

Prozessanalyse und Optimierungspotentiale des Materialeinsatzes bei der Herstellung von expandiertem Polystyrol

Masterarbeit
von
Peter Michael Kügler, BSc

Technische Universität Graz

Fakultät für Maschinenbau und Wirtschaftswissenschaften

Institut für Betriebswirtschaftslehre und Betriebssoziologie

O.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Ulrich Bauer

Graz, im Februar 2019

In Kooperation mit:

Hirsch Servo AG



EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am

.....

(Unterschrift)

STATUTORY DECLARATION

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

.....

date

.....

(signature)

Kurzfassung

Die Hirsch Servo AG ist ein Verarbeiter von expandiertem Polystyrol (EPS) sowie expandiertem Polypropylen (EPP) mit Hauptsitz in Glanegg, Kärnten und besitzt drei Unternehmenssparten. Die Hirsch Porozell GmbH produziert Formteile und Dämmstoffe aus EPS und EPP. Hirsch-Maschinenbau fertigt und verkauft die dazu benötigten Produktionsmaschinen. Im Unternehmensbereich Thermozell wird aus EPS-Recyclingmaterial Wärmedämm-Leichtbeton hergestellt. Betrachtungsbereich der Masterarbeit ist fast ausschließlich die Hirsch Porozell GmbH, wo es hinsichtlich Nachvollziehbarkeit, Transparenz und Kontrolle der Herstellungsprozesse Verbesserungsbedarf gibt. In diesem Zusammenhang sind die zentralen Themen der Masterarbeit Prozessanalyse und Erfassung des Rohstoffverbrauchs bei der Herstellung von Formteilen sowie Dämmstoffen. Dabei fehlt es derzeit im Unternehmen an der gewünschten Genauigkeit, was sich negativ auf die Materialkostensituation auswirkt.

Hauptziel ist ein Konzept zur verbesserten Ermittlung des Rohstoffverbrauchs. Ist dieser ausreichend genau bekannt, so kann er vom Unternehmen in optimierten und exakteren Stücklisten umgesetzt werden. Dieses Konzept soll dem Unternehmen Verbesserungen im Bereich der Materialkosten ermöglichen. Um die erforderliche Genauigkeit zu erreichen, muss eine Vielzahl von Informationen aus den Fertigungsprozessen, sowie über Ausschüsse und den Rezyklatkreislauf gesammelt werden.

Als Basis dafür werden zunächst die entsprechenden theoretischen Grundlagen der zu untersuchenden Themenbereiche erörtert. Danach werden mittels mehrerer Messreihen und Untersuchungen Daten über die Herstellungsprozesse gesammelt. Betroffen sind verschiedene Teilbereiche, vor allem gelieferte Rohstoffe und daraus entstehende Halbfertig- und Fertigprodukte. Diese werden insbesondere in Bezug auf Feuchtegehalt und Gewicht analysiert. Anschließend werden Nachforschungen zu Ausschuss und Recyclingkreislauf in der Fertigung selbst und in weiteren damit verbundenen Bereichen angestellt. Die erhobenen Daten und Informationen werden vor allem im Hinblick auf den Rohstoffverbrauch diskutiert.

Wesentliche Ergebnisse der Messreihen sind erhebliche Schwankungen in den Gewichten und Feuchtigkeitsgehalten von Rohstoff, Halbfertig- und Fertigprodukten. Es finden sich folglich eher Richtwerte anstatt exakter Ergebnisse. Zentrales Ergebnis bei Ausschuss und Rezyklatkreislauf ist die Notwendigkeit verbesserter Dokumentationssysteme und einer konsequenteren Aufzeichnung. Im Anschluss wird ein aus mehreren Teilen und Vorschlägen bestehendes Konzept zur Verbesserung von Erfassung, Ermittlung und Dokumentation des Materialverbrauchs erstellt. Optimierungsansätze bei Verbrauchsbestimmung und Datenerfassung werden vorgestellt. Dazu gehören insbesondere umfangreiche Kontrollen und Messungen. Zusätzlich werden konkrete Verbesserungsmöglichkeiten des bestehenden Dokumentationssystems präsentiert, unter anderem ein Formular zur genaueren Erfassung des Ausschusses. Außerdem werden weitere Vorschläge unterbreitet, die allesamt zur angestrebten, genaueren Kenntnis des Materialverbrauchs führen sollen.

Abstract

Hirsch Servo AG with headquarters in Glanegg, Carinthia, processes expanded polystyrene as well as expanded polypropylene. The company has three main branches. Preformed parts and insulants are the main products of Hirsch Porozell GmbH, while the necessary machines for these production processes are manufactured by Hirsch Maschinenbau. Additionally, the Thermozell division uses recycling material in its lightweight concrete for insulation purposes. The focus of this thesis lies on Hirsch Porozell, where the need for better transparency and control of the production processes is apparent. Process analysis and caption of raw material consumption for the Porozell-products are the main topics of this master's thesis. The current accuracy in this area is not satisfactory, which affects the company's material costs in a negative way.

The principal target is a concept for an improved, exact determination of the raw material consumption. More accurate data in this field can be used by the company in order to achieve an optimization of the current bills of materials. This concept should lead to significant improvements in the area of material costs. A substantial amount of information concerning the manufacturing processes, as well as scrap and existing recycling loops, must be obtained to reach the desired level of accuracy.

First, the necessary theoretical background for the various areas of investigation is presented. Afterwards, multiple series of measurements and investigations are conducted in order to gather data about the production processes. Supplied raw material, finished and semi-finished goods are the main fields that need to be examined, especially concerning moisture and weight of the mentioned objects. Subsequently, investigations about scrap and recycling loops take place directly at the shop floor, as well as in connected areas. Then, the results of these investigations are discussed, mainly in connection to material consumption.

Essential results are the significant fluctuations in the weight and moisture of raw material, finished and semi-finished goods. Therefore, several benchmark values can be identified instead of exact results. The main outcome in connection to scrap and recycling loop is the need for improved documentation systems and record keeping. Based on the gathered knowledge, the creation of a concept for improving capture and documentation of material consumption follows. This concept consists of different parts and suggestions. Possible methods of determining material consumption and obtaining the necessary data are introduced. Extensive series of measurement and close monitoring play an essential role to achieve improvements in this area. Some suggestions for enhancing the existing system of documentation are also presented, including a printed form for the accurate capture of scrap. Additionally, further proposals are made, which should all lead to a more exact knowledge of material consumption.

Vorwort

An dieser Stelle möchte ich einige Personen nennen, die mir bei der Erstellung dieser Masterarbeit behilflich waren. Die Zusammenarbeit mit meinem Betreuer, Dipl.-Ing. Dr. Volker Koch, und seine kompetente und freundliche Betreuung waren für das Zustandekommen dieser Masterarbeit unersetzlich. Mag. Aljosa Krizman eröffnete mir die einmalige Möglichkeit, meine Abschlussarbeit in der Hirsch Servo AG zu verfassen. Dipl.-Ing. Dr. Klaus Unterleitner war an der Konzeption und Durchführung beinahe aller durchgeführten Untersuchungen beteiligt. Außerdem durfte ich mit ihm unzählige Gespräche und Diskussionen über Datenerhebung, Informationssammlung und Interpretation der Ergebnisse führen. Bianca Sereinig half mir bei vielen inhaltlichen Themen mit ihrer Kompetenz, technischen Informationen und Ratschlägen zur Umsetzung. Mit Alexander Luschnig konnte ich einige gemeinsame Nachforschungen und Messungen im Bereich der Rohstoffe anstellen, die für die Ergebnisse dieser Masterarbeit sehr wertvoll waren. Das umfangreiche Wissen von Richard Paulini, vor allem über den Unternehmensbereich Thermozell, war ebenso eine große Bereicherung. Allen genannten Personen und natürlich den vielen weiteren Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Hirsch Servo AG, die mir während der letzten Monate behilflich waren, gilt mein herzlichster Dank.

Außerdem möchte ich noch meinen Eltern Elke und Johann Kügler, sowie meinem Bruder Paul Kügler, meinen Dank aussprechen. Sie waren mir während der gesamten Studienzzeit stets ein wichtiger Rückhalt.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Ausgangssituation	1
1.2	Ziele	2
1.2.1	Hauptziel – Konzept zur verbesserten Verbrauchsermittlung	2
1.2.2	Teilziel 1 – Messtechnisch erfasste Fertigungsdaten	3
1.2.3	Teilziel 2 – Nachverfolgung des Ausschusses	3
1.3	Aufgabenstellung	3
1.3.1	Aufgaben zu Teilziel 2	4
1.3.2	Aufgaben zu Teilziel 1	4
1.3.3	Aufgaben zum Hauptziel	5
1.4	Untersuchungsbereich	5
1.5	Vorgehensweise	6
2	Theoretische Grundlagen der Masterarbeit	7
2.1	Expandiertes Polystyrol	7
2.1.1	Styrol	7
2.1.2	Polystyrol	8
2.1.3	Expandiertes Polystyrol (EPS)	9
2.2	Pentan	13
2.2.1	Grundlegendes	13
2.2.2	Eigenschaften	14
2.3	Trocknung und Feuchtemessung	15
2.3.1	Trocknung	15
2.3.2	Arten der Feuchte	15
2.3.3	Thermogravimetrische Analyse	16
2.3.4	Feuchtemessung in der Masterarbeit	17
2.4	Recycling	18
2.4.1	Begrifflichkeit	18
2.4.2	Technische Möglichkeiten	18
2.4.3	Recycling in Deutschland	20
2.4.4	EPS-Recycling	20
2.5	Materialfluss	22
2.5.1	Grundlegende Definitionen	22

2.5.2	Materialflussmodell	23
2.6	Stoff- und Energiebilanzierung	25
2.6.1	Grundlegendes.....	25
2.6.2	Bilanzierung in der Masterarbeit	26
2.7	Materialmanagement, Stücklisten, Bedarfsermittlung	27
2.7.1	Aufgaben des Materialmanagements	27
2.7.2	Stücklisten.....	27
2.7.3	Bedarfsarten	29
2.7.4	Deterministisches und stochastisches Materialmanagement.....	29
2.7.5	Stücklistenauflösung	30
2.7.6	Einordnung in die Masterarbeit.....	30
2.8	Kostenrechnung	31
2.8.1	Definition	31
2.8.2	Ziele	31
2.8.3	Aufgaben.....	31
2.9	Datenanalyse und Statistik	33
2.9.1	Ablauf statistischer Untersuchungen	33
2.9.2	Technische Anwendung	34
2.9.3	Grafiken und Maßzahlen	34
2.9.4	Arithmetisches Mittel	35
2.9.5	Spannweite	35
2.9.6	Verwendung in der Masterarbeit	35
3	Praktische Problemlösung.....	36
3.1	Fertigungsprozesse und Materialfluss	36
3.1.1	Prozessbeschreibung Block/Platte	37
3.1.2	Prozessbeschreibung Formteile	43
3.1.3	Verwertung von Ausschüssen bei Thermozell	46
3.2	Untersuchung des Rohstoffs	47
3.2.1	Zweck der Untersuchung	48
3.2.2	Durchführung	48
3.2.3	Ergebnisse und Diskussion	50
3.2.4	Schlussfolgerungen.....	59
3.3	Untersuchung von fertigen Formteilen.....	61

3.3.1	Zweck der Untersuchung	61
3.3.2	Durchführung	62
3.3.3	Ergebnisse und Diskussion	63
3.3.4	Schlussfolgerungen.....	66
3.4	Untersuchung von Dämmplatten und Blöcken.....	68
3.4.1	Zweck der Untersuchung	68
3.4.2	Durchführung	69
3.4.3	Ergebnisse und Diskussion	70
3.4.4	Schlussfolgerungen.....	76
3.5	Untersuchung von Ausschuss und Rezyklatkreislauf.....	78
3.5.1	Zweck der Untersuchung	78
3.5.2	Durchführung	79
3.5.3	Ergebnisse und Diskussion	79
3.5.4	Schlussfolgerungen.....	82
3.6	Verbesserungskonzept.....	84
3.6.1	Verbrauchsermittlung mittels Stücklisten.....	84
3.6.2	Trockene Bilanzierung.....	85
3.6.3	Regelmäßige Messungen und Untersuchungen.....	86
3.6.4	Verbesserte Aufzeichnung und Dokumentation von Ausschüssen	88
3.6.5	Optimierung des betriebsinternen Recyclings.....	90
3.6.6	Allgemeine Verbesserung der Dokumentation.....	91
3.6.7	Verbesserungsmöglichkeiten im Arbeitsablauf	92
4	Zusammenfassung und Ausblick.....	94
4.1	Zusammenfassung.....	94
4.2	Ausblick.....	97
Literaturverzeichnis		98
Abbildungsverzeichnis		102
Tabellenverzeichnis		103
Formelverzeichnis.....		104
Abkürzungsverzeichnis		105

1 Einleitung

Dieses Kapitel soll dazu dienen, zum Thema der Masterarbeit hinzuführen, sowie Unternehmen und Umfeld kurz vorzustellen. Im Folgenden werden Ausgangssituation, Ziele, Aufgabenstellung, Untersuchungsbereich und Vorgehensweise beschrieben.

1.1 Ausgangssituation

Die Hirsch Servo AG ist ein Verarbeiter von expandiertem Polystyrol (EPS) und expandiertem Polypropylen (EPP). Das Unternehmen wurde 1972 in Landskron, Kärnten, gegründet und gewann im Laufe der Jahrzehnte deutlich an Größe. Heute gehören 20 Standorte in Österreich, Deutschland, Polen, der Slowakei, Rumänien, Ungarn und der Ukraine zur Hirsch Gruppe (siehe Abbildung 1). Zusätzlich gibt es Servicebüros in Asien und Amerika sowie Handelsvertreter in weiteren Ländern. Hauptwerk und Konzernzentrale befinden sich seit 1976 in Glanegg, Kärnten. In mehreren Produktionshallen werden dort die drei wesentlichen Produktarten des Unternehmens hergestellt. Im Bereich Porozell, mit welchem sich diese Masterarbeit hauptsächlich beschäftigt, werden Dämmstoffe, Formteile und Verpackungen gefertigt. In der Sparte Thermozell wird gemahlenes EPS wiederverwertet, um daraus mit weiteren Zusatzstoffen Wärmedämm-Leichtbeton zu gewinnen. Schließlich stellt das Unternehmen seit 1985 im Rahmen von Hirsch-Maschinenbau Produktionsmaschinen für EPS und EPP selbst her und verkauft diese weltweit.¹



Abbildung 1: Standorte der Hirsch Gruppe²

¹ Vgl. <https://www.hirsch-gruppe.com/de/uber-uns/unternehmensprofil2.html> (06.11.2018)

² Vgl. <https://www.hirsch-gruppe.com/de/uber-uns/unternehmensprofil2.html> (06.11.2018)

Im Bereich Porozell sehen die Verantwortlichen Verbesserungsbedarf. Dies betrifft hauptsächlich die Nachvollziehbarkeit, Transparenz, Standardisierung, Dokumentation und Kontrolle der Herstellungsprozesse, angefangen vom Rohstoffeinkauf bis hin zu Verpackung und Auslieferung der fertigen Produkte. Viele dieser Prozesse verlaufen derzeit noch nach althergebrachten Schemen und sollen nun modernisiert und neu aufgestellt werden. Die Notwendigkeit von Optimierungen ist in vielen Teilbereichen gegeben. Zentrale Probleme in diesem Zusammenhang sind Erfassung und Nachvollziehbarkeit des Rohstoffverbrauchs bei der Herstellung von Porozell-Produkten. Derzeit ist nicht ausreichend genau feststellbar, wie viel Rohstoff in den einzelnen Herstellungsschritten für Produkte der Unternehmenssparte Porozell verbraucht wird. Die Kosten der Porozell-Produkte werden hauptsächlich von den Materialkosten und damit in erster Linie vom verarbeiteten Rohstoff bestimmt. Als Folge der teilweise fehlenden Kenntnisse über den Materialverbrauch ist ein großer Einflussfaktor auf die Kosten im Unternehmen nur unzureichend bestimmt.

1.2 Ziele

Aus dem Anspruch Nachvollziehbarkeit und Transparenz der Herstellungsprozesse zu verbessern, kann ein Hauptziel definiert werden. Aus diesem Hauptziel werden zwei Teilziele abgeleitet. Damit ergibt sich die nachfolgende Zielstruktur.

1.2.1 Hauptziel – Konzept zur verbesserten Verbrauchsermittlung

Das Ziel ist die Schaffung eines neuen Konzepts zur möglichst exakten Ermittlung des Rohstoffverbrauchs der Produkte des Unternehmensbereichs Porozell. Der ermittelte Rohstoffverbrauch kann dann in Stücklisten umgesetzt werden, welche die realen Verhältnisse möglichst genau widerspiegeln. Durch neue Stücklisten kann in Zukunft Transparenz im Herstellungsprozess geschaffen werden, indem diese Soll-Verbräuche abbilden. Sie können im Anschluss mit den tatsächlich auftretenden Ist-Verbräuchen verglichen werden. Damit lassen sich Abweichungen feststellen, um deren Ursachen auf den Grund zu gehen. Die Stücklisten geben neben anderen, eher nebensächlichen Angaben lediglich den Rohstoffverbrauch an, da Porozell-Produkte im Wesentlichen nur aus dem Grundstoff EPS bestehen. Sowohl die Erzeugnisse als auch deren Stücklisten sind folglich sehr einfach aufgebaut. Das derzeit im Unternehmen verwendete, äußere Format der Stücklisten kann unverändert beibehalten werden, da es gut in das verwendete ERP-System proALPHA eingebettet ist.³

Somit wird in der Masterarbeit die Erstellung eines Konzepts zur verbesserten Verbrauchsermittlung für Porozell-Produkte angestrebt. Damit ist eine Reihe von in Zukunft umzusetzenden Verbesserungsmaßnahmen verbunden. Das Optimierungskonzept wird daher diverse Vorschläge und Teilkonzepte enthalten, die allesamt zu einer genaueren Kenntnis des Rohstoffverbrauchs beitragen können.

³ Vgl. <https://www.proalpha.com/at/> (07.11.2018)

Da die Materialkosten eine beherrschende Stellung im Unternehmen einnehmen, haben sämtliche Verbesserungen in diesem Bereich unmittelbar positiven Einfluss auf die Kostensituation von Hirsch Porozell. Folglich stellen sämtliche Optimierungsansätze Wege zur Kostenoptimierung dar. Die operative Umsetzung des Konzepts, sowie die Überarbeitung der Stücklisten auf Basis eines genauer bekannten Rohstoffverbrauchs sind nicht mehr Teil dieser Masterarbeit. Es bleibt auch dem Unternehmen überlassen, ob alle Teile oder nur einzelne Bereiche dieses Konzepts tatsächlich angewendet werden.

1.2.2 Teilziel 1 – Messtechnisch erfasste Fertigungsdaten

Grundlegende Voraussetzung für das Erreichen des Hauptziels, also einer genaueren Kenntnis des Materialverbrauchs, sind messtechnisch erfasste Daten aus der Fertigung. Diese sind für das Verständnis der Fertigungsprozesse essentiell. Hier sind in erster Linie Feuchtigkeitsgehalte, Gewichtsverluste und Ist-Gewichte von angelieferten Rohstoffen, Halbfertigprodukten und Fertigprodukten von Interesse. Um aus den Daten entsprechende Erkenntnisse und Schlussfolgerungen zu gewinnen, müssen sie in Form von übersichtlichen Tabellen und daraus abgeleiteten Grafiken vorliegen.

1.2.3 Teilziel 2 – Nachverfolgung des Ausschusses

Weitere wichtige Gesichtspunkte sind die Nachverfolgung des Ausschusses und die Feststellung von dessen Verwertung. Teilweise fließt der Ausschuss im Produktionsprozess zurück und wird erneut verarbeitet. Der restliche Anteil geht direkt in den Bereich Thermozell zur dortigen Verarbeitung.⁴ Hier ist es einerseits wichtig zu wissen, wie die Materialströme bzw. der Rezyklatkreislauf tatsächlich verlaufen. Andererseits muss auch die Art und Weise von Aufzeichnung, Dokumentation und Buchung der Ausschüsse bekannt sein. Dabei ist nur der Bereich Porozell von näherem Interesse. Die Vorgänge zur Verwertung bei Thermozell werden lediglich fallweise betrachtet, wenn sie für das Verständnis des Recyclings im Gesamtunternehmen eine Rolle spielen.

1.3 Aufgabenstellung

Das Verbrauchsermittlungskonzept ist das Ergebnis einer umfassenden Analyse und nötigenfalls Verbesserung der bestehenden Fertigungsprozesse. Zunächst ist es daher nötig, den Ist-Stand der tatsächlichen Vorgänge und Abläufe in der Fertigung zu ermitteln. Dabei müssen fehlende Informationen zu den Herstellungsschritten erhoben werden, z.B. über Liefermengenabweichungen der Lieferanten, tatsächliche Feuchtigkeitsgehalte von Rohstoffen und Fertigprodukten oder Gewichtsabweichungen der Produkte.

⁴ Vgl. <https://www.hirsch-gruppe.com/de/thermozell/eps-ausgleichsdaemmung.html> (11.12.2018)

Außerdem muss Klarheit darüber herrschen, wie die Fertigung in Glanegg derzeit abläuft und wo sich die wesentlichen Optimierungspotentiale befinden. Der Großteil der Aufgaben besteht daher aus Untersuchungen und Analysen der Herstellung und damit zusammenhängender Prozesse. Auf Basis der so gewonnenen Informationen können danach das erwähnte Konzept und die damit verbundenen Vorschläge und Ansätze zur Verbesserung erstellt werden. Im Sinne eines umfassenden Verbesserungskonzepts werden auch Vorschläge erarbeitet, die nicht direkt in die Verbrauchsermittlung einfließen, aber dennoch zur Optimierung auf den betreffenden Gebieten beitragen.

1.3.1 Aufgaben zu Teilziel 2

Für Teilziel 2 (siehe Kapitel 1.2.3) müssen folgende Aufgaben erfüllt werden:

- Untersuchung von derzeit verwendeten Aufzeichnungen und Dokumenten zum Thema Ausschuss und Rezyklatkreislauf, insbesondere Protokolle und Ausschusslisten.
- Analyse von derzeit getätigten Buchungen zu diesem Bereich.
- Nachforschung vor Ort, ob Aufzeichnung, Dokumentation und Buchung von Ausschüssen tatsächlich der Realität entsprechen.
- Qualitative Interviews mit den beteiligten Mitarbeitern und Mitarbeiterinnen.

1.3.2 Aufgaben zu Teilziel 1

Aus Teilziel 1 (siehe Kapitel 1.2.2) ergeben sich folgende Aufgaben:

- Untersuchung von derzeit verwendeten Aufzeichnungen und Dokumenten zum Thema gemessene Fertigungsdaten, in erster Linie Schichtprotokolle.
- Durchführung mehrerer Messreihen, in denen die Feuchtigkeitsgehalte von Rohstoff, Halbfertigprodukten und Fertigprodukten ermittelt werden. Diese Messreihen basieren hauptsächlich auf der Entnahme von Stichproben, die gewogen und getrocknet werden.
- Durchführung von Messreihen zur Feststellung der Ist-Gewichte. Meist werden diese Stichproben zusammen mit den Feuchtigkeitsproben gesammelt.
- Einarbeiten von Ergebnissen, die nach Vorbild der Untersuchungen in dieser Masterarbeit an anderen Standorten der Hirsch Servo AG erhoben wurden.
- Darstellung, Analyse und Diskussion der Messergebnisse.
- Häufig ergibt sich im Laufe dieser Erhebungen weiterer Nachforschungsbedarf, um weitere zugehörige Daten und Informationen zu sammeln.
- Qualitative Interviews mit den beteiligten Mitarbeitern und Mitarbeiterinnen.

1.3.3 Aufgaben zum Hauptziel

Neben der Erledigung der Aufgaben für die Teilziele müssen zur Erreichung des Hauptziels (siehe Kapitel 1.2.1) noch folgende Aufgaben erfüllt werden:

- Analyse von Materialströmen in der Fertigung.
- Aus den Ergebnissen der oben genannten Messreihen, Untersuchungen und Analysen ergibt sich ein umfassendes Bild der realen Verhältnisse.
- Erörterung, wo die real ablaufenden Ist-Prozesse verbessert werden könnten.
- Anfertigen eines Konzepts sowie weiteren Vorschlägen zur genaueren Ermittlung des Rohstoffverbrauchs für die Produktarten des Unternehmensbereichs Porozell.
- Qualitative Interviews mit den beteiligten Mitarbeitern und Mitarbeiterinnen.

1.4 Untersuchungsbereich

Untersuchungsbereich ist in erster Linie das Hauptwerk in Kärnten, mit den dortigen Fertigungsprozessen, Betriebsabläufen, Dokumenten etc. In Glanegg werden vor allem folgende Teilbereiche betrachtet:

- Die Fertigungshallen des Unternehmensbereichs Porozell.
- Mit den Fertigungsprozessen verbundene Dokumente und Daten wie z.B.:
 - Arbeitsanweisungen
 - Prozessbeschreibungen
 - Stücklisten
- Alle weiteren Bereiche im Rahmen der Sparte Porozell, die nicht direkt zur Fertigung gehören, also vor allem Buchung, Einkauf, Vergabe von Produktionsaufträgen, ERP-System etc.
- Der Bereich Thermozell ist nur insofern ein Teil dieser Untersuchung, als dass er eine wesentliche Rolle für den Kreislauf des Rezyklats und die Verwertung von Ausschüssen einnimmt.
- Die Unternehmenssparte Hirsch-Maschinenbau ist nicht Teil dieser Untersuchung.

Wie in Kapitel 1.3.2 erwähnt, werden vereinzelt Informationen von anderen Standorten eingeholt, was aber lediglich einen sehr kleinen Teil der verwendeten Daten ausmacht. Ein Ziel des Unternehmens wäre es letztlich, Verbesserungen zunächst in Glanegg und dann auch an anderen Standorten einzuführen. Dies ist jedoch nicht mehr Teil dieser Masterarbeit.

1.5 Vorgehensweise

In dieser Masterarbeit wird nach folgendem Ablauf vorgegangen. Zunächst werden die theoretischen Grundlagen für alle praktisch behandelten Themen angeführt. Dabei handelt es sich um mehrere unterschiedliche Themenbereiche, die allesamt wichtig für die praktischen Untersuchungen und Problemlösungen sind. Danach werden im praktischen Abschnitt die angestellten Untersuchungen beschrieben, deren Ergebnisse analysiert und diskutiert, sowie entsprechende Schlussfolgerungen gezogen. Es wird dabei auch besprochen, welchen Einfluss die Untersuchungsergebnisse auf die anfallenden Materialkosten haben. Den Abschluss des Praxisteils bildet die Vorstellung des Konzepts zur genaueren Verbrauchsermittlung, sowie der damit verbundenen Verbesserungsvorschläge. Alle Teilkonzepte und Vorschläge dienen dazu, den Rohstoffverbrauch des Unternehmens besser zu kennen und zu optimieren. Sie sollen also die Kostentransparenz im Materialbereich erhöhen und finanzielle Einsparungen ermöglichen. Im letzten Kapitel der Masterarbeit wird schließlich ein Fazit über die durchgeführten Untersuchungen und die dabei gefundenen Verbesserungsmöglichkeiten gezogen. Dabei wird auch ein Ausblick darauf gegeben, wie eine Umsetzung von Verbesserungen im Zusammenhang mit dem Rohstoffverbrauch in Zukunft gelingen könnte und welche positiven Effekte auf die im Unternehmen anfallenden Kosten erhofft werden.

2 Theoretische Grundlagen der Masterarbeit

In diesem Kapitel werden die theoretischen Grundlagen und Hintergründe für den darauf folgenden Abschnitt der praktischen Problemlösung erläutert. Die Fragestellungen und Untersuchungen im Praxisteil betreffen unterschiedliche Themenbereiche. Daher deckt die dazu verwendete Theorie ein breites Spektrum an Fachgebieten ab:

- Expandiertes Polystyrol (EPS), dessen Herstellung und Verwendung
- Pentan, welches als Treibmittel bei der Herstellung von EPS verwendet wird
- Trocknung und Feuchtemessung
- Recycling von Kunststoffen im Allgemeinen und EPS im Speziellen
- Materialfluss und dessen Modellierung
- Bilanzierung von Stoffen und Energie
- Materialmanagement, Materialbedarf und Stücklisten
- Kostenrechnung
- Datenanalyse und Statistik

2.1 Expandiertes Polystyrol

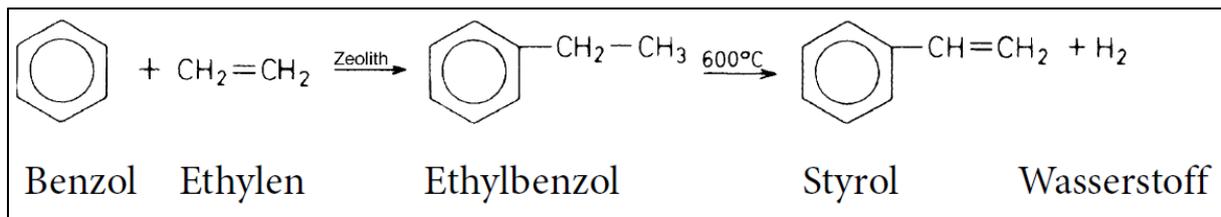
In Glanegg werden ausschließlich Produkte aus expandiertem Polystyrol (EPS) gefertigt, Expandiertes Polypropylen spielt auf diesem Standort und damit in der vorliegenden Masterarbeit keine nennenswerte Rolle. Für das Verständnis der Inhalte des praktischen Kapitels 3 sind einige theoretische Hintergründe des Kunststoffes EPS von Bedeutung. Diese werden im nun folgenden Abschnitt erläutert. Zunächst wird die Zusammensetzung und Erfindung von Polystyrol bzw. Styrol erklärt. Danach wird auf die industrielle Herstellung von EPS eingegangen. Zuletzt werden der Kunststoffmarkt mit Fokus auf EPS, sowie dessen wichtigste Anwendungsbereiche und Konkurrenzprodukte beschrieben.

2.1.1 Styrol

Bei Styrol handelt es sich um einen ungesättigten Kohlenwasserstoff in Form einer brennbaren, farblosen Flüssigkeit.⁵ Das Material wurde 1839 vom Apotheker Simon aus Berlin erstmals gewonnen. Er konnte beobachten, wie sich flüssiges Storax zu einer zähen Masse verfestigte. Heute wird Styrol, wie in Abbildung 2 dargestellt, aus den Grundstoffen Benzol und Ethylen hergestellt, welche wiederum aus Erdöl gewonnen werden. Sie werden in Gegenwart von Zeolithen aneinandergelagert. Es entsteht Ethylbenzol, das im Anschluss zu Styrol pyretisiert wird.⁶

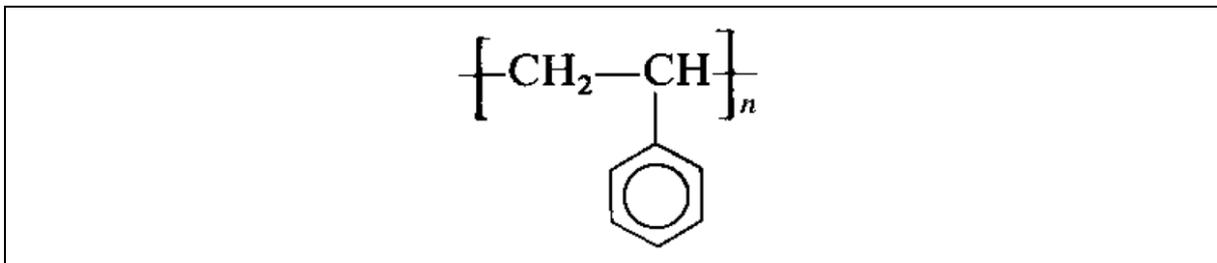
⁵ Vgl. <https://www.spektrum.de/lexikon/chemie/styrol/8811> (15.11.2018)

⁶ Vgl. Schade, 2012, S. 370

Abbildung 2: Gewinnung von Styrol⁷

2.1.2 Polystyrol

Polystyrol, kurz PS, (auch: Polyvinylbenzol) ist ein thermoplastischer Kunststoff, welcher durch Polymerisation des Ausgangsstoffs Styrol hergestellt wird. Heute gibt es dazu mehrere Verfahren, z.B. das Turmverfahren, Suspensionsverfahren oder die Lösungspolymerisation. Seine Struktureinheit ist in Abbildung 3 dargestellt. PS findet insbesondere in der Elektro- und Fahrzeugindustrie Verwendung, sowie bei Möbeln, im Verpackungs- und Fotobereich. Gebrauchsgegenstände, Spielzeug und Teile von Apparaten werden durch Spritzguss bzw. Formpressen aus Polystyrol hergestellt. In der Elektrotechnik wird es für Umhüllungen von Kabeln und als Isolationsmaterial eingesetzt. In der Landwirtschaft dient PS als Bodenverbesserer, während es auch zu Belägen von Sportplätzen verarbeitet wird. Außerdem können Harze daraus gewonnen werden. Mittels Extrusion von Polystyrol werden unter anderem Bürsten, Matten und Teile von Kühlschränken hergestellt. Der Kunststoff Polystyrol ist somit in verschiedenen Formen sehr vielseitig einsetzbar. Von zentralem Interesse im Rahmen dieser Masterarbeit ist das geschäumte Polystyrol EPS, worauf in Kapitel 2.1.3 noch näher eingegangen wird.⁸

Abbildung 3: Struktureinheit von Polystyrol⁹

Nach der Entdeckung von Styrol durch Simon (siehe Kapitel 2.1.1) wurde vor allem am Ende des 19. und zu Beginn des 20. Jahrhunderts an der technischen Herstellung von Polystyrol geforscht. Einen Meilenstein stellt der Start der kontinuierlichen Polymerisation von Styrol durch die IG Farben 1930 dar. Nach dem Ende des 2. Weltkriegs herrschte ein Überschuss an Benzol, sodass es zur Entwicklung von neuen Formmassen auf Styrol-Basis kam. Damit startete dessen Entwicklung zum viertwichtigsten Standardkunststoff, nach Polyethylen, Polyvinylchlorid (PVC) und Polypropylen. Zu Beginn der Fünfziger begann schließlich die industrielle Herstellung von Schaumstoffen aus PS.¹⁰

⁷ Schade, 2012, S. 370

⁸ Vgl. <https://www.spektrum.de/lexikon/chemie/polystyrol/7357> (09.11.2018)

⁹ Cherdron, 2006, S. 29

¹⁰ Vgl. Schade, 2012, S. 370 f.

Normales Polystyrol wird üblicherweise als Granulat geliefert. Dabei ist es von Natur aus hell und transparent, manchmal jedoch auch transparent eingefärbt oder opak. Für Spritzgusszwecke kann es mit einem Gleitmittel versehen bzw. auch glasklar ausgeliefert werden. Außerdem werden Halbzeuge angeboten, in gereckter und ungereckter Form, sowie als Tafeln. Der Rohstoff für geschäumtes PS, welches in dieser Masterarbeit von zentralem Interesse ist, kommt in Form von Perlen unterschiedlicher Korngrößen auf den Markt.¹¹

2.1.3 Expandiertes Polystyrol (EPS)

Polystyrol ist als expandiertes Polystyrol (EPS) grundlegender Werkstoff und zentrales Betrachtungsgebiet dieser Masterarbeit. Daher werden nun Erfindung, industrielle Entwicklung, Herstellungsverfahren und Marktsituation erläutert.

2.1.3.1 Erfindung

Entdeckt wurde EPS von Dr. Fritz Stastny bei der Badischen Anilin- & Soda-Fabrik (BASF). Dieser meldete das „Verfahren zur Herstellung poröser Formkörper aus thermoplastischen Kunststoffen“ 1951 zum Patent an.^{12, 13} 1949 führte der Chemiker Experimente mit Polystyrol-Perlen durch, die er mit Treibmitteln versetzte und unter Verwendung von heißem Wasserdampf aufschäumte. Auf der Suche nach einem Material zur Isolation von Telefonkabeln vergaß er eine seiner Proben in einer Schuhcremedose im Trockenschrank. Nach 36 Stunden hatte sich das Material in einen Schaumstrang verwandelt. Drei Jahre später, also 1952, wurde das expandierbare Polystyrol schließlich von BASF unter dem Namen „Styropor“ der Öffentlichkeit vorgestellt.¹⁴

2.1.3.2 Herstellungsverfahren

Perlen bzw. Granulat für expandierbares Polystyrol, also die Rohstoffe von Produkten aus EPS, lassen sich auf mehrere Arten gewinnen. Wesentlich ist, dass stets ein Treibmittel zur Expansion eingebracht werden muss. Dies kann erstens erfolgen, indem es bei der Suspensionspolymerisation von Styrol hinzugefügt wird. Eine weitere Möglichkeit stellt nachträgliches Imprägnieren dar. Bei diesem Verfahren wird das Treibmittel oberhalb der Glasatemperatur von PS-Perlen bzw. –Granulaten eingebracht, welche bereits zuvor suspendiert wurden. Schließlich lassen sich noch Granulate, die keine kugelige Form besitzen, durch Vermischen von PS und Treibmittel in einem Extruder gewinnen. Dabei muss der Stoff nach dem Extruder möglichst schnell abgekühlt werden, um ein ungewolltes Aufschäumen zu verhindern.¹⁵

¹¹ Vgl. Schade, 2012, S. 373

¹² Vgl. Deutsches Patentamt Patentnr. DE941389, 1951

¹³ Vgl. Deutsches Patentamt Patentnr. DE946085, 1951

¹⁴ Vgl.

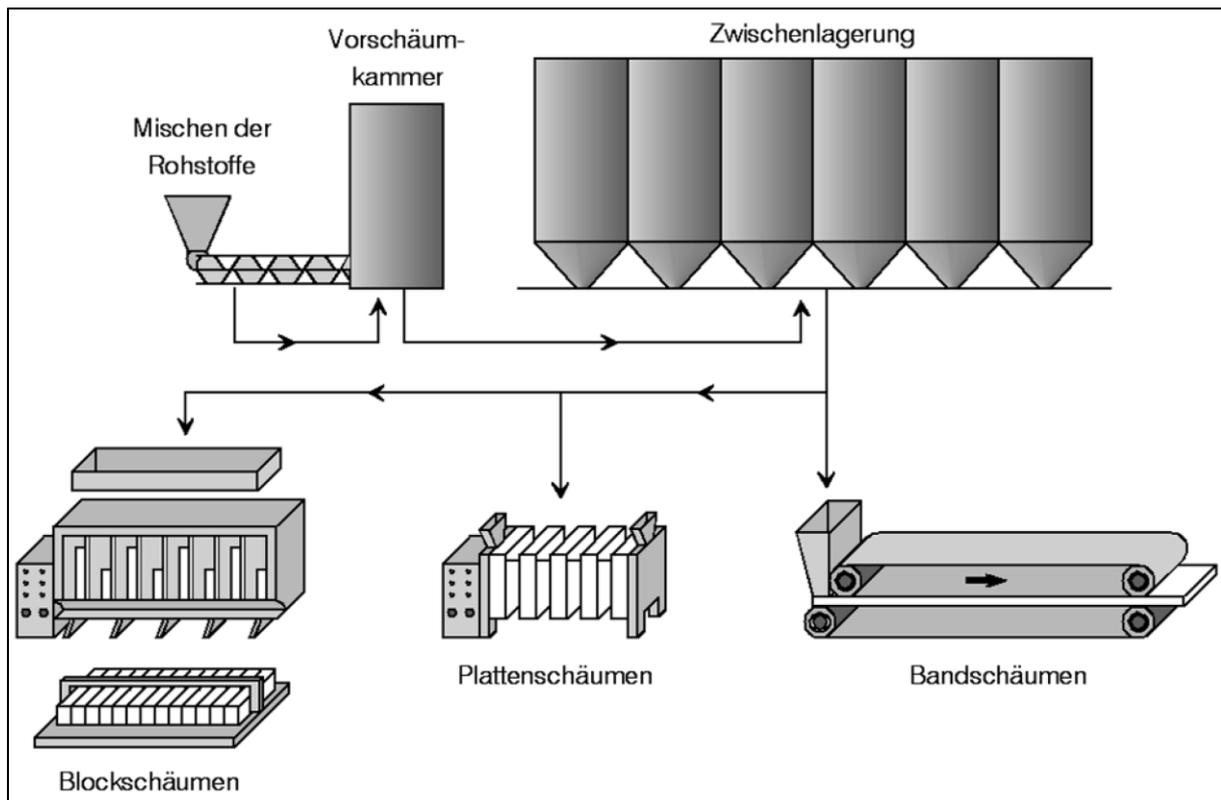
https://www.plasticsportal.net/wa/plasticsEU~de_DE/portal/show/common/content/literature/plastics/0208/plastics-styropor_a_basf_invention (09.11.2018)

¹⁵ Vgl. Fink, 2006, S. 121

Aus den oben genannten Rohstoffen, also Perlen oder Granulaten aus expandierbarem Polystyrol mit darin enthaltenem Treibmittel, können EPS-Produkte gefertigt werden, wobei sich der Ablauf (siehe Abbildung 4) folgendermaßen beschreiben lässt:¹⁶

- Zunächst liegt der Rohstoff im Lieferzustand vor. Neben dem Treibmittel kann das Granulat noch weitere Zusatzstoffe wie Stabilisatoren und Flammschutzmittel beinhalten. Die Granulatperlen erreichen Durchmesser von etwa einem bis drei Millimetern bei einer Schüttdichte von rund 650 kg/m³. Eine neuere Entwicklung auf dem Gebiet der Zusatzstoffe stellt die Verwendung von Graphit dar. Dies ermöglicht eine Verminderung der Wärmeleitfähigkeit, womit dünnere Elemente zur Dämmung verwendet werden können. Graphithaltiges EPS hat eine graue Färbung.
- Bei einer Temperatur von circa 90 °C wird das PS-Granulat aufgeschäumt, indem das Treibmittel Pentan (vgl. Kapitel 2.2) verdampft. Dabei findet eine Volumenvergrößerung um das 20- bis 50-fache statt. Ausschlaggebender Faktor für den Grad der Aufschäumung ist im Wesentlichen die Dauer der Temperatureinwirkung.
- Es folgt eine belüftete Zwischenlagerung in Silos, die der Abkühlung dient.
- Nach der Ablagerungszeit wird das Material nochmals expandiert. Dies geschieht unter Verwendung von 110-120 °C heißem Wasserdampf. Für diesen Schritt stehen kontinuierlich und diskontinuierlich laufende Verfahren zur Verfügung:
 - Bei der diskontinuierlichen Herstellung von Blöcken wird das Material in Metallformen eingebracht und über die Seitenwände bedampft. Mit Heißdrähten können die Blöcke danach beispielsweise zu Platten geschnitten werden.
 - Ebenfalls diskontinuierlich ist das direkte Schäumen von Platten in entsprechenden Formen. Hier ist kein Schneiden nötig.
 - Ein kontinuierliches Verfahren stellt das Aufbringen des Materials auf Fließbänder dar. Auf dem Band wird es zunächst mit Dampf beaufschlagt und kann danach abgelängt werden.
 - Allen Varianten ist das Prinzip des Verklebens von bereits vorgeschäumten PS-Perlen gemein, das in einem zweiten Verarbeitungsschritt mit Wasserdampf geschieht.
- Es entsteht ein Schaumstoff mit geschlossenen Zellen, bei dem die Luftporen circa 98 % des Gesamtvolumens ausmachen. Dieser muss vor seiner Verwendung in der Regel noch eine gewisse Zeit ablagern.

