	102,64%	31,72%

Tabelle 15: Gesamtnutzungs- und Hauptnutzungsgrad – Profilieranlagen

4.1.3.3 Auswertung – Pulverbeschichtungsanlagen

BM-Bez.	Abt.	BMZ1	BMZ2	BMZ3	BMZ4	BMZ5	Gesamtnutzungsgrad	Hauptnutzungsgrad
KB03G	KB	4.392 h	1.069 h	406 h	1.446 h	1.446 h	104,04%	77,88%
KB04G	KB	5.065 h	709 h	102 h	1.442 h	1.442 h	104,18%	89,81%
KB05G	RS3	3.262 h	2.094 h	169 h	1.618 h	1.618 h	97,95%	57,83%
KB06G	RS3	3.411 h	918 h	382 h	2.025 h	2.025 h	83,53%	60,48%

Tabelle 16: Gesamtnutzungs- und Hauptnutzungsgrad – KB- Anlagen

4.1.3.4 Auswertung – Montageautomaten

BM-Bez.	Abt.	BMZ1	BMZ2	BMZ3	BMZ4	BMZ5	Gesamtnutzungsgrad	Hauptnutzungsgrad
BV001	RS3	3.201 h	89 h	1.313 h	2.078 h	2.078 h	81,62%	56,76%
BV002	RS3	3.023 h	55 h	935 h	2.373 h	2.373 h	71,16%	53,60%
IF07G	RS1	1.152 h	112 h	1.074 h	3.211 h	3.211 h	41,46%	20,43%
IF15G	RS3	1.574 h	58 h	444 h	3.342 h	3.342 h	36,79%	27,90%
IF21G	RS5	791 h	21 h	752 h	3.598 h	3.598 h	27,74%	14,03%
IF24G	RS1	3.325 h	89 h	2.000 h	1.673 h	1.673 h	95,99%	58,95%
IF25G	RS3	1.231 h	49 h	463 h	3.508 h	3.508 h	30,91%	21,83%
IF26G	RS3	2.010 h	129 h	557 h	3.032 h	3.032 h	47,81%	35,65%
IF34R	KB	244 h	50 h	147 h	4.160 h	4.160 h	7,81%	4,33%
IF49G	RS3	4.585 h	82 h	424 h	1.834 h	1.834 h	90,28%	81,30%
IF58G	RS1	3.106 h	83 h	616 h	2.478 h	2.478 h	67,46%	55,07%
IF65L	RS6	4.060 h	178 h	1.268 h	1.627 h	1.627 h	97,63%	71,99%
IF65R	RS6	4.120 h	171 h	1.183 h	1.643 h	1.643 h	97,07%	73,05%
IF66G	RS3	110 h	2 h	46 h	4.301 h	4.301 h	2,80%	1,95%
IF67G	RS3	4.402 h	86 h	578 h	1.847 h	1.847 h	89,82%	78,05%
IF69L	RS8	19 h	6 h	54 h	4.340 h	4.340 h	1,41%	0,34%
IF69R	RS8	20 h	6 h	50 h	4.342 h	4.342 h	1,34%	0,36%
IF70L	RS6	944 h	134 h	388 h	3.647 h	3.647 h	25,99%	16,74%

BM-Bez.	Abt.	BMZ1	BMZ2	BMZ3	BMZ4	BMZ5	Gesamtnutzungsgrad	Hauptnutzungsgrad
IF70R	RS6	931 h	118 h	432 h	3.640 h	3.640 h	26,25%	16,50%
IF71G	RS8	76 h	13 h	183 h	4.244 h	4.244 h	4,81%	1,35%
IF72G	RS3	4.312 h	199 h	649 h	1.800 h	1.800 h	91,49%	76,45%
IF76G	RS1	4.486 h	213 h	1.042 h	1.509 h	1.509 h	101,79%	79,54%
IF77G	RS8	1.858 h	120 h	1.747 h	2.517 h	2.517 h	66,06%	32,95%
IF80G	RS3	4.437 h	157 h	553 h	1.806 h	1.806 h	91,27%	78,67%
IF84L	RS6	3.506 h	168 h	1.070 h	2.008 h	2.008 h	84,11%	62,17%
IF84R	RS6	3.477 h	138 h	1.108 h	2.018 h	2.018 h	83,76%	61,65%
IF85G	RS3	347 h	110 h	379 h	3.962 h	3.962 h	14,82%	6,15%
IF86G	RS3	1.310 h	122 h	666 h	3.331 h	3.331 h	37,19%	23,22%
IF87G	RS3	1.620 h	125 h	419 h	3.298 h	3.298 h	38,36%	28,72%
IF88G	RS8	3.130 h	397 h	1.803 h	1.715 h	1.715 h	94,50%	55,50%
IF89G	RS8	3.042 h	427 h	2.278 h	1.507 h	1.507 h	101,88%	53,93%
IF94G	RS8	2.716 h	1.271 h	1.734 h	1.520 h	1.520 h	101,43%	48,15%
IF98G	RS1	3.490 h	271 h	1.229 h	1.885 h	1.885 h	88,48%	61,89%
IF99G	RS3	3.841 h	94 h	909 h	1.958 h	1.958 h	85,88%	68,09%
IL02G	RS3	3.953 h	102 h	817 h	1.944 h	1.944 h	86,37%	70,09%
IL03G	RS3	3.994 h	72 h	553 h	2.071 h	2.071 h	81,89%	70,82%
IL04G	RS5	1.011 h	574 h	479 h	3.348 h	3.348 h	36,60%	17,93%
IL05G	RS5	2.638 h	1.552 h	1.527 h	1.521 h	1.521 h	101,37%	46,77%
IL06G	RS5	2.508 h	1.696 h	1.472 h	1.542 h	1.542 h	100,65%	44,47%
IL13G	RS7	3.466 h	157 h	1.805 h	1.666 h	1.666 h	96,25%	61,46%
IL15G	RS1	3.102 h	225 h	686 h	2.374 h	2.374 h	71,14%	54,99%
IL20G	RS7	3.081 h	179 h	2.118 h	1.690 h	1.690 h	95,37%	54,63%
IL21E	RS8	2.628 h	562 h	634 h	2.468 h	2.468 h	67,80%	46,59%
IL21G	RS8	2.579 h	820 h	417 h	2.471 h	2.471 h	67,68%	45,73%
IL22G	RS7	3.435 h	161 h	1.145 h	2.010 h	2.010 h	84,06%	60,90%
IL24E	RS7	733 h	168 h	1.027 h	3.416 h	3.416 h	34,18%	13,00%
IL26G	RS8	37 h	6 h	50 h	4.334 h	4.334 h	1,65%	0,66%
IL28G	RS5	3.183 h	1.002 h	1.741 h	1.418 h	1.418 h	105,05%	56,43%
IL29G	RS5	3.329 h	1.809 h	1.033 h	1.294 h	1.294 h	109,42%	59,02%
IL30G	RS5	3.293 h	1.725 h	1.173 h	1.285 h	1.285 h	109,76%	58,38%
IL39L	RS6	4.496 h	114 h	1.028 h	1.561 h	1.561 h	99,97%	79,72%
IL39R	RS6	4.474 h	107 h	939 h	1.621 h	1.621 h	97,85%	79,32%
IL40G	RS3	4.117 h	61 h	1.213 h	1.684 h	1.684 h	95,60%	73,00%
IL42G	RS8	850 h	327 h	216 h	3.683 h	3.683 h	24,71%	15,07%
IL43G	RS7	3.489 h	149 h	2.051 h	1.536 h	1.536 h	100,86%	61,86%
IL44G	RS7	3.208 h	181 h	1.666 h	1.853 h	1.853 h	89,63%	56,88%
IL45E	RS8	3.250 h	468 h	654 h	2.194 h	2.194 h	77,53%	57,63%
IL45G	RS8	3.141 h	824 h	408 h	2.194 h	2.194 h	77,53%	55,69%
IL46G	RS7	3.365 h	127 h	1.286 h	1.991 h	1.991 h	84,70%	59,66%
IL48E	RS7	4.407 h	119 h	867 h	1.683 h	1.683 h	95,63%	78,14%
IL48V	RS8	4.026 h	187 h	994 h	1.776 h	1.776 h	92,34%	71,38%
IL49G	RS3	4.494 h	172 h	902 h	1.597 h	1.597 h	98,70%	79,68%
IL57G	RS3	4.086 h	75 h	1.218 h	1.691 h	1.691 h	95,37%	72,45%
IL58E	RS7	4.393 h	153 h	860 h	1.677 h	1.677 h	95,85%	77,89%
IL63G	RS1	4.097 h	149 h	1.376 h	1.569 h	1.569 h	99,68%	72,63%
IL64L	RS6	3.768 h	101 h	1.447 h	1.722 h	1.722 h	94,26%	66,80%
IL64R	RS6	3.796 h	110 h	1.252 h	1.801 h	1.801 h	91,45%	67,30%
IL65G	RS7	4.195 h	271 h	1.701 h	1.296 h	1.296 h	109,34%	74,37%
IL66G	RS7	3.742 h	686 h	1.759 h	1.286 h	1.286 h	109,71%	66,35%
IL67G	RS8	4.682 h	31 h	942 h	1.553 h	1.553 h	100,26%	83,02%
IL68E	RS7	3.842 h	92 h	1.345 h	1.741 h	1.741 h	93,60%	68,12%
IL74G	RS8	4.942 h	46 h	916 h	1.428 h	1.428 h	104,69%	87,63%
IL75G	RS1	3.182 h	254 h	1.418 h	1.953 h	1.953 h	86,07%	56,41%
IL77G	RS5	2.870 h	141 h	1.412 h	2.169 h	2.169 h	78,42%	50,89%
IL82G	RS1	668 h	52 h	407 h	3.817 h	3.817 h	19,98%	11,85%

BM-Bez.	Abt.	BMZ1	BMZ2	BMZ3	BMZ4	BMZ5	Gesamtnutzungsgrad	Hauptnutzungsgrad
IL83G	RS1	374 h	47 h	508 h	3.916 h	3.916 h	16,46%	6,63%
IL84G	RS8	2.947 h	154 h	1.654 h	2.002 h	2.002 h	84,32%	52,26%
IL85G	RS3	3.107 h	57 h	666 h	2.465 h	2.465 h	67,92%	55,10%
IL87G	RS3	4.380 h	103 h	978 h	1.649 h	1.649 h	96,84%	77,67%
IL88G	RS3	4.083 h	77 h	1.106 h	1.747 h	1.747 h	93,38%	72,40%
IL91L	RS6	4.396 h	98 h	1.413 h	1.426 h	1.426 h	104,73%	77,94%
IL91R	RS6	4.389 h	133 h	1.462 h	1.388 h	1.388 h	106,08%	77,81%
IL93G	RS1	3.258 h	74 h	656 h	2.386 h	2.386 h	70,70%	57,77%
IL95V	RS8	4.080 h	110 h	1.043 h	1.764 h	1.764 h	92,78%	72,34%
IL96G	RS7	4.244 h	238 h	1.631 h	1.324 h	1.324 h	108,38%	75,24%
IL97G	RS7	4.035 h	531 h	1.673 h	1.260 h	1.260 h	110,63%	71,55%
IL98G	RS8	4.344 h	72 h	1.168 h	1.588 h	1.588 h	99,00%	77,02%
IL99G	RS7	3.751 h	75 h	1.183 h	1.876 h	1.876 h	88,81%	66,51%
IM07G	KB	2.561 h	260 h	577 h	2.681 h	2.681 h	60,26%	45,41%
IP02G	RS1	3.746 h	38 h	2.259 h	1.359 h	1.359 h	107,14%	66,42%
IP04G	RS7	1.890 h	207 h	1.072 h	2.796 h	2.796 h	56,17%	33,51%
IP07G	RS5	2.891 h	160 h	1.290 h	2.210 h	2.210 h	76,95%	51,26%
IP08G	RS5	1.238 h	170 h	1.243 h	3.055 h	3.055 h	47,00%	21,95%
IP09G	RS8	4.711 h	66 h	1.143 h	1.420 h	1.420 h	104,96%	83,53%
IP10G	RS5	1.717 h	406 h	1.791 h	2.423 h	2.423 h	69,39%	30,43%
IP16G	RS1	2.268 h	653 h	1.064 h	2.387 h	2.387 h	70,66%	40,22%
IP19E	RS7	3.834 h	40 h	1.308 h	1.789 h	1.789 h	91,87%	67,98%
IP21G	RS1	2.130 h	372 h	1.436 h	2.411 h	2.411 h	69,83%	37,77%
IP26G	RS7	550 h	15 h	643 h	3.777 h	3.777 h	21,40%	9,75%
IP28G	RS1	1.796 h	246 h	1.610 h	2.554 h	2.554 h	64,74%	31,85%
IP29E	RS5	971 h	131 h	1.909 h	2.874 h	2.874 h	53,39%	17,21%
IP29G	RS5	1.536 h	158 h	2.000 h	2.533 h	2.533 h	65,49%	27,24%
IP31G	RS5	1.104 h	172 h	1.087 h	3.198 h	3.198 h	41,91%	19,58%
IP32G	RS5	1.517 h	318 h	2.526 h	2.200 h	2.200 h	77,31%	26,89%
IP33G	RS5	1.416 h	1.047 h	2.137 h	2.080 h	2.080 h	81,56%	25,10%
IP34G	RS5	1.421 h	978 h	2.151 h	2.105 h	2.105 h	80,68%	25,20%
IP35G	RS1	1.961 h	244 h	1.053 h	2.751 h	2.751 h	57,77%	34,77%
IP37G	KB	2.325 h	265 h	1.745 h	2.212 h	2.212 h	76,87%	41,22%
IP39G	RS6	4.565 h	167 h	1.209 h	1.409 h	1.409 h	105,34%	80,94%
IP40G	RS5	1.211 h	1.966 h	1.205 h	2.189 h	2.189 h	77,69%	21,47%
IP41G	RS5	743 h	159 h	474 h	3.692 h	3.692 h	24,40%	13,18%
IP46L	KB	996 h	692 h	1.754 h	2.659 h	2.659 h	61,02%	17,65%
IP46R	KB	979 h	654 h	1.750 h	2.689 h	2.689 h	59,97%	17,36%
IP46V	KB	275 h	237 h	437 h	3.905 h	3.905 h	16,84%	4,88%
IP48G	RS6	18 h	30 h	21 h	4.345 h	4.345 h	1,23%	0,33%
LT43G	RS8	3.688 h	77 h	1.680 h	1.657 h	1.657 h	96,54%	65,40%

Tabelle 17: Gesamtnutzungs- und Hauptnutzungsgrad – Montageautomaten

4.2 Leistungsanalyse der Betriebsmittelzustände

Das Erfassen von Leistungszuständen erfolgt über eine Leistungsmessung der Betriebsmittel in den fünf Betriebsmittelzuständen (BMZ1 bis BMZ5). In Kapitel 4.1.1 erfolgte die individuell Zuteilung für jede Produktionstechnologie der 30 Stillstandsgründe auf die fünf Betriebsmittelzustände. Wie im vorherigen Kapitel beschrieben, kann damit die Dauer jedes Betriebsmittelzustandes ermittelt werden.

Für die Berechnung der Energie von jedem der fünf Betriebsmittelzustände fehlt nur noch die Kenntnis des Leistungsbedarfs der benötigten Energieformen in diesen Zuständen. Die Herausforderung in diesem Kapitel ist es somit, die möglichen Leistungszustände der unterschiedlichen Produktionsmaschinen auf die fünf Betriebsmittelzustände zu verdichten.

Da viele Betriebsmittel mehr stationäre Leistungszustände einnehmen können als Betriebsmittelzustände definiert wurden, wird die Zuordnung eines Leistungszustandes zum jeweiligen Betriebsmittelzustand mit Hilfe einer Leistungsanalyse durchgeführt. Für jede Produktionstechnologie wurde ein Versuchsablauf definiert, in welchem die untersuchten Betriebsmittel der Reihe nach jeden möglichen stationären Leistungszustand für eine kurze Zeit einnehmen. Die Dauer jedes einzunehmenden Leistungszustandes hängt davon ab, wie schnell sich eine stationäre Bezugsleistung für den jeweiligen Leistungszustand einstellt. Beschreibt ein solcher Leistungszustand den Leistungsbezug für einen der fünf Betriebsmittelzustände, so wird die zugehörige stationäre Bezugsleistung für die Berechnung des Energiebedarfs dieses Betriebsmittelzustands verwendet.

Für die Erfassung einer Änderung der gesamten Bezugsleistung eines Betriebsmittels muss an den Energiehauptleitungen für elektrischen Strom, Druckluft und Erdgas gemessen werden. Bei den Pressen und Profilieranlagen sowie bei den kleineren Montageautomaten war dies ohne weiteres durchführbar, da diese über nur eine einzige Energiezuleitung für elektrischen Strom, Druckluft bzw. Erdgas verfügen. Die Leistungsaufnahme für diese Anlagen wird in den Kapiteln 4.2.1 und 4.2.2 im Detail erläutert. Mittlere bis große Montageautomaten sowie alle Pulverbeschichtungsanlagen verfügen aufgrund der Baugröße und der Anschlussleistung über mehrere Energiezuleitungen pro Maschine. Bei diesen Anlagen sind die einzelnen Komponenten bzw. Aggregate an unterschiedliche Unterverteiler für elektrischen Strom oder an mehrere Druckluft- bzw. Erdgaszuleitungen angeschlossen. Für solche Anlagen muss der für die jeweilige Produktionstechnologie definierte Versuchsablauf für jede Energiezuleitung separat durchgeführt werden und die Einzelmessungen summiert werden. Diese Methodik wird im Kapitel 4.2.3 beschrieben.

4.2.1 Leistungsanalyse der Pressen

Die Produktionstechnologie der „Pressen“ benötigt für ihren Betrieb lediglich eine elektrische Energieversorgung. Der Messablauf der elektrischen Wirkleistung [P] in Watt erfolgt bei diesen so, dass die Pressen eingeschaltet werden und die möglichen Maschinenzustände der Reihe nach für wenige Minuten eingenommen werden. Für jeden Maschinenzustand stellt sich ein stationärer Leistungswert ein, der einem Betriebsmittelzustand zugeordnet werden kann. Die folgende Abbildung 25 zeigt die Messung der elektrischen Wirkleistung der Presse (P200G) für den beschriebenen Messablauf.

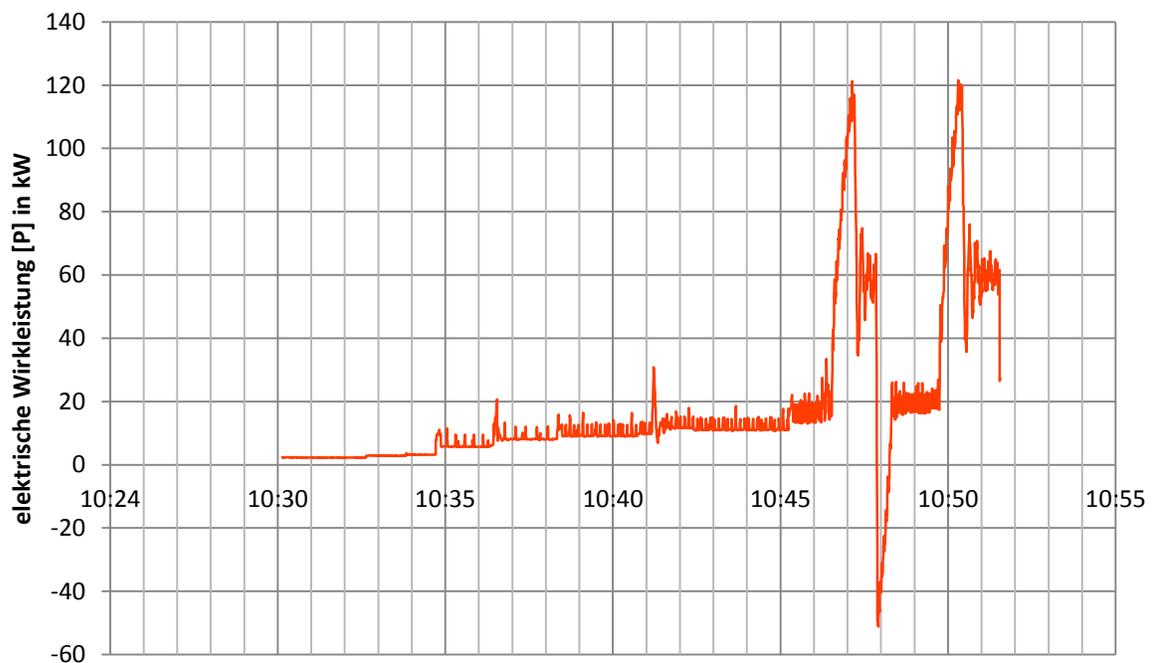


Abbildung 25: Messung der elektrischen Wirkleistung der Transferpresse (P200G)

Der stufenförmige Anstieg der Leistungskurve in der obigen Abbildung 25 spiegelt den beschriebenen Messablauf wieder. Es ist zu sehen, dass die gemessene Presse (P200G) im ausgeschalteten Zustand eine elektrische Wirkleistung von ca. 2 kW bezieht. Um ca. 10:30 startet die Messung und um ca. 10:32 Uhr erfolgt die erste Maschinenzustandsänderung auf knapp 3 kW. Der nächste Maschinenzustand wird 2 Min. später erreicht, wodurch die elektrische Leistung auf ungefähr 6 kW ansteigt. Jede Zustandsänderung ist mit einer kurzen Leistungsspitze – einem Peak –

verbunden, welcher in den meisten Fällen signifikant höher als das sich anschließend für diesen Maschinenzustand einstellende Leistungsniveau ist. Um aus dem obigen Leistungsdiagramm die gemessenen Maschinenzustände zu identifizieren, wurde der Messablauf, wie folgt, protokolliert.

Datum	Uhrzeit	Maschinenzustand
14.11.2013	10:29	Anlage aus
14.11.2013	10:32	Anlage ein
14.11.2013	10:34	Anlage ein + Antriebe ein
14.11.2013	10:38	Umrüsten
14.11.2013	10:41	Einrichten
14.11.2013	10:45	Automatikbetrieb
14.11.2013	10:48	Störung
14.11.2013	10:50	Automatikbetrieb
14.11.2013	10:52	Ende

Tabelle 18: Messablauf bei der elektrischen Leistungsmessung von Pressen

Der leichte Anstieg der Leistungskurve um 10:32 Uhr wird durch den Maschinenzustand „Anlage ein“ verursacht. Der nur sehr geringe Anstieg der Leistungskurve ist auf die Einschaltung der Maschinensteuerung zurückzuführen. Um 10:34 Uhr werden vom Maschinenbediener zusätzlich noch die Antriebe eingeschaltet, welche durch Referenzieren auch den Leistungspeak um 10:36 Uhr verursachen. Anschließend, um 10:38 Uhr, wird die Maschine in den Maschinenzustand „Umrüsten“ versetzt. Auch hier ist ein kurzer Leistungspeak zu erkennen, dann pendelt sich die Leistung bei ca. 11 kW ein. Der komplette Rüstvorgang setzt sich zum einen Teil aus dem soeben beschriebenen Umrüsten und zum anderen Teil aus dem Einrichten zusammen. Der Maschinenzustand „Einrichten“ wird laut Prüfprotokoll um 10:41 Uhr eingenommen, wobei keine signifikante Änderung zum Maschinenzustand „Umrüsten“ zu erkennen ist. In Folge ist die Maschine produktionsbereit und wird um 10:45 Uhr in den Produktionszustand „Automatikbetrieb“ versetzt. Bevor aber die Maschine in den stationären Maschinenzustand „Automatikbetrieb“ bei ca. 60 kW gelangt, ist ein Anstieg der Leistungskurve auf knapp unter 18 kW und für etwa 1 Minute ein Leistungspeak auf 120 kW zu erkennen. Danach befindet sich die Presse bis 10:48 Uhr im Automatikbetrieb, welcher durch eine geplante Störung abrupt unterbrochen wird. Die in dieser Presse verbauten Servomotoren ermöglichen eine Rückspeisung der

durch den Frequenzumrichter in elektrische Energie umgewandelten Bremsenergie in den Zwischenkreis. Nach der Störung wird die Presse gleich wieder in den Automatikbetrieb versetzt. Der Leistungspeak von ca. 120 kW wiederholt sich und die Presse gelangt anschließend wieder in den stationären Produktionszustand bei durchschnittlich 60 kW. Gegen 10:52 Uhr wird die Messung beendet.

Durch die Leistungsmessung der Maschinenzustände, können die durchschnittlichen Leistungen den Betriebsmittelzuständen BMZ1 bis BMZ5 zugeordnet werden. Die folgende Tabelle 19 zeigt das Ergebnis dieser Zuteilung am Beispiel der hier durchgeführten Leistungsanalyse der Servopresse P200G.

BM-Bez.	Abteilung	BMZ1	BMZ2	BMZ3	BMZ4	BMZ5
P200G	RS8 (541)	60,17 kW	19,28 kW	11,36 kW	2,27 kW	2,27 kW

Tabelle 19: Elektrische Leistungswerte der Servopresse P200G

Diese energetische Analyse zur Ermittlung der elektrischen Leistung der fünf Betriebsmittelzustände wird für alle vorhandenen Pressentypen durchgeführt. Die folgende Tabelle 20 gibt eine Übersicht über die Ergebnisse dieser Untersuchung.

BM-Bez.	Pressentyp	BMZ1	BMZ2	BMZ3	BMZ4	BMZ5
P123G	Exzenterpresse	24,05 kW	4,17 kW	6,06 kW	0,41 kW	0,41 kW
P124G	Exzenterpresse	24,05 kW	4,17 kW	6,06 kW	0,41 kW	0,41 kW
P179G	Exzenterpresse	41,53 kW	12,44 kW	7,45 kW	1,43 kW	1,43 kW
P189G	Exzenterpresse	67,20 kW	17,33 kW	13,61 kW	1,63 kW	1,63 kW
P196G	Exzenterpresse	67,58 kW	16,34 kW	12,14 kW	1,54 kW	1,54 kW
P200G	Exzenterpresse	60,17 kW	19,28 kW	11,36 kW	2,27 kW	2,27 kW
P107G	Hydraulikpresse	50,00 kW	20,00 kW	20,00 kW	1,60 kW	1,60 kW
P108G	Hydraulikpresse	50,00 kW	20,00 kW	20,00 kW	1,60 kW	1,60 kW
P109G	Hydraulikpresse	50,00 kW	20,00 kW	20,00 kW	1,60 kW	1,60 kW
P111G	Hydraulikpresse	50,00 kW	20,00 kW	20,00 kW	1,60 kW	1,60 kW
P112G	Hydraulikpresse	50,00 kW	20,00 kW	20,00 kW	1,60 kW	1,60 kW
P113G	Hydraulikpresse	50,00 kW	20,00 kW	20,00 kW	1,60 kW	1,60 kW
P114G	Hydraulikpresse	50,00 kW	20,00 kW	20,00 kW	1,60 kW	1,60 kW
P136G	Hydraulikpresse	50,00 kW	20,00 kW	20,00 kW	1,60 kW	1,60 kW
P205G	Servopresse	71,78 kW	36,59 kW	17,57 kW	3,54 kW	3,54 kW

Tabelle 20: Elektrische Leistungswerte der Pressen

Mit Hilfe der Leistungsanalyse der Pressen wurde der Bezug von elektrischer Wirkleistung in allen fünf Betriebsmittelzuständen derjenigen Maschinen gemessen, welche in der obigen Tabelle fett markiert sind. Die anderen in dieser Tabelle aufgeführten Pressen sind dieselben bzw. sehr ähnliche Maschinen, weshalb das

entsprechende Messergebnis für diese übernommen wird. Da die Technologiegruppe der Pressen für den Betrieb keinen anderen Energieträger als den elektrischen Strom benötigt, ist eine Leistungsanalyse von Druckluft bzw. Erdgas für die Pressen weder nötig noch möglich.

4.2.2 Leistungsanalyse der Profilieranlagen

Die Betriebsmittel der Produktionstechnologie „Profilieren“ benötigen für ihren Betrieb hauptsächlich elektrische Energie, aber zu einem geringen Teil auch pneumatische Energie in Form von Druckluft. Für die Ermittlung der elektrischen Wirkleistung in den verschiedenen Maschinenzuständen der Profilieranlagen dienen elektrische Leistungsmessungen aus einem vergangenen Optimierungsprojekt. Die Erfassung des Druckluftbedarfes erfolgt im Zuge dieser Arbeit. In der folgenden Abbildung ist der Verlauf der elektrischen Wirkleistung während des Prüfablaufs dargestellt.

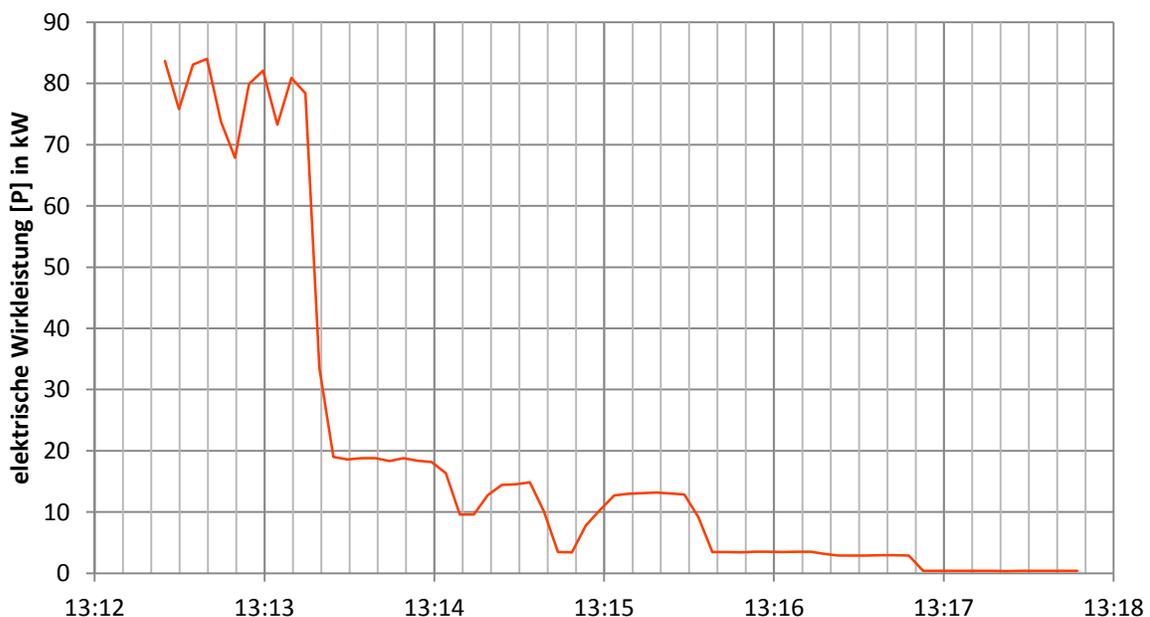


Abbildung 26: Messung der elektrischen Wirkleistung der Profilieranlage (P145G)

Der Prüfablauf für diese Leistungsmessung startet im Maschinenzustand „Produktion ein“ und endet mit dem Ausschalten der Maschine im Maschinenzustand „Steuerspannung aus“. Dazwischen werden die Maschinenzustände wie „Produktion

aus, Pumpendruck 200 bar“, „Produktion aus, Pumpendruck 140 bar“, „Einrichten, Pumpendruck 100 bar“, „Einrichten, Pumpen aus“ und „Umrüsten“ eingenommen.

Datum	Uhrzeit	Maschinenzustand
07.09.2010	13:12:25	Produktion ein
07.09.2010	13:13:20	Produktion aus, Pumpendruck 200 bar
07.09.2010	13:14:05	Produktion aus, Pumpendruck 140 bar
07.09.2010	13:14:45	Einrichten, Pumpendruck 100Bar
07.09.2010	13:15:35	Einrichten, Pumpen aus
07.09.2010	13:16:20	Umrüsten
07.09.2010	13:16:50	Steuerspannung aus

Tabelle 21: Messablauf bei der elektrischen Leistungsmessung von Profilieranlagen

Aus der elektrischen Leistungsmessung der Profilieranlage P145G ergibt sich folgende Aufteilung der gemessenen Maschinenzustände auf die fünf allgemeingültigen Betriebsmittelzustände.

BM-Bez.	Abteilung	BMZ1	BMZ2	BMZ3	BMZ4	BMZ5
P145G	RS3 (410)	78,41 kW	15,45 kW	6,39 kW	0,39 kW	0,39 kW

Tabelle 22: Elektrische Leistungswerte der Profilieranlage P145G

Die Leistung im BMZ1 ergibt sich aus der durchschnittlich gemessenen Leistung von 78,41 kW im Maschinenzustand „Produktion ein“. Die bezogene Wirkleistung im Betriebsmittelzustand 2 von 15,45 kW ergibt sich aus einem Mittelwert der durchschnittlich gemessenen Wirkleistung der Maschinenzustände „Produktion aus, Pumpendruck 200 bar“ und „Produktion aus, Pumpendruck 140 bar“. Der Betriebsmittelzustand „Rüztzustand“ besteht sowohl aus dem Maschinenzustand „Einrichten, Pumpendruck 100 bar“ als auch aus dem Maschinenzustand „Einrichten, Pumpen aus“. Durch eine Analyse der Rüstzeit von Profilieranlagen in den Kalenderwochen 34 und 35, wird festgestellt, dass sich die Anlage in dieser Zeit 4094 Minuten im Rüztzustand befindet und die Pumpe währenddessen 1291 Minuten betrieben wird. Dies ergibt ein prozentuelles Verhältnis von 32 Prozent. Der Leistung im BMZ3 setzt sich somit zu 32% aus der durchschnittlich gemessenen Leistung von 12,60 kW im Maschinenzustand „Einrichten, Pumpendruck 100 bar“ und zu 68% aus der durchschnittlich gemessenen Leistung von 3,47 kW des Maschinenzustandes „Einrichten, Pumpen aus“ zusammen. Für den Betriebsmittelzustand „Rüztzustand“ ergibt sich somit eine durchschnittliche

elektrische Wirkleistung von 6,39kW. Die elektrische Wirkleistung der Betriebsmittelzustände 4 und 5 folgt aus der Messung des Maschinenzustandes „Steuerspannung aus“ und beträgt 0,39kW.

Die am Beispiel der Profilieranlage P145G durchgeführte elektrische Leistungsanalyse der fünf Betriebsmittelzustände wird ebenso für die Profilieranlagen P147G und P184G durchgeführt. Aufgrund der technischen Vergleichbarkeit dieser Anlagen wird der gemessene Wirkleistungsbezug je Betriebsmittelzustand dieser drei Maschinen gemittelt und auf die anderen 12 Profilieranlagen umgelegt. Die folgende Tabelle zeigt die Leistungswerte aller Profilieranlagen im Werk 4 in den fünf Betriebsmittelzuständen. Die darin fettmarkierten Maschinen sind diejenigen, die tatsächlich gemessen worden sind.

BM-Bez.	Abteilung	BMZ1	BMZ2	BMZ3	BMZ4	BMZ5
P127G	RS3 (410)	87,76 kW	18,47 kW	8,90 kW	0,62 kW	0,62 kW
P145G	RS3 (410)	78,41 kW	15,45 kW	6,39 kW	0,39 kW	0,39 kW
P146G	RS3 (410)	87,76 kW	18,47 kW	8,90 kW	0,62 kW	0,62 kW
P147G	RS8 (540)	84,63 kW	18,12 kW	9,88 kW	0,91 kW	0,91 kW
P154G	RS3 (410)	66,53 kW	18,47 kW	8,90 kW	0,62 kW	0,62 kW
P155G	RS3 (410)	66,53 kW	18,47 kW	8,90 kW	0,62 kW	0,62 kW
P156G	RS3 (410)	66,53 kW	18,47 kW	8,90 kW	0,62 kW	0,62 kW
P160G	RS1 (422)	87,76 kW	18,47 kW	8,90 kW	0,62 kW	0,62 kW
P161G	RS1 (422)	87,76 kW	18,47 kW	8,90 kW	0,62 kW	0,62 kW
P162G	RS8 (540)	87,76 kW	18,47 kW	8,90 kW	0,62 kW	0,62 kW
P165G	RS1 (422)	87,76 kW	18,47 kW	8,90 kW	0,62 kW	0,62 kW
P169G	RS8 (540)	87,76 kW	18,47 kW	8,90 kW	0,62 kW	0,62 kW
P173G	RS1 (422)	87,76 kW	18,47 kW	8,90 kW	0,62 kW	0,62 kW
P184G	RS8 (540)	100,25 kW	21,84 kW	10,42 kW	0,55 kW	0,55 kW
P188G	RS8 (540)	87,76 kW	18,47 kW	8,90 kW	0,62 kW	0,62 kW

Tabelle 23: Elektrische Leistungswerte der Profilieranlagen

Die Betriebsmittelzustände 4 und 5 sind in Bezug auf den elektrischen Leistungsbezug ident, da die Maschine in beiden Fällen über die Maschinensteuerung abgeschaltet wird.

In Bezug auf den Druckluftverbrauch unterscheiden sich jedoch der Betriebsmittelzustand 4 und 5 voneinander, da im Betriebsmittelzustand 4 davon ausgegangen wird, dass die Wartungseinheit der Maschine geöffnet ist und somit der zur Kompensation der Leckagen benötigte Druckluftvolumenstrom verbraucht wird. Im Gegensatz dazu wird im Betriebsmittelzustand 5 angenommen, dass die

Wartungseinheit geschlossen ist und kein strömen der Druckluft in die Maschine möglich ist.

Die Druckluftverbraucher bei Profilieranlagen sind der Waschtunnel und das Abführgerät. Der Waschtunnel ist eine mit Druckluft beaufschlagte Kammer und wird von der gewalzten Schiene durchlaufen, um diese von Kühlmittelrückständen des vorhergehenden Walzprozesses zu befreien. Das Abführgerät dient zur Entnahme der gewalzten, gestanzten und abgelängten Schienen aus der Profilieranlage. Um die dafür nötigen Handhabungsbewegungen zu ermöglichen, werden Pneumatikzylinder verwendet. Jede Profilieranlage ist mit einem Waschtunnel und einem Abführgerät ausgestattet. Die in den fünf Betriebsmittelzuständen durchgeführten Druckluftvolumenstrommessungen erfolgen durch Ablesen des Messwertes an einem fix verbauten Druckluft-Durchflussmessgerät bei der Profilieranlage P165G. Die Ergebnisse dieser Messung sind in der folgenden Tabelle dargestellt.

BM-Bez.	Abteilung	BMZ1	BMZ2	BMZ3	BMZ4	BMZ5
P165G	RS3 (410)	36 m ³ /h	25 m ³ /h	25 m ³ /h	12 m ³ /h	0 m ³ /h

Tabelle 24: Druckluftvolumenströme der Profilieranlage P165G

Der Druckluftbedarf der vermessenen Profilieranlage P165G (BMZ1) beträgt im Produktionszustand durchschnittlich 36 m³/h. Dieser Druckluftbedarf wird zu 63 Prozent vom Waschtunnel verursacht. In einem Probelauf der Anlage kann durch das Abhängen des Waschtunnels von der Druckluftversorgung festgestellt werden, dass die Profilieranlage ohne diesen im BMZ1 lediglich 13 m³/h Druckluft benötigt. In den Betriebsmittelzuständen 2 und 3 reduziert sich der Druckluftverbrauch auf 25 m³/h. Wie schon erwähnt, wird zwischen den folgenden Betriebsmittelzuständen 4 und 5 aus der Sicht des Druckluftverbrauchs unterschieden. Der zur Kompensation der Leckagen benötigte Druckluftvolumenstrom im Betriebsmittelzustand 4 beträgt 12 m³/h. Da im Betriebsmittelzustand 5 der Druckluftvolumenstrom in die Maschine unterbunden ist, ist der Druckluftverbrauch in diesem gleich null.

Da jede Profilieranlage mit einem Waschtunnel und einem Abführgerät ausgestattet ist und die Instandhaltungsmaßnahmen vergleichbar sind, sind diese hinsichtlich

dem Druckluftverbrauch im jeweiligen Betriebsmittelzustand vergleichbar. Aus diesen Gründen werden die Druckluftvolumenstrommessungen der Profilieranlage P165G auf die anderen 14 Profilieranlagen umgelegt. Folgende Tabelle zeigt den Druckluftbedarf aller Profilieranlagen in den fünf Betriebsmittelzuständen.

