

Ausarbeitung und Bewertung werkstofflicher Recyclingkonzepte für thermoplastische Kunststoffe

Masterarbeit
von
Dipl.-Ing. Sebastian Stieger, BSc



eingereicht am
Lehrstuhl Wirtschafts- und Betriebswissenschaften
der
Montanuniversität Leoben

Leoben, August 2017

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

I declare in lieu of oath, that I wrote this thesis and performed the associated research myself, using only literature cited in this volume.

[Ort], [Datum]

([Vorname] [Nachname])

Gleichheitsgrundsatz

Aus Gründen der Lesbarkeit wurde in dieser Arbeit darauf verzichtet, geschlechtsspezifische Formulierungen zu verwenden. Es wird ausdrücklich festgehalten, dass die bei Personen verwendeten maskulinen Formen für beide Geschlechter zu verstehen sind.

Danksagung

Mein erster Dank gilt meinem Betreuer Dipl.-Ing. Dr. mont. Markus Battisti, der durch seinen fachlichen Input einen großen Anteil an der positiven Durchführung dieser Masterarbeit hatte. Neben den zahlreichen Fachdiskussionen möchte ich mich außerdem für den freundschaftlichen Umgang und sein großes Engagement bedanken.

Außerdem möchte ich meinen Dank an Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Hubert Biedermann, Leiter des Lehrstuhles für Wirtschafts- und Betriebswissenschaften an der Montanuniversität Leoben, richten, dessen Unterstützung mir als Absolvent der Studienrichtung Kunststofftechnik den Zugang zum Masterstudium Industrial Management und Business Administration ermöglichte.

Des Weiteren möchte ich mich bei Dipl.-Ing. Dr. mont. Andreas Mündler und Mag. Dr. rer. nat. Milan Topic bedanken, die eine exzellente fachliche Betreuung sichergestellt haben.

Ich möchte mich auch bei meinen Kommilitonen bedanken, mit denen ich eine großartige Zeit während meines Studiums verbracht habe, und die mich laufend unterstützt und motiviert haben.

Der Firma Hirschmann Automotive GmbH möchte ich für die Bereitstellung dieses interessanten Themas und dem großen Vertrauen, welches mir von Beginn weg entgegengebracht wurde, danken. In diesem Zusammenhang möchte ich mich bei allen Mitarbeitern bedanken, die mich bei der Durchführung der praktischen Fallstudie unterstützt haben. An dieser Stelle möchte ich namentlich Markus Trojer und David Fritz erwähnen.

Abschließend gilt der größte Dank meiner Familie und meinen Freunden, die mich in jeder Lebenslage bis zum heutigen Zeitpunkt unterstützt und gefördert haben. Hier seien insbesondere meine Mutter Maria, meine Schwester Viktoria und meine Großeltern Friedrich und Maria erwähnt.

Kurzfassung

Die Integration ökologischer Themenstellungen in unternehmerisches Handeln hat nicht zuletzt durch globale Probleme wie Klimawandel oder Ressourcenknappheit in den letzten Jahrzehnten immer stärker an Bedeutung gewonnen. Das daraus resultierende Streben nach einer Kreislaufwirtschaft hat im Bereich der Kunststofftechnik zu intelligenten Recyclinglösungen in Unternehmen geführt. Im Besonderen das werkstoffliche Recycling von thermoplastischen Kuppelprodukten ist in vielen Produktionsbetrieben Stand der Technik und wird dort neben dem ökologischen Aspekt vor allem auf Grund ökonomischer Gesichtspunkte betrieben.

Ziel dieser Masterarbeit war den aktuell extern ausgelagerten Aufbereitungsprozess der Firma Hirschmann am Standort Rankweil im Detail zu untersuchen. Dadurch sollte eine transparente Ausgangsbasis geschaffen werden, um im Sinne einer kontinuierlichen Verbesserung einen Vergleich mit Alternativkonzepten zu ermöglichen. Im Anschluss daran waren innerbetriebliche Recyclinglösungen auszuarbeiten und auf die speziellen Anforderungen des Standortes abzustimmen. Diese Konzepte waren abschließend neben wirtschaftlichen Kriterien auch hinsichtlich ihrer Einflüsse auf Produkte und Prozesse zu bewerten und die daraus resultierenden Risiken abzuschätzen.

Zu diesem Zweck wurde der gesamte Strom an Sekundärmaterial im Zeitraum Dezember 2015 bis Dezember 2016 erhoben und allen Tätigkeiten, die mit dem aktuellen Aufbereitungsprozess in Verbindung stehen, Kosten zugeordnet. Ein Vergleich mit dem Preis für Neuware zeigt, dass eine absolute Vorteilhaftigkeit für diese Form der Kreislaufwirtschaft in jedem Fall gegeben ist.

Das erste Alternativkonzept basiert auf zentralen Schneidemühlen. Im Gegensatz zum aktuell extern bezogenen Regenerat können jedoch beim Einsatz von Mahlgut weder Staubanteile noch eine unregelmäßige Korngröße gänzlich vermieden werden. Diese Umstände können neben Prozessschwankungen im schlimmsten Fall zu einem materialbedingten Produktausfall führen. Dem gegenüber steht ein enormes wirtschaftliches Erfolgspotential, welches mit Hilfe einer dynamischen Investitionsrechnung nachgewiesen werden konnte.

Durch den Einsatz einer innovativen Schredder-Extruderanlage können die technischen Risiken deutlich minimiert werden. Dieses Investitionsvorhaben ist jedoch mit bedeutend höheren Anschaffungsauszahlungen verbunden, die gemeinsam mit einer langen Amortisationsdauer und einem mit Unsicherheit behafteten Strom an Sekundärmaterial (Einsatz ist vom Kunden abhängig) in einem finanzwirtschaftlichen Risiko resultieren.

Ein weiteres Alternativkonzept, welches auf Beistellmühlen beruht, kommt auf Grund der höchst flexiblen Produktionsplanung der Firma Hirschmann als Gesamtkonzept nicht in Frage. Es wurde dennoch gezeigt, dass dieses Konzept, speziell für „Dauerläufer“ (Bauteile werden immer an denselben Fertigungsanlagen produziert), höchst profitabel sein kann.

Abstract

Within the last decades, the integration of environmental topics in corporate actions has attracted increasing attention due to global issues, such as climate change and a growing scarcity of resources. Consequently, companies created sophisticated solutions on how to implement (polymer) recycling. Especially material recycling of thermoplastic production waste is nowadays state of the art around the world. Additionally, the main reason for implementing recycling in a production plant has changed in many cases from environmental to economic reasons.

The first aim of this master's thesis was to analyse the outsourced material recycling process of Hirschmann Automotive GmbH at their plant in Rankweil (Austria). Secondly, in-house recycling solutions had to be found and adapted to the local conditions. These investment projects must not solely be judged on economic criteria but also on their influence on products and processes.

In order to fulfil these requirements, the flow of secondary material was monitored in Rankweil over a period of more than one year (December 2015 – December 2016). Furthermore, each working activity related to the current recycling process was assigned to its actual cost. A comparison between the total costs of the current recycling process and the price of the original material shows a big economic advantage in favour of the recycling process.

The first in-house solution contains two central edge mills. In contrast to the currently used granulate the particle size of the grist is irregular and it contains a lot of dust. Consequently, the process fluctuations increase drastically, which could lead to failure of manufactured parts. However, this investment project shows a huge economic success.

All technical risks are diminished, when innovative shredder-extruder systems are used instead. Nevertheless, a payback time of more than three years in combination with an uncertain secondary material flow (the use of recycling material has to be confirmed by the customers) leads to a significant financial risk.

Another solution, which is based on small edge mills next to every injection-moulding machine, was not even possible to design, because of the highly flexible production planning system. Nonetheless, a dynamic investment calculation shows the great economic success of this concept under special circumstances (the same product is manufactured on the same injection-moulding machine over a long period).

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	13
1.1	Ausgangssituation und Problemstellung	14
1.2	Zielsetzung und Forschungsfrage	15
1.3	Methodische Vorgehensweise	15
1.4	Aufbau der Arbeit	16
2	Technische Grundlagen	17
2.1	Einführung in die Kunststofftechnik	17
2.2	Recycling von Kunststoffen	20
2.3	Anlagen zur Aufbereitung von Kunststoffen	31
3	Betriebswirtschaftliche Grundlagen	41
3.1	Einführung in die Investitionsrechnung	41
3.2	Statische Investitionsrechnungsverfahren	53
3.3	Dynamische Investitionsrechnungsverfahren	61
3.4	Methoden bei unsicherer Datenlage	70
4	Praktische Fallstudie	74
4.1	Beschreibung des untersuchten Unternehmens	74
4.2	Analyse der Ausgangssituation	75
4.3	Analyse des Konzeptes 1: Zentralmühlen	83
4.4	Analyse des Konzeptes 2: Beistellmühle	90
4.5	Analyse des Konzeptes 3: Zentralmühlen mit Extruder	95
4.6	Analyse des Konzeptes 4: Schredder-Extruderanlage	101
4.7	Sensitivitätsanalysen	106
5	Zusammenfassung und Ausblick	111

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Grundprinzip der Kreislaufwirtschaft	14
Abbildung 2: Einteilung polymerer Werkstoffe	19
Abbildung 3: Strukturformel für PA 6 (x=5)	19
Abbildung 4: Strukturformel für PA 66 (x=6, y=4)	20
Abbildung 5: Grafische Darstellung möglicher Recyclingkreisläufe für Kunststoffabfälle	23
Abbildung 6: Vergleich mechanischer Eigenschaften zwischen zwei PA 6 GF30- Rezyklate mit dem Originalmaterial.....	25
Abbildung 7: Mechanische Eigenschaften eines PA 6-Typs mit 10, 20 und 25% Mahlgutzusatz.....	26
Abbildung 8: Organisationsformen für das Recycling von Produktionsabfällen.....	29
Abbildung 9: Möglichkeiten der werkstofflichen innerbetrieblichen Materialaufbereitung	31
Abbildung 10: Zerkleinerungsanlagen für Kunststoffabfälle	32
Abbildung 11: Schnitt durch eine Schneidemühle.....	32
Abbildung 12: Schematische Darstellung einer Beistell-Schneidemühle.....	33
Abbildung 13: Betriebsweisen sowie Beschickungsmöglichkeiten von Beistellmühlen; a: Spritzgießmaschine, b: Schneidemühle, c; Entnahmegesäß, d: Mahlgut-zwischenbehälter, e: Behälter mit Neuware, f: Förder- und Dosiergeräte, g: Förderband	34
Abbildung 14: Metallsuchbrücke und Metallsuchspule zum Auffinden von Metallteilen vor dem Beschicken der Schneidemühle	35
Abbildung 15: Schematische Darstellung eines Metallausscheidegeräts in der Druckleitung zwischen Schneidemühle und Absauggebläse; a: Materialfördergebläse, b: Sensorspule, c: Metallausscheidegerät, d: Zyklon, e: Absackklappe, f: sauberes Mahlgut, g: Metall, h: Ventile, i: Materialweiche, k: Trichter, l: sauberes Mahlgut	35
Abbildung 16: Zentrale Aufbereitungsanlage; a: Förderband, b: Metallsuchbrücke; c: Schallschutztunnel, d: Schneidemühle, e: Gebläse, f: Entstauber, g: Zellenradschleuse, h: Metallausscheidegerät, i: Zyklon, k: Deckenfilter, l: Staub, m: Feinstaub	36
Abbildung 17: Zweiwelliger Schnecke ausgeführt im Baukastenprinzip	37
Abbildung 18: Schematische Darstellung einer Extruderanlage (Kaltabschlag); 1-2: Dosiergeräte, 3: Schnecke, 4: Entgasung, 5: Vakuum-Entgasung, 6: Schmelzepumpe, 7: Filter, 8: Granulierung.....	38

Abbildung 19: Schematische Funktionsweise der Schredder-Extruderanlage; 1: Einwellenzerkleinerer, 2: Doppelschiebersystem, 3: Extruder, 4: Entgasungszone, 5: Filter, 6: Granulierung.....	38
Abbildung 20: Investitionsarten gegliedert nach dem Investitionsobjekt.....	44
Abbildung 21: Investitionsarten gegliedert nach dem Investitionszweck	45
Abbildung 22: Phasen des Investitionsprozesses	48
Abbildung 23: Argumente-Bilanz zur Darstellung monetär schwer erfassbarer Daten.....	50
Abbildung 24: Grafische Darstellung der drei Aspekte des Investitionsentscheids	51
Abbildung 25: Überblick möglicher Wirtschaftlichkeitsrechnungen	52
Abbildung 26: Statische Investitionsrechnungsverfahren.....	53
Abbildung 27: Dreieck der Vermögensanlage.....	54
Abbildung 28: Grafische Darstellung des durchschnittlich gebundenen Kapitals	57
Abbildung 29: Dynamische Investitionsrechnungsverfahren.....	62
Abbildung 30: Grafische Darstellung des internen Zinssatzes	66
Abbildung 31: Grafische Darstellung der dynamischen Amortisationszeit ohne Vorzeichenwechsel der Einzahlungsüberschüsse	69
Abbildung 32: Grafische Darstellung der dynamischen Amortisationszeit mit Vorzeichenwechsel der Einzahlungsüberschüsse	69
Abbildung 33: Dichtefunktion des Kapitalwerts	72
Abbildung 34: Steckverbindungen (links) und Spezial-Kabel-Assemblies (rechts) aus dem Produktsortiment der Hirschmann Automotive GmbH	75
Abbildung 35: Typische Kuppelprodukte (Angüsse) aus dem Spritzgießverfahren	75
Abbildung 36: Aufnahme aus der untersuchten Produktionshalle	76
Abbildung 37: Layout vom Standort Rankweil – Rot markiert der Weg aus der Produktionshalle zur Sammelstation (Schredder)	77
Abbildung 38: Ablaufdiagramm des Aufbereitungsprozesses am Standort Rankweil.....	77
Abbildung 39: Jährliche Menge an nicht aufbereiteten Sekundärrohstoff am Standort Rankweil	79
Abbildung 40: Jährliche Menge an aufbereitetem Sekundärrohstoff am Standort Rankweil	79
Abbildung 41: Grafische Darstellung des Regenerat-Materialstroms von Hirschmann Europa.....	81
Abbildung 42: Vergleich der Kosten für die externe Aufbereitung mit dem Preis des Originalmaterials	82
Abbildung 43: Restfeuchtemessung der Angüsse in Abhängigkeit der Zeit bei Auslagerung zu Produktionsbedingungen	83
Abbildung 44: Ablaufdiagramm nach Konzept 1	85
Abbildung 45: Grafische Darstellung der Kapitalwertentwicklung für Konzept 1	88

Abbildung 46: Aufbereitungsprozess nach Konzept 2.....	90
Abbildung 47: Grafische Darstellung der Kapitalwertentwicklung für Konzept 2	94
Abbildung 48: Ablaufdiagramm nach Konzept 3	96
Abbildung 49: Grafische Darstellung der Kapitalwertentwicklung für Konzept 3	99
Abbildung 50: Schredder-Extruderanlage in der ausgewählten Ausführung	101
Abbildung 51: Ablaufdiagramm nach Konzeptes 4	102
Abbildung 52: Grafische Darstellung der Kapitalwertentwicklung für Konzept 4	105
Abbildung 53: Sensitivität des Kapitalwertes auf ausgewählte Eingangsgrößen (Konzept 1).....	108
Abbildung 54: Sensitivität des internen Zinssatzes auf ausgewählte Eingangsgrößen (Konzept 1).....	108
Abbildung 55: Sensitivität des Kapitalwertes auf ausgewählte Eingangsgrößen (Konzept 4).....	110
Abbildung 56: Sensitivität des internen Zinssatzes auf ausgewählte Eingangsgrößen (Konzept 4).....	110

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Begriffsbestimmungen im Zusammenhang mit Kunststoffrecycling.....	27
Tabelle 2: Vorabbewertung aller Anlagen nach technischen und ökonomischen Kriterien.....	40
Tabelle 3: Übersicht peripherer und zentraler Klassifizierungskriterien.....	43
Tabelle 4: Einordnung der praktischen Fallstudie nach peripheren Kriterien.....	45
Tabelle 5: Einordnung der praktischen Fallstudie nach zentralen Kriterien.....	47
Tabelle 6: Auswahl an einzubeziehenden Kosten in der Kostenvergleichsrechnung.....	55
Tabelle 7: Zuordnung firmeninterner Materialnumern zu den jeweiligen Materialfamilien.....	78
Tabelle 8: Abschätzung des zukünftigen Angussanfalls am Standort Rankweil.....	80
Tabelle 9: Kalkulation der Kosten pro Kilogramm für die typenreine Sammlung aller aufzubereitenden Materialien.....	81
Tabelle 10: Kalkulation der Kosten pro Kilogramm für Aufbereitung, Transport, Lagerung und Einsatz aller aufzubereitenden Materialien.....	82
Tabelle 11: Ergebnis der Prozessfähigkeitsanalyse für das Material 101-285-000.....	84
Tabelle 12: Zusammenfassung aller Anschaffungsauszahlungen für Konzept 1.....	86
Tabelle 13: Zusammenfassung aller jährlichen Auszahlungen für Konzept 1.....	87
Tabelle 14: Weitere Eingangsgrößen der Investitionskostenrechnung für Konzept 1.....	87
Tabelle 15: Zusammenfassung der dynamischen Investitionsrechnung für Konzept 1.....	88
Tabelle 16: Ergebnisse der dynamischen Investitionsrechnung für Konzept 1.....	89
Tabelle 17: Gegenüberstellung der wichtigsten Vor- und Nachteile des Konzeptes 1.....	89
Tabelle 18: Daten zum untersuchten Fallbeispiel für Konzept 2.....	91
Tabelle 19: Zusammenfassung aller Anschaffungsauszahlungen für Konzept 2.....	92
Tabelle 20: Zusammenfassung aller jährlichen Auszahlungen für Konzept 2.....	92
Tabelle 21: Weitere Eingangsgrößen der Investitionskostenrechnung für Konzept 2.....	93
Tabelle 22: Zusammenfassung der dynamischen Investitionsrechnung für Konzept 2.....	93
Tabelle 23: Ergebnisse der dynamischen Investitionsrechnung für Konzept 2.....	94
Tabelle 24: Gegenüberstellung der wichtigsten Vor- und Nachteile des Konzeptes 2.....	95
Tabelle 25: Zusammenfassung aller Anschaffungsauszahlungen für Konzept 3.....	97

Tabelle 26: Zusammenfassung aller jährlichen Auszahlungen für Konzept 3	98
Tabelle 27: Weitere Eingangsgrößen der Investitionskostenrechnung für Konzept 3.....	98
Tabelle 28: Zusammenfassung der dynamischen Investitionsrechnung für Konzept 3.....	99
Tabelle 29: Ergebnisse der dynamischen Investitionsrechnung für Konzept 3.....	100
Tabelle 30: Gegenüberstellung der wichtigsten Vor- und Nachteile des Konzeptes 3	101
Tabelle 31: Zusammenfassung aller Anschaffungsauszahlungen für Konzept 4	103
Tabelle 32: Zusammenfassung aller jährlichen Auszahlungen für Konzept 4	103
Tabelle 33: Weitere Eingangsgrößen der Investitionskostenrechnung für Konzept 4.....	104
Tabelle 34: Zusammenfassung der dynamischen Investitionsrechnung für Konzept 4.....	104
Tabelle 35: Ergebnisse der dynamischen Investitionsrechnung für Konzept 4.....	105
Tabelle 36: Gegenüberstellung der wichtigsten Vor- und Nachteile des Konzeptes 4	106

Abkürzungsverzeichnis

Diss.	Dissertation
f.	folgende Seite
ff.	folgende Seiten
Hrsg.	Herausgeber
hrsg.	herausgegeben
o.V.	ohne Verfasserangabe
s.	siehe
S.	Seite
et al.	et alteri oder et alii = und andere
vgl.	vergleiche
zit. nach	zitiert nach
UGB	Unternehmensgesetzbuch
IAS	International Accounting Standards
IFRS	International Financial Reporting Standard
PA	Polyamid
PPA	Polyphthalamid
PA 6.6	Polyamid 6.6
PA 6	Polyamid 6
GF	Glasfaseranteil
bzw.	beziehungsweise
z.B.:	zum Beispiel

1 Einleitung

Der Begriff „Nachhaltigkeit“ geht bis ins 17. Jahrhundert auf Carl von Carlowitz zurück. Er prägte durch seine Forderung nur so viel Holz zu schlagen, wie durch Aufforstung wieder nachwachsen kann erstmals das Verständnis von intragenerationaler Verantwortung und legte so den Grundstein für eine „nachhaltige“ Denkweise.¹

Aktuell werden Definition und Verständnis von „Nachhaltigkeit“ vor allem durch den Brundtland-Report der Vereinten Nationen aus dem Jahr 1987 bestimmt. Der Kerngedanke ist hier, dass die Entwicklungsmöglichkeiten nachfolgender Generationen durch Handlungen der gegenwertigen Generation nicht eingeschränkt werden dürfen.²

Eine Einbeziehung ökologischer Themenstellungen in unternehmerisches Handeln erfolgte mit dem immer stärker werdenden Bewusstsein der Öffentlichkeit, die durch Probleme wie globaler Klimawandel und größer werdende Ressourcenknappheit zunehmend auf die Wichtigkeit umwelt- und nachhaltigkeitsorientierten Denkens sensibilisiert wurde. Dies sowie eine stark zunehmende Anzahl an Gesetzen, Verordnungen und Richtlinien im Bereich Umwelt führte in der Industrie zu einer stärkeren Einbeziehung der ökologischen Sichtweise.³

Als direkte Folge daraus kann das Bestreben zur Kreislaufschließung von Stoffen und Produkten verstanden werden. Abbildung 1 zeigt grafisch das Grundprinzip der Kreislaufwirtschaft, wonach Reststoffe und Abfälle nach dem Vorbild der Natur im Wirtschaftskreislauf so lange wie möglich verbleiben sollen. Umso kleiner dieser Kreislauf gespannt werden kann (im Idealfall Wiederverwendung von Produkten), desto höher liegt er auf der ökologischen Rangfolge der Kreislaufverfahren. Das bedeutet: Umso kleiner der Kreislauf, desto geringer ist auch der benötigte Energie- und Ressourceninput um das Produkt im Kreislauf zu halten. In diesem Zusammenhang kann auch das Prinzip der Produktverantwortung genannt werden. Es besagt, dass der Hersteller von Produkten auch Verantwortung für dessen Entsorgung trägt. Dies umfasst beispielsweise die Information der Nutzer über Entsorgungsmöglichkeiten sowie den strukturellen Aufbau zur Sammlung, Sortierung und Verwertung der Produkte.⁴

Dieser kulturelle und gesetzliche Wandel hatten zur Folge, dass ab den 1980er Jahren zahlreiche Verfahren im Bereich des Kunststoffrecyclings entwickelt und industriell umgesetzt wurden.⁵ Mittlerweile ist vor allem das werkstoffliche Recycling von Kunststoffen nicht mehr aus Produktionsbetrieben wegzudenken und wird dort neben ökologischen Aspekten vor allem auf Grund ökonomischer Gesichtspunkte betrieben.⁶

¹ Vgl. Colman, B. (2013), S. 11 ff.