¹⁶ Vgl. Willems & Schild, 2017, S. 127 ff.

Abbildung 4: Herstellung von EPS (schematisch)¹⁷

2.1.3.3 Anwendungsbranchen und Marktsituation

Expandiertes Polystyrol wird generell in Form von Platten, Formteilen oder Granulat verkauft. Als Dämmstoff ist es extrem vielfältig einsetzbar und kann bei Dächern, Decken, Rohrleitungen, Böden usw. verwendet werden.¹⁸ Auch als Verpackung bzw. für andere Formteile sind seine Einsatzmöglichkeiten sehr breit gefächert. Beispiele dafür sind der Lebensmittel- und Pharmabereich, sowie Elektrogeräte.¹⁹

Das Marktvolumen des weltweiten Kunststoffmarkts betrug 2016 circa 263 Millionen Tonnen, wobei damit gerechnet werden kann, dass sich dieser Wert bis 2024 mehr als verdoppelt. Über die Hälfte der Nachfrage nach Kunststoffen stammt aus der Region Asien-Pazifik. Global gesehen machen Bauprodukte, sowie starre und flexible Verpackungen etwa 65% der Nachfrage aus.²⁰ In Europa dominierten 2014 ebenfalls die gleichen Produkte (Bau, Verpackungen) den Markt zu 70 %. In der europäischen Baubranche führt Polyvinylchlorid den Absatzmarkt an. EPS liegt an vierter Stelle.²¹

¹⁷ Willems & Schild, 2017, S. 127

¹⁸ Vgl. Willems & Schild, 2017, S. 128

¹⁹ Vgl. <https://www.hirsch-gruppe.com/de/produkte-und-anwendungen.html> (07.12.2018)

²⁰ Vgl. <https://www.ceresana.com/de/marktstudien/kunststoffe/kunststoffe-welt/kunststoffe-welt-studie-markt-analyse-ceresana.html> (07.12.2018)

²¹ Vgl. <https://www.ceresana.com/de/marktstudien/kunststoffe/kunststoffe-europa/marktstudie-kunststoffe-europa.html> (07.12.2018)

Am globalen Dämmstoffmarkt sind Glas- und Steinwolle mit mehr als 50 % der Nachfrage vorherrschend. EPS ist hier der zweitwichtigste Dämmstoff.²² In Europa sind die Verhältnisse sehr ähnlich, wobei länderspezifische Unterschiede auftreten, unter anderem bedingt durch verschiedene klimatische Bedingungen.²³ Der Anteil von EPS am deutschen Dämmstoffmarkt lag 2005 bei circa 31 %, was in etwa 7,5 Millionen Kubikmetern entspricht.²⁴

EPS wird weltweit hauptsächlich von der Bauindustrie zur Wärme-, Kälte- und Schalldämmung verwendet. 2016 belief sich der globale EPS-Verbrauch auf 6,7 Millionen Tonnen. Obwohl EPS auch in Formteilen wie Helmen oder Verpackungen eingesetzt wird, beherrscht die Baubranche 59 % des Marktes. In Europa bedingt der Trend zu höherer Energieeffizienz und Klimaschutz eine positive Entwicklung. Bei Sanierung und Neubau kommt EPS häufig zum Zug. Wie oben bereits erwähnt, sind Glas- und Steinwolle die wichtigsten Konkurrenten, neben Naturprodukten. Die Nachfrage nach EPS wird wiederum vom Raum Asien-Pazifik dominiert, mit guten Wachstumsaussichten. Auch wenn die Baubranche beispielsweise in China nachlässt, herrscht große Nachfrage nach Verpackungen, die weltweit rund ein Drittel des EPS-Verbrauchs bestimmen. Besonders in Schwellenländern steigt aktuell der EPS-Verbrauch pro Kopf.²⁵

In der deutschen Kunststoffproduktion lag der Anteil von EPS 2015 mit 400.000 Tonnen bei 3,9%. Hinsichtlich der verarbeiteten Mengen trug expandiertes Polystyrol mit 315.000 Tonnen 2,6% zur gesamten Kunststoffverarbeitung in Deutschland bei. Auch hier war der Baubereich bei weitem dominierend, vor dem Verpackungssektor.²⁶

²² Vgl. <https://www.ceresana.com/de/marktstudien/industrie/daemmstoffe-welt/ceresana-marktstudie-daemmstoffe-welt.html> (07.12.2018)

²³ Vgl. <https://www.ceresana.com/de/marktstudien/industrie/daemmstoffe-europa/ceresana-marktstudie-daemmstoffe-europa.html> (07.12.2018)

²⁴ Vgl. Willems & Schild, 2017, S. 126

²⁵ Vgl. <https://www.ceresana.com/de/marktstudien/kunststoffe/expandierbares-polystyrol/expandierbares-polystyrol-eps-markt-anteil-kapazitaet-angebot-nachfrage-prognose-innovation-anwendung-wachstum-produktion-industrie.html> (07.12.2018)

²⁶ Vgl. Consultic Marketing & Industrieberatung GmbH, 2016, S. 5-9

2.2 Pentan

Pentan spielt als verwendetes Treibmittel für EPS (vgl. Kapitel 2.1.3) in den praktischen Kapiteln dieser Masterarbeit, insbesondere bei der Analyse des verarbeiteten Rohstoffs, eine wesentliche Rolle. Wie sich dieses Treibmittel sowohl in den angestellten Untersuchungen als auch bei seiner Verarbeitung verhält, wird immer wieder ein zu beachtender Aspekt sein. In den entsprechenden Praxisabschnitten wird diskutiert, welchen Einfluss die Umweltbedingungen, vor allem unterschiedliche Temperaturen, auf das Verhalten des Treibmittels ausüben. Daher werden nun die wesentlichen chemischen Grundlagen zu den Pentanen vorgestellt.

2.2.1 Grundlegendes

Pentane sind Kohlenwasserstoffe aus der Gruppe der Alkane. Diese werden auch als Grenzkohlenwasserstoffe oder Paraffine bezeichnet und haben die allgemeine Struktur C_nH_{2n+2} . Dabei sind die Kohlenstoffatome vollständig mit Wasserstoffatomen gesättigt. Bei Alkanen mit längeren Kohlenstoffketten treten unterschiedliche Strukturen auf. So kommt Pentan in drei verschiedenen Strukturvarianten (Isomere) vor. Die technische Gewinnung von Alkanen erfolgt größtenteils aus Erdöl und Erdgas.²⁷

Die allgemeine Struktur der Pentane lautet C_5H_{12} . Sie besitzen also fünf Kohlenstoff- und zwölf Wasserstoffatome. In den drei Varianten ihrer chemischen Struktur, wie sie in Abbildung 5 zu sehen sind, tragen die Pentane die Namen Pentan, Isopentan und Neopentan. Diese Stoffe werden durch Destillation aus Erdgas, Crack- und Raffineriegasen abgetrennt. Anwendung finden sie neben dem schon besprochenen Einsatz als Treibmittel unter anderem als Bestandteil von Vergaserkraftstoffen oder als Lösungsmittel.²⁸

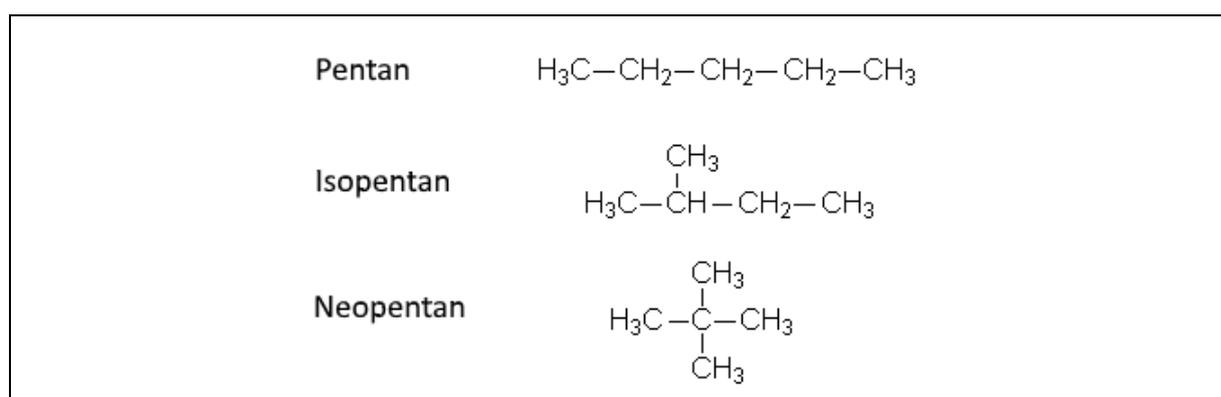


Abbildung 5: Struktur der Pentane^{29, 30, 31}

²⁷ Vgl. <https://www.spektrum.de/lexikon/chemie/alkane/266> (15.11.2018)

²⁸ Vgl. <https://www.spektrum.de/lexikon/chemie/pentane/6798> (15.11.2018)

²⁹ Vgl. [http://gestis.itrust.de/nxt/gateway.dll/gestis_de/010040.xml?f=templates\\$fn=default.htm\\$3.0](http://gestis.itrust.de/nxt/gateway.dll/gestis_de/010040.xml?f=templates$fn=default.htm$3.0) (15.11.2018)

³⁰ Vgl. [http://gestis.itrust.de/nxt/gateway.dll/gestis_de/030860.xml?f=templates\\$fn=default.htm\\$3.0](http://gestis.itrust.de/nxt/gateway.dll/gestis_de/030860.xml?f=templates$fn=default.htm$3.0) (15.11.2018)

³¹ Vgl. [http://gestis.itrust.de/nxt/gateway.dll/gestis_de/510188.xml?f=templates\\$fn=default.htm\\$3.0](http://gestis.itrust.de/nxt/gateway.dll/gestis_de/510188.xml?f=templates$fn=default.htm$3.0) (15.11.2018)

2.2.2 Eigenschaften

Nachfolgend werden die für diese Masterarbeit wichtigsten Eigenschaften der drei Isomere von Pentan erörtert. In Tabelle 1 sind deren jeweiliger Siede- und Schmelzpunkt angeführt. Hervorzuheben ist, dass die Siedepunkte von Pentan und Isopentan etwas über Raumtemperatur liegen, während Neopentan darunter siedet. Diese Werte werden bei der im Praxisabschnitt besprochenen Trocknung des Rohstoffs besonders zu beachten sein.

Bezeichnung	Schmelzpunkt [°C]	Siedepunkt [°C]
Pentan	-129,7	36,1
Isopentan	-160	27,9
Neopentan	-20	9,5

Tabelle 1: Schmelz- und Siedepunkte der Pentane³²

Pentan, auch bezeichnet als n-Pentan, ist eine farblose und beinahe geruchslose Flüssigkeit. Es ist leicht entzündlich und Gemische seiner Dämpfe mit Luft verhalten sich explosiv. n-Pentan ist leichter als Wasser und darin praktisch unlöslich. Eine wichtige Eigenschaft ist zudem seine leichte Flüchtigkeit. Sowohl für die menschliche Gesundheit, als auch für Gewässer ist dieser Kohlenwasserstoff nicht zur Gänze unbedenklich.³³

Für Isopentan, auch i-Pentan oder Methylbutan genannt, gelten im Wesentlichen die gleichen Aussagen wie für n-Pentan. Ein Unterschied ist allerdings, dass Isopentan nicht geruchslos ist, sondern einen benzinartigen Geruch aufweist.³⁴ Neopentan, welches auch die Namen 2,2-Dimethylpropan und tert-Pentan besitzt, ist als einzige Variante der Pentane keine Flüssigkeit, sondern ein farbloses Gas. Dabei ist es hochentzündlich und in Verbindung mit Luft sehr explosiv. Tert-Pentan ist schwerer als Luft und löst sich, ebenso wie die anderen beiden Strukturvarianten von Pentan, nicht in Wasser.³⁵

³² Vgl. <https://www.spektrum.de/lexikon/chemie/pentane/6798> (15.11.2018)

³³ Vgl. [http://gestis.itrust.de/nxt/gateway.dll/gestis_de/010040.xml?f=templates\\$fn=default.htm\\$3.0](http://gestis.itrust.de/nxt/gateway.dll/gestis_de/010040.xml?f=templates$fn=default.htm$3.0) (15.11.2018)

³⁴ Vgl. [http://gestis.itrust.de/nxt/gateway.dll/gestis_de/030860.xml?f=templates\\$fn=default.htm\\$3.0](http://gestis.itrust.de/nxt/gateway.dll/gestis_de/030860.xml?f=templates$fn=default.htm$3.0) (15.11.2018)

³⁵ Vgl. [http://gestis.itrust.de/nxt/gateway.dll/gestis_de/510188.xml?f=templates\\$fn=default.htm\\$3.0](http://gestis.itrust.de/nxt/gateway.dll/gestis_de/510188.xml?f=templates$fn=default.htm$3.0) (15.11.2018)

2.3 Trocknung und Feuchtemessung

Trocknung und Feuchtemessung spielen in den praktischen Abschnitten dieser Masterarbeit immer wieder eine wesentliche Rolle, sowohl bei der Untersuchung von Rohstoffen, als auch bei Halbfertig- und Fertigprodukten. Daher werden nun die grundlegenden Begriffe dazu näher erklärt, sowie eine Messmethode vorgestellt.

2.3.1 Trocknung

Trocknung beschreibt sowohl die vollständige als auch die unvollständige Flüssigkeitsentfernung aus feuchten Gütern mittels Verdampfung oder Verdunstung. Die mechanische Entfeuchtung stellt hingegen eine andere Variante des Entfernens von Flüssigkeit aus einem Gut dar. Sie erfolgt durch mechanischen Krafteintrag in das zu trocknende Gut, ohne dass eine Phasenänderung stattfindet. Beispiele sind das Schleudern oder Pressen. Prinzipiell kann das Gut, dessen Feuchte entfernt werden soll, flüssig, brei- bzw. pastenförmig oder als Feststoff vorliegen. Wird die Flüssigkeit durch den Eintrag von Energie bzw. Wärme entfernt, so spricht man von thermischer Trocknung. Der Energieeintrag kann z.B. mittels Strahlung, Leitung oder Konvektion realisiert werden und dient zur Verdampfung oder Verdunstung des Feuchteanteils. Energie und Stoffe werden also gleichzeitig übertragen. Ist die zu trocknende Flüssigkeit nicht in flüssiger, sondern fester Form vorhanden, wird von Sublimations- bzw. Gefriertrocknung gesprochen.³⁶ Folgende Punkte müssen bei der Trocknung besonders berücksichtigt werden:³⁷

- Transport der für die thermische Trocknung nötigen Energie in das Trocknungsgut
- Abführung des auftretenden Dampfes
- Trocknungsverlauf des Guts

2.3.2 Arten der Feuchte

Wasser ist in den überwiegenden Fällen die vorherrschende Flüssigkeit in feuchten Körpern, wobei es in verschiedenen Formen vorliegen kann:³⁸

- Die *Haftflüssigkeit* bildet einen Film auf der äußeren Oberfläche des Guts
- *Kapillarflüssigkeit* befindet sich in den Poren eines Körpers, benetzt also die inneren Oberflächen. Sie entweicht beim Trocknen durch Kapillarkräfte nach außen.
- *Quellflüssigkeit* befindet sich nicht nur an zugänglichen Oberflächen des Gutes, sondern durchdringt dieses und quillt es auf. Dadurch geschieht eine Vergrößerung des Gutsvolumens, sowie eine Schrumpfung beim Trocknen.
- *Kristallwasser* ist im Kristallgitter des Guts eingebunden. Es ist also Teil von dessen Struktur und entweicht bei einer thermischen Trocknung nicht, sondern erst bei Erreichen einer für die Kristallstruktur spezifischen Zersetzungstemperatur.

³⁶ Vgl. Kraume, 2012, S. 319 ff.

³⁷ Vgl. Kraume, 2012, S. 320

³⁸ Vgl. Kraume, 2012, S. 321 f.

2.3.2.1 Gleichgewichtsfeuchte

Der Begriff *Gleichgewichtsfeuchte* muss hier noch gesondert erklärt werden, da er bei den in dieser Masterarbeit untersuchten Materialien und Produkten ein nicht zu vernachlässigender Aspekt ist. Er wird im Zusammenhang mit Baustoffen verwendet, welche nie vollständig trocken vorliegen. Jedoch gibt es einen Zustand, bei dem die Baustofffeuchte durch Kapillarkondensation im Gleichgewicht mit der Feuchtigkeit der Umgebungsluft steht. Die dabei vorhandene Feuchte wird als Gleichgewichtsfeuchte bezeichnet.³⁹

2.3.3 Thermogravimetrische Analyse

Bei der thermogravimetrischen Analyse handelt es sich um ein Verfahren, bei der die Masse einer Probe als Funktion von Zeit oder Temperatur gemessen wird. Entweder geschieht dies mittels einer konstanten Aufheizrate (dynamische Messung) oder bei konstanter Temperatur (isothermische Messung). Gelegentlich werden auch nichtlineare Temperaturverläufe eingesetzt. Der gewählte Temperaturverlauf richtet sich nach den Informationen, die aus der Messung gewonnen werden sollen. Die Atmosphäre, unter der die Analyse stattfindet, spielt ebenso eine wichtige Rolle. Diese kann beispielsweise reaktiv oder inert sein. Typischerweise entstehen dabei Kurven, in denen die Masse bzw. ein prozentueller Anteil der Masse gegenüber der Temperatur und/oder der Zeit aufgetragen ist. Auch die Darstellung der ersten Ableitung solcher Kurven ist möglich, um die Änderungsrate der Masse abzubilden. Thermogravimetrie kann folglich dazu dienen, Informationen über die Bestandteile der untersuchten Probe zu gewinnen. Masseverluste treten ein, wenn das Probenmaterial durch Reaktion mit der umgebenden Atmosphäre verloren geht. Verluste oder Gewinne an Masse treten in der resultierenden Kurve einer dynamischen Messung als Stufen auf.⁴⁰ Unter anderem können folgende Effekte dafür verantwortlich sein:⁴¹

- Verdampfung und Verdunstung flüchtiger Bestandteile
- Oxidation
- Trocknung
- Verlust von Feuchtigkeit bzw. Wasser
- Magnetische Effekte unter Einfluss eines elektromagnetischen Feldes
- Diverse chemische Reaktionen der Bestandteile bzw. der Probenumgebung

³⁹ Vgl. Weber H. , 2008, S. 433

⁴⁰ Vgl. Bottom, 2008, S. 88 f.

⁴¹ Vgl. Bottom, 2008, S. 88

2.3.4 Feuchtemessung in der Masterarbeit

Viele der in den praktischen Untersuchungen angestellten Analysen dienen der Feststellung von Feuchtigkeitsgehalten. Dabei wird in Anlehnung an die oben vorgestellte thermogravimetrische Analyse, eine etwas einfacher gehaltene Messung durchgeführt. Die jeweiligen Proben werden bei konstanter Temperatur in einer gewöhnlichen Atmosphäre in Form von Umgebungsluft getrocknet. Verglichen mit der eher komplizierten dynamischen Messung, handelt es sich also um die oben erwähnte isothermische Variante in einer vereinfachten Form.

Verwendet werden dabei ein Trockenofen sowie ein begehbare Trockenschrank, welche den oben angesprochenen thermischen Energieeintrag ermöglichen. Dabei nimmt die Probenmasse ab. In erster Linie wird dabei der Verlust an Wasser untersucht, jedoch hat auch der Verlust weiterer Inhaltsstoffe einen Einfluss. Außerdem muss auch die Gleichgewichtsfeuchte der Untersuchungsobjekte in Betracht gezogen werden. Die untersuchten Proben werden gelegentlich durch händisches Schleudern von ihrem Oberflächenwasser (Haftflüssigkeit) befreit, was im Grunde einer teilweisen mechanischen Entfeuchtung entspricht.

2.4 Recycling

Das Recycling des eingesetzten Materials wird im praktischen Teil der Masterarbeit einen großen Platz einnehmen. Dabei wird die Frage auftauchen, durch welches Vorgehen anfallende EPS-Ausschüsse bestmöglich genutzt werden können. Um diese Themen zu erörtern, ist eine ausreichende Kenntnis der Möglichkeiten zum Recycling von Kunststoffen generell und EPS im speziellen unerlässlich. Aus diesem Grund wird im folgenden Kapitel zuerst allgemein auf das Recycling bzw. die Wiederverwendung von Kunststoffen eingegangen. Es müssen auch einige Fragen zu Begrifflichkeiten geklärt werden. Ausgehend von den allgemeinen Grundlagen des Kunststoffrecyclings wird dann auf spezifische Aspekte dieses Themas bezüglich EPS eingegangen. Neben den technischen Hintergründen soll auch ein kurzer Überblick über die derzeitigen Verarbeitungsmengen gegeben werden.

2.4.1 Begrifflichkeit

Der Ausdruck „Recycling“ wird in dieser Masterarbeit verwendet für Prozesse, mit denen aus Abfällen oder Resten wieder nützliche bzw. wertvolle Materialien gewonnen werden. Bestimmte Güter bzw. Materialien, sowohl aus dem Endkunden- als auch dem industriellen Bereich, werden dabei einer erneuten Verwendung zugeführt. Ziele sind die Verringerung von Müll und Verschmutzung, die Einsparung wertvoller Ressourcen usw.⁴² Die Begriffe Wiederverwertung, Wiederverwendung und Recycling sowie deren englische Äquivalente werden je nach Autor bzw. Quelle unterschiedlich genutzt.^{42, 43, 44} Um Verwirrung zu vermeiden, wird in dieser Masterarbeit auf scharfe Abgrenzungen dieser Begriffe verzichtet.

2.4.2 Technische Möglichkeiten

Um 1980 galten Kunststoffe noch als nicht verwendbar im Sinne des Recycling. Seit dieser Zeit kam es jedoch zu bedeutenden Fortschritten auf diesem Gebiet, sodass es heute diverse technische Verfahren des Kunststoffrecyclings gibt. Mittlerweile können unter anderem Bauteile und Verpackungen aus Kunststoff im großtechnischen Stil recycelt werden. Vor allem entsprechende Rechtsvorschriften fungieren als Antrieb für diese Entwicklung. So wird jenen, die Kunststoffprodukte verkaufen bzw. verbreiten, auch die Verantwortung für die Entsorgungspraxis übertragen. Folglich müssen diese die Endkunden über die Möglichkeiten einer sinnvollen Abfallbehandlung informieren und auch die entsprechenden Rahmendbedingungen zur Verfügung stellen. Dabei handelt es sich in erster Linie um Einrichtungen, die das Sammeln, Sortieren, Verwerten etc. erlauben. Damit werden natürliche Ressourcen bewahrt und der Materialverbrauch vermindert.⁴⁵

⁴² Vgl. Cleveland & Morris, 2015, S. 490 f.

⁴³ Vgl. <https://www.faz.net/aktuell/generation-plastik/generation-plastik-wie-gut-recycelt-deutschland-wirklich-15782613.html> (07.12.2018)

⁴⁴ Vgl. Woidasky, 2012, S. 105 ff.

⁴⁵ Vgl. Woidasky, 2012, S. 105 f.

Eine obere Ebene in dieser Kreislaufwirtschaft nimmt die *direkte Wiederverwendung von Bauteilen* ein. Sie erspart im Vergleich zur vollkommen neuen Herstellung einen großen Teil eines aufwändigen Prozesses. Häufig werden Bauteile aus Kunststoffen jedoch außen auf Produkten verwendet und ihre unterschiedliche optische Erscheinung bildet oft ein wesentliches äußeres Merkmal eines Produkts. Dies erschwert die einfache Wiederverwendung in einer neuen Generation von Produkten. Im Ersatzteilbereich ist dies leichter umsetzbar. Dennoch werden nur relativ kleine Anteile beispielsweise von PKW tatsächlich in einem Recyclingkreislauf rückgeführt.⁴⁶

Das *werkstoffliche Recycling* nimmt bei Polymeren einen wesentlich größeren Platz ein und ist heute Stand der Technik, um den Verbrauch von frischen Werkstoffen zu mindern. Direkt in der Fertigung anfallende Produktionsabfälle werden in Mühlen zerkleinert und unmittelbar in den Herstellungsprozess zurückgeführt. Beim Recycling von Altteilen ist die Qualität des verwendeten Materials von entscheidender Wichtigkeit. Je nach Kunststoffart gibt es dabei verschiedenste Einsatzmöglichkeiten für das Recycling. Insbesondere bei Thermoplasten, zu denen auch EPS zählt, leidet die Qualität des Kunststoffs nach mehrmaliger Verwendung des Materials. Grund sind negative chemische Veränderungen bei der Kettenlänge der Polymere. Bei Thermoplasten, wie auch EPS einer ist, sind besonders zwei Verfahren im Einsatz, Regranulierung und Compoundierung. Bei der Regranulierung, die nur in seltenen Fällen zur Anwendung kommt, wird ausschließlich reines Rezyklatmaterial verwendet. Wesentlich häufiger ist die Compoundierung anzutreffen. Hier werden neues und altes Material gemischt. Im Allgemeinen werden bei Produkten aus diesen Mischungen, die die gleiche Qualität wie Neuware haben sollen, Werte von bis zu 30 % Rezyklat erreicht. Geschädigt wird altes Material vor allem durch äußere Einflüsse wie UV-Strahlung, Säuren, Verunreinigungen etc., sowie den Wiederverarbeitungsprozess selbst. Gute Qualität des rezyklierten Materials ist daher ein entscheidender Faktor.⁴⁷

In der *rohstofflichen Kreislaufverwendung* werden Polymere auf ihre chemischen Grundbestandteile zurückgeführt. Dadurch können sie zur Synthese von neuen Polymeren herangezogen werden. Andererseits können sie in Farben und Klebstoffen verarbeitet werden oder als Ersatz für Erdöl und daraus gewonnene Produkte dienen. Zuletzt ist noch die *Verbrennung* anzuführen. Bei ihr gehen die stofflichen Eigenschaften der Kunststoffe verloren, weswegen sie meist nicht als Variante des stofflichen Recyclings im engeren Sinne angesehen werden, siehe dazu auch Kapitel 2.4.1. Teilprozesse sind dabei Trocknen, Entgasen, Vergasen und Oxidieren, wobei sich diese je nach Verfahren überlagern und bestimmte Schritte hervorgehoben werden.⁴⁸

⁴⁶ Vgl. Woidasky, 2012, S. 106 f.

⁴⁷ Vgl. Woidasky, 2012, S. 107 f.

⁴⁸ Vgl. Woidasky, 2012, S. 108 f.

Allgemein gesprochen, gibt es eine Vielzahl an Möglichkeiten des Kunststoffrecyclings, wobei die wenigsten davon tatsächlich in großem Stil umgesetzt werden. Durchsetzen können sich solche Methoden, die schnelle Vorteile und technisch gut umsetzbare Lösungen für Produzenten erlauben. Dazu zählt insbesondere die direkte Wiederverwendung von Produktionsabfällen, wie sie auch bei EPS zum Einsatz kommt. Der Trend weist weg von aus ökologischen Gründen geforderten kleinen Lösungen hin zu sowohl ökologisch als auch ökonomisch vorteilhaften großtechnischen Lösungen, wie Verbrennung oder Vergasung.⁴⁹

2.4.3 Recycling in Deutschland

Im Jahr 2015 fielen in Deutschland insgesamt 5,92 Millionen Tonnen an Kunststoffabfällen an. Beinahe die gesamte Menge wurde einer weiteren Nutzung zu geführt. Der Großteil der verwerteten Mengen stammt aus dem Verpackungsbereich, während Baumaterialien mit großem Abstand folgen. Die wichtigsten Abnehmer von Recyclingmaterial sind Bau- und Landwirtschaft sowie die Verpackungsindustrie.⁵⁰ Die Verwendung der Abfälle teilt sich anteilmäßig folgendermaßen auf:⁵¹

- Nur ca. 1 % der Abfälle wurde nicht verwertet, also „nutzlos“ deponiert.
- Die übrigen 99 % unterteilen sich in:
 - Stoffliche Verwertung: 46 %
 - Davon werkstofflich: 45 %
 - Davon rohstofflich: 1 %
 - Energetisch: 53 %
 - Davon Müllverbrennungsanlagen: 34,5 %
 - Davon als Ersatzbrennstoff bzw. Sonstiges: 18,5 %

2.4.4 EPS-Recycling

Betrachtet man speziell die Wiederverwertung von EPS-Abfällen, tauchen einige negative Einflussfaktoren auf, welche das Recycling dieses Kunststoffes erschweren:⁵²

- Die spezifischen Transportkosten erweisen sich aufgrund der sehr niedrigen Schüttdichte von EPS als relativ hoch.
- Für die Verwendung im Baubereich müssen dem EPS Flammenschutzmittel zugesetzt werden. Abfälle dieser Art müssen separat entsorgt werden, jedoch tritt häufig eine Vermischung auf.
- Die Reinheit der Abfälle ist meist niedrig, weswegen daraus kaum hochwertiges Rezyklat gewonnen werden kann. Ein Großteil der Abfälle wird daher einer thermischen Verwertung zugeführt.
- Nur geringe Mengen können als Ausgangsstoff für Spritzguss verwendet werden.

⁴⁹ Vgl. Woidasky, 2012, S. 110 f.

⁵⁰ Vgl. Consultic Marketing & Industrieberatung GmbH, 2016, S. 12 ff.

⁵¹ Vgl. Consultic Marketing & Industrieberatung GmbH, 2016, S. 17

⁵² Vgl. <https://www.ivv.fraunhofer.de/de/forschung/verfahrensentwicklung-polymer-recycling/recycling-eps-abfall.html> (07.12.2018)

Im Wesentlichen sind die beiden Hauptprobleme des EPS-Recyclings also die oft mangelhafte Qualität sowie der teure Transport. Es ist möglich, das Volumen von EPS-Abfällen durch mechanische Zerkleinerung um das Zwei- bis Dreifache zu reduzieren. Durch Verpressen erreicht man mitunter sogar den Faktor zehn. Nach dieser Vorbereitung werden die Abfälle, von Zentralsammelstellen ausgehend, entweder zu extrudiertem PS geringer Qualität verarbeitet oder nach Ostasien exportiert. Besonders problematisch in Bezug auf die Qualität ist, dass sich EPS-Abfälle ohne bzw. mit Flammschutzmittel optisch nicht wesentlich voneinander unterscheiden. Daher rührt die bereits erwähnte Vermischung. Die hohen Qualitätsanforderungen für eine erneute Expansion oder Spritzgussverarbeitung können nur geringe Anteile des gesamten EPS-Recyclingmaterials erfüllen. Dazu dürfen diese nur gering verschmutzt und thermisch kaum geschädigt sein. Starke Komprimierung und erneute Expansion resultieren in weiteren temperaturbedingten Schädigungen des EPS. Neben den bereits erwähnten Möglichkeiten wird konventionell recyceltes Material noch in speziellen Ziegeln oder Ausgleich-Estrichen verwendet. Bei diesen Varianten ist der Marktwert allerdings relativ gering.⁵³

Auch die Hirsch Servo AG stellt, wie schon erwähnt, eine Ausgleichsdämmung („Thermozell“) her.⁵⁴ Eine weitere Anwendung im Sinne des Recycling ist die Einblasdämmung. Dabei wird rezykliertes PS-Granulat in Hohlräume geblasen, die entweder bereits vorhanden sind, oder speziell für diesen Zweck geschaffen werden.⁵⁵

2.4.4.1 EPS-Loop

Ein neuartiges Verfahren im Bereich des EPS-Recyclings ist der sogenannte „EPS-Loop“. Dieses Projekt verfolgt zwei Ziele. Einerseits soll es die Aufbereitung von verunreinigten EPS-Abfällen zu wiederaufschäumbarem PS ermöglichen. Andererseits sollen Aufwand und Kosten für den Transport der Abfälle und Logistik verringert werden. Die Reduktion der Transportkosten gelingt durch eine Verminderung des Volumens um das fünfzigfache, indem das EPS in einer Flüssigkeit gelöst wird. Der angewendete Prozess beruht auf drei Schritten, Auflösen, Reinigen und Fällern. Zuerst wird das EPS aufgelöst. Danach folgt eine Reinigung der Lösung und deren Befreiung von störenden Stoffen wie Flammschutzmitteln. Der dritte und letzte Schritt ist die Fällung des zuvor gereinigten EPS. Auch stark verschmutzte Abfälle können so zu erneut expandierfähigem Polystyrol verarbeitet werden, welches ein mit neuem Rohstoff vergleichbares Niveau an Qualität bietet. Damit ergibt sich eine deutlich bessere Wertschöpfung als bei der thermischen Verwertung, dem Aufmahlen oder der Verwendung im Spritzguss.⁵⁶

⁵³ Vgl. <https://www.creacycle.de/de/projekte/recycling-von-expandiertem-polystyrol-eps/eps-kreislauf.html> (07.12.2018)

⁵⁴ Vgl. <https://www.hirsch-gruppe.com/de/thermozell/eps-ausgleichsdaemmung.html> (07.12.2018)

⁵⁵ Vgl. <https://www.energie-lexikon.info/einblasdaemmung.html> (07.12.2018)

⁵⁶ Vgl. <https://www.ivv.fraunhofer.de/de/forschung/verfahrensentwicklung-polymer-recycling/recycling-eps-abfall.html> (07.12.2018)

2.5 Materialfluss

Als Ausgangspunkt aller praktischen Überlegungen zur Problemlösung im Unternehmen wird ein grafisches Modell des Materialflusses innerhalb der Fertigung dienen, siehe Kapitel 3.1. Bei der Erstellung dieses Modells wurde von den hier erläuterten theoretischen Grundlagen ausgegangen. Bevor auf die konkreten Modellierungsvarianten des Materialflusses in produzierenden Unternehmen eingegangen wird, müssen einige wichtige Definitionen zu diesem Thema angeführt werden.

2.5.1 Grundlegende Definitionen

Material:⁵⁷ Der Begriff „Stoffe“ kann synonym verwendet werden. Zu den Stoffen werden nicht nur Betriebs-, Hilf- und Rohstoffe gezählt, sondern auch Reststoffe zur Wiederverwertung, Aggregate im einbaufertigen Zustand, Kleinmaterialien sowie zugekaufte Normteile. Im Bereich der Produktion stellen sie die Ausgangsstoffe dar. Nicht zum Material gezählt werden Fertigprodukte, Halbfertigprodukte und Bestandteile aus der Eigenfertigung.

Rohstoff:⁵⁸ Zur Vermeidung von Missverständnissen, insbesondere in den Praxiskapiteln, ist hier eine Begriffsunterscheidung wichtig. Der Begriff „Rohstoff“ kann zwei Bedeutungen haben, je nach volks- oder betriebswirtschaftlicher Sicht:

- *Volkswirtschaftslehre:* Unbearbeitete in der Primärproduktion gewonnene Grundstoffe.
- *Betriebswirtschaftslehre:* Beim Herstellungsprozess in das Produkt eingehende Grundstoffe, die den Hauptbestandteil eines Erzeugnisses ausmachen.

Wenn in dieser Masterarbeit von „Rohstoff“ gesprochen wird, ist damit stets die betriebswirtschaftliche Definition gemeint. Es handelt sich im konkreten Fall immer um EPS-Granulate bzw. -Perlen, siehe Kapitel 2.1.3.2.

Materialfluss:⁵⁹ Der Materialfluss stellt eine Kette von Prozessen dar, die sämtliche Abläufe für Gewinnung, Be- und Verarbeitung, Lagerung und Verteilung von Gütern bzw. Materialien beinhaltet. Diese Vorgänge spielen sich innerhalb vorgegebener Bereiche ab. Teilprozesse des Materialflusses sind die Abläufe bei Transport, Lagerung und Handhabung, aber auch Umschlagen, Lagern, Identifizierung und Prüfung. Aufenthalte von Material bzw. Gütern werden ebenso dazugezählt.

Ausschuss:⁶⁰ Als Ausschuss werden Erzeugnisse oder deren Teile bezeichnet, die endgültig nicht mehr für den ihnen ursprünglich zugedachten Zweck eingesetzt werden können. In der Regel werden sie in Betrieben statistisch erfasst. Um Ausschüsse zu vermeiden, findet oft eine Gliederung nach Ursachen statt. Allgemein lassen sich zwei Gründe unterscheiden:

⁵⁷ Vgl. <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/material-37210/version-260653> (17.11.2018)

⁵⁸ Vgl. <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/rohstoffe-46814/version-270088> (17.11.2018)

⁵⁹ Vgl. <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/materialfluss-51803/version-274954> (17.11.2018)

⁶⁰ Vgl. <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/ausschuss-27418/version-251071> (07.12.2018)

1. Fehler von gelieferten Teilen bzw. Material, welche von Lieferanten bezogen wurden.
2. In der Herstellung auftretende Fehler. Diese können aus falscher Montage oder Bearbeitung resultieren, aber auch schon vorher durch mangelhafte Zeichnung oder Konstruktion verursacht werden. In Transport oder Arbeitsvorbereitung können ebenso Gründe für das Entstehen von Ausschuss vorliegen.

2.5.2 Materialflussmodell

Zur Analyse von Materialflüssen gibt es diverse grafische Möglichkeiten. Jede Variante verfolgt einen anderen Zweck. Für diese Masterarbeit wird in den späteren Kapiteln ein Modell zur Materialflussvisualisierung erstellt. In ihren einfachsten, aber auch abstraktesten Formen bestehen Materialflussmodelle lediglich aus Blöcken sowie Pfeilen, deren Dicke die Menge des Materialflusses abbildet. Der Zweck dieser Diagramme in Linien- oder Kreisform ist in erster Linie das Finden von optimalen Layouts bezüglich Material und Produktion. Abbildung 6 zeigt beispielhaft verschiedene mehr oder weniger komplexe Materialflussvisualisierungen. Links sind oben ein lineares, mittig ein Kreis- und unten ein Matrix-Blockdiagramm dargestellt. Die Grafik rechts visualisiert ein mehrstufiges, wesentlich komplexeres Materialflusssystem. Neben den gezeigten Varianten gibt es noch weitere verwandte grafische Darstellungen, wie beispielsweise das sogenannte Spaghetti-Diagramm.⁶¹

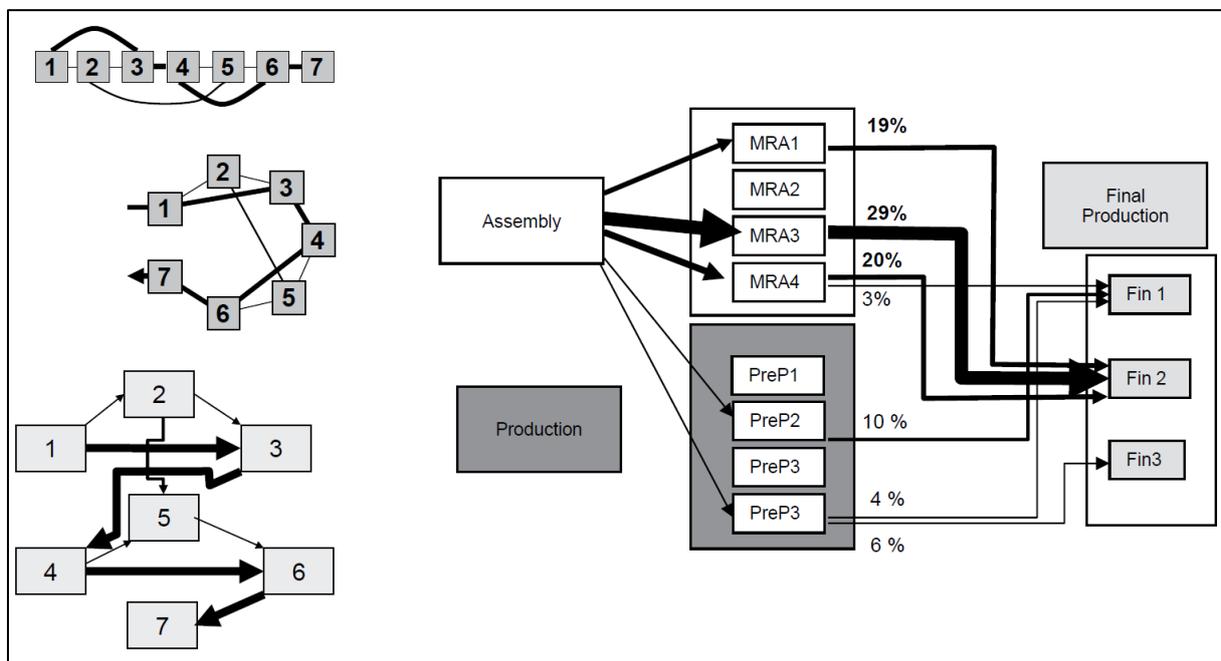


Abbildung 6: Beispiele für Materialflussvisualisierungen⁶²

⁶¹ Vgl. Hirsch & Dickmann, 2015, S. 386 f.