BM-Bez.	Abteilung	BMZ1	BMZ2	BMZ3	BMZ4	BMZ5
P127G	RS3 (410)	36 m³/h	25 m³/h	25 m³/h	12 m³/h	0 m³/h
P145G	RS3 (410)	36 m³/h	25 m³/h	25 m³/h	12 m³/h	0 m³/h
P146G	RS3 (410)	36 m³/h	25 m³/h	25 m³/h	12 m³/h	0 m³/h
P147G	RS8 (540)	36 m³/h	25 m³/h	25 m³/h	12 m³/h	0 m³/h
P154G	RS3 (410)	36 m³/h	25 m³/h	25 m³/h	12 m³/h	0 m³/h
P155G	RS3 (410)	36 m³/h	25 m³/h	25 m³/h	12 m³/h	0 m³/h
P156G	RS3 (410)	36 m³/h	25 m³/h	25 m³/h	12 m³/h	0 m³/h
P160G	RS1 (422)	36 m³/h	25 m³/h	25 m³/h	12 m³/h	0 m³/h
P161G	RS1 (422)	36 m³/h	25 m³/h	25 m³/h	12 m³/h	0 m³/h
P162G	RS8 (540)	36 m³/h	25 m³/h	25 m³/h	12 m³/h	0 m³/h
P165G	RS1 (422)	36 m³/h	25 m³/h	25 m³/h	12 m³/h	0 m³/h
P169G	RS8 (540)	36 m³/h	25 m³/h	25 m³/h	12 m³/h	0 m³/h
P173G	RS1 (422)	36 m³/h	25 m³/h	25 m³/h	12 m³/h	0 m³/h
P184G	RS8 (540)	36 m³/h	25 m³/h	25 m³/h	12 m³/h	0 m³/h
P188G	RS8 (540)	36 m³/h	25 m³/h	25 m³/h	12 m³/h	0 m³/h

Tabelle 25: Druckluftvolumenströme aller Profilieranlagen

4.2.3 Leistungsanalyse der Montageanlagen

Der Einsatz von Montageautomaten erfordert als energetischen Input elektrischen Strom und Druckluft. Wie schon erwähnt verfügen die meisten der Montageautomaten sowohl für die elektrische Stromversorgung als auch für die Druckluftversorgung über mehr als nur eine Energiehauptzuleitung. Aufgrund ihrer Baugröße reicht oft ein elektrischer Unterverteiler (UV) bzw. eine Druckluftzuleitung nicht aus.

Die elektrische Leistungsvermessung von Montageautomaten erfolgt auf der Komponentenebene. Dabei werden alle in den Anlagen verbauten Komponenten direkt gemessen. Die Summe der gemessenen Komponenten ergibt die elektrische Leistung der gesamten Anlage. Komponenten können sein:

- Laserschweißgeräte
- Laserkühlungen
- Widerstandsschweißgeräte
- Hydraulikaggregate

- Schaltschränke
- Antriebsschränke

Die Druckluft-Durchflussmessung von Montageautomaten findet ebenfalls auf der Maschinenebene statt, allerdings werden hierbei nicht wie bei den elektrischen Aggregaten die einzelnen Komponenten, sondern der Druckluftbedarf der kompletten Anlage gemessen. Diese energetische Untersuchung von elektrischer Wirkleistung und Druckluft findet in den folgenden für Montageautomaten möglichen Maschinenzuständen statt:

- Automatikbetrieb
- Tippen
- Schutz offen
- Steuerung aus
- Anlage aus

Diese Maschinenzustände werden der Reihe nach den Betriebsmittelzuständen BMZ1 bis BMZ5 zugeteilt.

Betriebsmittelzustand	BMZ-Bezeichnung	Maschinenzustand
BMZ 1	Produktionszustand	Automatikbetrieb
BMZ 2	Wartezustand	Tippen
BMZ 3	Rüszustand	Schutz offen
BMZ 4	Ruhezustand 1	Steuerung aus
BMZ 5	Ruhezustand 2	Anlage aus

Tabelle 26: Zuweisung der Maschinenzustände von Montageautomaten zu den Betriebsmittelzuständen

Der Ablauf bei den an Montageautomaten durchgeführten Messungen von elektrischer Wirkleistung und Druckluftbedarf gestaltet sich im Gegensatz zu denjenigen der Pressen und Profilieranlagen nicht über eine einzige Messung pro Maschine, sondern es wird jeder Maschinenzustand einzeln für ca. 1 Minute gemessen und die Messung anschließend beendet. Im Folgenden wird am Beispiel eines Schweißlasers und einer Druckluftzuleitung die energetische Analyse einer Montageanlage erklärt.

4.2.3.1 Elektrische Leistungsmessung bei Montageautomaten

Die elektrische Leistungsmessung erfolgt beispielhaft am Montagautomaten IF07G. Wie schon eingangs erwähnt werden dabei die in den Automaten verbauten Komponenten mittels Einzelmessungen untersucht. Im Folgenden wird die Leistungsmessung am Beispiel des in der IF07G verbauten Laserschweißgerätes HL3006D gezeigt, wobei die Bezeichnung HL3006D für „Haas Lampenlaser mit 3kW Laserleistung“ steht. Die elektrische Leistungsmessung des Laserschweißgerätes HL3006D wird mit einem elektrischen Leistungsmessgerät durchgeführt. In den folgenden Abbildungen beschreibt die orange Kurve den Verlauf der gemessenen Wirkleistung des Lampenlasers in den fünf Betriebsmittelzuständen.

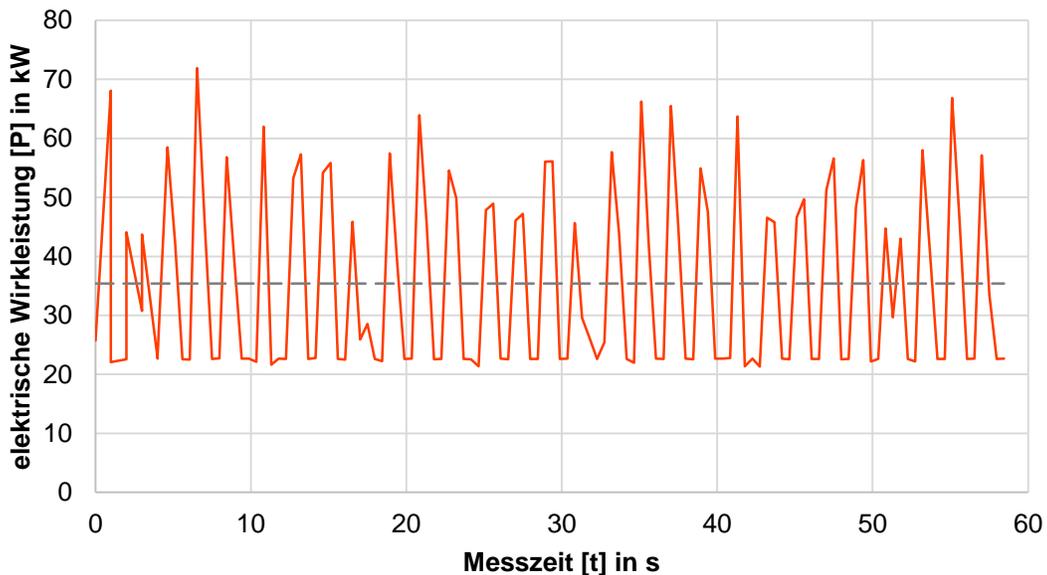


Abbildung 27: Elektrische Leistungsmessung eines 3kW Lampenlasers im Produktionszustand

In der obigen Abbildung ist die Leistungskurve des 3kW Lampenlasers im Betriebsmittelzustand 1 – Produktionszustand – dargestellt. Der Betriebsmittelzustand „Produktionszustand“ entspricht dabei dem Maschinenzustand „Automatikbetrieb“. Die sich wiederholenden Leistungsspitzen, welche bis knapp über 70kW reichen, beschreiben die Entladungen des Lasers durch den Schweißvorgang. Nach jedem dieser Schweißpeaks, fällt die Wirkleistung auf durchschnittlich 22,5kW ab. Für die Bestimmung eines Leistungszustandes des

untersuchten Lampenlasers im Betriebsmittelzustand 1, dient der Mittelwert der bezogenen Wirkleistung über die Messdauer von ca. einer Minute. Dieser liegt für diese Messung bei 35,4 Kilowatt. In der folgenden Abbildung wird die elektrische Leistungsmessung des 3kW Lampenlasers im Betriebsmittelzustand 2 – Wartezustand – beschrieben.

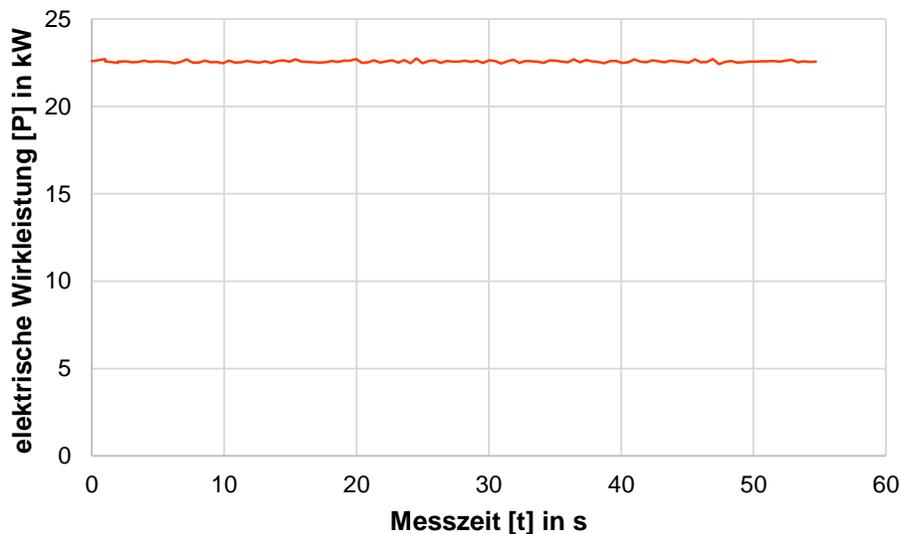


Abbildung 28: Elektrische Leistungsmessung eines 3kW Lampenlasers im Wartezustand

Aus der obigen Leistungsmessung in Abbildung 28 ist zu erkennen, dass der 3kW Lampenlaser im Wartezustand des Automaten einen konstanten Wirkleistungsbezug von durchschnittlich 22,5kW hat. Der Betriebsmittelzustand 2 „Wartezustand“ entspricht dem Maschinenzustand „Tippen“. Dies ist auch jenes Leistungsniveau, auf das die Leistungskurve im Produktionszustand (BMZ1) nach einem Schweißpeak abfällt. Die folgende Abbildung 29 zeigt die elektrische Leistungsmessung des untersuchten 3kW Lampenlasers im Betriebsmittelzustand 3 „Rüstzustand“, welcher dem Maschinenzustand „Schutz offen“ entspricht.

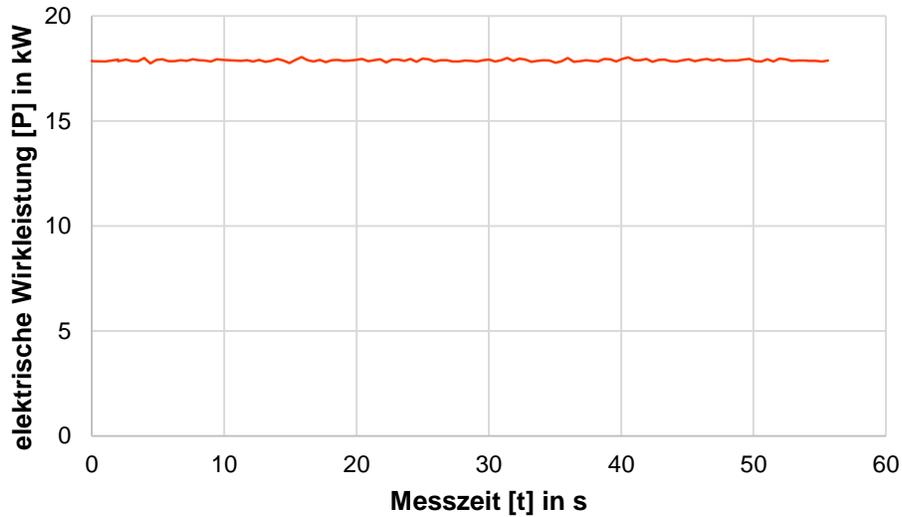


Abbildung 29: Elektrische Leistungsmessung eines 3kW Lampenlasers im Rüstzustand

Ähnlich wie bei der Leistungsmessung im Wartezustand ist der Wirkleistungsbezug des Lasers auch im Rüstzustand konstant. Der in diesem Betriebszustand benötigte elektrische Leistungsbedarf liegt bei durchschnittlich 17,9kW. Aus energetischer Sicht besteht kein Unterschied zwischen Betriebsmittelzustand 4 und 5. Deshalb gilt die folgende elektrische Leistungsmessung des 3kW Lampenlasers sowohl für den Ruhezustand 1 als auch für Ruhezustand 2 des untersuchten Montagautomaten

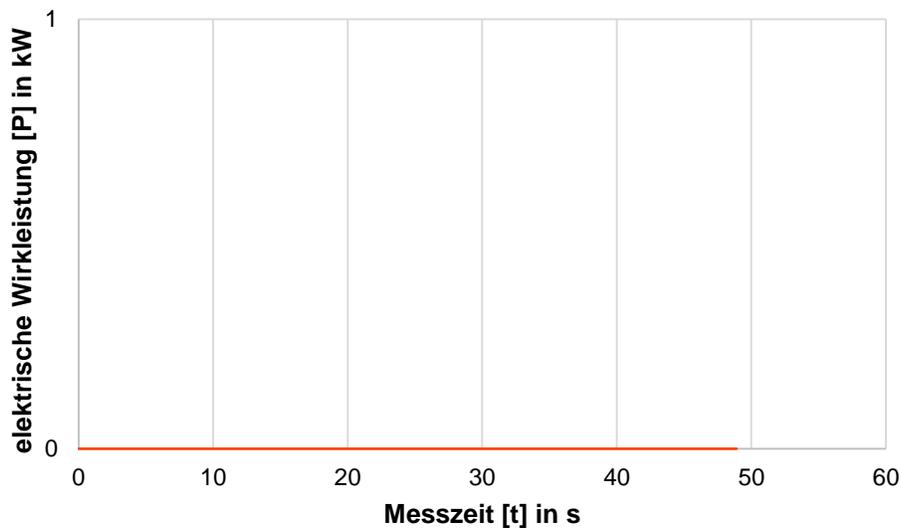


Abbildung 30: Elektrische Leistungsmessung eines 3kW Lampenlasers im Ruhezustand

Der Betriebsmittelzustand 4 „Ruhezustand 1“ entspricht dem Maschinenzustand „Steuerung aus“ und der Betriebsmittelzustand 5 „Ruhezustand 2“ entspricht dem Maschinenzustand „Anlage aus“.

Wie aus obiger Abbildung 30 zu erkennen ist, ist der elektrische Leistungsbedarf in den Betriebsmittelzuständen 4 und 5 gleich null. Somit trägt der Laser in diesen beiden Zuständen nichts zum gesamten elektrischen Energieverbrauch des untersuchten Montageautomaten bei. Anschließend sind die Ergebnisse der elektrischen Leistungsuntersuchung des Lampenlasers HL3006 tabellarisch dargestellt. Da dieser Laser über eine externe Laserkühlung verfügt und diese für den Betrieb des Lasers benötigt wird, muss diese bei der elektrischen Leistungsanalyse des Laserschweißgerätes HL3006 mitberücksichtigt werden. Also wird dieselbe elektrische Leistungsanalyse wurde ebenfalls für die Laserkühlung durchgeführt und gemeinsam mit den Ergebnissen aus der oben durchgeführten Leistungsanalyse des Lasers in der folgenden Tabelle 27 dargestellt.

	BMZ1	BMZ2	BMZ3	BMZ4	BMZ5
Laser (HL3006)	35,4 kW	22,6 kW	17,9 kW	0,0 kW	0,0 kW
Laserkühlung (HL3006)	16,3 kW	18,1 kW	18,1 kW	0,0 kW	0,0 kW
SUMME	51,7 kW	40,6 kW	36,0 kW	0,0 kW	0,0 kW

Tabelle 27: Elektrische Leistungswerte des Lampenlasers HL3006

Auffällig bei der Leistungsanalyse der Laserkühlung ist, dass diese im Warte- und Rüstzustand mehr Leistung benötigt, als im Produktionszustand. Der Grund hierfür ist, dass die Energie des aufbereiteten Laserstrahles, welche während des Schweißvorganges an das Werkstück abgegeben werden würde, in den BMZ 2 und 3 im Absorber aufgenommen werden muss.

Neben einem Laser und einer Laserkühlung sind im untersuchten Montageautomaten IF07G noch ein Widerstandsschweißgerät, ein Hydraulikaggregat, ein Antriebsschrank und ein Schaltschrank verbaut. Jede dieser Komponenten wurde nach demselben Schema wie der im obigen Beispiel beschriebene Lampenlaser HL3006 energetisch untersucht. Die folgende Tabelle zeigt diese Ergebnisse.

	BMZ1	BMZ2	BMZ3	BMZ4	BMZ5
Laser (HL3006)	35,4 kW	22,6 kW	17,9 kW	0,0 kW	0,0 kW
Laserkühlung (HL3006)	16,3 kW	18,1 kW	18,1 kW	0,0 kW	0,0 kW
Widerstandsschweißgerät	0,5 kW	0,2 kW	0,2 kW	0,1 kW	0,1 kW
Hydraulikaggregat	7,5 kW	3,6 kW	0,0 kW	0,0 kW	0,0 kW
Antriebsschrank (AS1)	2,6 kW	0,8 kW	0,4 kW	0,0 kW	0,0 kW
SchaLTS-S5schrank (SS1)	11,9 kW	8,2 kW	6,6 kW	0,0 kW	0,0 kW
SUMME	74,1 kW	53,5 kW	43,3 kW	0,1 kW	0,1 kW

Tabelle 28: Elektrischen Leistungswerte der IF07G

In Tabelle 28 ist zu erkennen, dass die Betriebsmittelzustände 1, 2 und 3 die elektrisch leistungsintensivsten sind. Im Vergleich zu diesen benötigen die Betriebsmittelzustände 4 und 5, in welchen sich die elektrischen Verbraucher der Anlage im Ruhezustand 1 oder 2 befinden, so gut wie keine elektrische Wirkleistung. Außerdem zeigt die obige Tabelle, wie sich die Gesamtleistung der IF07G für jeden Betriebsmittelzustand verändert und wie sich diese aus der Summe der Einzelleistungen von den in der Maschine verbauten Komponenten zusammensetzt. Da die Steuerungsart einen starken Einfluss auf die benötigte elektrische Leistung hat, wird die folgende Regressionsanalyse der elektrischen Leistungsmessung für die Montageautomaten, abhängig von der Steuerungstype, getrennt durchgeführt. Es werden folgende vier Steuerungskonzepte bei Montageautomaten eingesetzt:

- LCS (Low-Cost-System): erstes starr verkettetes System, dezentrale Steuerung (B&R)
- S7: lineares Transfersystem, Förderband, dezentrale Steuerung
- LTS-S5 (LT360-S): lineares Transfersystem starr verkettet, zentrale Steuerung (Siemens S5-135U – Multiprozessorsystem 16 CPU's)
- LTS-S5-LTS-CI: lineares Transfersystem starr verkettet, zentrale Steuerung (PC-Steuerung Beckhoff-TwinCat, Vernetzte Verbundsysteme)

Die Montageautomaten mit einer LCS- bzw. S7- Steuerung werden in dieser Arbeit aufgrund ihrer geringen Anzahl und aus Gründen der Ähnlichkeit den Montageautomaten mit einer LTS-S5-S5-Steuerung zugeordnet. Folgende Tabelle 29 zeigt die Messergebnisse der 21 untersuchten LTS-CI-Montageautomaten.

BM-Bez.	Abteilung	BMZ1	BMZ2	BMZ3	BMZ4	BMZ5
IP40G	RS5 (532)	1,12 kW	0,99 kW	0,88 kW	0,62 kW	0,62 kW
IL85G	RS3 (416)	1,36 kW	0,85 kW	0,75 kW	0,54 kW	0,54 kW
IP29E	RS5 (532)	2,56 kW	1,14 kW	0,91 kW	0,72 kW	0,72 kW
IP29G	RS5 (532)	3,07 kW	2,06 kW	1,29 kW	0,99 kW	0,99 kW
IP31G	RS5 (532)	3,41 kW	2,18 kW	1,40 kW	1,07 kW	1,07 kW
IL87G	RS3 (416)	3,75 kW	1,94 kW	1,35 kW	0,68 kW	0,68 kW
IP08G	RS5 (530)	3,99 kW	3,47 kW	1,68 kW	1,00 kW	1,00 kW
IP35G	RS1 (423)	4,11 kW	2,28 kW	1,62 kW	1,09 kW	1,09 kW
IL77G	RS5 (530)	4,14 kW	1,91 kW	1,35 kW	1,50 kW	1,50 kW
IP33G	RS5 (532)	6,57 kW	4,64 kW	2,38 kW	1,72 kW	1,72 kW
IP09G	RS8 (543)	9,52 kW	7,30 kW	5,87 kW	2,94 kW	2,94 kW
IP32G	RS5 (532)	11,25 kW	8,77 kW	4,39 kW	2,45 kW	2,45 kW
IP34G	RS5 (532)	18,81 kW	13,79 kW	5,10 kW	2,02 kW	2,02 kW
IL28G	RS5 (530)	33,87 kW	15,84 kW	7,45 kW	3,69 kW	3,69 kW
IL91L	RS6 (520)	41,24 kW	23,06 kW	14,79 kW	2,53 kW	2,53 kW
IL91R	RS6 (520)	41,24 kW	23,06 kW	14,79 kW	2,53 kW	2,53 kW
IL65G	RS7 (512)	42,88 kW	19,02 kW	8,34 kW	3,34 kW	3,34 kW
IL96G	RS7 (512)	43,12 kW	17,10 kW	8,47 kW	3,55 kW	3,55 kW
IL30G	RS5 (530)	66,64 kW	54,22 kW	36,71 kW	1,78 kW	1,78 kW
IL64L	RS6 (520)	80,22 kW	49,27 kW	32,37 kW	1,74 kW	1,74 kW
IL64R	RS6 (520)	80,22 kW	49,27 kW	32,37 kW	1,74 kW	1,74 kW

Tabelle 29: Elektrische Leistungswerte der LTS-CI-Montageautomaten

Die nachstehende Tabelle 30 zeigt eine Ergebnisübersicht der elektrischen Leistungsmessung der 14 untersuchten LTS-S5-Montageautomaten.

BM-Bez.	Abteilung	BMZ1	BMZ2	BMZ3	BMZ4	BMZ5
IF49G	RS3 (416)	0,94 kW	0,57 kW	0,50 kW	0,02 kW	0,02 kW
IF98G	RS1 (423)	2,28 kW	1,24 kW	0,91 kW	0,01 kW	0,01 kW
IL02G	RS3 (416)	1,04 kW	0,80 kW	0,61 kW	0,02 kW	0,02 kW
IL03G	RS3 (416)	0,76 kW	0,62 kW	0,49 kW	0,01 kW	0,01 kW
IL46G	RS7 (512)	3,14 kW	1,44 kW	1,26 kW	0,01 kW	0,01 kW
IL26G	RS8 (542)	14,79 kW	14,79 kW	2,83 kW	0,01 kW	0,01 kW
IF94G	RS8 (542)	17,39 kW	9,03 kW	8,00 kW	0,06 kW	0,06 kW
IL06G	RS5 (530)	53,80 kW	45,91 kW	30,44 kW	0,06 kW	0,06 kW
IF89G	RS8 (542)	24,81 kW	11,16 kW	5,67 kW	0,06 kW	0,06 kW
IF65L	RS6 (520)	67,16 kW	45,36 kW	28,47 kW	0,04 kW	0,04 kW
IF65R	RS6 (520)	67,16 kW	45,36 kW	28,47 kW	0,04 kW	0,04 kW
IF84R	RS6 (520)	74,67 kW	48,39 kW	28,75 kW	0,03 kW	0,03 kW
IF84L	RS6 (520)	74,67 kW	48,39 kW	28,75 kW	0,03 kW	0,03 kW
IF07G	RS1 (423)	74,12 kW	53,46 kW	43,26 kW	0,11 kW	0,11 kW

Tabelle 30: Elektrische Leistungswerte der LTS-S5- Montageautomaten

Neben der elektrischen Energie benötigen Montageautomaten für ihren Betrieb auch Druckluft. Im Folgenden wird die Erfassung des Druckluftbedarfes in den verschiedenen Betriebsmittelzuständen bei Montageautomaten beschrieben.

4.2.3.2 Volumenstrommessungen der Druckluft bei Montageautomaten

Je nach Alter und Zweck des jeweiligen Montageautomaten ist eine bestimmte Anzahl Druckluftzylinder, welche die Handhabungsbewegungen der Maschine ermöglichen, in diesen verbaut. Neuere Anlagen verfügen über eine eher geringe Zahl an Druckluftanwendungen, da diese zunehmend durch Servoantriebe ersetzt werden.

Die hier dargestellten Ergebnisse der Volumenstrommessung von Druckluft wurden am Montageautomaten IL64L durchgeführt. Dieser Automat verfügt über zwei Druckluftzuleitungen, wobei hier nur die Ergebnisse der Druckluftzuleitung 1 beschrieben werden. Die Messergebnisse für die Druckluftzuleitung 2 unterscheiden sich zwar von denen der Druckluftzuleitung 1, jedoch ist der Messablauf derselbe.

Wie auch bei der elektrischen Leistungsmessung erfolgt die Volumenstrommessung des Druckluftbedarfes in den für Montageautomaten möglichen Maschinenzuständen Automatikbetrieb, Tippen, Schutz offen, Steuerung aus und Anlage aus. bzw. in den Betriebsmittelzuständen BMZ1 bis BMZ5. Die folgende Abbildung zeigt den Druckluftbedarf der Druckluftzuleitung 1, im Betriebsmittelzustand 1 des Montageautomaten IL64L.

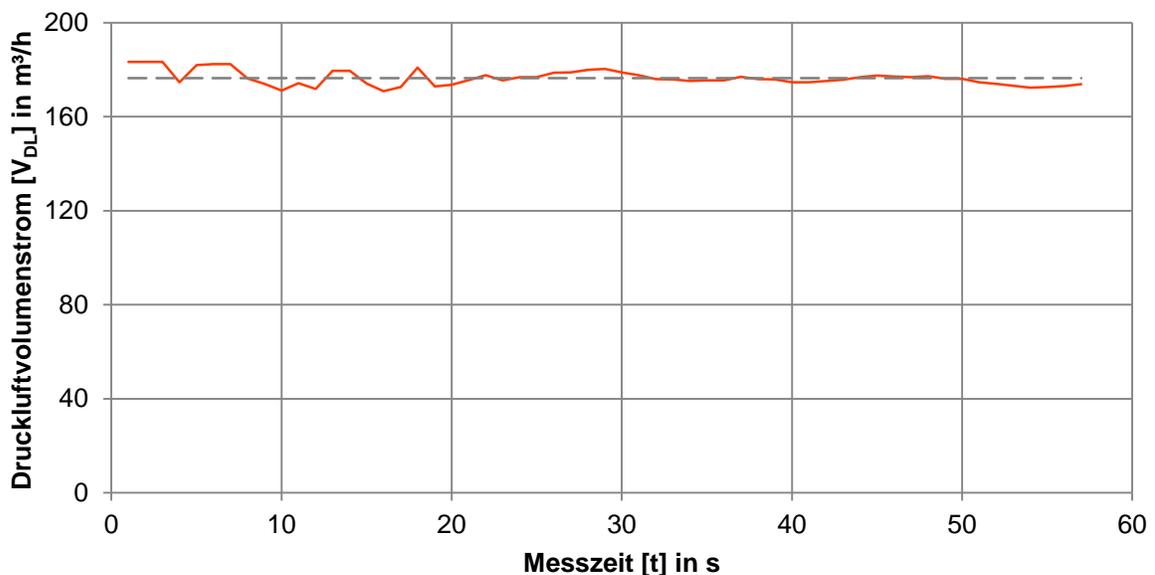


Abbildung 31: Volumenstrommessung der Druckluftleitung 1 der IL64L im BMZ1

Die Messdauer der Volumenstrommessung im stationären Betriebsmittelzustand 1 beträgt knapp eine Minute und der Druckluftbedarf schwankt währenddessen nur sehr wenig um den Durchschnitt von 176 m³/h. Der folgende Schritt im Messablauf ist die Volumenstrommessung der Druckluftleitung 1 im Betriebsmittelzustand 2 (BMZ2) und wird in folgender Grafik veranschaulicht.

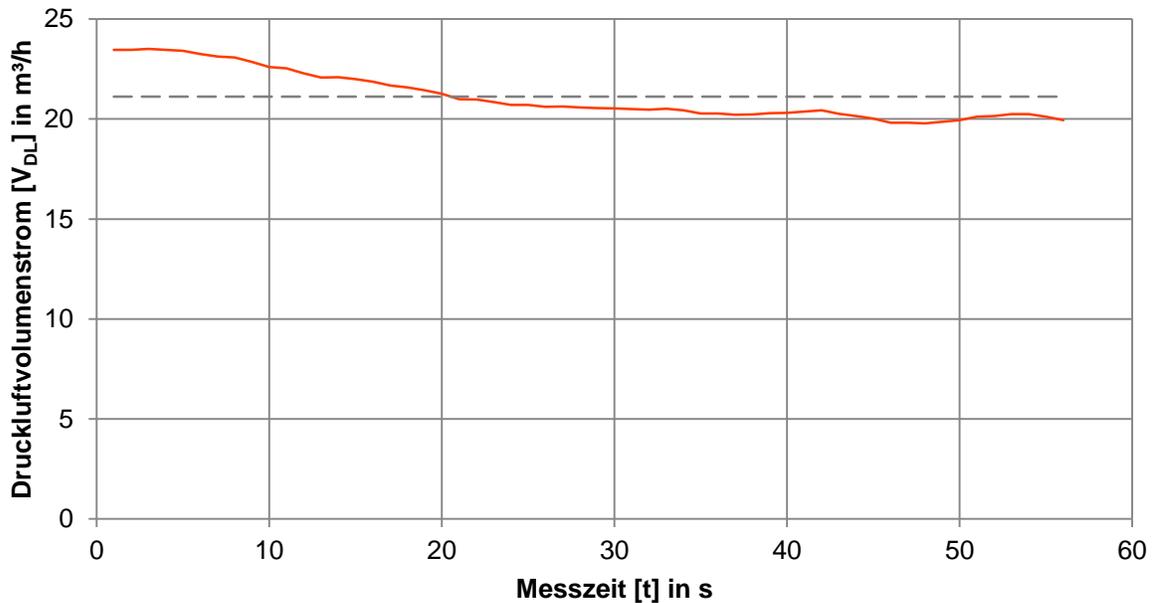


Abbildung 32: Volumenstrommessung der Druckluftleitung 1 der IL64L im BMZ2

Nach Einnahme des Wartezustandes wird auch hier der Druckluftvolumenstrom für eine Minute gemessen. Das Ergebnis dieser Messung ist durch die orange Kurve in der obigen Abbildung 32 dargestellt. Man erkennt, dass der Druckluftbedarf dieser Anlage zum Beginn der Messung sinkt und sich zum Schluss bei ca. 20 m³/h einpendelt. Der Mittelwert dieser Werte liegt bei etwa 21 m³/h. Im nächsten Schritt wird der Druckluftvolumenstrom im Betriebsmittelzustand 3 – Rüstzustand – untersucht. Die folgende Abbildung zeigt diese Messwerte.

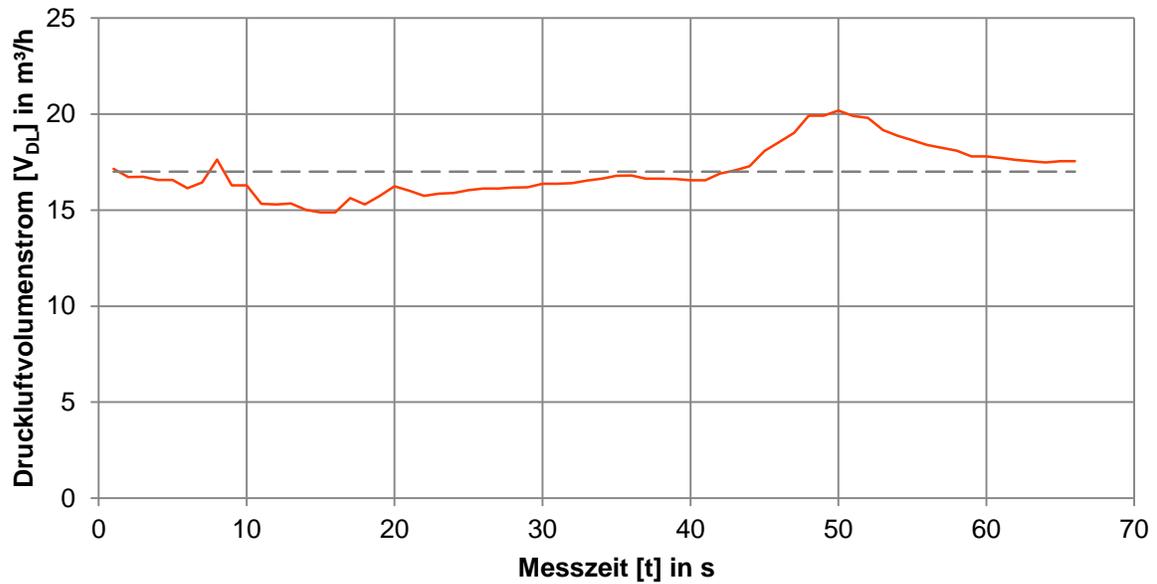


Abbildung 33: Volumenstrommessung der Druckluftleitung 1 der IL64L im BMZ3

Nach Einnahme des Rüstzustandes bei der Montageanlage IL64L liegt der Druckluftbedarf ziemlich konstant bei dessen Mittelwert von ungefähr 17 m³/h.

Abschließend wird die untersuchte Montageanlage in den Ruhezustand 1 versetzt. Dazu wird die Maschinensteuerung ausgeschaltet, die Wartungseinheit blieb aber aufgedreht. Dieser Maschinenzustand ermöglicht die Messung der im Druckluftsystem des Betriebsmittels vorhandenen Leckagen. Die folgende Abbildung 34 zeigt die Volumenstrommessung der Druckluftleitung 1 der IL64L im Betriebsmittelzustand 4.

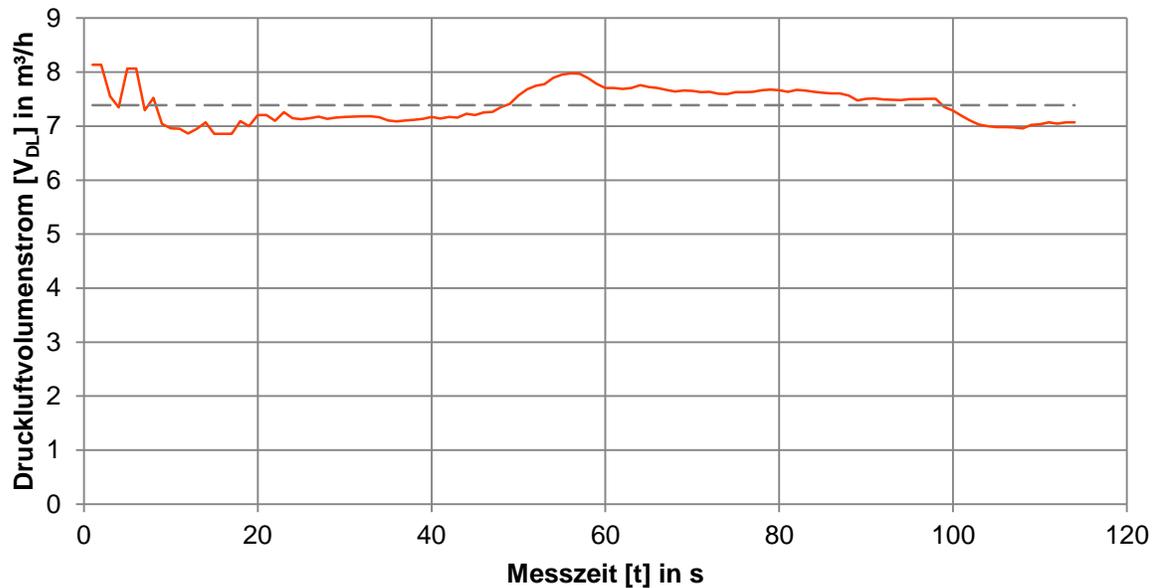


Abbildung 34: Volumenstrommessung der Druckluftleitung 1 der IL64L im BMZ4

Es ist zu erkennen, dass die untersuchte Maschine über die Druckluftzuleitung 1 einen konstanten Leckage-Volumenstrom an Druckluft von durchschnittlich 7 m³/h besitzt. Durch anschließendes Zudrehen der Wartungseinheit 1 wird der Volumenstrom über die Druckluftzuleitung 1 verhindert und die Montageanlage befindet sich im Betriebsmittelzustand 5 – dem Ruhezustand 2. Um den Druckluftbedarf des untersuchten Montageautomaten komplett zu erfassen, muss die Druckluftzuleitung 2 nach demselben Prüfschema analysiert werden. Die Summe beider Volumenstrommessungen je Betriebsmittelzustand ergibt den Gesamtbedarf der Anlage pro Betriebsmittelzustand. In der folgenden Tabelle sind die Ergebnisse der Volumenstrommessung der Druckluftzuleitungen 1 und 2 für jeden Betriebsmittelzustand der IL64L dargestellt und zum Gesamtdruckluftverbrauch pro Betriebsmittelzustand zusammengefasst.

	BMZ1	BMZ2	BMZ3	BMZ4	BMZ5
Druckluftzuleitung 1	176,5 m³/h	21,1 m³/h	17,0 m³/h	7,4 m³/h	0,0 m³/h
Druckluftzuleitung 2	96,2 m³/h	8,5 m³/h	7,8 m³/h	4,6 m³/h	0,0 m³/h
SUMME	272,7 m³/h	29,6 m³/h	24,8 m³/h	12,0 m³/h	0,0 m³/h

Tabelle 31: Ergebnisübersicht der Druckluft-Volumenstrommessung der IL64L

Diese Druckluft-Durchflussmessung wurde für 31 ausgewählte Montageautomaten in den Betriebsmittelzuständen BMZ1 bis BMZ4 durchgeführt. Die folgende Tabelle 32 zeigt die Ergebnisübersicht der Druckluftanalyse dieser 31 Montageautomaten.