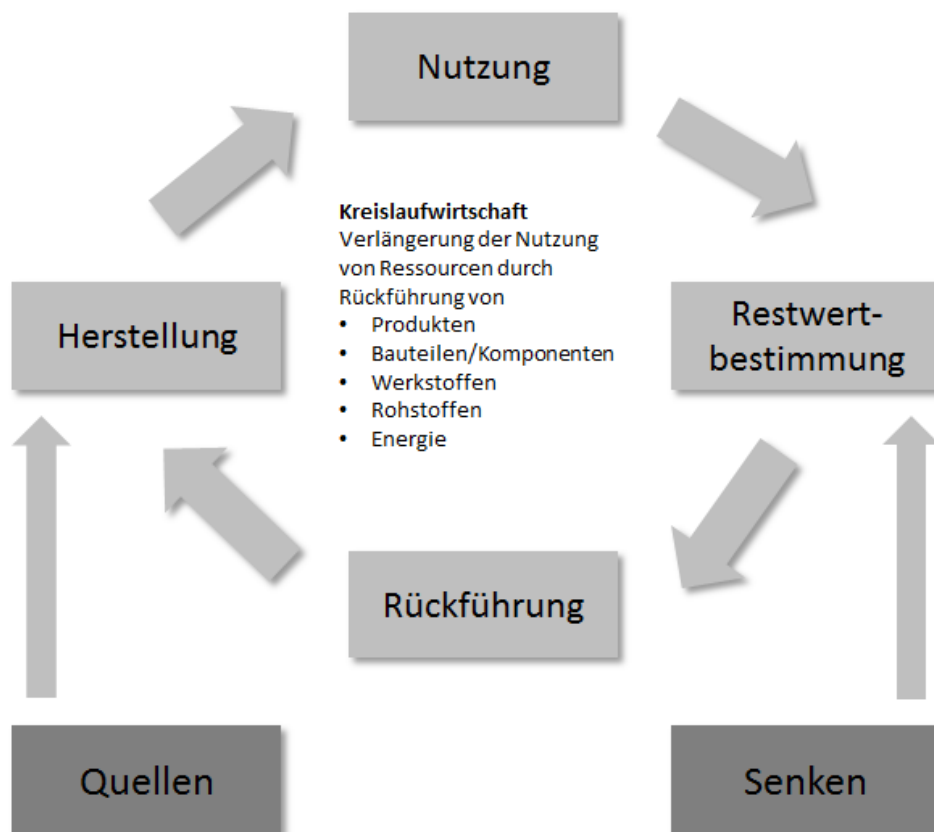
² Vgl. WCED (1987).

³ Vgl. Zvezdov, D.; Schaltegger, S. (2012), S. 276.

⁴ Vgl. Woidasky, J. (2008), S.610.

⁵ Vgl. Woidasky, J. (2008), S.610.

⁶ Vgl. Guiton, P. et al. (2008), S.852 ff.

Abbildung 1: Grundprinzip der Kreislaufwirtschaft⁷

1.1 Ausgangssituation und Problemstellung

Das werkstoffliche Recycling der Firma Hirschmann Automotive GmbH beschränkt sich am Standort Rankweil (Österreich) auf Produktionsabfälle (Kuppelprodukte) aus thermoplastischen Kunststoffen, die bei einem bestimmten Verarbeitungsverfahren (Spritzgießen) anfallen. Der betroffene Maschinenpark besteht gänzlich aus vollautomatischen Horizontalspritzgussmaschinen. Typischerweise werden Mehrfachheißkanalwerkzeuge (4-fach, 8-fach, 16-fach) in der Produktion eingesetzt, wobei die Kavitäten über Kaltkanalunterverteiler (Angüsse) miteinander verbunden sind. Der Anschnitt wird meist als Tunnelanguss ausgeführt, sodass es beim Entformungsvorgang zu einer automatischen Abtrennung zwischen Bauteil und Anguss kommt. Mit Hilfe einer Separiertrommel werden danach die Produkte und Angüsse (Kuppelprodukte) auch räumlich voneinander getrennt. Um Transportvolumen einzusparen, werden die Angüsse anschließend mit Hilfe einer Schredderanlage zerkleinert und typenrein in Oktabins gesammelt. Ein Teil der Produktionsabfälle wird an lokale Recyclingunternehmen verkauft oder von diesen kostenlos entsorgt. Der überwiegende Anteil wird jedoch zu einem Lohnrecyclingunternehmen nach Deutschland geschickt. Dieses übernimmt für alle Standorte, die zu Hirschmann

⁷ Quelle: Woidasky, J. (2008), S.611.

Europa zählen (siehe Kapitel 4.1), das werkstoffliche Recycling bestimmter Materialtypen (Polyamid 6 mit 30 % Glasfasern und Polyamid 6.6 mit 25 % Glasfasern). Die vorgeschredderten Angüsse werden dort gemahlen und anschließend mit Hilfe einer Extruderanlage unter Zusatz von Additiven (hauptsächlich Pigmente) zu „Regenerat“ aufbereitet. Das gesamte aufbereitete Regenerat wird in Oktabinform an den Standort Rankweil ausgeliefert und von dort entsprechend dem Bedarf der jeweiligen Standorte wieder verteilt. In der Produktion darf dieser Sekundärrohstoff nur in einem (vom Kunden) definierten prozentualen Verhältnis zur Neuware wieder eingesetzt werden. Durch diesen eben beschriebenen Prozess fallen hohe laufende Kosten an, die bis zu diesem Zeitpunkt (vor Erstellung dieser Masterarbeit) keiner exakten Prüfung unterzogen wurden. Im Sinne einer kontinuierlichen Verbesserung müssen Prozesse ständig hinterfragt und auf Optimierungspotential untersucht werden. Dafür müssen allerdings entsprechende Daten vorliegen, auf deren Basis Alternativkonzepte miteinander verglichen werden können. Mit dieser Masterarbeit soll erstmals ein transparentes, auf Daten basierendes, Bild über das werkstoffliche Recycling am Standort Rankweil geschaffen werden. Zusätzlich sind mögliche Alternativkonzepte zum aktuellen Prozess zu erarbeiten nach ökonomischen und technischen Gesichtspunkten zu bewerten.

1.2 Zielsetzung und Forschungsfrage

Ziel dieser Masterarbeit ist es, Alternativen (innerbetriebliche Lösungen) zum bestehenden extern ausgelagerten Recyclingprozess zu finden. Das Aufgabengebiet dieser Masterarbeit beschränkt sich dabei auf die Analyse des Standorts Rankweil und jenen Materialgruppen, die aktuell an diesem Standort aufbereitet werden. Dazu soll der Ist-Zustand genau erhoben und eine auf Daten basierende Ausgangsbasis geschaffen werden, um Alternativkonzepte vergleichen und bewerten zu können. Es sind Konzeptvorschläge nach dem aktuellen Stand der Technik auszuarbeiten, welche weder die hergestellten Produkte noch die Prozessfähigkeit einschränken oder negativ beeinflussen dürfen. Diese Konzepte sind hinsichtlich ihrer (technischen) Risiken und ihrer Wirtschaftlichkeit zu bewerten. Dadurch soll dem Management der Firma Hirschmann Automotive GmbH die nötige Entscheidungsgrundlage für die Auswahl eines idealen Konzeptes am Standort Rankweil geliefert werden.

1.3 Methodische Vorgehensweise

Auf Basis einer Literatur- bzw. Internetrecherche wurden innerbetriebliche Recyclingkonzepte, die dem aktuellen Stand der Technik entsprechen, erarbeitet. Danach wurde eine umfassende Analyse der Ausgangssituation vor Ort (Rankweil) durchgeführt. Dabei wurden alle Prozessschritte samt notwendigen Tätigkeiten, die mit dem aktuellen Aufbereitungsprozess in Verbindung stehen, erfasst. Somit konnte über Personalkosten, Energiekosten, Raumkosten, Wartungs- und Instandhaltungskosten, Transportkosten, Lagerkosten sowie Dienstleistungskosten (externe Aufbereitung) eine Basis für einen objektiven Vergleich mit Alternativkonzepten geschaffen werden. In

weiterer Folge wurden die Alternativkonzepte gemeinsam mit den entsprechenden Anlagenherstellern im Detail ausgearbeitet. In dieser Phase mussten neben technischen Fragestellungen, welche von der Machbarkeit bis zur benötigten Anlagenkonfigurationen reichten, insbesondere allfällige Einflüsse auf Produkte und Prozesse evaluiert werden. Anschließend wurden Angebote für die ausgearbeiteten Gesamtkonzepte eingeholt, um die Anschaffungsauszahlungen, die laufenden Auszahlungen sowie die Nutzungsdauer jedes Konzepts abschätzen zu können. Auf dieser Basis wurden dynamische Investitionsrechnungen durchgeführt, um Aussagen zur relativen Vorteilhaftigkeit der jeweiligen Investitionsalternativen treffen zu können. Als Referenz zur Bewertung diente dabei stets der externe Bezug des Sekundärrohstoffes (Ausgangssituation). Neben wirtschaftlichen Zielgrößen wie Kapitalwert, interner Zinssatz oder Amortisationsdauer wurden auch technische Risiken, die mit dem jeweiligen Investitionsvorhaben in Verbindung stehen, erhoben und analysiert.

1.4 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Masterarbeit kann in drei Hauptbereiche gegliedert werden. In den Kapiteln 2 und 3 werden für diese Arbeit relevante Grundlagen aufgearbeitet und diskutiert. Aus dem technischen Wissenschaftsbereich wird zunächst eine kurze Einführung in die Kunststofftechnik gegeben. Der Schwerpunkt liegt in diesem Abschnitt auf dem Recycling von thermoplastischen Kunststoffen mit besonderem Fokus auf die innerbetriebliche Aufbereitung von Produktionsabfällen. Im Anschluss daran werden jene Anlagen, die bei der Konzeption in der praktischen Fallstudie verwendet wurden, näher vorgestellt und nach technischen und ökonomischen Gesichtspunkten vorab bewertet. Der zweite Grundlagenabschnitt kann dem Wissenschaftsbereich der Betriebswirtschaften zugeordnet werden. Hier liegt der Schwerpunkt auf Investitionen mit besonderem Fokus auf den dynamischen Investitionsrechnungen. Diese Form der Wirtschaftlichkeitsrechnung wurde zur ökonomischen Bewertung aller Konzepte in der praktischen Fallstudie verwendet.

Der quantitativ größte Bereich wird durch die praktische Fallstudie in Kapitel 4 abgedeckt. Nach der Beschreibung der Ausgangssituation werden hier alle vier ausgearbeiteten, innerbetrieblichen Alternativlösungen vorgestellt. Neben einer wirtschaftlichen Bewertung werden alle Investitionsvorhaben hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf Produkte und Prozesse überprüft und daraus mögliche Risiken abgeleitet. Abschließend werden für zwei favorisierte Konzepte die Einflüsse ausgewählter Eingangsgrößen (Anschaffungsauszahlungen, Materialstrom, etc.) auf ökonomische Zielgrößen (Kapitalwert, interner Zinssatz, Amortisationsdauer) mit Hilfe von Sensitivitätsanalysen ermittelt.

2 Technische Grundlagen

In den technischen Grundlagen wird zunächst auf Basisgrundlagen aus dem Gebiet der Kunststofftechnik eingegangen, da vom Leser derartige Kenntnisse nicht vorausgesetzt werden können. Hierbei werden ausschließlich jene Themenstellungen behandelt, welche für diese Masterarbeit von unmittelbarer Relevanz sind. Anschließend wird ein Überblick über das Themengebiet Kunststoffrecycling gegeben. Dabei liegt der Schwerpunkt vor allem auf dem werkstofflichen Recycling von thermoplastischen Kunststoffen. Abschließend werden Anlagen, die zur Aufbereitung von Kunststoffen benötigt werden, näher beschrieben.

2.1 Einführung in die Kunststofftechnik

Polymere Werkstoffe bestehen chemisch betrachtet aus Makromolekülen, welche ihrerseits wiederum aus sich wiederholenden Struktureinheiten (Repetiereinheiten) aufgebaut sind. Makromoleküle entstehen durch chemischer Verbindung (Hauptvalenzbindung) niedermolekularer Ausgangsstoffe (Monomere) zu einem Molekül.⁸

Die Einteilung polymerer Werkstoffe ist in der Literatur abhängig vom Autor und dem angewandten Klassifizierungsschema. So kann beispielsweise eine Unterteilung in natürliche und synthetische Polymere oder eine Gruppierung auf Grund des mechanischen Verhaltens vorgenommen werden. Selbst innerhalb eines Schemas herrscht oftmals keine Einigkeit, da Elastomere und Duromere als eigenständige oder als gemeinsame Gruppe (vernetzende Kunststoffe) klassifiziert werden können. In dieser Masterarbeit wird jene Einteilung, wie sie in Abbildung 2 grafisch gezeigt wird, vorgenommen.⁹

Grundsätzlich wird bei polymeren Werkstoffen zwischen thermoplastischen und vernetzenden Kunststoffen differenziert. Thermoplastische Kunststoffe können weiter in amorph und teilkristallin unterteilt werden. Amorphe Kunststoffe weisen völlig unregelmäßig verteilte Makromoleküle auf. Sie liegen typischerweise in einer knäuelartigen Struktur vor. Die Verformungsfähigkeit hängt hier neben dem chemischen Aufbau in erster Linie von der Verschlaufungsdichte (physikalische Bindungen zwischen den Makromolekülen) und der temperaturabhängigen Kettenbeweglichkeit ab. Unterhalb der Glasübergangtemperatur (T_G) ist keine Bewegung der Makromoleküle möglich. Amorphe Polymere verhalten sich deshalb in diesem Temperaturbereich extrem spröde, steif und das Verformungsverhalten ist rein energieelastisch. Oberhalb der Glasübergangtemperatur werden die Polymerketten beweglicher und können Relaxationsvorgänge durchführen. Wird die Temperatur weiter erhöht können die Polymerketten aneinander abgleiten (keine physikalischen

⁸ Vgl. Bauer, E. et al. (2007), S. 15.

⁹ Vgl. Frick, A.; Stern, C. (2011), S.2.

Bindungen mehr vorhanden). Ab der Fließtemperatur (T_F) gehen amorphe Polymere also vom Zustand eines Festkörpers in den Zustand eines viskosen Fluids (Schmelze) über. Dieser Vorgang ist reversibel, also beliebig oft wiederholbar. Aus diesem Grund ist werkstoffliches Recycling bei amorphen Polymeren technisch einfach möglich und somit gängige Praxis. Als typische Vertreter sind hier Polycarbonat (PC), Polystyrol (PS) oder Polyvinylchlorid (PVC) zu nennen.¹⁰

Teilkristalline Kunststoffe weisen im Gegensatz dazu Bereiche mit Kettennahordnung (kristalline Gefügestrukturen) auf. Auch sie können reversibel, ab einer bestimmten Temperatur (Schmelzetemperatur T_S), vom Zustand des Festkörpers in den Zustand einer viskosen Schmelze übergehen. Hier sind als wichtigste Vertreter Polyethylen (PE), Polypropylen (PP) oder die Gruppe der Polyamide (PA) zu nennen. Bei Raumtemperatur (liegt typischerweise zwischen T_G und T_F/T_S) weisen sowohl amorphe wie auch teilkristalline Kunststoffe eher sprödes und hartes Materialverhalten auf.¹¹

Bei den vernetzenden Kunststoffen ist dieser reversible Vorgang nicht möglich. Die Makromoleküle sind hier über kovalente (chemische) Bindungen miteinander verknüpft. Je nachdem ob eine engmaschige oder weitmaschige Verbindung vorliegt, wird zwischen Duromere oder Elastomere unterschieden. Hat sich diese chemische Verbindung einmal durch den Vulkanisationsprozess (Elastomer) oder Aushärtprozess (Duromer) gebildet, können diese Polymere nicht mehr in den viskosen, schmelzeförmigen Zustand übergeführt werden. Die Makromoleküle bleiben über die chemischen Bindungen so lang miteinander verbunden bis die Zersetzungstemperatur (T_Z) des Stoffes erreicht wird. Aus diesem Grund können diese Werkstoffe nur bedingt (falls überhaupt) werkstofflich aufbereitet werden. Bei Raumtemperatur verhalten sich Elastomere auf Grund des weitmaschigen Netzwerks gummielastisch und sind bis zu 300% im Verhältnis zur Ausgangslänge dehnbar. Duromere hingegen weisen bei Raumtemperatur wie Thermoplaste ein sprödes, hartes Materialverhalten auf. Als typische Vertreter sind bei den Elastomeren Naturkautschuk (NR) oder Nitril-Butadien-Kautschuk (NBR) und bei den Duromeren Epoxidharze (EP-Harze) oder Polyurethane (PUR) zu nennen.¹²

Thermoplastische Elastomere zeigen bei Raumtemperatur ein ähnliches Materialverhalten wie Elastomere (gummielastisch). Sie bestehen jedoch (zum Großteil) aus unvernetzten Makromolekülen und können aus diesem Grund durch Wärmezufuhr plastisch verformt werden. Sie sind typischerweise aus Hart- und Weichsegmenten aufgebaut. Durch das jeweilige Verhältnis bezogen auf die Gesamtlänge können die Materialeigenschaften (wie z.B.: Härte) eingestellt werden.¹³

¹⁰ Vgl. Frick, A.; Stern, C. (2011), S.3 f.

¹¹ Vgl. Frick, A.; Stern, C. (2011), S.3 ff.

¹² Vgl. Frick, A.; Stern, C. (2011), S.2.

¹³ Vgl. Frick, A.; Stern, C. (2011), S.5.