⁶² Vgl. Hirsch & Dickmann, 2015, S. 387

Ein Materialflussmodell dient der Analyse der Materialflussstruktur. Es beschreibt allgemein die Materialflüsse innerhalb eines Betriebes in grafischer Form und kann unter anderem auch als Gerüst für eine Flusskostenrechnung dienen. Gebildet wird das Modell aus externen und internen Mengenstellen sowie Materialflüssen. Interne Mengenstellen sind alle Einheiten im Unternehmen, die zur Lagerung, Transport und Umwandlung von Material dienen. Dazu gehören unter anderem Lager, Versand und die verschiedenen Bereiche der Produktion. Außerdem können Aufbereitungsanlagen und Reststoffzentralen in das Modell integriert werden. In Abbildung 7 ist eine solche Grafik mit Mengenstellen wie „Halbfertigwarenlager“ oder „Produktion“ dargestellt. Die Materialflüsse verbinden die Mengenstellen und beschreiben damit die Materialbewegungen zwischen ihnen.⁶³

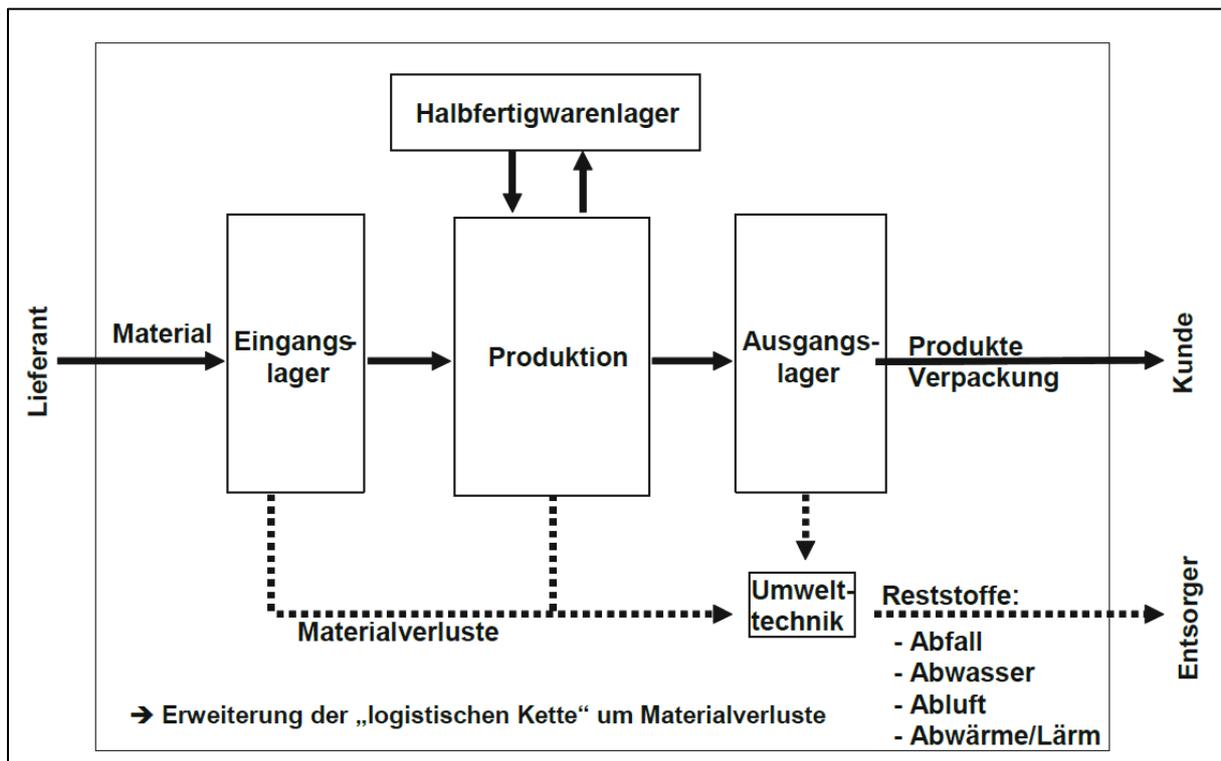


Abbildung 7: Vereinfachtes Materialflussmodell⁶⁴

In Anlehnung an die oben vorgestellten Modelle wird in den praktischen Betrachtungen dieser Masterarbeit ein etwas vereinfachtes Materialflussmodell verwendet. Dieses ist an die zentrale Fragestellung des Rohstoffverbrauchs angepasst und wird immer wieder als Referenz für die Einordnung bestimmter praktischer Untersuchungen usw. in die Fertigungsabläufe genutzt.

⁶³ Vgl. Strobel & Müller, 2012, S. 147 f.

⁶⁴ Strobel & Müller, 2012, S. 148

2.6 Stoff- und Energiebilanzierung

In diesem Abschnitt wird der theoretische Hintergrund der Bilanzierung ein- und ausfließender Stoff- und Energieströme erläutert. Im Anschluss wird kurz erklärt, welche Bedeutung eine derartige Bilanzierungsmethodik für den zu untersuchenden Materialverbrauch hat.

2.6.1 Grundlegendes

Eine wesentliche Grundlage für Informationen bezüglich der Fertigungsprozesse in einem produzierenden Betrieb ist die Bilanzierung der eingesetzten Stoffe und Energien. Damit lassen sich die physischen Bedingungen und Konsequenzen einer industriellen Produktion ermitteln. Bei Stoff- und Energiebilanzen werden ein- und ausgebrachte Mengen gegenübergestellt. Nach dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik kann Energie nicht erzeugt oder vernichtet werden. Sie lässt sich lediglich von einer in eine andere Form umwandeln, bleibt also stets erhalten. Es gibt nach der Relativitätstheorie keinen Unterschied zwischen Masse und Energie. Damit muss der Erhaltungssatz neben der Energie auch für Stoffe gelten. Erfasst man nun alle Stoff- und Energieströme, so muss sich in einer Gegenüberstellung von Inputs und Outputs ein Ausgleich ergeben. Einzige Ausnahme wäre eine Freiwerdung oder Pufferung von Energien und Stoffen innerhalb eines Systems, die den Zeitrahmen der Betrachtung überschreiten. Eine exakte Erhebung aller Flüsse von Stoffen und Energien ist jedoch praktisch kaum durchführbar. Durch die zunehmend komplizierten Flüsse würde dies jeden vernünftigen Rahmen sprengen. Es muss also ein Kompromiss bezüglich der Genauigkeit bzw. des Umfangs der Betrachtung gefunden werden.⁶⁵

Die Bilanzen von Stoffen und Energien lassen sich nach verschiedenen Kriterien einteilen:⁶⁶

- Art der Berechnung und Genauigkeit: Diese hängen vom Durchführungszeitpunkt der Bilanzierung ab. In der Phase der Planung sind auch Analysen experimenteller Natur und Literaturrecherchen zur Verbesserung der Genauigkeit sinnvoll. Da sich hier auftretende Fehler im Nachhinein vervielfachen können, ist es sinnvoll die Zusammensetzung der eingesetzten Stoffe möglichst differenziert zu betrachten.
- Kennzeichnung von Mengenströmen: Hier lassen sich gröbere Bezeichnungen wie z.B. „Abwasser“ von jenen, die auch die Zusammensetzung der Ströme angeben, unterscheiden.
- Erfassungsvollständigkeit: Betrachtungen eines Bilanzbereichs lassen sich dahingehend differenzieren, ob sie alle darin vorkommenden Ströme darstellen, oder lediglich einzelne Stoffe bzw. Stoffgruppen.
- Mengenangaben: Diese Angaben lassen sich in absolute (z.B. kg) oder relative (%) einteilen.

⁶⁵ Vgl. Posch & Klingspiegl, 2012, S. 58 f.

⁶⁶ Vgl. Posch & Klingspiegl, 2012, S. 60

Mit der Erstellung derartiger Bilanzen lassen sich verschiedene wirtschaftliche und umwelttechnische Ziele verfolgen. In jedem Fall sind sie eine Grundvoraussetzung um Schwachstellen und Möglichkeiten zur Optimierung zu erkennen. Sind Bilanzen und Istzustände ermittelt, können Produktionskosten sowie Auswirkungen auf die Umwelt durch das Ergreifen entsprechender Maßnahmen verringert werden. Damit wird eine Reihe positiver Veränderungen ermöglicht. So kann die Einführung überarbeiteter, verbesserter Prozesse zu Energie- und Materialeinsparungen führen. Auch das Ersetzen bisher verwendeter Materialien und Energiequellen durch solche, die billiger, passender oder einfacher verfügbar sind, erlaubt Optimierungen. Ebenso denkbar ist eine verbesserte Ausnützung von Rückständen. Ökologisch betrachtet erleichtert die Bilanzierung das Erfüllen von Umweltstandards, sowie die Entwicklung der gesamten Organisation mit ihrem Personal zu umweltbewussterem Handeln. Dabei ergeben Bilanzen von Stoffen und Energien stets Größen, die technisch-physikalischer Natur sind. Um daraus Entscheidungsalternativen zu ermitteln und auszuwählen, sowie Handlungen abzuleiten, muss noch eine entsprechende Bewertung der Ergebnisse bzw. Größen vorgenommen werden.⁶⁷

2.6.2 Bilanzierung in der Masterarbeit

Ein wesentlicher Zweck der genaueren Ermittlung des Materialverbrauchs ist die Erreichung positiver Effekte, wie sie oben vorgestellt wurden, also in erster Linie die Materialeinsparung, die Auswahl der bestgeeignetsten Materialien sowie eine optimierte Rückstandsnutzung. All dies soll letztendlich zu einer Verbesserung der Kostensituation führen. Um eine genauere Ermittlung des Material- bzw. Rohstoffverbrauchs zu erreichen, muss dafür ein Erfassungsschema gefunden werden. Die in der EPS-Fertigung in Glanegg zu erfassenden Ströme sind in erster Linie expandiertes Polystyrol, Wasser in Form von Dampf und Feuchtegehalt sowie Pentan als Treibmittel. In den späteren Kapiteln des Praxisteils wird ein Schema vorgestellt, wie mittels Bilanzierung dieser Flüsse ein besser definierter Materialbedarf für jedes hergestellte Produkt ermittelt werden kann.

⁶⁷ Vgl. Posch & Klingspiegl, 2012, S. 60 ff.

2.7 Materialmanagement, Stücklisten, Bedarfsermittlung

In diesem Kapitel werden die für die Masterarbeit zentralen Gebiete Materialbedarf und Materialmanagement sowie Stücklisten erläutert. Wichtig ist hierbei auch der Zusammenhang zwischen den verschiedenen Arten der Bedarfsermittlung und der sogenannten Stücklistenauflösung. Es wird daher auch kurz erklärt, welche Rolle diese Themen für die praktischen Untersuchungen einnehmen.

2.7.1 Aufgaben des Materialmanagements

Das Materialmanagement hat die Aufgabe Güter möglichst günstig und rechtzeitig bereitzustellen, um die Nachfrage decken zu können, womit seine wesentlichen Ziele lauten müssen:⁶⁸

- Vermeiden von Unterbrechungen der Produktion bzw. Lieferung durch Fehlbestände
- Möglichst kostengünstige Abwicklung der Administration von eigener Produktion und extern zugekauften Gütern.
- Vermeidung von Gütern, die zu früh oder überhaupt unnötigerweise beschafft wurden und damit zu erhöhten Bestandhaltungskosten führen.

Um diese Aufgaben zu erfüllen, müssen genaue Informationen über Lagerbestände, Aufträge und Fälligkeitstermine vorliegen. Von größter Wichtigkeit ist allerdings ein möglichst umfassendes Wissen über die Bedarfe.⁶⁹

2.7.2 Stücklisten

Eine Stückliste stellt die Zusammensetzung eines Produkts dar, beschreibt also die Einzelteile, aus denen dieses besteht. Sie gibt an, welche Menge an Teilen oder Baugruppen für eine Einheit des betreffenden Produkts benötigt wird. In erster Linie handelt es sich um eine tabellarische Auflistung der Erzeugnisstruktur eines übergeordneten Teils. Dabei kann es sich um ein Endprodukt oder eine Baugruppe handeln. Die untergeordneten Teile, aus denen sich das übergeordnete Teil zusammensetzt, sind unter Angabe ihrer Mengenkoeffizienten darin aufgeführt. Typische Angaben in der Stückliste sind Mengenkoeffizient, Teile- und Variantennummern, sowie mögliche Verweise, etwa auf eine Konstruktionszeichnung.⁷⁰

⁶⁸ Vgl. Schönsleben, 2016, S. 250

⁶⁹ Vgl. Schönsleben, 2016, S. 251

⁷⁰ Vgl. <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/stueckliste-44343/version-267656> (16.11.2018)

Stücklisten gibt es in verschiedenen Ausprägungsformen:⁷¹

- Baukastenstückliste: In ihr sind nur jene Elemente angeführt, die strukturell direkt untergeordnet sind, sowie deren jeweilige Menge. Folglich können diese untergeordneten Elemente selbst wieder in mehrere Elemente zerfallen. Dies kommt insbesondere vor, wenn das Endprodukt aus Baugruppen besteht und in einem mehrstufigen Prozess gefertigt wird.
- Mengenstückliste: Sie enthält eine relativ unstrukturierte Darstellung aller untergeordneten Elemente und ihrer Mengen.
- Strukturstückliste: Dabei handelt es sich um eine Vereinigung der beiden vorher genannten Varianten. Einerseits zeigt sie die Mengen aller Bestandteile eines Produkts, gibt andererseits aber auch deren Hierarchie an.

In Abbildung 8 sind Beispiele für die verschiedenen Arten von Stücklisten dargestellt.

Mengenstückliste		Baukastenstückliste	
P1		P1	
Teil	Menge	Teil	Menge
B1	1	B1	1
B2	2	B2	2
E1	2		
E2	3		
Strukturstückliste		Baukastenstückliste	
P1		B1	
Teil	Menge	Teil	Menge
B1	1	E1	2
E1	2	E2	1
E2	1		
B2	2		
E2	1		
Baukastenstückliste		B2	
P1		B2	
Teil	Menge	Teil	Menge
E2	1	E2	1

Abbildung 8: Stücklistenbeispiele⁷²

⁷¹ Vgl. Eigner, 2014, S. 239

⁷² Eigner, 2014, S. 240

2.7.3 Bedarfsarten

Je nach Abhängigkeit der entstehenden Bedarfe kann man insbesondere zwei Typen unterscheiden:⁷³

- Primärbedarf ist der Bedarf an Fertigprodukten bzw. zum Verkauf bestimmten Ersatzteilen. Er wird auch „unabhängiger Bedarf“ genannt, da er in keinerlei Beziehung zum Bedarf anderer Güter steht.
- Sekundärbedarf ist der Bedarf an Gütern wie Baugruppen, Halbfertigprodukten, Einzelteilen bzw. Komponenten oder Rohstoffen. Er kann vom Bedarf eines anderen Guts (Primärbedarf) abgeleitet werden, da er einen direkten Bezug zu diesem hat. Aus diesem Grund wird er auch als „abhängiger Bedarf“ bezeichnet.

Außerdem gibt es noch den Tertiärbedarf. Dieser beschreibt jene Hilfs- und Betriebsstoffe die im Rahmen der Erzeugung des Primärbedarfs nötig sind.⁷⁴

2.7.4 Deterministisches und stochastisches Materialmanagement

Abhängig vom Zeitpunkt lassen sich zwei Arten des Materialmanagements unterscheiden. Im deterministischen Materialmanagement geht man von einer gegebenen Nachfrage aus und berechnet daraus den entsprechenden Ressourcenbedarf. Das stochastische Materialmanagement schätzt den Bedarf anhand einer Vorhersage ab. Fehler in dieser Prognose werden durch Einbau von Sicherheiten in der Ermittlung berücksichtigt. Eine Unterklasse des stochastischen ist das quasideterministische Materialmanagement. Hier benutzt man für den Primärbedarf die stochastische Methodik, leitet daraus allerdings den Sekundärbedarf deterministisch ab⁷⁵. Es ergeben sich folgende Varianten mit jeweils eigener Ermittlungsmethode:⁷⁶

- Deterministischer Primärbedarf kann direkt aus der Nachfrage gewonnen werden.
- Deterministischer Sekundärbedarf wird vom übergeordneten deterministischen Primärbedarf abgeleitet durch Auflösung der Stücklisten.
- Stochastischer Primärbedarf muss mittels geeigneter Vorhersagemethoden sowie einem gewissen Risiko anhand von Intuition und Heuristiken usw. abgeschätzt werden.
- Stochastischer Sekundärbedarf wird wieder aus dem stochastischen Primärbedarf mittels Auflösung der Stücklisten errechnet.

⁷³ Vgl. Schönsleben, 2016, S. 251

⁷⁴ Vgl. <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/tertiaerbedarf-47172/version-270439> (18.11.2018)

⁷⁵ Vgl. Schönsleben, 2016, S. 251 ff.

⁷⁶ Vgl. Schönsleben, 2016, S. 251 ff.

2.7.5 Stücklistenauflösung

Wie oben bereits erwähnt, spielen Stücklisten für die Ermittlung von Sekundärbedarfen eine wichtige Rolle. Die dabei angewendete Technik wird als Stücklistenauflösung bezeichnet. Dabei wird zur Bedarfsermittlung die Produktstruktur in ihre Einzelkomponenten aufgelöst. Sowohl für die deterministische Sekundärbedarfsermittlung als auch für die Berechnung des stochastischen, abhängigen Bedarfs wird diese Technik eingesetzt. Im zweiten Fall wird sie auch als quasideterministische Stücklistenauflösung bezeichnet.⁷⁷

2.7.6 Einordnung in die Masterarbeit

Im Rahmen dieser Masterarbeit steht der Rohstoffverbrauch der fertigen Produkte im Zentrum des Interesses, da dieser die anfallenden Produktionskosten maßgeblich bestimmt. Wie oben bereits erläutert wurde, zählen Rohstoffe zum Sekundärbedarf. Damit lässt sich der Rohstoffbedarf aus dem Primärbedarf der Fertigerzeugnisse berechnen. Die Verkaufszahlen der Produkte des Unternehmens sind bekannt. Anhand dieser Zahlen kann mittels der in den Stücklisten hinterlegten Mengen an Rohstoff der Rohstoffverbrauch einer Periode abgeleitet werden. Die dafür nötigen Stücklisten liegen im Unternehmen vor. Sie enthalten in der Regel die mengenmäßige Angabe des eingehenden Rohstoffs oder einen Anteil am Halbfertigprodukt (Block), sowie Zusatzangaben wie Verpackungsfolie. Folglich sind sie recht einfach strukturiert (vgl. Abbildung 8).

Im Falle von aus Halbfertigprodukten geschnittenen Endprodukten kann durch Stücklistenauflösung aus den Fertigprodukten, über die Halbfertigerzeugnisse, auf den Rohstoffverbrauch rückgerechnet werden (vgl. Kapitel 2.7.5). Grundvoraussetzung dafür ist, dass der in den Stücklisten hinterlegte Rohstoffbedarf der Realität möglichst exakt entspricht. Alle Betrachtungen des Rohstoffverbrauchs, sei es zur zukünftigen Beschaffung des nötigen Rohstoffs über stochastische oder deterministische Methoden, oder zur Überprüfung des Verbrauchs vergangener Perioden, benötigen daher exakte Stücklisten. Die Masterarbeit beschäftigt sich folglich in erster Linie mit Untersuchungen und Methoden zur Analyse und Verbesserung des genauen Rohstoffverbrauchs je Produkt.

⁷⁷ Vgl. Schönsleben, 2016, S. 254 f.

2.8 Kostenrechnung

Fokus dieser Masterarbeit ist die Ermittlung von Material- bzw. Rohstoffverbrauch. Der Hauptgrund, um nach einem genau bekannten Materialeinsatz zu streben, ist die Ermittlung bzw. Senkung der Materialkosten für die jeweiligen Produkte. Daher sollen in diesem Kapitel wesentliche theoretische Grundlagen der Kostenrechnung vorgestellt werden, sowie eine Einordnung der Materialkosten in diese Thematik.

2.8.1 Definition

Die *Kostenrechnung* ist ein zentraler Teilbereich des internen Rechnungswesens. Dabei werden Kosten zunächst erfasst, um sie einem bestimmten Bezug zuzuordnen, beispielsweise Produktgruppen. Außerdem werden sie je nach Verwendungszweck ausgewertet, was durch Selektion, Verknüpfung oder Verdichtung geschehen kann. Im Gegensatz zum externen Rechnungswesen sind die Informationen des internen Rechnungswesens bis auf einzelne Ausnahmefälle nicht für Bereiche außerhalb des Unternehmens vorgesehen. Vielmehr liegt ihr Bestimmungszweck im Inneren, zum Beispiel in der Führungsetage oder bei Leitern von einzelnen Kostenstellen.⁷⁸

2.8.2 Ziele

Wie bereits erwähnt, soll die Kostenrechnung Informationen für Personen in leitenden Funktionen zur Verfügung stellen. Dies dient in erster Linie zur Schaffung einer Basis, um damit ein Unternehmen operativ steuern zu können. Wichtig ist, dass diese Informationen in einer Form vorliegen mit der betriebliche Entscheidungen getroffen werden können.⁷⁹ Typische Entscheidungen dieser Art sind:⁸⁰

- Entscheidung über Annahme eines Auftrags.
- Notwendigkeit von Rationalisierungsmaßnahmen und wie diese gegebenenfalls durchzuführen sind.
- Ausscheiden eines Produkts aus dem Sortiment.
- Eigene Erzeugung oder Fremdbezug bestimmter Leistungen.
- Finden eines geeigneten Produktionsverfahrens zur Erledigung eines Auftrags.

2.8.3 Aufgaben

Zur Erreichung dieser Ziele ist ein Aufbau der Kosten- und Erlösrechnung notwendig, mit dessen Hilfe die folgenden vier Punkte geklärt werden können:⁸¹

⁷⁸ Vgl. <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/kostenrechnung-39542/version-262949> (12.12.2018)

⁷⁹ Vgl. Horsch, 2015, S. 17

⁸⁰ Vgl. Horsch, 2015, S. 18

⁸¹ Vgl. Horsch, 2015, S. 18 f.

1. Die *Kostenartenrechnung* soll Auskunft darüber geben, in welcher Höhe die Kosten einer Periode liegen und wie diese sich einteilen lassen.
2. In der *Kostenstellenrechnung* werden die aus der Kostenartenrechnung stammenden Kosten organisatorischen Einheiten, beispielsweise Abteilungen, zugeordnet.
3. Mit der *Kostenträgerstückrechnung bzw. Kalkulation* folgt die Zuordnung der Kosten zu einzelnen Produkten oder Aufträgen.
4. In der *Erfolgsrechnung* werden schließlich Kosten und Erlöse einer Periode verglichen, um das Betriebsergebnis festzustellen.

Die Kostenartenrechnung stellt also Daten für weitere Schritte der Kostenrechnung, vor allem Kostenstellenrechnung, Kalkulation und Betriebserfolgsrechnung, bereit. Ihre zwei wesentlichen Aufgaben sind Dokumentation und Gliederung. Die Dokumentation dient zur Erfassung des Güterverzehr einer Periode im gesamten Betrieb sowie zugehöriger Wertansätze. Im Rahmen ihrer Gliederungsfunktion ordnet die Kostenartenrechnung alle angefallenen Kosten nach den verbrauchten Gütern. Dabei gibt es verschiedene Kriterien auf deren Basis eine Gliederung erfolgen kann. Diese müssen nach dem Zweck bzw. der weiteren Verwendung der daraus gewonnenen Informationen ausgewählt werden.⁸² Typische Gliederungsmöglichkeiten sind:⁸³

- Nach verbrauchten Einsatzfaktoren, wie Sach-, Personal- oder Kapitalkosten
- Nach betrieblicher Funktion, wie Beschaffung, Fertigung oder Vertrieb
- Nach Verrechnungsart
- Nach Erfassungsart

Eine zentrale Kostenart bei produzierenden Betrieben sind die Materialkosten, welche sich in ihrer Art wiederum folgendermaßen unterteilen lassen:⁸⁴

- *Rohstoffe* sind die hauptsächlichen Bestandteile eines Produkts, beispielsweise Holz eines Möbelproduzenten.
- *Hilfsstoffe* fließen zwar auch in das Produkt, aber eher in ergänzender Form. Beispiele sind Schrauben oder Klebstoff.
- *Betriebsstoffe* sind nicht unmittelbare Bestandteile eines Produkts, aber dennoch unverzichtbar für den Produktionsablauf, wie Wasser, Treibstoffe oder Strom.
- *Bezogene Fertigteile* werden zugekauft und unverändert in das Produkt eingebaut, beispielsweise Sitze in einem PKW.
- *Handelswaren* dienen nicht zu Be- oder Verarbeitung sondern lediglich zur Ergänzung des Produktsortiments.

Der im Mittelpunkt dieser Masterarbeit stehende Rohstoffverbrauch ist also ein Teil der Materialkosten der Hirsch Servo AG. Da es sich um ein produzierendes Unternehmen handelt, nehmen die Materialkosten eine besonders zentrale Rolle ein.

⁸² Vgl. Plinke & Rese, 2006, S. 61 ff.

⁸³ Vgl. Plinke & Rese, 2006, S. 64

⁸⁴ Vgl. Horsch, 2015, S. 46 f.

2.9 Datenanalyse und Statistik

Im Zuge der Ermittlung von Fertigungsdaten werden in dieser Masterarbeit mehrere Messreihen durchgeführt, deren Ergebnisse analysiert und diskutiert werden. Die dabei angewendeten statistischen Berechnungen bestehen mit dem arithmetischen Mittel und der Spannweite aus zwei wesentlichen Merkmalen. Sie sind leicht verständlich und geben den für die vorhandenen Messreihen nötigen Überblick.

2.9.1 Ablauf statistischer Untersuchungen

Grundsätzlich lässt sich der Ablauf einer statistischen Untersuchung in vier große Abschnitte unterteilen:⁸⁵

1. Vorbereitung
2. Erhebung
3. Aufbereitung und Darstellung
4. Auswertung und Analyse

In der Regel sind dabei die Untersuchungsvorbereitung und Erhebung der Daten, also die ersten beiden Schritte, jene, die am meisten Zeit in Anspruch nehmen. Sie besitzen auch die höchste Wichtigkeit des gesamten Unterfangens. Der wesentliche Inhalt der Vorbereitung ist es, den Zweck der statistischen Untersuchung zu definieren. Die interessierenden Informationen und Daten werden festgesetzt, womit hier auch der Grundstein für den Erfolg der gesamten Untersuchung gelegt wird.⁸⁶

Danach beginnt die Phase der Datenerhebung, wobei Primärstatistik und Sekundärstatistik bzw. unter Umständen auch beide Arten angewendet werden. Die Primärstatistik verwendet direkt durchgeführte Beobachtungen, Experimente und Befragungen, während die Sekundärstatistik mit bereits vorhandenen Daten arbeitet. Die entsprechenden Erhebungen wurden also bereits anderweitig durchgeführt. Beispiele sind amtliche Statistiken von Bund, Ländern etc., die auf Daten von Vorgängen der Verwaltung aufbauen, sowie nicht amtliche Statistiken, wie jene des Internationalen Währungsfonds. Typische Methoden der Primärstatistik sind Befragungen oder Stichproben. Die Stichprobe ist häufig die einzig sinnvolle Art konkrete Daten zu erfassen. Zeit, Personal und Kosten sind oft jene limitierenden Faktoren, die keine allumfassende Sammlung sämtlicher vorhandener Informationen zulassen. Stichproben erlauben es, nur einen Teil der interessierenden Masse zu untersuchen und daraus Schlüsse über die Gesamtmasse zu ziehen. Die im zweiten Schritt erhobenen Daten müssen danach aufbereitet und analysiert werden. Dies geschieht in erster Linie mittels Tabellen und Grafiken. Danach werden sogenannte Maßzahlen errechnet und gegebenenfalls weitere statistische Analysen bzw. Auswertungen durchgeführt.⁸⁷

⁸⁵ Vgl. Kohn, 2005, S. 7 f.

⁸⁶ Vgl. Kohn, 2005, S. 7 f.

⁸⁷ Vgl. Kohn, 2005, S. 7 ff.

2.9.2 Technische Anwendung

Für Größen physikalischer bzw. technischer Natur ist die direkte Übertragung einiger statistischer Ausdrücke oft nicht zielführend. In der Technik allgemein und in dieser Masterarbeit im speziellen geht es um physikalische Größen wie z.B. Gewichte von Gegenständen. Erhoben werden Messwerte, die mit einer gewissen Streuung auftreten. Die in der Statistik anzutreffende Beschreibung, dass Stichproben aus einer Grundgesamtheit gezogen werden ließe sich folgendermaßen auf technische Messreihen übertragen. Sämtliche theoretisch möglichen Messungen, also eine unendlich große Anzahl, würden die Grundgesamtheit darstellen. Die tatsächlich durchgeführten Messungen könnten dann als die gezogenen Stichproben angesehen werden. Eine ermittelte Größe kann von mehreren Faktoren abhängig sein. Dabei sollte man versuchen, jene Faktoren zu messen, die tatsächlich einen merkbaren Einfluss auf die zu erfassende Größe haben. Sie werden während eines Versuchs kontrolliert eingestellt. Daneben gibt es Faktoren, die keinen nennenswerten Beitrag zur gesuchten Größe leisten. Sie bedürfen keiner Einstellung und werden häufig als Kovariablen bezeichnet.⁸⁸

Beim Erheben der Daten steigt der Informationsgehalt in der Regel mit der Anzahl der Messungen. Damit wird auch die Berechnung nicht direkt messbarer Größen entsprechend genauer. Würde man theoretisch unendlich viele Messungen durchführen, wäre eine Größe bis auf die Messungenauigkeit des Messgeräts bestimmt. Mit zunehmendem Umfang einer Messreihe steigt jedoch auch der Aufwand, insbesondere in finanzieller Hinsicht. Es muss daher ein Kompromiss zwischen ausreichender Informationssammlung und dafür nötigem Aufwand gefunden werden.⁸⁹

2.9.3 Grafiken und Maßzahlen

Untersucht man jeweils nur ein Merkmal einer statischen Einheit, so wird von eindimensionalen Merkmalen gesprochen. In der Regel wird bei einer statistischen Analyse mit entsprechenden Grafiken gestartet. Damit lässt sich die Werteverteilung visualisieren, sowie eine Interpretation der Messwerte anstellen. Außerdem ist es wünschenswert, bestimmte Eigenschaften der Verteilung zu ermitteln, von denen hier Lage und Streuung besonders hervorgehoben werden sollen. Die Lage kann synonym für Niveau verwendet werden, während die Streuung anzeigt, wie sehr sich die Werte unterscheiden. Maßzahlen verdichten Informationen über die Werteverteilung. Der mit einer Verdichtung einhergehende Informationsverlust vermindert allerdings die Aussagekraft einer Maßzahl. Dessen muss man sich bei der Interpretation einer Maßzahl bewusst sein, da eine unbedachte Verwendung derselben zu falschen Schlüssen führen kann.⁹⁰

⁸⁸ Vgl. Bättig, 2015, S. 29 ff.

⁸⁹ Vgl. Bättig, 2015, S. 29 ff.

⁹⁰ Vgl. Kohn, 2005, S. 36

2.9.4 Arithmetisches Mittel

Als Maßzahl zur Bestimmung der Lage quantitativer, metrischer Daten eignet sich das arithmetische Mittel. Da Informationen über den Abstand der Daten vorhanden sein müssen, setzt es einen metrischen Datensatz voraus. Ist dies erfüllt, lässt sich aus geordneten metrischen Daten deren Schwerpunkt ermitteln. Formel 1 beschreibt die Berechnung des arithmetischen Mittels bei n verwendeten Werten einer Beobachtung. Die Summe aller Werte wird durch deren Anzahl dividiert.⁹¹

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n x_i$$

Formel 1: Arithmetisches Mittel⁹²

\bar{x} ...Arithmetisches Mittel

n ...Anzahl der Werte einer Beobachtung

x_i ...Beobachtungswerte

2.9.5 Spannweite

Neben dem Mittelwert als Maßzahl für die Lage der Daten wird noch eine solche für deren Streuung benötigt. Dafür wird die Spannweite verwendet, die gleichsam das einfachste Maß für die Streuung eines Datensatzes darstellt. In Formel 2 ist die Berechnung angeführt. Bei n verwendeten Beobachtungswerten ($i = 0, \dots, n$) ist die Spannweite w die Differenz zwischen dem höchsten Wert und dem niedrigsten auftretenden Wert.⁹³

$$w = \max_i x_i - \min_i x_i$$

Formel 2: Spannweite⁹⁴

w ...Spannweite

$\max_i x_i$...größter Beobachtungswert

$\min_i x_i$...kleinster Beobachtungswert

2.9.6 Verwendung in der Masterarbeit

Wie oben bereits erwähnt, sind Zeit, Kosten und Personalressourcen deutlich einschränkende Randbedingungen bei den Messreihen bzw. Untersuchungen dieser Masterarbeit. Daher ist die Anzahl der ermittelten Messwerte meist relativ klein. Es musste der in Kapitel 2.9.2 erwähnte Kompromiss zwischen Informationssammlung und Aufwand gefunden werden. Umfangreiche, tiefergehende, statistische Analysen machen auf dieser überschaubaren Datenbasis wenig Sinn. Arithmetisches Mittel und Spannweite geben jedoch schnell und einfach Auskunft über Lage und Streuung der ermittelten Messwerte. Für die vorliegende Masterarbeit ist dies ausreichend. Der arithmetische Mittelwert wird nachfolgend auch als „Durchschnitt“ (mit dem Symbol \emptyset) oder einfach als „Mittelwert“ bezeichnet.

⁹¹ Vgl. Kohn, 2005, S. 65

⁹² Vgl. Kohn, 2005, S. 65

⁹³ Vgl. Kohn, 2005, S. 72 f.

⁹⁴ Vgl. Kohn, 2005, S. 72

3 Praktische Problemlösung

Nachdem alle relevanten theoretischen Grundlagen erörtert wurden, kann nun mit der praktischen Problemlösung begonnen werden. Zunächst werden als Ausgangspunkt sämtlicher weiterer Untersuchungen die grundsätzlichen Fertigungsabläufe in Glanegg grafisch dargestellt und erläutert. Unterschieden wird dabei in die Herstellung von Dämmstoffen einerseits und von Formteilen andererseits. Danach werden die folgenden Bereiche untersucht, analysiert und diskutiert:

- Rohstoff
- Fertige Formteile
- Blöcke und daraus geschnittene Dämmplatten
- Ausschuss und Rezyklatkreislauf

Aus den Inhalten, Ergebnissen, Schlussfolgerungen usw. der angestellten Untersuchungen wird ein Verbesserungskonzept erarbeitet, dessen Bestandteile und Vorschläge nacheinander vorgestellt werden.

3.1 Fertigungsprozesse und Materialfluss

Um den Materialverbrauch der Produkte zu ermitteln, müssen die Fertigungsprozesse sowie die auftretenden Materialflüsse analysiert werden. Als Startpunkt dafür ist eine Darstellung und Beschreibung der in Glanegg durchgeführten Fertigungsprozesse essentiell. Im Rahmen der Problemlösung vor Ort waren die Inhalte dieses Kapitel der allererste Schritt. Vor der Entscheidung, welche Bereiche zu untersuchen sind bzw. worauf sich der Fokus richten soll, wurden grafische Prozessdarstellungen der Fertigung erarbeitet und dessen einzelne Schritte näher betrachtet.⁹⁵ Damit ist dieses Kapitel der Ausgangspunkt für alle weiteren praktischen Bearbeitungen des Themas, wie Messreihen, Datenanalysen, Optimierungsmöglichkeiten usw.

Aus der Betrachtung des Gesamtprozesses als Startpunkt lässt sich ableiten, welche Untersuchungen, Analysen etc. durchgeführt werden müssen, um letztendlich zu einem Verbesserungskonzept zu gelangen. Die entstandenen Darstellungen orientieren sich an den in Kapitel 2.5 vorgestellten Inhalten, insbesondere den Materialflussmodellen. Zweck der Grafiken ist es, einen guten, leicht verständlichen Überblick über die Fertigungsprozesse zu erhalten. Der Fokus des betrachteten Materialflusses liegt auf der Frage des Rohstoffverbrauchs.

⁹⁵ Besprechung mit Klaus Unterleutner und Michael Klimisch am 08.08.2018

Grundsätzlich entsprechen die Herstellungsprozesse der Hirsch Porzell in Glanegg den allgemeinen Grundlagen und Verfahrensbeschreibungen von EPS und dessen Herstellung aus Kapitel 2.1.3. Da die dortige theoretische Beschreibung jedoch für EPS-Produkte ganz allgemein gilt, weichen die Prozesse für die in Glanegg hergestellten Produkte in einigen Punkten davon ab. Je nach Produkt und speziellen Anforderungen im Unternehmen sind sie entsprechend angepasst. Daher ist es unerlässlich, sich ein Bild von den tatsächlich herrschenden Verhältnissen zu machen. Zwei Typen von Fertigungsprozessen lassen sich dabei am Hauptstandort unterscheiden, je nach Art des hergestellten Produkts:

- Der Prozess für den Bereich Block bzw. Dämmstoffe, wo die Fertigprodukte Platten sind, welche aus dem Halbfertigprodukt Block geschnitten werden.
- Der Prozess für den Bereich Formteile. Hier werden die Fertigprodukte direkt aus dem vorgeschäumten Material hergestellt, es gibt also kein Halbfertigprodukt. Es handelt sich dabei um Verpackungen, Teile von Fußbodenheizungen und andere Formteile, z.B. Elemente von Sturzhelmen.

3.1.1 Prozessbeschreibung Block/Platte

Als erstes wird jener Fertigungsbereich im Hauptwerk Glanegg betrachtet, bei dem aus Halbfertigprodukten (Blöcke) Fertigprodukte (Platten) geschnitten werden. In seinen Grundzügen entspricht der Prozess der allgemeinen Beschreibung in Kapitel 2.1.3.2 bzw. der diskontinuierlichen Variante „Blockschäumen“ in Abbildung 4. Dies geschieht in der Fertigungshalle mit Namen „Werk 7“, wo in erster Linie Dämmplatten für Böden, Fassaden, Dächer usw. gefertigt werden.

3.1.1.1 Grafische Darstellung

Entsprechend den real herrschenden Verhältnissen wurde das in Abbildung 9 dargestellte Schema des Fertigungsbereichs Block entwickelt. Die Visualisierung des Prozesses ist der erste Schritt der Analyse. Die Herstellung im Bereich Block wird nun Schritt für Schritt beschrieben, um den Weg für tiefergehende Analysen der einzelnen Teile des Prozesses zu bereiten. Die einzelnen Bereiche werden im Anschluss näher erklärt.