BM-Bez.	Abteilung	BMZ1	BMZ2	BMZ3	BMZ4	BMZ5
IP34G	RS5 (532)	218,2 m³/h	6,7 m³/h	7,7 m³/h	0,0 m³/h	0,0 m³/h
IP29G	RS5 (532)	185,0 m³/h	8,2 m³/h	7,8 m³/h	0,0 m³/h	0,0 m³/h
IP31G	RS5 (532)	152,4 m³/h	7,0 m³/h	7,0 m³/h	0,0 m³/h	0,0 m³/h
IP29E	RS5 (532)	79,7 m³/h	1,7 m³/h	1,7 m³/h	0,0 m³/h	0,0 m³/h
IP46L	KB (432)	73,4 m³/h	2,4 m³/h	1,7 m³/h	0,0 m³/h	0,0 m³/h
IP46R	KB (432)	13,4 m³/h	0,4 m³/h	0,5 m³/h	0,0 m³/h	0,0 m³/h
IP37G	KB (432)	310,8 m³/h	8,1 m³/h	7,0 m³/h	0,0 m³/h	0,0 m³/h
IF26G	RS3 (416)	70,8 m³/h	3,9 m³/h	3,9 m³/h	0,0 m³/h	0,0 m³/h
IP32G	RS5 (532)	222,0 m³/h	18,6 m³/h	18,4 m³/h	0,0 m³/h	0,0 m³/h
IP33G	RS5 (532)	75,0 m³/h	8,6 m³/h	8,6 m³/h	0,0 m³/h	0,0 m³/h
IP35G	RS1 (423)	144,0 m³/h	8,4 m³/h	8,3 m³/h	0,0 m³/h	0,0 m³/h
IP40G	RS5 (532)	174,0 m³/h	8,8 m³/h	8,6 m³/h	0,0 m³/h	0,0 m³/h
IP07G	RS5 (530)	9,7 m³/h	0,3 m³/h	0,2 m³/h	0,1 m³/h	0,0 m³/h
IF84R	RS6 (520)	305,6 m³/h	17,8 m³/h	19,5 m³/h	4,4 m³/h	0,0 m³/h
IP09G	RS8 (543)	314,5 m³/h	54,9 m³/h	53,5 m³/h	19,3 m³/h	0,0 m³/h
IL96G	RS7 (512)	274,6 m³/h	39,1 m³/h	35,6 m³/h	13,0 m³/h	0,0 m³/h
IL64L	RS6 (520)	272,7 m³/h	29,6 m³/h	24,8 m³/h	12,0 m³/h	0,0 m³/h
IF07G	RS1 (423)	250,7 m³/h	32,3 m³/h	31,5 m³/h	11,1 m³/h	0,0 m³/h
IF65L	RS6 (520)	254,5 m³/h	24,8 m³/h	26,2 m³/h	24,2 m³/h	0,0 m³/h
IF65R	RS6 (520)	210,4 m³/h	21,8 m³/h	21,5 m³/h	10,1 m³/h	0,0 m³/h
IL64R	RS6 (520)	200,1 m³/h	13,7 m³/h	11,7 m³/h	2,6 m³/h	0,0 m³/h
IL87G	RS3 (416)	188,9 m³/h	44,0 m³/h	42,9 m³/h	11,2 m³/h	0,0 m³/h
IP08G	RS5 (530)	174,1 m³/h	6,9 m³/h	6,4 m³/h	1,2 m³/h	0,0 m³/h
IF70R	RS6 (520)	178,5 m³/h	12,9 m³/h	11,4 m³/h	7,2 m³/h	0,0 m³/h
IL91L	RS6 (520)	163,1 m³/h	54,1 m³/h	53,8 m³/h	13,7 m³/h	0,0 m³/h
IL91R	RS6 (520)	163,1 m³/h	54,1 m³/h	53,8 m³/h	13,7 m³/h	0,0 m³/h
IF70L	RS6 (520)	134,6 m³/h	6,1 m³/h	6,0 m³/h	1,6 m³/h	0,0 m³/h
IL26G	RS8 (542)	93,7 m³/h	19,2 m³/h	16,8 m³/h	5,5 m³/h	0,0 m³/h
IL85G	RS3 (416)	71,7 m³/h	8,0 m³/h	8,0 m³/h	2,3 m³/h	0,0 m³/h
IF49G	RS3 (416)	44,6 m³/h	15,0 m³/h	15,1 m³/h	5,0 m³/h	0,0 m³/h
IL63G	RS1 (423)	28,5 m³/h	4,4 m³/h	4,5 m³/h	1,6 m³/h	0,0 m³/h

Tabelle 32: Druckluft-Durchflussmessungen der 31 Montageautomaten

Aus der obigen Ergebnisübersicht der Durchflussmessungen der 31 untersuchten Montageautomaten kann der Durchfluss je Betriebszustand entnommen werden. Im folgenden Kapitel wird beschrieben, wie diese Messungen mit Hilfe einer Regressionsanalyse auf nicht vermessene Montageautomaten umgelegt werden.

4.2.3.3 Regressionsanalyse der Messdaten

Dieses Unterkapitel besteht aus drei Teilen. Im ersten Teil wird sowohl die allgemeine Theorie der Regressionsanalyse, als auch die Methodik der

durchgeführten Regressionsanalyse der Messwerte der energetisch untersuchten Montageautomaten beschrieben. Im zweiten Teil wird auf die Ergebnisse der Regressionsanalyse der elektrischen Leistungswerte von LTS-CI- und LTS-S5-Montageautomaten eingegangen. Abschließend werden im dritten Unterkapitel die Regressionsstatistiken der durchgeführten Regressionen der Druckluftvolumenstrommessungen gezeigt.

Regression der Leistungsdaten von Montageautomaten

Mit einer Anzahl von 116 Montageautomaten ist die Montagetechnologie diejenige Produktionstechnologie mit den meisten Betriebsmitteln im Werk 4. Eine vollständige Energieanalyse aller Montageautomaten wäre im Rahmen dieser Diplomarbeit nicht durchführbar. Um dennoch eine energetische Analyse der Montagetechnologie durchführen zu können, werden die Ergebnisse der energetisch untersuchten Montageautomaten, welche in Tabelle 29 und Tabelle 30 aufgelistet sind, mit Hilfe einer Regressionsanalyse auf nicht untersuchte Maschinen übertragen. Um zu bestimmen, welche Art der Regressionsanalyse für diese Untersuchungen zweckmäßig ist, wird vorweg untersucht, ob die unabhängigen X-Variablen einen linearen bzw. einen nichtlinearen Einfluss auf die abhängige Y-Variable ausüben. Dabei wird zuerst der Einfluss der Anzahl der Elektromotoren auf die elektrische Leistungsaufnahme sowie der Einfluss der Anzahl der Druckluftzylinder auf den Druckluftverbrauch der Montageautomaten untersucht. Da der Großteil der in den Montageautomaten verbauten Elektromotoren und Druckluftzylinder von ähnlicher Baugröße ist, ist zu erwarten, dass die benötigte elektrische Leistung bzw. der Druckluftbedarf mit der Anzahl der Elektromotoren bzw. Druckluftzylinder linear ansteigt. In der folgenden Abbildung wird die Abhängigkeit von elektrischer Leistung und dem Druckluftvolumenstrom im Betriebsmittelzustand 1 der Montageautomaten von der Anzahl der in diesen verbauten Elektromotoren bzw. Druckluftzylindern dargestellt.

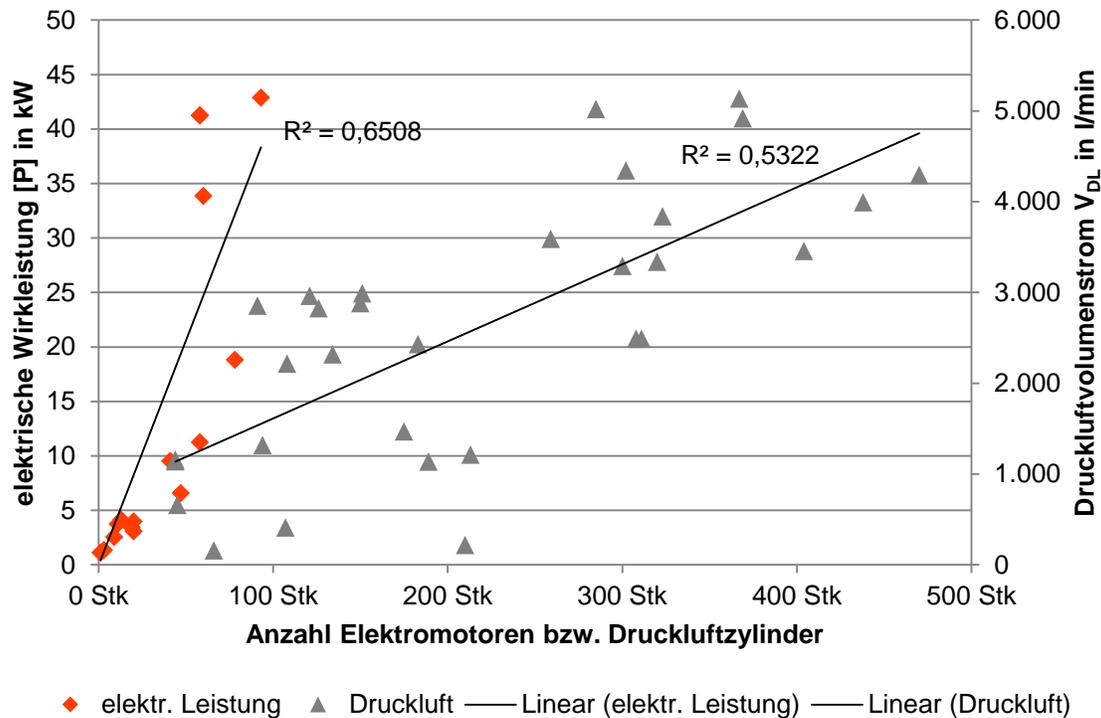


Abbildung 35: Abhängigkeit elektr. Leistung und Druckluftvolumenstrom im Betriebsmittelzustand 1 von der Anzahl der Elektromotoren bzw. Druckluftzylindern

Wie erwartet ist in der obigen Abbildung zum einen eine lineare Abhängigkeit der elektrischen Leistung von der Anzahl der Elektromotoren und zum anderen des Druckluftvolumenstromes von der Anzahl der Druckluftzylinder zu erkennen. Diese linearen Abhängigkeiten werden durch jeweils eine Regressionsgerade beschrieben, welche mit ihrem jeweiligen Bestimmtheitsmaß R^2 versehen sind. Das Bestimmtheitsmaß bietet zudem die Möglichkeit, den durch die Varianz des X-Variablen hervorgerufenen Varianzanteils der Y-Variablen angeben zu können. In unserem Beispiel (obige Abbildung) ergibt sich ein Bestimmtheitsmaß für die Anzahl an Elektromotoren von $R^2=0,65$. Inhaltlich bedeutet dies, dass 65% der Varianz der elektrischen Wirkleistungsaufnahme von Montageautomaten im Betriebsmittelzustand 1 (Y-Variable) durch die „Varianz der Elektromotoren“ (X-Variable) erklärt werden kann. Die andere Regressionsgerade in der obigen Abbildung, welche den Zusammenhang zwischen dem benötigten Druckluftvolumenstrom und der Anzahl an Druckluftzylindern beschreibt, besitzt eine Anpassungsgüte von $R^2 = 0,53$. Die Varianz der unabhängigen X-Variablen (Anzahl

Druckluftzylinder) erklärt somit zu 53% die Varianz der abhängigen Y-Variable (Druckluftvolumenstrom im BMZ1). Die Größe des Bestimmtheitsmaßes R^2 beider Regressionsgeraden entspricht einer mittleren Anpassungsgüte, welche zum einen auf eine kleine Stichprobengröße und zum anderen auf noch weitere erklärende unabhängige Variablen zurückzuführen ist.

Ein weiterer Einflussfaktor, welcher im kausalen Zusammenhang mit dem elektrischen Leistungsbedarf bzw. Druckluftbedarf von Montageautomaten stehen könnte, ist die Taktzeit der Maschinen. Die folgende Abbildung zeigt den elektrischen Leistungs- sowie den Druckluftbedarf von Montageautomaten in Abhängigkeit der Taktzeit.

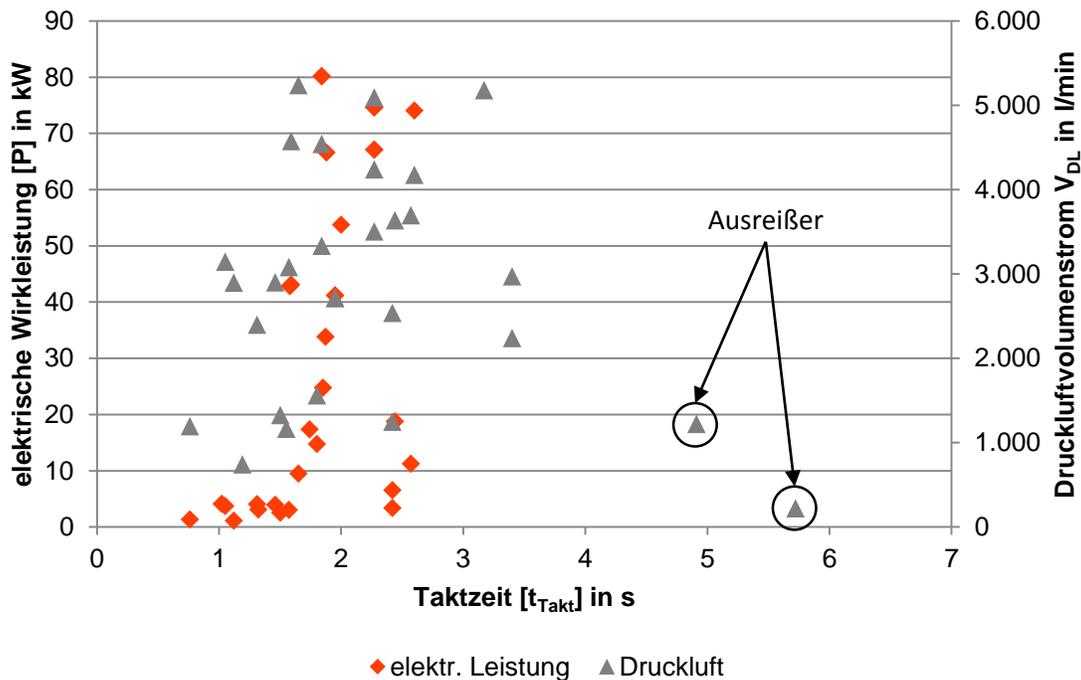


Abbildung 36: Einfluss der Taktzeit auf den Wirkleistungs- bzw. Druckluftbedarf von Montageautomaten im Betriebsmittelzustand 1

Beim Einfluss der Taktzeit auf die elektrische Wirkleistungsaufnahme bzw. den Druckluftbedarf wird davon ausgegangen, dass umso mehr Wirkleistung bzw. Druckluft die Montageautomaten benötigen je niedriger die Taktzeit der Maschinen ist. Diese Annahme wird aber durch die Betrachtung der obigen Abbildung verworfen, da daraus ersichtlich wird, dass eine Montageanlage mit einer niedrigen

Taktzeit sowohl einen kleinen als auch einen großen Wirkleistungs- bzw. Druckluftbedarf haben kann. Zwischen der Taktzeit und dem Wirkleistungs- bzw. Druckluftbedarf der Montageautomaten gibt es somit keinen linearen Zusammenhang, weshalb diese in der Regressionsanalyse nicht als unabhängige Variable berücksichtigt wird.

Für den elektrischen Leistungsbezug von Montageautomaten gibt es neben der unabhängigen Variable „Anzahl Elektromotoren“ noch weitere Einflussgrößen. Der Einsatz von besonders stromintensiven Geräten wie Laser- bzw. Widerstandsschweißgeräten, Hydraulikaggregaten oder Robotern beeinflusst den Bedarf erwartungsgemäß sehr stark. Die folgende Tabelle fasst die unabhängigen Variablen für die folgenden Regressionsanalysen des elektrischen Wirkleistungs- und Druckluftbedarfs zusammen.

	Elektrischer Wirkleistungsbedarf	Druckluftbedarf
x ₁	Elektromotoren	Druckluftzylinder
x ₂	Laserschweißgerät (LSG)	-
x ₃	Widerstandsschweißgerät (WSG)	-
x ₄	Hydraulikaggregat	-
x ₅	Roboter	-

Tabelle 33: Unabhängige Variablen der Regression der elektrischen Leistungsmessungen bzw. der Druckluftvolumenstrommessung

Die Untersuchung der elektrischen Leistungsmessungen der Montageautomaten erfolgt also anhand einer multivariaten linearen Regressionsanalyse mit den unabhängigen Variable „Elektromotoren“, „Laser- bzw. Widerstandsschweißgerät“, „Hydraulikaggregat“ und „Roboter“. Die Analyse des Druckluftverbrauchs von Montageautomaten erfolgt mittels einer bivariaten linearen Regressionsanalyse, da lediglich die unabhängige Variable „Druckluftzylinder“ im kausalen Zusammenhang mit der Y-Variable steht.

4.2.3.3.1 Regressionsanalyse der elektrischen Leistungsmessungen von Montageautomaten

Die Regression der Wirkleistungsaufnahme erfolgt getrennt für Montageautomaten mit einer stromintensiven Technologie und solche, die lediglich über Elektromotoren verfügen. Zusätzlich wird bei der Regression der Wirkleistungsaufnahme zwischen

Montageautomaten mit einer LTS-CI-Steuerung und solchen mit einer LTS-S5-Steuerung unterschieden, da sich diese grundlegend im Regelungsverhalten der elektrischen Antriebe und somit in ihrer elektrischen Leistungsaufnahme unterscheiden. Neben der LTS-CI- und LTS-S5-Steuerungstechnologie gibt es im Werk 4 noch 6 Montageautomaten mit einer LCS-Steuerung und 1 Anlage mit einer S7-Steuerung. Diese sind in ihrer elektrischen Leistungscharakteristik den LTS-S5-S5-Montageanlagen sehr ähnlich, weshalb diese gemeinsam untersucht werden. Die in den folgenden Regressionen der elektrischen Wirkleistungsaufnahmen basieren auf der Messung von 21 Montageautomaten mit einer LTS-CI-Steuerung bzw. 14 Montageautomaten mit einer LTS-S5-S5-Steuerung. Der Stichprobenumfang für die Regressionsanalyse umfasst somit 37,5% aller LTS-CI- und 23,3% aller LTS-S5-Montageautomaten im Werk 4 der Julius Blum GmbH.

Der eigentlich erforderliche Stichprobenumfang für die Regression der elektrischen Leistungsmessung von Montageautomaten wird anhand der im vorherigen Kapitel beschriebenen Formel (2) und auf Basis der Messergebnisse der 21 LTS-CI- und 14 LTS-S5- Montageautomaten berechnet. Für ein Signifikanzniveau von 90% und einem relativen Fehler von $r^*=10\%$ ergibt sich ein erforderlicher Stichprobenumfang von $n_{LTS-CI}=320$ Stichproben für die LTS-CI-Montageautomaten (LTS-CI-MoA) und $n_{LTS-S5}=225$ Stichproben für die LTS-S5-Montageautomaten (LTS-S5-MoA). Da aber nicht in diesem Umfang Messergebnisse vorliegen, wird die Regressionsanalyse anhand der Messergebnisse der durchgeführten energetischen Untersuchungen der 21 LTS-LTS-CI- bzw. 14 LTS-S5-Montageautomaten durchgeführt. Diese Messergebnisse sind bereits im Kapitel 4.2.3 in Tabelle 29 und Tabelle 30 dargestellt.

LTS-CI-MoA im BMZ 1, ohne stromintensiven Technologien

Die Regressionsanalyse der elektrischen Leistung von LTS-CI-Montageautomaten ohne stromintensiven Technologien im BMZ1 erfolgt auf Basis der folgenden Werte.

BM-Bez.	BMZ1	Elektromotoren	Laser-schweißgerät	Widerstands-schweißgerät	Hydraulik-aggregat	Roboter
IP40G	1,12 kW	1 Stk	0	0	0	0
IL85G	1,36 kW	3 Stk	0	0	0	0
IP29E	2,56 kW	9 Stk	0	0	0	0
IP29G	3,07 kW	20 Stk	0	0	0	0
IP31G	3,41 kW	19 Stk	0	0	0	0
IL87G	3,75 kW	11 Stk	0	0	0	0
IP08G	3,99 kW	20 Stk	0	0	0	0
IP35G	4,11 kW	18 Stk	0	0	0	0
IL77G	4,14 kW	13 Stk	0	0	0	0
IP09G	9,52 kW	41 Stk	0	0	0	0

Tabelle 34: elektrische Leistung von LTS-CI-Montageautomaten ohne stromintensiven Technologien im BMZ1

Aus der Regressionsanalyse ergibt sich die folgende Regressionsstatistik:

r	0,979				
R ²	0,958				
R ² _{adj}	0,847				
Standardfehler	0,930				
Beobachtungen	10				
	<i>Freiheitsgrade</i>	<i>Quadratsummen</i>	<i>Mittlere Quadratsumme</i>	<i>F-Wert</i>	<i>F_{krit}</i>
Regression	1	177,548	177,548	205,449	0,000
Residuen	9	7,778	0,864		
Gesamt	10	185,325			
	<i>Koeffizienten</i>	<i>Standardfehler</i>	<i>t-Statistik</i>	<i>p-Wert</i>	
Schnittpunkt	0,000	#NV	#NV	#NV	
Elektromotoren	0,224	0,016	14,333	0,000	

Tabelle 35: Regressionsstatistik der Wirkleistung von LTS-CI-MoA ohne stromintensiven Technologien im BMZ1

LTS-CI-MoA im BMZ 1, mit stromintensiven Technologien

Die Regression der elektr. Leistung von LTS-CI-Montageautomaten mit stromintensiver Technologie im BMZ1 erfolgt auf Basis der folgenden Werte.

BM-Bez.	BMZ1	Elektromotoren	Laserschweißgerät	Widerstandsschweißgerät	Hydraulikaggregat	Roboter
IP33G	6,57 kW	47 Stk	0	0	1	0
IP32G	11,25 kW	58 Stk	1	0	0	0
IP34G	18,81 kW	78 Stk	1	0	1	0
IL28G	33,87 kW	60 Stk	0	0	1	1
IL91L	41,24 kW	58 Stk	1	0	1	0
IL91R	41,24 kW	58 Stk	1	0	1	0
IL65G	42,88 kW	93 Stk	0	1	1	1
IL96G	43,12 kW	93 Stk	0	1	1	1
IL30G	66,64 kW	29 Stk	1	0	0	0
IL64L	80,22 kW	38 Stk	1	0	1	0
IL64R	80,22 kW	38 Stk	1	0	1	0

Tabelle 36: elektrische Leistung von LTS-CI-Montageautomaten mit stromintensiver Technologie im BMZ1

Aus der Regressionsanalyse ergibt sich die folgende Regressionsstatistik:

r	0,991
R ²	0,983
R ² _{adj}	0,966
Standardfehler	4,665
Beobachtungen	11

	Freiheitsgrade	Quadratsummen	Mittlere Quadratsumme	F-Wert	F _{krit}
Regression	5	6226,525	1245,305	57,212	0,000
Residuen	5	108,832	21,766		
Gesamt	10	6335,357			

	Koeffizienten	Standardfehler	t-Statistik	p-Wert
Schnittpunkt	54,511	7,472	7,296	0,001
Elektromotoren	-1,681	0,119	-14,138	0,000
LSG.	57,539	5,178	11,112	0,000
WSG.	64,590	6,931	9,319	0,000
Hydraulik-Aggr.	31,047	4,098	7,576	0,001
Roboter	49,146	6,776	7,252	0,001

Tabelle 37: Regressionsstatistik der Wirkleistung von LTS-CI-MoA mit stromintensiven Technologien im BMZ1

LTS-CI-MoA im BMZ 2, ohne stromintensiven Technologien

Die Regressionsanalyse der elektrischen Leistung von LTS-CI-Montageautomaten ohne stromintensiven Technologien im BMZ2 erfolgt auf Basis der folgenden Werte.

BM-Bez.	BMZ2	Elektromotoren	Laserschweißgerät	Widerstandsschweißgerät	Hydraulikaggregat	Roboter
IP40G	0,99 kW	1 Stk	0	0	0	0
IL85G	0,85 kW	3 Stk	0	0	0	0
IP29E	1,14 kW	9 Stk	0	0	0	0
IP29G	2,06 kW	20 Stk	0	0	0	0
IP31G	2,18 kW	19 Stk	0	0	0	0
IL87G	1,94 kW	11 Stk	0	0	0	0
IP08G	3,47 kW	20 Stk	0	0	0	0
IP35G	2,28 kW	18 Stk	0	0	0	0
IL77G	1,91 kW	13 Stk	0	0	0	0
IP09G	7,30 kW	41 Stk	0	0	0	0

Tabelle 38: elektrische Leistung von LTS-CI-Montageautomaten ohne stromintensiven Technologien im BMZ2

Aus der Regressionsanalyse ergibt sich die folgende Regressionsstatistik:

r	0,978
R ²	0,957
R ² _{adj}	0,845
Standardfehler	0,660
Beobachtungen	10

	Freiheitsgrade	Quadratsummen	Mittlere Quadratsumme	F-Wert	F _{krit}
Regression	1	86,117	86,117	197,928	0,000
Residuen	9	3,916	0,435		
Gesamt	10	90,033			

	Koeffizienten	Standardfehler	t-Statistik	p-Wert
Schnittpunkt	0,000	#NV	#NV	#NV
Elektromotoren	0,156	0,011	14,069	0,000

Tabelle 39: Regressionsstatistik der Wirkleistung von LTS-CI-MoA ohne stromintensiven Technologien im BMZ2

LTS-CI-MoA im BMZ 2, mit stromintensiven Technologien

Die Regression der elektrischen Leistung von LTS-CI-Montageautomaten mit stromintensiven Technologien im BMZ2 erfolgt auf Basis der folgenden Werte.

BM-Bez.	BMZ2	Elektromotoren	Laserschweißgerät	Widerstandsschweißgerät	Hydraulikaggregat	Roboter
IP33G	4,64 kW	47 Stk	0	0	1	0
IP32G	8,77 kW	58 Stk	1	0	0	0
IP34G	13,79 kW	78 Stk	1	0	1	0
IL28G	15,84 kW	60 Stk	0	0	1	1
IL91L	23,06 kW	58 Stk	1	0	1	0
IL91R	23,06 kW	58 Stk	1	0	1	0
IL65G	19,02 kW	93 Stk	0	1	1	1
IL96G	17,10 kW	93 Stk	0	1	1	1
IL30G	54,22 kW	29 Stk	1	0	0	0
IL64L	49,27 kW	38 Stk	1	0	1	0
IL64R	49,27 kW	38 Stk	1	0	1	0

Tabelle 40: elektrische Leistung von LTS-CI-Montageautomaten mit stromintensiven Technologien im BMZ2

Aus der Regressionsanalyse ergibt sich die folgende Regressionsstatistik:

r	0,966
R ²	0,933
R ² _{adj}	0,867
Standardfehler	6,342
Beobachtungen	11

	Freiheitsgrade	Quadratsummen	Mittlere Quadratsumme	F-Wert	F _{krit}
Regression	5	2822,598	564,520	14,034	0,006
Residuen	5	201,131	40,226		
Gesamt	10	3023,729			

	Koeffizienten	Standardfehler	t-Statistik	p-Wert
Schnittpunkt	45,203	10,157	4,450	0,007
Elektromotoren	-1,117	0,162	-6,910	0,001
LSG.	34,865	7,039	4,953	0,004
WSG.	39,064	9,422	4,146	0,009
Hydraulik-Aggr.	11,917	5,571	2,139	0,085
Roboter	25,715	9,212	2,791	0,038

Tabelle 41: Regressionsstatistik der Wirkleistung von LTS-CI-MoA mit stromintensiven Technologien im BMZ2

LTS-CI-MoA im BMZ 3, ohne stromintensiven Technologien

Die Regressionsanalyse der elektr. Leistung von LTS-CI- Montageautomaten ohne stromintensiven Technologien im BMZ3 erfolgt auf Basis der folgenden Werte.

BM-Bez.	BMZ3	Elektromotoren	Laser-schweißgerät	Widerstands-schweißgerät	Hydraulik-aggregat	Roboter
IP40G	0,88 kW	1 Stk	0	0	0	0
IL85G	0,75 kW	3 Stk	0	0	0	0
IP29E	0,91 kW	9 Stk	0	0	0	0
IP29G	1,29 kW	20 Stk	0	0	0	0
IP31G	1,40 kW	19 Stk	0	0	0	0
IL87G	1,35 kW	11 Stk	0	0	0	0
IP08G	1,68 kW	20 Stk	0	0	0	0
IP35G	1,62 kW	18 Stk	0	0	0	0
IL77G	1,35 kW	13 Stk	0	0	0	0
IP09G	5,87 kW	41 Stk	0	0	0	0

Tabelle 42: elektrische Leistung von LTS-CI-Montageautomaten ohne stromintensiven Technologien im BMZ3

Aus der Regressionsanalyse ergibt sich die folgende Regressionsstatistik:

r	0,955				
R ²	0,912				
R ² _{adj}	0,801				
Standardfehler	0,693				
Beobachtungen	10				
	<i>Freiheitsgrade</i>	<i>Quadratsummen</i>	<i>Mittlere Quadratsumme</i>	<i>F-Wert</i>	<i>F_{krit}</i>
Regression	1	44,963	44,963	93,741	0,000
Residuen	9	4,317	0,480		
Gesamt	10	49,280			
	<i>Koeffizienten</i>	<i>Standardfehler</i>	<i>t-Statistik</i>	<i>p-Wert</i>	
Schnittpunkt	0,000	#NV	#NV	#NV	
Elektromotoren	0,113	0,012	9,682	0,000	

Tabelle 43: Regressionsstatistik der Wirkleistung von LTS-CI-MoA ohne stromintensiven Technologien im BMZ3

LTS-CI-MoA im BMZ 3, mit stromintensiven Technologien

Die Regressionsanalyse der elektr. Leistung von LTS-CI- Montageautomaten ohne stromintensiven Technologien im BMZ3 erfolgt auf Basis der folgenden Werte.

BM-Bez.	BMZ3	Elektromotoren	Laserschweißgerät	Widerstandsschweißgerät	Hydraulikaggregat	Roboter
IP33G	2,38 kW	47 Stk	0	0	1	0
IP32G	4,39 kW	58 Stk	1	0	0	0
IP34G	5,10 kW	78 Stk	1	0	1	0
IL28G	7,45 kW	60 Stk	0	0	1	1
IL91L	14,79 kW	58 Stk	1	0	1	0
IL91R	14,79 kW	58 Stk	1	0	1	0
IL65G	8,34 kW	93 Stk	0	1	1	1
IL96G	8,47 kW	93 Stk	0	1	1	1
IL30G	36,71 kW	29 Stk	1	0	0	0
IL64L	32,37 kW	38 Stk	1	0	1	0
IL64R	32,37 kW	38 Stk	1	0	1	0

Tabelle 44: Regressionsstatistik der elektrischen Leistung von LTS-CI-MoA mit stromintensiven Technologien im BMZ3

Aus der Regressionsanalyse ergibt sich die folgende Regressionsstatistik:

r	0,978
R ²	0,957
R ² _{adj}	0,915
Standardfehler	3,683
Beobachtungen	11

	Freiheitsgrade	Quadratsummen	Mittlere Quadratsumme	F-Wert	F _{krit}
Regression	5	1520,130	304,026	22,419	0,002
Residuen	5	67,805	13,561		
Gesamt	10	1587,936			

	Koeffizienten	Standardfehler	t-Statistik	p-Wert
Schnittpunkt	32,978	5,898	5,592	0,003
Elektromotoren	-0,820	0,094	-8,742	0,000
LSG.	23,249	4,087	5,688	0,002
WSG.	28,019	5,471	5,122	0,004
Hydraulik-Aggr.	7,949	3,235	2,457	0,057
Roboter	15,739	5,349	2,943	0,032

Tabelle 45: Regressionsstatistik der Wirkleistung von LTS-CI-MoA mit stromintensiven Technologien im BMZ3

LTS-CI-MoA im BMZ 4 und 5, mit und ohne stromintensiven Technologien

Die Regression der elektr. Leistung von LTS-CI- Montageautomaten mit und ohne stromintensiven Technologien im BMZ4 und BMZ5 erfolgt auf Basis dieser Werte.

BM-Bez.	BMZ4,5	Elektromotoren	Laser-schweißgerät	Widerstands-schweißgerät	Hydraulik-aggregat	Roboter
IP40G	0,62 kW	1 Stk	0	0	0	0
IL85G	0,54 kW	3 Stk	0	0	0	0
IP29E	0,72 kW	9 Stk	0	0	0	0
IP29G	0,99 kW	20 Stk	0	0	0	0
IP31G	1,07 kW	19 Stk	0	0	0	0
IL87G	0,68 kW	11 Stk	0	0	0	0
IP08G	1,00 kW	20 Stk	0	0	0	0
IL77G	1,50 kW	13 Stk	0	0	0	0
IP09G	2,94 kW	41 Stk	0	0	0	0
IP33G	1,72 kW	47 Stk	0	0	1	0
IP32G	2,45 kW	58 Stk	1	0	0	0
IL30G	1,78 kW	29 Stk	1	0	0	0
IP34G	2,02 kW	78 Stk	1	0	1	0
IL28G	3,69 kW	60 Stk	0	0	1	1
IL91L	2,53 kW	58 Stk	1	0	1	0
IL91R	2,53 kW	58 Stk	1	0	1	0
IL65G	3,34 kW	93 Stk	0	1	1	1

Tabelle 46: elektrische Leistung von LTS-CI-MoA im BMZ4 bzw. BMZ5

Aus der Regressionsanalyse ergibt sich die folgende Regressionsstatistik:

r	0,854				
R ²	0,730				
R ² _{adj}	0,712				
Standardfehler	0,539				
Beobachtungen	17				
	<i>Freiheitsgrade</i>	<i>Quadratsummen</i>	<i>Mittlere Quadratsumme</i>	<i>F-Wert</i>	<i>F_{krit}</i>
Regression	1	11,755	11,755	40,517	0,000
Residuen	15	4,352	0,290		
Gesamt	16	16,107			
	<i>Koeffizienten</i>	<i>Standardfehler</i>	<i>t-Statistik</i>	<i>p-Wert</i>	
Schnittpunkt	0,645	0,220	2,932	0,010	
Elektromotoren	0,031	0,005	6,365	0,000	

Tabelle 47: Regressionsstatistik der Wirkleistung von LTS-CI-MoA im BMZ4 bzw. BMZ5

Ergebnis der Regression der elektrischen Leistungsmessung von LTS-CI-MoA

Das Ergebnis der Regressionsanalyse der elektrischen Leistungsmessungen von Montageautomaten ist ein Regressionsmodell, welches die Berechnung des theoretischen Wirkleistungsbezugs der fünf Betriebsmittelzustände in Abhängigkeit der technischen Maschineneigenschaften ermöglicht.

$$P_{\text{BMZ1}_{\text{LTS-CI,osT}}} = 0,224x_1 \quad (12)$$

$$P_{\text{BMZ1}_{\text{LTS-CI,msT}}} = 54,51 - 1,68x_1 + 57,54x_2 + 64,59x_3 + 31,05x_4 + 49,15x_5 \quad (13)$$

$$P_{\text{BMZ2}_{\text{LTS-CI,osT}}} = 0,156x_1 \quad (14)$$

$$P_{\text{BMZ2}_{\text{LTS-CI,msT}}} = 45,2 - 1,12x_1 + 34,87x_2 + 39,06x_3 + 11,92x_4 + 25,72x_5 \quad (15)$$

$$P_{\text{BMZ3}_{\text{LTS-CI,osT}}} = 0,113x_1 \quad (16)$$

$$P_{\text{BMZ3}_{\text{LTS-CI,msT}}} = 32,98 - 0,82x_1 + 23,25x_2 + 28,02x_3 + 7,95x_4 + 15,74x_5 \quad (17)$$

$$P_{\text{BMZ4,5}_{\text{LTS-CI}}} = 0,645 + 0,031x_1 \quad (18)$$

Die obigen sieben Formeln fassen das Ergebnis der Regressionsanalyse der elektrischen Leistungsmessungen der untersuchten LTS-CI-Montageautomaten in den fünf Betriebsmittelzuständen zusammen. Es zeigt sich, dass die elektrische Wirkleistung von Maschinen ohne stromintensiven Technologien in den Betriebsmittelzuständen 1, 2 und 3 ($P_{\text{BMZ1}_{\text{LTS-CI,osT}}}$, $P_{\text{BMZ2}_{\text{LTS-CI,osT}}}$, $P_{\text{BMZ3}_{\text{LTS-CI,osT}}}$) lediglich von der Anzahl der Elektromotoren (x_1) signifikant abhängt. Bei Montageanlagen mit stromintensiven Technologien hängt der elektrische Wirkleistungsbezug in den Betriebsmittelzuständen 1, 2 und 3 ($P_{\text{BMZ1}_{\text{LTS-CI,msT}}}$, $P_{\text{BMZ2}_{\text{LTS-CI,msT}}}$, $P_{\text{BMZ3}_{\text{LTS-CI,msT}}}$) sowohl von der Anzahl an Elektromotoren als auch davon ab, ob diese Anlagen über ein Laserschweißgerät (x_2), ein

Widerstandsschweißgerät (x_3), ein Hydraulikaggregat (x_4) oder einen Roboter (x_5) verfügen. Zusätzlich ergibt sich aus den Regressionsmodellen, dass der elektrische Wirkleistungsbezug dieser Maschinen von einer konstanten Grundlast abhängt. Da die Montageautomaten in den Betriebsmittelzuständen 4 und 5 abgeschaltet sind und die benötigte elektrische Leistung in diesen zwei Zuständen nicht gleich groß ist, erfolgt die Berechnung durch dieselbe Formel. Der elektrische Wirkleistungsbezug in den Betriebsmittelzuständen 4 und 5 ist geprägt von einer fixen Grundlast und einem von der Anzahl der Elektromotoren abhängigen variablen Anteil.

Im folgenden Abschnitt werden die gefundenen Formeln auf alle nicht gemessenen LTS-CI-Montageautomaten angewendet. Die folgende Tabelle beinhaltet die so errechneten elektrischen Leistungen der nicht untersuchten LTS-CI-Montageautomaten in den fünf Betriebsmittelzuständen.