Polymere (Kunststoffe)				
	Thermoplaste	thermoplastische Elastomere	Elastomere	Duroplaste
Molekülstruktur	<p>Makromolekül unvernetzt amorph teilkristallin</p>	<p>unvernetzt</p>	<p>chemische Bindung weitmaschig vernetzt</p>	<p>engmaschig vernetzt</p>
Festkörpercharakteristik bei Raumtemperatur	spröde bis zähhart	gummielastisch	gummielastisch	spröde, hart
Temperaturcharakteristik	schmelzbar Kristallschmelztemperatur vorhanden	schmelzbar Kristallschmelztemperatur teilweise vorhanden	nicht schmelzbar	nicht schmelzbar
chemische / physikalische Charakteristik	löslich	löslich	quellbar, nicht löslich	schwer quellbar, nicht löslich

Abbildung 2: Einteilung polymerer Werkstoffe¹⁴

Die in dieser Masterarbeit für die Aufbereitung relevanten Materialien (siehe Kapitel 4.2) können allesamt zur Gruppe der Polyamide gezählt werden. Somit handelt es sich dabei ausschließlich um synthetisch hergestellte, teilkristalline, thermoplastische Kunststoffe. Ihr hygroskopisches Verhalten (neigen zur Wasseraufnahme) hatte großen Einfluss auf die Gestaltung der Recyclingkonzepte. Deshalb werden an dieser Stelle Polyamide hinsichtlich ihres chemischen Aufbaus und ihrer charakteristischen Eigenschaften kurz beschrieben.

Polyamide (wie Polyamid 6) können aus nur einem Ausgangsstoff (ϵ -Caprolactam) aufgebaut sein. Die Strukturformel derartiger aliphatischer Polyamide kann aus Abbildung 3 entnommen werden. Jene Polyamide werden durch die Anzahl der C-Atome im Baustein charakterisiert. Polyamid 6 besitzt also exakt 6 C-Atome in seinem Grundbaustein.¹⁵

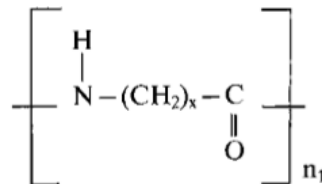


Abbildung 3: Strukturformel für PA 6 ($x=5$)¹⁶

Andere Polyamide bestehen aus zwei Ausgangsstoffen (Diamin + Säure), die durch Polykondensation einen Grundbaustein bilden. Sie werden ebenfalls durch die Anzahl der C-Atome dieser beider Ausgangsstoffe charakterisiert und gekennzeichnet. Zuerst

¹⁴ Quelle: Frick, A.; Stern, C. (2011), S.2.

¹⁵ Vgl. Hellerich, W. et al. (2010), S.133.

¹⁶ Quelle: Hellerich, W. et al. (2010), S.133.

wird hier die Zahl der C-Atome des Diamins, danach die Zahl der C-Atome der Säurekomponente genannt. Der bekannteste und wichtigste Vertreter ist hier Polyamid 66 (PA 66).¹⁷

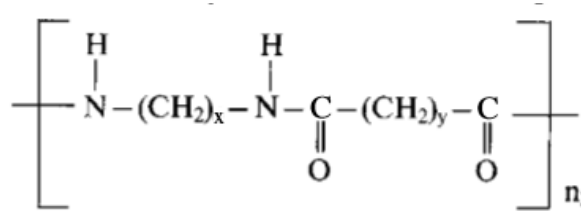


Abbildung 4: Strukturformel für PA 66 (x=6, y=4)¹⁸

Beide Polyamidtypen weisen stark polare CONH-Gruppen auf. Diese haben die Ausbildung von Wasserstoffbrückenbindungen zwischen den Makromolekülen zur Folge. Dieser Werkstoff besitzt im Vergleich zu anderen thermoplastischen Kunststoffen also zusätzliche Nebervalenzbindungskräfte. Diese sind für die charakteristische Zähigkeit, Temperaturformbeständigkeit und den vergleichsweise hohen E-Modul verantwortlich. Dieser chemische Aufbau hat allerdings auch noch eine weitere charakteristische Eigenschaft zur Folge: Polyamide neigen stark zur Wasseraufnahme (hygroskopisches Verhalten). Die mechanischen Eigenschaften sind in jenem Maß vom Wasseranteil im Werkstoff abhängig, dass in den Datenblättern Eigenschaften sowohl für den trockenen als auch für den feuchten Zustand angegeben werden. Um einen hydrolytischen Abbau bei der Verarbeitung zu vermeiden, müssen Polyamide vor der Verarbeitung getrocknet und somit auf ein definiertes Feuchtigkeitslevel gebracht werden. Typische Einsatzgebiete von Polyamiden sind technische Teile wie Zahnräder, Gehäuse oder Fittinge. Um die hohen (mechanischen) Anforderungen solcher Produkte erfüllen zu können werden typischerweise Glasfasern bis zu 50% als Verstärkungstoffe beigemischt.¹⁹

Als Spezialfall der Polyamide sind abschließend Polyphthalamide (PPA) zu nennen. Diese teilaromatisierten Polyamide sind sowohl preislich als auch hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften über Standardpolyamide zu stellen. Die Feuchteaufnahme von PPA ist im Vergleich zu Polyamid 6(6) deutlich geringer. Dennoch müssen auch diese Kunststoffe vor der Verarbeitung getrocknet werden. Dieser Werkstoff eignet sich für dauerhafte Einsatztemperaturen bis zu 140°C und besitzt hohe Festigkeiten und Steifigkeiten. PPA wird fast ausschließlich mit Verstärkungstoffen (Glasfaseranteil bis 65%) eingesetzt.²⁰

2.2 Recycling von Kunststoffen

In der Kunststofftechnik nimmt „Recycling“ (also das Rückführen von Stoffen in größeren und kleineren Kreisläufen) aus ökologischer Sicht nicht zuletzt deshalb eine entscheidende Rolle ein, da als materialeitige Inputfaktoren in Herstellprozessen

¹⁷ Vgl. Hellerich, W. et al. (2010), S.133 f.

¹⁸ Quelle: Hellerich, W. et al. (2010), S.134.

¹⁹ Vgl. Hellerich, W. et al. (2010), S.133 ff.

²⁰ Vgl. Hellerich, W. et al. (2010), S.171 ff.

typischerweise nicht regenerierbare Rohstoffe verwendet werden (betrifft alle synthetischen Kunststoffe). Zusätzlich fallen auf der Outputseite bei nahezu allen Produktionsprozessen Kuppelprodukte (Nebenprodukte) an, die selbst bei modernen Verfahren wie dem Spritzgießen zwischen 10% und 50% des Outputs betragen können. Diese teils gewaltigen Mengen an Sekundärrohstoff bieten auch aus rein ökonomischer Sicht großes Potential und können für ein Produktionsunternehmen bei intelligenter Nutzung bestehender Recyclingtechnologien durchaus zum Erfolgsfaktor werden.²¹

Sekundärrohstoffe können nach unterschiedlichsten Kriterien klassifiziert werden. Mögliche Unterscheidungspunkte sind nach Pitz:²²

Herkunft des Sekundärrohstoffs:

- Produktionsprozess (Post Industrial)
- Konsumprozess (Post Consumer)

Wiedereinsatz:

- Im Ursprungsprozess
- In einem anderen Prozess

Ort des Wiedereinsatzes:

- Im selben Unternehmen
- In einem anderen Unternehmen

Anzahl der aufbereitenden Unternehmen:

- Ein Unternehmen
- Mehrere Unternehmen

Erforderlichkeit von Aufbereitungsaktivitäten:

- Aufbereitung notwendig (Materialrecycling)
- Keine Aufbereitung notwendig (Produktrecycling)

Umfang der Aufbereitung des Sekundärrohstoffs:

- Wiedereinsatz des Recyclingguts als Ganzes
- Wiedereinsatz von Bauteilen des Recyclingguts
- Wiedereinsatz von Einzelteilen des Recyclingguts

Physikalische Beschaffenheit des Sekundärrohstoffs:

- Stofflich
- Energetisch

Ein wichtiges Unterscheidungsmerkmal betrifft die Notwendigkeit von Aufbereitungsmaßnahmen. Falls jene nicht durchgeführt und somit die Produktgestalt beibehalten wird, spricht man von Produktrecycling (= Wieder-, bzw. Weiterverwendung). Als Beispiel aus der Kunststofftechnik soll hier die bekannte PET-Flasche dienen. Wird sie für denselben Verwendungszweck wieder eingesetzt (Trinkflasche) ist das ein typisches Beispiel für Wiederverwendung. Wird sie allerdings für einen anderen Verwendungszweck (z.B.: als Blumenvase) benutzt, spricht man von Weiterverwendung.²³

²¹ Vgl. Pitz, T. (2000), S. 5 ff.

²² Vgl. Pitz, T. (2000), S. 8 f.

²³ Vgl. Hellerich, W. et al. (2010), S.54.

Sobald das Recyclinggut allerdings einer Form der Aufbereitung ausgesetzt war, ändert sich die sprachliche Diktion in Wieder-, bzw. Weiterverwertung (= Materialrecycling). Hier wird unterschieden, ob der aufbereitete Stoff dem Ursprungsprozess (Wiederverwertung) oder einem Prozess zur Herstellung von minderwertigen Produkten (Weiterverwertung) zugeführt wird.

Ein ebenfalls wichtiges Unterscheidungsmerkmal betrifft die Herkunft der Abfälle. Während Produktionsabfälle typischerweise sortenrein und unverschmutzt gesammelt werden können, ist das bei Konsumabfällen aus Kunststoffen nahezu unmöglich. Dies hat zur Folge, dass (werkstoffliches) Recycling für Konsumabfälle deutlich aufwendiger wird. Es müssen zeitraubende, dem eigentlichen Aufbereitungsprozess vorgelagerte, Tätigkeiten durchgeführt werden (trennen, waschen, sortieren, etc.). Trotz dieses Mehraufwands kann der gewonnene Sekundärrohstoff aus Konsumabfällen oft nur bei minderwertigen Produkten eingesetzt werden (Weiterverwertung). Die eben genannten Gründe führen dazu, dass Konsumabfälle aus Kunststoff oftmals energetisch verwertet werden (Verbrennung).²⁴

Als letztes Unterscheidungsmerkmal wird an dieser Stelle die physikalische Beschaffenheit des, aus dem Aufbereitungsprozess gewonnenen, Sekundärrohstoffes näher diskutiert. Dieses Merkmal erlaubt folgende Differenzierung:

- Werkstoffliches Recycling
- Chemisches (rohstoffliches) Recycling
- Energetische Verwertung

Beim werkstofflichen Recycling wird das Kunststoffrecyclinggut für eine zweite Verarbeitung aufbereitet und eventuell durch die Beimengung von Zusatzstoffen veredelt. Als wichtigste Prämisse gilt, dass die Makromoleküle während des Aufbereitungsprozesses nicht zu stark geschädigt werden dürfen. Es werden ausschließlich physikalische Behandlungen wie mahlen, aufschmelzen, filtern, compoundieren oder granulieren eingesetzt, um den Sekundärrohstoff zu gewinnen. Eine derartige Aufbereitung macht ausschließlich für jene Recyclinggüter Sinn, welche nicht schon in ihrem ersten Verarbeitungsprozess zu stark geschädigt wurden. Jene Kunststoffabfälle können nur noch in ihre chemischen Ausgangsstoffe (Monomere) zerlegt werden (=chemisches Recycling). Die so gewonnenen Acryl-, Ester- oder Amidgruppen werden entweder für eine erneuerte Polymerisation oder andere chemische Synthesen genutzt. Hier ist allerdings festzuhalten, dass sich diese aufwendigen Verfahren nur in den seltensten Fällen wirtschaftlich rechnen. Als Alternative bleibt dann nur mehr die Möglichkeit der energetischen Verwertung. Hier wird der Energiegehalt der Kunststoffe zur Energierückgewinnung durch Verbrennung genutzt.²⁵

²⁴ Vgl. Ehrenstein, G.W.; Kuhmann, K. (1993), S.1.7 ff.

²⁵ Vgl. Hellerich, W. et al. (2010), S.54.

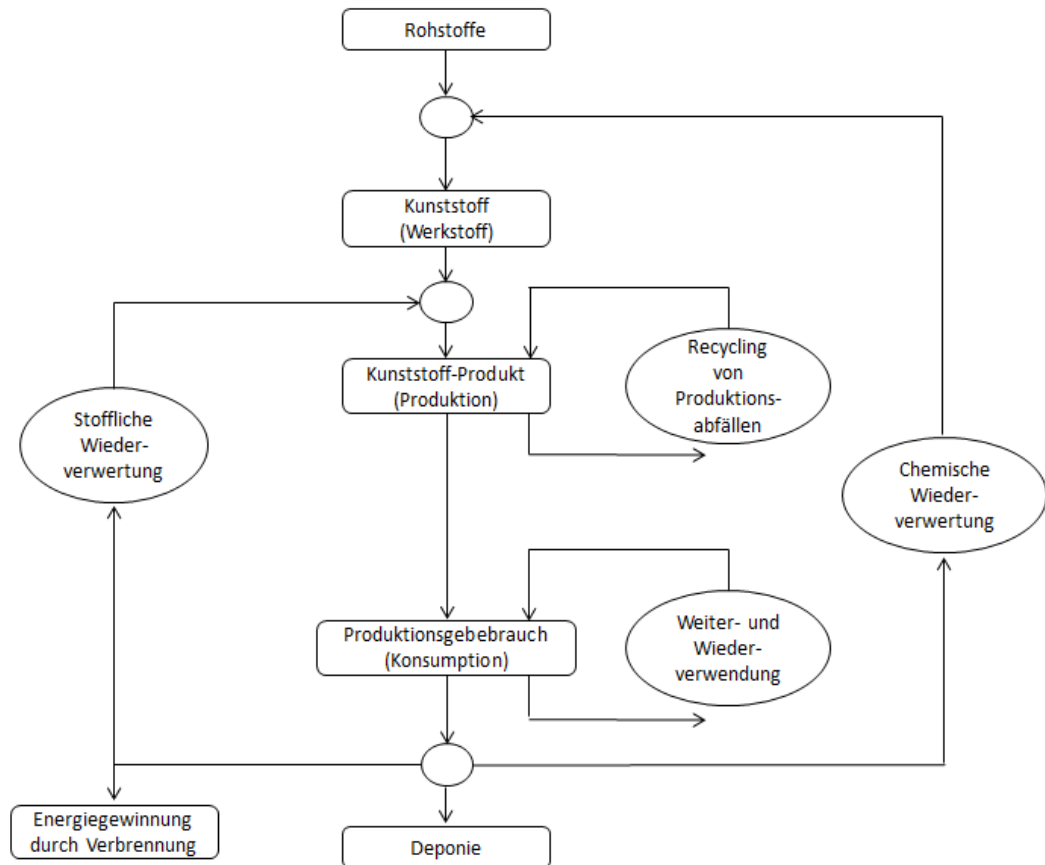


Abbildung 5: Grafische Darstellung möglicher Recyclingkreisläufe für Kunststoffabfälle²⁶

Im folgenden Abschnitt werden werkstoffliches und chemisches Recycling von Kunststoffen sowie die energetische Verwertung ausführlich beschrieben. Ein besonderer Fokus gilt dem werkstofflichen Recycling von Produktionsabfällen.

- **Werkstoffliches Kunststoffrecycling:**

Wie Abbildung 5 zeigt, muss beim werkstofflichen Recycling von Kunststoffen hinsichtlich der Abfallherkunft unterschieden werden. Typischerweise gestaltet sich das werkstoffliche Recycling von Konsumabfällen aufwendig, da das Material in der Regel vermisch und verunreinigt vorliegt. Eine Weiterverwertung (Einsatz bei Formteilen ohne hohe Qualitätsanforderungen) kann zwar technisch realisiert werden, ist aber oft wirtschaftlich unrentabel. In wenigen Fällen (PET-Flaschen, PVC-Profile) ist eine sortenreine Sammlung von Konsumabfällen aus Kunststoff und folge dessen auch eine Wiederverwertung möglich.²⁷

Das Recycling von Produktionsabfällen ist hingegen in der kunststoffverarbeitenden Industrie seit Jahren Stand der Technik und wird selbst bei jenen Produkten erfolgreich umgesetzt, die ein hohes (technisches) Anforderungsprofil im Einsatz erfüllen

²⁶ Quelle: Michaeli, W. et al. (1993), S. 112.

²⁷ Vgl. Hellerich, W. et al. (2010), S.55.

müssen.²⁸ Es werden Kuppelprodukte, die bei bestimmten Herstellprozessen anfallen, (Angüsse eines Spritzteils, Randbeschnitt von Folien, etc.) aufbereitet und anschließend in den Produktionsprozess, durch teilweiser Substitution des Originalmaterials, rückgeführt. Hier ist zu beachten, dass diese Form der Aufbereitung nur für jene Abfälle erlaubt ist, welche aus einem definierten, stabilen Prozess stammen. Ausnahmesituationen (Anlauf, Pausen, Defekte, Prozessschwankungen, etc.) führen in der Regel zu einem undefinierten Werkstoffzustand. Vor allem längere Verweilzeiten und Temperaturerhöhungen können zu einer Schädigung der Makromoleküle führen, was wiederum einen negativen Einfluss auf unterschiedlichste Eigenschaften haben kann. Aus diesem Grund ist es vorteilhaft Produktionsabfälle, welche nicht aus stabilen Prozessen stammen, generell zu entsorgen.²⁹

Selbst bei idealer Prozessführung wird das Material durch die Verarbeitung und die nachfolgende Aufbereitung geschädigt. Außerdem ist zu bedenken, dass der Einsatz von z.B.: 25% Rezyklat bedingt, dass zu einem bestimmten Prozentsatz Anteile im produzierten Formteil enthalten sind, die bereits dreimal, viermal und öfter diesen Kreislauf durchlaufen haben. Mit jedem Verarbeitungszyklus wird das Material stärker geschädigt. Neben Makromoleküle werden Glasfasern (falls vorhanden) verkürzt und Additive wie Stabilisatoren oder Flammschutzmittel abgebaut.³⁰

Diese Risiken müssen beim Einsatz von Rezyklat in der Produktion berücksichtigt werden, zumal sie, abhängig von der betrachteten Materialgruppe, unterschiedlich starken Einfluss auf die Produkteigenschaften haben können. Abbildung 6 zeigt, dass sich selbst innerhalb derselben Materialgruppe (Polyamid 6 mit 30% Glasfaseranteil), unterschiedliche Rezyklateigenschaften, in Abhängigkeit vom Aufbereitungsprozess, ergeben können. In der von Guiton et al. durchgeführten Studie³¹ wurde ein herkömmliches PA 6 GF30-Rezyklat (Standardrezyklat) gegen ein sortenrein gesammeltes und in-house aufbereitetes Rezyklat desselben Materialtyps (Rezyklat-Saugmodul) und dem Originalmaterial (Primärrohstoff) hinsichtlich ihrer mechanischen Eigenschaften getestet. Dabei weist das Standardrezyklat vom Sekundärmarkt signifikant schlechtere mechanische Eigenschaften als das Originalmaterial oder das in-house aufbereitete Rezyklat auf. Bei der Schlagzähigkeit beträgt der Abfall im Vergleich zum Primärrohstoff bereits nach einmaliger Aufbereitung über 30%. Dies zeigt einerseits den Einfluss des Aufbereitungsprozesses auf die nachfolgenden Materialeigenschaften, andererseits das generelle technische Risiko beim Einsatz von Rezyklat auf. Es ist also nicht anzunehmen, dass eine Umstellung im Aufbereitungsprozess ohne Auswirkungen auf die Materialeigenschaften bleibt. Abschließend ist zu erwähnen, dass viele Produkte im Einsatz keiner großen mechanischen Belastung ausgesetzt sind und deshalb die hier gezeigten Eigenschaftsverluste völlig unkritisch zu sehen sind. Sollte ein Produkt mechanischen Belastungen ausgesetzt sein, kann durch Veränderung der Geometrie

²⁸ Vgl. Guiton, P. et al. (2008), S.852 ff.

²⁹ Vgl. Hellerich, W. et al. (2010), S.55.

³⁰ Vgl. Hellerich, W. et al. (2010), S.57 f.

³¹ Vgl. Guiton, P. et al. (2008), S.852 ff.