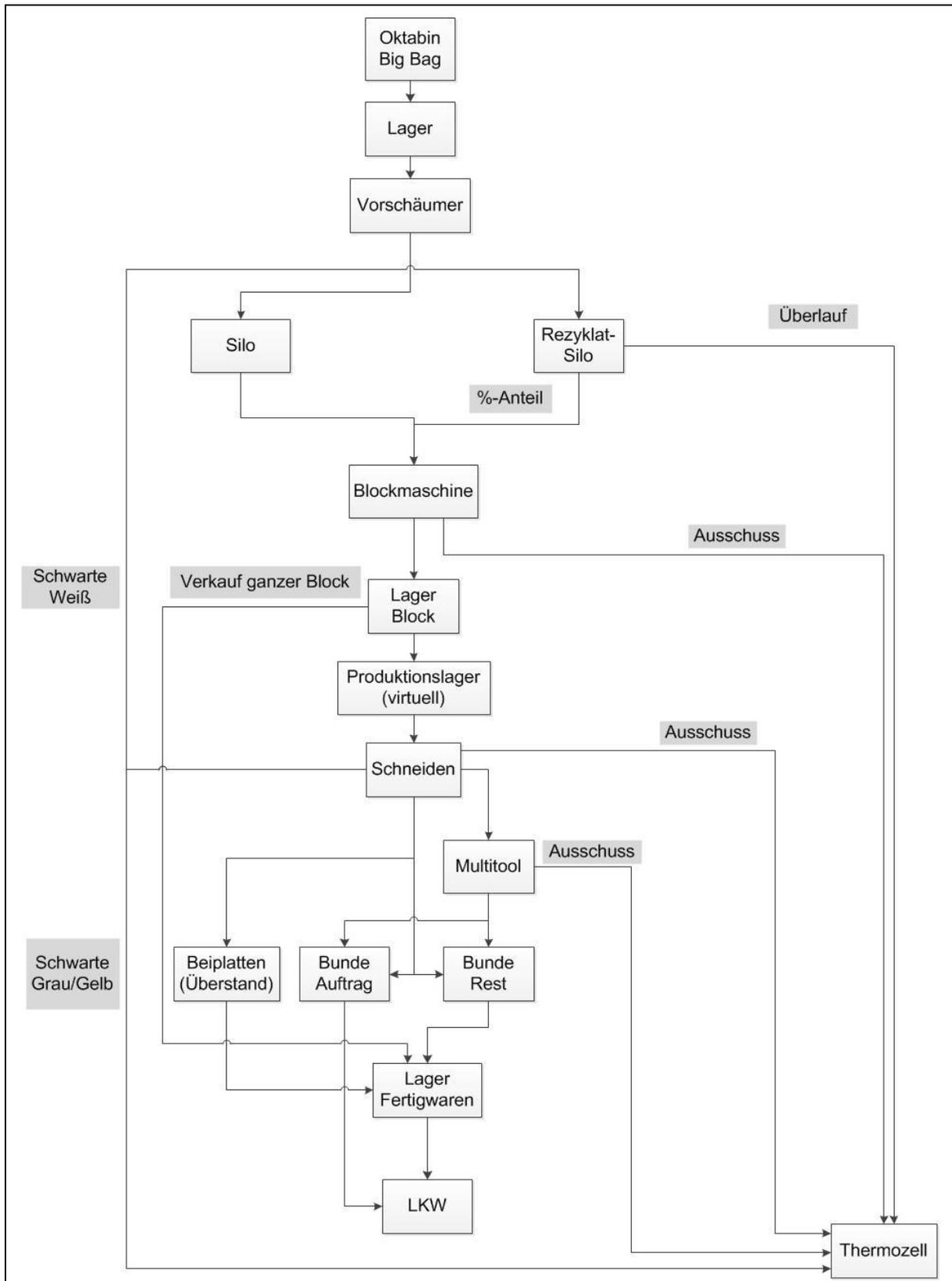


Abbildung 9: Fertigungsprozess Block/Platte

3.1.1.2 Angelieferter Rohstoff

Der Rohstoff expandierbares Polystyrol (EPS) wird, wie schon in Kapitel 2.1.3 beschrieben, in Form von PS-Perlen bzw. PS-Granulat mit oder ohne bestimmte Zusatzstoffe vom jeweiligen Rohstoffhersteller geliefert. Zu den im Folgenden erwähnten diversen Inhaltsstoffen, besonderen Eigenschaften und Lieferformen der einzelnen Rohstoffe sei auf die jeweiligen Datenblätter ihrer Hersteller verwiesen.^{96, 97, 98} Typischerweise erfolgt die Lieferung durch LKW, wobei eine solche aus etwa 20 Einheiten besteht, welche auf Paletten transportiert werden. Die Liefereinheiten besitzen zwei mögliche Formen:

- „Oktabins“: Achteckige Kartonbehälter
- „Big Bags“: Große Säcke aus Kunststoff

Im Inneren von Big Bags und Oktabins befindet sich der sogenannte Inliner, ein Plastiksack, der zum dichten Verschließen der Lieferung dient. Sowohl Oktabins als auch Big Bags enthalten in etwa die gleiche Menge Rohstoff. Im Folgenden wird stets von „Oktabins“ die Rede sein, da Big Bags als Liefereinheiten vergleichsweise selten verwendet werden. Das Netto-Füllgewicht bewegt sich im Bereich von 1000 bis 1200 Kilogramm. Die Rohstoffe werden von verschiedenen Herstellern bezogen (z.B. BASF, Sunpor, Synthos). Diese bieten wiederum eine Reihe unterschiedlicher Materialtypen an. Durch die große Zahl an Rohstoffherstellern und deren Produktvarianten ergibt sich eine erhebliche Vielfalt der angelieferten Rohstoffe. In den Lieferungen sind je nach Rohstofftyp mehrere Inhaltsstoffe vorhanden:

- Polystyrol als grundlegender Rohstoff
- Pentan, das zum Aufschäumen nötige Treibmittel
- Ein gewisser Anteil an Wasser bzw. Feuchtegehalt
- Teilweise noch weitere Zusatzstoffe, wie:
 - Antistatika
 - Flammschutzmittel
 - Graphit
 - Farbstoffe

Analysen und Nachforschungen über die Bestandteile des angelieferten Rohstoffs, insbesondere tatsächliche Liefermengen und Feuchtigkeitsgehalte werden in späteren Kapiteln einen wesentlichen Bereich einnehmen. Bis zu ihrer Verarbeitung werden die Rohstoffbehälter überdacht oder im Freien am Werksgelände gelagert.

⁹⁶ Vgl. z.B. BASF SE, 2015, Sicherheitsdatenblatt Styropor® F 415 E

⁹⁷ Vgl. z.B. BASF SE, 2016, Technisches Merkblatt Styropor® F 15 E Reihe

⁹⁸ Vgl. z.B. Sunpor, 2018, Technisches Merkblatt SUNPOR® A 245 SE

3.1.1.3 Vorschäumen

Zum Zeitpunkt der Verwendung wird der Rohstoffbehälter mittels Stapler zum Vorschäumer transportiert. Dort wird der gesamte Inhalt eines Oktabins entleert und die EPS-Perlen aufgeschäumt. Als Folge entsteht daraus das sogenannte Silomaterial. Hier wird durch die Maschineneinstellung die Dichte des geschäumten Materials definiert, indem sich die Rohstoffperlen verschieden stark aufblähen. Im Bereich Block bzw. Dämmstoffe werden folgende Dichten hergestellt:⁹⁹

- F und W15: 15 kg/m³
- W20 und W2019: 20 kg/m³
- W25: 25 kg/m³
- W30: 30 kg/m³

Die Dichte des Endprodukts (Platte) wird im Wesentlichen hier definiert, in den folgenden Schritten ändert sich daran nur mehr wenig. Alle Dichtetypen werden in verschiedenen Farben (weiß, grau, gelb) hergestellt, wobei weiß und grau die zwei wesentlichen Farbvarianten sind. Daneben gibt es auch gesprenkelte Produkte, bei denen z.B. im weißen Grundmaterial graue Perlen eingearbeitet sind.

3.1.1.4 Lagerung im Silo

Nach dem Vorschäumen wird das Material mittels Rohrleitungen in Silos zur Zwischenlagerung befördert. Abhängig von seiner Dichte muss das Silomaterial unterschiedlich lange lagern, bevor es weiterverwendet werden kann. Je niedriger die Dichte, desto kürzer die Ablagerungszeit, wobei in Glanegg die leichtesten Materialien F und W15 circa einen Tag lagern. Zumindest derzeit gibt es bezüglich Ablagerungszeiten etc. keine strengen Vorgaben. Größtenteils basieren die Vorgänge auf Erfahrungen der verantwortlichen Personen (Produktionsleiter, Schichtleiter, Maschinenbedienpersonal). Das Material wird nach Dichten und Farben getrennt gelagert. Dementsprechend viel Platz wird für die erhebliche Zahl an Silos benötigt.

3.1.1.5 Blockherstellung und Lagerung

Nach ausreichender Ablagerungszeit erfolgt die Verarbeitung des Silomaterials zu Blöcken. Dies geschieht in den zwei im Werk 7 arbeitenden Blockmaschinen („Blockmolds“). Dabei wird das vorgeschäumte Material über Rohrleitungen in eine Blockform eingeblasen. Zusätzlich wird ein per Maschineneinstellung definierter Anteil an recyceltem Material beigemischt. Auf das Thema Rezyklatkreislauf und Wiederverwendung von bereits geschäumtem Material wird in den folgenden Kapiteln noch eingegangen, siehe dazu außerdem Theoriekapitel 2.3. Auf hoher Temperatur und unter Zugabe von Wasserdampf werden die Kügelchen in die Form eines großen Blocks gebracht und anschließend ausgestoßen.

⁹⁹ Vgl. Hirsch Porozell GmbH, 2017, Produktsortiment Dämmstoffe (Broschüre)

Die in Glanegg hergestellten Blöcke haben ein Volumen von 2,67 m³ und sind leicht konisch geformt, was die Entformung aus der Blockmaschine erleichtert. Im Anschluss wird jeder Block auf einem Förderband zur Entnahmestelle gefördert und erhält ein Etikett zur Identifikation. Je drei Blöcke werden gestapelt und in der Fertigungshalle gelagert. Es ergeben sich lange Reihen von Blöcken, die dreifach aufeinander gestapelt sind. Auch hier müssen bestimmte Mindestablagerungszeiten eingehalten werden, analog zum Silomaterial. Hohe Dichten benötigen wiederum mehr Zeit, bis sie zur Weiterverarbeitung bereit sind.

3.1.1.6 Schneiden, Lagern und Ausliefern

Sind die Blöcke lange genug abgelagert, können sie weiterverwendet, also zu den Endprodukten (Platten) geschnitten werden. Stapel von je drei Blöcken übereinander werden mittels Stapler entnommen und zur Schneidstraße transportiert. Hier werden ihnen die Etiketten abgenommen, die gescannt und auf ein Formular geklebt werden, welches der Dokumentation dient. Buchungstechnisch werden die Blöcke derzeit vor dem Schneiden in ein sogenanntes virtuelles Blocklager gebucht. Dieses soll Unregelmäßigkeiten (z.B. durch ungenaue Stücklisten) aus der Buchung des realen Blocklagers fernhalten. Für die Analyse des Materialflusses und –verbrauchs spielt dieses Produktionslager jedoch keine wesentliche Rolle.

Mittels Heißdrähten werden die leicht konischen Blöcke zunächst auf ein einheitliches Format von 2 x 1 x 1,2 m zugeschnitten, was ein Volumen von 2,4 m³ ergibt. Der dabei abfallende Rest wird als „Schwarte“ bezeichnet. Im Anschluss werden die Blöcke in verschiedene Formate geschnitten, je nach Kundenwunsch.¹⁰⁰ Mehrere Platten werden dann mittels Straffpackfolie zu Bündeln zusammengefasst, in denen sie ausgeliefert werden. Je dünner die Platten, desto mehr Platten werden in einem Bund zusammengefasst. Die Verpackungsfolie ist entweder im Design der Hirsch Gruppe gehalten, oder in der Optik des Kundenunternehmens, welches hier in Auftrag produzieren lässt.

Außerdem werden an einer speziellen Maschine, dem sogenannten Multitool, kehlförmige Platten geschnitten, die ebenfalls zu Bündeln zusammengefasst werden. Es fallen zudem sogenannte Beiplatten bzw. Überstandsplatten an, falls die Dicken der Platten keine exakte Ausnutzung des gesamten Blocks zulassen. Beiplatten und Restbunde werden im Fertigwarenlager gelagert, je nach Platzverfügbarkeit in der Halle oder im Freien. Bunde, die direkt für einen Kundenauftrag hergestellt wurden, werden zeitnah auf LKW verladen und ausgeliefert. Der Zeitraum zwischen Kundenbestellung und Auslieferung beträgt häufig nur ein bis zwei Tage, da die Dämmmaterialien für Baustellen kurzfristig zur Verfügung stehen müssen. Alle anderen Bunde gelangen ins Fertigwarenlager.

¹⁰⁰ Vgl. Hirsch Porozell GmbH, 2017, Produktsortiment Dämmstoffe (Broschüre)

Es gibt gelegentlich auch Kundenbestellungen für ungeschnittene, also ganze Blöcke. Sie werden direkt in Blockform ausgeliefert. Dieser Ausnahmefall ist für die vorliegende Masterarbeit nicht relevant. Bei den verschiedenen Lagern (Block, Rohstoff, Fertigwaren etc.) handelt es sich nicht um räumlich getrennte Lager, sondern vielmehr um bestimmte Bereiche einer Fertigungshalle bzw. des Werksgeländes, die nicht scharf voneinander abgetrennt sind.

3.1.1.7 Ausschuss und Rezyklatkreislauf

Bisher unerwähnt geblieben ist der Fluss von Ausschuss und Recycling-Material, wie er in Abbildung 9 zu sehen ist. Zunächst muss vorausgeschickt werden, dass im Werk in Glanegg de facto kein Abfall von EPS anfällt. Die angewendete Wiederverwertung des Materials lässt sich in Bezug auf Kapitel 2.3 dem stofflichen bzw. werkstofflichen Recycling zuordnen. Konkret gibt es am Standort zwei Möglichkeiten das Ausschussmaterial zu verwerten.

Geschäumtes EPS, das bereits einmal Bestandteil eines geformten Blocks war, kann im Prozess rückgeführt und als Rezyklatanteil neu geformten Blöcken beigemischt werden. Derzeit funktioniert dies nach folgendem Kreislauf: Weißes Material, welches beim Zuschneiden der Blöcke von 2,67 m³ auf 2,4 m³ abfällt, also die weiße Schwarte, wird über ein Förderband zu einem Schredder geleitet, zerkleinert und in separaten Silos gelagert. Aus diesen Rezyklatsilos wird schließlich beim Formen neuer Blöcke Material entnommen und dem frisch geschäumten EPS zu einem definierten Anteil beigemischt. Der Prozentsatz des beigefügten Recycling-Materials wird über die Maschineneinstellung der Blockmaschine eingestellt.

Alle anderen Ausschüsse werden nicht rückgeführt bzw. finden keine Verwendung in neuen Blöcken. Sie stammen aus folgenden Quellen:

- Abfallende graue und gelbe Schwarte kommt im Gegensatz zur weißen Schwarte nicht in den Rezyklatkreislauf.
- Weiße, graue und gelbe Ausschussteile, die im Laufe des Fertigungsprozesses anfallen, also beim Blockformen, Lagern, Schneiden, sowie innerbetrieblichen Transport.
- Sollten die Rezyklatsilos, die ausschließlich mit der weißen Schwarte befüllt werden, ihren maximal möglichen Füllstand überschreiten und besteht die Gefahr des Überlaufens, so wird dieses überschüssige Material ebenfalls als gewöhnlicher Ausschuss behandelt.

Die oben genannten drei Ausschussarten werden nicht entsorgt, sondern innerhalb der Hirsch Servo AG wiederverwendet. Dies geschieht in der Sparte Thermo Zell direkt am Standort Glanegg. Auf dieses Thema wird in Kapitel 3.1.3 noch näher eingegangen.¹⁰¹

¹⁰¹ Vgl. <https://www.hirsch-gruppe.com/de/thermozell/eps-ausgleichsdaemmung.html> (07.12.2018)

3.1.2 Prozessbeschreibung Formteile

Als nächstes soll der Fertigungsablauf von Formteilen in „Werk 1“ („Verpackung“) und „Werk 2“ („Fußbodenheizung“) anhand eines gleichartigen Prozessschemas wie in Kapitel 3.1.1 beschrieben werden. Hier werden Verpackungen, Platten für Fußbodenheizungen und weitere Formteile hergestellt. Im Grunde ähnelt der Prozess wiederum stark der theoretischen Beschreibung in Kapitel 2.1.3.2 bzw. der diskontinuierlichen Variante „Plattenschäumen“ in Abbildung 4. Es werden also Formteile direkt und ohne Halbfertigprodukt aus dem vorgeschäumten EPS hergestellt. Wesentlicher Unterschied zum oben erläuterten theoretischen Ablauf ist, dass nicht (Dämm-)Platten, sondern verschiedenste Formteile auf diese Weise produziert werden.

3.1.2.1 Grafische Darstellung

Analog zur Fertigung im Bereich Block wurde auch zur Analyse der Fertigung von Formteilen zunächst der Herstellungsprozess visualisiert. Darauf aufbauend können nähere Analysen vorbereitet und durchgeführt werden. In Abbildung 10 ist das Schema der Formteilherstellung dargestellt. Es fällt sofort auf, dass der Prozess wesentlich einfacher ist als jener der Dämmstoffe, vgl. dazu Abbildung 9. Die sich ergebende visuelle Prozessdarstellung weist deutlich weniger Herstellungsschritte, Schleifen und Verschachtelungen auf. Dies hat insbesondere zwei Gründe:

- Es gibt hier kein Halbfertigprodukt (Block), denn die Fertigprodukte werden direkt aus dem vorgeschäumten Silomaterial geformt.
- Der anfallende Ausschuss gelangt in keinen Rezyklatkreislauf, sondern wird ausschließlich in der Unternehmenssparte Thermozell verarbeitet.

Im Anschluss werden wiederum die einzelnen Schritte näher erläutert, wobei sich viele Ähnlichkeiten mit dem Dämmstoffbereich zeigen.

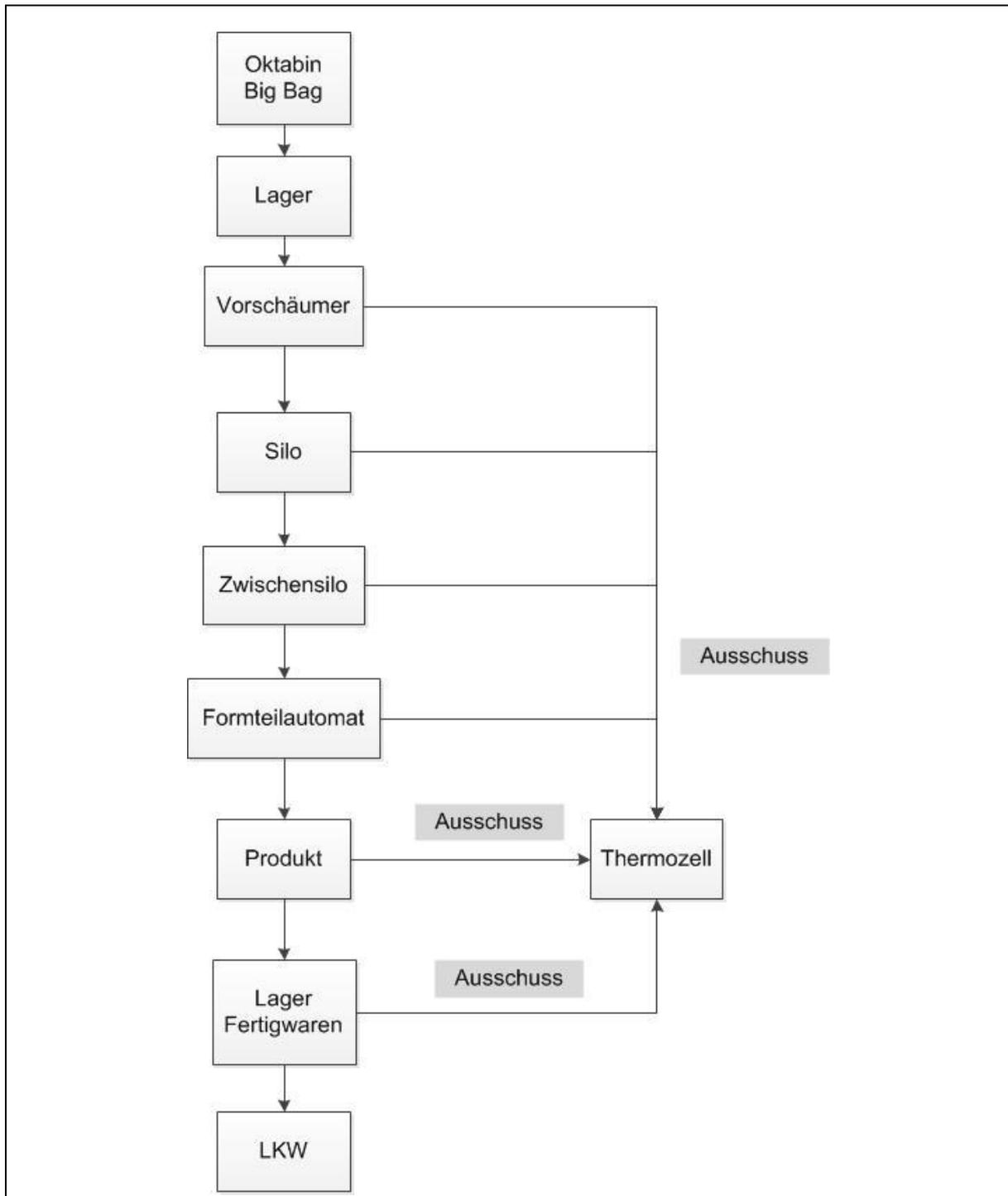


Abbildung 10: Fertigungsprozess Formteile

3.1.2.2 Angelieferter Rohstoff

Grundsätzlich gelten für die hier verwendeten Rohstoffe dieselben Aussagen wie in Kapitel 3.1.1.2. Einziger Unterschied ist, dass für Formteile teilweise andere Rohstofftypen verwendet werden als in der Dämmstoffproduktion. Lieferform und Lagerung sind jedoch völlig ident.

3.1.2.3 Vorschäumen

Auch das Vorschäumen verläuft im Wesentlichen wie im Blockbereich (Kapitel 3.1.1.3) an einem Vorschäumer. Es ist jedoch erwähnenswert, dass bei der Formteilherstellung nicht immer der gesamte Inhalt eines Oktabins geschäumt wird. Je nach Bedarf werden nur Teile des Inhalts verwendet und der Rest bis zu dessen Verarbeitung im Oktabin belassen. Durch die wesentlich größere Produktvielfalt der Formteile gegenüber den Dämmstoffen ist auch das vorgeschäumte Material variantenreicher. Während es dort, wie oben erwähnt, die Dichtestufen 15, 20, 25 und 30 kg/m³ gibt, sind diese Werte hier breiter gestreut und feiner abgestuft. Das ergibt sich aus den verschiedenen Anforderungen und Funktionen der daraus zu produzierenden Formteile. Die derzeit niedrigste Dichte nach dem Vorschäumer beläuft sich auf 18 kg/m³, die höchste Dichte erreicht ca. 150 kg/m³. Zwischen diesen Werten liegt eine Vielzahl von Dichteabstufungen.

3.1.2.4 Lagerung im Silo

Auch hier gilt ähnliches wie bei der Silolagerung im Blockbereich (Kapitel 3.1.1.4). Allerdings sind die Silos der Werke 1 und 2 kleiner als in Werk 7 und in größerer Zahl vorhanden. Nach der eigentlichen Silolagerung wird das Material in sogenannte Zwischensilos transportiert. Anschließend werden von dort die Formteilautomaten mit Material versorgt.

3.1.2.5 Formteilautomat und Lagerung

Ab diesem Schritt unterscheiden sich die Prozesse aus den Bereichen Block/Platte und Formteile erheblich (vgl. Kapitel 3.1.1.5 ff.). Das vorgeschäumte Material wird wieder unter hoher Temperatur und der Verwendung von Wasserdampf in Formen eingebracht. Diese sind nun keine konischen Blöcke, sondern haben die Gestalt des fertigen und zu verkaufenden Teils. Nach dem Öffnen des Werkzeugs (Form) wird das Teil ausgeworfen. Bei Produkten der Fußbodenheizung wird im Anschluss häufig noch eine Folie aufgebracht. Die fertigen Formteile werden in Liefereinheiten zusammengefasst, gestapelt, verpackt und ins Fertigwarenlager gebracht. Von dort werden sie an die Kunden ausgeliefert.

3.1.2.6 Ausschuss

Der Materialfluss des Ausschusses ist hier wesentlich einfacher als in der Dämmplattenherstellung, denn es wird kein Material im Kreislauf zurückgeführt, vgl. dazu Kapitel 3.1.1.7. Es gibt zwei mögliche Ausschusstypen:

- Vorgeschäumtes Silomaterial, das als Ausschuss zu behandeln ist. Meist handelt es sich um Perlen, die dem Prozess in kleinen Mengen entweichen und sich am Boden der Fertigungshalle ansammeln.
- Fehlerhafte Formteile und solche, die bei Lagerung und Transport Schaden nehmen

Auch hier wird der Ausschuss nicht entsorgt, sondern in der Sparte Thermo Zell verwertet, siehe Kapitel 3.1.3.¹⁰²

¹⁰² Vgl. <https://www.hirsch-gruppe.com/de/thermozell/eps-ausgleichsdaemmung.html> (07.12.2018)

3.1.3 Verwertung von Ausschüssen bei Thermozell

Wie in den Kapiteln 3.1.1 und 3.1.2 beschrieben, sowie in Abbildung 9 und Abbildung 10 ersichtlich, werden die Ausschüsse aus dem Unternehmensbereich Porozell im Rahmen der Sparte Thermozell verwertet. Obwohl Hirsch Porozell der Fokus dieser Masterarbeit ist, muss kurz beschrieben werden, wie mit diesen Ausschüssen bei Thermozell verfahren wird. Dies ist sehr wichtig für Betrachtungen des Materialverbrauchs.

In Kapitel 2.4.4 wurde bereits erklärt, dass sich EPS-Kügelchen in Wärmedämm-Leichtbeton bzw. Ausgleichsschüttungen verwenden lassen, was im Unternehmensbereich Thermozell geschieht. Dazu befindet sich ein Thermozell-Werk direkt am Standort Glanegg. Die Thermozell GmbH stellt diesen Wärmedämm-Leichtbeton in verschiedenen Varianten her. Es gibt diverse Fertigmischungen mit und ohne Zement, sowie unterschiedlich langen Verarbeitungszeiten an der Baustelle. Aus EPS-Kügelchen, Zement, Wasser und weiteren chemischen Inhaltsstoffen entsteht der Wärmedämm-Leichtbeton.¹⁰³

Sämtlicher Ausschuss aus den Bereichen Formteile und Block wird innerhalb des Werksgeländes an das dort angesiedelte Thermozell-Werk geliefert. Dies trägt dazu bei, die in Kapitel 2.4.4 schon thematisierten hohen spezifischen Transportkosten von bereits geschäumten EPS zu vermeiden bzw. zu verringern. Wie diese Ausschüsse gesammelt, erfasst, transportiert und dokumentiert werden, wird noch Gegenstand von Betrachtungen späterer Kapitel sein. Mit der oben erwähnten Rückführung in Rezyklatilos sowie der Verwertung im Rahmen von Thermozell ist es dem Unternehmen möglich, am gesamten Standort Glanegg keinen ungenutzten EPS-Abfall zu produzieren.

¹⁰³ Vgl. <https://www.hirsch-gruppe.com/de/thermozell/eps-ausgleichsdaemmung.html> (07.12.2018)

3.2 Untersuchung des Rohstoffs

Wie in Kapitel 3.1 erläutert, beginnt der Herstellungsprozess aller Produkte von Hirsch Porozell mit dem angelieferten Rohstoff. Die großen jährlich eingekauften Mengen dominieren die Materialkosten der Hirsch Porozell. Aus diesen Gründen ist er auch Gegenstand der ersten messtechnischen Untersuchung. Um den Rohstoffeinsatz der jeweiligen Fertigprodukte zu ermitteln, ist es essentiell, die tatsächliche Zusammensetzung der entsprechenden Lieferungen zu kennen. Abbildung 11 zeigt beispielhaft die Rohstoffperlen und daraus expandierte Kügelchen. Wie in den Kapiteln 2.1.3 und 3.1.1.2 erklärt, setzen sich die Rohstofflieferungen aus dem PS selbst und weiteren Komponenten zusammen:

- Polystyrol
- Pentan als Treibmittel
- Wasser in Form des Feuchtegehalts
- Zusatzstoffe wie Flammschutzmittel, Farbstoffe usw.

Welche Anteile diese Inhaltsstoffe einnehmen, ist jedoch nicht völlig klar. Daher müssen mittels Messungen und weiteren Untersuchungen erst dementsprechende Erkenntnisse gesammelt werden. Vorgegangen wird dabei nach den in Kapitel 2.9.1 angeführten Grundlagen zum Untersuchungsablauf. Zunächst werden der in der Vorbereitung zu definierende Untersuchungszweck und die zu erhebenden Daten festgestellt. Die erhobenen Daten werden dann aufbereitet, grafisch dargestellt sowie analysiert. Als wesentliche Maßzahl wird stets das arithmetische Mittel verwendet, in einigen Punkten zusätzlich die Spannweite.



Abbildung 11: Rohstoff und expandierte Kügelchen¹⁰⁴

¹⁰⁴ Vgl.

https://www.plasticsportal.net/wa/plasticsEU~de_DE/portal/show/common/content/literature/plastics/0208/plastics_styropor_a_basf_invention (09.12.2018)

3.2.1 Zweck der Untersuchung

Wie in Kapitel 3.1 schon erläutert, werden die Rohstoffe von verschiedenen Herstellern bezogen, welche wiederum diverse Rohstofftypen anbieten. Damit ist auch anzunehmen, dass sich in Hinblick auf die genaue Zusammensetzung Unterschiede ergeben. Von den Herstellern selbst sind in den Datenblättern meist nur grobe Angaben verfügbar, insbesondere bezüglich des Pentangehalts.^{105, 106} Über den Wasseranteil finden sich häufig überhaupt keine Angaben.^{107, 108, 109} Eine Ausnahme ist der Hersteller Sunpor, welcher z.B. bei seinem Produkt „A245 SE“ einen Feuchtegehalt von weniger als 0,4 % angibt.¹¹⁰ Um eine Vergleichbarkeit zu erreichen, ergeben sich nun folgende zu klärende Punkte über den Zustand des angelieferten Rohstoffs:¹¹¹

- Die mengenmäßigen Inhalte der Oktabins entsprechen nicht immer exakt den Herstellerangaben. Daher gilt es herauszufinden, welche Abweichungen zwischen tatsächlichem Netto-Inhalt der Liefereinheiten und den Angaben der Hersteller bestehen.
- Offen ist ebenso, ob eine signifikante Restmenge an Granulat im Plastiksack (Inliner) verbleibt, wenn dieser beim Vorschäumen entleert wird.
- Der Wasser- bzw. Feuchtegehalt im Rohstoff zum Zeitpunkt der Verwendung, also beim Vorschäumen, ist eine zentrale Fragestellung. Dabei ist nicht nur die Gesamtfeuchte, sondern auch deren Verteilung innerhalb des Oktabins von Interesse. Es wäre nämlich denkbar, dass sich die Feuchtigkeit in bestimmten Bereichen konzentriert.
- Die oben genannten Punkte sollen insbesondere in Bezug auf Unterschiede zwischen den verschiedenen Rohstoffherstellern sowie den diversen Rohstofftypen einzelner Hersteller untersucht werden.

3.2.2 Durchführung

Zu Beginn sei hier erwähnt, dass für die Analyse des Rohstoffes personelle und andere Ressourcen knapp waren. Daher musste ein Kompromiss über den Messumfang unter vertretbarem personellen und finanziellen Aufwand gefunden werden, wie es häufig bei Datenerhebungen der Fall ist, siehe dazu auch Kapitel 2.9. Außerdem gibt es im Unternehmen derzeit keine Einrichtungen zur chemischen Analyse des Rohstoffs. Als Messmethode wurde daher eine vereinfachte Variante in Anlehnung an die isothermische Form einer thermogravimetrischen Analyse (vgl. Kapitel 2.3.3) gewählt. Im Wesentlichen wurde eine Trocknung bei konstanter Temperatur angewendet, wobei parallel zusätzliche Informationen gesammelt wurden:

¹⁰⁵ Vgl. BASF SE, 2015, Sicherheitsdatenblatt Neopor® F 2300

¹⁰⁶ Vgl. BASF SE, 2015, Sicherheitsdatenblatt Styropor® F 415 E

¹⁰⁷ Vgl. BASF SE, 2016, Technisches Merkblatt Styropor® F 15 E Reihe

¹⁰⁸ Vgl. BASF SE, 2016, Technisches Merkblatt Neopor® F 2000

¹⁰⁹ Vgl. SYNTHOS Styrenics Services BV, 2018, Technisches Datenblatt InPacto® SR/F

¹¹⁰ Vgl. Sunpor, 2018, Technisches Merkblatt SUNPOR® A 245 SE

¹¹¹ Besprechung mit Klaus Unterleutner am 14.08.2018

1. Wiegen des vollen Oktabins.
2. Abfüllen von kleinen Mengen des Rohstoffs (circa 90-120 g) in Plastikbecher, während der Rohstoff für die Verarbeitung im Vorschäumer entleert wird. Um festzustellen, ob unterschiedliche Bereiche des Oktabins deutlich voneinander abweichen, wurden zunächst je Oktabin vier Proben gezogen (Unten, Mitte Unten, Mitte Oben, Oben).
3. Wiegen des leeren Oktabins. Aus der Differenz der Masse zwischen vollem und leerem Oktabin lässt sich die tatsächliche Netto-Liefermenge berechnen.
4. Wiegen und Überprüfung des Inliners mit freiem Auge. Damit wird untersucht, ob eine signifikante Menge an Rohstoff im Inliner verbleibt.
5. Wiegen der Rohstoffproben mittels Feinwaage.
6. Trocknen der Proben in einem Trockenofen bei 60 °C.
7. Erneutes Wiegen der Proben nach einem Tag. Berechnen des prozentuellen Masseverlusts der Probe. Dies wurde als Richtwert für den Feuchtegehalt des Rohstoffs verwendet. Als Bezugswert für die Prozentsätze wurde jeweils das Feuchtgewicht des Rohstoffs herangezogen.
8. Belassen der Proben im Ofen, um nach circa 2-3 Monaten weitere Masseverluste zu erfassen.

Es ist sehr wahrscheinlich, dass während der Trocknung nicht nur Wasser, sondern auch andere Komponenten des Rohstoffs entweichen. Hier ist insbesondere das Treibmittel Pentan zu nennen. In Kapitel 2.2 wurde bereits festgehalten, dass es sich bei den drei Pentan-Isomeren um leicht flüchtige Stoffe handelt, deren Siedepunkte unter den im Trockenofen herrschenden 60 °C liegen. Im Rohstoff sind vor allem Isopentan und n-Pentan vorhanden, wie aus den Sicherheitsdatenblättern der Produzenten hervorgeht.^{112, 113} Im Rahmen dieser Masterarbeit war es leider nicht möglich eine exaktere Messmethode, welche diese Einflüsse völlig ausschließt, durchzuführen.

Dennoch wurden zu dieser Thematik weitere Untersuchungen angestellt. Erstens wurde im späteren Verlauf der Messreihe zusätzlich eine Probe bei Raumtemperatur getrocknet, um den Einfluss der Temperatur auf die Masseverluste zu untersuchen. Zweitens wurden von einem Oktabin drei Proben gezogen. Eine davon kam zur üblichen Trocknung in den Ofen, während eine weitere bei Raumtemperatur getrocknet wurde. Zusätzlich wurde ein Probenexemplar von einem externen, auf Feuchtemessung spezialisierten Unternehmen labortechnisch auf ihren Wassergehalt untersucht.

¹¹² Vgl. BASF SE, 2015, Sicherheitsdatenblatt Neopor® F 2300

¹¹³ Vgl. BASF SE, 2015, Sicherheitsdatenblatt Styropor® F 415 E

3.2.3 Ergebnisse und Diskussion

Nachfolgend werden die Ergebnisse zu den oben genannten Fragestellungen vorgestellt und diskutiert.

3.2.3.1 Feuchteverteilung in der Liefereinheit

Um eine Aussage darüber zu gewinnen, ob sich die Feuchte im Oktabin räumlich konzentriert, wurden anfangs je vier Proben pro Oktabin zur Trocknung herangezogen. Obwohl bei der Trocknung neben Wasser höchstwahrscheinlich auch andere Stoffe entweichen, insbesondere Pentan, ist anzunehmen, dass dies hier keinen wesentlichen Einfluss hat. Es ist davon auszugehen, dass sich diese Stoffe in allen Bereichen eines Oktabins gleich verhalten. In Tabelle 2 sind die entsprechenden Prozentwerte, sowie deren Spannweite und arithmetisches Mittel ersichtlich. Außerdem sind stets die unternehmensinterne Chargennummer des Oktabins, Hersteller und Materialtyp angeführt.

Chargennummer	Hersteller	Materialtyp	Unten	Mitte Unten	Mitte Oben	Oben	Spannweite	Mittelwert
16E2	BASF	F415E_white	2,46%	2,55%	2,58%	2,55%	0,12%	2,53%
15G0	BASF	Neopor_F2300_grey	3,27%	3,16%	2,37%	3,36%	0,99%	3,04%
16RB	Cfn	WG200A	2,60%	2,53%	2,49%	2,51%	0,12%	2,53%
16GP	Sunpor	245SE	1,58%	1,45%	1,46%	1,46%	0,13%	1,48%
16GZ	Sunpor	245SE	1,56%	1,45%	1,46%	1,40%	0,16%	1,47%
163E	Sunpor	245SE	1,42%	1,37%	1,37%	1,29%	0,13%	1,36%
15A5	Synthos	InPacto300SR/F_white	2,98%	3,07%	3,00%	3,01%	0,10%	3,01%
16BJ	Synthos	InPacto500SR/F_white	2,27%	2,33%	2,36%	2,36%	0,09%	2,33%
16BH	Synthos	InPacto500SR/F_white	2,58%	2,66%	2,73%	2,82%	0,24%	2,70%

Tabelle 2: Masseverlust beim Trocknen aus verschiedenen Bereichen im Oktabin

Es wird sofort deutlich, dass sich die Werte aus unterschiedlichen Bereichen kaum unterscheiden. Nur in der Charge 15G0 liegt die Spannweite bei etwa 1 %. Ansonsten weist diese keine höheren Werte als 0,25 % auf. Außerdem ist kein augenscheinlicher Trend erkennbar, ob sich die Feuchtigkeit oben, unten oder in der Mitte konzentriert. Sie erscheint also relativ gleichmäßig verteilt. Für alle weiteren Proben des Rohstoffes genügt es daher, eine einzelne Probe aus einem beliebigen Bereich zu ziehen. Das erleichtert die Untersuchung im laufenden Fertigungsbetrieb erheblich. Die bisher analysierten Oktabins werden in den folgenden Betrachtungen mit dem Mittelwert aus allen vier Werten berücksichtigt.

3.2.3.2 Restmengen im Inliner

In diesem Abschnitt wird untersucht, ob ein signifikanter Anteil des Rohstoffs im innenliegenden Plastiksack (Inliner) verbleibt. Von insgesamt 17 betrachteten Oktabin konnte bis auf zwei Ausnahmen kein übriggebliebener Rohstoff im Inliner gefunden wurden. Mittelwert und Spannweite der festgestellten Mengen sind in Tabelle 3 dargestellt. Auch in den zwei Fällen, bei denen tatsächlich Granulat im Plastiksack gefunden wurde, waren die Mengen äußerst gering. Im Vergleich zu den weiteren Abweichungen, welche in den nachfolgenden Abschnitten diskutiert werden, sind diese Werte nahezu verschwindend gering. Rohstoffrückstände in den Liefereinheiten sind folglich kein zu berücksichtigender Faktor bei der Betrachtung des Rohstoffverbrauchs.

Maximalwert	Minimalwert	Spannweite	Mittelwert
0,07%	0,00%	0,07%	0,01%

Tabelle 3: Restmengen im Inliner

3.2.3.3 Abweichungen durch Feuchte und Netto-Liefermengen

Nachdem sich der Einfluss von räumlicher Feuchteverteilung und allfälligen Restmengen im Inliner in den vorangegangenen Kapiteln als sehr gering herausgestellt hat, soll nun der Fokus auf das zentrale Thema bei der Analyse des Rohstoffs gerichtet werden. Dabei handelt es sich um die Frage, wie viel trockener Rohstoff tatsächlich in einer Liefereinheit zum Zeitpunkt der Verwendung, also direkt vor dem Vorschäumen, vorhanden ist. Zwei wesentliche Aspekte lassen sich nicht getrennt voneinander betrachten:

- Die tatsächliche Menge an Rohstoff im Oktabin, welche stets ein wenig schwankt. Als Bezugswert für Prozentwerte dient die Herstellerangabe in Kilogramm.
- Der Feuchtegehalt des Rohstoffs zum Zeitpunkt der Verwendung. Der Wasseranteil geht bei der Verarbeitung unter hohen Temperaturen und Zusatz von Wasserdampf, sowie beim anschließenden Trocknen der Teile verloren. Somit muss er in der Betrachtung des tatsächlichen Rohstoffverbrauchs getrennt betrachtet werden.

Feuchte und Netto-Liefermenge hängen direkt zusammen. Je mehr Wasser im Oktabin vorhanden ist, desto schwerer ist dieser. Damit steigt auch die gemessene Netto-Liefermenge, die über die Massendifferenz von vollem und leerem Oktabin ermittelbar ist. Betrachtet man die Summe der Abweichungen durch Feuchte und Schwankung des Nettogewichts, ergibt sich ein Richtwert für die tatsächlich gelieferte Menge an trockenem Rohstoff. Wie schon erwähnt, gehen neben Wasser auch andere Stoffe, vor allem das leicht flüchtige Pentan, beim Trocknen verloren. Daher dürfen die folgenden Ergebnisse lediglich als Richtwert für Betrachtungen des Rohstoffverbrauchs angesehen werden, nicht als exakte Messwerte. Auf diese Thematik wird in den nachfolgenden Unterkapiteln noch näher eingegangen.

Besonders wichtig für das Unternehmen sind Unterschiede zwischen den verschiedenen Rohstoffherstellern einerseits und zwischen den diversen Materialtypen eines einzelnen Herstellers andererseits. Es wurden zunächst nur in Glanegg verwendete Rohstoffe untersucht. Mit gestiegenem Interesse innerhalb des Unternehmens an diesem Thema starteten später an drei Standorten in Deutschland ebenfalls solche Messreihen. In Rheda-Wiedenbrück, Bad Waldsee und Abstatt wurden nach derselben Methode Daten erhoben. Sie wurden ebenfalls in diese Analyse einbezogen.