BM-Bez.	Abteilung	BMZ1	BMZ2	BMZ3	BMZ4	BMZ5
IL28G	RS5 (530)	33,87 kW	15,84 kW	7,45 kW	3,69 kW	3,69 kW
IL29G	RS5 (530)	4,95 kW	3,43 kW	2,47 kW	1,27 kW	1,27 kW
IL30G	RS5 (530)	66,64 kW	54,22 kW	36,71 kW	1,78 kW	1,78 kW
IL40G	RS3 (416)	2,84 kW	1,71 kW	1,18 kW	1,21 kW	1,21 kW
IL57G	RS3 (416)	2,84 kW	1,71 kW	1,18 kW	1,21 kW	1,21 kW
IL63G	RS1 (423)	6,49 kW	4,67 kW	3,41 kW	0,94 kW	0,94 kW
IL64L	RS6 (520)	80,22 kW	49,27 kW	32,37 kW	1,43 kW	1,43 kW
IL64R	RS6 (520)	80,22 kW	49,27 kW	32,37 kW	1,43 kW	1,43 kW
IL65G	RS7 (512)	42,88 kW	19,02 kW	8,34 kW	3,34 kW	3,34 kW
IL66G	RS7 (512)	5,17 kW	3,88 kW	1,94 kW	1,37 kW	1,37 kW
IL67G	RS8 (543)	6,68 kW	4,83 kW	3,53 kW	1,69 kW	1,69 kW
IL68E	RS7 (512)	5,72 kW	4,05 kW	2,94 kW	1,04 kW	1,04 kW
IL74G	RS8 (543)	6,29 kW	4,52 kW	3,30 kW	1,63 kW	1,63 kW
IL75G	RS1 (423)	2,26 kW	1,25 kW	0,83 kW	0,81 kW	0,81 kW
IL77G	RS5 (530)	4,14 kW	1,91 kW	1,35 kW	1,50 kW	1,50 kW
IL82G	RS1 (423)	1,69 kW	0,78 kW	0,48 kW	0,81 kW	0,81 kW
IL83G	RS1 (423)	1,69 kW	0,78 kW	0,48 kW	0,98 kW	0,98 kW
IL84G	RS8 (543)	8,79 kW	6,54 kW	4,82 kW	1,76 kW	1,76 kW
IL85G	RS3 (416)	1,36 kW	0,85 kW	0,75 kW	0,54 kW	0,54 kW
IL87G	RS3 (416)	3,75 kW	1,94 kW	1,35 kW	0,68 kW	0,68 kW
IL88G	RS3 (416)	2,84 kW	1,71 kW	1,18 kW	1,21 kW	1,21 kW
IL91L	RS6 (520)	41,24 kW	23,06 kW	14,79 kW	2,53 kW	2,53 kW
IL91R	RS6 (520)	41,24 kW	23,06 kW	14,79 kW	2,53 kW	2,53 kW
IL93G	RS1 (423)	1,50 kW	0,62 kW	0,36 kW	0,85 kW	0,85 kW
IL95V	RS8 (543)	1,30 kW	0,47 kW	0,24 kW	0,75 kW	0,75 kW
IL96G	RS7 (512)	43,12 kW	17,10 kW	8,47 kW	1,89 kW	1,89 kW
IL97G	RS7 (512)	5,17 kW	3,88 kW	1,94 kW	1,37 kW	1,37 kW
IL98G	RS8 (543)	9,75 kW	7,32 kW	5,41 kW	1,73 kW	1,73 kW
IL99G	RS7 (512)	3,61 kW	2,34 kW	1,65 kW	1,11 kW	1,11 kW
IM07G	KB (432)	2,65 kW	1,56 kW	1,06 kW	0,88 kW	0,88 kW
IP02G	RS1 (423)	96,77 kW	57,36 kW	38,06 kW	1,92 kW	1,92 kW
IP04G	RS7 (513)	12,43 kW	9,50 kW	7,06 kW	1,01 kW	1,01 kW

BM-Bez.	Abteilung	BMZ1	BMZ2	BMZ3	BMZ4	BMZ5
IP07G	RS5 (530)	3,61 kW	2,34 kW	1,65 kW	0,78 kW	0,78 kW
IP08G	RS5 (530)	3,99 kW	3,47 kW	1,68 kW	1,00 kW	1,00 kW
IP09G	RS8 (543)	9,52 kW	7,30 kW	5,87 kW	2,94 kW	2,94 kW
IP10G	RS5 (530)	5,54 kW	4,15 kW	2,08 kW	1,47 kW	1,47 kW
IP16G	RS1 (423)	4,37 kW	2,96 kW	2,12 kW	1,24 kW	1,24 kW
IP19E	RS7 (512)	5,72 kW	4,05 kW	2,94 kW	1,08 kW	1,08 kW
IP21G	RS1 (423)	8,40 kW	6,23 kW	4,59 kW	1,47 kW	1,47 kW
IP28G	RS1 (423)	3,61 kW	2,34 kW	1,65 kW	1,27 kW	1,27 kW
IP29E	RS5 (532)	2,56 kW	1,14 kW	0,91 kW	0,72 kW	0,72 kW
IP29G	RS5 (532)	3,07 kW	2,06 kW	1,29 kW	0,99 kW	0,99 kW
IP31G	RS5 (532)	3,41 kW	2,18 kW	1,40 kW	1,07 kW	1,07 kW
IP32G	RS5 (532)	11,25 kW	8,77 kW	4,39 kW	2,45 kW	2,45 kW
IP33G	RS5 (532)	6,57 kW	4,64 kW	2,38 kW	1,72 kW	1,72 kW
IP34G	RS5 (532)	18,81 kW	13,79 kW	5,10 kW	2,02 kW	2,02 kW
IP35G	RS1 (423)	4,11 kW	2,28 kW	1,62 kW	1,11 kW	1,11 kW
IP37G	KB (432)	17,42 kW	13,56 kW	10,11 kW	2,15 kW	2,15 kW
IP39G	RS6 (520)	10,32 kW	7,79 kW	5,76 kW	1,01 kW	1,01 kW
IP40G	RS5 (532)	1,12 kW	0,99 kW	0,88 kW	0,62 kW	0,62 kW
IP41G	RS5 (532)	1,11 kW	0,31 kW	0,12 kW	0,75 kW	0,75 kW
IP46L	KB (432)	55,71 kW	33,92 kW	21,52 kW	0,94 kW	0,94 kW
IP46R	KB (432)	55,71 kW	33,92 kW	21,52 kW	0,94 kW	0,94 kW
IP46V	KB (432)	2,07 kW	1,09 kW	0,71 kW	1,01 kW	1,01 kW
IP48G	RS6 (520)	2,26 kW	1,25 kW	0,83 kW	1,24 kW	1,24 kW
LT43G	RS8 (543)	9,56 kW	7,17 kW	5,29 kW	2,02 kW	2,02 kW

Tabelle 48: Ergebnis der Regression der elektrischen Leistungsmessungen von LTS-CI-MoA

Der obigen Tabelle können die elektrischen Leistungen aller 56 LTS-CI-Montageautomaten im Werk 4 in den fünf Betriebsmittelzuständen entnommen werden. Für die energetisch untersuchten LTS-CI-Montageautomaten werden die Messwerte direkt verwendet und für die nicht untersuchten Anlagen, wird der Wirkleistungsbezug über das Regressionsmodell des jeweiligen Betriebsmittelzustandes berechnet. Wie im Kapitel 4.2.3.3.1 einleitend erwähnt wird der theoretische Wirkleistungsbezug von Montageanlagen mit einer LTS-CI-Steuerung und einer LTS-S5-Steuerung getrennt untersucht. In den folgenden Unterkapiteln folgt deshalb dieselbe durchgeführt wurde, für Montageanlagen mit einer LTS-S5-Steuerung.

LTS-S5-MoA im BMZ 1, ohne stromintensive Technologien

Die Regressionsanalyse der elektrischen Leistung von LTS-S5-Montageautomaten im Betriebsmittelzustand 1 (BMZ1) ohne stromintensiven Technologien erfolgt auf Basis der folgenden Werte.

BM-Bez.	BMZ1	Elektromotoren	Laserschweißgerät	Widerstandsschweißgerät	Hydraulikaggregat	Roboter
IF49G	0,94 kW	1 Stk	0	0	0	0
IF98G	2,28 kW	7 Stk	0	0	0	0
IL02G	1,04 kW	1 Stk	0	0	0	0
IL03G	0,76 kW	1 Stk	0	0	0	0
IL46G	3,14 kW	11 Stk	0	0	0	0

Tabelle 49: elektrische Leistung von LTS-S5-Montageautomaten ohne Technologie im Betriebsmittelzustand 1

Aus der Regressionsanalyse ergibt sich die folgende Regressionsstatistik:

r	0,995				
R ²	0,990				
R ² _{adj}	0,987				
Standardfehler	0,117				
Beobachtungen	5				
	<i>Freiheitsgrade</i>	<i>Quadratsummen</i>	<i>Mittlere Quadratsumme</i>	<i>F-Wert</i>	<i>F_{krit}</i>
Regression	1	4,226	4,226	310,308	0,000
Residuen	3	0,041	0,014		
Gesamt	4	4,266			
	<i>Koeffizienten</i>	<i>Standardfehler</i>	<i>t-Statistik</i>	<i>p-Wert</i>	
Schnittpunkt	0,695	0,075	9,330	0,003	
Elektromotoren	0,223	0,013	17,616	0,000	

Tabelle 50: Regressionsstatistik der Wirkleistung von LTS-S5- Montageautomaten ohne stromintensive Technologien im Betriebsmittelzustand 1

LTS-S5-MoA im BMZ 1, mit stromintensiven Technologien

Die Regressionsanalyse der elektrischen Leistung von LTS-S5-Montageautomaten im Betriebsmittelzustand 1 (BMZ1) mit stromintensive Technologien erfolgt auf Basis der folgenden Werte.

BM-Bez.	BMZ1	Elektromotoren	Laser-schweißgerät	Widerstandsschweißgerät	Hydraulikaggregat	Roboter
IL26G	14,79 kW	38 Stk	0	0	1	0
IF94G	17,39 kW	38 Stk	0	1	0	0
IF89G	24,81 kW	36 Stk	0	0	1	1
IL06G	53,80 kW	27 Stk	1	0	0	0
IF65L	67,16 kW	26 Stk	1	0	1	0
IF65R	67,16 kW	26 Stk	1	0	1	0
IF07G	74,12 kW	43 Stk	1	1	1	0
IF84R	74,67 kW	17 Stk	1	0	1	0
IF84L	74,67 kW	17 Stk	1	0	1	0

Tabelle 51: Elektrische Leistung von LTS-S5-Montageautomaten mit stromintensiven Technologien im Betriebsmittelzustand 1

Aus der Regressionsanalyse ergibt sich die folgende Regressionsstatistik:

r	1,000
R ²	1,000
R ² _{adj}	0,999
Standardfehler	0,929
Beobachtungen	9

	Freiheitsgrade	Quadratsummen	Mittlere Quadratsumme	F-Wert	F _{krit}
Regression	5	5300	1060	1228	0,000
Residuen	3	3	1		
Gesamt	8	5302			

	Koeffizienten	Standardfehler	t-Statistik	p-Wert
Schnittpunkt	26,664	2,071	12,874	0,001
Elektromotoren	-0,691	0,062	-11,202	0,002
LSG	45,370	0,979	46,320	0,000
WSG	17,417	1,172	14,857	0,001
Hydraulik-Aggr.	13,956	0,846	16,488	0,000
Roboter	9,069	1,264	7,174	0,006

Tabelle 52: Regressionsstatistik der Wirkleistung von LTS-S5-Montageautomaten mit stromintensiven Technologien im Betriebsmittelzustand 1

LTS-S5-MoA im BMZ 2, ohne stromintensive Technologien

Die Regression der elektrischen Leistung von LTS-S5-Montageautomaten ohne stromintensiven Technologien im Betriebsmittelzustand 2 (BMZ2) erfolgt auf Basis der folgenden Werte.

BM-Bez.	BMZ2	Elektromotoren	Laserschweißgerät	Widerstandsschweißgerät	Hydraulikaggregat	Roboter
IF49G	0,57 kW	1 Stk	0	0	0	0
IF98G	2,28 kW	7 Stk	0	0	0	0
IL02G	1,04 kW	1 Stk	0	0	0	0
IL03G	0,76 kW	1 Stk	0	0	0	0
IL46G	3,14 kW	11 Stk	0	0	0	0

Tabelle 53: elektrische Leistung von LTS-S5-Montageautomaten ohne stromintensiven Technologien im Betriebsmittelzustand 2

Aus der Regressionsanalyse ergibt sich die folgende Regressionsstatistik:

r	0,988				
R ²	0,975				
R ² _{adj}	0,967				
Standardfehler	0,200				
Beobachtungen	5				
	<i>Freiheitsgrade</i>	<i>Quadratsummen</i>	<i>Mittlere Quadratsumme</i>	<i>F-Wert</i>	<i>F_{krit}</i>
Regression	1	4,771	4,771	119,193	0,002
Residuen	3	0,120	0,040		
Gesamt	4	4,891			
	<i>Koeffizienten</i>	<i>Standardfehler</i>	<i>t-Statistik</i>	<i>p-Wert</i>	
Schnittpunkt	0,563	0,128	4,403	0,022	
Elektromotoren	0,237	0,022	10,918	0,002	

Tabelle 54: Regressionsstatistik von LTS-S5-Montageautomaten ohne stromintensive Technologien im Betriebsmittelzustand 2

LTS-S5-MoA im BMZ 2, mit stromintensiven Technologien

Die Regression der elektrischen Leistung von LTS-S5-Montageautomaten ohne stromintensive Technologien im Betriebsmittelzustand 2 (BMZ2) erfolgt auf Basis der folgenden Werte.

BM-Bez.	BMZ2	Elektromotoren	Laser-schweißgerät	Widerstandsschweißgerät	Hydraulikaggregat	Roboter
IL26G	14,79 kW	38 Stk	0	0	1	0
IF94G	9,03 kW	38 Stk	0	1	0	0
IF89G	11,16 kW	36 Stk	0	0	1	1
IL06G	45,91 kW	27 Stk	1	0	0	0
IF65L	45,36 kW	26 Stk	1	0	1	0
IF65R	45,36 kW	26 Stk	1	0	1	0
IF07G	53,46 kW	43 Stk	1	1	1	0
IF84R	48,39 kW	17 Stk	1	0	1	0
IF84L	48,39 kW	17 Stk	1	0	1	0

Tabelle 55: elektrische Leistung von LTS-S5-Montageautomaten mit stromintensiven Technologien im Betriebsmittelzustand 2

Aus der Regressionsanalyse ergibt sich die folgende Regressionsstatistik:

r	0,994
R ²	0,989
R ² _{adj}	0,970
Standardfehler	3,160
Beobachtungen	9

	Freiheitsgrade	Quadratsummen	Mittlere Quadratsumme	F-Wert	F _{krit}
Regression	5	2649,047	529,809	53,048	0,004
Residuen	3	29,962	9,987		
Gesamt	8	2679,009			

	Koeffizienten	Standardfehler	t-Statistik	p-Wert
Schnittpunkt	3,617	7,044	0,513	0,643
Elektromotoren	0,150	0,210	0,717	0,525
LSG	36,764	3,331	11,036	0,002
WSG	1,157	3,987	0,290	0,791
Hydraulik-Aggr.	3,988	2,879	1,385	0,260
Roboter	-1,861	4,300	-0,433	0,694

Tabelle 56: Regressionsstatistik von LTS-S5-Montageautomaten mit stromintensiven Technologien im Betriebsmittelzustand 2

LTS-S5-MoA im BMZ 3, ohne stromintensive Technologien

Die Regressionsanalyse der elektrischen Leistung von LTS-S5- Montageautomaten ohne stromintensive Technologien im Betriebsmittelzustand 1 (BMZ1) erfolgt auf Basis der folgenden Werte.

BM-Bez.	BMZ1	Elektromotoren	Laserschweißgerät	Widerstandsschweißgerät	Hydraulikaggregat	Roboter
IF49G	0,50 kW	1 Stk	0	0	0	0
IF98G	0,91 kW	7 Stk	0	0	0	0
IL02G	0,61 kW	1 Stk	0	0	0	0
IL03G	0,49 kW	1 Stk	0	0	0	0
IL46G	1,26 kW	11 Stk	0	0	0	0

Tabelle 57: elektrische Leistung von LTS-S5-Montageautomaten ohne stromintensive Technologien im Betriebsmittelzustand 3

Aus der Regressionsanalyse ergibt sich die folgende Regressionsstatistik:

r	0,988				
R ²	0,976				
R ² _{adj}	0,968				
Standardfehler	0,059				
Beobachtungen	5				
	<i>Freiheitsgrade</i>	<i>Quadratsummen</i>	<i>Mittlere Quadratsumme</i>	<i>F-Wert</i>	<i>F_{krit}</i>
Regression	1	0,426	0,426	122,866	0,002
Residuen	3	0,010	0,003		
Gesamt	4	0,437			
	<i>Koeffizienten</i>	<i>Standardfehler</i>	<i>t-Statistik</i>	<i>p-Wert</i>	
Schnittpunkt	0,456	0,038	12,107	0,001	
Elektromotoren	0,071	0,006	11,084	0,002	

Tabelle 58: Regressionsstatistik von LTS-S5-Montageautomaten ohne stromintensive Technologien im Betriebsmittelzustand 3

LTS-S5- MoA im BMZ 3, mit stromintensiven Technologien

Die Regression der elektrischen Leistung von LTS-S5-MoA ohne stromintensive Technologien im Betriebsmittelzustand 3 erfolgt auf Basis der folgenden Tabelle.

BM-Bez.	BMZ1	Elektromotoren	Laserschweißgerät	Widerstandsschweißgerät	Hydraulikaggregat	Roboter
IL26G	14,79 kW	38 Stk	0	0	1	0
IF94G	17,39 kW	38 Stk	0	1	0	0
IF89G	24,81 kW	36 Stk	0	0	1	1
IL06G	53,80 kW	27 Stk	1	0	0	0
IF65L	67,16 kW	26 Stk	1	0	1	0
IF65R	67,16 kW	26 Stk	1	0	1	0
IF07G	74,12 kW	43 Stk	1	1	1	0
IF84R	74,67 kW	17 Stk	1	0	1	0
IF84L	74,67 kW	17 Stk	1	0	1	0
IL26G	14,79 kW	38 Stk	0	0	1	0

Tabelle 59: elektrische Leistung von LTS-S5-Montageautomaten mit stromintensiven Technologien im Betriebsmittelzustand 3

Aus der Regressionsanalyse ergibt sich die folgende Regressionsstatistik:

r	0,998
R ²	0,996
R ² _{adj}	0,742
Standardfehler	2,546
Beobachtungen	9

	Freiheitsgrade	Quadratsummen	Mittlere Quadratsumme	F-Wert	F _{krit}
Regression	5	6150	1230	190	0,001
Residuen	4	26	6		
Gesamt	9	6176			

	Koeffizienten	Standardfehler	t-Statistik	p-Wert
Schnittpunkt	0,000	#NV	#NV	#NV
Elektromotoren	0,025	0,076	0,335	0,754
LSG	28,505	1,953	14,593	0,000
WSG	10,034	2,864	3,503	0,025
Hydraulik-Aggr.	0,622	2,312	0,269	0,801
Roboter	4,129	3,463	1,192	0,299

Tabelle 60: Regressionsstatistik von LTS-S5-Montageautomaten mit stromintensiven Technologien im Betriebsmittelzustand 3

LTS-S5-MoA im BMZ 4 und 5, mit und ohne stromintensiven Technologien

Die Regressionsanalyse der elektrischen Leistung von LTS-S5- Montageautomaten mit und ohne stromintensiven Technologien im Betriebsmittelzustand 4 und 5 erfolgt auf Basis der folgenden Tabelle.

BM-Bez.	BMZ1	Elektromotoren	Laserschweißgerät	Widerstandsschweißgerät	Hydraulikaggregat	Roboter
IF49G	0,02 kW	1 Stk	0	0	0	0
IF98G	0,01 kW	7 Stk	0	0	0	0
IL02G	0,02 kW	1 Stk	0	0	0	0
IL03G	0,01 kW	1 Stk	0	0	0	0
IL46G	0,01 kW	11 Stk	0	0	0	0
IL26G	0,01 kW	38 Stk	0	0	1	0
IL06G	0,06 kW	27 Stk	1	0	0	0
IF07G	0,11 kW	43 Stk	1	1	1	0

Tabelle 61: elektrische Leistung von LTS-S5- Montageautomaten mit und ohne stromintensive Technologien im Betriebsmittelzustand 4 und 5

Aus der Regressionsanalyse ergibt sich die folgende Regressionsstatistik:

r	0,707				
R ²	0,499				
R ² _{adj}	0,416				
Standardfehler	0,027				
Beobachtungen	8				
	<i>Freiheitsgrade</i>	<i>Quadratsummen</i>	<i>Mittlere Quadratsumme</i>	<i>F-Wert</i>	<i>F_{krit}</i>
Regression	1	0,004	0,004	5,985	0,050
Residuen	6	0,004	0,001		
Gesamt	7	0,009			
	<i>Koeffizienten</i>	<i>Standardfehler</i>	<i>t-Statistik</i>	<i>p-Wert</i>	
Schnittpunkt	0,007	0,014	0,517	0,624	
Elektromotoren	0,001	0,001	2,446	0,050	

Tabelle 62: Regressionsstatistik von LTS-S5-Montageautomaten mit und ohne stromintensive Technologien im Betriebsmittelzustand 4 und 5

Im folgenden Abschnitt werden die mathematischen Modelle, mit welchen der theoretische Wirkleistungsbezug von LTS-S5-Montageautomaten in den fünf Betriebsmittelzuständen ermittelt wird, auf alle nicht gemessenen LTS-S5-Montageautomaten angewendet.

Ergebnis der Regressionsanalyse der elektrischen Leistungsmessung von LTS-S5-Montageautomaten

Das Ergebnis der Regressionsanalyse der elektrischen Leistungsmessungen von LTS-S5- Montageautomaten sind mathematische Ansätze, welche die Berechnung des theoretischen Wirkleistungsbezugs der fünf Betriebsmittelzustände in Abhängigkeit der technischen Maschineneigenschaften ermöglichen.

$$P_{BMZ1_{LTS-S5,osT}} = 0,695 + 0,223x_1 \quad (19)$$

$$P_{BMZ1_{LTS-S5,msT}} = 26,66 - 0,69x_1 + 45,37x_2 + 17,42x_3 + 13,96x_4 + 9,07x_5 \quad (20)$$

$$P_{BMZ2_{LTS-S5,osT}} = 0,503 + 0,237x_1 \quad (21)$$

$$P_{BMZ2_{LTS-S5,msT}} = 3,62 + 0,15x_1 + 36,76x_2 + 1,16x_3 + 3,99x_4 - 1,86x_5 \quad (22)$$

$$P_{BMZ3_{LTS-S5,osT}} = 0,456 + 0,071x_1 \quad (23)$$

$$P_{BMZ3_{LTS-S5,msT}} = 0,00 - 0,03x_1 + 28,51x_2 + 10,03x_3 + 0,62x_4 + 4,13x_5 \quad (24)$$

$$P_{BMZ4,5_{LTS-S5}} = 0,007 + 0,01x_1 \quad (25)$$

Die obigen sieben Formeln fassen das Ergebnis der Regressionsanalyse der elektrischen Leistungsmessungen der untersuchten LTS-S5-Montageautomaten in den fünf Betriebsmittelzuständen zusammen. Es zeigt sich, dass die elektrischen Wirkleistung von Maschinen ohne stromintensive Technologie (kurz: *osT*) in den Betriebsmittelzuständen 1, 2 und 3 ($P_{BMZ1,LTS-CI,osT}$, $P_{BMZ2,LTS-CI,osT}$, $P_{BMZ3,LTS-CI,osT}$) lediglich von der Anzahl der Elektromotoren (x_1) abhängt. Bei Montageanlagen mit stromintensiven Technologien (kurz: *msT*) hängt der elektrische Wirkleistungsbezug in den Betriebsmittelzuständen 1, 2 und 3 ($P_{BMZ1,LTS-CI,msT}$, $P_{BMZ2,LTS-CI,msT}$, $P_{BMZ3,LTS-CI,msT}$) sowohl von der Anzahl an Elektromotoren als auch davon ab, ob diese

Anlagen über ein Laserschweißgerät (x_2), ein Widerstandsschweißgerät (x_3), ein Hydraulikaggregat (x_4), oder einen Roboter (x_5) verfügen. Zusätzlich ergibt sich aus den Regressionsmodellen, dass der elektrische Wirkleistungsbezug dieser Maschinen in jedem Betriebsmittelzustand einen konstanten Grundlastanteil enthält. Da die Montageautomaten in den Betriebsmittelzuständen 4 und 5 abgeschaltet sind und der Bedarf an elektrischer Leistung in diesen zwei Zuständen gleich ist, erfolgt die Berechnung durch dieselbe Formel. Der elektrische Wirkleistungsbezug in den Betriebsmittelzuständen 4 und 5 ist von einer fixen Grundlast und einem von der Anzahl der Elektromotoren abhängigen variablen Anteil geprägt. Anschließend werden diese Formeln auf alle nicht gemessenen LTS-S5-Montageautomaten sowie die LCS- und S7-Montageautomaten angewendet und die Ergebnisse pro Maschine und je Betriebsmittelzustand dargestellt.

BM-Bez.	Abteilung	BMZ1	BMZ2	BMZ3	BMZ4	BMZ5
IF15G	RS3 (416)	0,92 kW	0,80 kW	0,53 kW	0,01 kW	0,01 kW
IF21G	RS5 (530)	0,92 kW	0,80 kW	0,53 kW	0,01 kW	0,01 kW
IF25G	RS3 (416)	0,92 kW	0,80 kW	0,53 kW	0,01 kW	0,01 kW
IP26G	RS7 (512)	0,92 kW	0,80 kW	0,53 kW	0,01 kW	0,01 kW
BV001	RS3 (416)	2,48 kW	2,46 kW	1,02 kW	0,02 kW	0,02 kW
BV002	RS3 (416)	2,03 kW	1,99 kW	0,88 kW	0,02 kW	0,02 kW
IF07G	RS1 (423)	74,12 kW	53,46 kW	43,26 kW	0,11 kW	0,11 kW
IF24G	RS1 (423)	1,14 kW	1,04 kW	0,60 kW	0,01 kW	0,01 kW
IF26G	RS3 (416)	0,92 kW	0,80 kW	0,53 kW	0,01 kW	0,01 kW
IF34R	KB (431)	40,62 kW	5,53 kW	10,16 kW	0,01 kW	0,01 kW
IF49G	RS3 (416)	0,94 kW	0,57 kW	0,50 kW	0,02 kW	0,02 kW
IF58G	RS1 (423)	0,92 kW	0,80 kW	0,53 kW	0,01 kW	0,01 kW
IF65L	RS6 (520)	67,16 kW	45,36 kW	28,47 kW	0,04 kW	0,04 kW
IF65R	RS6 (520)	67,16 kW	45,36 kW	28,47 kW	0,04 kW	0,04 kW
IF66G	RS3 (416)	0,92 kW	0,80 kW	0,53 kW	0,01 kW	0,01 kW
IF67G	RS3 (416)	0,92 kW	0,80 kW	0,53 kW	0,01 kW	0,01 kW
IF69L	RS8 (542)	38,55 kW	5,98 kW	10,24 kW	0,02 kW	0,02 kW
IF69R	RS8 (542)	38,55 kW	5,98 kW	10,24 kW	0,02 kW	0,02 kW
IF70L	RS6 (520)	39,93 kW	5,68 kW	10,19 kW	0,02 kW	0,02 kW
IF70R	RS6 (520)	39,93 kW	5,68 kW	10,19 kW	0,02 kW	0,02 kW
IF71G	RS8 (542)	0,92 kW	0,80 kW	0,53 kW	0,01 kW	0,01 kW
IF72G	RS3 (416)	1,14 kW	1,04 kW	0,60 kW	0,01 kW	0,01 kW
IF76G	RS1 (423)	2,48 kW	2,46 kW	1,02 kW	0,02 kW	0,02 kW
IF77G	RS8 (542)	0,92 kW	0,80 kW	0,53 kW	0,01 kW	0,01 kW
IF80G	RS3 (416)	1,14 kW	1,04 kW	0,60 kW	0,01 kW	0,01 kW
IF84L	RS6 (520)	74,67 kW	48,39 kW	28,75 kW	0,03 kW	0,03 kW
IF84R	RS6 (520)	74,67 kW	48,39 kW	28,75 kW	0,03 kW	0,03 kW
IF85G	RS3 (415)	2,03 kW	1,99 kW	0,88 kW	0,02 kW	0,02 kW
IF86G	RS3 (416)	1,81 kW	1,75 kW	0,81 kW	0,01 kW	0,01 kW
IF87G	RS3 (416)	1,14 kW	1,04 kW	0,60 kW	0,01 kW	0,01 kW
IF88G	RS8 (542)	0,92 kW	0,80 kW	0,53 kW	0,01 kW	0,01 kW
IF89G	RS8 (542)	24,81 kW	11,16 kW	5,67 kW	0,06 kW	0,06 kW
IF94G	RS8 (542)	17,39 kW	9,03 kW	8,00 kW	0,06 kW	0,06 kW
IF98G	RS1 (423)	2,28 kW	1,24 kW	0,91 kW	0,01 kW	0,01 kW
IL02G	RS3 (416)	1,04 kW	0,80 kW	0,61 kW	0,02 kW	0,02 kW

BM-Bez.	Abteilung	BMZ1	BMZ2	BMZ3	BMZ4	BMZ5
IL03G	RS3 (416)	0,76 kW	0,62 kW	0,49 kW	0,01 kW	0,01 kW
IL04G	RS5 (530)	5,83 kW	6,02 kW	2,09 kW	0,04 kW	0,04 kW
IL05G	RS5 (530)	24,72 kW	11,07 kW	1,21 kW	0,04 kW	0,04 kW
IL06G	RS5 (530)	53,80 kW	45,91 kW	30,44 kW	0,06 kW	0,06 kW
IL13G	RS7 (512)	20,71 kW	16,89 kW	12,03 kW	0,08 kW	0,08 kW
IL15G	RS1 (423)	0,92 kW	0,80 kW	0,53 kW	0,01 kW	0,01 kW
IL20G	RS7 (512)	28,18 kW	8,23 kW	10,62 kW	0,04 kW	0,04 kW
IL21E	RS8 (543)	2,03 kW	1,99 kW	0,88 kW	0,02 kW	0,02 kW
IL21G	RS8 (543)	4,49 kW	4,60 kW	1,66 kW	0,03 kW	0,03 kW
IL22G	RS7 (512)	2,26 kW	2,22 kW	0,95 kW	0,02 kW	0,02 kW
IL24E	RS7 (512)	2,70 kW	2,70 kW	1,09 kW	0,02 kW	0,02 kW
IL26G	RS8 (542)	14,79 kW	14,79 kW	2,83 kW	0,01 kW	0,01 kW
IL39L	RS6 (520)	63,18 kW	49,33 kW	29,97 kW	0,05 kW	0,05 kW
IL39R	RS6 (520)	63,18 kW	49,33 kW	29,97 kW	0,05 kW	0,05 kW
IL42G	RS8 (543)	7,17 kW	7,44 kW	2,51 kW	0,05 kW	0,05 kW
IL43G	RS7 (512)	21,41 kW	16,74 kW	12,00 kW	0,08 kW	0,08 kW
IL44G	RS7 (512)	19,20 kW	10,19 kW	10,95 kW	0,06 kW	0,06 kW
IL45E	RS8 (543)	3,37 kW	3,41 kW	1,31 kW	0,02 kW	0,02 kW
IL45G	RS8 (543)	4,49 kW	4,60 kW	1,66 kW	0,03 kW	0,03 kW
IL46G	RS7 (512)	3,14 kW	1,44 kW	1,26 kW	0,01 kW	0,01 kW
IL48E	RS7 (512)	2,26 kW	2,22 kW	0,95 kW	0,02 kW	0,02 kW
IL48V	RS8 (543)	1,37 kW	1,27 kW	0,67 kW	0,01 kW	0,01 kW
IL49G	RS3 (416)	1,59 kW	1,51 kW	0,74 kW	0,01 kW	0,01 kW
IL58E	RS7 (512)	2,26 kW	2,22 kW	0,95 kW	0,02 kW	0,02 kW
IF99G	RS3 (416)	0,92 kW	0,80 kW	0,53 kW	0,01 kW	0,01 kW

Tabelle 63: Regressionsergebnis der elektrischen Leistungsmessungen von Montageautomaten mit einer LTS-S5-, LCS- oder S7-Steuerung

Aus der obigen Tabelle können die elektrischen Wirkleistungswerte von Montageautomaten mit einer LTS-S5-, LCS- oder S7-Steuerung entnommen werden. Für die energetisch untersuchten Montageautomaten werden die Messwerte direkt verwendet, für die nicht untersuchten Anlagen wird der Wirkleistungsbezug über das Regressionsmodell des jeweiligen Betriebsmittelzustandes berechnet.

Im nächsten Unterkapitel wird dieselbe Regressionsanalyse für die der Druckluftvolumenstrommessungen von Montageautomaten durchgeführt und daraus Regressionsmodelle zur Berechnung des theoretischen Druckluftbedarfes der fünf Betriebsmittelzustände abgeleitet.

4.2.3.3.2 Regressionsanalyse der Druckluftvolumenstrommessungen von Montageautomaten

Für die in diesem Kapitel folgenden Regressionsanalysen wurden Druckluftvolumenstrommessungen an 31 von insgesamt 116 Montageautomaten in

den Betriebsmittelzuständen 1 bis 4 durchgeführt. Der Stichprobenumfang für die Regressionsanalyse umfasst somit 26,7% aller Montageautomaten im Werk 4 der Julius Blum GmbH. Der prinzipiell erforderliche Stichprobenumfang für die Regressionsanalyse des Druckluftbedarfes von Montageautomaten berechnet sich anhand der im vorherigen Kapitel beschriebenen Formel (2) und auf Basis der Messergebnisse der 31 Druckluftmessungen. Für ein Konfidenzniveau von 90% und einem relativen Fehler von $r^*=10\%$, ergibt sich ein erforderlicher Stichprobenumfang von $n=81$ Stichproben. Da aber lediglich 31 Messwerte zur Verfügung stehen, wird die Regressionsanalyse auf der Basis der vorhandenen Messungen durchgeführt.

In Bezug auf den Druckluftverbrauch von Montageautomaten muss zwischen Montageautomaten, welche mit dem Hardwarekonzept 2.0 ausgestattet sind und solchen, die es nicht sind, unterschieden werden. Das Hardwarekonzept 2.0 steht für ein neues Druckluftversorgungskonzept von Montageanlagen und ermöglicht lediglich eine Druckluftversorgung in den Betriebsmittelzuständen 1, 2 und 3. Im Gegensatz zur elektrischen Leistungsaufnahme von Montageautomaten unterscheiden sich die Druckluftbedarfe in den Betriebsmittelzuständen 4 und 5.

Solange der zur Kompensation der Leckagen benötigte Druckluftvolumenstrom aufgebracht wird, befindet sich die jeweilige Montageanlage im Ruhezustand 1 (BMZ4). Bei Montageautomaten, die nicht mit dem Hardwarekonzept 2.0 ausgestattet sind, muss die Wartungseinheit nach dem Abschalten der Maschinen von Hand geschlossen werden, damit Leckagen verhindert werden. Bei Anlagen, die mit dem Hardwarekonzept 2.0 ausgestattet sind, wird die Wartungseinheit nach dem Abschalten der Maschine automatisch über ein Magnetventil geschlossen. Anschließend befindet sich die Maschine im Betriebsmittelzustand 5, in welchem die Wartungseinheit der Montageanlage definitionsgemäß geschlossen ist. In diesem Betriebsmittelzustand ist unabhängig vom Hardwarekonzept keine Druckluftversorgung der Maschine möglich. Es kann somit festgestellt werden, dass sich bei Montageautomaten mit Hardwarekonzept 2.0 die Betriebsmittelzustände 4 und 5 aus energetischer Sicht nicht unterscheiden. Die folgende Tabelle zeigt die

um die Leckagen bereinigten Messwerte der Druckluftvolumenstrommessungen der untersuchten Montageautomaten ohne Hardwarekonzept 2.0.

BM-Bez.	DL-Zylinder	BMZ1	BMZ2	BMZ3	BMZ4	BMZ5
IP07G	66 Stk	162 l/min	4 l/min	4 l/min	2 l/min	0 l/min
IF84R	285 Stk	5.094 l/min	297 l/min	325 l/min	74 l/min	0 l/min
IP09G	369 Stk	5.241 l/min	916 l/min	891 l/min	322 l/min	0 l/min
IL96G	470 Stk	4.577 l/min	651 l/min	593 l/min	217 l/min	0 l/min
IL64L	302 Stk	4.544 l/min	493 l/min	414 l/min	201 l/min	0 l/min
IF07G	438 Stk	4.178 l/min	538 l/min	526 l/min	186 l/min	0 l/min
IF65L	323 Stk	4.241 l/min	414 l/min	436 l/min	403 l/min	0 l/min
IF65R	320 Stk	3.507 l/min	363 l/min	358 l/min	168 l/min	0 l/min
IL64R	300 Stk	3.335 l/min	228 l/min	194 l/min	43 l/min	0 l/min
IL87G	121 Stk	3.149 l/min	734 l/min	715 l/min	187 l/min	0 l/min
IP08G	150 Stk	2.902 l/min	115 l/min	107 l/min	20 l/min	0 l/min
IF70R	91 Stk	2.975 l/min	215 l/min	190 l/min	120 l/min	0 l/min
IL91L	311 Stk	2.719 l/min	902 l/min	897 l/min	229 l/min	0 l/min
IL91R	308 Stk	2.719 l/min	902 l/min	897 l/min	229 l/min	0 l/min
IF70L	108 Stk	2.243 l/min	102 l/min	100 l/min	27 l/min	0 l/min
IL26G	175 Stk	1.561 l/min	320 l/min	281 l/min	92 l/min	0 l/min
IL85G	44 Stk	1.196 l/min	134 l/min	134 l/min	39 l/min	0 l/min
IF49G	45 Stk	744 l/min	251 l/min	251 l/min	83 l/min	0 l/min
IL63G	107 Stk	476 l/min	74 l/min	74 l/min	27 l/min	0 l/min

Tabelle 64: Druckluftbedarf der untersuchten Montageautomaten ohne Hardwarekonzept 2.0

In dieser Übersicht der Druckluftvolumenstrommessungen der untersuchten Montageautomaten ohne Hardwarekonzept 2.0 sind neben der Anzahl der Druckluftzylinder der untersuchten Anlagen die Druckluftvolumenstrommessungen in den einzelnen Betriebsmittelzuständen dargestellt. Der Produktionszustand (BMZ1) ist der Betriebsmittelzustand, in welchem der Druckluftvolumenstrom der Montageautomaten am größten ist, da die Maschine in diesem Zustand die Druckluft als Arbeitsmedium benötigt. Im Warte- und im Rüstzustand (BMZ2 und 3) benötigen die Montageautomaten ungefähr gleich viel Druckluft, wobei der Volumenstrom im Vergleich zum Produktionszustand viel geringer ist. Wird die Anlage über die Maschinensteuerung von einem Auftrag abgemeldet und die Wartungseinheit nicht händisch zuge dreht, so befindet sich die Maschine definitionsgemäß im Betriebsmittelzustand 4, dem Ruhezustand 1. Bei Montageautomaten, die nicht über das neue Hardwarekonzept 2.0 verfügen, kann im Betriebsmittelzustand 4 ein geringer Druckluftvolumenstrom gemessen werden. Dieser Volumenstrom wird benötigt, um die sich im pneumatischen Netz der Montageautomaten befindlichen Leckagen zu decken und somit den an der Wartungseinheit eingestellten Netzdruck

aufrecht zu erhalten. Die folgende Tabelle zeigt die Messergebnisse der Druckluftvolumenstrom-messungen der untersuchten Montageautomaten mit Hardwarekonzept 2.0.

BM-Bez.	DL-Zylinder	BMZ1	BMZ2	BMZ3	BMZ4	BMZ5
IP34G	259 Stk	3.637 l/min	111 l/min	129 l/min	0 l/min	0 l/min
IP29G	151 Stk	3.083 l/min	137 l/min	130 l/min	0 l/min	0 l/min
IP31G	183 Stk	2.540 l/min	116 l/min	117 l/min	0 l/min	0 l/min
IP29E	94 Stk	1.328 l/min	28 l/min	28 l/min	0 l/min	0 l/min
IP46L	213 Stk	1.224 l/min	39 l/min	29 l/min	0 l/min	0 l/min
IP46R	210 Stk	223 l/min	7 l/min	8 l/min	0 l/min	0 l/min
IP37G	367 Stk	5.180 l/min	134 l/min	117 l/min	0 l/min	0 l/min
IF26G	44 Stk	1.165 l/min	41 l/min	40 l/min	0 l/min	0 l/min
IP32G	404 Stk	3.700 l/min	285 l/min	284 l/min	0 l/min	0 l/min
IP33G	189 Stk	1.250 l/min	127 l/min	127 l/min	0 l/min	0 l/min
IP35G	134 Stk	2.400 l/min	109 l/min	109 l/min	0 l/min	0 l/min
IP40G	126 Stk	2.900 l/min	111 l/min	110 l/min	0 l/min	0 l/min

Tabelle 65: Druckluftbedarf der untersuchten Montageautomaten mit Hardwarekonzept 2.0

In der obigen Tabelle ist zu erkennen, dass bei den untersuchten Montageautomaten mit dem Hardwarekonzept 2.0 keine Leckagen im Betriebsmittelzustand 4 gemessen werden können. Da aber in jedem Druckluftsystem Leckagen vorhanden sind, erfolgt die Ermittlung der Leckagen für Montageautomaten im Anschluss durch eine Regressionsanalyse der Messungen des Druckluftvolumenstroms der Montageautomaten ohne Magnetventil im Betriebsmittelzustand 4. Als möglicher Regressor kommt die Anzahl der in diesen Montageautomaten verbauten Druckluftzylinder in Frage, da von einer Zunahme der Leckagen mit der Anzahl an Pneumatik-Anwendungen ausgegangen wird. Die folgende Regressionsanalyse untersucht somit den Druckluftbedarf von Montageautomaten in den Betriebsmittelzuständen 1 bis 4 in Abhängigkeit von der Anzahl der in diesen verbauten Druckluftzylindern. Vor dem Beginn der Regressionsanalyse der Messwerte der Betriebsmittelzustände 1 bis 3 müssen diese zuerst um die Leckagen bereinigt werden, weshalb im Folgenden mit der Regression der Messwerte des Betriebsmittelzustandes 4 begonnen wird.