(recyclinggerechte Konstruktion) den Eigenschaftsveränderungen Rechnung getragen werden.³²

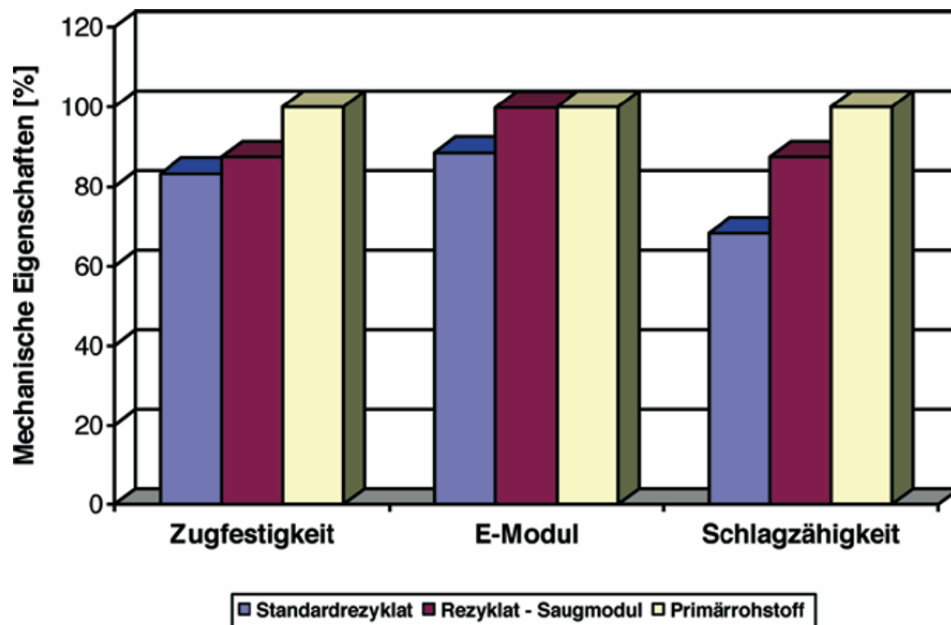


Abbildung 6: Vergleich mechanischer Eigenschaften zwischen zwei PA 6 GF30-Rezyklate mit dem Originalmaterial³³

Eine Studie von Uske zu dieser Thematik³⁴, zeigt den Einfluss unterschiedlicher prozentualer Rezyklatanteile auf die finalen Produkteigenschaften auf. Dabei wurde ebenfalls Polyamid 6 (allerdings ohne Glasfaseranteil) untersucht. Abbildung 7 zeigt, dass selbst eine Beimengung von 25% Mahlgut (zum Originalmaterial) keinen signifikanten Einfluss auf den E-Modul der untersuchten Prüfkörper hat. Es konnte jedoch eine leichte Abnahme der Streckspannung und ein deutlicher Rückgang der Streckdehnung mit zunehmendem Mahlgutanteil festgestellt werden. Neben dem Aufbereitungsprozess und der Materialtype hat demzufolge auch der Rezyklatanteil einen signifikanten Einfluss auf die Eigenschaften der produzierten Formteile. Die Frage, bis zu welchem Prozentsatz die Beimengung von Rezyklat noch vertretbar ist, kann unmöglich generell beantwortet werden. Jeder Produktionsbetrieb muss auf Grund jener Anforderungen, welche die herzustellenden Produkte im Einsatz zu erfüllen haben, seine Grenzen selbst festlegen.³⁵

In manchen Literaturstellen wird dennoch ein Rezyklatanteil von 30% angegeben, bis zu welchen von nahezu keinem Eigenschaftsverlust ausgegangen werden darf.³⁶

Diese Behauptung kann durch Abbildung 7 sofort widerlegt werden und sollte keinesfalls unkritisch übernommen werden.

³² Vgl. Guiton, P. et al. (2008), S.852 ff.

³³ Quelle: Guiton, P. et al. (2008), S.857.

³⁴ Vgl. Uske, K. (2002), S. 61 f.

³⁵ Vgl. Uske, K. (2002), S. 61 f.

³⁶ Vgl. Woidasky, J. (2008), S.611.

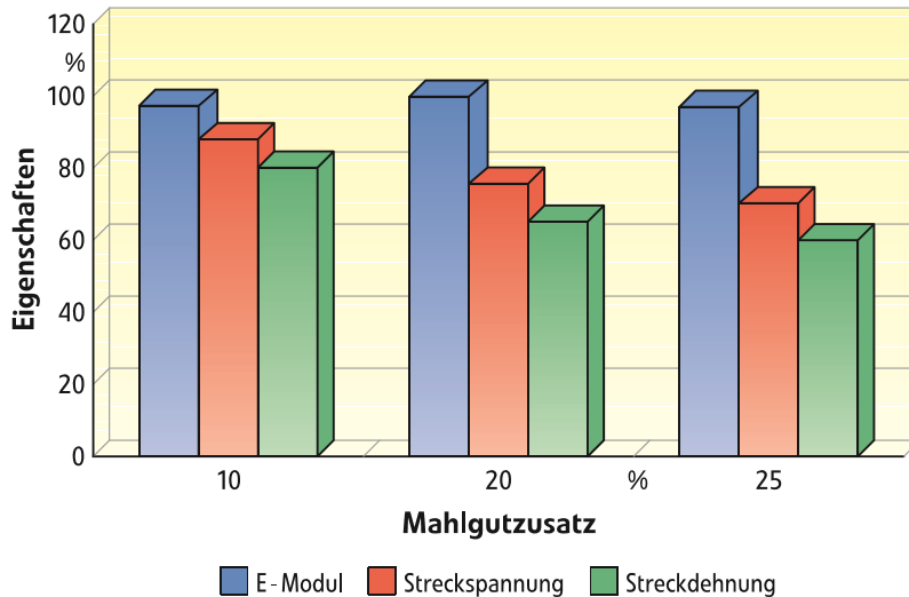


Abbildung 7: Mechanische Eigenschaften eines PA 6-Typs mit 10, 20 und 25% Mahlgutzusatz³⁷

An dieser Stelle werden mit Tabelle 1 die wichtigsten Begrifflichkeiten im Zusammenhang mit werkstofflichen Kunststoffrecycling definiert und nachfolgend ausführlich beschrieben. Als Überbegriff für aufbereiteten Kunststoff wird in der Literatur Rezyklat verwendet. Dieser Begriff umfasst Mahlgut, Regranulat und Regenerat. Mahlgut wird in der Regel an Schneidemühlen hergestellt. Die Produktionsabfälle werden im Mahlraum der Mühle durch rotierende Messer so lange zerkleinert, bis sie durch ein Sieb definierter Größe (4 - 8 mm) passen. Die Korngröße ist unregelmäßig, da Teilchen von zylindrischer Form und geringem Durchmesser (< 4 mm) oft ohne Zerkleinerung durch dieses Sieb durchrutschen können. Diese Teilchen werden auch „Stippen“ genannt. Es gibt bereits technische Lösungen dieser Problematik entgegenzuwirken (z.B.: schräggebohrte Siebe), eine ideal regelmäßige Korngröße kann dennoch nicht erreicht werden. Diesen Mühlen kann eine Entstaubungsanlage nachfolgen, die den Staubanteil im Mahlgut verringern aber nicht gänzlich verhindern kann. Diese beiden Punkte werden als größte Schwächen von Mahlgut angeführt. Bei Prozessen, wo Staubanteil oder eine unregelmäßige Korngröße zu technischen Problemen führen kann, wird deshalb Regranulat oder Regenerat verwendet. Hier werden die zuvor (z.B.: durch Schneidemühlen) zerkleinerten Produktionsabfälle in einem nachfolgenden Prozessschritt in Extruderanlagen aufgeschmolzen und über Granulieranlagen Regranulat (ohne Zusatz) oder Regenerat (Zusatz von Additiven am Extruder) hergestellt. Diese Rezyklate besitzen eine exakt definierbare Korngröße ohne Staubanteil. Da die diese Form der Aufbereitung deutlich aufwendiger ist, müssen bei der Herstellung von Regranulat bzw. Regenerat deutlich höheren Kosten (verglichen mit Mahlgut) in Kauf genommen werden. Als weiterer Nachteil ist die zusätzliche thermische Belastung (Aufschmelzen) bei der Aufbereitung zu nennen. Diese kann eine Reduktion der Kettenlänge und somit zu einer Reduktion

³⁷ Quelle: Uske, K. (2002), S. 62.

unterschiedlichster Eigenschaften (Zugfestigkeit, E-Modul, etc.) zur Folge haben. Eine exaktere Beschreibung aller Anlagen zur Aufbereitung wird in Kapitel 2.3 gegeben.³⁸

Eine weitere terminologische Unterscheidung wird hinsichtlich der Reinheit der Rezyklate vorgenommen. Der Begriff „typenrein“ wird verwendet, wenn ausschließlich Kunststoffe mit identer Handelsbezeichnung zur Herstellung eines Rezyklates eingesetzt wurden. „Sortenrein“ bedeutet, dass ausschließlich Kunststoffe derselben Materialgruppe (nach ISO 1043 Teil 1) und identem Anteil und Gehalt an Zusatzstoffen (nach ISO 1043 Teil 2 bis 4) gemeinsam aufbereitet wurden. Unterscheiden sich die verwendeten Kunststoffe in ihrem Anteil oder Gehalt an Zusatzstoffen, spricht man von „sortenähnlichem“ Rezyklat. Der Begriff „vermischt“ wird nur dann verwendet, falls Kunststoffe unterschiedlicher Materialgruppen (nach ISO 1043 Teil 1) gemeinsam aufbereitet wurden.³⁹

Tabelle 1: Begriffsbestimmungen im Zusammenhang mit Kunststoffrecycling⁴⁰

Begriff	Definition
Rezyklat	Wiederverwerteter Kunststoff; Sammelbegriff für Mahlgut, Regranulat und Regenerat
Mahlgut	(An Mühlen) zerkleinerter Kunststoff; liegt in Form von rieselfähigen Teilchen mit unregelmäßiger Korngröße und Staubanteil vor
Regranulat	Ohne Zusätze über Extruder aufbereiteter Kunststoff; liegt in Form von rieselfähigen Teilchen mit regelmäßiger Korngröße ohne Staubanteil vor
Regenerat	Mit Zusätzen über Extruder aufbereiteter Kunststoff; liegt in Form von rieselfähigen Teilchen mit regelmäßiger Korngröße ohne Staubanteil vor
Typenrein	Rezyklat stammt ausschließlich aus Kunststoffen mit identer Handelsbezeichnung
Sortenrein	Rezyklat stammt ausschließlich aus Kunststoffen mit identer Bezeichnung nach ISO 1043, Teil 1 ⁴¹ , Teil 2 ⁴² , Teil 3 ⁴³ und Teil 4 ⁴⁴
Sortenähnlich	Rezyklat stammt ausschließlich aus Kunststoffen mit identer Bezeichnung nach ISO 1043 Teil 1 ⁴⁵
Vermischt	Rezyklat stammt aus Kunststoffen mit unterschiedlicher Bezeichnung nach ISO 1043 Teil 1 ⁴⁶
Verträglich	Rezyklat stammt aus Kunststoffen die miteinander zumindest teilverträglich sind
Verunreinigt	Rezyklat enthält Stoffe, welche die Verarbeitung oder den Gebrauch daraus produzierter Teile beeinträchtigen können

³⁸ Vgl. Michaeli, W. et al. (1993), S. 116 f.

³⁹ Vgl. Johannaber, F.; Michaeli, W. (2004), S. 299 f.

⁴⁰ Vgl. Johannaber, F.; Michaeli, W. (2004), S. 299 f.

⁴¹ Vgl. ÖNORM EN ISO 1043-1: 2012-02, Teil 1, S. 1 ff.

⁴² Vgl. ÖNORM EN ISO 1043-2: 2012-02, Teil 2, S. 1 ff.

⁴³ Vgl. ÖNORM EN ISO 1043-3: 2015-09, Teil 3, S. 1 ff.

⁴⁴ Vgl. ÖNORM EN ISO 1043-4: 1999-10, Teil 4, S. 1 ff.

⁴⁵ Vgl. ÖNORM EN ISO 1043-1: 2012-02, Teil 1, S. 1 ff.

⁴⁶ Vgl. ÖNORM EN ISO 1043-1: 2012-02, Teil 1, S. 1 ff.

Als letzter Punkt wird in diesem Abschnitt näher auf mögliche Organisationsformen eingegangen, die Produktionsunternehmen beim werkstofflichen Recycling von Produktionsabfällen aus thermoplastischen Kunststoffen zur Verfügung stehen. Wie Abbildung 8 zeigt kann zwischen innerbetrieblichem und außerbetrieblichem Recycling unterschieden werden. Vor allem größere Unternehmen übernehmen die Aufbereitung ihrer Produktionsabfälle meist selbst (In-house-Recycling). Bei zentraler Organisation werden die Abfälle sortenrein (oder typenrein) gesammelt und an zentralen Mahlstationen (optional mit nachfolgendem Extruder) zu Rezyklat aufbereitet. Der so gewonnene Sekundärrohstoff wird dem Originalmaterial zu einem intern definierten (oder mit Kunden vereinbarten) Prozentanteil beigemischt. Die Sammlung der Produktionsabfälle erfolgt in den wenigsten Fällen automatisiert und wird in der Regel von Produktionsmitarbeitern übernommen. Dies führt für alle Formen des zentral organisierten Recyclings zu einem hohen Risiko hinsichtlich Vermischung und Verschmutzung. Viele Unternehmen versuchen dieser Problematik mit Schulungen, Anweisungen und entsprechenden Maßnahmen („Poka-Yoke“) entgegenzuwirken. Trotz aller Anstrengungen kann das Risiko einer menschlichen Fehlhandlung nie gänzlich ausgeschlossen werden.⁴⁷

Dieser Fakt hat vor allem für Mahlgut zu einem Akzeptanzproblem in der kunststoffverarbeitenden Industrie geführt. Obwohl in zahlreichen Anwendungsfällen der Einsatz von Rezyklat völlig unkritisch zu sehen ist, wird aus Sicherheitsgründen (Produzentenhaftung) der ausschließliche Einsatz von Neuware vorgeschrieben.⁴⁸

Eine Alternative zur zentralen Organisation stellen Beistellmühlen dar. Diese kleinen Mühlen können direkt neben den Produktionsanlagen (z.B.: Spritzgießmaschine) platziert werden. Der Produktionsabfall wird über Förderbänder in den Trichter der Beistellmühle und das dort produzierte Mahlgut über ein Fördergerät wieder direkt in das Dosiergerät der Produktionsanlage geleitet. Dieser kleinstmöglich geschlossene Recyclingkreislauf schließt logistische Risiken völlig aus, da eine sorten-, oder typenreine Sammlung nicht mehr nötig ist. An dieser Stelle sollte nicht unerwähnt bleibt, dass die dezentrale Organisation ebenfalls mit zahlreichen Problemen behaftet sein kann. Im Detail wird darauf im Kapitel 2.3 eingegangen.⁴⁹

Auch kleinere und mittlere Produktionsunternehmen der kunststoffverarbeitenden Industrie haben die ökonomischen und ökologischen Vorteile des werkstofflichen Recyclings von Produktionsabfällen erkannt. Sie besitzen jedoch oft entweder keine Kompetenz bei der Aufbereitung von thermoplastischen Kunststoffen oder verzichten aus Kostengründen auf eine Anschaffung entsprechender Anlagen. Der Aufbereitungsprozess wird extern auf so genannte „Lohnmalerein“ oder „Lohnrecycler“ ausgelagert. Von diesen Unternehmen kann sowohl Rezyklat (Mahlgut, Regranulat oder Regenerat) definierter Qualität bezogen aber auch die Aufbereitung eigener Produktionsabfälle als Dienstleistung zugekauft werden. Das Risiko von Vermischung und Verschmutzung kann bei der außerbetrieblichen Aufbereitung ebenso wenig

⁴⁷ Vgl. Michaeli, W. et al. (1993), S. 116 f.

⁴⁸ Vgl. Hellerich, W. et al. (2010), S.60 f.

⁴⁹ Vgl. Michaeli, W. et al. (1993), S. 116 f.

ausgeschlossen werden. Der Vorteil zum zentralen innerbetrieblichen Recycling ist jedoch, dass in diesem Fall der Lohnrecycler hinsichtlich der Materialqualität haftet.⁵⁰

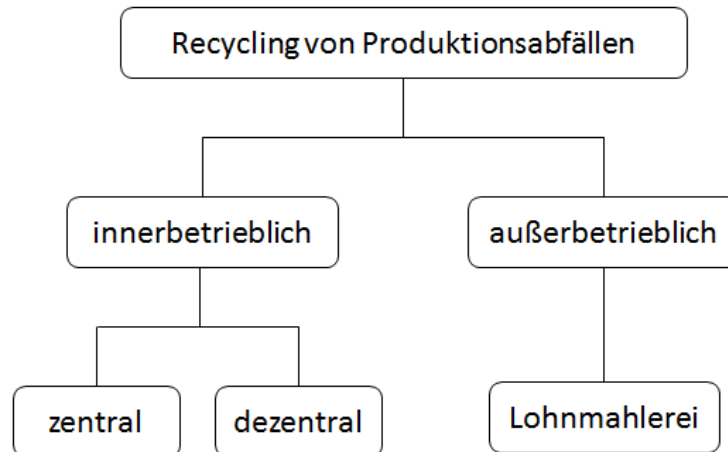


Abbildung 8: Organisationsformen für das Recycling von Produktionsabfällen⁵¹

- **Chemisches (rohstoffliches) Kunststoffrecycling**

In einigen Situationen ist eine werkstoffliche Aufbereitung von Kunststoffabfällen aus technischen Gründen (vernetzende Kunststoffe) gar nicht möglich oder aus wirtschaftlicher Sicht unrentabel. Für diese Anwendungsfälle bietet sich chemisches (rohstoffliches) Recycling an. Hier werden die Makromoleküle der Polymere entweder in Monomere (zur neuerlichen Synthese) oder in niedermolekulare Raffinerieprodukte zerlegt. Im folgenden Abschnitt werden die drei industriell wichtigsten Verfahren des chemischen Kunststoffrecyclings (Solvolyse, Pyrolyse und Hydrierung) kurz beschrieben.⁵²

Ein großer Teil aus der Gruppe der polymeren Werkstoffe wird durch Abspaltung von Wasser bei ihrer chemischen Synthese gebildet (Polyamide, Polyester, Polycarbonate oder Polyoxymethylen). Diese Tatsache bietet die Möglichkeit jene Verbindungsstelle hydrolytisch, alkoholisch sauer oder basisch anzugreifen (= solvolytische Depolymerisation). Durch das entsprechende Reagens (Wasser, Alkohol, etc.) werden die Moleküle bei Druck und hohen Temperaturen in ihre Ausgangsstoffe zerlegt. Bei der Hydrolyse von Polyurethan entsteht beispielsweise Polyol, Kohlendioxid und ein Aminogemisch. Nach einem Reinigungsschritt kann das so gewonnene Polyol als Rohstoff bei der Polyurethanherstellung eingesetzt werden. Ein weiterer Kunststoff, bei dem die Solvolyse industrielle Bedeutung erlangt hat, ist Polyoxymethylen (POM). Die werkstoffliche Aufbereitung dieser Materialgruppe gestaltet sich äußerst schwierig. Einerseits ist POM nicht allzu stabil gegen Mehrfachverarbeitung andererseits kann diese Materialgruppe ausschließlich typenrein aufbereitet werden. Diese Gründe führten dazu, dass vor allem Konsumabfälle aus POM nahezu ausschließlich chemisch

⁵⁰ Vgl. Michaeli, W. et al. (1993), S. 116 f.

⁵¹ Quelle: Michaeli, W. et al. (1993), S. 116.

⁵² Vgl. Hellerich, W. et al. (2010), S.61 ff.

aufbereitet werden. Der zur Synthese benötigte Rohstoff (Trioxan) wird hier durch Depolymerisation in einem sauren Medium gewonnen.⁵³

Die Hydrierung ist hingegen ein technisch aufwendiges Verfahren und deshalb nur in seltenen Fällen aus wirtschaftlicher Sicht rentabel. Die Polymerketten werden bei Verfahrensbedingungen von über 200 bar und Temperaturen jenseits von 400°C in den flüssigen und gasförmigen Zustand übergeführt und gespalten (gecrackt). Die entstehenden reaktiven Bruchstellen werden durch Wasserstoff gesättigt. So können Produkte wie Methan oder Schmierstoffe aus Kunststoffabfällen gewonnen werden. Bei PVC kann auf diese Weise das Chlor-Atom zu HCl hydriert und entfernt werden. Das ermöglicht die Entsorgung stark halogener Kunststoffe.^{54,55}

Bei der Pyrolyse werden Polymere unter Abwesenheit von Luft bzw. Sauerstoff thermisch zersetzt. Die Kohlenwasserstoffketten werden durch Energieeinwirkung in kürzere gesättigte und ungesättigte Ketten geteilt. In Abhängigkeit der Temperatur können unterschiedliche Produkte (Wachse, Öle, Benzin, etc.) gewonnen werden. Als Vorteil gegenüber der Verbrennung kann bei diesem Verfahren eine deutliche Rauchgasreduktion genannt werden. Viele gesundheitsgefährdende Stoffe verbleiben in einem koksartigen Zustand und entweichen nicht (wie bei der Verbrennung) in die Atmosphäre.^{56,57}

- **Energetische Verwertung von Kunststoffen**

Während die Verbrennung zunächst als Messereduktion vor einer nachfolgenden Deponierung Anwendung fand, hat auf Grund der Preissteigerung fossiler Brennstoffe auch die Nutzung des Energiegehalts von Kunststoffabfällen immer stärker an Bedeutung gewonnen. Kunststoffe besitzen, verglichen mit anderen Werkstoffen, einen außergewöhnlich hohen Betrag an gebundener Energie. Dieser kann bis zu 60% jenes Energiebedarfs betragen, der zur Herstellung benötigt wurde. So bieten sich Kunststoffe z.B.: in Heizkraftwerken als Sekundärbrennstoffe an. Hier wird allerdings nur der kalorische Wert des Materials genutzt was diese Alternative aus rein ökologischer Sicht unattraktiv erscheinen lässt. Ein Problem bei der Nutzung von Kunststoff als Sekundär-Brennstoff stellen allerdings halogenhaltige Verbindungen dar (Chlor in PVC). Neben Korrosionsproblemen hat die Verwertung halogenhaltiger Verbindungen in Heizkraftwerken die Notwendigkeit einer Abgasnachbehandlung zur Folge. Um derartige Probleme zu vermeiden, werden Kunststoffabfälle zu Sekundärbrennstoffen aufgearbeitet. Dieser Sekundärbrennstoff unterliegt bestimmten Spezifikationen. So darf beispielsweise der Cl-Anteil nicht mehr als 0,5 Gew.-% betragen.⁵⁸

⁵³ Vgl. Hellerich, W. et al. (2010), S.62.