In Tabelle 4 und Abbildung 12 sind die Ergebnisse dieser Messreihe, geordnet nach Herstellern und Standorten, dargestellt. Dabei wurde jeweils das arithmetische Mittel (Symbol \bar{x}) der Werte aller Materialtypen eines Herstellers an einem Standort ermittelt. Die Anzahl der gezogenen Proben ist angeführt. Aus den Abweichungen der Netto-Liefermenge und dem Masseverlust nach einem Tag im Trockenofen wurde die Summe gebildet. Zur Veranschaulichung wird in der Tabelle auch dargestellt, welchen Gewichtsverlust eine derartige prozentuelle Abweichung bei einem Oktabin-Füllgewicht von 1100 kg bedeuten würde, wie es häufig geliefert wird.¹¹⁴

Standort	Hersteller	Anzahl Proben	\bar{x} Abweichung Netto-Liefermenge [%]	\bar{x} Masseverlust 1 Tag [%]	\bar{x} Summe [%]	Abweichung bei 1100 kg [kg]
Glanegg	BASF	6	-0,52%	-2,44%	-2,96%	-32,53
Abstatt	BEWI	6	0,27%	-1,20%	-0,93%	-10,22
Rheda	BEWI	7	0,12%	-1,25%	-1,13%	-12,46
Waldsee	BEWI	4	0,18%	-1,28%	-1,10%	-12,06
Glanegg	cfn kimya	1	-0,13%	-2,53%	-2,67%	-29,32
Glanegg	Sunpor	3	-0,36%	-1,44%	-1,80%	-19,80
Abstatt	Synthos	3	-0,17%	-2,80%	-2,97%	-32,64
Glanegg	Synthos	6	-0,09%	-2,12%	-2,21%	-24,27
Rheda	Synthos	3	-0,65%	-2,87%	-3,52%	-38,71
Waldsee	Synthos	2	-0,93%	-2,45%	-3,38%	-37,20
Rheda	Total	2	-0,18%	-1,29%	-1,47%	-16,14
Waldsee	Total	1	-0,45%	-1,50%	-1,95%	-21,50

Tabelle 4: Messwerte Rohstoffuntersuchung Hersteller – Standort

¹¹⁴ Vgl. SYNTHOS Styrenics Services BV, 2018, Technisches Datenblatt InPacto® SR/F

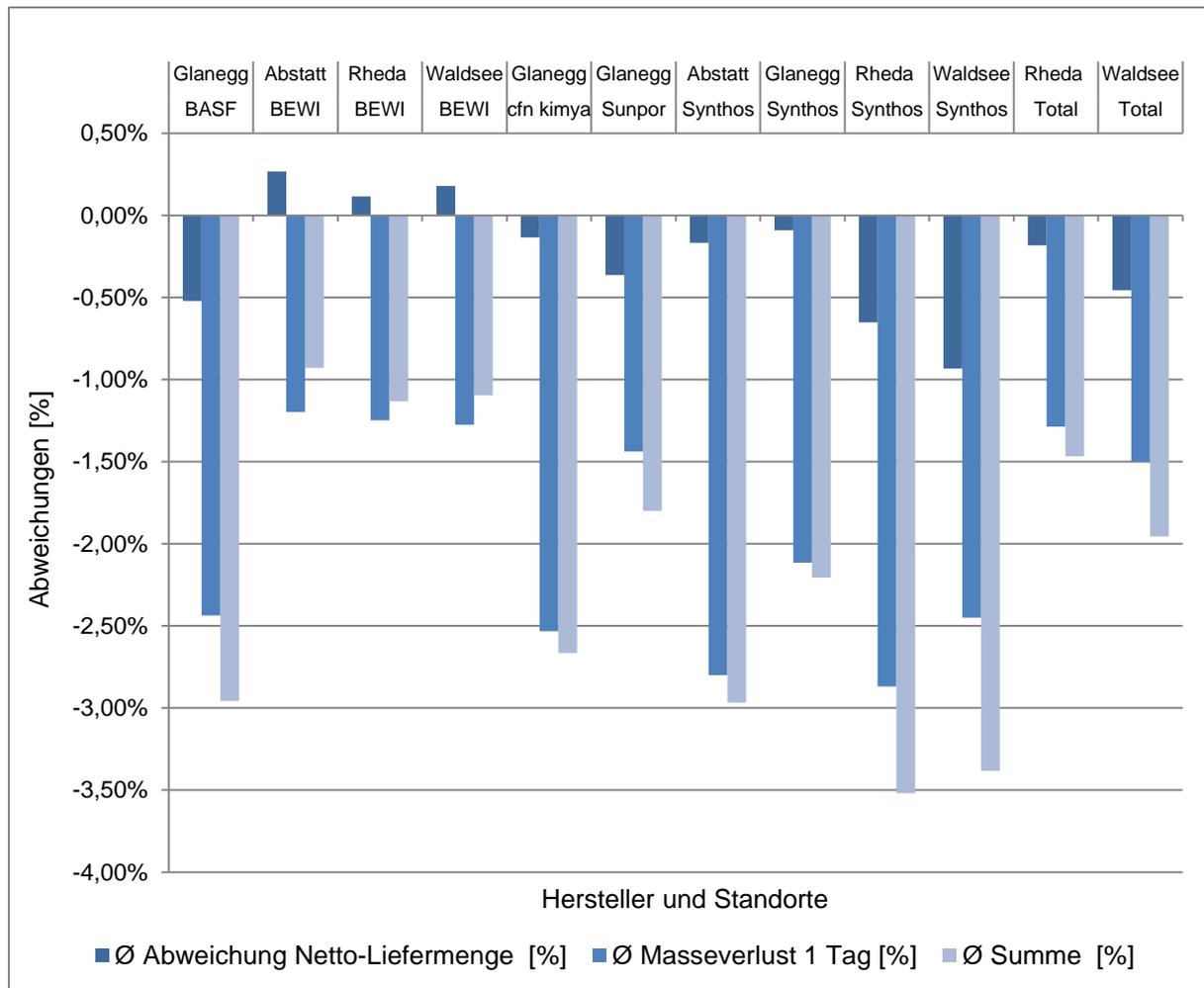


Abbildung 12: Diagramm Rohstoffuntersuchung Hersteller – Standort

Bei den Netto-Liefermengen (linker Balken im Diagramm), fällt zunächst auf, dass nahezu alle Hersteller unter ihren Angaben liegen, mit Ausnahme von BEWI. Dort liegen die Werte darüber. Es gibt teils erhebliche Abweichungen nach unten, von bis zu rund -1 %. Das Maximum liegt bei 0,3 % über dem Nenngewicht. Insgesamt zeigt die Tendenz eher zu Werten unter den Lieferantangaben. Es zeigen sich hier jedoch starke Unterschiede zwischen den Herstellern. Allerdings schwanken auch die Werte desselben Herstellers an unterschiedlichen Standorten.

Die Gewichtsverluste nach einem Tag Trocknung (mittlerer Balken im Diagramm) zeigen ein ähnliches Bild. Es gibt deutliche Unterschiede zwischen den Herstellern. Während einige bei Werten von etwa 1 % Verlust liegen, kommen bei anderen dreimal so hohe Werte vor. Unterschiede zwischen den Standorten zeigen sich auch hier, jedoch etwas weniger deutlich als bei den Netto-Liefermengen. In der Summe von Trocknungsverlust und Lieferabweichungen liegen schließlich alle Hersteller und Standorte deutlich im negativen Bereich. Erneut zeigt sich jedoch der große Einfluss verschiedener Produzenten. Die niedrigsten Werte liegen bei rund -1 %, während die stärksten Abweichungen bis zu -3,5 % reichen.

Tabelle 5 und Abbildung 13 zeigen die Ergebnisse noch detaillierter aufgeschlüsselt. Hier wird zusätzlich zwischen den verschiedenen Materialtypen eines Herstellers unterschieden. Erneut setzt sich das oben Gesagte fort, denn merkliche Abweichungen treten auch bei verschiedenen Materialtypen desselben Herstellers in Erscheinung. Die Prozentwerte bewegen sich in sehr ähnlichen Bereichen wie oben. Es ist jedoch zu sehen, dass sich die Werte eines Produzenten bei unterschiedlichen Materialtypen nicht derartig stark unterscheiden. Die deutlichsten Schwankungen treten nach wie vor zwischen den diversen Rohstofflieferanten auf. Ein Detail sei besonders hervorgehoben. Die Werte von BASF F415E und BASF F2300 sind beinahe identisch. Laut deren Sicherheitsdatenblätter sollte der Pentangehalt von F2300 allerdings etwas geringer sein.^{115, 116} Es wäre zu erwarten, dass damit auch der Gewichtsverlust von F2300 etwas geringer ausfällt, was nicht der Fall ist.

Standort	Hersteller	Materialtyp	Anzahl Proben	Ø Abweichung Netto-Liefermenge [%]	Ø Masseverlust 1 Tag [%]	Ø Summe [%]	Abweichung bei 1100 kg [kg]
Glanegg	BASF	F215E	2	-0,15%	-2,25%	-2,40%	-26,42
Glanegg	BASF	F415E_white	2	-0,72%	-2,51%	-3,23%	-35,54
Glanegg	BASF	Neopor_F2300	2	-0,69%	-2,55%	-3,24%	-35,62
Abstatt	BEWI	1016FM	3	0,09%	-1,20%	-1,10%	-12,15
Rheda	BEWI	1016FM	3	-0,11%	-1,72%	-1,83%	-20,10
Waldsee	BEWI	1016FM	2	0,07%	-1,65%	-1,58%	-17,36
Abstatt	BEWI	710FM	3	0,44%	-1,20%	-0,75%	-8,28
Rheda	BEWI	710FM	4	0,29%	-0,90%	-0,61%	-6,72
Waldsee	BEWI	710FM	2	0,29%	-0,90%	-0,61%	-6,76
Glanegg	cfn kimya	WG200A	1	-0,13%	-2,53%	-2,67%	-29,32
Glanegg	Sunpor	245SE	3	-0,36%	-1,44%	-1,80%	-19,80
Glanegg	Synthos	InPacto300SR/F	2	-0,10%	-2,73%	-2,83%	-31,14
Glanegg	Synthos	InPacto500SR/F	2	0,00%	-2,51%	-2,51%	-27,64
Abstatt	Synthos	InSphere800F/NL	3	-0,17%	-2,80%	-2,97%	-32,64
Rheda	Synthos	InSphere800F/NL	3	-0,65%	-2,87%	-3,52%	-38,71
Waldsee	Synthos	InSphere800F/NL	2	-0,93%	-2,45%	-3,38%	-37,20
Glanegg	Synthos	Silver 800FG grey	2	-0,17%	-1,11%	-1,27%	-14,02
Rheda	Total	XLR5559_grau	2	-0,18%	-1,29%	-1,47%	-16,14
Waldsee	Total	XLR5559_grau	1	-0,45%	-1,50%	-1,95%	-21,50

Tabelle 5: Messwerte Rohstoffuntersuchung Hersteller – Materialtyp – Standort

¹¹⁵ Vgl. BASF SE, 2015, Sicherheitsdatenblatt Neopor® F 2300

¹¹⁶ Vgl. BASF SE, 2015, Sicherheitsdatenblatt Styropor® F 415 E

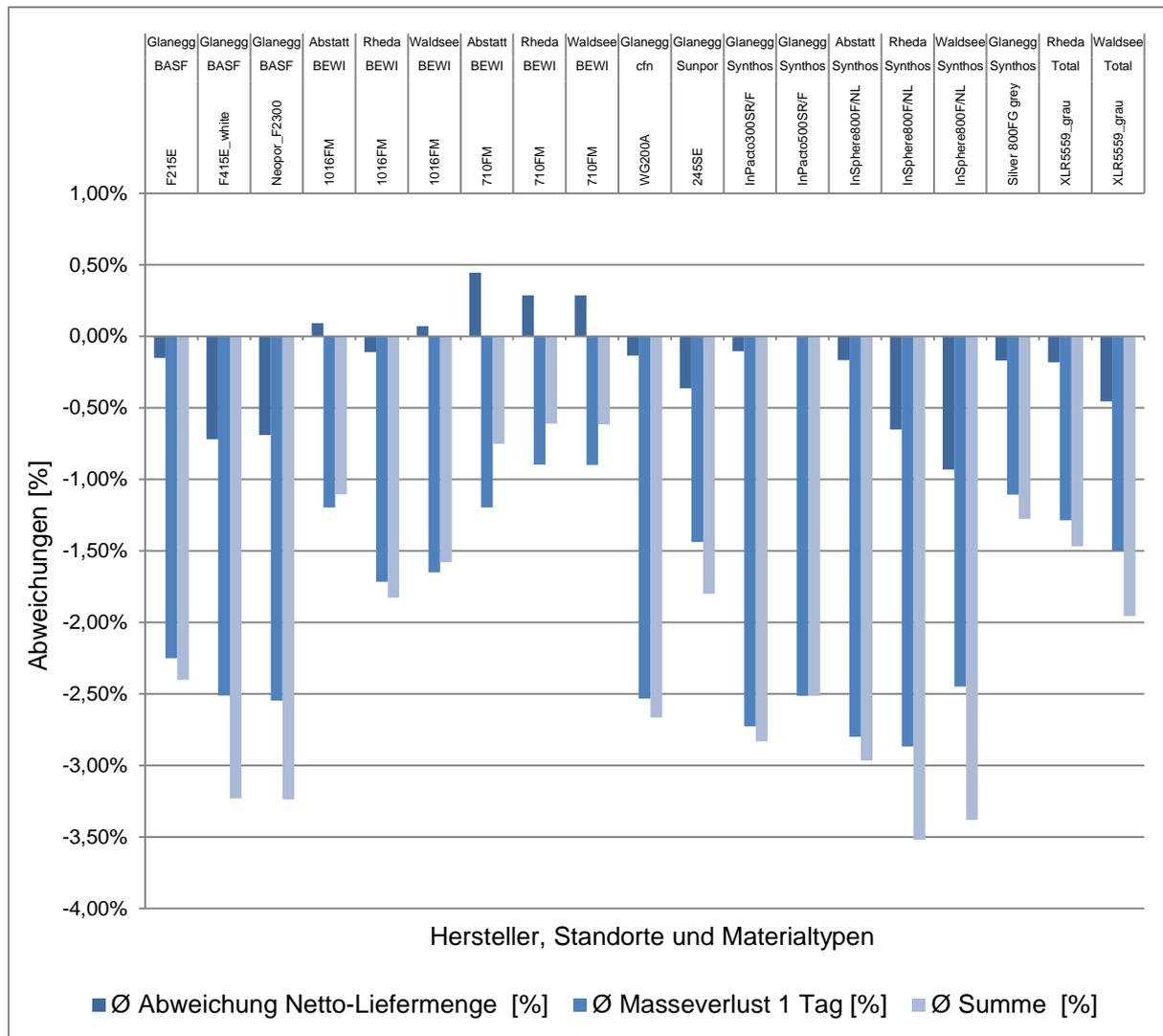


Abbildung 13: Diagramm Rohstoffuntersuchung Hersteller – Materialtyp – Standort

Als wesentliches Ergebnis dieses Untersuchungsteils muss festgehalten werden, dass sich alles andere als ein einheitliches Bild ergibt. Standort, Hersteller und Materialtyp haben jeweils großen Einfluss auf die ermittelten Werte. Die Schwankungen in den Werten sind überraschend groß. Es hat daher wenig Sinn, pauschale Prozentsätze oder grobe Mittelwerte über sämtliche Proben hinweg zu ermitteln. Zu stark unterscheiden sich die einzelnen Prozentwerte.

Unbedingt berücksichtigt werden muss außerdem, dass keine vollkommen eindeutige Aussage darüber gemacht werden kann, ob der eine oder andere Hersteller insgesamt mehr oder weniger trockenes Material liefert. Es ist nämlich aufgrund bereits erwähnter Einschränkungen der Messmethode nicht klar festzustellen, welchen Einfluss andere Inhaltsstoffe als PS und Wasser haben. So ist es durchaus denkbar, dass ein Hersteller leichter flüchtige Substanzen in seinem Rohstoff verarbeitet, mehr Pentan als Treibmittel verwendet, oder eine größere Menge anderer Zusatzstoffe beimischt. Jedoch ist unübersehbar, dass gewisse Hersteller wesentlich geringere Gesamtabweichungen aufweisen als andere. Dieses Muster zeigt sich auch, wenn man deren diverse Materialtypen berücksichtigt.

3.2.3.4 Langzeitmessungen und Vergleich Zimmertemperatur

Wie eingangs erwähnt, fand noch eine Weiterführung der obigen Messreihe statt. Sämtliche Proben wurden über Monate hinweg im Trockenofen belassen, um ihren weiteren Gewichtsverlust zu verfolgen. Außerdem wurden von sieben Proben gleichzeitig Exemplare bei Raumtemperatur gelagert, zusätzlich zu jenen im Trockenofen. Die dort herrschenden niedrigeren Temperaturen müssten sich in den Messergebnissen deutlich bemerkbar machen. Abbildung 14 zeigt diese Ergebnisse. Die Balken links geben in Rot und Orange jeweils die Verluste nach einem Tag, zwei bis drei Monaten sowie einem weiteren Monat im Trockenofen an. Rechts sind die Werte bei Raumtemperatur nach sieben bis zehn Tagen, zwei bis drei Monaten und drei bis vier Monaten in blau aufgetragen.

Es ist anzunehmen, dass die Trocknung im Zimmer aufgrund der deutlich niedrigeren Temperaturen wesentlich langsamer voranschreitet. Tatsächlich wurde festgestellt, dass nach einem Tag bei Zimmerumgebung wesentlich weniger Probenmasse verloren geht. Daher wird zum Vergleich mit dem Ofen der Verlust nach circa einer Woche herangezogen. Bei einer Zimmertemperatur von 20-25 °C geschah die Trocknung unter den jeweiligen Siedepunkten von n-Pentan und Isopentan, siehe dazu Kapitel 2.2.2. Vergleicht man die Werte von einem Tag im Ofen und einer Woche Raumtemperatur, so ähneln sich die Werte im Diagramm. Bei einigen Proben sind sie sehr nahe beieinander, meist jedoch ist der Verlust im Ofen etwas höher.

Nach zwei bis drei Monaten sind die Verluste im Ofen deutlich höher als im Zimmer. Dies deutet darauf hin, dass im Trockenofen sehr viel Pentan entweicht. Dieses Ergebnis entspricht den Erwartungen, da die Temperatur deutlich über den Siedepunkten sämtlicher Pentanarten liegt. Es ist dagegen kaum festzustellen, wie viel Pentan sich bei den Proben unterhalb der Siedetemperatur verflüchtigt. Im entsprechenden Theoriekapitel wurde bereits die leichte Flüchtigkeit der Pentane erwähnt. Bei Gesamtverlusten von 3-6 % im Ofen dürfte zumindest ein Teil des Pentans entwichen sein. Dennoch ist unklar, wie viel davon immer noch in den EPS-Perlen enthalten ist. Bei Raumtemperatur scheint dagegen wesentlich weniger Treibmittel zu entweichen, denn die Werte liegen bis auf eine Ausnahme unter 3 %. Ebenso im Dunklen bleibt, welche Mengen der anderen Zusatzstoffe entwichen sind. Die wesentlichen Gewichtsveränderungen finden eindeutig in den ersten Wochen der Messung statt. Vergleicht man nämlich die Werte nach 2-3 bzw. 3-4 Monaten, finden sich nur sehr geringe zusätzliche Verluste. Damit dürfte nach einigen Monaten der Prozess des Entweichens von Wasser und Pentan nahezu vollständig abgeschlossen sein.

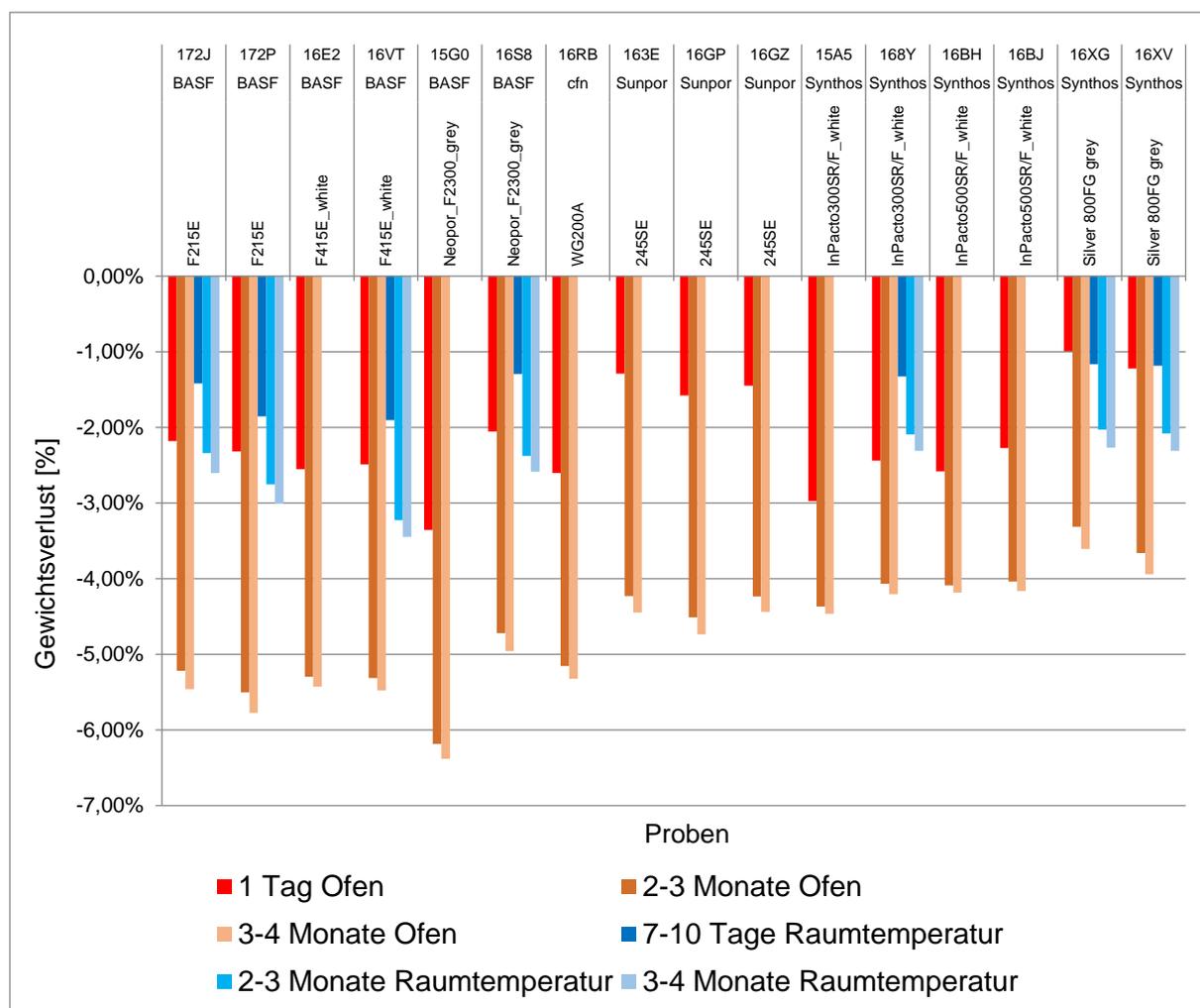


Abbildung 14: Diagramm Rohstoff Langzeitmessung Ofen und Raumtemperatur

In jedem Fall ist durch diese Erhebung klar geworden, dass Temperatur und Pentanverlust einen signifikanten Einfluss auf das Verhalten des Rohstoffs bei der Trocknung bzw. Feuchtemessung mittels Ofen haben. Um noch mehr Klarheit in die Aussagekraft der in den vorigen Abschnitten diskutierten Trocknungsergebnisse zu bringen, sei außerdem auf den nachfolgenden Abschnitt 3.2.3.5 verwiesen.

3.2.3.5 Vergleich Trocknungsmethode mit Labormessung

In den bisher dargelegten Ergebnissen kam immer wieder die Frage auf, welche Anteile anderer Inhaltsstoffe neben Wasser im Zuge des Trocknungsvorgangs verloren gehen, sowohl im Trockenschrank bzw. Trockenofen als auch bei Raumtemperatur. Vor allem der Einfluss des entweichenden Pentans auf den Masseverlust ist ein gewisser Unsicherheitsfaktor. Daher wurden von einem Oktabin drei Proben gezogen. Je eine Probe wurde in Ofen und bei Raumtemperatur getrocknet. Das dritte Exemplar wurde an ein auf Feuchtemessung spezialisiertes Unternehmen, die Schaller GmbH, geschickt, um den Wassergehalt mit der dortigen Labortechnik festzustellen.^{117, 118} Dort verkaufte Geräte zur Feuchtemessung lieferten laut dem Unternehmen die gleichen Ergebnisse wie im Labor.

¹¹⁷ Besprechung mit Alexander Luschnig am 19.11.2018

¹¹⁸ Vgl. <https://www.humimeter.com/de/startseite/> (11.12.2018)

In den Datenblättern des Herstellers BASF für das betrachtete Produkt Neopor F2300 ist kein Wassergehalt angegeben, während der Gesamtgehalt an n-Pentan und Isopentan summiert bei 4,5–5,5 % liegen sollte.^{119, 120} Abbildung 15 zeigt den Verlauf der Gewichtsverluste im Vergleich mit dem im Labor ermittelten Wert. Jeden Tag wurden die Massen der Proben dokumentiert.¹²¹ Zu beachten ist, dass bedingt durch die dazwischenliegenden Wochenenden an diesen Tagen keine Messwerte vorliegen, zu erkennen an den fehlenden Nummern der horizontalen Achse.

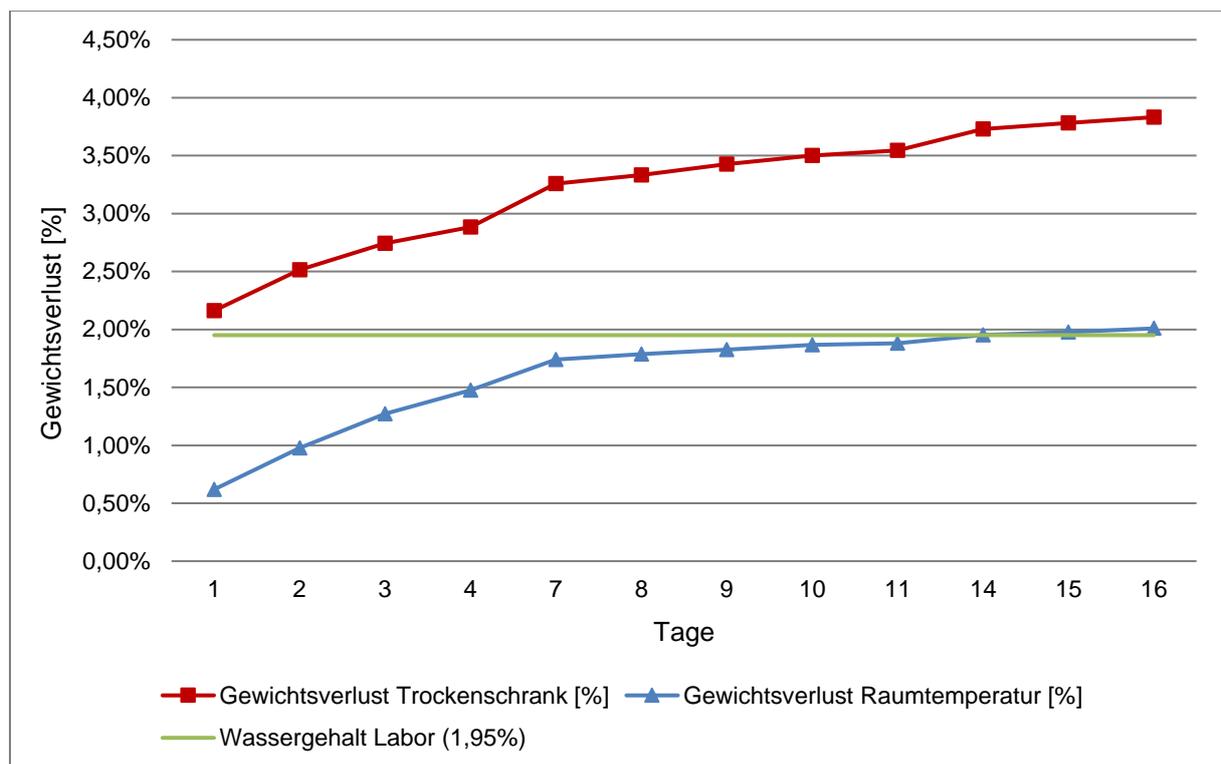


Abbildung 15: Vergleich Rohstoffmessung Trockenschrank – Raumtemperatur – Labor

Der Wert nach einem Tag Ofentrocknung ist zwar etwas höher als der im Labor gemessene, allerdings weicht er nicht stark davon ab. In der Folgezeit steigt der Gewichtsverlust der Ofenprobe immer weiter an, was fast ausschließlich auf entweichendes Pentan zurückzuführen sein dürfte. Bei Raumtemperatur erreicht der Gewichtsverlust nach etwa sieben bis zehn Tagen ein vergleichbares Niveau wie im Labor. Nach 14 Tagen sind die Werte annähernd identisch. Danach folgt ein weiterer, recht flacher Anstieg der Kurve. Damit bestätigen sich im Wesentlichen die Annahmen der vorherigen Abschnitte, vor allem von Kapitel 3.2.3.3. Die Gewichtsverluste im Trockenschrank nach einem Tag und bei Raumtemperatur nach etwa 7-14 Tagen kommen dem tatsächlichen Wassergehalt sehr nahe, siehe dazu auch Tabelle 6. Folglich sollten sich die bisher angestellten Untersuchungen zu Feuchtegehalten, Liefermengenabweichungen etc. eng an den realen Verhältnissen bewegen. Es ist anzunehmen, dass es sich um gute, wenn auch nicht vollkommen exakte Richtwerte handelt.

¹¹⁹ Vgl. BASF SE, 2016, Technisches Merkblatt Neopor® F 2000

¹²⁰ Vgl. BASF SE, 2015, Sicherheitsdatenblatt Neopor® F 2300

¹²¹ Das Wiegen der Proben selbst wurde in diesem Fall aus Zeitgründen nicht vom Autor selbst, sondern von Mitarbeitern und Mitarbeiterinnen der Qualitätssicherung durchgeführt.

Material	Gewichtsverlust 1 Tag Trockenschank [%]	Gewichtsverlust 14 Tage Raumtemperatur [%]	Wassergehalt Labor [%]
Neopor F2300	2,162%	1,953%	1,951%

Tabelle 6: Vergleichbare Zeitpunkte der Rohstofftrocknung

3.2.4 Schlussfolgerungen

An dieser Stelle werden die wesentlichen Schlüsse aus der umfangreichen Untersuchung des Rohstoffs zusammengefasst, insbesondere in Bezug auf den Rohstoffverbrauch bzw. die Rohstoffkosten:

- Die Feuchte im Oktabin ist gleichmäßig verteilt. Lokale Ansammlungen von besonders hohem Wassergehalt konnten nicht festgestellt werden.
- Im Plastiksack (Inliner) verbleiben nur sehr geringe Mengen an Material. Damit hat dieser Aspekt keinen wesentlichen Einfluss auf den Rohstoffverbrauch.
- Die Rohstoffe verschiedener Hersteller verhalten sich bei der Trocknung sehr unterschiedlich. Dies kann einerseits auf unterschiedliche chemische Zusammensetzungen zurückzuführen sein, deutet jedoch auch auf verschiedene Feuchtegehalte hin. Außerdem zeigen sich gleichartige, wenn auch schwächere, Abweichungen bei den diversen Materialtypen einzelner Hersteller und an verschiedenen Standorten der Hirsch Servo AG.
- Es gibt Hinweise darauf, dass die Feuchtegehalte über den Angaben der Hersteller liegen. Leider geben nur wenige Hersteller dazu in ihren Datenblättern konkrete Auskünfte. Die Vergleiche von Ofentrocknung, Zimmertemperaturmessung und dem Laborergebnis in Kapitel 3.2.3.5 legen allerdings nahe, dass Wassergehalt und Liefermengenabweichungen Werte relevanter Größenordnungen annehmen.
- Der zugekaufte Rohstoff macht einen Großteil der gesamten Produktionskosten des Unternehmens aus. Folglich haben Schwankungen in den tatsächlich gelieferten Rohstoffmengen, auf welche die obigen Untersuchungen hindeuten, unmittelbare Auswirkungen auf die Materialkosten. Sie führen zu Ungenauigkeiten und Fehlern im Bereich der Rohstoffkosten und Kalkulation. Außerdem wäre es wünschenswert zu wissen, welche Kosten je Hersteller für tatsächlich gelieferte Mengen an Rohstoff anfallen. Das kann nur gelingen, wenn eine umfangreiche Datenbasis durch solche und weitere Untersuchungen geschaffen wird. Eine vertiefte Beschäftigung mit den hier erörterten Sachverhalten erscheint daher insbesondere im Hinblick auf eine größere Kostentransparenz sinnvoll.
- Neben der Trocknung im Trockenschrank bzw. -ofen sollten verschiedene weitere Feuchtemessmethoden angewendet werden. Dies haben insbesondere die Ergebnisse der Abschnitte 3.2.3.4 und 3.2.3.5 gezeigt. Daraus würde sich ein deutlich vollständigeres Bild ergeben.

- Es ist anzuraten ein professionelles Feuchtemessgerät anzuschaffen, auch wenn dies mit finanziellem Aufwand verbunden wäre. Mit einem solchen Messgerät könnten regelmäßige, groß angelegte Kontrollen bzw. Messreihen wesentlich einfacher durchgeführt werden. Die dabei gewonnenen Information über die verschiedenen Rohstoffe wären sehr wertvoll.
- Trotz der erwähnten Kompromisse in Bezug auf den Messaufwand sind die hier gewonnenen Erkenntnisse durchaus sehr nützlich. Es gab bisher im Unternehmen kaum Daten zu diesen Fragestellungen. Sollte es jedoch den Wunsch nach näheren Analysen mit noch belastbareren Ergebnissen geben, müssen von Unternehmensseite Investitionen in umfangreiche Messungen getätigt werden. Insbesondere entsprechende Finanz- und Personalressourcen wären dafür notwendig. Aufgrund der hohen jährlichen Rohstoffkosten sind hier dennoch Einsparungspotentiale zu vermuten.

3.3 Untersuchung von fertigen Formteilen

Gegenstand der Analysen in diesem Kapitel sind die fertigen Formteile. Bezugnehmend auf Kapitel 3.1.2 bzw. Abbildung 10 handelt es sich um das Produkt zum Zeitpunkt seiner Entnahme aus dem Formteilautomaten. Hirsch Porozell stellt für seine diversen Kunden eine Vielzahl an Formteilen her. Da durch die erwähnten, beschränkten Ressourcen unmöglich alle Produkte analysiert werden können, wurde eine Formteilstück exemplarisch zur Untersuchung herangezogen. Dabei handelt es sich um EPS-Schalelemente, welche an Formteilautomaten der Fertigung in Glanegg in hoher Frequenz durchgehend produziert werden. Folglich sind sie ein besonders repräsentativer Analysegegenstand. In Abbildung 16 ist das Produkt dargestellt. Aufbau und Ablauf der Untersuchung richten sich wiederum nach dem Muster von Kapitel 2.9. Auf Vorbereitung und Untersuchungszweck bzw. Definition zu erhebender Daten folgen wieder Aufbereitung, Darstellung und Analyse. Wichtig sind arithmetisches Mittel und Spannweite als Maßzahlen für Lage und Streuung.



Abbildung 16: EPS-Schalelement¹²²

3.3.1 Zweck der Untersuchung

Das EPS-Schalelement steht exemplarisch für die von der Hirsch Gruppe in Glanegg hergestellten Formteile. Wie schon in Kapitel 3.1.2 erklärt, wird das vorgeschäumte Material an den Automaten direkt zu Fertigprodukten verarbeitet. Im konkreten Fall der Schalelemente wird Silomaterial in das Werkzeug bzw. die Form eingebracht und darin mit Hilfe von Wasserdampf, Überdruck sowie Vakuum zum fertigen Teil verarbeitet. Es werden immer zwei Schalelemente gleichzeitig geschäumt. Danach werden diese aus dem Werkzeug ausgeworfen, vom Maschinenbedienpersonal entnommen und gestapelt. Nach der Verpackung der Stapel in Folie sind die Teile fertig zur Auslieferung. In Bezug auf den Materialverbrauch und die damit einhergehenden Kosten interessieren im Wesentlichen drei Aspekte:¹²³

¹²² <https://www.hirsch-gruppe.com/de/produkte-und-anwendungen/eps-technische-formteile/bau.html>
(16.11.2018)

¹²³ Besprechung mit Klaus Unterleutner am 27.08.2018

- Die Schalelemente bzw. ganz allgemein alle vom Unternehmen hergestellten Teile müssen gewissen Anforderungen an ihr Gewicht bzw. ihre Dichte genügen. Außerdem sind Gewicht und Dichte des Teils natürlich der ausschlaggebende Faktor für die Menge des darin enthaltenen Materials. Damit hängt die für ein Formteil benötigte Rohstoffmenge direkt von dessen Masse ab. Es gilt daher zu untersuchen, wie schwer die produzierten Teile sind und wie stark ihr Gewicht schwankt.
- Da der Feuchtegehalt einen großen Einfluss auf das Gewicht des Teils hat, soll überprüft werden, wie hoch dieser ist. Außerdem interessiert dessen Schwankungsbreite. Auch für die Analyse des Rohstoffeinsatzes pro Formteil spielt der Wassergehalt eine wichtige Rolle.
- Schließlich ist es noch wissenswert, welche anderen Parameter an der Maschine einen offensichtlichen Einfluss auf Gewicht und Feuchte der Teile und damit auf den Materialeinsatz haben.

3.3.2 Durchführung

Zum Zeitpunkt der Entnahme aus der Maschine enthalten die Teile noch einen erheblichen Anteil an Feuchte. Um Trockengewicht und Feuchte der Teile festzustellen, wurde ähnlich der Trocknung des Rohstoffs (siehe Kapitel 3.2.2) und in Anlehnung an die isothermische Thermogravimetrie (vgl. Kapitel 2.3.3) folgendes, vereinfachtes Messverfahren als praktikabel erachtet und eingesetzt:

1. Entnahme der zwei ausgeworfenen Formteile.
2. Entfernen des Oberflächenwassers durch gründliches Schütteln (vgl. „Haftflüssigkeit“ in Kapitel 2.3.2).
3. Wiegen der feuchten Teile.
4. Lagern der Teile in einem begehbaren Trockenschrank („Sauna“) bei circa 50 °C.
5. Entnahme der getrockneten Teile aus dem Trockenschrank nach 24 Stunden.
6. Erneutes Wiegen der Teile.
7. Ermittlung des prozentuellen Feuchtegehalts aus dem Unterschied zwischen Trocken- und Feuchtgewicht. Als Bezugswert wurde das Trockengewicht verwendet.

Da insbesondere der zeitliche Verlauf der Größen Gewicht und Feuchte im Zentrum des Interesses steht, müssen die Werte über einen längeren Zeitraum aufgezeichnet werden. Als geeignete Dauer wurde eine Schicht, also acht Stunden gewählt. Alle 30 Minuten wurden dabei je zwei Teile entnommen und ihre Daten aufgezeichnet. Dieses Intervall stellt einen sinnvollen Kompromiss zwischen Aufwand und Nutzen des Ziehens von Stichproben dar (vgl. Kapitel 2.9.2). Am folgenden Tag, also nach der Trocknungsphase, wurden die Daten im trockenen Zustand erneut notiert. Um Schwankungen zwischen zwei Tagen zu untersuchen, fand die Messung an zwei aufeinanderfolgenden Tagen statt:

- Tag 1: Lagerung von Teilen zur Trocknung im Trockenschrank.
- Tag 2: Entnahme der bereits getrockneten Teile aus dem Trockenschrank und Einlagerung der neuen, feuchten Teile.
- Tag 3: Entnahme der getrockneten Teile von Tag 2.

Außerdem erfolgte parallel zu den oben genannten Messungen noch eine weitere Datensammlung. Dabei wurde auf das laufend vom Formteilautomaten automatisch erstellte, elektronische Protokoll zurückgegriffen. Jedem Zyklus, in dem zwei Formteile entstehen, wurden folgende Daten aus dem Protokoll der Sensoraufzeichnungen zugeordnet:

- Dampfverbrauch
- Bedampfungszeit
- Druck
- Gesamt-Zykluszeit
- Öffnung des Werkzeugs („Spalt“)

Wie in den vorangegangenen Kapiteln mehrfach erwähnt, enthalten die Ausgangsstoffe von EPS-Produkten neben Wasser auch andere Stoffe wie Flammenschutzmittel und Pentan. Der Einfluss dieser Stoffe auf den Gewichtsverlust von Fertigteilen wird jedoch in dieser Untersuchung als vernachlässigbar klein angenommen. Insbesondere das Treibmittel sollte während der zuvor erfolgten, zweimaligen Expansion nahezu vollständig entwichen sein.

3.3.3 Ergebnisse und Diskussion

Nachfolgend werden die Ergebnisse dieser Messreihe bezüglich Trockengewicht, Feuchte und dem Einfluss der Maschinenparameter vorgestellt.

3.3.3.1 Ergebnisse und Diskussion Trockengewicht

In Tabelle 7 sind die ermittelten Maßzahlen, also Mittelwert und Spannweite angeführt, während Abbildung 17 den Verlauf der Trockengewichte darstellt. Dabei bezeichnen „101/1“ und „101/2“ usw. jeweils zwei zum gleichen Zeitpunkt entnommenen Teile. Das maximale Gewicht wurde am ersten Tag mit 889 g erreicht. Ein Minimum von 806 g wurde am zweiten Tag gemessen.