Montageautomaten im Betriebsmittelzustand 4

Diese Regressionsanalyse wird auf Basis der in Tabelle 64 aufgeführten und bereinigten Druckluftvolumenströme für den Betriebsmittelzustand 4 (BMZ4)

durchgeführt. Das Ergebnis wird in Form der folgenden Regressionsstatistik beschrieben.

r	0,888
R ²	0,789
R ² _{adj}	0,730
Standardfehler	85,970
Beobachtungen	18

	<i>Freiheitsgrade</i>	<i>Quadratsummen</i>	<i>Mittlere Quadratsumme</i>	<i>F-Wert</i>	<i>F_{krit}</i>
Regression	1	470374	470374	64	0,000
Residuen	17	125646	7391		
Gesamt	18	596020			

	<i>Koeffizienten</i>	<i>Standardfehler</i>	<i>t-Statistik</i>	<i>p-Wert</i>
Schnittpunkt	0,000	#NV	#NV	#NV
Druckluftzylinder	0,599	0,075	7,978	0,000

Tabelle 66: Regressionsstatistik der Druckluftvolumenstrommessungen im BMZ4

Mit Hilfe der in der Regressionsstatistik bestimmten Koeffizienten ergibt sich eine Regressionsgerade, welche in der folgenden Abbildung mit den 31 erfassten Messwerten im Betriebsmittelzustand 4 verglichen wird.

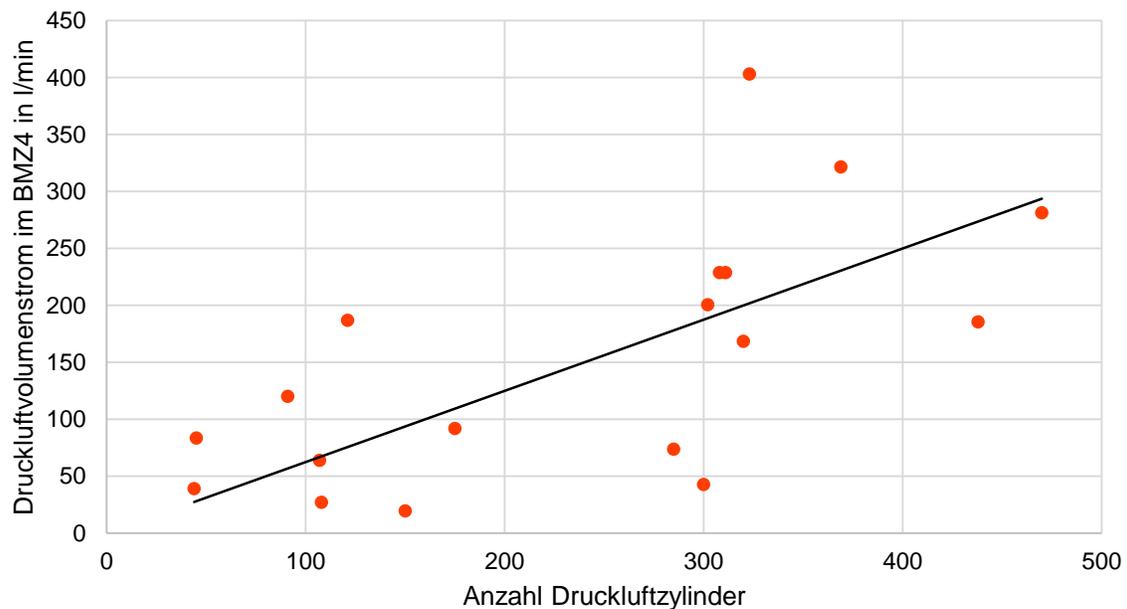


Abbildung 37: Zusammenhang zwischen Druckluftverbrauch und -zylinderzahl von Montageautomaten im Betriebsmittelzustand 4

Aus dieser Regressionsstatistik ergibt sich die Formel für die Berechnung der Leckagen von Montageautomaten im Betriebsmittelzustand 4, sie lautet:

$$\dot{V}_{\text{BMZ4}} = 0,599 \cdot x_1 \quad (26)$$

Aus dieser Beziehung errechnet sich der durchschnittliche Leckagenanteil, um welchen die gemessenen Druckluftvolumenströme der Montageautomaten in den Betriebsmittelzuständen 1, 2 und 3 bereinigt werden müssen. Die folgende Tabelle zeigt die leckagebereinigten Druckluftvolumenströme der Betriebsmittelzustände 1, 2 und 3 der 31 untersuchten Montageautomaten. Außerdem kann der folgenden Tabelle der Leckagenanteil der jeweiligen Maschine entnommen werden, wobei die fettmarkierten Werte die hochgerechneten Leckagen derjenigen Montageanlagen sind, welche über das Magnetventil zur Druckluftabspernung verfügen.

BM-Bez.	DL-Zylinder	Taktzeit	BMZ1 (bereinigt)	BMZ2 (bereinigt)	BMZ3 (bereinigt)	Leckagen
IP34G	259 Stk	2,44 s	3.590 l/min	64 l/min	82 l/min	47 l/min
IP29G	151 Stk	1,57 s	2.992 l/min	46 l/min	39 l/min	90 l/min
IP31G	183 Stk	2,42 s	2.430 l/min	6 l/min	7 l/min	110 l/min
IP29E	94 Stk	1,50 s	1.318 l/min	18 l/min	18 l/min	10 l/min
IP46L	213 Stk	4,91 s	1.213 l/min	29 l/min	18 l/min	11 l/min
IP46R	210 Stk	5,72 s	220 l/min	4 l/min	5 l/min	3 l/min
IP37G	367 Stk	3,17 s	5.137 l/min	92 l/min	74 l/min	43 l/min
IF26G	44 Stk	1,55 s	1.139 l/min	18 l/min	17 l/min	26 l/min
IP32G	404 Stk	2,57 s	3.458 l/min	55 l/min	52 l/min	242 l/min
IP33G	189 Stk	2,42 s	1.137 l/min	18 l/min	17 l/min	113 l/min
IP35G	134 Stk	1,31 s	2.320 l/min	37 l/min	35 l/min	80 l/min
IP40G	126 Stk	1,12 s	2.825 l/min	45 l/min	42 l/min	75 l/min
IP07G	66 Stk	17,41 s	160 l/min	3 l/min	3 l/min	2 l/min
IF84R	285 Stk	2,27 s	5.020 l/min	223 l/min	251 l/min	74 l/min
IP09G	369 Stk	1,65 s	4.920 l/min	594 l/min	570 l/min	322 l/min
IL96G	470 Stk	1,59 s	4.296 l/min	370 l/min	312 l/min	281 l/min
IL64L	302 Stk	1,84 s	4.344 l/min	293 l/min	213 l/min	201 l/min
IF07G	438 Stk	2,60 s	3.993 l/min	352 l/min	340 l/min	186 l/min
IF65L	323 Stk	2,27 s	3.838 l/min	11 l/min	33 l/min	403 l/min
IF65R	320 Stk	2,27 s	3.338 l/min	195 l/min	189 l/min	168 l/min
IL64R	300 Stk	1,84 s	3.292 l/min	186 l/min	152 l/min	43 l/min
IL87G	121 Stk	1,05 s	2.962 l/min	547 l/min	528 l/min	187 l/min
IP08G	150 Stk	1,46 s	2.883 l/min	95 l/min	88 l/min	20 l/min
IF70R	91 Stk	3,40 s	2.855 l/min	95 l/min	70 l/min	120 l/min
IL91L	311 Stk	1,95 s	2.490 l/min	674 l/min	669 l/min	229 l/min
IL91R	308 Stk	1,95 s	2.490 l/min	674 l/min	669 l/min	229 l/min
IF70L	108 Stk	3,40 s	2.216 l/min	75 l/min	73 l/min	27 l/min
IL26G	175 Stk	1,80 s	1.470 l/min	228 l/min	189 l/min	92 l/min
IL85G	44 Stk	0,76 s	1.156 l/min	94 l/min	95 l/min	39 l/min
IF49G	45 Stk	1,19 s	660 l/min	167 l/min	168 l/min	83 l/min
IL63G	107 Stk	2,20 s	412 l/min	10 l/min	10 l/min	64 l/min

Tabelle 67: Bereinigte Druckluftvolumenströme und Leckagen der 31 untersuchten Montageautomaten

Montageautomaten im Betriebsmittelzustand 1

Die Regressionsanalyse wird auf Basis der in Tabelle 67 genannten und bereinigten Druckluftvolumenströme für den Betriebsmittelzustand 1 (BMZ1) durchgeführt. Das Ergebnis wird in Form der folgenden Regressionsstatistik beschrieben.

r	0,937				
R ²	0,878				
R ² _{adj}	0,845				
Standardfehler	1052,545				
Beobachtungen	31				
	<i>Freiheitsgrade</i>	<i>Quadratsummen</i>	<i>Mittlere Quadratsumme</i>	<i>F-Wert</i>	<i>F_{krit}</i>
Regression	1	239237644	239237644	216	0,000
Residuen	30	33235514	1107850		
Gesamt	31	272473158			
	<i>Koeffizienten</i>	<i>Standardfehler</i>	<i>t-Statistik</i>	<i>p-Wert</i>	
Schnittpunkt	0	#NV	#NV	#NV	
Druckluftzylinder	11,197	0,762	14,695	0,000	

Tabelle 68: Regressionsstatistik der Druckluftvolumenstrommessungen im BMZ1

Mit Hilfe der in der Regressionsstatistik bestimmten Koeffizienten ergibt sich eine Regressionsgerade, welche in der folgenden Abbildung mit den 31 erfassten Messwerten der Druckluftvolumenstrommessung im BMZ1 verglichen wird.

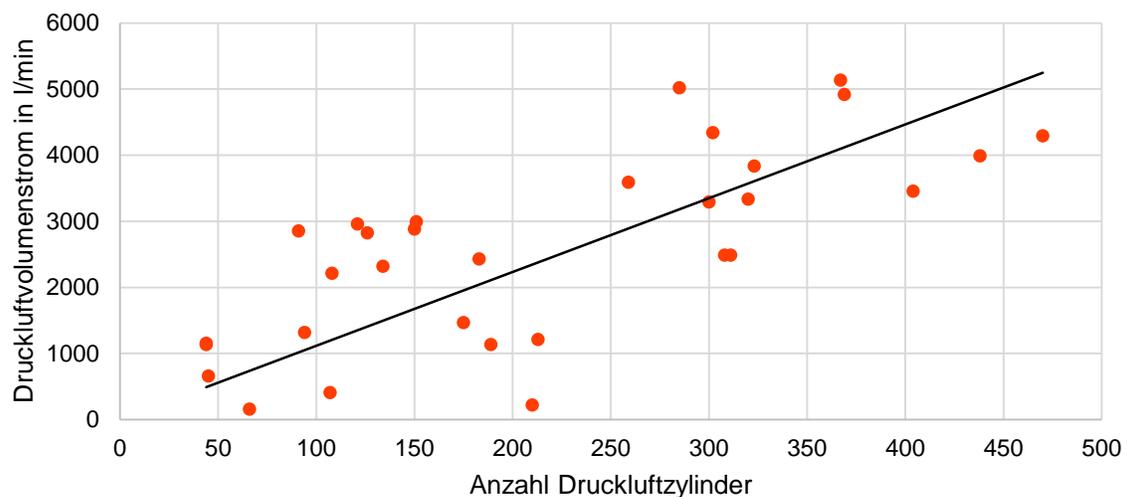


Abbildung 38: Zusammenhang zwischen Druckluftverbrauch und -zylinderzahl von Montageautomaten im Betriebsmittelzustand 1

Montageautomaten im Betriebsmittelzustand 2

Die Regressionsanalyse wird auf Basis der in Tabelle 67 aufgeführten bereinigten Druckluftvolumenströme für den Betriebsmittelzustand 2 (BMZ2) durchgeführt. Das Ergebnis wird in Form der folgenden Regressionsstatistik beschrieben.

r	0,755
R ²	0,569
R ² _{adj}	0,536
Standardfehler	179,153
Beobachtungen	31

	<i>Freiheitsgrade</i>	<i>Quadratsummen</i>	<i>Mittlere Quadratsumme</i>	<i>F-Wert</i>	<i>F_{krit}</i>
Regression	1	1272669	1272669	40	0,000
Residuen	30	962872	32096		
Gesamt	31	2235541			

	<i>Koeffizienten</i>	<i>Standardfehler</i>	<i>t-Statistik</i>	<i>p-Wert</i>
Schnittpunkt	0,000	#NV	#NV	#NV
Druckluftzylinder	0,817	0,130	6,297	0,000

Tabelle 69: Regressionsstatistik der Druckluftvolumenstrommessungen im BMZ2

Mit Hilfe der in der Regressionsstatistik bestimmten Koeffizienten ergibt sich eine Regressionsgerade, welche in der folgenden Abbildung mit den 31 erfassten Messwerten der Druckluftvolumenstrommessung im BMZ2 verglichen wird.

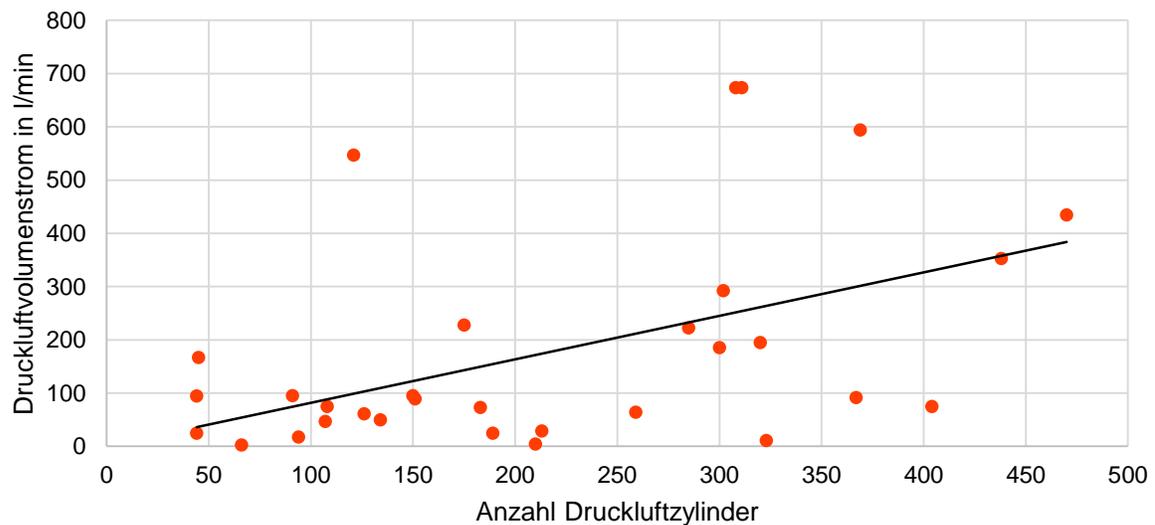


Abbildung 39: Zusammenhang zwischen Druckluftverbrauch und -zylinder von Montageautomaten im Betriebsmittelzustand 2

Montageautomaten im Betriebsmittelzustand 3

Die Regressionsanalyse wird auf Basis der in Tabelle 67 enthaltenen und bereinigten Druckluftvolumenströme für den Betriebsmittelzustand 3 (BMZ3) durchgeführt. Das Ergebnis wird in Form der folgenden Regressionsstatistik beschrieben.

r	0,744				
R ²	0,554				
R ² _{adj}	0,521				
Standardfehler	174,704				
Beobachtungen	31				
	<i>Freiheitsgrade</i>	<i>Quadratsummen</i>	<i>Mittlere Quadratsumme</i>	<i>F-Wert</i>	<i>F_{krit}</i>
Regression	1	1137092	1137092	37	0,000
Residuen	30	915647	30522		
Gesamt	31	2052739			
	<i>Koeffizienten</i>	<i>Standardfehler</i>	<i>t-Statistik</i>	<i>p-Wert</i>	
Schnittpunkt	0	#NV	#NV	#NV	
Druckluftzylinder	0,772	0,126	6,104	0,000	

Tabelle 70: Regressionsstatistik der Druckluftvolumenstrommessungen im BMZ2

Mit Hilfe der in der Regressionsstatistik bestimmten Koeffizienten ergibt sich eine Regressionsgerade, welche in der folgenden Abbildung, mit den 31 Messwerten der Druckluftvolumenstrommessung im Betriebsmittelzustand 3 verglichen wird.

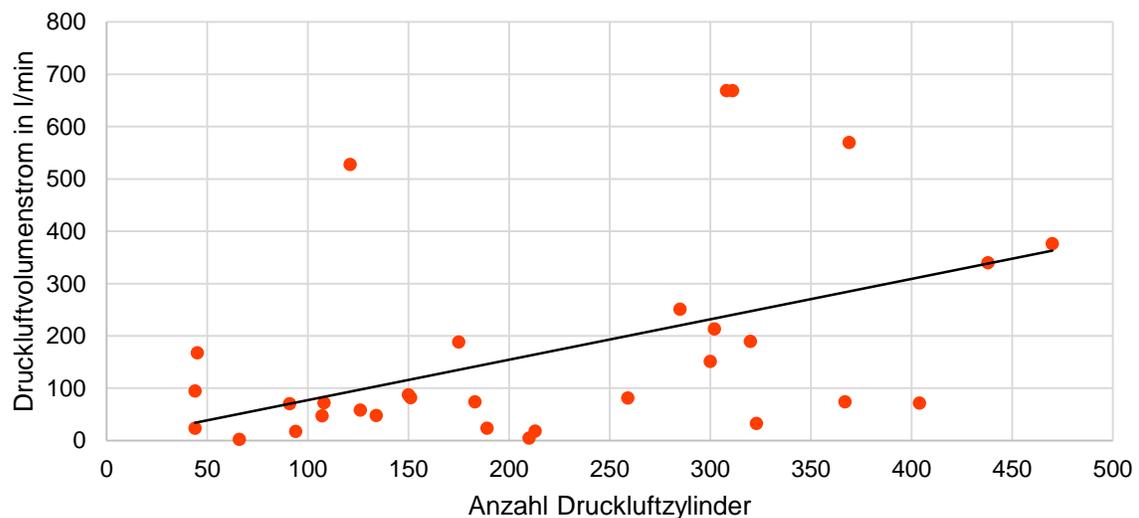


Abbildung 40: Zusammenhang zwischen Druckluftverbrauch und -zylinder von Montageautomaten im Betriebsmittelzustand 3

Ergebnis der Regressionsanalyse der Druckluftvolumenstrommessungen

Das Ergebnis der Regressionsanalyse der Druckluftvolumenstrommessungen von Montageautomaten sind mathematische Beziehungen, welche die Berechnung des Druckluftbedarfs der vier relevanten Betriebsmittelzustände erlauben.

$$\dot{V}_{DL_BMZ1}=11,197x_1 \quad (27)$$

$$\dot{V}_{DL_BMZ2}=0,817x_1 \quad (28)$$

$$\dot{V}_{DL_BMZ3}=0,772x_1 \quad (29)$$

$$\dot{V}_{DL_BMZ4}=0,599x_1 \quad (30)$$

Die obigen 4 Formeln fassen das Ergebnis der Regressionsanalyse der Druckluftvolumenstrommessungen der untersuchten Montageautomaten in den Betriebsmittelzuständen 1 bis 4 zusammen. Es zeigt sich, dass der Druckluftbedarf von Montageanlagen proportional zur Anzahl dort verbauten Druckluftzylinder (x_1) zunimmt. Der Druckluftvolumenstrom im Betriebsmittelzustand 4 entspricht der Leckluft der Automaten und muss zu den Betriebsmittelzuständen 1 bis 3 dazu addiert werden. Montageautomaten mit dem Hardwarekonzept 2.0 werden im BMZ4 nicht mit Druckluft versorgt. Die Ergebnisse der Berechnung der Druckluftvolumenströme von Montageautomaten in den Betriebsmittelzuständen 1 bis 4 erfolgen aus der Anwendung der aus der Regressionsanalyse resultierenden mathematischen Ansätze und werden in der folgenden Tabelle zusammengefasst.

Maschine	Abteilung	BMZ1	BMZ2	BMZ3	BMZ4	BMZ5	Leckluft
BV001	RS3	1.699 l/min	204 l/min	197 l/min	86 l/min	0 l/min	86 l/min
BV002	RS3	1.616 l/min	194 l/min	188 l/min	82 l/min	0 l/min	82 l/min
IF07G	RS1	4.178 l/min	538 l/min	526 l/min	186 l/min	0 l/min	186 l/min
IF15G	RS3	24 l/min	3 l/min	3 l/min	1 l/min	0 l/min	1 l/min
IF21G	RS5	24 l/min	3 l/min	3 l/min	1 l/min	0 l/min	1 l/min
IF24G	RS1	283 l/min	34 l/min	33 l/min	14 l/min	0 l/min	14 l/min
IF25G	RS3	118 l/min	14 l/min	14 l/min	6 l/min	0 l/min	6 l/min
IF26G	RS3	1.165 l/min	41 l/min	40 l/min	0 l/min	0 l/min	26 l/min
IF34R	KB	401 l/min	48 l/min	47 l/min	20 l/min	0 l/min	20 l/min
IF49G	RS3	744 l/min	251 l/min	251 l/min	83 l/min	0 l/min	83 l/min
IF58G	RS1	436 l/min	52 l/min	51 l/min	22 l/min	0 l/min	22 l/min

Maschine	Abteilung	BMZ1	BMZ2	BMZ3	BMZ4	BMZ5	Leckluft
IF65L	RS6	4.241 l/min	414 l/min	436 l/min	403 l/min	0 l/min	403 l/min
IF65R	RS6	3.507 l/min	363 l/min	358 l/min	168 l/min	0 l/min	168 l/min
IF66G	RS3	1.710 l/min	205 l/min	199 l/min	87 l/min	0 l/min	87 l/min
IF67G	RS3	354 l/min	42 l/min	41 l/min	18 l/min	0 l/min	18 l/min
IF69L	RS8	967 l/min	116 l/min	112 l/min	49 l/min	0 l/min	49 l/min
IF69R	RS8	1.132 l/min	136 l/min	132 l/min	57 l/min	0 l/min	57 l/min
IF70L	RS6	2.243 l/min	102 l/min	100 l/min	27 l/min	0 l/min	27 l/min
IF70R	RS6	2.975 l/min	215 l/min	190 l/min	120 l/min	0 l/min	120 l/min
IF71G	RS8	436 l/min	52 l/min	51 l/min	22 l/min	0 l/min	22 l/min
IF72G	RS3	1.003 l/min	120 l/min	116 l/min	51 l/min	0 l/min	51 l/min
IF76G	RS1	1.062 l/min	127 l/min	123 l/min	54 l/min	0 l/min	54 l/min
IF77G	RS8	106 l/min	13 l/min	12 l/min	5 l/min	0 l/min	5 l/min
IF80G	RS3	590 l/min	71 l/min	69 l/min	30 l/min	0 l/min	30 l/min
IF84L	RS6	3.515 l/min	422 l/min	408 l/min	178 l/min	0 l/min	178 l/min
IF84R	RS6	5.094 l/min	297 l/min	325 l/min	74 l/min	0 l/min	74 l/min
IF85G	RS3	779 l/min	93 l/min	90 l/min	40 l/min	0 l/min	40 l/min
IF86G	RS3	1.380 l/min	166 l/min	160 l/min	70 l/min	0 l/min	70 l/min
IF87G	RS3	590 l/min	71 l/min	69 l/min	30 l/min	0 l/min	30 l/min
IF88G	RS8	425 l/min	51 l/min	49 l/min	22 l/min	0 l/min	22 l/min
IF89G	RS8	4.341 l/min	521 l/min	504 l/min	220 l/min	0 l/min	220 l/min
IF94G	RS8	3.114 l/min	374 l/min	362 l/min	158 l/min	0 l/min	158 l/min
IF98G	RS1	1.191 l/min	143 l/min	138 l/min	60 l/min	0 l/min	60 l/min
IF99G	RS3	165 l/min	20 l/min	19 l/min	8 l/min	0 l/min	8 l/min
IL02G	RS3	613 l/min	74 l/min	71 l/min	31 l/min	0 l/min	31 l/min
IL03G	RS3	519 l/min	62 l/min	60 l/min	26 l/min	0 l/min	26 l/min
IL04G	RS5	1.321 l/min	159 l/min	153 l/min	67 l/min	0 l/min	67 l/min
IL05G	RS5	1.934 l/min	232 l/min	225 l/min	98 l/min	0 l/min	98 l/min
IL06G	RS5	2.347 l/min	282 l/min	273 l/min	119 l/min	0 l/min	119 l/min
IL13G	RS7	4.624 l/min	555 l/min	537 l/min	235 l/min	0 l/min	235 l/min
IL15G	RS1	460 l/min	55 l/min	53 l/min	23 l/min	0 l/min	23 l/min
IL20G	RS7	3.385 l/min	406 l/min	393 l/min	172 l/min	0 l/min	172 l/min
IL21E	RS8	1.227 l/min	147 l/min	143 l/min	62 l/min	0 l/min	62 l/min
IL21G	RS8	14.733 l/min	1.768 l/min	1.712 l/min	748 l/min	0 l/min	748 l/min
IL22G	RS7	1.427 l/min	171 l/min	166 l/min	72 l/min	0 l/min	72 l/min
IL24E	RS7	2.253 l/min	270 l/min	262 l/min	114 l/min	0 l/min	114 l/min
IL26G	RS8	1.561 l/min	320 l/min	281 l/min	92 l/min	0 l/min	92 l/min
IL28G	RS5	5.037 l/min	604 l/min	585 l/min	256 l/min	0 l/min	256 l/min
IL29G	RS5	1.227 l/min	147 l/min	143 l/min	62 l/min	0 l/min	62 l/min
IL30G	RS5	3.397 l/min	408 l/min	395 l/min	172 l/min	0 l/min	172 l/min
IL39L	RS6	3.963 l/min	476 l/min	460 l/min	201 l/min	0 l/min	201 l/min
IL39R	RS6	3.881 l/min	466 l/min	451 l/min	197 l/min	0 l/min	197 l/min
IL40G	RS3	1.663 l/min	200 l/min	193 l/min	84 l/min	0 l/min	84 l/min
IL42G	RS8	4.541 l/min	545 l/min	528 l/min	230 l/min	0 l/min	230 l/min
IL43G	RS7	4.754 l/min	570 l/min	552 l/min	241 l/min	0 l/min	241 l/min
IL44G	RS7	3.633 l/min	436 l/min	422 l/min	184 l/min	0 l/min	184 l/min
IL45E	RS8	3.397 l/min	408 l/min	395 l/min	172 l/min	0 l/min	172 l/min
IL45G	RS8	6.617 l/min	794 l/min	769 l/min	336 l/min	0 l/min	336 l/min
IL46G	RS7	1.250 l/min	150 l/min	145 l/min	63 l/min	0 l/min	63 l/min
IL48E	RS7	2.253 l/min	270 l/min	262 l/min	114 l/min	0 l/min	114 l/min
IL48V	RS8	566 l/min	68 l/min	66 l/min	29 l/min	0 l/min	29 l/min
IL49G	RS3	1.014 l/min	122 l/min	118 l/min	51 l/min	0 l/min	51 l/min
IL57G	RS3	1.533 l/min	184 l/min	178 l/min	78 l/min	0 l/min	78 l/min
IL58E	RS7	1.887 l/min	226 l/min	219 l/min	96 l/min	0 l/min	96 l/min
IL63G	RS1	476 l/min	74 l/min	74 l/min	64 l/min	0 l/min	64 l/min
IL64L	RS6	4.544 l/min	493 l/min	414 l/min	201 l/min	0 l/min	201 l/min
IL64R	RS6	3.335 l/min	228 l/min	194 l/min	43 l/min	0 l/min	43 l/min
IL65G	RS7	4.931 l/min	592 l/min	573 l/min	250 l/min	0 l/min	250 l/min
IL66G	RS7	3.090 l/min	371 l/min	359 l/min	157 l/min	0 l/min	157 l/min
IL67G	RS8	4.742 l/min	569 l/min	551 l/min	241 l/min	0 l/min	241 l/min

Maschine	Abteilung	BMZ1	BMZ2	BMZ3	BMZ4	BMZ5	Leckluft
IL68E	RS7	1.687 l/min	202 l/min	196 l/min	86 l/min	0 l/min	86 l/min
IL74G	RS8	3.845 l/min	461 l/min	447 l/min	195 l/min	0 l/min	195 l/min
IL75G	RS1	1.109 l/min	133 l/min	129 l/min	56 l/min	0 l/min	56 l/min
IL77G	RS5	1.345 l/min	161 l/min	156 l/min	68 l/min	0 l/min	68 l/min
IL82G	RS1	531 l/min	64 l/min	62 l/min	27 l/min	0 l/min	27 l/min
IL83G	RS1	1.121 l/min	134 l/min	130 l/min	57 l/min	0 l/min	57 l/min
IL84G	RS8	5.273 l/min	633 l/min	613 l/min	268 l/min	0 l/min	268 l/min
IL85G	RS3	1.196 l/min	134 l/min	134 l/min	39 l/min	0 l/min	39 l/min
IL87G	RS3	3.149 l/min	734 l/min	715 l/min	187 l/min	0 l/min	187 l/min
IL88G	RS3	1.533 l/min	184 l/min	178 l/min	78 l/min	0 l/min	78 l/min
IL91L	RS6	2.719 l/min	902 l/min	897 l/min	229 l/min	0 l/min	229 l/min
IL91R	RS6	2.719 l/min	902 l/min	897 l/min	229 l/min	0 l/min	229 l/min
IL93G	RS1	613 l/min	74 l/min	71 l/min	31 l/min	0 l/min	31 l/min
IL95V	RS8	543 l/min	65 l/min	63 l/min	28 l/min	0 l/min	28 l/min
IL96G	RS7	4.577 l/min	651 l/min	593 l/min	281 l/min	0 l/min	281 l/min
IL97G	RS7	3.197 l/min	384 l/min	371 l/min	162 l/min	0 l/min	162 l/min
IL98G	RS8	5.898 l/min	708 l/min	685 l/min	299 l/min	0 l/min	299 l/min
IL99G	RS7	1.463 l/min	175 l/min	170 l/min	74 l/min	0 l/min	74 l/min
IM07G	KB	731 l/min	88 l/min	85 l/min	37 l/min	0 l/min	37 l/min
IP02G	RS1	4.353 l/min	522 l/min	506 l/min	221 l/min	0 l/min	221 l/min
IP04G	RS7	3.031 l/min	364 l/min	352 l/min	154 l/min	0 l/min	154 l/min
IP07G	RS5	162 l/min	4 l/min	4 l/min	2 l/min	0 l/min	2 l/min
IP08G	RS5	2.902 l/min	115 l/min	107 l/min	20 l/min	0 l/min	20 l/min
IP09G	RS8	5.241 l/min	916 l/min	891 l/min	322 l/min	0 l/min	322 l/min
IP10G	RS5	2.453 l/min	294 l/min	285 l/min	125 l/min	0 l/min	125 l/min
IP16G	RS1	1.604 l/min	192 l/min	186 l/min	81 l/min	0 l/min	81 l/min
IP19E	RS7	1.581 l/min	190 l/min	184 l/min	80 l/min	0 l/min	80 l/min
IP21G	RS1	2.395 l/min	287 l/min	278 l/min	122 l/min	0 l/min	122 l/min
IP26G	RS7	543 l/min	65 l/min	63 l/min	28 l/min	0 l/min	28 l/min
IP28G	RS1	1.899 l/min	228 l/min	221 l/min	96 l/min	0 l/min	96 l/min
IP29E	RS5	1.328 l/min	28 l/min	28 l/min	0 l/min	0 l/min	10 l/min
IP29G	RS5	3.083 l/min	137 l/min	130 l/min	0 l/min	0 l/min	90 l/min
IP31G	RS5	2.540 l/min	116 l/min	117 l/min	0 l/min	0 l/min	110 l/min
IP32G	RS5	3.700 l/min	285 l/min	284 l/min	0 l/min	0 l/min	242 l/min
IP33G	RS5	1.250 l/min	127 l/min	127 l/min	0 l/min	0 l/min	113 l/min
IP34G	RS5	3.637 l/min	111 l/min	129 l/min	0 l/min	0 l/min	47 l/min
IP35G	RS1	2.400 l/min	109 l/min	109 l/min	0 l/min	0 l/min	80 l/min
IP37G	KB	5.180 l/min	134 l/min	117 l/min	0 l/min	0 l/min	43 l/min
IP39G	RS6	3.267 l/min	392 l/min	380 l/min	166 l/min	0 l/min	166 l/min
IP40G	RS5	2.900 l/min	111 l/min	110 l/min	0 l/min	0 l/min	75 l/min
IP41G	RS5	436 l/min	52 l/min	51 l/min	0 l/min	0 l/min	22 l/min
IP46L	KB	1.224 l/min	39 l/min	29 l/min	0 l/min	0 l/min	11 l/min
IP46R	KB	223 l/min	7 l/min	8 l/min	0 l/min	0 l/min	3 l/min
IP46V	KB	720 l/min	86 l/min	84 l/min	0 l/min	0 l/min	37 l/min
IP48G	RS6	908 l/min	109 l/min	106 l/min	0 l/min	0 l/min	46 l/min
LT43G	RS8	4.647 l/min	558 l/min	540 l/min	236 l/min	0 l/min	236 l/min

Tabelle 71: Ergebnis der Regression der Druckluftvolumenstrommessungen von Montageautomaten

Im Sinne eines Bottom-Up-Ansatzes werden die so ermittelten bzw. gemessenen elektrischen Wirkleistungs-, Druckluft- und Erdgasbedarfe der einzelnen Betriebsmittelzustände mit der aus Kapitel 4.1.3 bekannten Dauer der einzelnen Betriebsmittelzuständen multipliziert und somit der Energieverbrauch pro

Betriebsmittelzustand berechnet. Dieser kann dann zum Gesamtenergieverbrauch pro Betriebsmittel zusammengefasst werden.

4.2.4 Leistungsanalyse der Pulverbeschichtungsanlagen

Die Leistungsanalyse der Pulverbeschichtungsanlagen konnte aufgrund fehlender Messmöglichkeiten nur an der Pulverbeschichtungslinie 6 durchgeführt werden. Die elektrische Leistungsmessung an der gemeinsamen Zuleitung der Linien 5 und 6 ergibt einen Messwert von 68,2kW. Von dieser Zuleitung werden die Anlagenteile Vorbehandlung, Wassertrockner, Pulvertrockner und Kettentransport versorgt. Da jede Pulverbeschichtungslinie mit einer Pulverfilterstation und einer Pulverkabine ausgestattet ist, werden diese separat gemessen. Die elektrische Leistungsmessung der Pulverstation ergibt 17,7kW und die der Pulverkabine 1,3kW. Bei Betrieb einer Pulverbeschichtungslinie wird prinzipiell zwischen Teil- und Vollastbetrieb unterschieden. Aus der Sicht des elektrischen Leistungsbezuges unterscheidet sich der Teillastbetrieb nur durch die Abschaltung der Pulverkabine.

Die Messung des Erdgasverbrauches im Teil- und Vollastbetrieb erfolgt durch Ablesen eines Durchflussvolumenstromzählers unmittelbar vor den Erdgasbrennern des Pulver- und Wassertrockners der Linie 6. Die Messung des Pulvertrockners ergibt einen Erdgasvolumenstrom von 23,4m³/h im Vollastbetrieb und 5,4m³/h im Teillastbetrieb. Der Wassertrockner benötigt hingegen 24m³/h im Vollastbetrieb und 4,8m³/h im Teillastbetrieb.

Diese Messwerte dienen zur Bestimmung des Energieverbrauches der Pulverbeschichtungslinie 6 pro Betriebsmittelzustand. Die folgende Tabelle zeigt den elektrischen Leistungs- und Erdgasbedarf der Line 6 pro Betriebsmittelzustand.

BM-Bez.	Abteilung	BMZ1	BMZ2	BMZ3	BMZ4	BMZ5
KB06G	RS3	53,10 kW	53,10 kW	52,45 kW	0,80 kW	0,80 kW

Tabelle 72: elektrische Leistung der Pulverbeschichtungslinie 6 pro Betriebsmittelzustand

Die Messwerte der elektrischen Leistung von Teil- und Vollast werden auf die Betriebsmittelzustände 1, 2 und 3 aufgeteilt. In den Betriebsmittelzuständen 1 und 2 befindet sich die Pulverbeschichtungsanlage aus der Sicht der elektrischen Leistung

im Volllastbetrieb und im Betriebsmittelzustand 3 im Teillastbetrieb, weshalb dieser um die elektrische Leistung der Pulverstation weniger Wirkleistung benötigt. Im Betriebsmittelzustand 4 und 5 ist die Anlage ausgeschaltet und benötigt lediglich über eine geringe Versorgungsleistung von 0,8kW.

Im Betriebsmittelzustand 1 befindet sich die Pulverbeschichtungsanlage im Teillastbetrieb und im Betriebsmittelzustand 2 im Volllastbetrieb. Der Betriebsmittelzustand 3 definiert einen Zustand mit reduzierter Temperatur, weshalb dieser weniger Erdgas benötigt als im Betriebsmittelzustand 1 bzw. im Teillastbetrieb. Im Betriebsmittelzustand 4 und 5 ist die Anlage ausgeschaltet und benötigt kein Erdgas. Aus Abbildung 24 ist bekannt wie viel Erdgas in die Produktionsbereiche fließt und sich auf die vier Pulverbeschichtungsanlagen aufzuteilen hat. Die oben beschriebenen Messwerte des Erdgasvolumenstromes in der Teil- und Volllast führen zu einem Ergebnis, welches nur ca. die Hälfte des Erdgasverbrauches der Pulverbeschichtungsanlagen im GJ2012/13 erklärt. Aus diesem Grund werden die Erdgasvolumenströme erhöht bis der theoretisch erforderliche Verbrauch erreicht ist. Die folgende Tabelle zeigt die so bestimmten Erdgasvolumenströme pro Betriebsmittelzustand der Pulverbeschichtungslinie 6.

Messgröße	BM-Bez.	Abteilung	BMZ1	BMZ2	BMZ3	BMZ4	BMZ5
Erdgasvolumenstrom [V _{DL}]	KB06G	RS3	17,5 m³/h	35,4 m³/h	11,7 m³/h	0 m³/h	0 m³/h

Tabelle 73: Erdgasvolumenstrom der Pulverbeschichtungslinie 6 pro Betriebsmittelzustand

Die Energiebezugswerte pro Betriebsmittelzustand der Pulverbeschichtungslinie 6 aus der obigen Tabelle werden für die Linien 3, 4, und 5 übernommen.

4.3 Energieverbrauch der Produktionstechnologien

In diesem Kapitel wird der Gesamtenergieverbrauch pro Produktionstechnologie sowohl für den Alt- als auch für den Neubau ermittelt. Der Altbau umfasst die Abteilungen mit den Kurzbezeichnungen KB, RS1 und RS4, der Neubau die Abteilungen RS5, RS6, RS7 und RS8.

4.3.1 Energieverbrauch der Pressen

Die Produktionstechnologie Pressen benötigt für ihren Betrieb lediglich eine elektrische Energieversorgung. Die folgende Tabelle beschreibt den Energieverbrauch der Pressen im Werk 4 (W4) in den fünf Betriebsmittelzuständen BMZ1 bis BMZ5 für das GJ2012/13. Zusätzlich sind die produzierte Stückzahl und die Energieeffizienz (EE) jeder Presse angegeben. Die Energieeffizienz beschreibt das Verhältnis zwischen Gesamtenergieverbrauch und der Stückzahl.

BM- Bez.	BMZ1	BMZ2	BMZ3	BMZ4	BMZ5	Stückzahl	EE
	kWh _{EL}	Stk	kWh/Stk				
P107G	0	0	0	7.008	7.008	0	#DIV/0!
P108G	4.106	1.681	196	6.867	6.867	76.109	0,2591
P109G	21.278	13.179	10.052	5.738	5.738	885.648	0,0632
P111G	14.793	11.902	6.089	6.052	6.052	772.696	0,0581
P112G	20.238	9.991	4.195	6.117	6.117	697.064	0,0669
P113G	13.862	5.776	2.624	6.450	6.450	513.315	0,0685
P114G	15.949	6.903	7.061	6.194	6.194	706.878	0,0598
P123G	45.856	2.278	4.890	1.130	1.130	10.496.190	0,0053
P124G	46.437	1.852	5.159	1.137	1.137	10.888.982	0,0051
P136G	19.678	13.082	11.003	5.730	5.730	895.574	0,0617
P179G	127.904	7.319	11.816	2.512	2.512	31.441.704	0,0048
P189G	105.338	8.707	18.631	4.339	4.339	13.979.132	0,0101
P196G	220.929	11.133	18.995	2.507	2.507	36.242.008	0,0071
P200G	133.489	15.863	27.592	3.727	3.727	20.230.856	0,0091
P205G	222.841	20.846	33.054	5.672	5.672	37.681.698	0,0076

Tabelle 74: Energieverbrauch, Stückzahl und Energieeffizienz pro Presse

Der Gesamtenergieverbrauch der Pressen je Betriebsmittelzustand wird durch die folgende Tabelle für den Alt- (A) bzw. Neubau (N) zusammengefasst.