⁵⁴ Vgl. Hellerich, W. et al. (2010), S.63 f.

⁵⁵ Vgl. Ehrenstein, G.W.; Kuhmann, K. (1993), S.2.7.

⁵⁶ Vgl. Hellerich, W. et al. (2010), S.62.

⁵⁷ Vgl. Kaminsky, W.; Sinn, H. (1995), S.440 f.

⁵⁸ Vgl. Hellerich, W. et al. (2010), S.63 ff.

2.3 Anlagen zur Aufbereitung von Kunststoffen

Im folgenden Abschnitt werden Anlagen, welche industriell bei der Aufbereitung von Kunststoffen Verwendung finden, detailliert beschrieben. Auch hier liegt der Fokus auf werkstofflichem Recycling von Produktionsabfällen aus thermoplastischen Kunststoffen und jenen Anlagen, die im praktischen Teil der Masterarbeit ausgelegt und bewertet werden. Wie Abbildung 9 zeigt, muss bei der innerbetrieblichen Materialaufbereitung hinsichtlich des Rezyklattyps unterschieden werden. Bei einem geplanten Einsatz von Mahlgut stehen Produktionsbetrieben sowohl zentrale (Zentralmühle) wie auch eine dezentrale Anlagen (Beistellmühle) zur Verfügung. Die Aufbereitung von Regranulat bzw. Regenerat ist jedoch ausschließlich in zentraler Form (Zentralmühle mit nachfolgendem Extruder; Schredder-Extruderanlage) möglich.

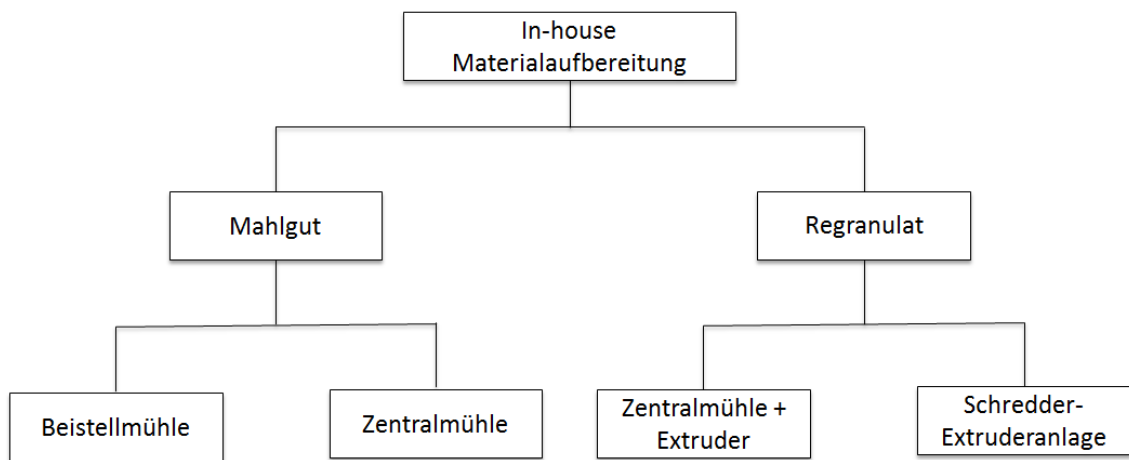


Abbildung 9: Möglichkeiten der werkstofflichen innerbetrieblichen Materialaufbereitung⁵⁹

Der Verfahrensschritt der Zerkleinerung bildet grundsätzlich den Anfang aller Aufbereitungsanlagen. Abbildung 10 bietet eine Zusammenfassung aller, in der Kunststofftechnik üblichen, Zerkleinerungsaggregate. Als Beanspruchungsformen kommen ausschließlich Prall und Schnitt zum Einsatz. Die Aggregate können weiter in den Bereich der generierten Zerkleinerung (Grob-, Mittel-, Feinzerkleinerung) unterteilt werden. Die Grobzerkleinerung wird vor allem bei sperrigen Formteilen oder Produktionsabfällen zur Vorzerkleinerung genutzt. Durch einen Schredder kann beispielsweise bei extern ausgelagerter Aufbereitung das Transportvolumen durch Vorzerkleinerung drastisch reduziert und so Transportkosten eingespart werden. Bei der Mittelzerkleinerung können bereits Korngrößen von 4-6 mm (Mahlgut) erreicht werden. Diese Korngrößen eignen sich bereits zur direkten Wiederverwertung in den meisten Produktionsanlagen. Die industriell am häufigsten verwendete Anlage ist im Bereich der Mittelzerkleinerung die Schneidemühle. Bei der Konzeptgestaltung wurden in der vorliegenden Masterarbeit ausschließlich Schneidemühlen berücksichtigt, weshalb diesem Aggregat im folgenden Abschnitt auch besondere Bedeutung zugemessen wird. Mit Fein- und Feinstzerkleinerung können Korngrößen von bis zu 20

⁵⁹ Quelle: Eigene Darstellung

um erreicht werden. Der Output ist bei diesen Aggregaten also in der Regel pulverförmig.⁶⁰

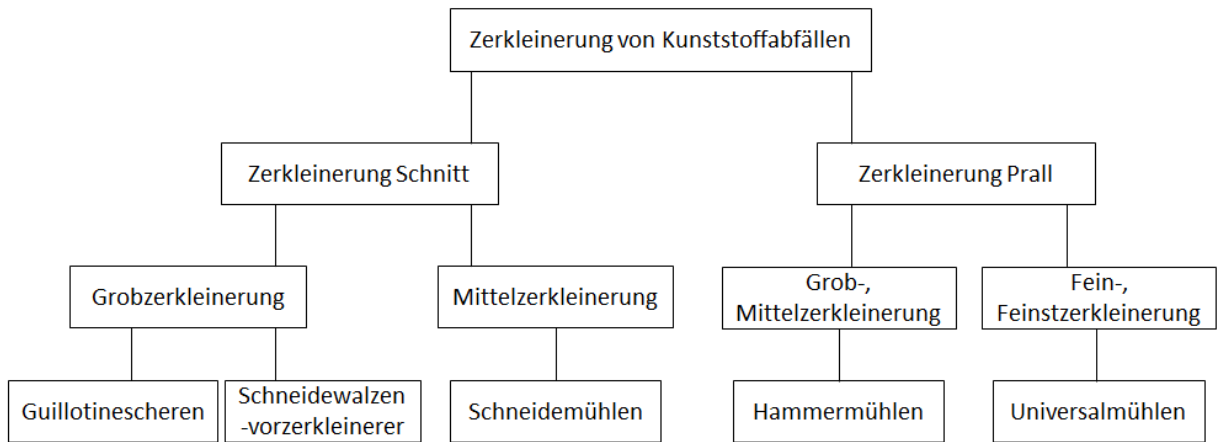


Abbildung 10: Zerkleinerungsanlagen für Kunststoffabfälle⁶¹

Jede Schneidemühle ist nach dem in Abbildung 11 skizzierten Prinzip aufgebaut. Im Mahlraum sind so genannte Statormesser angebracht. Sobald der Rotor angetrieben wird, ergibt sich zwischen Rotor- und Statormesser ein Schneidespalt. Das zugeführte Material wird so lange zerkleinert, bis es durch ein, im unteren Bereich des Mahlraums, angebrachtes Sieb (Lochgröße 4-8 mm) durchrutschen kann. Längliche zylindrische Teilchen mit geringem Durchmesser („Stippen“) haben bei diesem Prinzip die Möglichkeit auch ohne Zerkleinerung den Mahlraum zu verlassen. Aus diesem Grund können optional schräggebohrte Siebeinsätze verwendet werden, die diesen Effekt minimieren sollen. Dennoch kann eine völlig regelmäßige Korngröße mit Schneidemühlen nie erreicht werden.⁶²

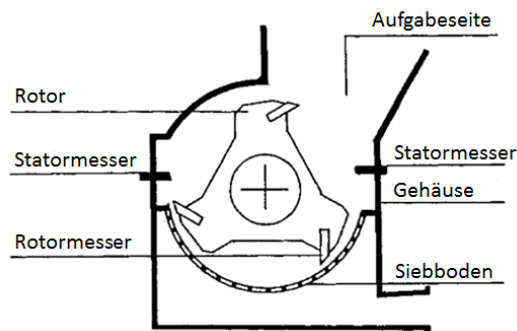


Abbildung 11: Schnitt durch eine Schneidemühle⁶³

Das Anforderungsprofil, welches meist an Schneidemühlen gerichtet wird, betrifft vor allem die Punkte Wartungsfreundlichkeit, (geringe) Lärmbelastung, gleichmäßige

⁶⁰ Vgl. Michaeli, W.; Bittner, M. (1992), S. 423 f.

⁶¹ Quelle: Michaeli, W.; Bittner, M. (1992), S. 424.

⁶² Vgl. Michaeli, W.; Bittner, M. (1992), S. 423 f.

⁶³ Quelle: Michaeli, W.; Bittner, M. (1992), S. 424.

Korngröße, geringer Staubanteil und vor allem bei Beistellmühlen eine platzsparende Ausführung. Auf die Punkte Lärmbelastung und Staubanteil kann (vor allem bei Beistellmühlen) durch ideale Wahl der Prozessparameter (Schnittgeschwindigkeit) Einfluss genommen werden. Versuchsreihen haben gezeigt, dass Schneidemühlen bei einer Schnittgeschwindigkeit von ca. 40 – 50% ein Minimum hinsichtlich des Lärmpegels und des Staubgehalts im Mahlgut durchlaufen.⁶⁴

Wie Abbildung 12 zeigt, zeichnen sich Beistellmühlen durch eine äußerst kompakte Bauweise aus. Sie können direkt neben Verarbeitungsmaschinen platziert werden und bilden so den kleinst möglichen geschlossenen Recyclingkreislauf für Produktionsabfälle aus thermoplastischen Kunststoffen (In-Line Recycling). Im folgenden Absatz wird der Einsatz von Beistellmühlen in Spritzgießbetrieben näher diskutiert.

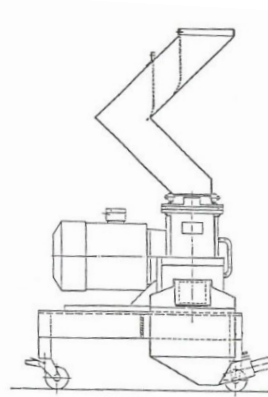


Abbildung 12: Schematische Darstellung einer Beistell-Schneidemühle⁶⁵

Beim Spritzgießen fallen, sofern nicht jedes Formteil direkt über einen Heißkanal angebunden wird, Kuppelprodukte (Angüsse) an, die über 30% eines Schusses (Formteil + Kuppelprodukt) ausmachen können. Die Angüsse werden entweder über ein Handlinggerät („Angusspicker“) aus dem Spritzgießwerkzeug entnommen oder durch Separiertrommeln räumlich von den Produkten getrennt. Bei Integration einer Beistellmühle erfolgt die Beschickung direkt über den Angusspicker (siehe Abbildung 13A/B) oder über Förderbänder (siehe Abbildung 13C). Im zweiten Fall wird die Beistellmühle unmittelbar nach oder direkt unter der Separiertrommel platziert. Das Mahlgut wird anschließend über Fördergeräte in Zwischenbehälter (Abbildung 13A) oder direkt auf das Dosiergerät der Spritzgießmaschine (Abbildung 13B) geleitet. In seltenen Fällen wird das Mahlgut gesammelt und vor dem neuerlichen Einsatz zwischengelagert (Abbildung 13C). Oftmals geben Kunden einen maximal zulässigen Anteil an Rezyklat vor. Um dieser Vorgabe Folge leisten zu können, müssen an den Spritzgießmaschinen (bei Integration einer Beistellmühle) gravimetrische Dosiergeräte angebracht werden. Bei diesen Geräten werden die unterschiedlichen Komponenten (Neuware, Rezyklat, Masterbatch) in Behälter einer Wiegezone dosiert und anschließend zu definierten Anteilen vermischt. So kann sichergestellt werden, dass jeder Schuss den gleichen und vorher festgelegten Anteil an Rezyklat enthält. Als

⁶⁴ Vgl. Hess, V. (1992), S. 108 f.

⁶⁵ Quelle: Hess, V. (1992), S. 112.

größter Vorteil von Beistellmühlen, gegenüber allen übrigen Recyclinganlagen, kann der Verzicht auf Sammlung und Zwischenlagerung angeführt werden. Dadurch werden zahlreiche Fehlerquellen wie Vermischung oder Verunreinigungen ausgeschlossen, und alle mit Sammlung, Lagerung und Logistik (des Rezyklates) verbundenen Kosten eingespart. Beistellmühlen finden vor allem in Produktionsbetrieben Anwendung, die an einer Maschine stets dasselbe Produkt („Dauerläufer“) herstellen. Gibt es in Unternehmen jedoch ständige Werkzeugwechsel (und folge dessen Produktwechsel), ist der Einsatz von Beistellmühlen kritisch zu sehen. Bei einem Materialwechsel muss die Beistellmühle (insbesondere bei Farbwechsel) gründlich gereinigt werden, was in der Regel eine Erhöhung der Rüstzeit zur Folge hat. Außerdem müssen in einigen Fällen Änderungen an der Peripherie (andere Form der Beschickung, Zwischenbehälter notwendig, etc.) vorgenommen werden. Beistellmühlen werden überdies für ein bestimmtes Material, einen definierten Durchsatz und eine Angussform ausgelegt. Diese Punkte sollen aufzeigen, dass der kürzest mögliche Recyclingkreislauf nicht für jedes Produktionsunternehmen zwangsweise am besten geeignet ist. Die Frage nach dem idealen Recyclingsystem kann nur individuell beantwortet werden und hängt immer von den Gegebenheiten vor Ort ab.⁶⁶

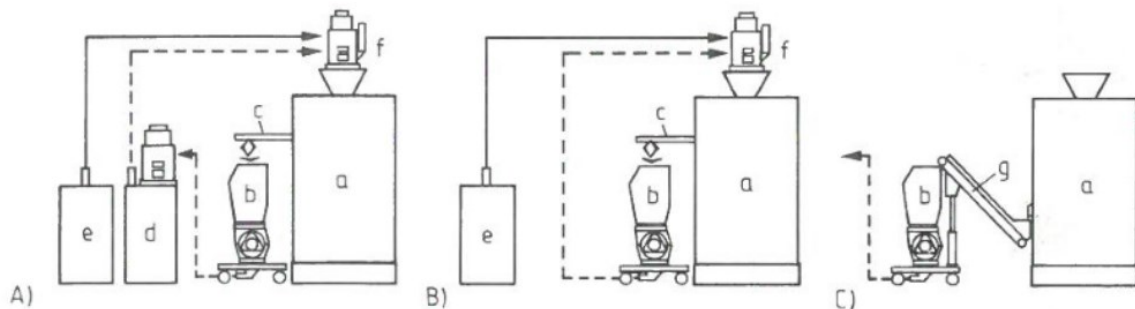


Abbildung 13: Betriebsweisen sowie Beschickungsmöglichkeiten von Beistellmühlen;
a: Spritzgießmaschine, b: Schneidemühle, c: Entnahmegert, d: Mahlgut-
zwischenbehälter, e: Behälter mit Neuwere, f: Förder- und Dosiergeräte, g: Förderband⁶⁷

Eine weitere Möglichkeit beim Einsatz von Mahlgut als Rezyklat stellen Zentralmühlen dar. Zentrale Schneidemühlen unterscheiden sich optisch und technisch nicht wesentlich von Beistellmühlen mit Ausnahme einer deutlich größeren Bauform. Diese Anlagen werden meist außerhalb der Produktionshalle in eigenständigen Recyclingbereichen platziert. Die Angüsse müssen zuvor an den Spritzgießmaschinen in Kisten oder Tonnen sorten-, bzw. typenrein gesammelt und zur Zentralmühle transportiert werden. Die Beschickung erfolgt in der Regel händisch oder über eine Kippvorrichtung mit nachfolgendem Förderband. Da bei der Sammlung und beim Transport des Recyclinggutes Verunreinigungen oder Vermischungen mit metallischen Gegenständen nicht ausgeschlossen werden können, empfiehlt sich das Anbringen von Metallsuchbrücken bzw. Metallsuchspulen (siehe Abbildung 14) am Förderband. Die Sensorspulen dieser Geräte induzieren ein elektromagnetisches Feld, welches beim Durchgang metallischer Gegenstände verändert wird. Das Förderband wird durch einen Impuls gestoppt und der metallische Gegenstand kann händisch entfernt

⁶⁶ Vgl. Hausladen, G. (2007), S. 95 ff.

⁶⁷ Quelle: Hess, V. (1992), S. 111.

werden. Diese Vorrichtungen werden vor allem zum Schutz der Schneidemühle angebracht.⁶⁸

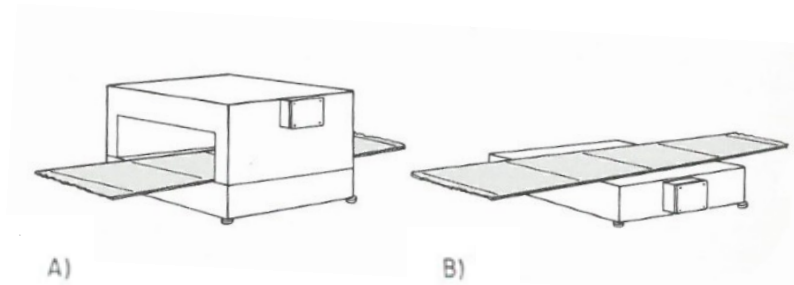


Abbildung 14: Metallsuchbrücke und Metallsuchspule zum Auffinden von Metallteilen vor dem Beschicken der Schneidemühle⁶⁹

Die vor der Schneidemühlen angebrachten Suchspulen sind jedoch nur in der Lage metallische Teilchen > 4 mm zu detektieren. Überdies ist nicht auszuschließen, dass beim Mahlvorgang selbst durch Abrasion metallische Partikel in das Mahlgut gelangen. Deshalb werden bei Zentralmühlen Metallausscheidegeräte auch nach der Schneidemühle angebracht. Abbildung 15 zeigt eine Variante, die in der Druckleitung zwischen Absauggebläse und Zyklon verbaut ist. Sobald die Sensorspule ein metallisches Partikel detektiert, wird eine Weiche betätigt, die eine Abscheidung in einen separaten Behälter ermöglicht.⁷⁰

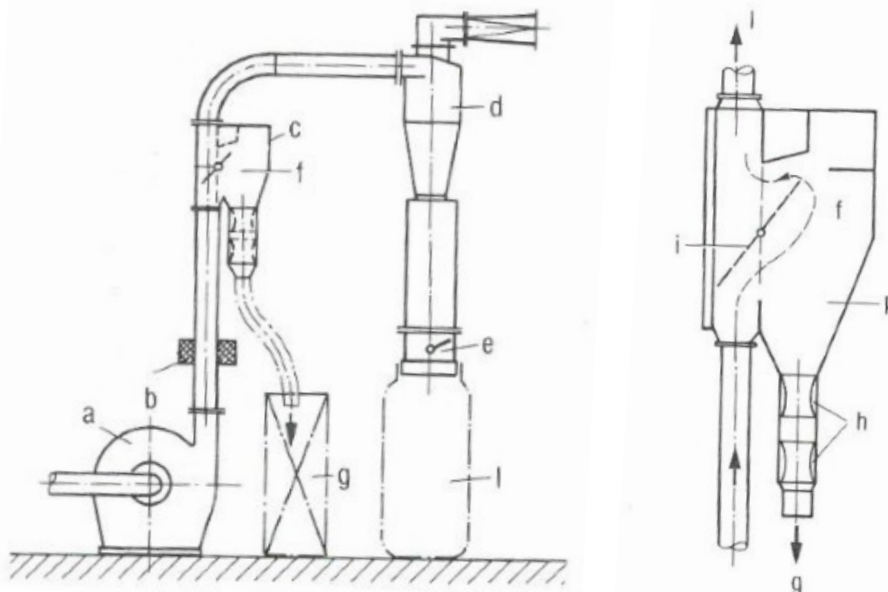


Abbildung 15: Schematische Darstellung eines Metallausscheidegeräts in der Druckleitung zwischen Schneidemühle und Absauggebläse; a: Materialfördergebläse, b: Sensorspule, c: Metallausscheidegerät, d: Zyklon, e: Absackklappe, f: sauberes Mahlgut, g: Metall, h: Ventile, i: Materialweiche, k: Trichter, l: sauberes Mahlgut⁷¹

⁶⁸ Vgl. Hess, V. (1992), S. 128.