	Tag 1	Tag 2	Gesamt
Mittelwert [g]	870,18	830,12	850,15
Maximalwert [g]	889	848	889
Minimalwert [g]	812	806	806
Spannweite [g]	77	42	83

Tabelle 7: Maßzahlen Trockenmasse Schalelemente

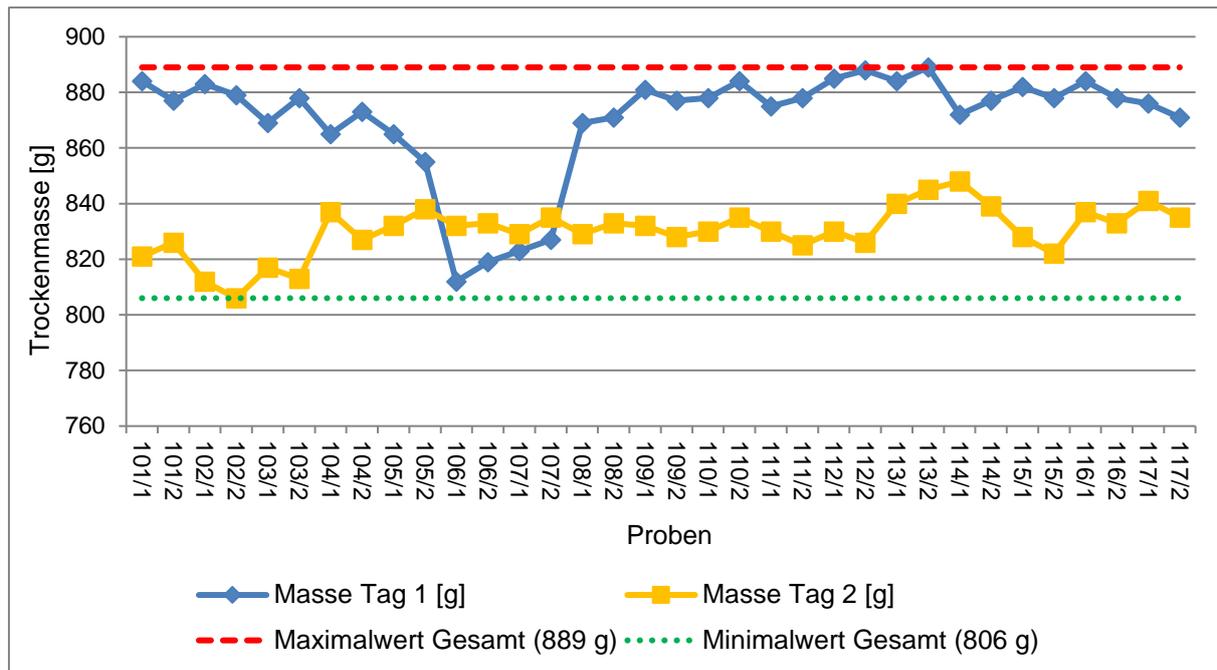


Abbildung 17: Trockenmasse der Schalelemente

Die Gesamt-Spannweite fällt überraschend groß aus. Bei einem Gesamtgewicht von 800-900 g stellen 83 g eine erhebliche Spannweite dar. Die Gewichte des zweiten Tags weisen zudem eine wesentlich niedrigere Streuung als an Tag 1 auf. Außerdem ist hervorzuheben, dass sich das Gewicht am ersten Tag relativ konstant auf deutlich höherem Niveau bewegt als am Folgetag. Als einzige Ausnahmen sind die Proben 106/1 bis 107/2 zu nennen. Hier zeigt sich ein deutlicher Einbruch, der auch zu der erheblich vergrößerten Spannweite führt. Jedoch stellt sich sofort danach das konstant höhere Gewicht erneut ein. In diesem Wertebereich bleibt es auch für den Rest des Tages. An Tag 2 stellen sich die ermittelten Trockengewicht durchwegs niedriger dar. Der Unterschied der Mittelwerte an den beiden Tagen ist ebenso unerwartet hoch. Sowohl Mittelwerte als auch die Grafik zeigen einen gravierenden Niveauunterschied zwischen beiden Tagen der Messung.

Bezüglich der Ursachen für diese deutliche Schwankung wurden einige Nachforschungen unternommen. Dennoch sind diese nach wie vor relativ unklar. Betreffend der Dichte der geschäumten Teile wurde von den verantwortlichen Personen keine Umstellung an der Maschine zwischen Tag 1 und 2 vorgenommen. Auch das Silomaterial hatte laut Protokoll des Vorschäumers die gleiche Dichte. Eine Möglichkeit wäre eine inkonstante Versorgung der Maschine mit Wasserdampf. Letzte denkbare Erklärung ist eine geänderte Einstellung bei der Öffnung des Werkzeuges („Spalt“). Gelegentlich wird das Werkzeug beim Herstellen der Teile etwas weiter geöffnet, um durch anschließendes Schließen und Zusammenpressen eine bessere Ausfüllung der Form zu erreichen. Doch auch hier finden sich in den Protokollen der Maschineneinstellung keine wesentlichen Änderungen. Es gibt zwar eine kleine Umstellung der Spaltgröße von 1 auf 1,1 mm, doch fällt diese zeitlich nicht annähernd zusammen mit den Sprüngen in den gemessenen Trockengewichten. Die Änderung der Spalteinstellung fand in Bezug auf das obige Diagramm zwischen Probe 108/2 und 109/1 an Tag 2 statt. Hier gibt es eindeutig keinen Sprung im Trockengewicht der Teile.

Als wesentliche Erkenntnis bleibt festzuhalten, dass die Unterschiede in den Trockengewichten der Formteile sehr groß sind, ohne dass es dafür einen klar ersichtlichen Grund gibt. Einerseits ist der Einbruch der Werte an Tag 1 bemerkenswert, andererseits der extreme Unterschied im Vergleich der beiden Tage.

3.3.3.2 Ergebnisse und Diskussion Feuchte

Tabelle 8 zeigt wieder die ermittelten Maßzahlen. In Abbildung 18 sind die Feuchtegehalte der Schalelemente ersichtlich. Die Bezeichnung der Proben erfolgte analog zu Kapitel 3.3.3.1.

	Tag 1	Tag 2	Gesamt
Mittelwert	8,56%	8,41%	8,48%
Maximalwert	11,56%	10,23%	11,56%
Minimalwert	6,85%	7,59%	6,85%
Spannweite	4,71%	2,64%	4,71%

Tabelle 8: Maßzahlen Feuchteanteil Schalelemente

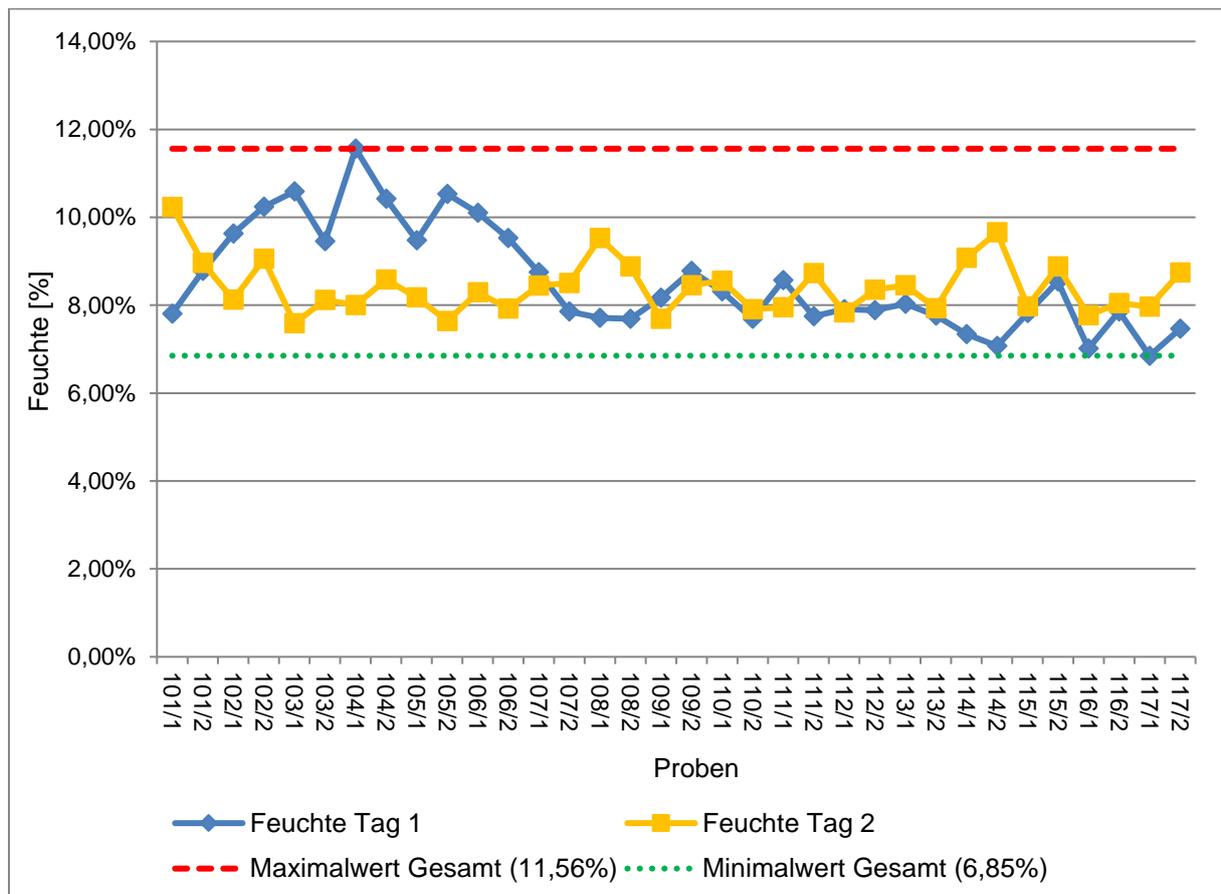


Abbildung 18: Feuchte der Schalelemente

Bei der Analyse der Feuchte zeigt sich ein ähnliches Bild wie bei den Trockengewichten. Die Unterschiede zwischen höchsten und niedrigsten gemessenen Werten sind erheblich. Man beachte, dass sich die Werte an Tag 2 in einem kleineren Korridor bewegen als an Tag 1. Die Spannweite des ersten Tages ist beinahe doppelt so groß wie am Folgetag. Sowohl Maximal- als auch Minimalwert traten am ersten Tag auf. Damit ist die die Gesamt-Streuung, die exakt jener am ersten Tag entspricht, erneut sehr groß. An Tag 2 ist sie hingegen relativ moderat. Die Mittelwerte an den beiden Tagen sind hingegen sehr ähnlich. Auch hier bleibt zu sagen, dass die großen Unterschiede in den gemessenen Werten das auffälligste Ergebnis der Messung sind.

3.3.3.3 Ergebnisse und Diskussion Maschinenparameter

Wie oben bereits erwähnt, wurden zusätzlich zu den bereits diskutierten Daten und Auswertungen noch weitere Informationen gesammelt, um diese auf Zusammenhänge mit den gemessenen Werten zu untersuchen. Die vorangegangenen Analysen von Trockengewicht und Feuchteanteil stehen jedoch eindeutig im Zentrum dieses Kapitels. Daher werden die weiteren Ergebnisse hier in aller Kürze beschrieben:

- Die Gesamt-Zykluszeit zur Herstellung von je zwei Schalelementen ist nicht konstant. Daher gab es die Vermutung, dass die zeitlichen Schwankungen rein auf die Abweichungen in der Bedampfungszeit, die einen großen Teil der Gesamtzeit ausmacht, zurückzuführen sind. Die Differenz zwischen Gesamt-Zyklus- und Bedampfungszeit hat sich jedoch ebenso als inkonstant herausgestellt. Damit muss es noch weitere unbekannte Einflüsse auf die Gesamtzeit geben.
- Außerdem wurden Bedampfungszeit, Dampfverbrauch und Feuchteanteil jedes Zyklus miteinander verglichen. Auch hier konnte kein klar ersichtlicher Zusammenhang ausgemacht werden.
- Die bereits erwähnte Spalteinstellung könnte einen Einfluss auf Dichte und damit Trockengewicht der untersuchten Teile haben. Zumindest im Rahmen dieser Analyse wurde allerdings kein Zusammenhang gefunden.

3.3.4 Schlussfolgerungen

Nachfolgend werden die wichtigsten Erkenntnisse aus der Untersuchung der Schalelemente in Bezug auf den Materialverbrauch bzw. Auswirkungen auf die Materialkosten der Teile zusammengefasst:

- Die Trockengewichte der Teile weisen eine sehr große Streuung bzw. Spannweite auf. Zieht man die Mittelwerte der beiden Tage heran, zeigen sich ebenso deutliche Unterschiede. Es ist daher nur schwer möglich einen allgemeinen (Durchschnitts-) Wert für das Gewicht eines Teils festzulegen. Folglich wird es auch nur unter Vorbehalt möglich sein, einen durchschnittlichen Materialverbrauch pro Teil zu definieren.

- Die Feuchte der Schalelemente zeigt ebenfalls erhebliche Unterschiede und Streuungen. Dennoch liegen die Durchschnittswerte der beiden Tage relativ nahe beisammen. Im Gegensatz zum Trockengewicht ist es hier wesentlich leichter vorstellbar, einen Richtwert der Feuchte zu definieren. Dieser könnte in etwa bei 8,5 % liegen.
- Die Gründe für die oben angesprochenen Schwankungen der gemessenen Werte konnten zumindest im Rahmen dieser Masterarbeit nicht gefunden werden. Um eine bessere Vorhersagbarkeit und Stabilität der Prozesse zu erreichen, müsste man, wie schon in Kapitel 3.2.4 zum Thema Rohstoffe vorgeschlagen, deutlich mehr finanzielle und personelle Anstrengungen unternehmen. Die entsprechenden Messreihen wären dann über einen wesentlich längeren Zeitraum anzustellen.
- Wenn nicht genau bekannt bzw. vorhersagbar ist, welche Gewichte und Feuchtigkeitsverluste die produzierten Teile aufweisen, kann auch keine belastbare Aussage darüber gemacht werden, wie viel Rohstoff bei ihrer Herstellung verbraucht wird. Abweichungen und Streuungen in diesem Bereich führen daher zu Ungenauigkeiten bei der Berechnung des eingesetzten Materials. Daraus folgen auch Probleme bei der Bewertung der anfallenden Materialkosten. Im Sinne einer Verbesserung der Kostentransparenz sollte man folglich danach streben, die Ursachen für diese Abweichungen zu finden und zu beseitigen. Hier könnte sich erhebliches Einsparungspotential ergeben.

3.4 Untersuchung von Dämmplatten und Blöcken

Nach den Formteilen werden in diesem Kapitel die Produkte des Bereichs Dämmstoffe analysiert. Bezugnehmend auf Kapitel 3.1.1 und Abbildung 9 betrifft diese Untersuchung den Abschnitt von der Blockmaschine bis zum Schneiden. In Kapitel 2.1.3.2 wurden Blockschäumen und anschließendes Schneiden zu Platten bereits vorgestellt. Um den gesamten Dämmstoffbereich mit dieser Untersuchung abzudecken, wurde versucht, möglichst viele verschiedene Dichte- und Farbvarianten der Blöcke einzubeziehen. Auch die Zusammenhänge und Vorgänge in den aus diesen Blöcken geschnittenen Platten sind von Interesse. Als Beispiel sind zwei Dämmplatten des Materialtyps F verschiedener Dicke in Abbildung 19 schematisch dargestellt. Das grundsätzliche Vorgehen (Vorbereitung, Erhebung, Darstellung, Analyse) ist, wie schon in den Untersuchungen zuvor, an von Kapitel 2.9.1 angelehnt.

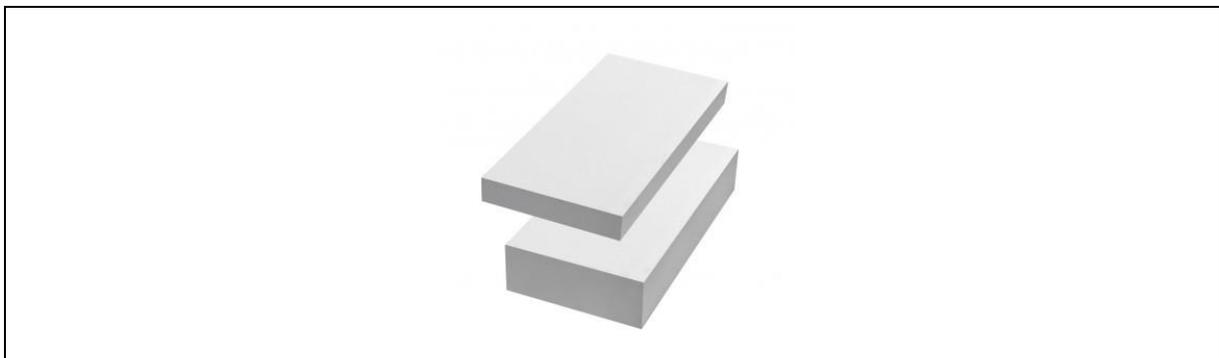


Abbildung 19: Dämmplatten Typ F¹²⁴

3.4.1 Zweck der Untersuchung

Der grundlegende Vorgang bei der Dämmplattenherstellung wurde bereits in Kapitel 3.1.1 beschrieben. Das in den Silos ausreichend lange gelagerte Material wird mittels Blockmaschinen in die Form eines großen Blocks gebracht. Wasserdampf wird über Düsen eingeblasen, während die EPS-Perlen unter großer Hitze leicht expandieren und verkleben. Dabei entweicht auch Pentan. Nach dem erneuten Lagern und Trocknen der Blöcke werden diese in ihre endgültige Plattenform geschnitten. Die Untersuchung soll nun folgende Punkte klären, die für den Materialverbrauch und daraus entstehende Kosten wichtig sind:¹²⁵

- Das in die Blockformen eingeblasene Silomaterial wird an der Maschine automatisch gewogen. Daraus wird die Dichte des Blocks berechnet. Die errechnete Masse entspricht jedoch aus mehreren Gründen nicht exakt den tatsächlichen Werten. Erstens wird neben Silomaterial auch Dampf in die Formen eingeblasen, zweitens entweicht dabei Pentan und drittens könnte es sein, dass die Maschinenwaage nicht exakt arbeitet. Daher ist der Inhalt des ersten Untersuchungsteils, die automatisch erfassten Blockgewichte mit den tatsächlichen zu vergleichen.

¹²⁴ <https://www.hirsch-gruppe.com/de/produkte-und-anwendungen/eps-daemmung/eps-fassadendaemmung.html> (10.12.2018)

¹²⁵ Besprechung mit Klaus Unterleutner am 07.09.2018

- Die Lagerung der Blöcke dient in erster Linie der Trocknung. Sind die Blöcke zu feucht, reißen die zum Schneiden verwendeten Heißdrähte. Es gilt daher zu ermitteln, wie viel Masse bzw. Feuchte die Blöcke während der Lagerung verlieren.
- Die aus den Platten geschnittenen Blöcke enthalten noch eine Restfeuchte und weichen in ihrer Masse bzw. Dichte voneinander ab. Es soll herausgefunden werden, wie hoch der Anteil der Restfeuchte ist und wie stark die Plattengewichte sich unterscheiden.
- Zur Ermittlung der Plattenfeuchte wird ein Trockenschrank verwendet. In Kapitel 2.3.2.1 wurde schon erklärt, dass die Feuchte eines Bauteils, welche in einem Gleichgewichtszustand mit dessen Umgebung vorliegt, als Gleichgewichtsfeuchte bezeichnet wird. Da der Trockenschrank keine praktisch relevante Umgebung ist, soll untersucht werden, was mit einer analysierten Platte nach einiger Zeit bei Raumtemperatur geschieht.

3.4.2 Durchführung

Um den oben erklärten Untersuchungszweck zu erfüllen, wurde wieder eine vereinfachte Messung mittels Trocknung nach Vorbild der isothermischen Thermogravimetrie (vgl. Kapitel 2.3.3) angewendet:

1. Notieren der Daten des frisch geschäumten Blocks, insbesondere das von der Maschine automatisch erfasste Einwaagegewicht.
2. Kennzeichnen der zu untersuchenden Blöcke und Wiegen an einer zuvor auf ihre möglichst exakte Funktion geprüfte Waage. Der Unterschied zwischen Einwaage- und tatsächlichem Gewicht ist nun feststellbar.
3. Separate Lagerung, um die Blöcke aus dem Fertigungsablauf auszuscheiden.
4. Nach einiger Lagerungszeit erneutes Wiegen und Berechnung des Gewichtsverlusts bzw. Feuchteanteils.
5. Schneiden einiger Platten aus den gewogenen Blöcken. Wiederum werden diese im Anschluss gewogen, getrocknet und erneut gewogen, um ihren Gewichts- bzw. Wasserverlust zu berechnen. Zur Trocknung wird wie schon bei den Formteilen ein großer, begehbare Trockenschrank (Sauna) verwendet.
6. Lagern einer bereits analysierten, getrockneten Platte bei Zimmertemperatur und erneutes Wiegen. Es ist anzunehmen, dass diese wieder etwas an Gewicht zunimmt. Die Umgebung (Büro) entspricht eher den realen Verhältnissen an einer Baustelle als der Trockenschrank.

Ursprünglich war es geplant, aus allen Blöcken geschnittene Platten zu untersuchen. Dies erwies sich jedoch als unmöglich, da es den reibungslosen Ablauf der Fertigung zu stark beeinträchtigt hätte. Daher konnten lediglich einige Exemplare untersucht werden. Insgesamt wurden 24 Blöcke gewogen und aus sechs davon zwölf Platten geschnitten. Wieder sei darauf hingewiesen, dass der Gewichtsverlust durch andere Stoffe als Wasser, wie schon in Kapitel 3.3.2, bei den hier betrachteten Halbfertig- und Fertigprodukten als vernachlässigbar angenommen wird.

3.4.3 Ergebnisse und Diskussion

Nun werden die Ergebnisse zu Einwaagegewicht, Blockgewicht, Blockfeuchte, Plattengewicht und Plattenfeuchte präsentiert und analysiert.

3.4.3.1 Ergebnisse und Diskussion Einwaagegewicht

Abbildung 20 und Tabelle 9 zeigen die Ergebnisse des Gewichtsunterschieds zwischen Einwaagegewicht an der Maschine und tatsächlichem Blockgewicht. Es sind jeweils die Blocknummern und Materialtypen angegeben, wobei „W“ für weißes und „G“ für graues Material stehen. Während in Abbildung 20 die Werte jedes einzelnen Blocks dargestellt sind, gibt Tabelle 9 Mittelwerte und Spannweiten je Materialtyp an (vgl. Kapitel 2.9). Als Bezug für die Prozentwerte wurde hier vom Einwaagegewicht ausgegangen. Positive Werte bedeuten, dass das Gewicht des manuell gewogenen Blocks höher als der Maschinenwert war, negative Werte, dass es niedriger ausfiel. Von den 24 Blöcken konnten die Nummern 6-8 wegen Problemen bei der Kennzeichnung nicht für diese Analyse herangezogen werden. Daher fehlen diese in der horizontalen Achse der Grafik und wurden auch nicht bei der Berechnung der Mittelwerte und Spannweiten berücksichtigt.

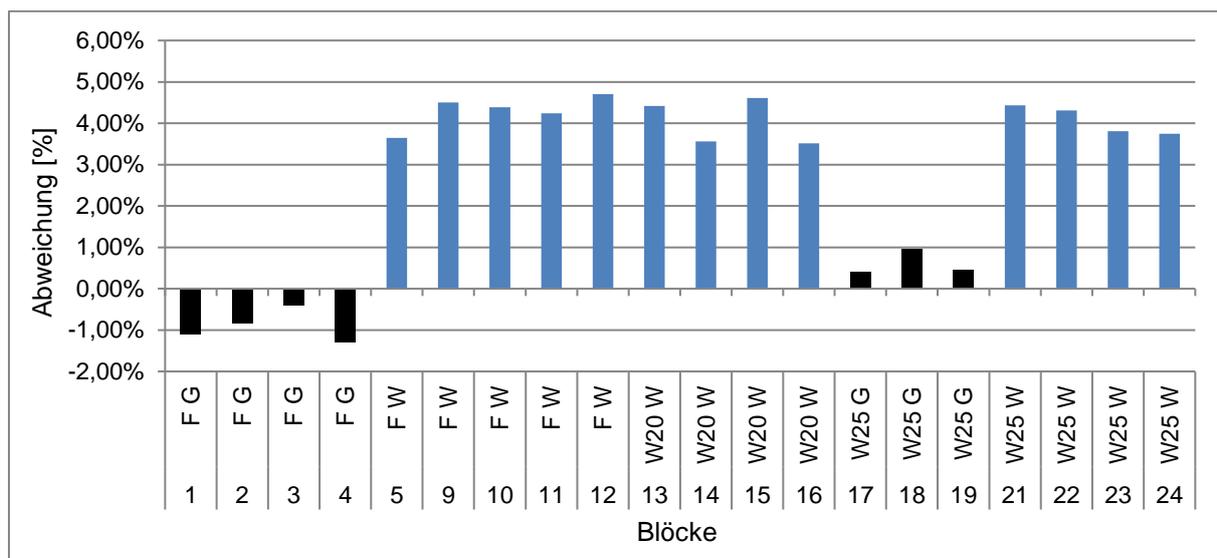


Abbildung 20: Diagramm Einwaagegewicht

Materialtyp	Mittelwert	Maximalwert	Minimalwert	Spannweite
F G	-0,91%	-0,41%	-1,29%	0,88%
F W	4,29%	4,70%	3,64%	1,06%
W20 W	4,03%	4,61%	3,51%	1,10%
W25 G	0,60%	0,95%	0,41%	0,55%
W25 W	4,07%	4,44%	3,75%	0,69%
Gesamt	2,60%	4,70%	-1,29%	5,99%
Gesamt Weiß	4,14%	4,70%	3,51%	1,19%
Gesamt Grau	-0,26%	0,95%	-1,29%	2,24%

Tabelle 9: Arithmetisches Mittel und Spannweite Einwaagegewicht

Im Diagramm fällt sofort auf, dass die Werte für die Materialien F G und W25 G eklatant niedriger als alle anderen sind. Hier muss angemerkt werden, dass diese beiden grauen Materialien an der Blockmaschine 2, alle weißen Blöcke hingegen an der Blockmaschine 1 verarbeitet wurden. Der naheliegende Grund für die auftretenden Unterschiede ist daher, dass die Einwaage der Maschine 2 nicht exakt arbeitet. Dies wurde daher vor Ort untersucht und tatsächlich eine Abweichung festgestellt, welche die gesuchte Ursache sein könnte. Eine Neukalibrierung der Einwaage wurde veranlasst. Sie wurde aber erst für die Zeit nach dieser Untersuchung in Aussicht gestellt.

Auch bei den Mittelwerten in der Tabelle fällt der dadurch verursachte Unterschied deutlich ins Gewicht. Daher wurde das arithmetische Mittel für weißes und graues Material noch einmal separat berechnet. Betrachtet man in Diagramm und Tabelle nur die an der korrekt arbeitenden Blockmaschine 1 gefertigten weißen Blöcke, so zeigt sich hingegen ein recht einheitliches Bild. Sämtliche Werte der einzelnen Blöcke bewegen sich im Bereich zwischen 3 und 5 %. Die Spannweiten liegen circa bei 0,5 bis 1 %, wobei auch hier die grauen Materialien deutlich von den übrigen abweichen. Weiße Blöcke zeigen also eine geringe Streuung. Deren Mittelwerte liegen alle nahe bei circa 4 %, was folglich als näherungsweise Richtwert für den Messunterschied der beiden Wiegemethoden (Einwaage und manuelle Wiegung des Blocks) herangezogen werden kann.

3.4.3.2 Ergebnisse und Diskussion Gewichtsverlust Block

Nun wird der Gewichtsverlust der Blöcke bei deren Lagerung betrachtet. Abbildung 21 stellt die Einzelwerte pro Block dar, Tabelle 10 gibt Mittelwerte und Spannweiten je Materialtyp an. Die Blocknummern sind zur Vergleichbarkeit mit den anderen Messungen in diesem Kapitel immer angegeben. Die Blöcke 21-23 konnten nicht gewogen werden, da sie im Lager nicht mehr auffindbar waren. Vorweg ist auch noch anzumerken, dass die Blöcke des Materials F Grau nur zwei Wochen, alle anderen jedoch circa einen Monat ablagern konnten. Dies lag an der erheblichen Schwierigkeit, die Blöcke dieser Messung an der Schneidstraße zu Platten zu verarbeiten, ohne den laufenden Fertigungsbetrieb massiv zu stören. Die kürzer gelagerten Blöcke sind im Diagramm durch die hellere Färbung der Balken gekennzeichnet. In der Tabelle sind für die unterschiedlichen Lagerungszeiten separate Werte angeführt. Als Bezugswert für die Prozentzahlen wurde das Trockengewicht nach dem Lagern verwendet.

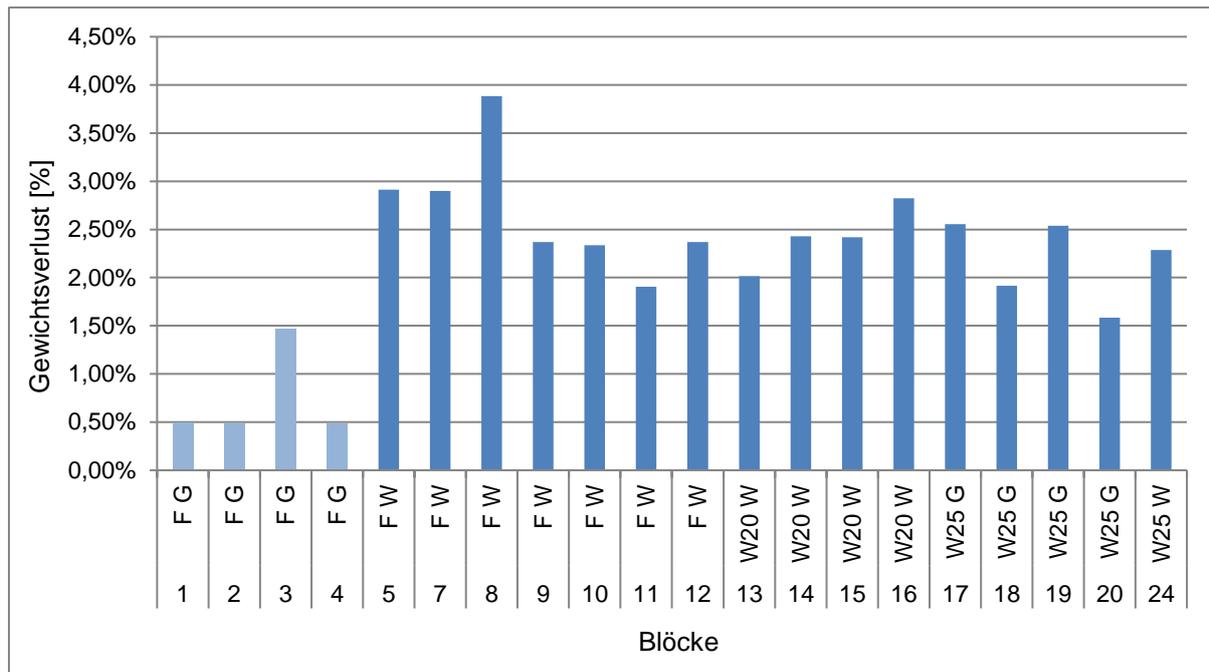


Abbildung 21: Diagramm Gewichtsverlust Block

Materialtyp	Mittelwert	Maximalwert	Minimalwert	Spannweite
F G	0,73%	1,47%	0,49%	0,99%
F W	2,67%	3,88%	1,90%	1,98%
W20 W	2,42%	2,82%	2,02%	0,81%
W25 G	2,15%	2,56%	1,58%	0,97%
W25 W	2,29%	2,29%	2,29%	0,00%
Gesamt	2,11%	3,88%	0,49%	3,40%
Gesamt 2 Wochen	0,73%	1,47%	0,49%	0,99%
Gesamt 1 Monat	2,45%	3,88%	1,58%	2,30%

Tabelle 10: Arithmetisches Mittel und Spannweite Gewichtsverlust Block

Zunächst wird deutlich, dass die Verluste der kürzer gelagerten Platten wesentlich niedriger als jene der übrigen Exemplare sind. Daraus lässt sich schließen, dass nach zwei Wochen auch bei niedrigen Dichten noch keine vollständige Trocknung geschehen ist. Vom Material W25 konnte nur ein Block gewogen werden, daher entspricht der Mittelwert dem Messwert und die Spannweite verschwindet (vgl. Kapitel 2.9). Nach zwei Wochen liegen die Werte in etwa zwischen 0,5 und 1,5 %, nach einem Monat schon bei 1,5 bis 4 %. Die einzelnen Materialien streuen um rund 1 %. Lediglich F W liegt hier bei 2 %, was wohl auch daran liegt, dass hiervon die meisten Stichproben gezogen wurden. Ansonsten zeigt sich nach einem Monat ein relativ einheitlicher Gewichtsverlust mit einem Mittelwert von 2,45 %. Offensichtlich hat die längere Ablagerungszeit einen erheblichen Einfluss, während sich die unterschiedlichen Materialien dagegen sehr ähnlich verhalten. Auch ein wesentlicher Unterschied zwischen gleich lange gelagerten weißen und grauen Materialien ist nicht auszumachen.

3.4.3.3 Ergebnisse und Diskussion Plattenfeuchte

In diesem Abschnitt wird die Feuchte der Platten betrachtet. Insgesamt wurden zwölf Platten aus sechs Blöcken geschnitten. Je Block wurden zwei Platten entnommen, eine aus dem äußeren Bereich und eine weiter innen liegende. Blocknummern, Lage der Platte (innen oder außen) sowie Material sind in den Grafiken dieses Kapitels angegeben.

Zunächst werden die Ergebnisse der Feuchtemessung analysiert. Abbildung 22 zeigt für jede der Platten drei Werte:

- Links: Der Gewichtsverlust des Blocks, aus denen die Platten geschnitten wurden.
- Mitte: Der Gewichtsverlust der Platte nach zwei Wochen im Trockenschrank. Es hat sich gezeigt, dass das Gewicht nach dieser Zeit stabil bleibt, also kein weiterer Feuchteverlust eintritt.
- Rechts: Die Summe der beiden oben genannten Verluste pro Platte. Damit lässt sich abschätzen, welcher Wasseranteil insgesamt im entsprechenden Bereich des Blocks zum Zeitpunkt des Auswerfens aus der Blockmaschine vorhanden war.

Tabelle 11 zeigt wieder arithmetisches Mittel und Spannweite je Materialtyp einer Platte. Tabelle 12 gibt die gleichen Maßzahlen für die Summe aus den Verlusten von Block und Platte an.

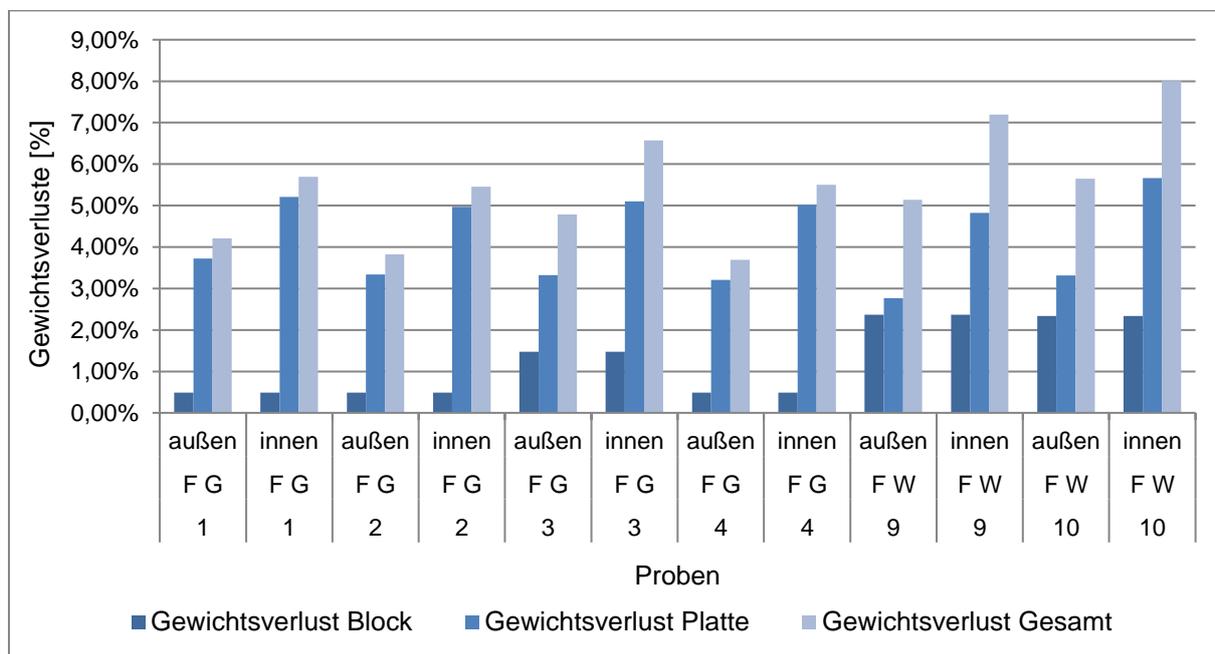


Abbildung 22: Gewichtsverlust von Blöcken und daraus geschnittenen Platten

Materialtyp	Mittelwert	Maximalwert	Minimalwert	Spannweite
F G	4,234%	5,208%	3,204%	2,004%
F W	4,142%	5,665%	2,769%	2,896%
Gesamt	4,203%	5,665%	2,769%	2,896%

Tabelle 11: Arithmetisches Mittel und Spannweite Gewichtsverlust Platten

Materialtyp	Mittelwert	Maximalwert	Minimalwert	Spannweite
F G	4,966%	6,572%	3,689%	2,882%
F W	6,495%	8,001%	5,139%	2,862%
Gesamt	5,476%	8,001%	3,689%	4,312%

Tabelle 12: Arithmetisches Mittel und Spannweite Gewichtsverlust Gesamt

Als erstes muss wieder angemerkt werden, dass die Blöcke des Materials F G zwei Wochen, jene aus F W hingegen einen Monat abgelagert wurden, wie schon vorher erwähnt wurde. Das zeigt sich erneut in den deutlich niedrigeren Gewichtsverlusten. Nun betrachte man die Verluste der Platten in Abbildung 22 mit besonderem Augenmerk darauf, ob diese aus einem äußeren oder inneren Bereich des Blocks stammen. Hier ist der Wert innen für jeden einzelnen Block eindeutig höher als außen, unabhängig von der vorangegangenen Ablagerungszeit. Somit ist eindeutig festgestellt, dass die Außenbereiche eines Blocks beim gewöhnlichen Lagern schneller trocknen als innen. Die Werte innen und außen liegen nach einem Monat ähnlich weit auseinander wie nach zwei Wochen. Es scheint also kein wesentlicher Ausgleich der Bereiche mit zunehmender Ablagerungszeit einzutreten.

Außerdem fällt auf, dass die Summe der Verluste (Balken ganz rechts) zwischen den verschiedenen lange gelagerten Blöcken relativ zum reinen Verlust des Blockgewichts nur minimal ähnlicher zueinander sind. Hier war eine stärkere Angleichung zu erwarten, da die feuchteren, bzw. kürzer in Form eines Block gelagerten, Platten anschließend im Trockenschrank umso mehr Wasser verlieren sollten. Die Gesamtwerte gleichen sich zwar leicht an, aber es ist immer noch ein erheblicher Unterschied feststellbar. Die Gesamtverluste liegen beim zwei Wochen als Block gelagerten Material (F G) bei circa 3,7 bis 6,6 % mit einem Mittel von rund 5 %. Beim länger gelagerten F W liegen die Werte in etwa bei 5,1 bis 8 %, der Mittelwert bei rund 6,5 %. Mit rund 2,8 % Spannweite streuen beide Materialien etwa gleich breit. Es bleibt noch zu sagen, dass der Unterschied zwischen den zwei Materialien wohl auch auf die chemische Zusammensetzung und nicht nur auf die Ablagerungszeit zurückzuführen ist. Es scheint daher naheliegend anzunehmen, dass F G allgemein weniger Feuchte enthält als F W.

3.4.3.4 Ergebnisse und Diskussion Trockengewichte

Um näher zu untersuchen, wie sich die Materialien und insbesondere die Lage im Block auf die Eigenschaften der Platten auswirken, sollen nun die Ergebnisse der Messungen des Trockengewichts analysiert werden. Für die untersuchten Platten sowie die Diagrammbeschriftung gilt das in Kapitel 3.4.3.3 Gesagte. Es wurden dieselben Platten untersucht. Abbildung 23 zeigt die einzelnen Werte der Trockengewichte und Tabelle 13 wieder Spannweite und Mittelwert. Im Diagramm sieht man, dass die äußeren Platten des Materials F G stets etwas schwerer sind als die innenliegenden. Dieses Muster ist bei F W allerdings nicht zu erkennen. Hier ist jeweils die innere Platte etwas schwerer. Eine außerhalb dieser Masterarbeit im Unternehmen angestellte Untersuchung zu den Dichten der Platten zeigte dagegen eine Tendenz dazu, dass die schwereren Platten innen liegen.¹²⁶

¹²⁶ Diese Untersuchung wurde einige Monate vor dieser Masterarbeit von Bianca Sereinig durchgeführt.

Der Grund für diese etwas widersprüchlichen Ergebnisse konnte nicht geklärt werden. Außerdem zeigt sich in Tabelle 13, dass das graue Material etwas leichter als das weiße ist. Die Mittelwerte unterscheiden sich um circa 100 g. Das ist erstaunlich, da „F“ jeweils die gleiche Nenndichte von 15 kg/m^3 bedeutet, siehe Kapitel 3.1.1.3. Überraschenderweise ist die Spannweite von F G niedriger als von F W, obwohl doppelt so viele Stichproben der grauen Platten gezogen wurden.