	BMZ1	BMZ2	BMZ3	BMZ4	BMZ5	Summe
	kWh _{EL}	kWh _{Ges}				
A	202.197	66.645	51.269	52.424	52.424	424.958
N	810.501	63.869	110.089	18.757	18.757	1.021.974
Σ	1.012.698	130.513	161.358	71.181	71.181	1.446.932

Tabelle 75: Gesamtenergieverbrauch der Pressen im Alt- bzw. Neubau im GJ2012/13

Aus der obigen Tabelle ist ersichtlich, dass die Zahl Pressen im Neubau trotz ihrer geringeren um ca. 2,5-mal mehr Elektrizität im GJ2012/13 benötigt haben, als die Pressen im Altbau bzw. in der Abteilung RS1. Dies liegt daran, dass die Pressen der

Abteilung RS8 hochautomatisiert sind und eine deutlich höhere Auslastung haben. Dies wird bei Betrachtung des Gesamtnutzungs- bzw. Hauptnutzungsgrades der Pressen im Kapitel 4.1.2, Tabelle 14 deutlich.

4.3.2 Energieverbrauch der Profileranlagen

Die Profileranlagen benötigen für ihren Betrieb elektrische Energie und Druckluft. Die folgende Tabelle zeigt den auf die fünf Betriebsmittelzustände bezogenen Energieverbrauch der Profileranlagen für das vergangene Geschäftsjahr 2012/13. Da aus Definitionsgründen im BMZ5 keine Druckluft verbraucht werden kann, wird auf diese Spalte verzichtet. Außerdem Zusätzlich sind die produzierte Stückzahl und die Energieeffizienz (EE) jeder Profileranlage angegeben.

BM- Bez.	BMZ1		BMZ2		BMZ3		BMZ4		BMZ5	Stückzahl	EE
	kWh _{EL}	kWh _{DL}	kWh _{EL}	Stk	kWh/Stk						
P145G	119.012	5.789	15.225	2.631	10.634	4.440	896	2.920	896	12.045.316	0,0135
P146G	100.079	4.349	17.734	2.564	17.185	5.156	1.457	3.006	1.457	5.656.942	0,0270
P154G	144.857	8.305	18.374	2.656	18.069	5.422	1.096	2.261	1.096	30.765.454	0,0087
P155G	76.557	4.389	22.937	3.316	22.012	6.605	1.199	2.475	1.199	20.581.128	0,0098
P156G	77.823	4.462	9.710	1.404	12.321	3.697	1.750	3.611	1.750	6.928.814	0,0203
P160G	79.541	3.457	22.565	3.262	22.020	6.607	1.281	2.643	1.281	6.088.460	0,0191
P161G	183.128	7.959	19.833	2.867	15.563	4.670	1.186	2.448	1.186	6.278.462	0,0227
P165G	179.303	7.793	21.357	3.088	17.680	5.305	1.101	2.272	1.101	20.251.398	0,0118
P173G	176.472	7.670	21.663	3.132	17.983	5.396	1.095	2.260	1.095	7.886.044	0,0223
P147G	202.057	9.107	24.650	3.632	17.169	4.638	1.487	2.082	1.487	22.647.776	0,0106
P162G	100.676	4.375	28.480	4.117	26.234	7.872	962	1.985	962	7.326.858	0,0230
P169G	96.083	4.176	27.698	4.004	24.559	7.369	1.049	2.165	1.049	19.106.855	0,0124
P184G	234.329	8.916	23.226	2.840	14.589	3.739	1.089	2.516	1.089	30.622.434	0,0095
P188G	157.004	6.823	21.704	3.138	25.134	7.542	915	1.889	915	13.251.288	0,0170

Tabelle 76: Energieverbrauch, Stückzahl und Energieeffizienz pro Profileranlage

Der Gesamtenergieverbrauch der Profileranlagen je Betriebsmittelzustand wird durch die folgende Tabelle für den Alt- und Neubau zusammengefasst.

	BMZ1		BMZ2		BMZ3		BMZ4		BMZ5	Summe
	kWh _{EL}	kWh _{DL}	kWh _{EL}	kWh _{Ges}						
A	1.136.772	54.173	169.399	24.920	153.467	47.298	11.061	23.896	11.061	1.632.047
N	790.149	33.397	125.757	17.732	107.686	31.161	5.502	10.637	5.502	1.127.523
Σ	1.926.921	87.570	295.156	42.652	261.153	78.459	16.563	34.533	16.563	2.759.570

Tabelle 77: Gesamtenergieverbrauch der Profileranlagen im Alt- bzw. Neubau im GJ2012/13

4.3.3 Energieverbrauch der Montageautomaten

Für den Betrieb der Montageautomaten ist sowohl elektrische Energie als auch Druckluft notwendig. Die folgende Tabelle zeigt den auf die fünf Betriebsmittelzustände bezogenen Energieverbrauch der Montageautomaten für das vergangene Geschäftsjahr 2012/13. Da aus Definitionsgründen im BMZ5 keine Druckluft verbraucht werden kann wird auf diese Spalte verzichtet. Zusätzlich sind darin die produzierte Stückzahl und die Energieeffizienz (EE) jedes Montageautomaten angegeben.

BM- Bez.	BMZ1		BMZ2		BMZ3		BMZ4		BMZ5	Stückzahl	EE
	kWh _{EL}	kWh _{DL}	kWh _{EL}	Stk	kWh/Stk						
BV001	7.943	34.564	220	116	1.343	1.647	38	1.139	38	8.871.360	0,0053
BV002	6.151	31.057	109	68	824	1.116	37	1.237	37	7.506.945	0,0054
IF07G	85.392	30.601	5.992	383	46.463	3.589	346	3.788	346	3.745.854	0,0472
IF15G	1.446	236	46	1	234	8	28	25	28	3.723.237	0,0006
IF21G	727	119	17	0	396	13	30	27	30	3.424.718	0,0004
IF24G	3.797	5.984	93	19	1.194	418	16	153	16	20.009.884	0,0006
IF25G	1.131	923	39	4	244	40	29	134	29	9.535.916	0,0003
IF26G	1.847	14.891	103	33	293	143	25	0	25	4.498.195	0,0039
IF34R	9.910	622	274	15	1.493	44	58	538	58	192.873	0,0675
IF49G	4.298	21.683	47	131	210	678	31	973	31	13.591.650	0,0021
IF58G	2.854	8.618	66	27	324	199	21	349	21	9.817.495	0,0013
IF65L	272.668	109.459	8.076	469	36.099	3.515	71	4.170	71	6.669.615	0,0652
IF65R	276.682	91.836	7.772	396	33.692	2.693	71	1.759	71	6.755.675	0,0614
IF66G	101	1.193	2	3	24	58	36	2.373	36	330.385	0,0116
IF67G	4.044	9.903	69	23	304	151	16	211	16	19.209.687	0,0008
IF69L	735	117	36	4	556	39	79	1.354	79	24.845	0,1208
IF69R	775	145	34	5	507	41	79	1.586	79	36.529	0,0890
IF70L	37.706	13.464	761	87	3.951	246	56	631	56	994.078	0,0573
IF70R	37.171	17.606	667	161	4.404	523	56	2.778	56	978.189	0,0648
IF71G	70	211	10	4	96	59	36	598	36	264.300	0,0042
IF72G	4.924	27.484	207	153	387	480	18	582	18	17.525.931	0,0020
IF76G	11.131	30.275	523	172	1.066	817	27	517	27	19.894.516	0,0022
IF77G	1.707	1.254	96	10	920	137	21	86	21	10.289.378	0,0004
IF80G	5.067	16.636	163	71	331	241	18	344	18	19.606.599	0,0012
IF84L	261.821	78.353	8.112	449	30.761	2.778	62	2.277	62	5.798.620	0,0663
IF84R	259.650	112.603	6.698	261	31.868	2.291	62	947	62	5.722.856	0,0724
IF85G	705	1.716	219	65	334	218	61	995	61	522.813	0,0084
IF86G	2.372	11.489	214	129	539	679	47	1.483	47	2.705.363	0,0063
IF87G	1.849	6.072	130	56	250	183	32	628	32	4.456.096	0,0021
IF88G	2.876	8.450	318	129	949	565	14	235	14	11.238.019	0,0012
IF89G	75.460	83.941	4.761	1.412	12.903	7.302	87	2.110	87	11.428.606	0,0165
IF94G	47.217	53.762	11.474	3.019	13.862	3.988	91	1.527	91	11.330.928	0,0119
IF98G	7.964	26.435	336	246	1.123	1.082	12	724	12	15.198.822	0,0025
IF99G	3.528	4.032	76	12	478	111	16	104	16	13.039.543	0,0006
IL02G	4.130	15.414	81	48	495	370	34	385	34	14.640.070	0,0014
IL03G	3.053	13.178	45	28	272	212	21	347	21	21.511.353	0,0008
IL04G	5.894	8.491	3.454	578	1.000	468	131	1.427	131	3.304.210	0,0065
IL05G	65.219	32.442	17.177	2.290	1.842	2.182	60	949	60	8.416.966	0,0145

BM- Bez.	BMZ1		BMZ2		BMZ3		BMZ4		BMZ5	Stückzahl	EE
	kWh _{EL}	kWh _{DL}	kWh _{EL}	Stk	kWh/Stk						
IL06G	134.943	37.427	77.851	3.036	44.814	2.553	93	1.168	93	8.341.148	0,0362
IL13G	71.803	101.893	2.658	555	21.710	6.164	138	2.485	138	12.431.792	0,0167
IL15G	2.850	9.071	180	79	361	233	20	352	20	9.819.817	0,0013
IL20G	86.844	66.313	1.478	463	22.492	5.297	66	1.846	66	11.430.016	0,0162
IL21E	5.347	20.493	1.116	526	559	575	38	977	38	10.286.212	0,0029
IL21G	11.582	241.577	3.770	9.220	693	4.543	76	11.746	76	10.352.367	0,0274
IL22G	7.756	31.164	359	176	1.090	1.207	34	925	34	19.542.558	0,0022
IL24E	1.982	10.499	453	289	1.123	1.709	67	2.483	67	1.693.312	0,0110
IL26G	554	372	85	12	141	89	59	2.532	59	119.184	0,0327
IL28G	107.792	101.902	15.869	3.848	12.973	6.476	5.236	2.303	5.236	11.433.404	0,0229
IL29G	16.384	25.959	6.202	1.693	2.560	936	1.678	512	1.678	11.963.080	0,0048
IL30G	219.419	71.106	93.532	4.470	43.061	2.944	2.282	1.408	2.282	12.006.262	0,0367
IL39L	284.093	113.290	5.634	345	30.792	3.008	83	1.996	83	7.464.032	0,0589
IL39R	282.642	110.364	5.267	316	28.127	2.691	86	2.029	86	7.445.062	0,0580
IL40G	10.133	43.531	105	78	1.503	1.491	2.078	904	2.078	13.014.343	0,0048
IL42G	6.093	24.538	2.437	1.134	543	725	175	5.396	175	3.345.608	0,0123
IL43G	74.678	105.429	2.490	539	24.618	7.202	125	2.355	125	12.585.344	0,0173
IL44G	61.586	74.087	1.848	503	18.238	4.470	106	2.171	106	11.516.280	0,0142
IL45E	10.967	70.193	1.597	1.214	854	1.641	52	2.404	52	12.719.028	0,0070
IL45G	14.103	132.120	3.787	4.159	677	1.993	68	4.683	68	12.816.224	0,0126
IL46G	10.554	26.744	182	121	1.618	1.187	21	803	21	18.520.930	0,0022
IL48E	9.951	63.119	266	205	825	1.443	28	1.223	28	15.429.633	0,0050
IL48V	5.496	14.491	239	81	664	416	20	324	20	30.865.022	0,0007
IL49G	7.138	28.980	259	133	666	676	20	522	20	35.974.402	0,0011
IL57G	10.056	39.833	129	88	1.508	1.379	2.086	836	2.086	13.225.626	0,0044
IL58E	9.920	52.709	339	220	819	1.199	28	1.021	28	15.463.126	0,0043
IL63G	27.496	12.392	698	70	4.648	650	1.547	639	1.547	6.157.017	0,0081
IL64L	302.256	108.847	4.991	318	46.848	3.810	2.499	2.196	2.499	7.223.752	0,0657
IL64R	304.514	80.479	5.419	160	40.523	1.547	2.614	488	2.614	7.290.044	0,0601
IL65G	179.861	131.474	5.162	1.021	14.190	6.195	4.327	2.062	4.327	17.589.504	0,0198
IL66G	20.825	73.521	2.660	1.618	3.415	4.016	1.786	1.282	1.786	18.282.352	0,0061
IL67G	32.475	141.146	150	112	3.287	3.298	2.638	2.375	2.638	19.822.392	0,0095
IL68E	22.348	41.197	374	119	3.936	1.675	1.878	947	1.878	14.549.192	0,0051
IL74G	32.067	120.819	206	134	2.992	2.603	2.337	1.771	2.337	20.859.038	0,0079
IL75G	5.695	22.427	317	215	1.277	1.161	1.684	699	1.684	15.565.348	0,0023
IL77G	11.877	24.535	269	145	1.905	1.402	3.252	941	3.252	18.325.589	0,0026
IL82G	748	2.255	40	21	229	160	3.290	654	3.290	220.718	0,0484
IL83G	418	2.662	37	41	286	420	3.983	1.416	3.983	42.471	0,3118
IL84G	27.695	98.789	1.011	621	7.821	6.441	3.526	3.406	3.526	12.052.562	0,0127
IL85G	4.218	23.616	48	48	500	567	1.331	612	1.331	13.860.479	0,0023
IL87G	16.424	87.676	200	482	1.316	4.445	1.117	1.960	1.117	14.129.449	0,0081
IL88G	10.049	39.805	133	91	1.370	1.253	2.156	864	2.156	13.105.379	0,0044
IL91L	181.280	75.982	2.259	562	20.903	8.061	3.615	2.074	3.615	8.068.283	0,0370
IL91R	180.977	75.856	3.062	762	21.622	8.338	3.518	2.019	3.518	8.052.707	0,0372
IL93G	2.916	12.704	46	35	295	297	2.131	472	2.131	12.327.768	0,0017
IL95V	2.739	14.074	51	45	352	418	1.411	309	1.411	31.545.268	0,0007
IL96G	182.999	123.479	4.073	986	13.807	6.148	2.495	2.367	2.495	18.047.584	0,0188
IL97G	22.455	82.002	2.059	1.295	3.248	3.951	1.750	1.299	1.750	19.437.522	0,0062
IL98G	45.680	162.873	526	323	6.180	5.087	2.748	3.022	2.748	18.287.570	0,0125
IL99G	12.588	34.877	174	83	1.998	1.278	2.140	885	2.140	22.516.858	0,0025
IM07G	5.730	11.906	405	145	650	312	2.477	632	2.477	685.156	0,0361
IP02G	362.500	103.651	2.193	127	85.962	7.261	2.603	1.908	2.603	14.574.472	0,0390
IP04G	25.792	36.421	1.963	478	7.361	2.400	2.930	2.734	2.930	1.455.992	0,0570

BM-Bez.	BMZ1		BMZ2		BMZ3		BMZ4		BMZ5	Stückzahl	EE
	kWh _{EL}	kWh _{DL}	kWh _{EL}	Stk	kWh/Stk						
IP07G	9.701	2.974	373	4	2.178	34	1.837	21	1.837	1.196.066	0,0159
IP08G	4.944	22.846	590	124	2.086	846	3.058	380	3.058	2.746.337	0,0138
IP09G	44.842	156.968	482	384	6.705	6.474	4.173	2.902	4.173	20.309.841	0,0112
IP10G	10.191	26.773	1.678	760	3.709	3.246	3.591	1.918	3.591	5.463.114	0,0102
IP16G	9.642	23.133	1.933	799	2.276	1.261	3.020	1.236	3.020	3.300.883	0,0140
IP19E	22.303	38.525	161	48	3.828	1.527	1.986	912	1.986	14.596.603	0,0049
IP21G	19.063	32.425	2.319	679	6.470	2.541	3.573	1.862	3.573	3.237.139	0,0224
IP26G	505	1.896	12	6	338	258	32	661	32	1.166.831	0,0032
IP28G	6.028	21.686	574	356	2.719	2.258	3.311	1.565	3.311	3.809.605	0,0110
IP29E	2.483	8.193	150	23	1.744	336	2.067	0	2.067	3.088.228	0,0055
IP29G	4.715	30.104	326	137	2.573	1.647	2.511	0	2.511	4.654.961	0,0096
IP31G	3.770	17.828	375	127	1.525	808	3.415	0	3.415	2.550.116	0,0123
IP32G	17.065	35.677	2.790	577	11.087	4.563	5.385	0	5.385	2.937.255	0,0281
IP33G	9.303	11.249	4.862	849	5.079	1.726	3.582	0	3.582	2.846.408	0,0141
IP34G	26.736	32.863	13.487	690	10.976	1.758	4.254	0	4.254	2.827.493	0,0336
IP35G	8.057	29.921	557	170	1.709	727	3.139	0	3.139	4.980.003	0,0095
IP37G	45.254	76.560	3.596	226	17.096	1.293	4.719	0	4.719	789.236	0,1944
IP39G	51.069	94.825	1.304	417	6.804	2.917	1.477	1.486	1.477	3.846.975	0,0421
IP40G	1.358	22.327	1.941	1.387	1.055	843	1.364	0	1.364	3.620.191	0,0087
IP41G	333	2.062	49	53	107	153	2.954	0	2.954	2.954.385	0,0029
IP46L	55.469	7.748	23.474	173	37.755	323	2.622	0	2.622	332.015	0,3921
IP46R	54.531	1.386	22.177	30	37.658	88	2.652	0	2.652	335.944	0,3607
IP46V	431	1.259	259	130	345	232	4.093	0	4.093	568.685	0,0191
IP48G	33	107	37	21	19	14	5.497	0	5.497	23.231	0,4832
LT43G	37.960	108.973	552	273	8.700	5.766	3.330	2.485	3.330	16.784.825	0,0102

Tabelle 78: Energieverbrauch, Stückzahl und Energieeffizienz pro Montageautomat

Der Gesamtenergieverbrauch je Betriebsmittelzustand wird durch die im Anschluss folgende Tabelle für die Anlagen im Alt- bzw. im Neubau zusammengefasst.

	BMZ1		BMZ2		BMZ3		BMZ4		BMZ5	Summe
	kWh _{EL}	kWh _{DL}	kWh _{EL}	kWh _{Ges}						
A	830.540	913.070	68.510	5.903	263.485	39.862	54.581	33.023	54.581	4.278.494
N	4.616.611	4.148.599	360.501	57.059	701.697	184.888	107.545	116.195	107.545	10.400.641
Σ	5.447.151	5.061.669	429.011	62.962	965.182	224.751	162.126	149.218	162.126	12.664.198

Tabelle 79: Gesamtenergieverbrauch der Montageautomaten im Alt- bzw. Neubau im GJ2012/13

4.3.4 Energieverbrauch der Pulverbeschichtungsanlagen

Die Pulverbeschichtungsanlagen benötigen für ihren Betrieb elektrische Energie und Erdgas. Die folgende Tabelle zeigt den Energieverbrauch dieser Anlagen je Betriebsmittelzustand und je Energieträger sowie den Gesamtenergieverbrauch.

BM- Bez.	BMZ1		BMZ2		BMZ3		BMZ4	BMZ5	Stückzahl	EE
	kWh _{EL}	kWh _{EG}	kWh _{EL}	kWh _{EG}	kWh _{EL}	kWh _{EG}	kWh _{EL}	kWh _{EL}	Stk	kWh/Stk
KB03G	219.220	812.065	14.690	110.076	76.711	192.339	1.166	1.148	28.278.783	0,0505
KB04G	265.108	982.047	4.662	34.933	41.729	104.626	1.164	1.143	39.405.326	0,0364
KB05G	166.733	617.633	7.171	53.736	118.302	296.619	1.328	1.256	10.948.353	0,1153
KB06G	166.737	617.650	15.212	113.988	67.679	169.693	1.672	1.562	14.898.376	0,0775
	817.798	3.029.395	41.735	312.733	304.421	763.276	5.331	5.108		

Tabelle 80: Energieverbrauch, Stückzahl und Energieeffizienz pro Pulverbeschichtungsanlage

Durch die Kenntnis des Energieverbrauchs pro Betriebsmittel für das Geschäftsjahr 2012/13 wäre eine Weiterverästelung des Energieflussdiagramms auf Gebäudeebene (siehe 3.3.6) auf die einzelnen Maschinen möglich. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird der Energiefluss, welcher die Gebäudeebene verlässt, lediglich bis zur Ebene der Produktionstechnologien verästelt. Zusätzlich wird dabei zwischen dem Produktionsbereich im Altbau bzw. der 1. bis 7. Bauetappe (BE) und dem Produktionsbereich im Neubau bzw. der 8. bis 12. BE unterschieden.

4.3.5 Energieflussdiagramm auf Bereichsebene

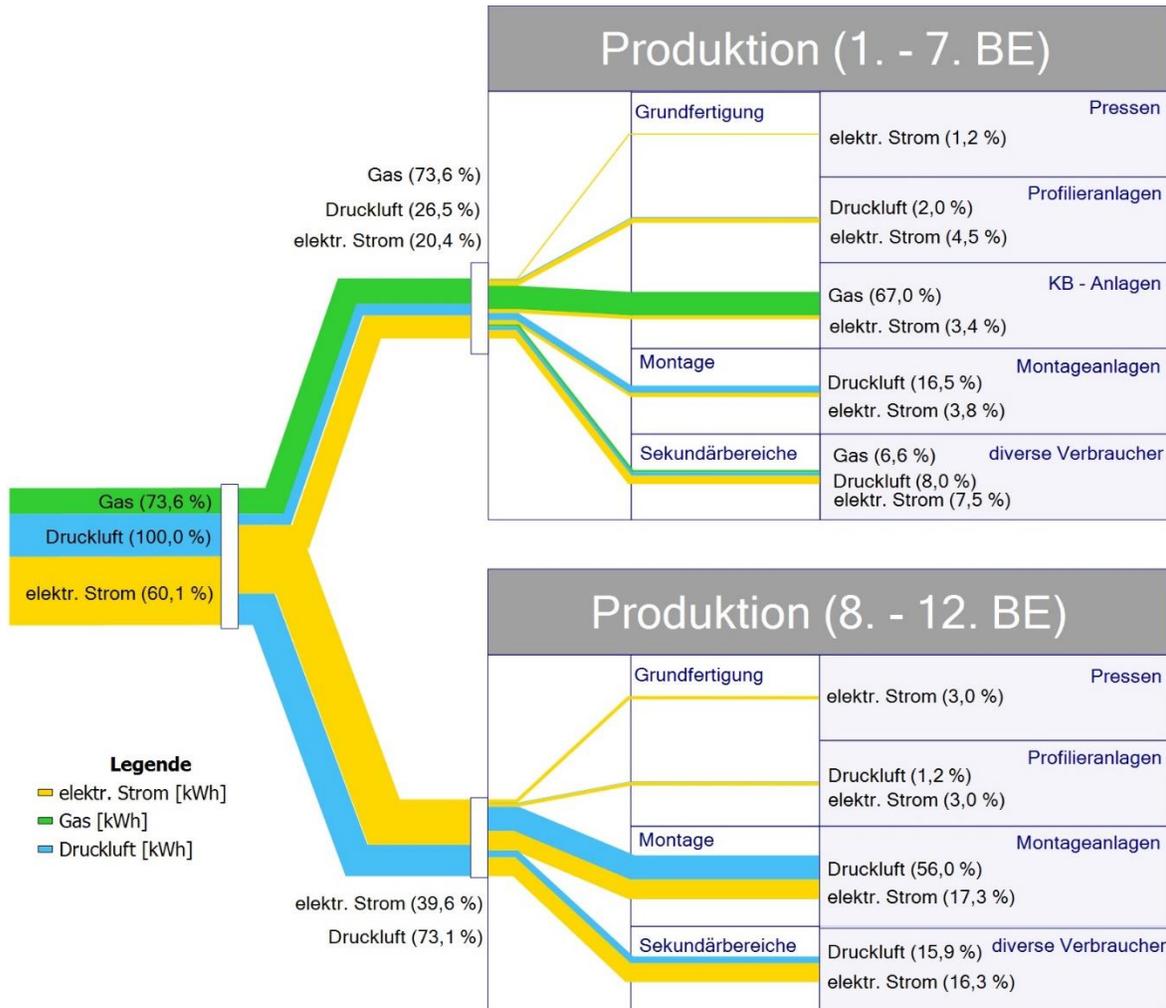


Abbildung 41: Energieflussdiagramm auf Bereichsebene

Im Energieflussdiagramm auf Bereichsebene wird dargestellt, wie sich der Anteil des Gesamtenergiestromes, welcher auf Gebäudeebene nicht in andere Energieformen umgewandelt wurde, auf die Produktionsbereiche in Alt- und Neubau aufteilt. Aus dem obigen Diagramm ist zu entnehmen, dass 60,1% des gesamten vom EVU bezogenen elektr. Stromes und 73,6% des bezogenen Erdgases auf die Produktionsbereiche aufgeteilt wird. Die Erzeugung der Druckluft geschieht durch die Kompressoren auf der Gebäudeebene und wird der Bereichsebene zu 100% zur Verfügung gestellt. Der Bereich „Produktion Altbau“ benötigt 26,5% der erzeugten Druckluft, 20,4% des bezogenen elektrischen Stromes und 73,6% des bezogenen

Erdgases im Geschäftsjahr 2012/13. Auf die Produktionstechnologie Pressen entfallen lediglich 1,2% des gesamten Elektrizitätsverbrauches vom Werk 4. Hingegen benötigten die Profilieranlagen 4,5% der Elektrizität sowie 2% der erzeugten Druckluft. Die Pulverbeschichtungsanlagen benötigten 67% des bezogenen Erdgases sowie 3,4% des elektrischen Stroms, die Montageautomaten 16,5% der erzeugten Druckluft sowie 3,8% des bezogenen elektrischen Stroms. Der Bereich „Produktion Neubau“ benötigte im selben Geschäftsjahr 73,1% der erzeugten Druckluft und 39,6% des insgesamt bezogenen elektrischen Stroms. Von den Pressen wurden 3% des gesamten bezogenen elektrischen Stroms benötigt. Die Profilieranlagen benötigten 1,2% der gesamten erzeugten Druckluft sowie 3% des Gesamtstromverbrauchs. Die Montageautomaten im Neubau verbrauchten 56% der erzeugten Druckluft und 17,3% der insgesamt bezogenen Elektrizität.

Die Differenz zwischen dem Gesamtenergiebedarf der Bereichsebene und dem über das Regressionsmodell errechneten Energieverbrauch der Produktionstechnologien wird unter dem Begriff „Sekundärbereiche“ zusammengefasst.

Da nicht alle Energieverbraucher mit dem Betriebsdatenkommunikationssystem verbunden sind, können diese nicht im Regressionsmodell mitberücksichtigt werden. Die Sekundärbereiche beschreiben somit die Differenz zwischen dem Gesamtenergieverbrauch abzüglich der für die Erzeugung der in Kapitel 3.3 beschriebene Energiedienstleistungen und dem durch das Berechnungsmodell des Bottom-Up-Ansatzes berechneten Energieverbrauch der Betriebsmittel. Diese Differenz wird zu einem Drittel auf die Sekundärbereiche im Altbau und zu zwei Dritteln auf die Sekundärbereiche im Neubau aufgeteilt. Die Sekundärbereiche im Altbau verbrauchen somit geschätzte 6,6% des gesamten Erdgases, 8% der erzeugten Druckluft und 7,5% des gesamten elektrischen Stroms vom Werk 4. Die Sekundärbereiche im Neubau benötigen 15,9% der erzeugten Druckluft und 16,3% der gesamten Elektrizität. Die genannten 8% des Erdgasverbrauchs sind zum Großteil auf die Entlackungsanlage und zu einem kleinen Teil auf die Kistenwaschanlage zurückzuführen. Energieverbraucher, welche in den Sekundärbereichen berücksichtigt aber nicht über den Bottom-Up-Ansatz identifiziert werden, sind folgende:

- Alle nicht mit dem Betriebsdatenkommunikationssystem verbundenen Betriebsmittel.
- Alle in der Produktion vorhandenen Mess- und Prüfplätze
- Alle Batterieladestationen der fahrerlosen Transportfahrzeuge (FTF'S)
- Sowie alle anderen Energieverbraucher, die weder in der Energieanalyse der Gebäudeebene in Kapitel 3.3 und noch durch den Bottom-Up-Ansatz berücksichtigt werden.

Durch Zusammenfassung des Energieflussdiagrammes des Top-Down-Ansatzes (Abbildung 24) und des Bottom-Up-Ansatzes (Abbildung 41) ergibt sich das Energieflussdiagramm vom Werk 4. Dieses ist in der folgenden Abbildung dargestellt und beschreibt die Aufteilung der Energieflüsse von der obersten Ebene des Betrachtungsmodells, nämlich der Werksebene, bis hinunter zur Ebene der Produktionstechnologien.

4.4 Energieflussdiagramm Werk 4

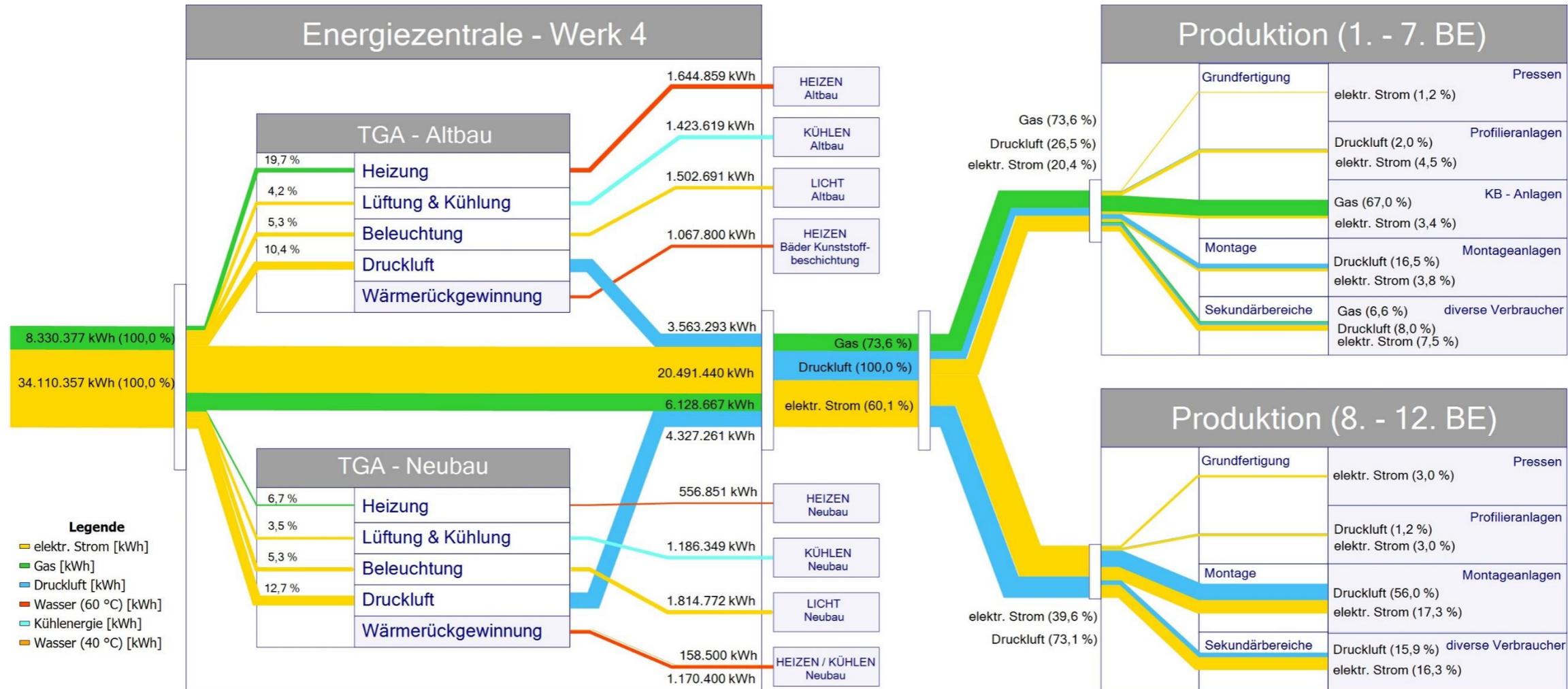


Abbildung 42: Energieflussdiagramm des Werks 4 der Julius Blum GmbH

4.5 Energiekosten der Produktionstechnologien

Die Energiekosten ergeben sich durch die Multiplikation des Energiepreises für den elektrischen Strom bzw. des Erdgases mit dem im vorherigen Kapitel beschriebenen Energieverbrauch der Betriebsmittel. Es ist eine verursachungsgerechte Aufteilung der angefallenen Gesamtenergiekosten für das GJ2012/13 auf die einzelnen Betriebsmittel und somit auf die Kostenstelle möglich.

In den folgenden Tabellen werden alle Betriebsmittel einer Produktionstechnologie zusammengefasst und deren Gesamtenergiekosten aus der Summe der Energiekosten der einzelnen Betriebsmittelzustände aufgezeigt.

4.5.1 Energiekosten der Pressen

In der folgenden Tabelle sind die Kosten für die von den Pressen im Geschäftsjahr 2012/13 verbrauchte Elektrizität in den jeweiligen Betriebsmittelzuständen, sowie die gesamten CO₂ Emissionen pro Presse aufgelistet.

BM- Bez.	Abt.- Bez.	BMZ1	BMZ2	BMZ3	BMZ4	BMZ5	Summe	CO ₂
		€ _{EL}	€ _{Ges}	t _{CO2}				
P107G	RS1	0	0	0	653	653	1.305	0,39
P108G	RS1	382	157	18	639	639	1.836	0,55
P109G	RS1	1.981	1.227	936	534	534	5.213	1,57
P111G	RS1	1.377	1.108	567	564	564	4.180	1,26
P112G	RS1	1.885	930	391	570	570	4.345	1,31
P113G	RS1	1.291	538	244	601	601	3.274	0,98
P114G	RS1	1.485	643	657	577	577	3.939	1,18
P123G	RS1	4.270	212	455	105	105	5.148	1,55
P124G	RS1	4.324	172	480	106	106	5.189	1,56
P136G	RS1	1.832	1.218	1.025	534	534	5.142	1,55
P179G	RS8	11.910	682	1.100	234	234	14.160	4,26
P189G	RS8	9.809	811	1.735	404	404	13.163	3,96
P196G	RS8	20.573	1.037	1.769	233	233	23.845	7,17
P200G	RS8	12.430	1.477	2.569	347	347	17.171	5,16
P205G	RS8	20.751	1.941	3.078	528	528	26.827	8,07

Tabelle 81: Energiekosten und CO₂-Emissionen pro Presse

In der folgenden Tabelle werden sowohl die gesamten Energiekosten je Betriebsmittelzustand als auch die gesamten CO₂-Emissionen je Betriebsmittel und für die Pressen im Altbau (A) und im Neubau (N) aufgelistet.

	BMZ1	BMZ2	BMZ3	BMZ4	BMZ5	Summe	CO ₂
	€ _{EL}	€ _{Ges}	t _{CO2}				
A	18.829	6.206	4.774	4.882	4.882	39.572	11,90
N	75.474	5.947	10.252	1.747	1.747	95.166	28,62
Σ	94.302	12.153	15.026	6.628	6.628	134.738	40,51

Tabelle 82: Energiekosten und CO₂-Emissionen der Pressen im Alt- bzw. Neubau

4.5.2 Energiekosten der Profileranlagen

In der folgenden Tabelle sind die Kosten für die von den Profileranlagen im Geschäftsjahr 2012/13 verbrauchte Energie getrennt nach Energieträger und Betriebsmittelzustand aufgelistet. Außerdem sind die pro Profileranlage im GJ2012/13 ausgestoßenen CO₂-Emissionen angeführt.

BM- Bez.	Abt.- Bez.	BMZ1		BMZ2		BMZ3		BMZ4		BMZ5		Summe			CO ₂
		€ _{EL}	€ _{DL}	€ _{Ges}											
P145G	RS3	11.082	539	1.418	245	990	413	83	272	83	0	13.657	1.469	15.127	4,55
P146G	RS3	9.319	405	1.651	239	1.600	480	136	280	136	0	12.842	1.404	14.246	4,28
P154G	RS3	18.816	848	2.295	338	1.599	432	138	194	138	0	22.987	1.812	24.799	7,46
P155G	RS3	13.489	773	1.711	247	1.683	505	102	211	102	0	17.087	1.736	18.823	5,66
P156G	RS3	7.129	409	2.136	309	2.050	615	112	230	112	0	11.538	1.563	13.101	3,94
P160G	RS1	7.247	415	904	131	1.147	344	163	336	163	0	9.624	1.227	10.851	3,26
P161G	RS1	7.407	322	2.101	304	2.051	615	119	246	119	0	11.797	1.487	13.284	3,99
P165G	RS1	17.053	741	1.847	267	1.449	435	110	228	110	0	20.570	1.671	22.241	6,69
P173G	RS1	9.375	407	2.652	383	2.443	733	90	185	90	0	14.649	1.709	16.358	4,92
P147G	RS8	16.697	726	1.989	288	1.646	494	103	212	103	0	20.537	1.719	22.256	6,69
P162G	RS8	8.947	389	2.579	373	2.287	686	98	202	98	0	14.009	1.650	15.658	4,71
P169G	RS8	16.433	714	2.017	292	1.675	502	102	210	102	0	20.329	1.719	22.048	6,63
P184G	RS8	21.821	830	2.163	264	1.358	348	101	234	101	0	25.545	1.677	27.222	8,19
P188G	RS8	14.620	635	2.021	292	2.340	702	85	176	85	0	19.152	1.806	20.958	6,30

Tabelle 83: Energiekosten und CO₂-Emissionen pro Profileranlagen

Insgesamt liegt der CO₂-Ausstoß der Profileranlagen bei 77,27t_{CO2} für im GJ2012/13, wovon 45,70t_{CO2} von den Anlagen im Altbau und 31,57t_{CO2} von jenen im Neubau verursacht wurden. In der nächsten Tabelle werden die gesamten Energiekosten, getrennt nach Betriebsmittel und Betriebsmittelzustand, der Profileranlagen im Alt- und Neubau zusammengefasst.

	BMZ1		BMZ2		BMZ3		BMZ4		BMZ5		Summe		
	€ _{EL}	€ _{DL}	€ _{Ges}										
A	105.856	5.045	15.774	2.321	14.291	4.404	1.030	2.225	1.030	0	137.981	13.995	151.976
N	73.579	3.110	11.711	1.651	10.028	2.902	512	991	512	0	96.342	8.653	104.995
Σ	179.435	8.155	27.485	3.972	24.318	7.306	1.542	3.216	1.542	0	234.323	22.648	256.971

Tabelle 84: Energiekosten der Profileranlagen im Alt- bzw. Neubau

4.5.3 Energiekosten der Montageautomaten

Die Energiekosten der Montageautomaten des Geschäftsjahres 2012/13 werden in der folgenden Tabelle getrennt nach Energieträger und Betriebsmittelzustand aufgelistet. Außerdem sind die im selben Zeitraum ausgestoßenen CO₂-Emissionen der einzelnen Montageautomaten zu sehen.