⁶⁹ Quelle: Hess, V. (1992), S. 128.

⁷⁰ Vgl. Hess, V. (1992), S. 132.

⁷¹ Quelle: Hess, V. (1992), S. 132.

Neben der unregelmäßigen Partikelgröße wird vor allem der nicht zu vermeidende Staubanteil als wesentlicher Kritikpunkt beim Einsatz von Mahlgut angeführt. Ein zu hoher Staubanteil kann sowohl die Qualität der Endprodukte wie auch den Verarbeitungsprozess an sich negativ beeinflussen. Bei der Verwendung von Beistellmühlen wird diese Problematik vor allem mittels idealer Prozesseinstellungen minimiert. Bei hohen Durchsätzen > 150 kg/h kann eine ausreichende Entstaubung nicht mehr alleine über die Wahl der Prozessparameter erreicht werden. Aus diesem Grund werden bei zentralen Schneidemühlen in der Regel Entstaubungsanlagen nachgeschaltet. Abbildung 15 zeigt eine gängige Variante mit mehreren vertikal angeordneten zickzackförmigen Gliedern („Zickzacksichter“). Das Mahlgut wird vom Gebläse in den Zickzacksichter hineingeblasen. Die entstaubten Partikel fallen auf Grund der Schwerkraft gegen den Luftstrom nach unten und werden über eine Zellenradschleuse ausgetragen. Der Staub wird hingegen mit dem Luftstrom in einen Zyklon gefördert und dort in einem separaten Behälter gesammelt. Abschließend zeigt Abbildung 16 eine komplexe zentrale Aufbereitungslineie. Die Beschickung erfolgt hier über ein Förderband, welches mit Metallsuchbrücke ausgestattet ist. Das Mahlgut wird über einen Zickzacksichter entstaubt und nochmals über ein Metallausscheidegerät geführt. Die hier beschriebenen Elemente wurden in der vorliegenden Masterarbeit als Vorbild bei der Konzeption der zentralen Schneidemühlen verwendet.⁷²

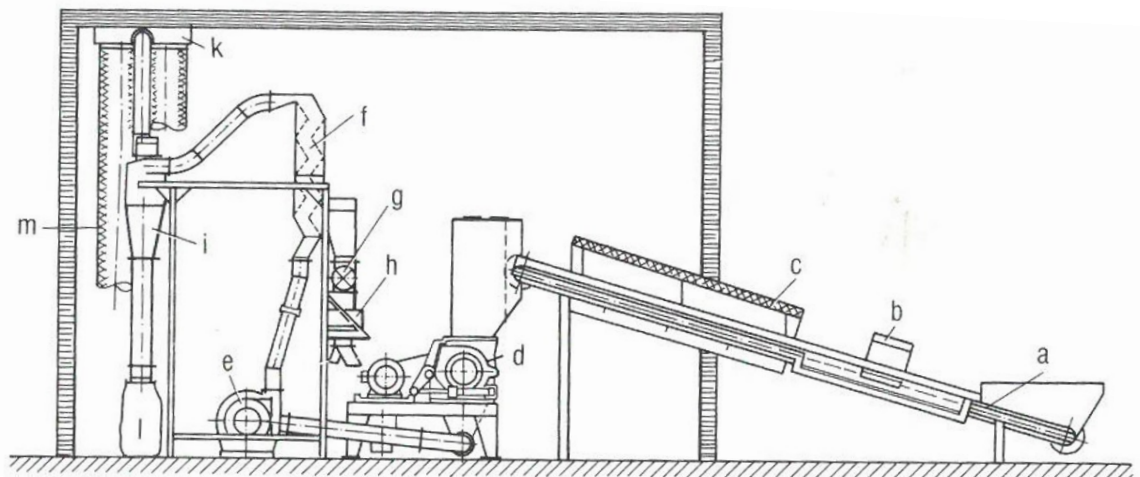


Abbildung 16: Zentrale Aufbereitungsanlage; a: Förderband, b: Metallsuchbrücke; c: Schallschutzsitz, d: Schneidemühle, e: Gebläse, f: Entstauber, g: Zellenradschleuse, h: Metallausscheidegerät, i: Zyklon, k: Deckenfilter, l: Staub, m: Feinstaub⁷³

Beim Einsatz von Regranulat bzw. Regenerat wird der Sekundärrohstoff zusätzlich zur Zerkleinerung mit Hilfe von Extrusionsanlagen aufgeschmolzen (plastifiziert). Wie Abbildung 9 zeigt, stehen nach dem aktuellen Stand der Technik zwei verschiedene Konzepte zur Verfügung. Zuerst wird die herkömmliche Extrusion beschrieben und anschließend die Unterschiede (Vorteile) des Schredder-Extruderprinzips erläutert.

⁷² Vgl. Hess, V. (1992), S. 128 ff.

⁷³ Quelle: Hess, V. (1992), S. 136.

Als Input werden bei herkömmlichen Extruderanlagen Partikel < 6 mm benötigt. Beim Einsatz in der Recyclingtechnik müssen demnach Angüsse an (zentralen) Mühlen vorzerkleinert werden. Eine Entstaubung ist bei nachfolgender Extrusion allerdings nicht erforderlich. Das Mahlgut wird über Dosiergeräte in die Einzugszone des Extruders geleitet. Bei der Herstellung von Regenerat werden außerdem Zusatzstoffe (Pigmente, Füllstoffe, etc.) zu definierten Anteilen beigemischt. In der ersten Zone des Extruders wird der Kunststoff mit Hilfe speziell ausgelegter Schneckenelemente über Schererwärmung und externer Wärmezufuhr (Heizbänder) plastifiziert. Danach folgt typischerweise eine Homogenisierungs- bzw. Dispergierungszone. Die Mischelemente in jener Zone gewährleisten, dass Additive homogen in die Schmelze eingearbeitet und so eine gleichmäßige Produktqualität erreicht werden kann. Die Schnecken können sowohl einwellig wie auch zweiwellig (gleich-, gegenläufig) ausgeführt und über ein Baukastenprinzip (siehe Abbildung 17) mit unterschiedlichsten Schneckenelementen ausgestattet (Scher-, Misch-, Knetelemente) werden.⁷⁴



Abbildung 17: Zweiwelliger Schnecke ausgeführt im Baukastenprinzip⁷⁵

Kunststoffe enthalten bei der Verarbeitung am Extruder oftmals flüchtige Bestandteile (Feuchtigkeit), die bei der Extrusion über Entgasungszonen einfach entfernt werden können. Dies ermöglicht beispielsweise bei der Aufbereitung von Polyamiden die Einstellung eines definierten Feuchtegehaltes für das produzierte Rezyklat. Neben der Entgasung ist die Filtration der Schmelze ebenfalls ein wichtiger Bestandteil. Verunreinigungen im Material können bei der Verarbeitung zu einer drastischen Reduktion der Produktqualität führen. Aus diesem Grund werden nach der Entgasungszone kontinuierliche (Reinigung ohne Produktionsstopp möglich) oder diskontinuierliche (Reinigung bedingt Produktionsstopp) Schmelzefilter angebracht.⁷⁶

Die homogenisierte, entgaste und filtrierte Kunststoffschmelze muss abschließend in eine definierte, einfach zu verarbeitende Partikelform gebracht werden (Granulierung). Dafür stehen im Wesentlichen zwei Methoden zur Verfügung. Beim Heißabschlag wird die Kunststoffschmelze direkt nach Verlassen der Lochplatte von scharfen Messern im schmelzeförmigen Zustand abgeschlagen und anschließend die Granulate mit Luft oder Wasser gekühlt. Beim Kaltabschlag hingegen wird der Schmelzestrang zuerst durch ein Wasserbad geleitet und die Granulate im erstarrten (festen) Zustand abgeschlagen. Beim Heißabschlag ergibt sich in der Regel eine kugelförmige und beim Kaltabschlag eher eine zylindrische Partikelform. Die Qualität des Granulats wird durch diese beiden Verfahrensvarianten jedoch nicht beeinflusst. Abbildung 18 zeigt grafisch eine typische Extrusionsanlage mit Kaltabschlag. Abschließend muss darauf hingewiesen werden, dass die Temperatur- und Schereinwirkung bei der Verarbeitung am Extruder abhängig vom Materialtyp einen mehr oder weniger starken Abbau der

⁷⁴ Vgl. Mauch, K.F. (1984), S.185 ff.

⁷⁵ Quelle: Wohlfahrt-Laymann, H. (1992), S. 140.

⁷⁶ Vgl. Wohlfahrt-Laymann, H. (1992), S. 137 ff.

Makromoleküle zur Folge hat. Jener kann wiederum zu einer Reduktion der (mechanischen) Eigenschaften führen.⁷⁷

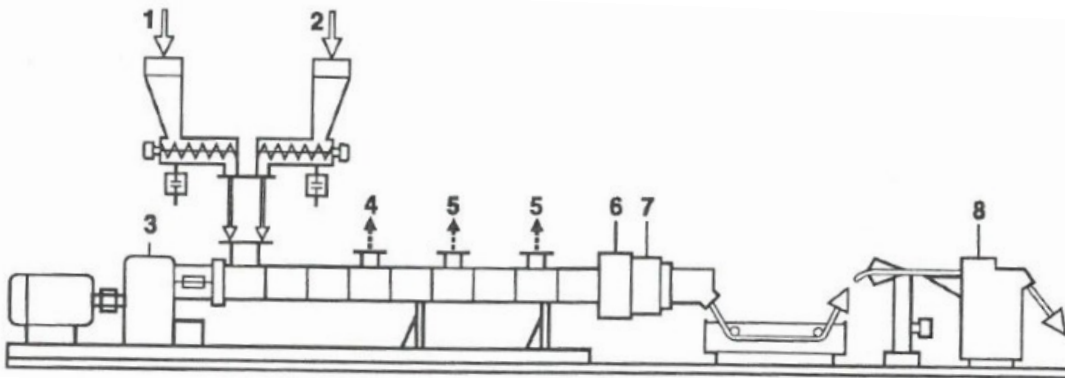


Abbildung 18: Schematische Darstellung einer Extruderanlage (Kaltabschlag);
1-2: Dosiergeräte, 3: Schnecke, 4: Entgasung, 5: Vakuum-Entgasung,
6: Schmelzpumpe, 7: Filter, 8: Granulierung⁷⁸

Das Schredder-Extruderprinzip vereint die beiden Prozessschritte Zerkleinerung und Extrusion bei der Regranulat- bzw. Regeneratherstellung. Die Angüsse werden über ein Förderband (mit Metallsuchbrücke) in den Trichter eines Einwellenzerkleinerers (Schredder) geleitet. Hier werden die Angüsse auf eine Partikelgröße zerkleinert, die es erlaubt die Einzugszone des Extruders kontinuierlich zu beschicken. Der Rest der Anlage unterscheidet sich kaum von herkömmlichen Extrudern. Durch dieses innovative Recyclingkonzept kann ein gesamter Verfahrensschritt eingespart und somit der Energieinput und die Zeit zur Aufbereitung deutlich reduziert werden.⁷⁹

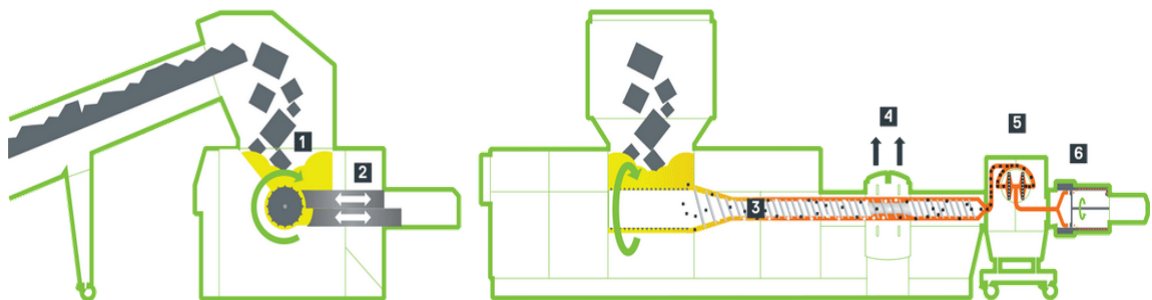


Abbildung 19: Schematische Funktionsweise der Schredder-Extruderanlage; 1:
Einwellenzerkleinerer, 2: Doppelschiebersystem, 3: Extruder, 4: Entgasungszone, 5:
Filter, 6: Granulierung⁸⁰

Abschließend werden die eben vorgestellten Anlagen noch hinsichtlich technischer und ökonomischer Gesichtspunkte verglichen und vorab bewertet (siehe Tabelle 2). Durch den deutlich komplexeren Anlagenaufbau ist bei den Konzepten 3 und 4 von höheren

⁷⁷ Vgl. Wohlfahrt-Laymann, H. (1992), S. 137 ff.

⁷⁸ Quelle: Wohlfahrt-Laymann, H. (1992), S. 150.

⁷⁹ Vgl. PureLoop, http://www.pureloop.at/de/isec_produkt (Zugriff: 27.11.2016).

⁸⁰ Quelle: PureLoop, http://www.pureloop.at/de/isec_produkt (Zugriff: 27.11.2016).

Anschaffungs- sowie Wartungs- und Instandhaltungskosten auszugehen. Die Investitionskosten der Beistellmühlen sind dagegen direkt proportional zur benötigten Anzahl und somit von den Rahmenbedingungen im konkreten Unternehmen abhängig. Ein entscheidender Nachteil der Beistellmühlen kann ihre starre Einbindung in den Fertigungsprozess darstellen. Die direkte Rückführung des Rezyklates an den Verarbeitungsanlagen, schränkt den Anteil des beigemengten Sekundärmaterials auf das Verhältnis von Kuppelprodukt zu Formteil ein. Oft wird die maximal zulässige Menge an Sekundärmaterial bei einem Produkt durch Kunden, Normen, Verordnungen oder bestimmten Anforderungen eingeschränkt. Zentrale Lösungen (Konzept 1, 3 und 4) bieten die Möglichkeit die gesamte Menge des Sekundärmaterials (eines Standortes) entsprechend dem Bedarf konkreter Produkte zu verteilen und weisen somit eine deutlich höhere Flexibilität auf. Der Personalaufwand beschränkt sich bei Beistellmühlen auf die Wartung- und Instandhaltung (gegebenenfalls Reinigung). Alle zentralen Anlagen müssen dagegen von einem Operator beschickt und bedient werden. Mit den größten Kosten ist in diesem Zusammenhang bei Konzept 3 zu rechnen. Die Prozessschritte des Mahlens und des Extrudierens werden hier getrennt voneinander durchgeführt. Somit benötigen beide Anlagen (Mühle und Extruder) einen eigenen Operator. Die Produktqualität trennt die vier Konzepte entsprechend ihrem Output in Mahlgut- (Konzept 1 und 2) und Regranulatlösungen (Konzept 3 und 4). Eine unregelmäßige Korngröße sowie Staubanteile können bei Mahlgut nie gänzlich vermieden werden. Diese Tatsache schränkt die Qualität dieses Sekundärmaterials deutlich ein. Durch die Extrusion kann überdies gezielt Einfluss (durch die Beimengung von Füllstoffen) auf den Output der Anlagen genommen werden. Das benötigte Know-how zur Bedienung der Anlagen kann bei den Konzepten 1 und 2 als äußerst gering eingestuft werden. Die Bedienung einer Mühle setzt keine entsprechende Ausbildung oder Kenntnisse voraus. Eine simple Einschulung ist zur sicheren Bedienung jedenfalls ausreichend. Extruderanlagen setzen dagegen Grundkenntnisse der zu verarbeiteten Materialien voraus. Wird eine solche Anlage ausschließlich zur Aufbereitung verwendet und kein Füllstoff eingearbeitet, reicht eine Grundausbildung im Bereich der Kunststofftechnik samt entsprechender Einschulung jedenfalls zur prozesssicheren Bedienung der Anlagen aus. Als letztes Kriterium wurden im Rahmen dieser Vorabbewertung die benötigten räumlichen Ressourcen ausgewählt. Beistellmühlen können direkt neben den Fertigungsanlagen platziert werden. Im Sinne einer Nettobilanz haben diese Anlagen mit Sicherheit den geringsten Bedarf an Stellfläche. Da es sich um eine dezentrale Lösung handelt, wird diese Stellfläche in der Fertigung (direkt neben den Verarbeitungsanlagen) benötigt. In vielen Produktionsbetrieben sind die Raumressourcen in den Fertigungshallen vollkommen ausgeschöpft. Eine Integration von Beistellmühlen stellt dann trotz geringer Stellfläche einen signifikanten Eingriff in das Layout der Produktionshalle dar und ist mit großem Aufwand verbunden. Alle zentralen Konzepte können dagegen auch außerhalb der Fertigung problemlos umgesetzt werden. Das Konzept 3 besteht aus mindestens zwei Anlagen (Mühle und Extruder) und benötigt somit die größte Stellfläche aller betrachteten Alternativen.

Tabelle 2: Vorabbewertung aller Anlagen nach technischen und ökonomischen Kriterien

	Zentralmühle (Konzept 1)	Beistellmühle (Konzept 2)	Mühle+Extruder (Konzept 3)	Schredder-Extruder (Konzept 4)
Kosten	niedrig	niedrig	hoch	hoch
Flexibilität	hoch	niedrig	hoch	hoch
Personal- aufwand	mittel	niedrig	hoch	mittel
Produkt- qualität	niedrig	niedrig	hoch	hoch
Benötigtes Know-how	niedrig	niedrig	mittel	mittel
Benötigte räumliche Ressourcen	mittel	niedrig	hoch	mittel

3 Betriebswirtschaftliche Grundlagen

Im folgenden Abschnitt wird das Themengebiet „Investitionsrechnung“ in umfassender Art und Weise aufgearbeitet. Die Investitionsrechnung wurde in der praktischen Fallstudie zur wirtschaftlichen Bewertung aller Konzepte herangezogen und besitzt aus diesem Grund zentralen Charakter für diese Masterarbeit. Im einführenden Teil wird eine Begriffsbestimmung vorgenommen, mögliche Klassifizierungskriterien angegeben und der Prozess, welcher typischerweise bei der Tätigung einer Investition durchlaufen wird, beschrieben. Anschließend werden sowohl statische wie auf dynamische Methoden der Investitionsrechnung vorgestellt und deren Vor- und Nachteile näher diskutiert. Abschließend werden drei Methoden vorgestellt, die bei unsicherer Datenlage angewendet werden können.

3.1 Einführung in die Investitionsrechnung

Investitionen gehören zu den wichtigsten Entscheidungen in Unternehmen und können (abhängig vom Investitionsvolumen) großen Einfluss auf die Liquidität, Rentabilität und dem Fortbestand der gesamten Unternehmung haben.⁸¹

Die Definition des Investitionsbegriffs gestaltet sich jedoch nicht trivial und wird in der Literatur von unterschiedlichen Sicht- bzw. Betrachtungsweisen geprägt. Im folgenden Abschnitt werden vier mögliche Zugänge vorgestellt. Während der vermogensbestimmte (bilanzorientierte), kombinationsbestimmte und zahlungsbestimmte Investitionsbegriff Prozesscharakter aufweist, orientiert sich der dispositionsbestimmte Investitionsbegriff an den Folgen des Investitionsprozesses.⁸²

Nach dem vermogensbestimmten (bilanzorientierten) Zugang liegt eine Investition bei Umwandlung von Kapital (Passivseite der Bilanz) in Vermögen (Aktivseite der Bilanz) vor. Diese Definition würde bedeuten, dass jede Form der Kapitalverwendung, welche die Aktivseite der Bilanz betrifft (also auch das Umlaufvermögen) einer Investition gleichzusetzen ist.⁸³ Dieser weit gefasst Investitionsbegriff widerspricht jedoch dem langfristigen Charakter einer Investition, weshalb manche Autoren den vermogensbestimmten Investitionsbegriff auf Erwerb von Anlagevermögen einschränken.⁸⁴ Ein weiteres Problem stellt beim vermogensbestimmten Investitionsbegriff die Tatsache dar, dass jener von den jeweiligen Bilanzierungsvorschriften abhängig ist. Dies betrifft vor allem Kapitalverwendung in Form von Forschung und Entwicklung. Hier bestehen Differenzen zwischen UGB (Ansatzverbot) und IAS bzw. IFRS (unter bestimmten Voraussetzungen Ansatzpflicht). Je nach verwendeter Bilanzierungsvorschrift kann nach dem vermogensbestimmten Investitionsbegriff Kapitalverwendung in Form Entwicklungsprojekten als Investition

⁸¹ Vgl. Staehlin, E. (1993), S. 12 f.