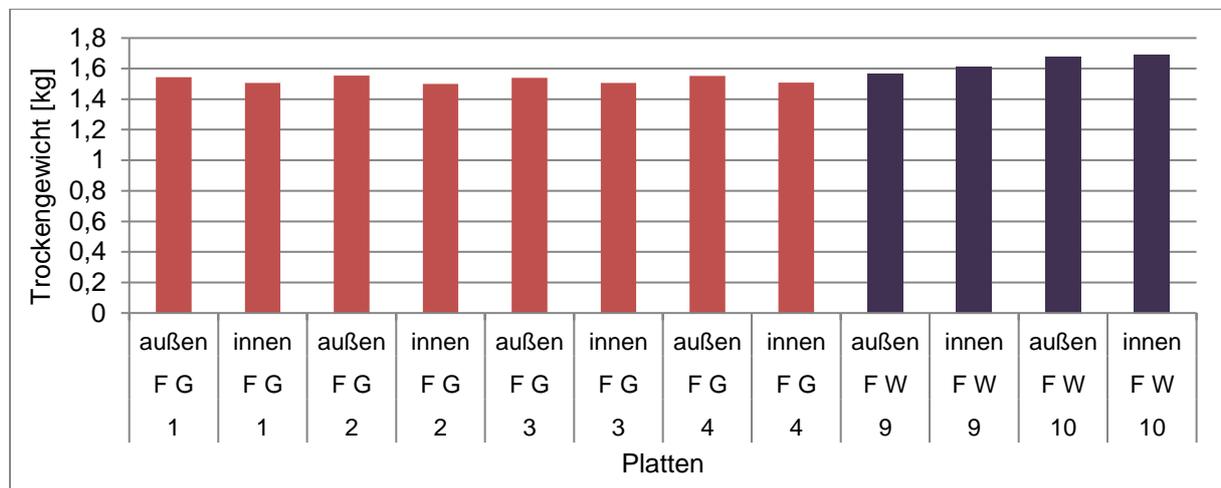


Abbildung 23: Diagramm Trockengewichte Platten

Materialtyp	Mittelwert [kg]	Maximalwert [kg]	Minimalwert [kg]	Spannweite [kg]
F G	1,5257	1,5536	1,4994	0,0542
F W	1,6355	1,6877	1,5638	0,1239
Gesamt	1,5623	1,6877	1,4994	0,1883

Tabelle 13: Arithmetisches Mittel und Spannweite Trockengewichte Platten

3.4.3.5 Ergebnisse und Diskussion Gleichgewichtszustand

Bei den theoretischen Grundlagen zur Feuchtemessung in Kapitel 2.3 wurde bereits erläutert, dass der Umgebungszustand einen Einfluss auf die Feuchte eines Bauteils hat. Ein Büro sollte dem üblichen Verwendungsort Baustelle deutlich ähnlicher sein als der Trockenschrank. Daher wurde dieses gewählt, um nach dem Trockenschrank einen Gleichgewichtszustand mit einer praktisch relevanten Umgebung zu untersuchen. Abbildung 24 zeigt nun den Verlauf des Gewichtsverlusts einer ausgewählten Platte. Dieser steigt zu Beginn im Trockenschrank stark an, danach flacht die Kurve merklich ab. Nach zwei Wochen tritt keine Veränderung der Plattenmasse mehr ein. Bis zur vollständigen Trocknung hat die Platte in dieser Zeit also etwas mehr als 5 % Feuchte verloren. Danach wurde diese bei Raumtemperatur in einem Büro gelagert, bis sich das Gewicht erneut stabilisiert hat. In der Grafik ist deutlich zu erkennen, dass bereits nach einer Woche der Gleichgewichtszustand erreicht ist und sich nichts mehr verändert, wenn die Platte noch länger dort lagert. Im Vergleich zum Trockenschrank erhöht sich das Gewicht um etwa 0,5 %.

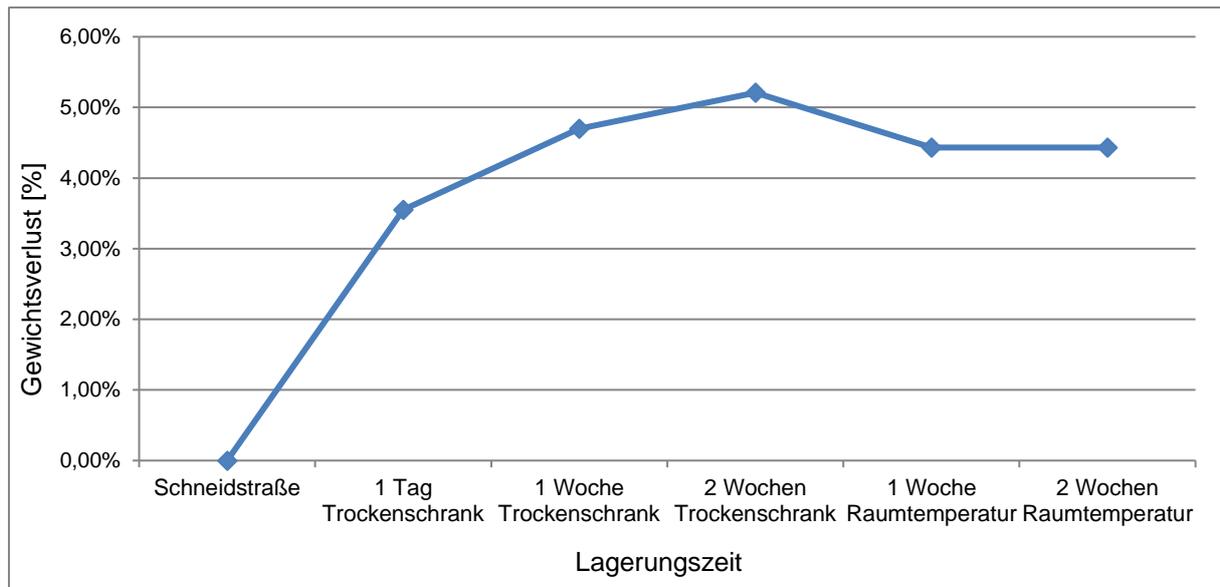


Abbildung 24: Verlauf des Gewichtsverlusts einer Dämmplatte

3.4.4 Schlussfolgerungen

An dieser Stelle soll der Blick wieder auf die Konsequenzen der obigen Untersuchung auf die Erfassung des Materialverbrauchs und Möglichkeiten zur Verbesserung der Kostentransparenz in diesem Bereich geworfen werden. Dazu können die folgenden Schlussfolgerungen gezogen werden:

- Eine der wichtigsten Eigenschaften der Produkte ist die Dichte, deren Abstufungen schon in Kapitel 3.1 erläutert wurde. Die Nenndichte eines Blocks und der daraus geschnittenen Platte berechnet sich aus dem an der Einwaage automatisch erfassten Gewicht und dem stets gleichen Volumen eines Blocks. Somit müssen die Werte der Einwaage die realen Verhältnisse möglichst genau widerspiegeln, um einen relevanten Dichtewert zu erhalten. In Hinblick auf die systematischen Abweichungen beim grauen Material ist folglich klar, dass eine regelmäßige Kalibrierung dieses Messsystems essentiell ist. Die Blockmaschinen 1 und 2 sollten dahingehend unbedingt vergleichbare Werte ergeben.
- Sind beide Einwaagen gut und regelmäßig kalibriert, könnte mit einem Standard-Prozentsatz von Einwaage auf tatsächliches Gewicht gerechnet werden. Dieser dürfte nach den hier angestellten Untersuchungen im Mittel bei ca. 4 % Unterschied liegen.
- Bei der Untersuchung des Gewichtsverlusts gelagerter Blöcke wurde der erhebliche Einfluss der Ablagerungszeit sehr deutlich. Nach zwei Wochen sind die Blöcke offenbar nicht annähernd vollständig getrocknet. In Anbetracht dessen, wie viel Gewicht auch die daraus geschnittenen Platten noch verlieren, dürfte auch nach einem Monat noch keine vollständige Trocknung erreicht sein.
- Bezüglich des Materialtyps (Dichtevarianten) und der Farbe konnte kein wesentlicher Einfluss auf das Trocknungsverhalten der Blöcke festgestellt werden. Es ist daher denkbar, einen groben Prozentsatz für die Gewichtsverluste aller Blöcke zu definieren, der kaum von Material und Farbe abhängt, jedoch sehr stark von der Lagerungszeit. Nach einem Monat würde dieser circa bei 2,5 % liegen.

- Aus der Analyse der Feuchteverluste der fertigen Platten kann gefolgert werden, dass die Lage im Block einen wesentlichen Einfluss auf die Trocknung hat. Weiter innenliegende Bereiche verlieren ihren Wassergehalt offensichtlich deutlich langsamer als außen, was nicht besonders überraschend ist. Die Nähe zur Oberfläche des Blocks dürfte also eine wichtige Rolle spielen.
- Außerdem scheint es beim Gesamt-Wassergehalt Unterschiede zwischen verschiedenen Materialien zu geben. Ein Durchschnittswert wäre hier wahrscheinlich separat für jedes Material zu definieren. Für F G, von dem die meisten Proben gezogen wurden, könnte er exemplarisch bei circa 5 % liegen.
- Auch bei den Trockengewichten und damit den tatsächlichen Dichten der Platten ist ein Einfluss des Blockbereichs, aus dem diese geschnitten wurde, erkennbar. Allerdings sind die Ergebnisse hier nicht eindeutig. Für klarere Ergebnisse erscheinen hier größer angelegte, aufwendigere Untersuchungen sinnvoll.
- In Hinblick auf den Feuchtegehalt in einem üblichen Umgebungszustand zeigte sich ein Unterschied von etwa 0,5 % zum Trockenschrank, der sich schon nach einer Woche stabil einstellt. Dies ist insofern bemerkenswert, da im Rahmen der laufenden Qualitätssicherung die Trockengewichte im Trockenschrank festgestellt werden. Man sollte sich also dem Unterschied zu gewöhnlichen Umgebungen wie Baustellen bewusst sein. Außerdem gilt zumindest bei den untersuchten Platten, dass der gesamte Wasseranteil erst nach etwa zwei Wochen ausgetrieben ist.
- Bei allen oben genannten Näherungswerten handelt es sich um grobe Prozentwerte. Wie aus den Untersuchungen hervorgegangen ist, streuen diese Werte in erheblichem Ausmaß.
- In diesem Kapitel bleibt erneut zu sagen, dass die Werte und Ergebnisse umso genauer und belastbarer werden, je aufwendiger man die Untersuchung gestaltet. Besteht Interesse an einer vertieften Untersuchung der oben genannten Aspekte, müssten wesentlich mehr Ressourcen zur Verfügung gestellt werden. Diese würden höchstwahrscheinlich weitere wertvolle Erkenntnisse im Hinblick auf den Materialverbrauch pro Teil bringen. Wie schon bei der Untersuchung der Rohstoffe (Kapitel 3.2) und Formteile (Kapitel 3.3) sollte dies auch hier zur Verbesserung der Transparenz im Bereich der Materialkosten führen. Ausgehend davon könnte man Einsparungspotentiale und Kostenoptimierungen anstreben.

3.5 Untersuchung von Ausschuss und Rezyklatkreislauf

Zur Ermittlung des Materialverbrauchs der hergestellten Produkte ist, neben den in den vorhergehenden Kapiteln analysierten Fertigungsdaten, zusätzlich die Untersuchung des Ausschusses bzw. der Materialströme von großer Bedeutung. Nur, wenn bekannt ist, welcher Ausschuss in welchen Mengen anfällt und wie dieser verwendet wird, kann der Themenbereich in die Ermittlung von Material- bzw. Rohstoffverbrauch einbezogen werden. Durch die erhebliche Mengen an Ausschuss bzw. Recyclingmaterial ist auch dieser Bereich ein wichtiger Einflussfaktor auf die Kostensituation.

3.5.1 Zweck der Untersuchung

Im Grunde fällt bei jedem Herstellungsschritt eine gewisse Menge an Ausschuss an. In dieser Untersuchung soll nun Klarheit über die betreffenden Abläufe direkt in der Fertigung geschaffen werden. Es gilt in erster Linie zu untersuchen, wie Vorgaben umgesetzt werden und wo etwaige Mängel bestehen.¹²⁷

- Zunächst soll eine Übersicht über den Gesamtprozess bzw. die Istzustände der Ausschussverwertung unter Einbeziehung der Prozessbeschreibungen aus Kapitel 3.1 geschaffen werden.
- Besonders wichtig für eine korrekte Erfassung des Ausschusses ist dessen Dokumentation. Folglich soll erhoben werden, wie das entsprechende Material aufgezeichnet wird bzw. welche dahingehenden Vorgaben und Abläufe es derzeit gibt. Sinn dieses Vorhabens ist somit eine Beschreibung des Istzustandes der Dokumentation.
- Der Ausschuss wird an das betriebliche ERP-System übermittelt. Es soll nun herausgefunden werden, wie die entsprechenden Daten erfasst und gesammelt werden, mit Fokus auf die direkt in den Produktionshallen stattfindenden Vorgänge. Die Verarbeitung der Daten im ERP-System selbst ist nicht Gegenstand dieser Untersuchung.
- Wie schon in Kapitel 3.1 erläutert, wird das Ausschussmaterial direkt in Glanegg im Bereich Thermozone verwertet. Diesem Vorgang zugrundeliegende Aufzeichnungen müssen ebenfalls untersucht werden.

¹²⁷ Besprechung mit Klaus Unterleutner am 15.10.2018

3.5.2 Durchführung

Informationen und Daten zu den oben genannten Themen wurden auf drei Arten gesammelt:

- Während der Messreihen zu den Fertigungsdaten (siehe Kapitel 3.2 bis 3.4) wurden parallel stets die dortigen Verhältnisse betreffend Dokumentation und Ausschuss verfolgt und gegebenenfalls aufgezeichnet.
- Gezieltes Nachfragen bei den zuständigen Personen, sowohl direkt in der Fertigung als auch bei jenen, die für die Verarbeitung der erfassten Daten zuständig sind.
- Nachforschungen vor Ort, ob die Vorgänge tatsächlich den Angaben der befragten Personen entsprechen.
- Untersuchung der an den betreffenden Stellen aufliegenden Dokumente.

3.5.3 Ergebnisse und Diskussion

Im Folgenden werden die wesentlichen Ergebnisse zu Ausschuss und Rezyklatkreislauf, getrennt nach den Bereichen Dämmstoffe, Formteile und Thermozell, angeführt. Es muss vorausgeschickt werden, dass hier der Wissenstand nach der Untersuchung im Rahmen dieser Masterarbeit dargestellt wird. Mitunter wurden von handelnden Personen widersprüchliche Aussagen zu diesen Themen getätigt. Außerdem ist es schwierig, die tatsächliche Durchführung der entsprechenden Vorgänge auf Schritt und Tritt zu verfolgen.

3.5.3.1 Ergebnisse und Diskussion Dämmstoffe

Zur Einordnung der hier besprochenen Abläufe im gesamten Fertigungsprozess des Bereichs Dämmstoffe sei auf das Kapitel 3.1.1 sowie Abbildung 9 verwiesen. Die Herstellungsschritte wurden in diesem Kapitel bereits erklärt. Hier soll nun auf die begleitende Dokumentation eingegangen werden, die für die Nachverfolgung von Ausschüssen essentiell ist. Dazu werden die derzeit angewendeten Dokumentationsmethoden geordnet nach ihrer Reihenfolge im Herstellungsprozess erläutert.

Obwohl auch beim Vorschäumen EPS-Perlen verloren gehen können, ist das Blockformen der erste Schritt, bei dem nennenswerter Ausschuss entsteht. Häufiger auftretende Fehler, die zu Ausschuss führen, sind insbesondere schlechtes Verkleben der Perlen, sodass der Block auseinanderfällt, oder mindere Qualität der Blockoberfläche. Ein solcher Block ist als Ausschuss einzuordnen. Das Volumen dieser mangelhaften Blöcke wird üblicherweise in Kubikmetern auf einer handschriftlichen Liste notiert. Sie wird nachfolgend noch weiter diskutiert.

Als nächstes kommt Ausschuss typischerweise an der Schneidstraße zustande. Wie in Kapitel 3.1.1 erläutert fällt stets der gleiche Anteil eines Blocks in Form der „Schwarte“ ab. Diese gelangt auf ein Förderband unter den Heißdrähten und wird in der Folge geschreddert. Danach gelangt sie über Rohrleitungen entweder direkt zur Thermozone oder in die Rezyklatensilos. Davon ist nur jener Teil tatsächlich Ausschuss, der nicht wieder als Rezyklat in neue Blöcke verarbeitet, sondern zur Thermozone umgeleitet wird. Das ist insbesondere die farbige, also graue und gelbe Schwarte, da diese niemals in den Rezyklatenkreislauf gelangt. Die weiße Schwarte wird hingegen immer in Rezyklatensilos zurückgeleitet, es sei denn diese sind bereits voll. In diesem Fall wird auch hier umgeschaltet, sodass der Überlauf der Silos zur Verarbeitung in die Thermozone gelangt. Es konnte auch beobachtet werden, dass gelegentlich anderer Überstand sowie Platten, die nicht Teil der Schwarte sind, händisch auf das Förderband zum Schreddern gelegt werden.

Zur Aufzeichnung an der Schneidstraße sowie von übergelaufenem Rezyklat aus den entsprechenden Silos muss festgehalten werden, dass diese etwas wirr und undurchsichtig erscheint. Mehrere Personen machten im Zuge dieser Untersuchung unterschiedliche Angaben darüber, wie und ob diese Mengen überhaupt aufgezeichnet werden. Generell gibt es hier offensichtlich kein konsequentes Dokumentationssystem. Das ist umso erstaunlicher, wenn man bedenkt, dass jeder Block von 2,67 m³ auf 2,4 m³ zugeschnitten wird. Das entspricht rund 10 % jedes einzelnen Blocks und stellt damit einen erheblichen Anteil am gesamten Materialverbrauch dar. Hier erscheint eine konsequente Aufzeichnung dringend geboten.

Alle weiteren Ausschüsse, wie fehlerhafte Platten oder bei Vorgängen wie Lagern, Schneiden und Transport beschädigte Teile, werden ebenfalls aufgezeichnet. Zunächst wird ihr Volumen geschätzt und ebenfalls auf der bereits erwähnten handschriftlichen Liste notiert. Diese Liste gibt nur eine einzige Information an, nämlich das grobe Volumen ohne weitere Daten. Es gibt keinen Hinweis auf Material, Farbe, Dichte, Zeitpunkt oder den Grund für die Einstufung als Ausschuss. Auch hier lässt die Genauigkeit der Dokumentation augenscheinlich zu wünschen übrig. Alle in dieser Liste geführten Ausschussteile können nicht einfach, wie beim geschredderten Material, über Rohrleitungen zur Thermozone geblasen werden. Sie werden folglich mittels eines Transportwagens dorthin gebracht.

Hinsichtlich der Erfassung der Ausschussmengen gibt es zwei Ansätze. Am Schichtende werden Gutteile anhand einer Eingabemaske eines Notebooks zunächst an ein dafür vorgesehenes Computerprogramm übergeben, um die Daten von dort in das ERP-System zu übertragen. Laut den beteiligten Personen werden dort auch Ausschussteile gebucht, aber hier gab es erneut unterschiedliche Meinungen. Die oben angesprochene handschriftliche Liste wird regelmäßig in den Vertriebsinnendienst gebracht und bildet dort die Grundlage für die Verrechnung der Ausschussmengen zwischen den Unternehmenssparten Thermozone und Porozell, nicht jedoch für die Daten des ERP-Systems. Zusammenfassend lässt sich bei allen erwähnten Aspekten sagen, dass Genauigkeit und Konsequenz in der Ausführung zu wünschen übrig lassen.

3.5.3.2 Ergebnisse und Diskussion Formteile

Analog zum vorigen Kapitel 3.5.3.1 wird nun die Dokumentation für den Bereich Formteile nach ihrer Reihenfolge im Herstellungsprozess beleuchtet. Wieder sei zur Übersicht der Herstellungsschritte auf das Kapitel 3.1.2 und die Abbildung 10 verwiesen.

Der erste nennenswerte Ausschuss tritt im Bereich von Vorschäumer und Silos auf, wo sich bereits vorgeschäumte EPS-Perlen, die dem Herstellungsprozess entweichen, am Boden der Fertigungshalle ansammeln. Diese werden in Behältern oder Ähnlichem gesammelt. Andererseits tritt Ausschuss bei den Formteilautomaten selbst auf, wenn sie fehlerhafte Teile produzieren. Hier wird ein ähnliches Vorgehen wie in der Dämmstoffproduktion angewendet, wobei sich Werk 1 (Verpackung) und Werk 2 (Fußbodenheizung) leicht unterscheiden. Die fehlerhaften Teile aus dem Verpackungsbereich werden auf einem Transportwagen gesammelt. Dort wird ihr Volumen in Kubikmetern grob geschätzt, genauso wie das Volumen der gesammelten EPS-Perlen.

Diese Schätzwerte werden wiederum in eine handschriftliche Liste eingetragen, die, ebenso wie bei den Dämmstoffen, als Grundlage der Verrechnung des Ausschusses an die Thermozell dient. In Werk 2 gibt es keinen Transportwagen, sondern einzelne Paletten, Säcke usw., in denen der Ausschuss transportiert wird. Ansonsten ist das Vorgehen sehr ähnlich. Es gibt in den Listen der Werke wieder keinen Hinweis auf Material, Farbe, Dichte, Zeitpunkt oder Grund für die Einstufung als Ausschuss. Außerdem werden Ausschussteile in vor Ort aufliegende Schichtblätter eingetragen, wobei es wieder schwierig festzustellen ist, mit welcher Konsequenz und Genauigkeit dies durchgeführt wird.

Für das ERP-System wird die Buchung von Ausschüssen elektronisch erfasst. Dies geschieht über ein Chipkarten und Barcode-System. Anhand von Barcodes der Produktionsaufträge werden die produzierten Stück im ERP-System erfasst. Das Maschinenbedienpersonal gibt händisch die Anzahl der fehlerhaften Teile ein. Somit sind Gut- und Ausschussteile systematisch erfasst. Auch hier ist in den beiden Werken 1 und 2 nicht immer klar, wie genau sich an diese Vorgaben gehalten wird.

Auch im Bereich Formteile könnten Genauigkeit und Aufzeichnungspraxis verbessert werden. Zwar werden Ausschüsse hier etwas genauer erfasst als in Werk 7, was insbesondere am einfacheren Herstellungsprozess ohne Rezyklatkreislauf liegt. Allerdings sind die Verrechnung der Ausschüsse an Thermozell und die zugrundeliegenden Dokumente ebenfalls verbesserungswürdig.

3.5.3.3 Ergebnisse und Diskussion Thermozell

Monatlich werden die schon erwähnten Aufzeichnungen, also im Wesentlichen die groben, handschriftlichen Zettel, verwendet, um das von der Sparte Porozell an die Thermozell übergebene Material zu verrechnen. Hierbei wird pro Kubikmeter ein bestimmter Preis verrechnet, den die Thermozell für das Alt-EPS bezahlt. Dieser liegt deutlich unter dem Wert, der mit dem Material in Form von Verpackungen oder Dämmstoffen erzielt werden könnte. Siehe dazu auch Kapitel 2.4.4, wo unter anderem der vergleichsweise geringe Marktwert von solchen Ausgleichsschüttungen diskutiert wird. Pro Jahr belaufen sich die so verrechneten Mengen auf einige Tausend Kubikmeter. Jeden Monat erhält die Thermozell allerdings einige hundert Kubikmeter mehr, als ihr von der Sparte Porozell verrechnet wird. Es gibt hier also eine erhebliche Dunkelziffer, die aus den mangelhaften Aufzeichnungen in den einzelnen Werken, insbesondere jene der Dämmstoffe, resultieren dürfte.¹²⁸

3.5.4 Schlussfolgerungen

Folgende, für eine Optimierung des Materialverbrauchs und der resultierenden Kosten relevanten Schlüsse lassen sich aus der obigen Untersuchung ziehen:

- Nahezu alle derzeitigen Aufzeichnungen zum Thema Ausschuss geben nur sehr verkürzte Informationen, meist in Form von groben Volumenangaben. Weitere Informationen, welche zur genaueren Erfassung, Analyse und gegebenenfalls zukünftigen Vermeidung von Ausschüssen dienen könnten, fehlen beinahe völlig. Dies gilt insbesondere für die handschriftlichen Zettel sowohl im Formteilbereich als auch bei der Dämmstoffherstellung.
- Im Bereich Block wird die Verwendung der Schwarte derzeit nicht konsequent und systematisch aufgezeichnet, obwohl sie mit rund 10 % eines Blocks einen großen Teil der gesamten Materialmenge ausmacht.
- Es fällt auf, dass verschiedene in den betroffenen Bereichen arbeitende Personen unterschiedliche Meinungen dazu haben, wie tatsächlich aufgezeichnet wird bzw. welche Abläufe und Vorgaben es dazu gibt. Dies lässt erkennen, dass hier kein einheitliches, exakt funktionierendes System vorliegt. Wenn nicht alle den gleichen Anweisungen folgen, kann die Dokumentation niemals zuverlässig sein.
- Der Verrechnung von Ausschussmaterial und den Informationen an das ERP-System liegen nicht die gleichen Daten und Aufzeichnungen zugrunde. Stattdessen wird hier mit Computer- und Chipkartensystemen für ERP einerseits und relativ einfachen analogen Aufzeichnungen für Thermozell andererseits parallel gearbeitet. Diese zweigleisige Struktur sollte hinterfragt werden.

¹²⁸ Besprechung mit Richard Paulini am 25.09.2018

- Die Thermozell erhält, höchstwahrscheinlich aufgrund mangelnder Aufzeichnungen, derzeit mehr Material als ihr verrechnet wird. Dies könnte vermutlich ebenfalls durch verbesserte Dokumentation behoben werden.
- In nahezu allen untersuchten Bereichen fehlt es an Transparenz, konsequenter Aufzeichnung sowie klaren Zuständigkeiten und Verantwortlichkeiten.
- Die gefundenen Mängel bei den Themen Ausschuss und Rezyklat führen unweigerlich dazu, dass derzeit nur ein unvollständiges Bild von den durch Ausschuss verursachten Materialkosten vorliegt. Dabei sind die anfallenden Ausschussmengen keinesfalls vernachlässigbar klein. Verbesserungen auf diesem Gebiet sind daher unerlässlich, um positive Effekte im Bereich der Materialkosten zu erzielen.

3.6 Verbesserungskonzept

Zu Beginn dieser Masterarbeit wurde ein Konzept zur Verbesserung der Verbrauchsermittlung von Rohstoffen als Intention definiert, wovon positive Effekte auf die Kostensituation des Unternehmens zu erwarten sind. Im Laufe der dazu nötigen Untersuchungen und Analysen (siehe Kapitel 3.1 bis 3.5) wurde deutlich, wie vielfältig die dabei betroffenen Problemfelder sind. Dazu sei vor allem auf die Schlussfolgerungen der jeweiligen Untersuchungskapitel verwiesen. Dementsprechend muss auch das Verbesserungskonzept viele verschiedene Teilbereiche abdecken. Das nun folgende Konzept besteht daher aus mehreren Einzelteilen sowie damit verbundenen Vorschlägen und möglichen Optimierungen. Die Umsetzung dieser Teilkonzepte und Vorschläge ist, wie in Kapitel 1.2 schon ausgeführt, nicht mehr Teil dieser Masterarbeit.

3.6.1 Verbrauchsermittlung mittels Stücklisten

Im Kapitel 2.7 wurde bereits erklärt, dass sich der Sekundärbedarf, zu dem der hier betrachtete Rohstoffbedarf zählt, mittels Stücklistenauflösung aus dem Primärbedarf ermitteln lässt. In Anlehnung daran wird nun erklärt, wie man im Unternehmen Stücklisten verwenden könnte, um den Rohstoffverbrauch möglichst genau zu bestimmen. Die Stücklisten sind im ERP-System hinterlegt. Da es sich bei EPS-Produkten nicht um komplizierte, aus vielen Einzelteilen aufgebaute Produkte handelt, besitzen auch die Stücklisten eine relativ einfache Struktur. Diese unterscheiden sich je nach Produkttyp:

Formteil:

- Rohstoffbedarf in Kilogramm
- Diverse weitere Angaben, wie Verpackungsfolie usw.

Block:

- Rohstoffbedarf in Kilogramm

Dämmplatte:

- Materialbedarf ausgedrückt als Anteil eines gesamten Blocks
- Diverse weitere Angaben, wie Verpackungsfolie usw.

Aus der Stückliste eines Formteils lässt sich also direkt entnehmen, wie viel Kilogramm Rohstoff benötigt wird, ebenso bei ganzen Blöcken. Bei geschnittenen Platten lässt sich zweistufig auf den Rohstoffbedarf in Kilogramm durchrechnen, da der Rohstoffbedarf eines Blocks und der benötigte Anteil eines Blocks pro Platte bekannt sind. Verwendete Folie und weitere, eher nebensächliche Inhaltsstoffe werden in dieser Masterarbeit nicht miteinbezogen, da der Fokus auf dem Rohstoffverbrauch liegt. Ist die Anzahl der produzierten Fertigprodukte bekannt, lässt sich durch diese einfache Struktur also leicht auf die Menge des dafür eingesetzten Rohstoffs schließen.

Dieses Konzept ist sinnvoll, praktikabel und leicht verständlich. Daher soll am Aufbau der Stücklisten nichts verändert werden. Allerdings müssen die mengenmäßigen Angaben in den Stücklisten die Realität möglichst genau widerspiegeln. Daher wird im folgenden Kapitel 3.6.2 ein Konzept zur genaueren Stoffbilanzierung zur Ermittlung des Verbrauchs jedes beliebigen Produkts vorgestellt. Der Großteil des Optimierungspotentials liegt jedoch nicht in diesem Bilanzierungskonzept selbst, sondern in den zugrundeliegenden Daten, wie in den darauf folgenden Kapiteln besprochen wird.

3.6.2 Trockene Bilanzierung

Im Laufe dieser Masterarbeit wurde mehrfach besprochen, dass nicht nur Rohstoff, sondern weitere Inhaltsstoffe bei der EPS-Produktion verarbeitet werden. Zudem fällt außerdem ein gewisser Anteil an Ausschuss an. In Kapitel 2.6 wurde bereits erläutert, dass mittels Stoffbilanzierung ein- und ausgehende Stoffströme gegenübergestellt werden können. Die Gesamtmenge der Stoffströme muss stets erhalten bleiben. Dieser grundlegende Gedanke kann nun hier angewendet werden, um ein Ermittlungsschema des verbrauchten Rohstoffs je Produkt zu erreichen. Es können folgende Ströme definiert werden, sofern man Rohstoff bzw. EPS stets im trockenen Zustand annimmt:

- Im angelieferten Rohstoff:
 - Trocken es EPS, also ohne Feuchte- und Pentananteile
 - Prozentueller Anteil an Feuchte bzw. Wasser
 - Prozentueller Anteil an Treibmittel (Pentan)
 - Weitere Zusatzstoffe werden nicht berücksichtigt, da angenommen wird, dass sie während der Verarbeitung nicht in nennenswertem Ausmaß aus dem EPS entweichen.
- Im Halbfertigprodukt (Block):
 - Trocken es EPS
 - Prozentueller Anteil an Feuchte bzw. Wasser
 - Eventuell ein niedriger Anteil Pentan
- Im Fertigprodukt:
 - Trocken es EPS
 - Prozentueller Anteil an Feuchte bzw. Wasser
 - Eventuell ein niedriger Anteil Pentan
- Während des Herstellungsprozesses strömen ein bzw. aus:
 - Wasser (Rohstofffeuchte, Dampf, Umgebungsfeuchte) wird eingebracht und entweicht im Laufe der Zeit, in erster Linie durch Trocknung.
 - Pentan entweicht bei der Expansion.
 - Ein gewisser Anteil an Ausschuss geht verloren, entweicht also ebenso dem Prozess.

Aus der Gegenüberstellung dieser Ströme ergibt sich, wie viel Wasser und welche Anteile anderer Stoffe in Summe zu- und abfließen. Eine naheliegende Methode ist die Berücksichtigung dieser Ströme in Form von Prozentanteilen bezogen auf das trockene EPS (vgl. Kapitel 2.6.1). Ist nun das Trockengewicht eines Fertigprodukts bekannt, so lässt sich über entsprechende prozentmäßige Zuschläge auf den benötigten Rohstoff im Anlieferungszustand rückrechnen, in welchem er noch Feuchte und Pentan enthält. Die derart ermittelten Werte können in die verbesserten Stücklisten eingearbeitet werden.

Dieses grundsätzliche Konzept funktioniert jedoch nur, wenn auch bekannt ist, wie groß diese Anteile und Ströme genau sind. Sie müssen bereits in der Anfangsphase möglichst genau ermittelt werden, da sich frühe Fehler in den Daten später vervielfachen, wie schon in Kapitel 2.6.1 erwähnt wurde. Die obigen Untersuchungen zu Feuchte, Trockengewichten usw. haben gezeigt, dass die derzeitigen Informationen dafür nicht ausreichen, da kaum allgemeingültige Werte festgestellt werden konnten. Während die oben kurz vorgestellte, trockene Bilanzierung recht einfach umzusetzen ist, stellt die Ermittlung der entsprechenden Prozentwerte die eigentliche Herausforderung dar. In den folgenden Abschnitten werden nun Vorschläge und Ansätze eingebracht, um die Ermittlung ausreichend genauer Daten zu ermöglichen, welche letztlich in einem genauer bekannten Materialverbrauch resultieren. Dies soll schließlich zu mehr Transparenz bei den Materialkosten der Hirsch Porozell führen und Optimierungspotentiale eröffnen.

3.6.3 Regelmäßige Messungen und Untersuchungen

Im Laufe der Untersuchungen dieser Masterarbeit konnten Richt- und Bilanzierungswerte bezüglich Feuchtegehalt und Trockengewichten von Rohstoffen (Kapitel 3.2), Formteilen bzw. Schalelementen (Kapitel 3.3), sowie Dämmplatten und EPS-Blöcken (Kapitel 3.4) ermittelt werden. Diese Werte könnten zwar prinzipiell für die jeweils spezifisch untersuchten Produkte eingesetzt werden, dennoch müssen einige Einschränkungen gemacht werden.

Erstens ist Rohstoffzusammensetzung bzw. der darin enthaltene Anteile an Feuchtigkeit, Pentan usw. nicht exakt bekannt. Im Rahmen der eingeschränkten Ressourcen dieser Masterarbeit konnten nur Richtwerte ermittelt werden. Es zeigten sich jedoch große Unterschiede zwischen den diversen Materialtypen und Produzenten. Ein Standard-Richtwert für alle Rohstoffe und Hersteller ist daher nicht sinnvoll festzulegen. Außerdem wurde schon erläutert, dass der Einfluss des Pentans bei diesen Messungen nicht unerheblich ist.

Zweitens zeigten sich bei Formteilen, Blöcken und Platten durchwegs große Spannweiten bzw. Streuungen von Feuchte und Gewichten. Damit folgt auch ein unterschiedlicher Materialverbrauch für einzelne Exemplare des gleichen Produkttyps. Es ist daher ebenso fraglich wie sinnvoll generelle Prozentwerte usw. hier wären. Daher sollen nun einige Ansätze genannt werden, um diese Unsicherheiten zu reduzieren:

- Es ist anzuraten, Messungen, wie sie in den vorherigen Kapiteln angestellt wurden, in deutlich größerem Umfang und unter höherem Personaleinsatz durchzuführen. Alle Produkte, Dichtetypen, Rohstoffe usw. unterscheiden sich in ihrem Verhalten bei der Herstellung. Daher ist es wünschenswert, vergleichbare Untersuchungen zu sämtlichen hergestellten Produkten durchzuführen. Damit würde eine bessere Kenntnis nicht nur des Materialverbrauchs sondern auch der Prozesse selbst einhergehen. Folglich wäre es durch eine bessere Kontrolle der Fertigungsprozesse leichter möglich, die erheblichen Streubreiten der Messwerte einzuschränken. Für die Erfüllung dieser Messaufgaben könnte die Qualitätssicherung eine wichtige Rolle spielen. Unter Einsatz von mehr Ressourcen, Kapital und Personal könnten dort regelmäßig umfassende Messungen und Untersuchungen durchgeführt werden.
- Ein messtechnischer Ansatz wäre die thermogravimetrische Messung in ihrer isothermischen oder dynamischen Form für verschiedene Rohstoffe und Produkte (vgl. Kapitel 2.3.3). Sie könnte dazu dienen, chemische Bestandteile genauer zu ermitteln und damit die große Unsicherheit über die tatsächlichen Zusammensetzungen im Vergleich zu den entsprechenden Angaben der Hersteller zu verringern.
- Eine weitere Möglichkeit sind systematische Befragungen der einzelnen Hersteller zu deren Produkten unter Verwendung hausintern durchgeführter Messungen, wie sie für diese Masterarbeit angestellt wurden. Dies wäre ein Ansatz, um mehr Informationen zu gewinnen, als die recht groben Angaben aus den Datenblättern bieten.
- Eine verbesserte Feuchtemessung mit professionellen Feuchtemessgeräten könnte die regelmäßige Überprüfung der Fertigungsprozesse wesentlich erleichtern. Besonders Kapitel 3.2 hat den Wert solcher Investitionen in geeignete Ausrüstung gezeigt. Entsprechende Möglichkeiten wurden während dieser Masterarbeit angestoßen und es wäre sicher sehr sinnvoll, diese weiter zu verfolgen. Eine derartige Anschaffung wäre nicht nur, wie in Kapitel 3.2.4 erwähnt, für die Analyse der verwendeten Rohstoffe hilfreich. Der Einsatz vergleichbarer Geräte erscheint in nahezu allen Bereichen der Fertigung sinnvoll, da sie den Messaufwand reduzieren und exaktere Ergebnisse liefern. Solange diese Messungen größtenteils mit der Trocknungsmethode arbeiten, wird der dazu nötige, große Zeit- und Personalaufwand immer ein limitierender Faktor sein.

Das Hauptaugenmerk in der Fertigung sollte verstärkt auf ein fundiertes Verständnis der Fertigungsprozesse selbst gelegt und der Untersuchung dieser Prozesse mehr Bedeutung als bisher beigemessen werden. Von diesen vertieften Kenntnissen ausgehend könnten dann Kostenoptimierungen angestrebt werden. Letztlich sei aber darauf hingewiesen, dass der Aufwand von derartigen Nachforschungen ihren Nutzen niemals überschreiten darf. Das mögliche Einsparungspotential bei den Materialkosten muss stets mit dem dafür nötigen finanziellen Aufwand in Relation gesetzt werden. Es liegt schlussendlich im Ermessen des Unternehmens zu entscheiden, welchen Wert eine genauere Kenntnis der Prozesse bzw. des Materialverbrauchs tatsächlich hat.

3.6.4 Verbesserte Aufzeichnung und Dokumentation von Ausschüssen

Für den Materialverbrauch ist der Anteil von Ausschüssen mindestens genauso wichtig wie Istgewichte und Wassergehalte. Der Ausschuss sollte daher akribisch dokumentiert und aufgezeichnet werden. In Kapitel 3.5 wurden einige Schwächen des derzeitigen Dokumentationssystems aufgezeigt. Ein erster wichtiger Schritt könnte ein vereinheitlichtes Vorgehen zur Aufzeichnung sein, wofür nun ein Ansatz vorgestellt wird. Zentraler Punkt des Vorschlags ist ein verbessertes Formular, welches die bisherigen, groben, handschriftlichen Zettel ersetzen könnte. Es ist exemplarisch in Form von Tabelle 14 angeführt. Darin sind beispielhaft zwei frei erfundene Ausschüsse eingetragen.

Werk Nr. 1	Ausschussformular									
	Person	Datum	Uhrzeit	Ort / Maschine	Gewicht [kg]	Volumen [m ³]	Dichte [kg/m ³]	Produkttyp	Materialtyp / Farbe	Ursache / Bemerkung
Muster		10.12.2018	11:00	Schneidstraße	1,5	0,100	15	Dämmplatte	F Grau	Kanten beschädigt
Muster		10.12.2018	17:00	Blockmaschine	53,4	2,67	20	Block	W20 Weiß	Schlechte Oberfläche

Tabelle 14: Beispiel verbessertes Ausschussformular

Diese Tabelle enthält wesentlich mehr und genauere Informationen über den anfallenden Ausschuss, als die bisherigen handschriftlichen Zettel, welche lediglich Kubikmeterwerte ohne jegliche weitere Daten enthalten:

- Datum, Uhrzeit, Ort und Angabe der Werksnummer dienen der besseren Rückverfolgbarkeit. So kann festgestellt werden, wann und wo Ausschüsse entstanden sind, um den Ursachen gezielter auf den Grund zu gehen.
- Durch die Angabe der aufzeichnenden Person wird der Ansprechpartner für etwaige Nachfragen sofort ersichtlich. Hier geht es keinesfalls um Schuldzuweisung, sondern um die Wichtigkeit von Auskunftspersonen.
- Von den Spalten für Gewicht, Dichte und Volumen müssen nur zwei ausgefüllt werden, da die dritte sich aus den anderen beiden berechnen lässt. Dies hat den Vorteil, dass es beispielsweise reicht, den Ausschuss zu wiegen, sofern man dessen Dichte in etwa kennt. Das Volumen ergibt sich aus den anderen beiden Werten. Andererseits ist bei bekanntem Volumen und Material bzw. Dichte sofort das Gewicht berechenbar.
- Klarerweise können auch mehrere Ausschussteile lediglich eine Position in der Liste darstellen, sofern sie aus dem gleichen Anlassfall resultieren. Damit wäre der Gefahr eine überbordenden Länge dieser Liste Einhalt geboten.
- Produkt- und Materialtyp definieren den anfallenden Ausschuss näher. Es kann sich um Teile von Platten, Blöcken, EPS-Perlen usw. handeln.
- In der Spalte für Bemerkungen und Ursachen kann schließlich in wenigen Worten erläutert werden, warum es sich hierbei um Ausschuss handelt.

Damit wird diese Ausschussliste von der bloßen Zählliste für an Thermozell gelieferte Mengen zu einem umfangreichen Dokumentationsinstrument. Fehler im Prozess können schneller ausfindig gemacht, behoben und in Zukunft vermieden werden. Dieses Dokument ließe sich außerdem in einheitlicher Form in allen Werken (Dämmstoffe, Verpackung, Fußbodenheizung) anwenden, was die Weiterverwendung und Vergleichbarkeit wesentlich erleichtern würde.

Ein weiterer Schritt wäre die Speisung von ERP-System und Thermozell-Verrechnung aus den gleichen Datensätzen. Es ist durchaus zu hinterfragen, dass der Ausschuss derzeit parallel auf zwei Arten dokumentiert wird. Anhand konsequent geführter Ausschusslisten könnten beispielsweise am Schichtende die darin notierten Positionen als Ausschuss über Eingabemasken an das ERP-System übergeben werden. Danach würde die Verrechnung entweder direkt aus dem ERP-System an Thermozell erfolgen, oder die Listen würden gesammelt und in einem separaten Schritt verrechnet. In beiden Fällen würden einheitliche Daten verwendet, was zu deutlich mehr Transparenz und Vergleichbarkeit führen sollte. Zur Kontrolle wäre ein regelmäßiger Abgleich zwischen den in ERP-System und Thermozell-Verrechnung eingegebenen Daten mit gelegentlicher Korrektur sinnvoll.