BM-Bez.	Abt. Bez.	BMZ1		BMZ2		BMZ3		BMZ4		BMZ5	Summe			CO ₂
		€EL	€DL	€EL	€DL	€EL	€DL	€EL	€DL	€EL	€EL	€DL	€Ges	
BV001	RS3	740	3.219	20	11	125	153	4	106	4	892	3.489	4.381	1,0
BV002	RS3	573	2.892	10	6	77	104	3	115	3	666	3.117	3.784	0,9
IF07G	RS1	7.952	2.850	558	36	4.327	334	32	353	32	12.901	3.572	16.473	1,1
IF15G	RS3	135	22	4	0	22	1	3	2	3	166	25	191	0,0
IF21G	RS5	68	11	2	0	37	1	3	3	3	112	15	127	0,0
IF24G	RS1	354	557	9	2	111	39	2	14	2	476	612	1.089	0,2
IF25G	RS3	105	86	4	0	23	4	3	12	3	137	103	240	0,0
IF26G	RS3	172	1.387	10	3	27	13	2	0	2	214	1.403	1.617	0,4
IF34R	KB	923	58	26	1	139	4	5	50	5	1.098	113	1.212	0,0
IF49G	RS3	400	2.019	4	12	20	63	3	91	3	430	2.185	2.615	0,7
IF58G	RS1	266	803	6	3	30	18	2	32	2	306	856	1.162	0,3
IF65L	RS6	25.391	10.193	752	44	3.362	327	7	388	7	29.517	10.952	40.470	12,2
IF65R	RS6	25.765	8.552	724	37	3.137	251	7	164	7	29.639	9.003	38.642	11,6
IF66G	RS3	9	111	0	0	2	5	3	221	3	19	338	356	0,1
IF67G	RS3	377	922	6	2	28	14	1	20	1	414	958	1.372	0,3
IF69L	RS8	68	11	3	0	52	4	7	126	7	138	141	279	0,1
IF69R	RS8	72	13	3	0	47	4	7	148	7	137	166	303	0,1
IF70L	RS6	3.511	1.254	71	8	368	23	5	59	5	3.960	1.343	5.304	1,6
IF70R	RS6	3.461	1.640	62	15	410	49	5	259	5	3.944	1.962	5.906	1,8
IF71G	RS8	6	20	1	0	9	5	3	56	3	23	81	104	0,0
IF72G	RS3	459	2.559	19	14	36	45	2	54	2	517	2.672	3.190	0,8
IF76G	RS1	1.037	2.819	49	16	99	76	3	48	3	1.190	2.960	4.149	0,9
IF77G	RS8	159	117	9	1	86	13	2	8	2	258	138	396	0,1
IF80G	RS3	472	1.549	15	7	31	22	2	32	2	521	1.610	2.131	0,5
IF84L	RS6	24.381	7.296	755	42	2.864	259	6	212	6	28.012	7.809	35.821	10,8
IF84R	RS6	24.179	10.486	624	24	2.968	213	6	88	6	27.782	10.811	38.593	11,6
IF85G	RS3	66	160	20	6	31	20	6	93	6	129	279	407	0,1
IF86G	RS3	221	1.070	20	12	50	63	4	138	4	300	1.283	1.583	0,4
IF87G	RS3	172	565	12	5	23	17	3	58	3	214	646	860	0,2
IF88G	RS8	268	787	30	12	88	53	1	22	1	388	873	1.262	0,4
IF89G	RS8	7.027	7.817	443	132	1.201	680	8	197	8	8.688	8.825	17.512	5,3
IF94G	RS8	4.397	5.006	1.068	281	1.291	371	9	142	9	6.773	5.801	12.574	3,8
IF98G	RS1	742	2.462	31	23	105	101	1	67	1	880	2.653	3.532	0,8
IF99G	RS3	329	375	7	1	45	10	2	10	2	383	397	780	0,1
IL02G	RS3	385	1.435	8	4	46	34	3	36	3	445	1.510	1.955	0,5
IL03G	RS3	284	1.227	4	3	25	20	2	32	2	318	1.282	1.600	0,4
IL04G	RS5	549	791	322	54	93	44	12	133	12	988	1.021	2.009	0,6
IL05G	RS5	6.073	3.021	1.600	213	172	203	6	88	6	7.855	3.526	11.381	3,4
IL06G	RS5	12.566	3.485	7.249	283	4.173	238	9	109	9	24.006	4.114	28.120	8,5
IL13G	RS7	6.686	9.488	248	52	2.022	574	13	231	13	8.981	10.345	19.326	5,8
IL15G	RS1	265	845	17	7	34	22	2	33	2	319	907	1.226	0,3
IL20G	RS7	8.087	6.175	138	43	2.094	493	6	172	6	10.331	6.883	17.215	5,2
IL21E	RS8	498	1.908	104	49	52	54	4	91	4	661	2.102	2.763	0,8

BM-Bez.	Abt. Bez.	BMZ1		BMZ2		BMZ3		BMZ4		BMZ5		Summe			CO ₂ tCO ₂
		€ _{EL}	€ _{DL}	€ _{Ges}											
IL21G	RS8	1.079	22.496	351	859	65	423	7	1.094	7	7	1.508	24.871	26.379	7,9
IL22G	RS7	722	2.902	33	16	101	112	3	86	3	3	863	3.117	3.980	1,2
IL24E	RS7	185	978	42	27	105	159	6	231	6	6	344	1.395	1.739	0,5
IL26G	RS8	52	35	8	1	13	8	5	236	5	5	84	280	363	0,1
IL28G	RS5	10.038	9.489	1.478	358	1.208	603	488	214	488	488	13.699	10.665	24.364	7,3
IL29G	RS5	1.526	2.417	577	158	238	87	156	48	156	156	2.654	2.710	5.364	1,6
IL30G	RS5	20.432	6.621	8.710	416	4.010	274	212	131	212	212	33.577	7.443	41.020	12,3
IL39L	RS6	26.455	10.550	525	32	2.867	280	8	186	8	8	29.862	11.048	40.910	12,3
IL39R	RS6	26.320	10.277	490	29	2.619	251	8	189	8	8	29.445	10.746	40.191	12,1
IL40G	RS3	944	4.054	10	7	140	139	194	84	194	194	1.480	4.284	5.764	1,3
IL42G	RS8	567	2.285	227	106	51	67	16	502	16	16	877	2.961	3.838	1,2
IL43G	RS7	6.954	9.818	232	50	2.292	671	12	219	12	12	9.501	10.758	20.259	6,1
IL44G	RS7	5.735	6.899	172	47	1.698	416	10	202	10	10	7.625	7.564	15.189	4,6
IL45E	RS8	1.021	6.536	149	113	80	153	5	224	5	5	1.259	7.026	8.285	2,5
IL45G	RS8	1.313	12.303	353	387	63	186	6	436	6	6	1.742	13.312	15.054	4,5
IL46G	RS7	983	2.490	17	11	151	111	2	75	2	2	1.154	2.687	3.841	1,2
IL48E	RS7	927	5.878	25	19	77	134	3	114	3	3	1.033	6.145	7.178	2,2
IL48V	RS8	512	1.349	22	8	62	39	2	30	2	2	600	1.426	2.025	0,6
IL49G	RS3	665	2.699	24	12	62	63	2	49	2	2	755	2.823	3.577	0,8
IL57G	RS3	936	3.709	12	8	140	128	194	78	194	194	1.477	3.924	5.401	1,2
IL58E	RS7	924	4.908	32	20	76	112	3	95	3	3	1.037	5.135	6.172	1,9
IL63G	RS1	2.560	1.154	65	7	433	61	144	59	144	144	3.346	1.280	4.627	0,4
IL64L	RS6	28.146	10.136	465	30	4.362	355	233	205	233	233	33.439	10.725	44.163	13,3
IL64R	RS6	28.356	7.494	505	15	3.773	144	243	45	243	243	33.121	7.699	40.820	12,3
IL65G	RS7	16.749	12.243	481	95	1.321	577	403	192	403	403	19.357	13.107	32.463	9,8
IL66G	RS7	1.939	6.846	248	151	318	374	166	119	166	166	2.838	7.490	10.328	3,1
IL67G	RS8	3.024	13.144	14	10	306	307	246	221	246	246	3.835	13.682	17.518	5,3
IL68E	RS7	2.081	3.836	35	11	367	156	175	88	175	175	2.832	4.092	6.924	2,1
IL74G	RS8	2.986	11.251	19	12	279	242	218	165	218	218	3.719	11.670	15.390	4,6
IL75G	RS1	530	2.088	30	20	119	108	157	65	157	157	992	2.282	3.274	0,7
IL77G	RS5	1.106	2.285	25	13	177	131	303	88	303	303	1.914	2.516	4.430	1,3
IL82G	RS1	70	210	4	2	21	15	306	61	306	306	707	288	995	0,1
IL83G	RS1	39	248	3	4	27	39	371	132	371	371	811	423	1.233	0,1
IL84G	RS8	2.579	9.199	94	58	728	600	328	317	328	328	4.058	10.174	14.232	4,3
IL85G	RS3	393	2.199	5	4	47	53	124	57	124	124	692	2.313	3.005	0,7
IL87G	RS3	1.529	8.164	19	45	123	414	104	183	104	104	1.879	8.806	10.684	2,6
IL88G	RS3	936	3.707	12	8	128	117	201	80	201	201	1.477	3.912	5.389	1,2
IL91L	RS6	16.881	7.075	210	52	1.946	751	337	193	337	337	19.711	8.072	27.782	8,4
IL91R	RS6	16.853	7.064	285	71	2.013	776	328	188	328	328	19.806	8.099	27.905	8,4
IL93G	RS1	272	1.183	4	3	28	28	198	44	198	198	700	1.258	1.958	0,4
IL95V	RS8	255	1.311	5	4	33	39	131	29	131	131	555	1.382	1.938	0,6
IL96G	RS7	17.041	11.498	379	92	1.286	572	232	220	232	232	19.171	12.383	31.554	9,5
IL97G	RS7	2.091	7.636	192	121	302	368	163	121	163	163	2.911	8.246	11.157	3,4
IL98G	RS8	4.254	15.167	49	30	576	474	256	281	256	256	5.390	15.952	21.342	6,4
IL99G	RS7	1.172	3.248	16	8	186	119	199	82	199	199	1.773	3.457	5.230	1,6
IM07G	KB	534	1.109	38	14	61	29	231	59	231	231	1.093	1.210	2.303	0,4
IP02G	RS1	33.756	9.652	204	12	8.005	676	242	178	242	242	42.450	10.518	52.967	3,2
IP04G	RS7	2.402	3.392	183	44	685	223	273	255	273	273	3.816	3.914	7.730	2,3
IP07G	RS5	903	277	35	0	203	3	171	2	171	171	1.483	282	1.766	0,5
IP08G	RS5	460	2.127	55	12	194	79	285	35	285	285	1.279	2.253	3.532	1,1
IP09G	RS8	4.176	14.617	45	36	624	603	389	270	389	389	5.622	15.526	21.148	6,4
IP10G	RS5	949	2.493	156	71	345	302	334	179	334	334	2.120	3.045	5.164	1,6
IP16G	RS1	898	2.154	180	74	212	117	281	115	281	281	1.852	2.461	4.313	0,7

BM-Bez.	Abt. Bez.	BMZ1		BMZ2		BMZ3		BMZ4		BMZ5		Summe			CO ₂
		€ _{EL}	€ _{DL}	€ _{Ges}	t _{CO2}										
IP19E	RS7	2.077	3.587	15	4	357	142	185	85	185	2.818	3.819	6.637	2,0	
IP21G	RS1	1.775	3.019	216	63	602	237	333	173	333	3.259	3.493	6.752	1,1	
IP26G	RS7	47	177	1	1	32	24	3	62	3	86	263	348	0,1	
IP28G	RS1	561	2.019	53	33	253	210	308	146	308	1.485	2.409	3.893	0,7	
IP29E	RS5	231	763	14	2	162	31	193	0	193	793	796	1.589	0,5	
IP29G	RS5	439	2.803	30	13	240	153	234	0	234	1.177	2.969	4.146	1,2	
IP31G	RS5	351	1.660	35	12	142	75	318	0	318	1.164	1.747	2.911	0,9	
IP32G	RS5	1.589	3.322	260	54	1.032	425	501	0	501	3.884	3.801	7.685	2,3	
IP33G	RS5	866	1.048	453	79	473	161	334	0	334	2.459	1.287	3.746	1,1	
IP34G	RS5	2.490	3.060	1.256	64	1.022	164	396	0	396	5.560	3.288	8.848	2,7	
IP35G	RS1	750	2.786	52	16	159	68	292	0	292	1.546	2.870	4.416	0,9	
IP37G	KB	4.214	7.129	335	21	1.592	120	439	0	439	7.020	7.271	14.291	2,2	
IP39G	RS6	4.756	8.830	121	39	634	272	138	138	138	5.786	9.279	15.065	4,5	
IP40G	RS5	126	2.079	181	129	98	78	127	0	127	659	2.287	2.946	0,9	
IP41G	RS5	31	192	5	5	10	14	275	0	275	596	211	807	0,2	
IP46L	KB	5.165	722	2.186	16	3.516	30	244	0	244	11.355	768	12.123	0,2	
IP46R	KB	5.078	129	2.065	3	3.507	8	247	0	247	11.144	140	11.284	0,0	
IP46V	KB	40	117	24	12	32	22	381	0	381	859	151	1.010	0,0	
IP48G	RS6	3	10	3	2	2	1	512	0	512	1.032	13	1.045	0,3	
LT43G	RS8	3.535	10.148	51	25	810	537	310	231	310	5.017	10.941	15.958	4,8	

Tabelle 85: Energiekosten und CO₂-Emissionen pro Montageautomat

In der folgenden Tabelle sind die Energiekosten getrennt nach Betriebsmittelzustand und Energieträger der Montageautomaten im Altbau (1. Zeile) und denen im Neubau (2. Zeile) sowie deren Summe (3. Zeile) aufgelistet. Aus Platzgründen muss auf die Beschriftung der drei Zeilen verzichtet werden.

BMZ1		BMZ2		BMZ3		BMZ4		BMZ5	Summe		
€ _{EL}	€ _{DL}	€ _{EL}	€ _{EL}	€ _{DL}	€ _{Ges}						
77.340	85.025	6.380	550	24.536	3.712	5.083	3.075	5.083	118.420	92.362	210.782
429.899	386.318	33.570	5.313	65.342	17.217	10.015	10.820	10.015	548.840	419.668	968.508
507.978	474.561	39.970	5.874	90.003	21.082	15.101	14.001	15.101	668.153	515.519	1.183.671

Tabelle 86: Energiekosten der Montageautomaten im Alt- und Neubau

4.5.4 Energiekosten der Pulverbeschichtungsanlagen

Die Energiekosten der Pulverbeschichtungsanlagen im Geschäftsjahr 2012/13 werden in der folgenden Tabelle dargestellt und sind getrennt nach Energieträger und Betriebsmittelzustand aufgelistet. Außerdem sind die im selben Zeitraum pro Maschine ausgestoßenen CO₂-Emissionen angeführt. Im Betriebsmittelzustand wird kein Erdgas verbraucht, weshalb diese Werte nicht in der folgenden aufgelistet sind.

BM- Bez.	BMZ1		BMZ2		BMZ3		BMZ4	BMZ5	Summe			CO ₂
	€ _{EL}	€ _{EG}	€ _{EL}	€ _{EG}	€ _{EL}	€ _{EG}	€ _{EL}	€ _{EL}	€ _{EL}	€ _{EG}	€ _{Ges}	t _{CO2}
KB03G	20.414	29.153	1.368	3.952	7.143	6.905	109	107	29.141	40.010	69.150	499
KB04G	24.687	35.255	434	1.254	3.886	3.756	108	106	29.222	40.266	69.487	502
KB05G	15.526	22.173	668	1.929	11.016	10.649	124	117	27.451	34.751	62.202	434
KB06G	15.527	22.174	1.417	4.092	6.302	6.092	156	145	23.547	32.358	55.904	404

Tabelle 87: Energiekosten und CO₂-Emissionen pro Pulverbeschichtungsanlage

Durch die Anwendung des methodischen Bottom-Up-Ansatzes können die von den einzelnen Maschinen verursachten Energiekosten ermittelt werden. Aus der Aufteilung dieser Kosten auf die fünf Betriebsmittelzustände lassen sich erste Möglichkeiten zur Einsparung von Energiemenge bzw. Energiekosten ermitteln.

Wie schon zu Beginn dieser Diplomarbeit, nämlich in der Aufgabenstellung, erwähnt wurde, bedarf es zur Umsetzung gezielter Energieoptimierungsmaßnahmen der Kenntnis der aktuellen energetischen Betriebssituation. Erst wenn die bestehenden Energie- und Stoffflüsse analysiert sind, können die größten Verbraucher lokalisiert und konkrete Energieoptimierungsmaßnahmen wirtschaftlich bewertet und umgesetzt werden. Durch die methodische Anwendung des Top-Down- bzw. Bottom-Up-Ansatzes kann die energetische Situation des Werks 4 entlang der einzelnen in Abbildung 2 dargestellten Unternehmensebenen analysiert und in Form eines Energieflussdiagrammes (Abbildung 42) dargestellt werden.

Im folgenden Kapitel wird auf Basis der für das Geschäftsjahr 2012/13 festgehaltenen energetischen Ist-Situation des Werks 4 gezeigt, dass sich einige Optimierungsmöglichkeiten von Energiemenge und -kosten auf den unterschiedlichen Unternehmensebenen direkt hieraus entwickeln lassen.

5 Energieoptimierungsmaßnahmen

In diesem Kapitel wird gezeigt, dass sich auf jeder Strukturebene eines Unternehmens Energieoptimierungspotentiale finden und die für deren Erschließung notwendigen Maßnahmen bewerten lassen. Im ersten Teil erfolgt die Beschreibung möglicher Energieoptimierungsmaßnahmen anhand der Analyseergebnisse des Top-Down-Ansatzes und im zweiten Teil diejenige auf Basis der Ergebnisse des Bottom-Up-Ansatzes.

5.1 Energieoptimierung mittels Top-Down-Ansatz

Die Lastdauerkurve in Abbildung 13 beschreibt die vier Lastbereiche der elektrischen Leistungsaufnahme des Werks 4, welche hinsichtlich Energieverbrauch und -kosten optimiert werden können. Im Folgenden werden ein Energieoptimierungsbeispiel für den Grundlastbereich (IV) und ein Kostenoptimierungsbeispiel für Spitzenlastbereich I des elektrischen Stromverbrauches des Werks 4 beschrieben.

5.1.1 Einsparpotential durch Grundlastreduktion

In Abbildung 12 ist zu sehen, dass sich aufgrund des zweiwöchigen Betriebsurlaubes im Juni und Juli 2012 eine sehr niedrige und konstant über diesen Zeitraum verlaufende Grundlast ergibt. Selbiges gilt auch für den zweiwöchigen Weihnachtsurlaub im Dezember 2012 und Jänner 2013. Die während dieser Zeiten durchschnittliche bezogene Grundlast beträgt im Schnitt ca. 430 kW, wobei die minimale bezogene Grundlast bei 300kW liegt. Neben diesen Urlaubszeiten wird auch an Wochenenden, welche die Produktionswochen trennen, nicht produziert. Je nachdem, ob die Produktionsauslastung einen 15- oder 18- Schichtenbetrieb während der Woche fordert, beläuft sich die produktionsfreie Zeit an den Wochenenden auf 3 bzw. 6 Schichten. Die Verursacher für einen erhöhten Grundlastverbrauch in produktionsfreien Zeiten können sein:

- Hallenbeleuchtungen, die nicht benötigt werden
- Nicht richtig abgeschaltete Produktionsmaschinen

- Zur Kompensierung von Leckagen laufende Kompressoren
- Falsch eingestellte und dadurch ständig aktive Lüftungs- und Klimageräte
- EDV- Rechnerzentren

Würde es gelingen, die Grundlast an diesen Wochenenden permanent auf die kleinste im GJ2012/13 aufgetretene Leistung von 300 kW zu senken, so entspräche dies einem Einsparungspotential von 1.047.255 kWh bzw. 97.520 Euro im Geschäftsjahr 2012/13. Da aber Urlaubszeiten für Umbauten und größere Instandhaltungsmaßnahmen genutzt werden, wäre diese Einsparmaßnahme nur teilweise umsetzbar. In Abbildung 12 ist bei der zweiten Woche des Weihnachtsurlaubes besonders gut zu erkennen, dass die produktionsfreie Zeit tatsächlich für entsprechende Arbeiten genutzt wird und so die Grundlast wieder etwas ansteigt.

5.1.2 Einsparpotential durch Spitzenlastreduktion

Die Netznutzungsentgelte und die Strompreise setzen sich bei Kunden ab der Netzebene 3 aus einem Arbeits- und einem Leistungspreis zusammen. Neben der bezogenen elektrischen Arbeit (kWh) wird in diesem Fall auch die maximale bezogene Leistung (kW) bei der Berechnung der Netznutzungsentgelte und der Strombezugskosten berücksichtigt. (dena, 2013) Eine durch betriebliches Energiemanagement umgesetzte Begrenzung der bezogenen Leistung auf einen bestimmten maximalen Wert würde somit die Kosten der Netznutzung und somit des Strombezugs insgesamt verringern. Allerdings ist der Anteil des Leistungspreises an den Strombezugskosten im Vergleich zum Arbeitspreis marginal. Eine Reduzierung der bezogenen elektrischen Leistung um 1kW reduziert die Strombezugskosten um 2352 Cent pro Jahr. (Vorarlberger Energienetze, 2013) Könnte man durch Spitzenlastreduktion alle Lastspitzen über die in Abbildung 13 definierten unteren Grenze des Spitzenlastbereiches vermeiden, so wäre eine Kosteneinsparung von 13.806€ pro Jahr zu erzielen.

maximale Spitzenlast	6.924 kW
minimale Spitzenlast laut Lastdauerkurve	5.750 kW
Spitze-Spitze-Wert des Spitzenlastbereiches	1.174 kW
Prozentuelle Spitzenlastreduktion	50 %
Spitzenlastreduktion	587 kW
Leistungspreis der Netznutzungsentgelte	2.352 Cent/(kW*Jahr)
Ersparnis pro Jahr	13.806€/Jahr

Tabelle 88: Einsparpotential durch Spitzenlastoptimierung

5.2 Energieoptimierung mittels Bottom-Up-Ansatz

Das Ziel dieser Diplomarbeit ist die Analyse der Ist-Energie-Situation des Produktionswerks 4. Auf Basis dieser Analyse soll diejenige Produktionstechnologie mit dem attraktivsten Energieeinsparpotential identifiziert, konkrete Energieeinsparmaßnahmen erarbeitet und diese wirtschaftlich bewertet werden.

Bei Betrachtung des Energieflussdiagramms des Werks 4 (siehe Abbildung 42) ist zu erkennen, dass die Montageautomaten gegenüber den Pressen, Profilieranlagen und Pulverbeschichtungsanlagen mit 21,1% des bezogenen elektrischen Stromes und 22,1% der gesamten erzeugten Druckluft die Produktionstechnologie im Werk 4 mit dem größten Energieverbrauch ist. Dies ist vor allem auf die hohe Anzahl von 116 Anlagen im Werk 4 zurückzuführen. Die Pulverbeschichtungsanlagen besitzen zwar nicht den gleichen Energieverbrauch wie die Montageautomaten, heben sich jedoch ebenfalls deutlich vom Energieverbrauch der Pressen und der Profilieranlagen ab. Diverse Montageanlagen werden auch in allen anderen Produktionswerken von Blum eingesetzt, wodurch das Energieeinsparpotential der Montageautomaten deutlich größer ist, als diese für das Werk 4 geltende Untersuchung vermuten lässt. Aus diesem Grund wird in den Montageautomaten das größte Energieeinsparpotential vermutet. Daher werden diese hinsichtlich konkreter Energieoptimierungsmaßnahmen untersucht und wirtschaftlich bewertet.

Montageautomaten verbrauchen elektrischen Strom und Druckluft, wodurch die möglichen energieeinsparenden Maßnahmen auf die Reduktion dieser beiden Energieformen abzielen. In Anlehnung an den in Abbildung 2 beschriebenen Bottom-Up-Ansatz können die energieoptimierenden Maßnahmen eines Betriebsmittels der Prozess- oder der Komponentenebene systematisch erarbeitet werden. Eine

Optimierung auf der Komponentenebene ist meist mit einer technischen Maßnahme verbunden und eine Optimierung auf der Prozessebene meist mit einer Organisatorischen. Beide Maßnahmen führend zu einem Energieeinspareffekt, da mit einer technischen Maßnahme eine Leistungsoptimierung und mit einer organisatorischen Maßnahme eine Optimierung bezüglich der Dauer des Energiebezuges verbunden ist. Im Anschluss wird sowohl eine technische, als auch eine organisatorische energieoptimierende Maßnahme vorgestellt und bewertet.

5.2.1 Druckluftoptimierung von Montageautomaten

Aus der nachfolgenden Tabelle sind die sich aus dem Berechnungsmodell ergebenden Druckluftkosten der Montageautomaten in den fünf Betriebsmittelzuständen mit und ohne Leckagen aufgelistet.

	BMZ1	BMZ2	BMZ3	BMZ4	BMZ5	Summe
Istwerte	491.792 €	6.170 €	20.290 €	14.736 €	- €	532.989 €
Leckagebereinigt	467.432 €	3.583 €	10.980 €	- €	- €	481.995 €
Ersparnis	24.360 €	2.587 €	9.310 €	14.736 €	- €	50.993 €

Tabelle 89: Einsparpotential durch Reduzierung der Druckluftleckagen bei Montageautomaten

Die obige Tabelle zeigt, dass im Geschäftsjahr 2012/13 insgesamt 532.989 Euro für die Druckluftversorgung der im Werk 4 eingesetzten Montageautomaten aufgewendet werden. Bei einer vollständigen Beseitigung der Leckagen könnte ein theoretisches maximales Einsparungspotential von 50.993 Euro erschlossen werden. Knapp 30% dieses Potentials, nämlich 14.736 Euro, könnten durch die Beseitigung der Leckagen im Betriebsmittelzustand 4, in welchem die Maschine abgeschaltet ist, erreicht werden. Diese organisatorische Maßnahme zielt darauf ab, den Druckluftverbrauch im Betriebsmittelzustand 4 bzw. im Ruhezustand 1 zu verhindern und kann somit der Prozessebene (siehe Abbildung 2) zugeordnet werden. In Tabelle 85 werden die Kosten für elektrischen Strom und Druckluft aller im Werk 4 eingesetzten Montageautomaten in den fünf Betriebsmittelzuständen dargestellt. Obwohl die Montageautomaten im Betriebsmittelzustand 4 ausgeschaltet sind, ist an den anfallenden Kosten zu erkennen, dass der Großteil dieser Anlagen Energie in Form von Druckluft verbraucht. Nur wenige Anlagen

verfügen über eine neue Druckluft-Wartungseinheit mit Magnetventil, welches die Druckluftversorgung der Anlagen im abgeschalteten Zustand verhindert. Eine Nachrüstung alter Wartungseinheiten um dieses Magnetventil würde knapp 345 Euro kosten. Die nachstehende Tabelle enthält alle für den Umbau benötigten Teile inklusive ihrer jeweiligen Kosten.

MAT.ID.NR.	Lagerteile	Stück:	€/Stk.	Gesamt
5652938	KUPPLUNGSDOSE 2+E/B/LED	1,00	12,68	12,68
5450183	STECKER M12-4POL STI GERA	1,00	0,53	0,53
SUMME:	Material			13,21
MAT.ID.NR.	Lagerteile	Stück:	€/Stk.	Gesamt
4165895	EINSCHALTVENTIL 1" NL6 EL	1,00	140,99	140,99
1240872	ANSCHLUSSPLATTE G1" NL6	1,00	15,75	15,75
3537859	VERBLOCKUNGSSATZ NL6	1,00	5,14	5,14
SUMME:	Material			161,88
FREMDL.	Leistung X Stundensatz	Std.	€/Std.	Gesamt
	externe Firma	0,50	60,00	30,00
SUMME:	Stunden für Fremdleistung			30,00
EIGENL.	Gesamt	Gesamt	Gesamt	Gesamt
	Anlagentechniker / PM2	2,00	46,00	92,00
	Anlagensteuerungstechniker / BE2	1,00	46,00	46,00
SUMME:	Stunden für Eigenleistung			138,00
Gesamter Betriebsaufwand pro Wartungseinheit				343,09 €

Tabelle 90: Kosten für die Ausstattung der Wartungseinheit mit einem Magnetventil

Aus der obigen Kostenaufstellung ergibt sich der Gesamtaufwand des Umbaus aus dem benötigten Material sowie aus den Personalstunden für externes und internes Personal. Die Gesamtkosten für die Ausstattung einer Wartungseinheit mit einem Magnetventil belaufen sich somit auf 343,09 Euro.

Investitionen in Optimierungsmaßnahmen, die sich innerhalb der ersten 3 Jahre amortisieren, werden bei Blum als sehr attraktiv betrachtet. In der folgenden Tabelle sind die 18 Montageautomaten aufgelistet, für welche sich das Nachrüsten eines Magnetventils bei den Wartungseinheiten (WHE) innerhalb der ersten 3 Jahre rechnet.

BM-Bez.	Abt. Bez.	Anzahl WHE	BMZ1	BMZ2	BMZ3	BMZ4	BMZ5	SUMME	Amortisierungsdauer
IL21G	RS8	3	18.455 €	806 €	410 €	1.012 €	- €	20.684 €	1,02
IP04G	RS7	1	2.931 €	53 €	140 €	258 €	- €	3.382 €	1,33
IF66G	RS3	1	136 €	0 €	6 €	243 €	- €	385 €	1,41
IL45E	RS8	1	6.519 €	113 €	158 €	224 €	- €	7.014 €	1,53
IF65L	RS6	2	10.193 €	44 €	327 €	388 €	- €	10.952 €	1,77
IL87G	RS3	1	8.164 €	45 €	414 €	183 €	- €	8.806 €	1,88
IF69R	RS8	1	20 €	1 €	5 €	177 €	- €	202 €	1,93
IL83G	RS1	1	321 €	7 €	40 €	159 €	- €	527 €	2,16
IF86G	RS3	1	1.427 €	13 €	73 €	158 €	- €	1.671 €	2,16
IF69L	RS8	1	17 €	1 €	4 €	158 €	- €	180 €	2,17
IP39G	RS6	1	7.470 €	45 €	166 €	139 €	- €	7.820 €	2,47
IL45G	RS8	3	10.893 €	373 €	184 €	416 €	- €	11.866 €	2,48
IF70R	RS6	2	1.640 €	15 €	49 €	259 €	- €	1.962 €	2,65
IF85G	RS3	1	283 €	8 €	27 €	124 €	- €	441 €	2,77
IL42G	RS8	4	2.146 €	104 €	68 €	491 €	- €	2.809 €	2,80
IL24E	RS7	2	1.089 €	28 €	171 €	243 €	- €	1.532 €	2,82
IL26G	RS8	2	35 €	1 €	8 €	236 €	- €	280 €	2,91
IF07G	RS1	3	2.850 €	36 €	334 €	353 €	- €	3.572 €	2,92

Tabelle 91: Liste aller Montageautomaten des Werks 4 mit einer Amortisierungszeit des Umbaus der Wartungseinheiten von weniger als 3 Jahren

Zu berücksichtigen ist, dass bei diesen Werten die Betriebsbedingungen der Maschinen vom Geschäftsjahr 2012/13 angenommen werden. Bei konstant bleibenden Leckagen und einer Erhöhung des BetriebsmittelGesamtnutzungsgrades der Montageautomaten, würde die Amortisierung zu einem späteren Zeitpunkt erfolgen. Sinkt dieser hingegen, so würde sich der Umbau der Wartungseinheiten früher amortisieren, da mehr Druckluft im Betriebsmittelzustand 4 eingespart werden würde.

Eine Alternative zur Optimierung der Wartungseinheiten ist eine Optimierung der Leckagen dieser Anlagen. Die Wartungseinheiten zielen auf eine Optimierung der Leckagen in den Betriebsmittelzuständen 4 und 5 ab. Im Gegensatz dazu würden Verbesserungen an den Ursachen der Leckagen, wie z.B. an defekten Leitungen, Ventile, Drosseln, etc., den Druckverlust auch in den BMZ 1-3 verhindern. Aus der obigen Tabelle ergeben sich die Ist-Druckluftkosten dieser 18 Montageanlagen für jeden der fünf Betriebsmittelzustände. Die folgende Tabelle fasst die Summe dieser Ist-Druckluftkosten zusammen und stellt diese den leckagebereinigten Werten gegenüber. Die Differenz von Beiden ergibt die möglich Ersparnis, welche sich ohne Leckagen an diesen Maschinen ergeben würde.

	BMZ1	BMZ2	BMZ3	BMZ4	BMZ5	Summe
Istwerte	74.588 €	1.691 €	2.585 €	5.222 €	- €	84.086 €
Leckagebereinigt	70.069 €	973 €	1.316 €	- €	- €	72.358 €
Ersparnis	4.520 €	718 €	1.268 €	5.222 €	- €	11.728 €

Tabelle 92: Druckluft- und Leckagekosten aller Montageautomaten im Werk 4, bei denen sich der Umbau der Wartungseinheiten in weniger als 3 Jahren rechnet

Für eine maximale Ersparnis von 11.728 Euro könnten Instandhaltungsmaßnahmen im Umfang von 255 Stunden durch einen Betriebsmechaniker mit einem Stundensatz von 46 Euro pro Stunde durchgeführt werden. Im folgenden Kapitel wird eine Investition in eine Energieoptimierungsmaßnahme untersucht, die sich hinsichtlich ihrer Amortisierungsdauer genau gegenläufig zu der soeben beschriebenen Maßnahme verhält. Je höher der BetriebsmittelGesamtnutzungsgrad ist, desto früher erfolgt dann der Zeitpunkt der r Amortisation.

5.2.2 Elektrische Leistungsoptimierung von Montageautomaten

Bei der Betrachtung eines Montageautomaten hinsichtlich der möglichen Energieoptimierungsmaßnahmen auf der Komponentenebene (siehe Abbildung 2) bieten sich natürlich die einzelnen in einer Montageanlage eingesetzten Komponenten¹ an. Für das Beispiel einer technischen Energieeinsparmaßnahme wird hierbei der Austausch eines alten 3kW Lampen-Laserschweißgerätes (HL3006D) gegen ein neues Dioden-Laserschweißgerät (TD4002) untersucht. Diese technische Energieeinsparmaßnahme zielt darauf ab, Energie bzw. -kosten durch die Reduktion der benötigten Leistung einzusparen. Die folgende Tabelle zeigt die gemessene mittlere elektrische Wirkleistung beider Lasertypen in den 5 Betriebsmittelzuständen.

Lasertyp	BMZ1	BMZ2	BMZ3	BMZ4	BMZ5
HL3006D	52,19 kW	43,21 kW	36,98 kW	0,00 kW	0,00 kW
TD4002	6,19 kW	5,47 kW	2,38 kW	0,00 kW	0,00 kW

Tabelle 93: Mittlere elektrische Wirkleistung der Lasertypen HL3006 und TD4002

¹ Technische Komponenten eines Montageautomaten sind wie in 4.2.3 beschrieben Laserschweißgeräte, Laserkühlungen, Widerstandsschweißgeräte, Hydraulikaggregate, Schaltschränke und Antriebsschränke.

Die erste Ziffer in der Typenbezeichnung steht hier für die Laserleistung an der Schweißstelle. Der Diodenlaser (TD4002) bringt 4kW auf die Schweißstelle und benötigt dazu eine fast 8,5-mal geringere Eingangsleistung als der 3kW Lampenlaser (HL3006D). Zusätzlich ist zu erkennen, dass der Diodenlaser in den Betriebsmittelzuständen 2 und 3 effizienter ist, da die bezogene Wirkleistung gegenüber dem Betriebsmittelzustand 1 stärker abfällt als beim Lampenlaser. Nach dem Abschalten der Montageanlage beziehen beide Lasertypen keine elektrische Wirkleistung.

Es stellt sich nun die Frage, wie lange es dauert, bis sich der Austausch eines alten Lampenlasers rechnet. Für die Beantwortung ist die Entwicklung der Lebenszykluskosten entscheidend, zu welchen die Anschaffungs-, Inbetriebnahme- und die fortlaufenden Betriebskosten zählen.

Die Anschaffungskosten für den 4kW Diodenlaser des Typs TD4002 belaufen sich auf ca. 220.000€ und die Inbetriebnahmekosten auf 11.300€. Letztere setzen sich wie folgt zusammen:

Aufwände	Stunden	Stundensatz	Aufwand
Ext. Techniker	25,0 h	200 €/h	5.000 €
Betriebselektriker (BE)	25,0 h	46 €/h	1.150 €
Betriebsmechaniker (BM)	25,0 h	46 €/h	1.150 €
Sonstiges	-	-	4.000 €
SUMME			11.300 €

Tabelle 94: Inbetriebnahmekosten eines Laserschweißgerätes

Die Betriebskosten sind von der Maschinenauslastung und somit vom BetriebsmittelGesamtnutzungsfaktor bzw. vom BetriebsmittelHauptnutzungsfaktor abhängig. Dieser variable Kostenanteil setzt sich wiederum aus den Energie- und den Instandhaltungskosten zusammen. In der folgenden Tabelle wird das Lastprofil des Montageautomaten IP02G dargestellt, welches gemeinsam mit den gemessenen Laserleistungen als Basis für die Berechnung der Energiekosten dient.

BM-Bez.	Gesamtnutzungsfaktor	Hauptnutzungsfaktor	BDK-Zeiten					Summe
			BMZ1	BMZ2	BMZ3	BMZ4	BMZ5	
IP02G	107%	66%	3.746 h	38 h	2.259 h	1.359 h	1.359 h	8.760 h

Tabelle 95: Lastprofil des Montageautomaten IP02G im GJ2012/13

Auf Basis des obigen Lastprofils der IP02G im GJ2012/13 ergeben sich die Energiekosten der beiden Lasertypen. Diese sind auf die fünf Betriebsmittelzustände aufgeteilt und werden in der folgenden Tabelle aufgelistet.

Lasertyp	BMZ1	BMZ2	BMZ3	BMZ4	BMZ5	SUMME
HL3006D	18.205 €	154 €	7.778 €	0 €	0 €	26.136 €
TD4002	2.158 €	19 €	500 €	0 €	0 €	2.678 €

Tabelle 96: Energiekosten des Montageautomaten IP02G im Geschäftsjahr 2012/13

Die auf Basis des Lastprofils der Montageanlage IP02G für das vergangene Geschäftsjahr 2012/13 errechneten Energiekosten des Lampen- bzw. Diodenlasers unterscheiden sich ca. um den Faktor 10. Neben den Energiekosten zählen die Instandhaltungskosten zu den Betriebskosten. Die folgenden zwei Tabellen zeigen die zu wartenden Komponenten des Lampenlasers (HL3006D) und des Diodenlasers (TD4002). Außerdem sind darin die Wartungsintervalle und die Kosten der Verschleißteile sowie die sich auf Basis des Lastprofils der IP02G ergebenden wöchentlichen Wartungskosten zu sehen.

Lampenlaser (HL3006D)	Anzahl	Wartungsintervall	Kosten pro Stück
Lampen	12 Stk	10.000 h	212 €/Stk
Gesamte Instandhaltungskosten pro Woche			147 €

Tabelle 97: Instandhaltungskosten des 3kW Lampenlasers (HL3006D)

Diodenlaser (TD4002)	Anzahl	Wartungsintervall	Kosten pro Stück
Pumpmodul	6 Stk	30.000 h	8.432 €/Stk
Luftaufbereitungsmodul	1 Stk	10.000 h	2.800 €/Stk
Gesamte Instandhaltungskosten pro Woche			228 €

Tabelle 98: Instandhaltungskosten des 4kW Diodenlasers (TD4002)

Aus den obigen Tabellen geht hervor, dass die wöchentlichen Instandhaltungskosten des neuen Diodenlasers für den Montageautomaten IP02G um ca. 50% höher als die des aktuellen Lampenlasers lägen. Verantwortlich dafür sind vor allem die teuren Pumpmodule des Diodenlasers. Somit lassen sich die Lebenszykluskosten des Lampenlasers (HL3006D) und des Diodenlasers (TD4002) in Abhängigkeit des Lastprofils des Montageautomaten IP02G berechnen. Die folgende Abbildung zeigt eine Break-Even-Analyse dieser beiden Technologien.