⁸² Vgl. Linder, S. (2006), S. 29 ff.

⁸³ Vgl. Linder, S. (2006), S. 29.

⁸⁴ Vgl. Heesen, B. (2010), S. 1.

angesehen werden oder nicht. Diese Tatsache führt bei diesem Zugang zu einer zwangsläufigen Unschärfe.⁸⁵

Der kombinationsbestimmte Investitionsbegriff definiert eine Investition als Kombination angeschaffter (materieller) Anlagegüter zu einer neuen Produktionszelle oder als Eingliederung in eine bestehende. Das bedeutet, dass weder der Vorgang der Beschaffung des Investitionsobjekts noch jener der Erfolgskontrolle Teil der Investition ist. Lediglich die Kombination bzw. Eingliederung der beschafften Anlagegüter wird nach dieser Begriffsbestimmung als Investition bezeichnet. Vermutlich auch auf Grund dieser Einschränkungen hat sich diese Begriffsbestimmung weder in der Praxis noch in der Literatur durchsetzen können.⁸⁶

Ein in der Praxis weit verbreiteter Zugang ist der zahlungsbestimmte. Er führt die Investition auf die damit verbundenen Zahlungsströme zurück.

„Eine Investition ist ein Zahlungsstrom, welcher mit einer Auszahlung beginnt und in späteren Zeitpunkten Einzahlungen bzw. eine Reduktion von Auszahlungen erwarten lässt.“⁸⁷

Hier wird der Investitionsbegriff offensichtlich noch weiter gefasst als beim vermögensbestimmten. Demnach können nicht nur Entwicklungsauszahlungen (nach IFRS) sondern auch Marketing- und Schulungsauszahlungen als Investitionen charakterisiert werden.⁸⁸

Wie bereits erwähnt, legt die dispositionsbestimmte Sichtweise keinen Schwerpunkt auf den Investitionsprozess an sich, sondern auf die damit verbundenen Folgen. Hier wird eine Investition als langfristige Bindung finanzieller Mittel angesehen, wodurch die Dispositionsfreiheit eines Unternehmens deutlich eingeschränkt wird. Dieser Zugang findet in der Literatur und Praxis nur selten Verwendung.⁸⁹

In dieser Masterarbeit wird dem zahlungsorientierten Investitionsbegriff mit der oben angegebenen Definition Vorzug gegeben. Der Fokus auf Zahlungsströme kommt insbesondere in der dynamischen Investitionsrechnung zu tragen und erscheint nicht zuletzt deshalb als sinnvoller Zugang bei der Begriffsdefinition.

Investitionen können außerdem durch bestimmte Merkmale charakterisiert werden. Wie bereits aus der Definition (*„...und in späteren Zeitpunkten Einzahlungen bzw. eine Reduktion von Auszahlungen erwarten lässt“⁹⁰*) entnommen werden kann, besitzen Investitionen langfristigen Charakter. Das bedeutet, dass der Nutzen der Kapitalverwendung nie sofort, sondern über die Nutzungsdauer verteilt, eintritt. Daraus ergibt sich in der Regel eine langfristige Kapitalbindung. Ein weiteres Merkmal sind, insbesondere bei Investitionen in Maschinen und Anlagen, höhere Fixkosten. Diese ergeben sich als Folge von Abschreibungen und kalkulatorischen Zinsen. Abschließend kann die Komplexität bei der Datenbeschaffung und –beurteilung als Merkmal angegeben werden. Wie bereits erwähnt, liegt der erwartete Nutzen in der

⁸⁵ Vgl. Linder, S. (2006), S. 29 f.

⁸⁶ Vgl. Müller-Hedrich, B. W. et al. (2006), S. 14.

⁸⁷ Müller, D. (2006), S. 215.

⁸⁸ Vgl. Linder, S. (2006), S. 31.

⁸⁹ Vgl. Götz, U. (2008), S. 5.

⁹⁰ Müller, D. (2006), S. 215.

Zukunft. Umso länger die Nutzungsdauer ist, desto schwieriger und unsicherer gestaltet sich die Prognose der für die Kalkulation benötigten Daten (z.B.: erwartete Absatzmenge).⁹¹

- **Klassifizierungskriterien**

Wie im letzten Abschnitt diskutiert, umfasst der Investitionsbegriff ein breites Spektrum an unternehmerischen Handlungen. Um diese Vielfalt gliedern bzw. einordnen zu können, werden in der Literatur häufig Klassifizierungskriterien angegeben. Wie Tabelle 3 zeigt, wird dabei zwischen peripheren und zentralen Kriterien unterschieden. Periphere Kriterien dienen vor allem zur Abgrenzung unterschiedlicher Problemstellungen und zur Einordnung jener in bestimmte Schemen. Zentrale Kriterien versuchen hingegen Investitionen hinsichtlich ihrer wirtschaftlichen Merkmale oder Auswirkungen zu differenzieren.⁹²

Tabelle 3: Übersicht peripherer und zentraler Klassifizierungskriterien⁹³

Periphere Kriterien	Zentrale Kriterien
Investitionsobjekt	Konsequenzen von Investitionen
Investitionszweck	Interdependenzweite von Investitionen
Investitionsbereich	Ausmaß an Unsicherheit

Abbildung 20 gibt einen Überblick über Investitionsarten, die hinsichtlich des Investitionsobjekts gegliedert wurden. Dabei wird grundsätzlich zwischen Finanz- und Realinvestitionen unterschieden. Finanzinvestitionen sind dadurch charakterisiert, dass der Leistungsbereich des Unternehmens durch ihre Umsetzung nicht oder nur in einem geringen Ausmaß beeinflusst wird. Sie umfassen sowohl Forderungs- (Anleihen, Bankeinlagen) als auch Beteiligungsinvestitionen (Aktien, Investmentzertifikate). Realinvestitionen (Leistungsinvestitionen) können in immaterielle Investitionen und Sachinvestitionen unterteilt werden. Immaterielle Investitionen werden auch als Potentialinvestitionen bezeichnet. Unter diesen Begriff fallen Investitionen in Mitarbeiterschulung, Forschung und Entwicklung oder Patente. Sie sind aus rein monetärer Sicht schwierig zu bewerten, da in den wenigsten Fällen Zahlungsströme direkt zugerechnet oder eine seriöse Nutzungsdauer angegeben werden kann. Unter dem Begriff Sachinvestitionen fällt jede Form der materiellen Güterbereitstellung wie beispielsweise Investitionen in Maschinen, Anlagen, Gebäude etc.⁹⁴

⁹¹ Vgl. Staehlin, E. (1993), S. 12 f.

⁹² Vgl. Götz, U. (2008), S. 7.

⁹³ Vgl. Götz, U. (2008), S. 7.

⁹⁴ Vgl. Götz, U. (2008), S. 7 f.

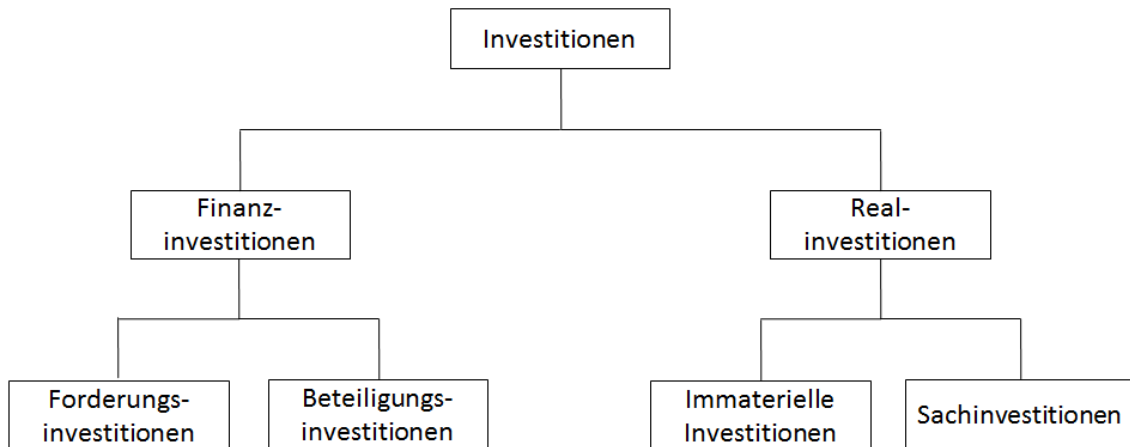


Abbildung 20: Investitionsarten gegliedert nach dem Investitionsobjekt⁹⁵

Die Gliederung nach dem Investitionszweck (siehe Abbildung 21) betrifft in erster Linie realwirtschaftliche Investitionen. Errichtungsinvestitionen müssen bei Unternehmensgründung oder dem Aufbau eines Zweigwerks getätigt werden. Laufende Investitionen können entweder als Großreparaturen oder Ersatzinvestitionen anfallen. Eine reine Ersatzinvestition liegt eher selten vor, da es sich hierbei um den identen Austausch eines Betriebsmittels handelt. In den meisten Fällen werden reparaturanfällige Anlagen durch moderne ersetzt, die gleichzeitig eine Kapazitätssteigerung und/oder höheren Automatisierungsgrad aufweisen. Diese Investitionen sind gleichzeitig Erweiterungs- und/oder Rationalisierungsinvestitionen. Als letzte Gruppe sind die Ergänzungsinvestitionen zu nennen. Diese gliedern sich in Erweiterungs-, Veränderungs-, und Sicherungsinvestitionen. Eine Erweiterungsinvestition wird zur Steigerung der betrieblichen Leistungskapazität getätigt. Wie bei der Gründungsinvestition wird demzufolge die Betriebsgröße verändert. Sicherungsinvestitionen dienen zur Reduktion des betrieblichen Risikos. Maßnahmen wie das Halten von Vorratsbeständen, (Sicherheits-) Schulungen oder Forschungs- und Entwicklungsausgaben können jener Kategorie zugewiesen werden. Die Veränderungsinvestition gliedert sich in Umstellungs-, Diversifizierungs- und Rationalisierungsinvestitionen. Während mit Umstellungsinvestitionen auf Veränderungen bei den Absatzmengen reagiert wird, werden durch Diversifizierungsinvestitionen Veränderungen beim Absatzprogramm gezielt vorgenommen. Diese Veränderungen können durch die Entwicklung neuer Produkte oder durch das Erschließen neuer Absatzmärkte herbeigeführt werden.⁹⁶

Abschließend ist noch die wichtige Gruppe der Rationalisierungsinvestitionen zu erwähnen. Diese haben stets eine Verbesserung der betrieblichen Leistungsfähigkeit zum Ziel. Typischerweise werden dadurch Kostensenkungen herbeigeführt (Einsparung von Arbeitskräften, Energiekosten oder Rohstoffkosten).⁹⁷

⁹⁵ Quelle: in modifizierter Form übernommen von Götz, U. (2008), S. 8.

⁹⁶ Vgl. Götz, U. (2008), S. 8 ff.

⁹⁷ Vgl. Vgl. Staehlin, E. (1993), S. 16 f.

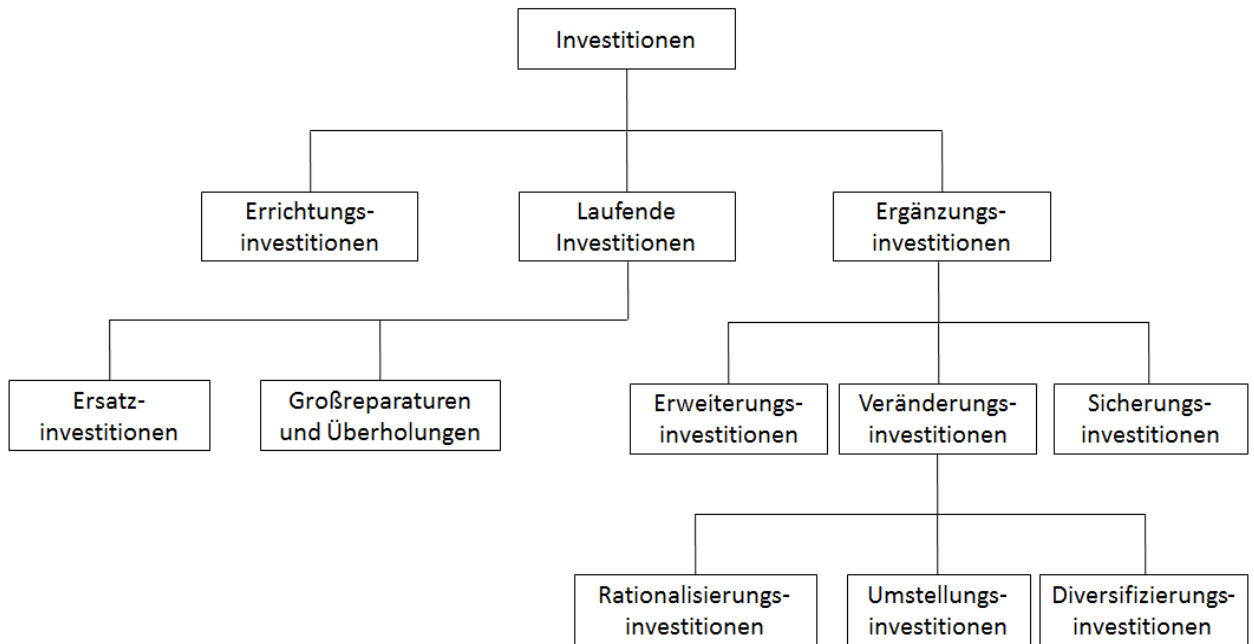


Abbildung 21: Investitionsarten gegliedert nach dem Investitionszweck⁹⁸

Das dritte periphere Kriterium ist der Investitionsbereich (siehe Tabelle 3). Dieses Klassifizierungskriterium beschreibt, wie der Name bereits vermuten lässt, den Funktionsbereich (Produktion, Verwaltung, Vertrieb, Personal, etc.), in welchem die Investition durchgeführt wird.⁹⁹

An dieser Stelle wird die Investitionsart der praktischen Fallstudie nach den eben genannten peripheren Kriterien charakterisiert. Beim Investitionsobjekt handelt es um unterschiedliche Varianten von Kunststoffrecyclinganlagen (= realwirtschaftliche Sachinvestition). Der Zweck der Investition ist eine Kosteneinsparung verglichen mit dem Ist-Zustand (externe Aufbereitung) zu erzielen (=Rationalisierungsinvestition). Der Investitionsbereich ist die Produktion (siehe Tabelle 4).

Tabelle 4: Einordnung der praktischen Fallstudie nach peripheren Kriterien

Fallstudie: In-house Kunststoffrecycling	
Investitionsobjekt	Realwirtschaftliche Sachinvestition
Investitionszweck	Rationalisierungsinvestition
Investitionsbereich	Produktion

⁹⁸ Quelle: Götz, U. (2008), S. 9.

⁹⁹ Vgl. Götz, U. (2008), S. 8 ff.

Im folgenden Abschnitt werden zentrale Klassifizierungskriterien näher diskutiert. Wie Tabelle 3 zeigt, können Investitionen auch hinsichtlich ihrer Auswirkungen (Konsequenzen) differenziert werden. Dabei stellt sich vorab die Frage ob die quantitative Wirkung einer Investition (Zahlungsströme) überhaupt erfasst werden kann oder nicht (diverse immaterielle Investitionen). Außerdem können die Zahlungsströme der jeweiligen Investition einen zeitlich konstanten oder variablen Verlauf aufweisen. Hinsichtlich der qualitativen Auswirkung wird zwischen Einzweck- und Mehrzwecknutzung (Kapazitäts-, Qualitäts-, Betriebssicherheitssteigerung) unterschieden. Abschließend wird an dieser Stelle in Bezug auf die Auswirkung noch auf den zeitlichen Aspekt verwiesen. Die Länge der Nutzungsdauer kann bestimmt (Firmenwagen) oder unbestimmt (Vermietung einer Immobilie, Kauf eines Unternehmens) sein.¹⁰⁰

Als zweites zentrales Klassifizierungskriterium ist die Interdependenzweite zu nennen. Dieses Merkmal differenziert Investitionen hinsichtlich ihres Verflechtungsgrades mit anderen Elementen im System „Unternehmen“. In der Regel stehen Investitionsobjekte in Wechselwirkung. Das bedeutet, dass die Investitionsumsetzung Systemelemente beeinflusst und das Investitionsobjekt selbst durch Systemelemente beeinflusst wird. Am Beispiel der praktischen Fallstudie kann an dieser Stelle auf den starken Zusammenhang zwischen dem Materialanfall und dem Produktionsprogramm verwiesen werden. Wie eingangs beschrieben, fällt das recyclingfähige Material (Angüsse) in einem bestimmten Prozentsatz zum hergestellten Produkt an. Werden also bestimmte Produkte in Zukunft nicht mehr produziert sinkt auch die recyclingfähige Materialmenge, welche wiederum eine zentrale Größe zur Beurteilung der Vorteilhaftigkeit dieser Investition darstellt. Im Gegensatz dazu gibt es bestimmte Finanzinvestitionen (Kauf von Wertpapieren), welche kaum Interdependenzen zu anderen Unternehmensbereichen aufweisen. Diese werden als isolierte Investitionen bezeichnet.¹⁰¹

Wie Tabelle 3 zeigt, ist das letzte zentrale Kriterium das Ausmaß an Unsicherheit. Auf Grund des Zukunftsbezugs ist keine Investition frei von Risiko. Dennoch ergeben sich Unterschiede hinsichtlich des Risikoausmaßes. So ist eine Gründungsinvestition in der Regel mit deutlich höherem Risiko behaftet als der Kauf von festverzinslichen Wertpapieren.¹⁰²

Nun folgt die Charakterisierung der Aufgabenstellung aus der praktischen Fallstudie nach zentralen Kriterien. Hinsichtlich der quantitativen Auswirkung ist festzuhalten, dass eine Zuordnung der Zahlungsströme möglich ist und diese zeitlich konstant anfallen (bei Verwendung eines zeitlich konstanten Materialstroms als Eingangsgröße). Vom qualitativen Standpunkt ist bei diesem Investitionsvorhaben durchaus von einer Mehrzwecknutzung zu sprechen. Neben der primären Motivation dieser Investition (Kostensparnis zur Ist-Situation), kann dadurch ebenfalls die Abhängigkeit vom Lieferanten reduziert und aktiv Einfluss auf die Materialqualität genommen werden. Die Nutzungsdauer der einzelnen Recyclinganlagen ist unterschiedlich aber in jedem Fall zeitlich bestimmt. Außerdem handelt es sich um eine interdependente Investition, die

¹⁰⁰ Vgl. Götz, U. (2008), S. 10.

¹⁰¹ Vgl. Götz, U. (2008), S. 10 ff.

¹⁰² Vgl. Götz, U. (2008), S. 12.

auf Grund der zahlreichen Verflechtungen auch mit einem relativ hohen Ausmaß an Unsicherheit behaftet ist. Um diese Aussage zu untermauern wird an dieser Stelle noch einmal daran erinnert, dass die Menge an erlaubtem Rezyklat im Produkt vom jeweiligen Kunden abhängig ist. Es ist demnach nicht auszuschließen, dass in Zukunft der Einsatz von Rezyklat von Kundenseite sogar verboten wird.