Schließlich ergibt sich noch ein weiterer Vorteil aus einer vereinheitlichten Dokumentation. Sind Ort, Typ, Ursache etc. der jeweiligen Ausschüsse bekannt, so können die entsprechenden Mengen auch dem richtigen Produkt zugeordnet werden. Dann könnten beispielsweise jährlich die Ausschüsse eines Produkts addiert und durch die Zahl der fertigen Produkte dieser Art geteilt werden. So ergäbe sich auf relativ einfache Weise ein guter Richtwert für den Ausschuss-Prozentsatz dieses Artikels. Mit dem so gewonnenen Wert könnte danach die Verbrauchermittlung für verbesserte Stücklisten, wie sie in Kapitel 3.6.2 vorgestellt wurde, verfeinert werden.

Zusammenfassend lässt sich zu der hier vorgeschlagenen, erneuerten Ausschussliste sagen, dass diese ein äußerst nützliches und relativ günstiges Dokument für Dokumentation, Verrechnung, Verbrauchsberechnung und Nachverfolgung von Fehlern darstellen könnte. Auch hier muss aber bedacht werden, dass der Aufwand der besseren Dokumentation deren Nutzen, welcher vor allem im möglichen Einsparungspotential bei den Materialkosten liegt, nicht übersteigen darf. Das neue System müsste sich erst im täglichen Praxiseinsatz bewähren, erscheint jedoch als ein vielversprechender Ansatz zur besseren Kontrolle des Ausschusses und folglich der dafür anfallenden Kosten.

3.6.4.1 Automatische Erfassung der Schwarte

Die Schwarte als Sonderfall des Ausschusses könnte zusätzlich durch ein weiteres Konzept konsequenter dokumentiert werden. Sofern sie in die Rezyklatsilos geleitet wird, liegt ohnehin kein Ausschuss vor und es gibt nichts zu dokumentieren. Wird die Schwarte jedoch direkt zur Thermozell geleitet, ist sie als Ausschuss zu werten. Bei grauem und gelbem Material ist dies derzeit immer der Fall. Bei weißem EPS kommt es hingegen nur vor, wenn die Rezyklatsilos voll sind. Die Menge an Ausschuss aus diesem Bereich ließe sich relativ leicht automatisch erfassen, indem lediglich die Anzahl jener geschnittenen Blöcke gezählt wird, deren Schwarte direkt zur Thermozell geleitet wird. Rund 10 % des Materials dieser Blöcke können automatisch per Computer als Ausschuss dokumentiert werden. Das wäre eine sehr einfache, günstige und genaue Methode um einen großen Teil der Ausschusskosten zu überwachen, die zudem einigen Aufwand sparen dürfte. Überlauf der Rezyklatsilos sollte hingegen mengenmäßig geschätzt und ebenfalls in die oben vorgestellte, verbesserte Liste eingetragen werden.

3.6.5 Optimierung des betriebsinternen Recyclings

Im Theoriekapitel 2.3 wurden die Möglichkeiten erläutert, Kunststoff und insbesondere EPS zu recyceln. Während der Untersuchungen von Kapitel 3 konnte die derzeitige Praxis im Unternehmen geklärt werden. Im Grunde wird lediglich die „Schwarte“ des weißen Materials als Rezyklatanteil in neuen EPS-Blöcken wiederverwendet, während der gesamte übrige Ausschuss zur Verwendung in Wärmedämm-Leichtbeton an die Sparte Thermozell geleitet wird. In Kapitel 3.6.4 wurden Verbesserung von Dokumentation und Transparenz in Hinblick auf den Ausschuss diskutiert. Im Zuge dieser Masterarbeit sind außerdem noch weitere Optimierungspotentiale des Recyclings aufgetaucht, welche nicht direkt mit der Dokumentation, sondern mit den Fertigungsabläufen selbst zusammenhängen. Diese Verbesserungsmöglichkeiten werden im Folgenden angeführt.

Zunächst muss gesagt werden, dass der EPS-Ausschuss des Unternehmens fast ausschließlich im Sinne des werkstofflichen Recyclings verwendet wird. In Anlehnung an Kapitel 2.4.4 gelten sowohl die Verwendung von Rezyklat in Thermozell-Ausgleichsschüttungen als auch in neuen EPS-Blöcken als werkstoffliches Recycling. Dort wurde ebenso erläutert, dass der Marktwert von EPS-Perlen in Ausgleichsschüttungen relativ gering ist. Als Rezyklatanteil in neuen EPS-Blöcken entspricht der Wert jedoch annähernd dem des frischen Rohstoffs. Im Sinne einer Optimierung der Materialkosten sollte es ein Ziel sein, möglichst viel Ausschuss wieder in neuen Blöcken zu verarbeiten. Nur so wird der finanzielle Aufwand für das eingesetzte Material möglichst gewinnbringend verwendet. Die zwei nachfolgenden Stoßrichtungen erscheinen hier besonders erfolgsversprechend.

3.6.5.1 Direkte Rezyklierung grauer Schwarte

Erstens könnte nicht nur die weiße, sondern auch die graue Schwarte in neuen Blöcken wiederverwendet werden. Durch diese Nutzung von grauem Rezyklat würde der Anteil an direkt zur Thermozell geleiteten Ausschüssen deutlich verringert und der Marktwert des recycelten Materials erhöht. Es gilt allerdings zu bedenken, dass dafür ein separates Rezyklat-Silo für graues Material nötig wäre, neben anderen prozesstechnischen Änderungen. Dennoch dürfte das Einsparungspotential bei den Materialkosten deutlich sein, da die Schwarte, wie bereits erwähnt, rund 10 % jedes Blocks ausmacht. Erneut sei auf ein sinnvolles Nutzen-Aufwand-Verhältnis bei Umsetzung einer solchen Maßnahme verwiesen.

3.6.5.2 Definierter Rezyklatanteil in Blöcken

Zweitens ist es anzustreben pro geformtem Block eines bestimmten Materialtyps stets den gleichen Anteil an Rezyklat zu verwenden. Derzeit wird der an der Maschine eingestellte Prozentsatz eher nach dem Füllstand der Rezyklatsilos bemessen. Sind diese relativ leer, wird kaum Rezyklat verwendet. Drohen sie jedoch zeitnah überzulaufen, so kommen höhere Prozentsätze an Recyclingmaterial zum Einsatz. Dies hat eine uneinheitliche Qualität der Blöcke zur Folge, was wiederum zu mehr Ausschuss führt.

Bei niedrigen Dichtetypen ist die Beimischung von Recyclingmaterial leichter, da dichteres Rezyklat die effektive Dichte des Endprodukts erhöhen würde, was kaum nennenswerte Qualitätseinbußen zur Folge hätte. Dichtere Blöcke hingegen dürfen nicht darunter leiden, dass ihr Gewicht durch leichtes Rezyklat zu stark verringert wird. In die Rezyklatsilos gelangt jedoch die Schwarte aller Blockdichten. Daher befindet sich dort ein Rezyklatgemisch relativ unbekannter Dichte. Es erscheint am sinnvollsten, für die einzelnen Dichtetypen jeweils unterschiedliche Anteile vorzugeben. Diese dürfte bei leichteren Blöcken höher liegen als bei schwereren. Anstatt eines genauen Prozentsatzes sollten Mindest- und Maximalwerte angegeben werden, um dem Maschinenbedienpersonal Flexibilität und Spielraum zur Materialdisposition zu geben.

3.6.6 Allgemeine Verbesserung der Dokumentation

Nachdem in Kapitel 3.6.4 bereits ein konkreter Vorschlag zur Optimierung von Dokumentation und Buchung des Ausschusses vorgestellt wurde, folgen nun einige Optimierungsmöglichkeiten der allgemeinen Aufzeichnungspraxis. Allen gemein ist, dass sie recht wenig finanziellen und personellen Aufwand verlangen, aber auf lange Sicht merkliche Verbesserungen und damit Kosteneinsparungen versprechen:

- Möglichst viele Formulare, Schichtblätter etc. der verschiedenen Werke sollten zusammengeführt und vereinheitlicht werden. Die Vielzahl der verschiedenen Dokumente führt oft dazu, dass ihr konkreter Nutzen für die damit arbeitenden Personen unklar ist. Folglich werden diese nur ungenau bzw. nachlässig ausgefüllt und bearbeitet. Eine weitgehende Vereinheitlichung der in allen Werken verwendeten Aufzeichnungen könnte folglich zu besserer Transparenz und Kontrolle beitragen.

- An der Schneidstraße werden derzeit die Etiketten zur Identifikation der Blöcke entfernt und auf ein Formular geklebt, welches relativ wenige Informationen liefert und keine ausreichende Rückverfolgbarkeit ermöglicht. Eine definierte Reihenfolge des Klebens unter Angabe der jeweiligen Uhrzeit könnte hier unkompliziert Abhilfe leisten. Bei auftretenden Fehlern, Reklamationen usw., wäre die direkte Identifikation des betreffenden Blocks zwar immer noch nicht gesichert. Allerdings könnte man den Zeitraum seiner Verarbeitung zur Erleichterung der Fehlersuche deutlich eingrenzen.
- Der Ausschuss sollte stets dahingelangen, wo er laut Aufzeichnungen bzw. Vorgaben auch hingehört. So sollten beispielsweise keine Beiplatten auf das Förderband für die Schwarte zum Schreddern gelegt werden, was gelegentlich beobachtet wurde. Ein solches Vorgehen verursacht Ungenauigkeiten und schlechte Nachvollziehbarkeit.
- Ein deutlich langfristiger Weg zu erhöhter Genauigkeit ist die völlige Umstellung der analogen, handschriftlichen und papiergebundenen Dokumentation hin zu einem reinen Computersystem. Alle schriftlichen Aufzeichnungen, die im Laufe dieser Masterarbeit besprochen wurden, könnten ebenso direkt an PC-Arbeitsplätzen durchgeführt werden. Die darin enthaltenen Daten wären für alle weiteren Zwecke wesentlich leichter weiterzuverwenden als die derzeit verwendeten Formulare usw. Auf längere Sicht ist die schrittweise Umstellung auf rein computergestützte Dokumentations- und Kontrollsysteme sicher sinnvoll. Kurzfristig versprechen allerdings weniger aufwendige Verbesserungsansätze schnellere Erfolge.

Allgemein müssen Dokumentation und Buchung möglichst konsequent und genau umgesetzt werden. Die besten Systeme haben keinen Nutzen, wenn sie nicht rigoros und genau verwendet werden. Auch mit den bereits bestehenden Systemen wären durchaus bessere Ergebnisse erzielbar, wenn sie strikt umgesetzt würden. Insbesondere darf bis auf minimale und damit vernachlässigbare Anteile kein Gut- oder Ausschussteil ohne entsprechende Dokumentation verbleiben.

3.6.7 Verbesserungsmöglichkeiten im Arbeitsablauf

Die oben angeführten Teile des Verbesserungskonzepts bestehen hauptsächlich aus technischen Maßnahmen, sei es zur Verbesserung der Herstellungsprozesse, der Materialbilanzierung oder der Dokumentation. Das Personal und dessen Umgang mit diesen Themen ist jedoch ebenso ein wichtiger Ansatzpunkt für Verbesserungen. Daher werden im Folgenden einige Vorschläge dazu gemacht:

- Allen Mitarbeitern und Mitarbeiterinnen muss die Wichtigkeit von Genauigkeit, Transparenz und Nachvollziehbarkeit in sämtlichen Bereichen der Fertigung sowie der unterstützenden Prozesse vermittelt werden. Dazu können unter anderem die schon vorgestellten verbesserten Formulare beitragen, aber auch klärende Gespräche mit den damit beauftragten Personen.

- Im gesamten Unternehmen muss Bewusstsein dafür geschaffen werden, wie wichtig eine genaue Kenntnis und Kontrolle der Fertigungsprozesse ist. Auch wenn die zur Erreichung dieser Genauigkeit nötigen Prüfungen und Messungen auf kurze Sicht aufwendig und teuer erscheinen, sind sie langfristig zur Verbesserung der Materialkostensituation sehr sinnvoll. Ohne ausreichendes Wissen über die stattfindenden Prozesse können die darauf aufbauenden Berechnungs-, Dokumentations- und Planungssysteme niemals zuverlässige Ergebnisse liefern.
- In allen Bereichen müssen klare Verantwortlichkeiten und Zuständigkeiten herrschen. Mehrfach ist im Verlaufe der Masterarbeit das Problem aufgetreten, dass sich bei auftretenden Fragen bzw. Problemen niemand zuständig gefühlt hat. Andererseits erschienen die Hierarchien oft unklar definiert.
- Den in der Fertigung arbeitenden Personen sollte vermittelt werden, dass Probleme und Ausschüsse nicht grundsätzlich auf sie selbst zurückfallen. Derzeit scheint es beispielsweise vorzukommen, dass Ausschüsse „verheimlicht“ werden, damit niemand für ihr Auftreten verantwortlich gemacht werden kann. Grund dafür könnte die Angst vor persönlichen Konsequenzen sein. Für das Unternehmen ist es jedoch wesentlich nachteiliger, nicht zu wissen, wo, wie und warum Probleme aufgetreten sind, als gelegentlich auftretende, menschliche Fehler.

4 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem abschließenden Kapitel werden zunächst die in der vorliegenden Masterarbeit behandelten Themen, Sachverhalte und Untersuchungsergebnisse kurz zusammengefasst. Zuletzt wird ein Ausblick über künftige Umsetzungen und weitere Entwicklungen gegeben.

4.1 Zusammenfassung

Ziel dieser Masterarbeit war ein Konzept zur verbesserten Ermittlung des Rohstoffverbrauchs der von der Hirsch Porozell GmbH in Glanegg hergestellten Produkte. Dieses Konzept soll letztlich zu Optimierungen im Bereich der Materialkosten des Unternehmens führen. Dazu mussten, aufbauend auf den gesammelten theoretischen Grundlagen, Untersuchungen, Nachforschungen und Recherchen im Unternehmen angestellt werden.

Begonnen wurde zunächst mit einer grundsätzlichen Betrachtung der Fertigungsabläufe in Glanegg. Nützlich war dabei das Anfertigen von grafisch dargestellten und genau beschriebenen Prozessschemen der Herstellung, die als Bezugspunkte für alle weiteren Untersuchungen und Analysen dienten. Damit war eine Einordnung aller Teilbereiche in das Gesamtthema gewährleistet und der Fokus auf das Wesentliche blieb stets erhalten. Von diesem Ausgangspunkt konnten daraufhin spezifische Untersuchungen der Teilbereiche durchgeführt werden.

Erstes Untersuchungsobjekt war der angelieferte Rohstoff, dessen Zusammensetzung bzw. Inhaltsstoffe nicht genau bekannt waren. Hier wurden Proben gezogen und getrocknet, während in regelmäßigen Abständen ihr Gewicht festgehalten wurde. Schon in einer frühen Phase dieser Messreihe zeigten erste Ergebnisse, dass eine eventuelle lokale Feuchtekonzentration oder etwaige im Oktabin verbliebene Reste keine wesentlichen Einflussfaktoren auf den Rohstoffverbrauch darstellen. Etwas schwieriger gestaltete sich die Analyse der Feuchte im Rohstoff. Im Rahmen der zur Verfügung stehenden Ressourcen war es kaum möglich, neben dem Feuchtegehalt, weitere Einflüsse auf Trocknungsverluste der Probenmasse vollkommen auszuschließen. Besonders die Menge des enthaltenen Pentans und dessen Verhalten während der Messung waren schwierig zu klären.

Dennoch ergaben sich einige sehr klare Erkenntnisse. So waren auffallende Unterschiede zwischen verschiedenen Herstellern und Materialtypen im Hinblick auf den Masseverlauf der getrockneten Proben festzustellen. Dies deutet auf verschiedene Zusammensetzungen hin, insbesondere auf voneinander abweichende Wasser- und Treibmittelgehalte. Außerdem wurden bei Zimmertemperatur und mittels einer extern durchgeführten Laboranalyse Vergleichsmessungen durchgeführt, welche sehr ähnliche Ergebnisse lieferten. Damit konnten im Wesentlichen die Messwerte der Trocknungsmethode in ihrer Aussagekraft bestätigt werden. Folglich sollte es sich bei den Messergebnissen durchaus um sehr gute Richtwerte halten, wenn auch nicht um äußerst exakte Daten.

In jedem Fall sind die Unterschiede zwischen den diversen Produzenten derart groß, dass bei einer Betrachtung des Rohstoffverbrauchs nur unter großen Vorbehalten pauschale Annahmen getroffen werden können. Vielmehr wird ist eine differenzierte Betrachtung der eingesetzten Rohstoffe und ihrer Varianten dringend geboten. Außerdem sind intensivere, über die vorliegende Masterarbeit hinausgehende Untersuchungen auf diesem Gebiet zu empfehlen. Aufgrund der großen Mengen an Rohstoff, die jährlich zugekauft werden, sind daraus deutlich positive Effekte auf den Materialkostenbereich zu erwarten.

Als nächstes wurden die vom Unternehmen hergestellten Formteile untersucht. Wieder wurde mit Trocknung sowie entsprechender Aufzeichnung und Analyse des Gewichtsverlusts gearbeitet. Hier zeigten sich vor allem gravierende Streuungen der Trockengewichte. Ein genereller Durchschnittswert für das Gewicht eines fertigen Teils, wie er für eine Berechnung von dessen Materialverbrauch sehr hilfreich wäre, ist somit schwierig festzulegen. Beim Feuchteanteil der Formteile ist die Verwendung von entsprechenden Mittelwerten eher vorstellbar, obwohl auch dort die Messwerte schwanken. Die Ursachen für auftretende Streuungen sowie auffällige Einbrüche in den Werten konnten nicht auf spezifische Ursachen zurückgeführt werden. Folglich sollten auch hier weitere, intensive Analysen sehr nützlich sein, insbesondere in Hinblick auf Kostentransparenz und finanzielle Einsparungen beim Materialeinsatz pro Teil.

Eine weitere Messreihe fand in Bezug auf die EPS-Blöcke sowie die daraus geschnittenen Platten statt. Wieder konnten einige Richtwerte für Feuchte und Trockengewichte ermittelt werden. Dennoch war die Streuung der Werte erneut recht hoch. Ein starker Einfluss der Ablagerungsdauer auf die Trocknung der untersuchten Produkte scheint gegeben zu sein. Ebenso von großer Relevanz für das Gewicht und die Trocknung einer Platte ist deren Lage im Block, während die diversen Materialtypen sich dagegen sehr ähnlich verhielten. Außerdem wurde festgestellt, dass in einer praktisch relevanteren Umgebung, z.B. in einem Büro, nach der Trocknung etwas mehr Feuchte im Produkt enthalten ist als im Trockenschrank. Zudem wurden Messfehler bei den in der Fertigung verwendeten Waagen festgestellt. Daher ist eine regelmäßige Kalibrierung anzuraten. Auch in diesem Bereich wären regelmäßige, auf dieser Masterarbeit aufbauende Analysen und Kontrollen sinnvoll, um letztendlich Einsparungsmöglichkeiten am Materialsektor zu eröffnen.

Als letzte Untersuchung wurden Ausschuss und Rezyklatkreislauf eingehend betrachtet. Hier handelte es sich nicht wie davor um Messreihen, sondern um Nachforschungen vor Ort, Untersuchungen damit verbundener Dokumente sowie Gespräche mit den handelnden Personen. Dabei wurde festgestellt, dass die bisher verwendeten Aufzeichnungen meist nur relativ wenige, verkürzte Informationen über Ausschüsse und deren Verwendung als Rezyklat geben. Es wurde auch kein einheitliches, konsequentes Vorgehen in der begleitenden Dokumentation und Buchung vorgefunden.

Das wesentliche Ergebnis der Untersuchung von Ausschuss und Recycling war ein Mangel an Transparenz, konsequenter Aufzeichnung sowie klaren Zuständigkeiten und Verantwortlichkeiten. Aufgrund der großen anfallenden Mengen birgt dieser Bereich großes Optimierungspotential in Bezug auf Materialkosten.

In nahezu allen Untersuchungen waren Kompromisse zwischen gewünschtem Umfang der Erhebungen und praktischer Durchführbarkeit einzugehen. So wäre vor allem für Messungen der Feuchte und andere, tiefergehende Analysen eine entsprechende Ausrüstung sehr nützlich gewesen. Außerdem war, bedingt durch die geringen personellen Ressourcen, die Zahl der zur Verfügung stehenden Messwerte gelegentlich recht überschaubar. Größere zur Verfügung stehende Mittel in finanzieller, technischer und personeller Hinsicht hätten sicher für einige Erleichterung gesorgt. Es ist jedoch verständlich, dass diese im Rahmen einer Masterarbeit nur im begrenzten Umfang zur Verfügung stehen. Ein weiteres Problem war die manchmal eher eingeschränkte Bereitschaft zur Kooperation, insbesondere von direkt in der Fertigung arbeitenden Personen. Vielleicht fehlte es gelegentlich an Verständnis für den Sinn der angestellten Untersuchungen, die natürlich den reibungslosen Ablauf der Fertigung hin und wieder leicht beeinträchtigten. Vielfach waren Interesse und Hilfsbereitschaft allerdings sehr groß und es kam zu einer guten Zusammenarbeit.

Mit den durch die vorangegangenen Untersuchungen gewonnenen Informationen, Daten und Erfahrungen, wurde schließlich ein Verbesserungskonzept erstellt. Dabei handelt es sich in erster Linie um eine Sammlung zusammenhängender Teilkonzepte und Vorschläge, die zu einer Optimierung im Bereich Materialverbrauch und dessen Ermittlung beitragen sollen. Diese bieten allesamt Verbesserungspotential zur Verringerung der Materialkosten und Erhöhung der Transparenz in diesem, die finanziellen Aufwendungen des Unternehmens dominierenden, Bereich. So wäre ein neues Formular zur Aufzeichnung von Ausschüssen ein wichtiger Ansatzpunkt zur Verbesserung von Transparenz und Nachvollziehbarkeit. Eine Stoffbilanzierung auf Basis des trockenen Materials, unter Verwendung der in den Messreihen ermittelten Zuschläge für Feuchteverluste, Ausschüsse usw., könnte dazu dienen, den Rohstoffverbrauch genauer zu ermitteln.

Ein wichtiger Verbesserungsansatz wäre auch die Durchführung aufwendigerer und längerer Messungen zu allen in dieser Masterarbeit betrachteten Themen. Nur so lassen sich zuverlässige, belastbare Daten sammeln. Die Anschaffung professioneller Geräte wäre hier sicher äußerst nützlich. Auch das betriebliche Recycling bietet durch mögliche Umstellungen in den ablaufenden Prozessen, sowie den begleitenden Aufzeichnungen erhebliches Optimierungspotential. Generell weist die gesamte derzeitige Praxis von Dokumentation und Aufzeichnung reichlich Möglichkeiten zur Verbesserung auf. Außerdem muss die zentrale Rolle des arbeitenden Personals in diesem Zusammenhang berücksichtigt werden. Unter allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern sollte ein Bewusstsein für die Wichtigkeit von Konsequenz und Genauigkeit in sämtlichen Arbeitsbereichen geschaffen werden. Das beste System kann nur dann die gewünschten Ergebnisse liefern, wenn es auch richtig eingesetzt wird.

4.2 Ausblick

In dieser Masterarbeit konnten viele Erkenntnisse im Zusammenhang mit dem Materialverbrauch gewonnen werden. Dennoch wurde schon früh klar, dass das gesamte Betrachtungsfeld und die vielen Problemstellungen darin sehr weitläufig und komplex sind. Es ist faktisch unmöglich, alle im Zusammenhang mit dem Rohstoffverbrauch relevanten Themen in einer Masterarbeit zu analysieren und abzubilden. Für die Hirsch Servo AG ist es daher definitiv ratsam, auf diesen Untersuchungen und ihren Ergebnissen aufbauend, weitere Anstrengungen zu unternehmen. Neben dem Rohstoff EPS fließen kaum wesentliche, weitere Inhaltsstoffe in die Produkte der Hirsch Porozell. Die verarbeiteten Mengen sind jedoch sehr groß und damit auch die dafür aufzuwendenden finanziellen Mittel. Folglich dominiert der Rohstoffverbrauch die Kostensituation des Unternehmens. Daher erscheint es vor allem aus finanzieller Perspektive sinnvoll, möglichst genaue Kenntnisse über die Zusammensetzung der zugekauften Rohstoffe sowie deren spezifische Eigenschaften anzustreben. Als Startpunkt einer Kostenoptimierung sollten auch über die physikalischen, chemischen und fertigungstechnischen Abläufe umfangreiche Informationen vorliegen.

Für diese zukünftigen Ziele sind eingehende Analysen des Rohstoffs, der Fertig- und Halbfertigprodukte nötig. In der derzeitigen Praxis wird hingegen häufig mit im Laufe der Zeit gesammelten, groben Erfahrungswerten gearbeitet. Oft interessiert nur, ob die Fertigung zufriedenstellend funktioniert oder nicht, während die Gründe dafür meist im Dunklen bleiben. Folglich können auch kaum präventive Maßnahmen ergriffen werden und es kommt immer wieder zu Stillständen, Fehlern und Ausschuss.

Vielleicht kann diese Masterarbeit einen Anstoß dazu geben, den Fokus verstärkt auf das Verständnis der grundlegenden Fertigungsprozesse zu legen. In jedem Fall sollte der Untersuchung und Analyse der Herstellungsprozesse mehr Bedeutung als bisher beigemessen werden. Dazu wären entsprechendes Personal und höhere finanzielle Mittel vonnöten. Hoffentlich können die besprochenen Problemfelder und Lösungen als Startpunkt für weitere, ähnliche Untersuchungen und intensive Nachforschungen dienen. Was hier in einigen Monaten untersucht wurde, ließe sich durchaus zu regelmäßigen Messungen und Kontrollen, beispielsweise im Rahmen der Qualitätssicherung, ausbauen.

Zu betonen ist, dass es augenscheinlich keine einfache, alleinstehende Lösung gibt, um den Rohstoffverbrauch, dessen Ermittlung und damit auch die Materialkosten zu optimieren. Vielmehr müssen unterschiedliche Themenbereiche bearbeitet und verbessert werden. Es bleibt zu hoffen, dass die in der vorliegenden Masterarbeit gewonnenen Erkenntnisse und Vorschläge dem Unternehmen viele positive Impulse bringen. Wenn auch wahrscheinlich nicht alle vorgeschlagenen Verbesserungen tatsächlich umgesetzt werden, ist es doch wünschenswert, dass zumindest bei Teilen davon eine Realisierung gelingt.

Literaturverzeichnis

- BASF SE. (21. 12. 2015). Sicherheitsdatenblatt Neopor® F 2300 (Version 3.0).
- BASF SE. (21. 12. 2015). Sicherheitsdatenblatt Styropor® F 415 E (Version 2.0).
- BASF SE. (2018). *Erfunden von BASF: Styropor*. Abgerufen am 09. 11. 2018 von https://www.plasticsportal.net/wa/plasticsEU~de_DE/portal/show/common/content/literature/plastics/0208/plastics_styropor_a_basf_invention
- BASF SE. (September 2016). Technisches Merkblatt Neopor® F 2000.
- BASF SE. (September 2016). Technisches Merkblatt Styropor® F 15 E Reihe.
- Bättig, D. (2015). *Angewandte Datenanalyse*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Bottom, R. (2008). Thermogravimetric Analysis. In P. Gabbott, *Principles and Applications of Thermal Analysis* (S. 87-118). Oxford: Blackwell Publishing.
- Ceresana. (2018). *Marktstudie Dämmstoffe - Europa (2. Auflage)*. Abgerufen am 07. 12. 2018 von <https://www.ceresana.com/de/marktstudien/industrie/daemmstoffe-europa/ceresana-marktstudie-daemmstoffe-europa.html>
- Ceresana. (2018). *Marktstudie Dämmstoffe - Welt (2. Auflage)*. Abgerufen am 07. 12. 2018 von <https://www.ceresana.com/de/marktstudien/industrie/daemmstoffe-welt/ceresana-marktstudie-daemmstoffe-welt.html>
- Ceresana. (2018). *Marktstudie Expandierbares Polystyrol - EPS (3. Auflage)*. Abgerufen am 07. 12. 2018 von <https://www.ceresana.com/de/marktstudien/kunststoffe/expandierbares-polystyrol/expandierbares-polystyrol-eps-markt-anteil-kapazitaet-angebot-nachfrage-prognose-innovation-anwendung-wachstum-produktion-industrie.html>
- Ceresana. (2018). *Marktstudie Kunststoffe - Europa*. Abgerufen am 07. 12. 2018 von <https://www.ceresana.com/de/marktstudien/kunststoffe/kunststoffe-europa/marktstudie-kunststoffe-europa.html>
- Ceresana. (2018). *Marktstudie Kunststoffe - Welt*. Abgerufen am 07. 12. 2018 von <https://www.ceresana.com/de/marktstudien/kunststoffe/kunststoffe-welt/kunststoffe-welt-studie-markt-analyse-ceresana.html>
- Cherdron, H. (2006). Synthesemethoden und Herstellverfahren für Kunststoffe. In W. Keim (Hrsg.), *Kunststoffe* (S. 2-29). Weinheim: WILEY-VCH.
- Cleveland, C. J., & Morris, C. (Hrsg.). (2015). *Dictionary of Energy*. Amsterdam: Elsevier.
- Consultic Marketing & Industrieberatung GmbH. (2016). *Produktion, Verarbeitung und Verwertung von Kunststoffen in Deutschland 2015 - Kurzfassung*. Studie, Alzenau.
- CreaCycle GmbH. (2018). *EPS-Kreislauf*. Abgerufen am 07. 12. 2018 von <https://www.creacycle.de/de/projekte/recycling-von-expandiertem-polystyrol-eps/eps-kreislauf.html>
- Eigner, M. (2014). Technische Organisation des Produktentwicklungsprozesses. In M. Eigner, D. Roubanov, & R. Zafirov (Hrsg.), *Modellbasierte Virtuelle Produktentwicklung* (S. 227-266). Berlin, Heidelberg: Springer.
- Fink, G. (2006). Herstellung der wichtigsten Kunststoffe. In W. Keim (Hrsg.), *Kunststoffe* (S. 102-125). Weinheim: WILEY-VCH.

- Fraunhofer-Institut für Verfahrenstechnik und Verpackung IVV. (2018). *Recycling von EPS-Abfall zu re-expandierbarem Polystyrol – EPS-Loop*. Abgerufen am 07. 12. 2018 von <https://www.ivv.fraunhofer.de/de/forschung/verfahrensentwicklung-polymer-recycling/recycling-eps-abfall.html>
- GESTIS-Stoffdatenbank. (2018). *Isopentan*. Abgerufen am 15. 11. 2018 von [http://gestis.itrust.de/nxt/gateway.dll/gestis_de/030860.xml?f=templates\\$fn=default.htm\\$3.0](http://gestis.itrust.de/nxt/gateway.dll/gestis_de/030860.xml?f=templates$fn=default.htm$3.0)
- GESTIS-Stoffdatenbank. (2018). *Neopentan*. Abgerufen am 15. 11. 2018 von [http://gestis.itrust.de/nxt/gateway.dll/gestis_de/510188.xml?f=templates\\$fn=default.htm\\$3.0](http://gestis.itrust.de/nxt/gateway.dll/gestis_de/510188.xml?f=templates$fn=default.htm$3.0)
- GESTIS-Stoffdatenbank. (2018). *Pentan*. Abgerufen am 15. 11. 2018 von [http://gestis.itrust.de/nxt/gateway.dll/gestis_de/010040.xml?f=templates\\$fn=default.htm\\$3.0](http://gestis.itrust.de/nxt/gateway.dll/gestis_de/010040.xml?f=templates$fn=default.htm$3.0)
- Hirsch Porozell GmbH. (2017). Produktsortiment Dämmstoffe (Broschüre). Glanegg.
- Hirsch Servo AG. (2018). *Bau*. Abgerufen am 16. 11. 2018 von <https://www.hirsch-gruppe.com/de/produkte-und-anwendungen/eps-technische-formteile/bau.html>
- Hirsch Servo AG. (2018). *Fassaden- und Sockeldämmplatten*. Abgerufen am 10. 12. 2018 von <https://www.hirsch-gruppe.com/de/produkte-und-anwendungen/eps-daemmung/eps-fassadendaemmung.html>
- Hirsch Servo AG. (2018). *Hirsch Porozell*. Abgerufen am 07. 12. 2018 von <https://www.hirsch-gruppe.com/de/produkte-und-anwendungen.html>
- Hirsch Servo AG. (2018). *Über uns*. Abgerufen am 06. 11. 2018 von <https://www.hirsch-gruppe.com/de/uber-uns/unternehmensprofil2.html>
- Hirsch Servo AG. (2018). *Wärmedämm-Leichtbeton*. Abgerufen am 07. 12. 2018 von <https://www.hirsch-gruppe.com/de/thermozell/eps-ausgleichsdaemmung.html>
- Hirsch, J., & Dickmann, P. (2015). Materialfluss- und Wertstromanalyse sowie Wertstromdesign und andere Darstellungen der Materialströme. In P. Dickmann (Hrsg.), *Schlanker Materialfluss* (S. 385-417). Berlin Heidelberg: Springer.
- Horsch, J. (2015). *Kostenrechnung*. Wiesbaden: Springer Gabler.
- Kohn, W. (2005). *Statistik - Datenanalyse und Wahrscheinlichkeitsrechnung*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Kraume, M. (2012). *Transportvorgänge in der Verfahrenstechnik*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Krieger, W. (2018). *Materialfluss*. (Gabler Wirtschaftslexikon) Abgerufen am 17. 11. 2018 von <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/materialfluss-51803/version-274954>
- Krieger, W. (2018). *Tertiärbedarf*. (Gabler Wirtschaftslexikon) Abgerufen am 18. 11. 2018 von <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/tertiaerbedarf-47172/version-270439>
- Paschotta, R. (2018). *Einblasdämmung*. Abgerufen am 07. 12. 2018 von <https://www.energie-lexikon.info/einblasdaemmung.html>
- Plinke, W., & Rese, M. (2006). *Industrielle Kostenrechnung*. Berlin Heidelberg: Springer.

- Posch, A., & Klingspiegl, M. (2012). Stoff- und Energiebilanzierung in der industriellen Produktion. In M. Tschandl, & A. Posch (Hrsg.), *Integriertes Umweltcontrolling* (S. 54-67). Wiesbaden: Gabler .
- proALPHA Business Solutions GmbH. (2018). *proALPHA*. Abgerufen am 07. 11. 2018 von <https://www.proalpha.com/at/>
- Sadeler, J. (2018). *Deutschland, Recyclingland?* Abgerufen am 07. 12. 2018 von <https://www.faz.net/aktuell/generation-plastik/generation-plastik-wie-gut-recycelt-deutschland-wirklich-15782613.html>
- Schade, C. (2012). Styrolpolymere. In Elsner et al. (Hrsg.), *Kunststoffe - Eigenschaften und Anwendungen* (S. 369-473). Heidelberg: Springer.
- Schaller GmbH. (2018). *Schaller Messtechnik*. Abgerufen am 11. 12. 2018 von <https://www.humimeter.com/de/startseite/>
- Schönsleben, P. (2016). *Integrales Logistikmanagement*. Berlin Heidelberg: Springer.
- Spektrum Lexikon der Chemie. (2018). *Alkane*. Abgerufen am 15. 11. 2018 von <https://www.spektrum.de/lexikon/chemie/alkane/266>
- Spektrum Lexikon der Chemie. (2018). *Pentane*. Abgerufen am 15. 11. 2018 von <https://www.spektrum.de/lexikon/chemie/pentane/6798>
- Spektrum Lexikon der Chemie. (2018). *Polystyrol*. Abgerufen am 09. 11. 2018 von <https://www.spektrum.de/lexikon/chemie/polystyrol/7357>
- Spektrum Lexikon der Chemie. (2018). *Styrol*. Abgerufen am 09. 11. 2018 von <https://www.spektrum.de/lexikon/chemie/styrol/8811>
- Stastny, F. (1951). *Deutsches Patentamt Patentnr. DE941389*.
- Stastny, F. (1951). *Deutsches Patentamt Patentnr. DE946085*.
- Strobel, M., & Müller, U. (2012). Flusskostenrechnung – Ein ERP-basiertes Instrument zur systematischen Reduzierung des Materialeinsatzes. In M. Tschandl, & A. Posch (Hrsg.), *Integriertes Umweltcontrolling* (S. 145-161). Wiesbaden: Gabler.
- Sunpor. (2018). Technisches Merkblatt SUNPOR® A 245 SE (Revision: 09).
- SYNTHOS Styrenics Services BV. (01. 03. 2018). Technisches Datenblatt InPacto® SR/F (Version 1).
- Voigt, K.-I. (2018). *Ausschuss*. (Gabler Wirtschaftslexikon) Abgerufen am 07. 12. 2018 von <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/ausschuss-27418/version-251071>
- Voigt, K.-I. (2018). *Stücklisten*. (Gabler Wirtschaftslexikon) Abgerufen am 16. 11. 2018 von <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/stueckliste-44343/version-267656>
- Weber, H. (2008). Instandsetzung von feuchte- und salzgeschädigtem Mauerwerk. In N. A. Fouad, *Bauphysik Kalender 2008* (S. 425-469). Berlin: Ernst & Sohn.
- Weber, J. (2018). *Kostenrechnung*. (Gabler Wirtschaftslexikon) Abgerufen am 12. 12. 2018 von <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/kostenrechnung-39542/version-262949>
- Weber, J. (2018). *Material*. (Gabler Wirtschaftslexikon) Abgerufen am 17. 11. 2018 von <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/material-37210/version-260653>
- Weerth, C. G. (2018). *Rohstoffe*. (Gabler Wirtschaftslexikon) Abgerufen am 17. 11. 2018 von <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/rohstoffe-46814/version-270088>

- Willems, W. M., & Schild, K. (2017). Dämmstoffe im Bauwesen. In N. A. Fouad (Hrsg.), *Bauphysikkalender 2017* (S. 77-152). Berlin: Wilhelm Ernst & Sohn.
- Woidasky, J. (2012). Kreislaufwirtschaft und Recycling. In Elsner et al. (Hrsg.), *Kunststoffe - Eigenschaften und Anwendungen* (S. 105-111). Springer.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Standorte der Hirsch Gruppe	1
Abbildung 2: Gewinnung von Styrol.....	8
Abbildung 3: Struktureinheit von Polystyrol.....	8
Abbildung 4: Herstellung von EPS (schematisch).....	11
Abbildung 5: Struktur der Pentane.....	13
Abbildung 6: Beispiele für Materialflussvisualisierungen.....	23
Abbildung 7: Vereinfachtes Materialflussmodell.....	24
Abbildung 8: Stücklistenbeispiele	28
Abbildung 9: Fertigungsprozess Block/Platte.....	38
Abbildung 10: Fertigungsprozess Formteile.....	44
Abbildung 11: Rohstoff und expandierte Kügelchen	47
Abbildung 12: Diagramm Rohstoffuntersuchung Hersteller – Standort	53
Abbildung 13: Diagramm Rohstoffuntersuchung Hersteller – Materialtyp – Standort	55
Abbildung 14: Diagramm Rohstoff Langzeitmessung Ofen und Raumtemperatur	57
Abbildung 15: Vergleich Rohstoffmessung Trockenschrank – Raumtemperatur – Labor.....	58
Abbildung 16: EPS-Schalelement.....	61
Abbildung 17: Trockenmasse der Schalelemente.....	64
Abbildung 18: Feuchte der Schalelemente	65
Abbildung 19: Dämmplatten Typ F	68
Abbildung 20: Diagramm Einwaagegewicht.....	70
Abbildung 21: Diagramm Gewichtsverlust Block.....	72
Abbildung 22: Gewichtsverlust von Blöcken und daraus geschnittenen Platten.....	73
Abbildung 23: Diagramm Trockengewichte Platten	75
Abbildung 24: Verlauf des Gewichtsverlusts einer Dämmplatte	76

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Schmelz- und Siedepunkte der Pentane	14
Tabelle 2: Masseverlust beim Trocknen aus verschiedenen Bereichen im Oktabin	50
Tabelle 3: Restmengen im Inliner	51
Tabelle 4: Messwerte Rohstoffuntersuchung Hersteller – Standort.....	52
Tabelle 5: Messwerte Rohstoffuntersuchung Hersteller – Materialtyp – Standort	54
Tabelle 6: Vergleichbare Zeitpunkte der Rohstofftrocknung	59
Tabelle 7: Maßzahlen Trockenmasse Schalelemente.....	63
Tabelle 8: Maßzahlen Feuchteanteil Schalelemente	65
Tabelle 9: Arithmetisches Mittel und Spannweite Einwaagegewicht	70
Tabelle 10: Arithmetisches Mittel und Spannweite Gewichtsverlust Block	72
Tabelle 11: Arithmetisches Mittel und Spannweite Gewichtsverlust Platten	73
Tabelle 12: Arithmetisches Mittel und Spannweite Gewichtsverlust Gesamt	74
Tabelle 13: Arithmetisches Mittel und Spannweite Trockengewichte Platten	75
Tabelle 14: Beispiel verbessertes Ausschussformular	88

Formelverzeichnis

Formel 1: Arithmetisches Mittel	35
Formel 2: Spannweite.....	35

Abkürzungsverzeichnis

AG	Aktiengesellschaft
EPP	Expandiertes Polypropylen
EPS	Expandiertes Polystyrol
ERP	Enterprise Resource Planning
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
LKW	Lastkraftwagen
PKW	Personenkraftwagen
PS	Polystyrol
PVC	Polyvinylchlorid