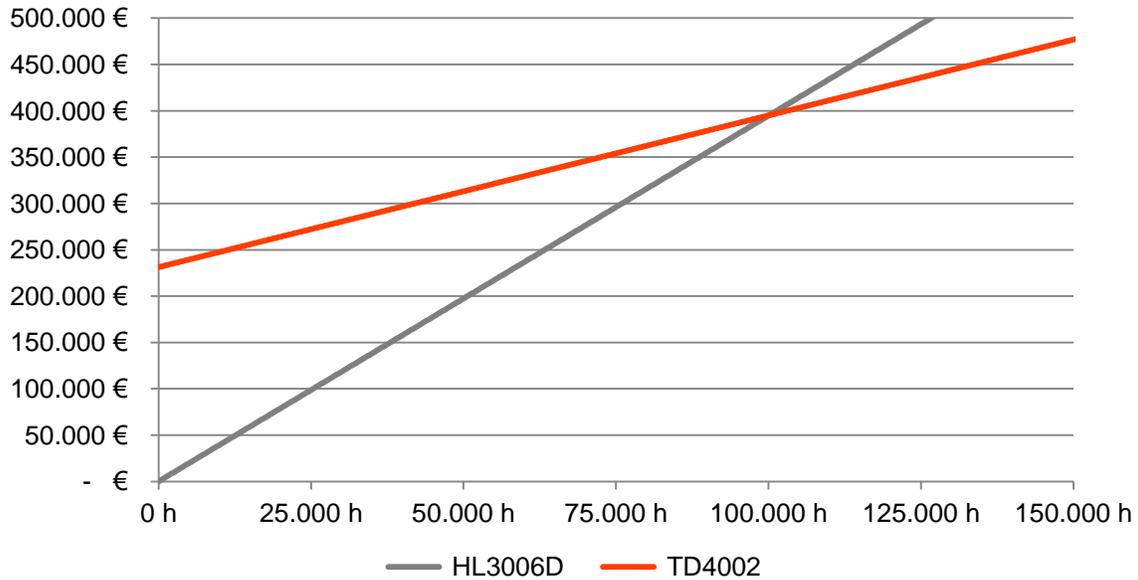


Abbildung 43: Entwicklung der Lebenszykluskosten des Lampen- und Diodenlasers

Aus der obigen Abbildung geht hervor, dass sich der Austausch des aktuellen 3kW Lampenlasers gegen einen neuen Diodenlaser bei einem Betriebsmittel-Gesamtnutzungsfaktor von 107% und einen Betriebsmittel-Hauptnutzungsfaktor von 66% erst nach 12 Betriebsjahren rechnen würde. Selbst wenn eine Steigerung der Maschinenauslastung bzw. des Hauptnutzungsgrades auf 100% möglich wäre, würde sich ein Amortisierungszeitpunkt von 11,4 Jahren ergeben. Dieser Zeitraum liegt deutlich über dem als interessant angesehenen Amortisierungszeitraum von 3 Jahren, weshalb ein Austausch eines 3kW Lampenlasers gegen einen 4kW Diodenlaser trotz höherer Energieeffizienz wirtschaftlich nicht vertretbar ist.

6 Schlusskapitel

In diesem letzten Kapitel werden die weiteren im Zuge dieses Projektes gefundenen Potentiale kurz aufgegriffen, die verwendete Methode kritisch hinterfragt, sowie Schlussfolgerungen aus den Ergebnissen dieser Diplomarbeit gezogen.

6.1 Weitere gefundene Potentiale

Wie schon in der Aufgabenstellung in Kapitel 1 beschrieben, zeigt diese Diplomarbeit eine Methodik auf wie die in einem Produktionsbetrieb verborgenen Energieeinsparpotentiale systematisch gefunden und anschließend bewertet werden können. Das Ziel dieser Arbeit liegt in der Anwendung dieser Methodik, wie in Kapitel 5 gezeigt wird. Es ist nicht das Ziel alle im Zuge dieser Arbeit gefundenen Potentiale genau zu untersuchen, weshalb im Kapitel 5.2 jeweils ein Optimierungsbeispiel für die zwei Energieformen elektrischer Strom und Druckluft, welche für den Betrieb der Montageautomaten benötigt werden, beschrieben wurde.

Stromverbrauch von LTS-S5 vs. LTS-CI-Montageautomaten

Der erhöhte Stromverbrauch der LTS-CI-Montageautomaten gegenüber LTS-S5-Montageautomaten im Betriebsmittelzustand 4 und 5 verursacht zusätzliche Stromkosten von ca. 1120 Euro pro Jahr. Zusätzlich zu diesen kommen noch die wesentlich höheren Ersatzteilkosten für den Austausch von Motorcontrollern der LTS-CI-Montageautomaten, welche durch einen Stromausfall stark beschädigt bzw. zerstört werden können.

Druckluftverbrauch der Waschtunnel bei Profilieranlagen

Durch den Verzicht des Waschtunnels bei den Profilieranlagen könnte der Druckluftverbrauch von diesen stark reduziert werden. Dadurch ließen sich jährlich ca. 22.800 Euro bei den Profilieranlagen im Werk 4 einsparen. Diese Maßnahme wurde schon getestet und ist aus Qualitätsgründen derzeit noch nicht umsetzbar.

Druckluftherzeugung und Wärmerückgewinnung

Laut dem Berechnungsmodell hat die Druckluftherzeugung für die im Modell berücksichtigten Betriebsmittel 556.980 Euro im Geschäftsjahr 2012/13 gekostet. Diese Druckluftherzeugungskosten ließen sich um ca. um 13% auf 483.396 Euro reduzieren, wenn die Leckagen der Betriebsmittel vollständig behoben werden würden.

Durch eine Verringerung des Druckluftbedarfes der Produktionsanlagen ergäbe sich auch eine Reduktion des Heiz- bzw. des Kühlbedarfes wie in Kapitel 3.3.1 und 3.3.2 beschrieben wird. Im Winter ist der Bedarf an der zurückgewonnenen Wärmeenergie der Kompressoren vorhanden, wodurch weniger geheizt werden muss. Im Sommer hingegen ist jedoch der Kühlbedarf umso größer. Eine Reduktion der Druckluftleckagen würde sich zweifach kostensparend auswirken. Zum einen würde sich dies auf eine Reduktion der Heizkosten auswirken, da die Rückgewinnung von Wärme aus der Druckluftherzeugung teurer ist als das Heizen mit Erdgas bzw. Heizöl und zum anderen würden sich dadurch der Kühlbedarf und in Folge die Stromkosten für den Betrieb der Kühltechnik reduzieren lassen. Es ist schwer abschätzbar wieviel Energiekosten sich zusätzlich zu den oben erwähnten Druckluftherzeugungskosten für Leckagen im Werk 4 durch einen optimierten Heiz- und Kühlbedarf einsparen lassen würden, da die Wirkzusammenhänge zwischen der Abwärme im Werk, der technischen Gebäudeausrüstung, der Gebäudestruktur und der Umwelt sehr komplex sind.

Optimierung des Pulverbeschichtungsprozesses

Ein weiteres großes Energieeinsparpotential ist bei den Pulverbeschichtungsanlagen zu vermuten. Durch große Eingangs- und Ausgangsöffnungen beim Wasser- und Pulvertrockner wird sehr viel Wärme in die Produktionshalle abgegeben. Dadurch sind sowohl die Wärmeverluste der Öfen als auch der Kühlbedarf des Altbaus größer als nötig. Für eine Optimierung des Pulverbeschichtungsprozesses könnte eine isolierte Vor- und Nachlaufstrecke mit integriertem Wärmerückgewinnungssystem angedacht werden. Damit könnte die

Restwärme der Nachlaufstrecke zum Vorwärmen der Teile in die Vorlaufstrecke geblasen werden, was sich wiederum auf eine Reduktion des Erdgases auswirkt.

6.2 Kritische Betrachtung der verwendeten Methodik

Beim Bottom-Up-Ansatz erfolgt die Verdichtung der 30 allgemein gültigen Stillstandsgründe auf die drei Betriebsmittelzustände (BMZ) Produktionszustand (BMZ1), Wartezustand (BMZ2) und Rüstzustand (BMZ3) in Abhängigkeit von der jeweiligen Produktionstechnologie. Es wird somit festgelegt, dass die Betriebsmittel während dessen diese am BDK angemeldet sind, drei energetisch unterschiedliche Zustände einnehmen können. In Kapitel 4.2.2 wurde gezeigt, dass die Profilieranlagen auch mehr als diese drei sich voneinander unterscheidenden Leistungszustände während des Betriebes haben können. Da das BDK-System den energiesparenden Maschinenzustand der Profilieranlagen, welcher nach einer gewissen Stillstandszeit der Anlage automatisch eingenommen wird, nicht als solchen erkennt, musste hier eine Einschränkung gemacht werden. Diese Verdichtung führt somit zu einem Informationsverlust. Es wäre empfehlenswert wenn eine Rückmeldung eines energiesparenden Zustandes der Maschinen an das BDK-System ermöglicht werden würde.

Weiter berücksichtigt der Bottom-Up-Ansatz lediglich solche Betriebsmittel, die mit dem Betriebsdatenkommunikationssystem verbunden sind. Dazu zählen alle Pulverbeschichtungsanlagen und Profilieranlagen sowie der Großteil der Pressen und Montageautomaten. Dieser sehr geringe Anteil der Pressen und Montageautomaten, welcher nicht mit dem BDK-System verbunden ist, trägt nur sehr wenig zur Gesamtproduktion bei. Durch die Vernachlässigung dieser Betriebsmittel im Berechnungsmodell des Bottom-Up-Ansatzes, wird deren Anteil am Gesamtenergieverbrauch in den Sekundärbereichen von Alt- und Neubau berücksichtigt.

Aufgrund der Anzahl und Unterschiedlichkeit von Montageautomaten, würde eine energetische Untersuchung einer jeden Anlage einen enormen Messaufwand bedeuten, welcher im Zuge dieser Diplomarbeit nicht zu bewältigen wäre. Die

Regressionsanalyse eignet sich hervorragend, um den Messaufwands auf einige Maschinen zu reduzieren. Dabei werden die Messergebnisse dieser, über Ähnlichkeitsmerkmale der Automaten, auf nicht untersuchte Automaten umgelegt werden konnte. Eine weitere Möglichkeit, die angedacht worden ist, wäre die energetische Untersuchung der einzelnen Module einer Montageanlage. Diese wurde jedoch verworfen, da eine klare Trennung der einzelnen Module voneinander aus energetischer Sicht nicht möglich ist.

Die möglichen Abweichungen der durch die Regressionsanalyse ermittelten Verbrauchswerte von elektrischem Strom und Druckluft der Montageautomaten, wurden im Kapitel 4.2.3 für jeden untersuchten Betriebsmittelzustand angeführt. Bei den Pressen und Profilieranlagen wurden die Energiemesswerte der untersuchten Maschinen aufgrund der technischen Vergleichbarkeit auf die nicht untersuchten Maschinen umgelegt. Diese Vereinfachung ist als weitere Fehlerquelle zu verstehen, welche durch eine energetische Untersuchung aller Anlagen vermieden werden könnte. Ein weiterer Modellfehler entsteht, durch die Multiplikation dieser gemessenen Verbrauchswerte mit den Betriebsmittelzuständen Produktionszustand (BMZ1), Wartezustand (BMZ2) und Rüstzustand (BMZ3), Ruhezustand 1 (BMZ4) und Ruhezustand 2 (BMZ2).

Für die wirtschaftliche Bewertung der Energieoptimierungsmaßnahmen wurde die Life-Cycle-Cost (LCC) Analyse verwendet. Die Tatsache, dass die Energiekosten von Bauteilen wie beispielsweise einer Pumpe ca. 60% ihrer Lebenszykluskosten ausmachen zeigt, wie wichtig eine Berücksichtigung dieser ist. Ein Nachteil der LCC-Analyse ist jedoch, dass der Aufwand für die Datenbeschaffung sehr groß ist und im Speziellen bei der Analyse der Energiekosten mit einem Messaufwand verbunden ist. Außerdem ist zu erwähnen, dass die hier durchgeführte Amortisierungsrechnung statisch erfolgt ist und somit der Zeitwert der Einsparungen nicht berücksichtigt worden ist. Grund dafür ist, dass eine Ab-Diskontierung zukünftiger Ersparnisse auf einen gemeinsamen Betrachtungszeitpunkt amortisierungsverlängernd wirken würde. Diese statische Wirtschaftlichkeitsberechnung ist in erster Instanz bzw. für eine Abschätzung der Amortisierungsdauer auseichend.

Weitere durchzuführende Messungen

Die Leistungsanalyse des Betriebsmittelzustandes 1 „Produktionszustand“ der einzelnen Produktionstechnologien wird unabhängig von dem Produkt, welches während der Messung auf der Maschine gefertigt wird, durchgeführt. Aufgrund des Messaufwandes wird somit auf mehrere Messungen einer Maschine während der Produktion unterschiedlicher Produkte verzichtet. Außerdem wird davon ausgegangen, dass der Anteil der Leistung, welcher produktabhängig ist, klein gegenüber der Leistung ist, welche die Maschine zur Bewegung der Achsen und Führungssysteme benötigt. Durch weitere Messungen könnte die Prozessenergie abhängig von Produkt und Produktionstechnologie genauer studiert werden.

Aus der Regressionsanalyse ergibt sich sowohl für die LTS-CI Montageautomaten mit stromintensiver Technologie in den Betriebsmittelzuständen 1, 2 und 3 als auch für die LTS-S5 Montageautomaten mit stromintensiver Technologie im Betriebsmittelzuständen 1 ein negativer Koeffizient „Anzahl Elektromotoren“. Da die elektrische Leistung von Montageautomaten mit einer steigenden Anzahl an Elektromotoren nicht kleiner werden kann, wären mehr Messwerte für eine Optimierung dieses Regressionsmodells von großem Wert. Ebenso wären erneute Energiemessungen an den Pulverbeschichtungsanlagen empfehlenswert, da die in dieser Arbeit getätigten Volumenstrommessungen des Erdgases durch ablesen eines Zählers erfolgten. Geeignete Sensoren, die mit dem BDK-System verbunden werden, wären die Grundlage für eine professionelle Prozess- und Energieanalyse der Pulverbeschichtungsanlagen.

Im folgenden letzten Unterkapitel werden Schlussfolgerungen aus der durchgeführten Diplomarbeit gezogen und beschrieben

6.3 Schlussfolgerungen

Aus dieser Arbeit kann gelernt werden wie sich ein derartiger Produktionsbetrieb aus energetischer Sichtweise, angefangen vom Energiebezug, über die Energieumwandlung bis hin zum Energieeinsatz bei den wertschöpfenden Prozessen, verhält. Die Diplomarbeit ermöglicht es den Energieverbrauch der

einzelnen Produktionsbereiche bzw. Betriebsmittel zu bestimmen, was nicht möglich war. Bisher wurden die angefallenen Energiekosten über Kostenstellenschlüssel auf die Kostenstellen bzw. die Betriebsmittel aufgeteilt. In Folge kann das Ergebnis des Berechnungsmodells dieser Diplomarbeit mit der bisherigen Aufteilung der Energiekosten über Kostenstellenschlüssel verglichen werden und als Grundlage für Optimierungen im Bereich der Betriebskostenrechnung dienen.

Aus der Sicht der Energieeffizienz der Betriebsmittel in kWh pro Stück, welche in Kapitel 4.3 für alle Betriebsmittel der vier Produktionsmitteltechnologien angegeben wird, lassen sich folgende zwei wesentliche Aussagen ableiten:

1. Ein direkter Vergleich der Energieeffizienz von mehreren Maschinen innerhalb einer Produktionsmitteltechnologiegruppe ist nur bei baugleichen Anlagen und gleichem zu fertigenden Produkt möglich. Die Energieeffizienz schwankt innerhalb der Technologiegruppe sehr stark. Dies ist vom technischen Stand, dem zu fertigenden Produkt und von der Betriebsweise der jeweiligen Maschine abhängig. Somit darf ein Vergleich der Energieeffizienz von unterschiedlichen Maschinen nur unter Berücksichtigung der jeweiligen Unterschiede erfolgen.
2. Die Energieeffizienz zwischen den Maschinen der einzelnen Produktionsmitteltechnologiegruppen unterscheidet sich nicht besonders stark. Dies hat mit der Tatsache zu tun, dass eine Presse zwar weniger Stück pro Jahr produziert als eine Kunststoffbeschichtungsanlage, jedoch auch weniger Energie für deren Produktion benötigt. Beispielsweise besitzt sowohl die Presse P114G als auch die Pulverbeschichtungsanlage KB03G eine Energieeffizienz von 0,05, jedoch unterscheiden sich beide Anlagen in ihrer Ausbringung und dem dafür benötigten Energieverbrauch enorm. Für die Produktion 706.878 Stück im GJ2012/13 benötigt die Presse 42.301 kWh, hingegen benötigt die Pulverbeschichtungsanlage für die Produktion von 28.278.783 Stück 1.472.415 kWh. Ein Vergleich der Energieeffizienz von derartig unterschiedlichen Produktionstechnologien ist deshalb nicht sehr sinnvoll. Viel interessanter hingegen wäre der Vergleich innerhalb einer Technologiegruppe und hinsichtlich des zu produzierenden Produktes.

Daraus würde sich eine „Best in Class“ Maschine und somit ein interner Benchmark in Abhängigkeit des Produktes erstellen lassen, an welchem sich gezielt Optimierungsstrategien ableiten lassen würden.

Allgemein kann somit gesagt werden, dass nur eine Steigerung des Betriebsmittel-Hauptnutzungsgrades zu einer Erhöhung der Energieeffizienz dieser führt. Die Steigerung der Energieeffizienz in Abhängigkeit des Hauptnutzungsgrades ist von der jeweiligen Maschine abhängig.

Zusätzlich konnte im Zuge der Energiemessungen ein Messablauf für Energiemessungen an Produktionsmaschinen entwickelt werden, an dem sich zukünftige Energiemessungen orientieren können. Im Zuge dieser Messungen konnte ebenso ein tiefgehendes Verständnis für den Energieverbrauch an den verschiedenen Betriebsmittel bzw. -technologien in den unterschiedlichen Maschinenzuständen und in Folge auch für die auf diesen ablaufenden Prozessen erlangt werden.

Ein derzeit bei Blum laufendes Projekt beschäftigt sich damit neuen Anlagen mit Energiemesssensoren auszustatten und diese so mit dem Betriebsdatenkommunikationssystem zu verbinden, dass eine Abfrage eines Energieberichts der Betriebsmittel über das BDK-System möglich wird. Dabei werden die gemessenen Verbrauchswerte von elektrischem Strom, Druckluft und Erdgas auf die vier Zustände „Produktion“, „Produktionsbereit“, „Rüsten“ und „Anlage Aus“ verdichtet. Diese Verdichtung erfolgt jedoch nicht in Abhängigkeit der jeweiligen Produktionstechnologie. Im Kapitel 4.1.1 dieser Diplomarbeit wird jedoch gezeigt, dass eine Verdichtung der 30 allgemeinen Stillstandsgründe individuell für jede Produktionstechnologie erfolgen muss, weshalb dies als weitere Empfehlung ausgesprochen werden kann. In weiterer Folge werden die Betriebsmittel zur eigenständigen Überprüfung von deren Energieverbrauch fähig sein. Dies erlaubt ein automatisiertes Energie-Monitoring, welches die Betriebsmittel dazu befähigen würde, selbstständig einen Instandhaltungsservice anzufordern sobald ein kritischer Wert, wie beispielsweise der der Druckluftleckagen, überschritten werden würde.

Literaturverzeichnis

- Chancenland Vorarlberg.* (16. 01 2014). Von <http://www.chancenland.at/xCMS5/WebObjects/nexus5.woa/wa/page?menuid=1014&orgid=1193&lang=de> abgerufen
- Cleff, T. (2008). *Deskriptive Statistik und moderne Datenanalyse*. Wiesbaden: Verlag Dr. Th. Gabler.
- dena.* (16. 11 2013). Von Deutsche Energie-Agentur: <http://www.effiziente-energiesysteme.de/themen/lastmanagement/spitzenlastreduktion.html> abgerufen
- Dreistern.* (03. 03 2014). *Dreistern.* Von <http://www.dreistern.com/technologie-innovation/product/overview/rollprofilieren/> abgerufen
- Fraunhofer.* (21. 10 2013). *www.fraunhofer.de.* Von Energieeffizienz in der Produktion – Untersuchung zum Handlungs- und Forschungsbedarf: http://www.fraunhofer.de/content/dam/zv/de/forschungsthemen/energie/Studie_Energieeffizienz-in-der-Produktion.pdf abgerufen
- Gabler Wirtschaftslexikon.* (22. Jänner 2014). Von <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Definition/enterprise-resource-planning-system.html?referenceKeywordName=ERP-System> abgerufen
- Google. (01. 22 2014). *Google Maps.* Von Google Maps am 22.01.2014 um 16;00 Uhr – Suchbegriff: Blum Bregenz : maps.google.at abgerufen
- Hesselbach, J. (2012). *Energie- und klimaeffiziente Produktion*. Wiesbaden: Springer.
- Kunst, R. (11. Februar 2014). *Das einfache lineare Regressionsmodell.* Von Robert M. Kunst: <http://homepage.univie.ac.at/robert.kunst/emwi2.PDF> abgerufen
- Lippe, P. v. (Februar 2011). *www.von-der-lippe.org.* Abgerufen am 2. Februar 2014 von www.von-der-lippe.org/dokumente/Wieviele.pdf

- M. Ventzislavova, C. H. (2013). *Betriebswirtschaftliche Formelsammlung: betrieblicher Leistungsprozess* (2. Auflage Ausg.). Norderstedt: Books and Demand GmbH. Abgerufen am 12. 05 2014 von http://books.google.at/books?id=dJ0VAgAAQBAJ&pg=PA99&lpg=PA99&dq=Hauptnutzungsgrad&source=bl&ots=nlx4hReRFJ&sig=IDpjJakm2V1fKqsslvGJL5-DOPs&hl=de&sa=X&ei=CHlwU6_uL4mJ7Abo4YGADA&ved=0CFYQ6AEwBw#v=onepage&q=Hauptnutzungsgrad&f=false
- OEE Help. (14. 04 2014). *OEE Help - Alles zum Thema OEE*. Von OEE Help - Alles zum Thema OEE: <http://oeehelp.npage.de/verstehen.html> abgerufen
- PC Control. (03. 03 2014). *PC Control*. Von <http://www.pc-control.net>: http://www.pc-control.net/pdf/032004/pcc_stiwa_d.pdf abgerufen
- Pehnt, M. (2010). *Energieeffizienz, Ein Lehr- und Handbuch*. Heidelberg: Springer.
- Pietschmann, J. (2013). Industrielle Pulverbeschichtung. In J. Pietschmann, *Industrielle Pulverbeschichtung - 4., überarb. u. erw. Aufl. 2013* (S. 191). Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- PLM IT Business. (03. 03 2014). *Portal für Produktentwicklung und Datenmanagement*. Von www.plm-it-business.de abgerufen
- RheinEnergie. (18. 03 2014). www.rheinenergie.com. Von http://www.rheinenergie.com/de/unternehmensportal/technik_zukunft/smart_metering/glossar/index.php abgerufen
- Schuler. (15. 03 2014). www.schulergroup.com. Von https://www.schulergroup.com/technologien/produkte/servopressen_monoblock/index.html abgerufen
- Selhausen, H. M. (1976). *Quantitative Marketing Modelle in der Kreditbank*. Berlin: Duncker & Humbolt.

Statistik Schweiz. (16. 01 2014). Von <http://www.bfs.admin.ch/bfs/portal/de/index/themen/21/02/ind32.indicator.71505.290105.html> abgerufen

Vorarlberger Energienetze. (16. 11 2013). Von <http://www.vorarlbergnetz.at:>
http://www.vorarlbergnetz.at/downloads/at/Preisblatt_Systemnutzungsentgelte_2013.pdf abgerufen

W. Irrek, S. T. (01. 07 2008). *Wuppertal Institut*. (W. Institut, Hrsg.) Abgerufen am 21. 09 2013 von Wuppertal Institut:
http://wupperinst.org/uploads/tx_wupperinst/energieeffizienz_definition.pdf

Weck, B. (2005). *Werkzeugmaschinen 1 - Maschinenarten und Anwendungsbereiche*. Aachen: Springer.

Wikimedia Foundation Inc. (28. 12 2013). www.wikipedia.at. Von Wikipedia/Versorgungstechnik:
<http://de.wikipedia.org/wiki/Versorgungstechnik> abgerufen

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematische Übersicht des Werks 4 der Julius Blum GmbH	3
Abbildung 2: Top-Down- und Bottom-Up-Ansatz bei der energetischen Analyse eines Produktionsbetriebes	5
Abbildung 3: Werk 4 der Julius Blum GmbH aus der Vogelperspektive (Google, 2014)	18
Abbildung 4: Funktionsschema einer Transferpresse mit Servoantrieb und Bandanlage (Schuler, 2014).....	20
Abbildung 5: Werkzeugeinbauraum einer Transferpresse (Weck, 2005)	21
Abbildung 6: Greiferschienen-Transfer der Großteiltransferpresse (Weck, 2005)..	21
Abbildung 7: Walzprofilieren (PLM IT Business, 2014)	22
Abbildung 8: Montageautomaten (PC Control, 2014).....	23
Abbildung 9: Anlagenlayout einer Pulverbeschichtungsanlage (Pietschmann, 2013)	24
Abbildung 10: Umsatzentwicklung vs. Energieverbrauch der Julius Blum GmbH ..	26
Abbildung 11: Verbrauchsentwicklung der Energieträger vom Werk 4.....	28
Abbildung 12: Jahres-Lastgangkurve der elektrischen Leistung vom Werk 4	31
Abbildung 13: Jahres-Lastdauerkurve der bezogenen elektrischen Leistung vom Werk 4 für das Geschäftsjahr 2012/13	32
Abbildung 14: Elektrische Lastgangkurve vom Werk 4 (08.07. - 15.07.2012)	33
Abbildung 15: Lastgangkurve des bezogenen Erdgases des Werks 4.....	35
Abbildung 16: Lastdauerkurve des bezogenen Erdgases vom Werk 4	36
Abbildung 17: Heizbedarf im Werk 4 und Jahrestemperaturverlauf	39
Abbildung 18: Heiz- und Kühlleistung im Neubau	41
Abbildung 19: Kosten für Heizen und Kühlen im Neubau.....	42
Abbildung 20: Stromverbrauch für Beleuchtung im Neubau.....	43
Abbildung 21: Inventarliste der Beleuchtung im Werk 4	44
Abbildung 22: Strombedarf der Kompressoren im Neubau	46
Abbildung 23: Wärmerückgewinnung im Werk 4.....	49
Abbildung 24: Energieflussdiagramm auf Gebäudeebene	50

Abbildung 25: Messung der elektrischen Wirkleistung der Transferpresse (P200G)	64
Abbildung 26: Messung der elektrischen Wirkleistung der Profileranlage (P145G)	67
Abbildung 27: Elektrische Leistungsmessung eines 3kW Lampenlasers im Produktionszustand	73
Abbildung 28: Elektrische Leistungsmessung eines 3kW Lampenlasers im Wartezustand	74
Abbildung 29: Elektrische Leistungsmessung eines 3kW Lampenlasers im Rüstzustand	75
Abbildung 30: Elektrische Leistungsmessung eines 3kW Lampenlasers im Ruhezustand	75
Abbildung 31: Volumenstrommessung der Druckluftleitung 1 der IL64L im BMZ1	79
Abbildung 32: Volumenstrommessung der Druckluftleitung 1 der IL64L im BMZ2	80
Abbildung 33: Volumenstrommessung der Druckluftleitung 1 der IL64L im BMZ3	81
Abbildung 34: Volumenstrommessung der Druckluftleitung 1 der IL64L im BMZ4	82
Abbildung 35: Abhängigkeit elektr. Leistung und Druckluftvolumenstrom im Betriebsmittelzustand 1 von der Anzahl der Elektromotoren bzw. Druckluftzylindern	85
Abbildung 36: Einfluss der Taktzeit auf den Wirkleistungs- bzw. Druckluftbedarf von Montageautomaten im Betriebsmittelzustand 1	86
Abbildung 37: Zusammenhang zwischen Druckluftverbrauch und -zylinderzahl von Montageautomaten im Betriebsmittelzustand 4	112
Abbildung 38: Zusammenhang zwischen Druckluftverbrauch und -zylinderzahl von Montageautomaten im Betriebsmittelzustand 1	114
Abbildung 39: Zusammenhang zwischen Druckluftverbrauch und -zylinder von Montageautomaten im Betriebsmittelzustand 2	115
Abbildung 40: Zusammenhang zwischen Druckluftverbrauch und -zylinder von Montageautomaten im Betriebsmittelzustand 3	116
Abbildung 41: Energieflussdiagramm auf Bereichsebene	128
Abbildung 42: Energieflussdiagramm des Werks 4 der Julius Blum GmbH	131

Abbildung 43: Entwicklung der Lebenszykluskosten des Lampen- und Diodenlasers
.....147

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Konfidenzniveau, Irrtumswahrscheinlichkeit [α] und Sicherheit [z]	8
Tabelle 2: Exemplarische Darstellung einer Regressionsstatistik	14
Tabelle 3: Entwicklung der Energieintensität seit dem Geschäftsjahr 2000/01	27
Tabelle 4: Lastbereiche der elektrischen Lastdauerkurve	32
Tabelle 5: Arbeitszeit-Schichtmodell vom Werk 4	34
Tabelle 6: Lastbereiche der Lastdauerkurve von Erdgas	37
Tabelle 7: Hochrechnung des Kühlbedarfes für den Altbau	43
Tabelle 8: Hochrechnung des Beleuchtungsbedarfes für den Altbau	45
Tabelle 9: Charakteristische Betriebsparameter der Kompressoren im Altbau	46
Tabelle 10: Hochrechnung der Verbrauchswerte der Kompressoren im Altbau	47
Tabelle 11: Leistungswerte der Kompressoren von Alt- und Neubau.....	47
Tabelle 12: Definition der fünf Betriebsmittelzustände	51
Tabelle 13: Verdichtungsschema der 30 allgemein gültigen Stillstandsgründe	57
Tabelle 14: Gesamtnutzungs- und Hauptnutzungsgrad – Pressen	59
Tabelle 15: Gesamtnutzungs- und Hauptnutzungsgrad – Profilieranlagen	60
Tabelle 16: Gesamtnutzungs- und Hauptnutzungsgrad – KB- Anlagen	60
Tabelle 17: Gesamtnutzungs- und Hauptnutzungsgrad – Montageautomaten	62
Tabelle 18: Messablauf bei der elektrischen Leistungsmessung von Pressen.....	65
Tabelle 19: Elektrische Leistungswerte der Servopresse P200G.....	66
Tabelle 20: Elektrische Leistungswerte der Pressen.....	66
Tabelle 21: Messablauf bei der elektrischen Leistungsmessung von Profilieranlagen	68
Tabelle 22: Elektrische Leistungswerte der Profilieranlage P145G	68
Tabelle 23: Elektrische Leistungswerte der Profilieranlagen	69
Tabelle 24: Druckluftvolumenströme der Profilieranlage P165G	70
Tabelle 25: Druckluftvolumenströme aller Profilieranlagen	71
Tabelle 26: Zuweisung der Maschinenzustände von Montageautomaten zu den Betriebsmittelzuständen	72
Tabelle 27: Elektrische Leistungswerte des Lampenlasers HL3006	76
Tabelle 28: Elektrischen Leistungswerte der IF07G	77

Tabelle 29: Elektrische Leistungswerte der LTS-CI-Montageautomaten.....	78
Tabelle 30:Elektrische Leistungswerte der LTS-S5- Montageautomaten.....	78
Tabelle 31: Ergebnisübersicht der Druckluft-Volumenstrommessung der IL64L....	82
Tabelle 32: Druckluft-Durchflussmessungen der 31 Montageautomaten	83
Tabelle 33: Unabhängige Variablen der Regression der elektrischen Leistungsmessungen bzw. der Druckluftvolumenstrommessung.....	87
Tabelle 34: elektrische Leistung von LTS-CI-Montageautomaten ohne stromintensiven Technologien im BMZ1	89
Tabelle 35: Regressionsstatistik der Wirkleistung von LTS-CI-MoA ohne stromintensiven Technologien im BMZ1	89
Tabelle 36: elektrische Leistung von LTS-CI-Montageautomaten mit stromintensiver Technologie im BMZ1	90
Tabelle 37: Regressionsstatistik der Wirkleistung von LTS-CI-MoA mit stromintensiven Technologien im BMZ1	90
Tabelle 38: elektrische Leistung von LTS-CI-Montageautomaten ohne stromintensiven Technologien im BMZ2	91
Tabelle 39: Regressionsstatistik der Wirkleistung von LTS-CI-MoA ohne stromintensiven Technologien im BMZ2	91
Tabelle 40: elektrische Leistung von LTS-CI-Montageautomaten mit stromintensiven Technologien im BMZ2	92
Tabelle 41: Regressionsstatistik der Wirkleistung von LTS-CI-MoA mit stromintensiven Technologien im BMZ2	92
Tabelle 42: elektrische Leistung von LTS-CI-Montageautomaten ohne stromintensiven Technologien im BMZ3	93
Tabelle 43: Regressionsstatistik der Wirkleistung von LTS-CI-MoA ohne stromintensiven Technologien im BMZ3	93
Tabelle 44: Regressionsstatistik der elektrischen Leistung von LTS-CI-MoA mit stromintensiven Technologien im BMZ3	94
Tabelle 45: Regressionsstatistik der Wirkleistung von LTS-CI-MoA mit stromintensiven Technologien im BMZ3	94
Tabelle 46: elektrische Leistung von LTS-CI-MoA im BMZ4 bzw. BMZ5	95

Tabelle 47: Regressionsstatistik der Wirkleistung von LTS-CI-MoA im BMZ4 bzw. BMZ5.....	95
Tabelle 48: Ergebnis der Regression der elektrischen Leistungsmessungen von LTS-CI-MoA	98
Tabelle 49: elektrische Leistung von LTS-S5-Montageautomaten ohne Technologie im Betriebsmittelzustand 1	99
Tabelle 50: Regressionsstatistik der Wirkleistung von LTS-S5- Montageautomaten ohne stromintensive Technologien im Betriebsmittelzustand 1	99
Tabelle 51: Elektrische Leistung von LTS-S5-Montageautomaten mit stromintensiven Technologien im Betriebsmittelzustand 1	100
Tabelle 52: Regressionsstatistik der Wirkleistung von LTS-S5-Montageautomaten mit stromintensiven Technologien im Betriebsmittelzustand 1	100
Tabelle 53: elektrische Leistung von LTS-S5-Montageautomaten ohne stromintensiven Technologien im Betriebsmittelzustand 2.....	101
Tabelle 54: Regressionsstatistik von LTS-S5-Montageautomaten ohne stromintensive Technologien im Betriebsmittelzustand 2.....	101
Tabelle 55: elektrische Leistung von LTS-S5-Montageautomaten mit stromintensiven Technologien im Betriebsmittelzustand 2.....	102
Tabelle 56: Regressionsstatistik von LTS-S5-Montageautomaten mit stromintensiven Technologien im Betriebsmittelzustand 2.....	102
Tabelle 57: elektrische. Leistung von LTS-S5-Montageautomaten ohne stromintensive Technologien im Betriebsmittelzustand 3.....	103
Tabelle 58: Regressionsstatistik von LTS-S5-Montageautomaten ohne stromintensive Technologien im Betriebsmittelzustand 3.....	103
Tabelle 59: elektrische Leistung von LTS-S5-Montageautomaten mit stromintensiven Technologien im Betriebsmittelzustand 3.....	104
Tabelle 60: Regressionsstatistik von LTS-S5-Montageautomaten mit stromintensiven Technologien im Betriebsmittelzustand 3.....	104
Tabelle 61: elektrische Leistung von LTS-S5- Montageautomaten mit und ohne stromintensive Technologien im Betriebsmittelzustand 4 und 5	105
Tabelle 62: Regressionsstatistik von LTS-S5-Montageautomaten mit und ohne stromintensive Technologien im Betriebsmittelzustand 4 und 5	105

Tabelle 63: Regressionsergebnis der elektrischen Leistungsmessungen von Montageautomaten mit einer LTS-S5-, LCS- oder S7-Steuerung	108
Tabelle 64: Druckluftbedarf der untersuchten Montageautomaten ohne Hardwarekonzept 2.0	110
Tabelle 65: Druckluftbedarf der untersuchten Montageautomaten mit Hardwarekonzept 2.0	111
Tabelle 66: Regressionsstatistik der Druckluftvolumenstrommessungen im BMZ4	112
Tabelle 67: Bereinigte Druckluftvolumenströme und Leckagen der 31 untersuchten Montageautomaten	113
Tabelle 68: Regressionsstatistik der Druckluftvolumenstrommessungen im BMZ1	114
Tabelle 69: Regressionsstatistik der Druckluftvolumenstrommessungen im BMZ2	115
Tabelle 70: Regressionsstatistik der Druckluftvolumenstrommessungen im BMZ2	116
Tabelle 71: Ergebnis der Regression der Druckluftvolumenstrommessungen von Montageautomaten	119
Tabelle 72: elektrische Leistung der Pulverbeschichtungslinie 6 pro Betriebsmittelzustand	120
Tabelle 73: Erdgasvolumenstrom der Pulverbeschichtungslinie 6 pro Betriebsmittelzustand	121
Tabelle 74: Energieverbrauch, Stückzahl und Energieeffizienz pro Presse	122
Tabelle 75: Gesamtenergieverbrauch der Pressen im Alt- bzw. Neubau im GJ2012/13.....	122
Tabelle 76: Energieverbrauch, Stückzahl und Energieeffizienz pro Profilieranlage	123
Tabelle 77: Gesamtenergieverbrauch der Profilieranlagen im Alt- bzw. Neubau im GJ2012/13.....	123
Tabelle 78: Energieverbrauch, Stückzahl und Energieeffizienz pro Montageautomat	126

Tabelle 79: Gesamtenergieverbrauch der Montageautomaten im Alt- bzw. Neubau im GJ2012/13.....	126
Tabelle 80: Energieverbrauch, Stückzahl und Energieeffizienz pro Pulverbeschichtungsanlage.....	127
Tabelle 81: Energiekosten und CO ₂ -Emissionen pro Presse	132
Tabelle 82: Energiekosten und CO ₂ -Emissionen der Pressen im Alt- bzw. Neubau	133
Tabelle 83: Energiekosten und CO ₂ -Emissionen pro Profilieranlagen	133
Tabelle 84: Energiekosten der Profilieranlagen im Alt- bzw. Neubau.....	133
Tabelle 85: Energiekosten und CO ₂ -Emissionen pro Montageautomat	136
Tabelle 86: Energiekosten der Montageautomaten im Alt- und Neubau	136
Tabelle 87: Energiekosten und CO ₂ -Emissionen pro Pulverbeschichtungsanlage	137
Tabelle 88: Einsparpotential durch Spitzenlastoptimierung.....	140
Tabelle 89: Einsparpotential durch Reduzierung der Druckluftleckagen bei Montageautomaten	141
Tabelle 90: Kosten für die Ausstattung der Wartungseinheit mit einem Magnetventil	142
Tabelle 91: Liste aller Montageautomaten des Werks 4 mit einer Amortisierungszeit des Umbaus der Wartungseinheiten von weniger als 3 Jahren.....	143
Tabelle 92: Druckluft- und Leckagekosten aller Montageautomaten im Werk 4, bei denen sich der Umbau der Wartungseinheiten in weniger als 3 Jahren rechnet..	144
Tabelle 93: Mittlere elektrische Wirkleistung der Lasertypen HL3006 und TD4002	144
Tabelle 94: Inbetriebnahmekosten eines Laserschweißgerätes.....	145
Tabelle 95: Lastprofil des Montageautomaten IP02G im GJ2012/13	145
Tabelle 96: Energiekosten des Montageautomaten IP02G im Geschäftsjahr 2012/13	146
Tabelle 97: Instandhaltungskosten des 3kW Lampenlasers (HL3006D)	146
Tabelle 98: Instandhaltungskosten des 4kW Diodenlasers (TD4002)	146