Tabelle 5: Einordnung der praktischen Fallstudie nach zentralen Kriterien

Fallstudie: In-house Kunststoffrecycling	
Quantitative Auswirkung	Zeitlich konstante Zahlungsströme
Qualitative Auswirkung	Investition mit Mehrzwecknutzung
Zeitliche Auswirkung	Zeitlich bestimmte Investition
Interdependenzweite	Interdependente Investition
Unsicherheit	Unsichere Investition

- **Investitionsprozess**

Der zeitliche Ablauf einer Investitionstätigkeit kann in mehrere Phasen unterteilt werden. Wie Abbildung 22 zeigt, beginnt dieser Prozess in der Regel mit einer Planungsphase. Ein Instrument, welches häufig in der Planungsphase Verwendung findet ist die Investitionsrechnung. Dies soll den Stellenwert der Investitionsrechnung im gesamten Prozess verdeutlichen und aufzeigen, dass die Investitionsrechnung keinesfalls mit dem Investitionsprozess gleichgesetzt werden darf. Mit dem Investitionsentscheid wird die Planungsphase abgeschlossen. Der Prozess der Willensbildung geht hier also in jenen die Willensdurchsetzung über¹⁰³. Die Umsetzungsphase beginnt typischerweise mit einer detaillierten Projektplanung. Mit der Inbetriebnahme des Investitionsobjekts startet die Nutzungsphase, welche von kontinuierlichem Ergebniscontrolling (Soll-Ist-Vergleiche) begleitet wird. Werden dabei zu große Differenzen zur Planungsphase festgestellt, muss eine umfassende Abweichungsanalyse eingeleitet werden. Die dadurch gewonnenen Erkenntnisse dienen zur exakteren Planung von Folgeinvestitionen oder zur Tötigung einer Sicherungsinvestition, um die erkannten Schwachstellen zu minimieren oder gänzlich auszuschließen. Die Investitionskontrolle kann demnach Anreger und Auslöser einer Investition sein. Diese Möglichkeit wird in Abbildung 22 durch den geschlossenen Kreislauf symbolisiert. Der Investitionsprozess muss nicht zwangsläufig in der eben beschriebenen Reihenfolge durchlaufen werden. Bei anspruchsvollen Investitionsprojekten kann es oft zur Rückkehr in eine bereits beendete Phase kommen. Falls beispielsweise in der Entscheidungsphase der vorliegende Informationsstand nicht ausreicht um eine qualifizierte Entscheidung treffen zu können,

¹⁰³ Vgl. Poggensee, K. (2009), S. 23.

muss eine neuerliche (intensivere) Planung durchgeführt werden. Auch die Kenntnis neuer Informationen kann in bestimmten Fällen eine Rückkehr auslösen.¹⁰⁴

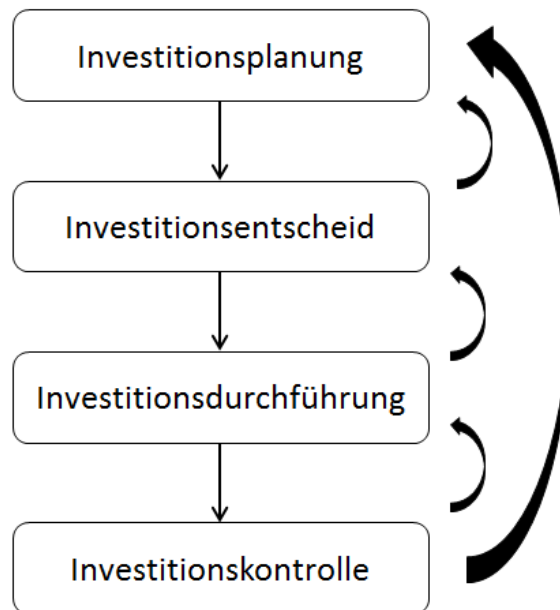


Abbildung 22: Phasen des Investitionsprozesses¹⁰⁵

Im folgenden Abschnitt werden die einzelnen Phasen des Investitionsprozesses näher diskutiert und im Detail beschrieben.

Alle unternehmerischen Tätigkeiten sind in der Regel von Visionen geprägt. Aus der Analyse der Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken eines Unternehmens (SWOT-Analyse) können unterschiedliche Strategien und Stoßrichtungen abgeleitet werden, die zur erfolgreichen Umsetzung von Unternehmensvisionen dienen. Die Realisierung einer Strategie erfolgt mit Hilfe von konkreten Unternehmenszielen. Neben wertorientierten Zielen (Shareholder-Value) können diese in unterschiedlichster Art und Ausprägung vorliegen und sollten Bedürfnisse aller Interessensgruppen (Stakeholder) widerspiegeln. Um nicht Gefahr zu laufen die finanzielle Perspektive zu sehr zu betonen, kann in dieser Phase der Unternehmensplanung eine Balanced Scorecard (BSC) zu Hilfe genommen werden. Hier werden ausgehend von einer konkreten Vision und Strategie Unternehmensziele aus Finanz-, Prozess-, Potential-, und Kundenperspektive (fallweise auch Umweltperspektive) definiert. Anschließend werden Kennzahlen vorgegeben, mit denen der Grad der Zielerreichung quantitativ gemessen und erfasst werden kann. Nach der Vorgabe eines Zielwertes sind Maßnahmen für die operative Umsetzung zu planen. Aus diesem Maßnahmenkatalog ergibt sich eine Vielzahl an Investitionsanregungen. Strategisch wichtige Investitionen, die entscheidenden Einfluss auf die Zukunfts- und Wettbewerbsfähigkeit eines

¹⁰⁴ Vgl. Heesen, B. (2010), S. 3 ff.

¹⁰⁵ Quelle: in modifizierter Form übernommen von Heesen, B. (2010), S. 3.

Unternehmens haben, werden in der Regel von der Geschäftsleitung als Folge der allgemeinen Unternehmensplanung angeregt und geplant.¹⁰⁶

Grundsätzlich ist jedoch festzuhalten, dass unternehmensinterne Investitionsanregungen aus allen Bereichen (Fertigung, Forschungs- und Entwicklung, Marketing, Verkauf, Controlling) und Ebenen (Top-Management, Middle-Management, Lower-Management) kommen können.¹⁰⁷ Anregungen aus dem Bereich der Fertigung, die oft von hierarchisch untergeordneten Ebenen eingebracht werden, sind beispielsweise Verbesserungsvorschläge (betriebliches Vorschlagswesen) oder beobachtete Kapazitätsengpässe. Zusätzlich zu unternehmensinternen Möglichkeiten können Investitionsanregungen auch extern durch Lieferanten, Kunden, Unternehmensberater oder sogar Konkurrenten erfolgen. Diese eben beschriebene Phase der Investitionsanregung wird entweder als Teil der Planungsphase oder als dem Prozess vorgeschaltete Zwangsbedingung angesehen.¹⁰⁸

Die klassische Planungsphase beginnt mit der Definition konkreter technischer, wirtschaftlicher, ökologischer und sozialer Mindestanforderungen und Beurteilungskriterien, die sich in der Regel aus den Unternehmenszielen ableiten.¹⁰⁹ Neben quantitativ erfassbaren (oft monetären) Kriterien müssen Investitionen oft auch qualitative Anforderungen, wie beispielsweise Betriebssicherheit, geringe Umweltbelastung oder Risikoarmut erfüllen. Anschließend startet die Suche nach Investitionsalternativen. In dieser Phase sind alle möglichen Konzepte, Anbieter und die Entscheidung über Eigenfertigung oder Fremdbezug (= Make or Buy) zu prüfen. Möglichkeiten, welche den zuvor gesetzten Mindestanforderungen nicht genügen, sind sofort auszuschneiden. So verbleiben in der Regel einige (wenige) Alternativen, die in einem nächsten Schritt einer detaillierten Prüfung unterzogen werden. Dabei sind Daten und Informationen in umfassender Art und Weise zu sammeln und aufzubereiten. Die verbleibenden Alternativen sind bestmöglich nach den zuvor definierten Kriterien zu beurteilen und einzuordnen. Zur Analyse quantitativ erfassbarer, monetärer Kriterien werden Investitionsrechnungen eingesetzt. Mit deren Hilfe werden Zielsetzungen nach Kostenminimierung, Gewinnmaximierung, Rentabilitätsmaximierung oder Minimierung der Kapitalrückflusszeit untersucht. Ein Problem bei der Datenbeschaffung von Investitionsrechnungen sind oftmals unsichere Prognosedaten. Die Rückflüsse von Investitionen sind von zukünftigen Entscheidungen, Ereignissen und Rahmenbedingungen geprägt, was eine exakte Prognose schlichtweg unmöglich macht. Dieser Unsicherheitsfaktoren werden in der klassischen Investitionsrechnung nur in seltenen Fällen (Risikoaufschläge) berücksichtigt. Typischerweise werden die wahrscheinlichsten Werte oder Durchschnittswerte verwendet. In dieser Arbeit wird dieser Problematik mit Kapitel 3.4 ein eigener Abschnitt gewidmet und drei Methoden vorgestellt, die in solchen Fällen angewandt werden können. Neben der unsicheren Datenlage und dem damit verbundenen (nicht berücksichtigten) Risiko gehen auch qualitative Kriterien nicht in die Investitionsrechnung mit ein. Um diese monetär schwer erfassbaren Daten

¹⁰⁶ Vgl. Poggensee, K. (2009), S. 23 ff.

¹⁰⁷ Vgl. Becker, H.P. (2013), S. 29 f.

¹⁰⁸ Vgl. Zantow, R. (2004), S. 298 f.

¹⁰⁹ Vgl. Staehlin, E. (1993), S. 21.

(Imponderabilien) in übersichtlicher Art darzustellen kann entweder eine Entscheidungsmatrix oder eine Argumenten Bilanz (siehe Abbildung 23) verwendet werden. In der praktischen Fallstudie wurde die Argumenten Bilanz als Darstellungsvariante eingesetzt. Anschließend müssen die einzelnen Investitionen in das Investitionsprogramm des gesamten Unternehmens eingegliedert werden. Dabei werden betriebliche Interdependenzen (Konkurrenzen und Synergien) zu geplanten oder bereits getätigten Investitionen geprüft und analysiert. Das Investitionsprogramm ist seinerseits wieder mit dem Finanzierungsplan sowie mit der Gesamtunternehmensplanung abzustimmen bzw. zu koordinieren (im Idealfall zeitgleiche Investition- und Finanzplanung).¹¹⁰

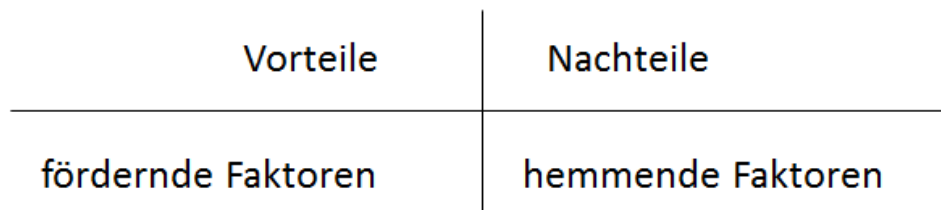


Abbildung 23: Argumente-Bilanz zur Darstellung monetär schwer erfassbarer Daten¹¹¹

Die Ergebnisse der Planungsphase (Investitionsanträge) werden in der Regel der Unternehmensleitung präsentiert. Bei kleinen Investitionsvolumina (Ersatzinvestition einer Maschine) können auch nachgeordnete Stellen mit dem Investitionsentscheid betraut sein. Investitionsentscheide handeln entweder von der Auswahl zwischen Investitionsalternativen (= relative Vorteilhaftigkeit) oder von der Entscheidung eine Investition zu tätigen oder zu unterlassen (= absolute Vorteilhaftigkeit). Wie Abbildung 24 zeigt, können Investitionsentscheide unter drei Aspekten betrachtet werden. Der prozessuale Aspekt beschreibt die einzelnen Phase des Entscheidungsprozesses (siehe Abbildung 22). Der instrumentale Aspekt bezieht sich auf die verwendeten Methoden und Instrumente zur Beurteilung eines konkreten Investitionsobjekt (Investitionsrechnung, Argumenten-Bilanz, etc.). Der institutionelle Aspekt beschreibt, welche Stellen im Unternehmen mit der Planung, dem Entscheid und der Kontrolle von Investitionen betraut ist. Vom zeitlichen und organisatorischen Aufwand sollte es sich bei dieser Phase um die mit Abstand kürzeste handeln. Unter Berücksichtigung aller quantitativen und qualitativen Argumente können folgende Entscheidungen getroffen werden:¹¹²

- Investitionsantrag wird angenommen
- Investitionsantrag wird abgelehnt
- Investitionsantrag wird zurückgestellt

Die Zurückstellung eines Investitionsantrages kann entweder aus zeitlichen Gründen (optimaler Investitionszeitpunkt noch nicht erreicht) oder aus Informationsmangel erfolgen. Bei letzterem Grund werden die zuständigen Unternehmensbereiche mit der Sammlung (Aufbereitung) weiterer Daten bzw. Informationen betraut, bis ein

¹¹⁰ Vgl. Zantow, R. (2004), S. 298 f.

¹¹¹ Quelle: Staehlin, E. (1993), S. 29.

¹¹² Vgl. Vgl. Staehlin, E. (1993), S. 18 ff.

Wissenstand erreicht wird, der eine verantwortungsbewusste Entscheidung ermöglicht.¹¹³

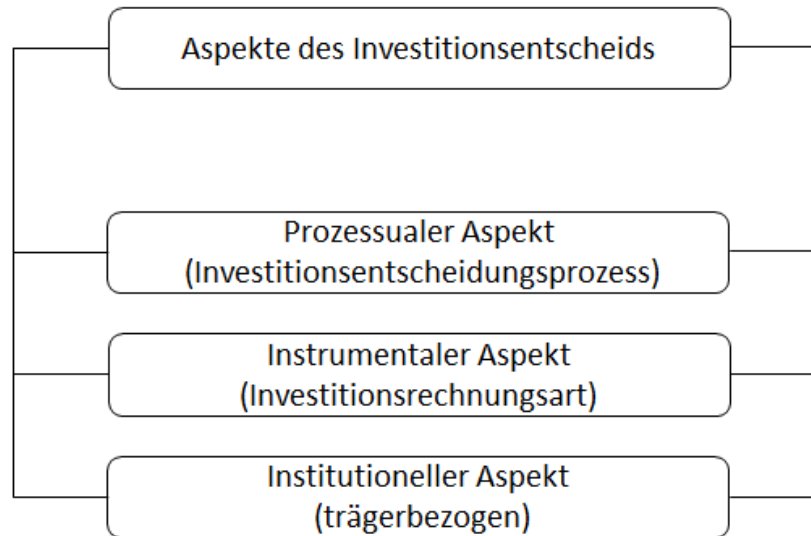


Abbildung 24: Grafische Darstellung der drei Aspekte des Investitionsentscheids¹¹⁴

Mit einem positiven Investitionsentscheid beginnt die Phase der Investitionsdurchführung. Zunächst wird abhängig von der Größe und Bedeutung der Investition eine detaillierte Projektplanung vorgenommen. Darauf folgt die konkrete Ausführung, welche bei Sachinvestitionen beispielsweise aus der Anschaffung bestimmter Maschinen und Anlagen, Montagetätigkeiten, baulichen Veränderungsmaßnahmen und Mitarbeiterschulungen bestehen kann. Mit der Inbetriebnahme beginnt die Nutzungsphase der Investition. Hier müssen vor allem laufende Investitionen in Form von Wartungs- und Reparaturarbeiten geplant und durchgeführt werden. Mit fortschreitender Zeitdauer sind Überlegungen anzustellen ob der Nutzen verlängert werden soll oder nicht (Deinvestition). Eine Verlängerung kann in unveränderter Form (Großreparaturen, Ersatzinvestition) oder in veränderter Form (Rationalisierungsinvestition) erfolgen. Diese Maßnahmen werden als Folgeinvestitionen bezeichnet.¹¹⁵

Die im Schema (siehe Abbildung 22) zuletzt angeführte Phase (Investitionskontrolle) tritt bereits in allen vorhergehenden Phasen in begleitender Form in Erscheinung. Bereits in der Investitionsplanung muss geprüft werden, welche Alternativen näher verfolgt werden und welche nicht. Während der Nutzungsphase werden in regelmäßigen Abständen Soll-Ist-Vergleiche vorgenommen. Hier wird überprüft in welchem Ausmaß die in der Planungsphase kalkulierten finanzwirtschaftlichen Ziele erreicht wurden. Bei größeren Differenzen müssen Abweichungsanalysen durchgeführt und aus den daraus gewonnenen Erkenntnissen Gegensteuerungsmaßnahmen eingeleitet werden. Somit ist die Investitionskontrolle eine Quelle für

¹¹³ Vgl. Becker, H.P. (2013), S. 30.

¹¹⁴ Quelle: in modifizierter Form übernommen von Staehlin, E. (1993), S. 19.

¹¹⁵ Vgl. Götz, U. (2008), S. 15.

Investitionsanregungen und der Investitionsprozess wird in Form eines Kreislaufes geschlossen (siehe Abbildung 22). Aus institutioneller Sicht wird diese Tätigkeit in der Regel vom Controlling übernommen.¹¹⁶

Abschließend wird in diesem einführenden Kapitel noch eine Abgrenzung der Investitionsrechnung gegenüber dem einfachen Verfahrensvergleich vorgenommen. Wie Abbildung 25 zeigt, können beide Rechnungsarten der Gruppe der Wirtschaftlichkeitsrechnung zugeordnet werden. Als generelle Aufgabe der Wirtschaftlichkeitsrechnung kann die monetäre Bewertung von betrieblichen Maßnahmen und Handlungen definiert werden. Betriebliche Tätigkeiten, die weder den Ertrag beeinflussen noch mit einer Investition (anfängliche Auszahlung) verbunden sind, werden dabei mit Hilfe von Verfahrensvergleichen charakterisiert. Ein typisches Beispiel ist die Fragestellung, ob der Transport von Ware mit der Bahn, mit dem (eigenen) Lastwagen oder mit einem Speditionsunternehmen durchgeführt werden soll. Dies zeigt, dass die Wirtschaftlichkeit in Unternehmen auch ohne Investition gesteigert (beeinflusst) werden kann. Sobald betriebliches Handeln mit einer zuvor getätigten Auszahlung verbunden ist, werden zur wirtschaftlichen Bewertung Investitionsrechnungen eingesetzt. Wie Abbildung 25 zeigt, kann dabei zwischen statischen und dynamischen Methoden unterschieden werden. Diese Verfahren werden in den beiden folgenden Kapiteln im Detail beschrieben. Ein besonderes Augenmerk liegt dabei auf die Ausarbeitung der jeweiligen Vor- und Nachteile.¹¹⁷

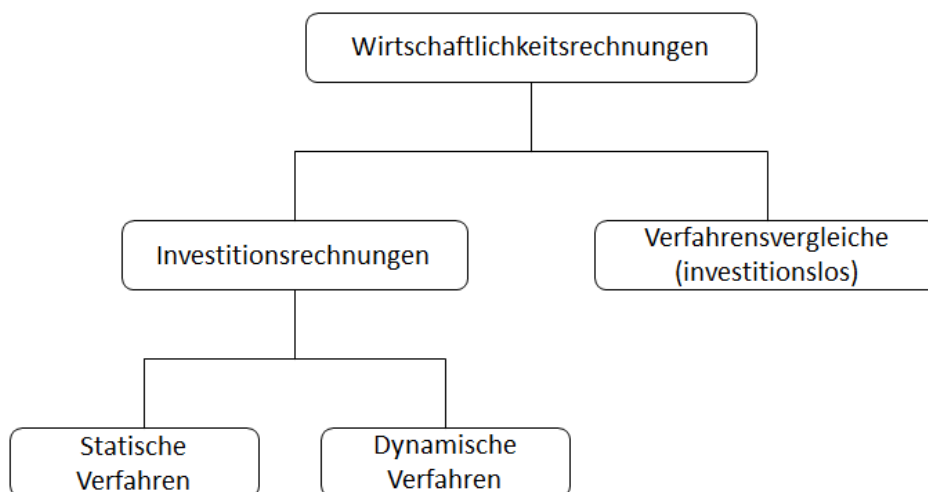


Abbildung 25: Überblick möglicher Wirtschaftlichkeitsrechnungen¹¹⁸

¹¹⁶ Vgl. Becker, H.P. (2013), S. 30.

¹¹⁷ Vgl. Staehlin, E. (1993), S. 13 f.

¹¹⁸ Quelle: in modifizierter Form übernommen von Staehlin, E. (1993), S. 14.

3.2 Statische Investitionsrechnungsverfahren

Bei statischen Verfahren wird der exakte zeitliche Anfall der Zahlungsströme nicht (vollständig) berücksichtigt. Für die Bewertung wird eine repräsentative oder durchschnittliche Periode der gesamten Nutzungsdauer herangezogen. Es werden also alle Kosten und Erlöse auf einen einzigen Abschnitt bezogen, welcher in weiterer Folge charakteristisch für die gesamte Laufzeit der Investition steht.¹¹⁹

Diese Vereinfachung ist vor allem in jenen Fällen kritisch zu beurteilen, in denen die Zahlungsströme sehr unregelmäßig anfallen. Eine weitere Konsequenz bei der Verwendung einer charakteristischen Periode ist die unberücksichtigte Nutzungsdauer beim Vergleich unterschiedlicher Investitionsalternativen. Trotz der eben genannten Nachteile sind statische Verfahren in der betrieblichen Praxis weit verbreitet. So wird oft auf Genauigkeit zu Gunsten einfacherer Datenerhebung und Auswertung verzichtet. Diese Vorgehensweise ist jedoch nur für eine erste grobe Einschätzung zu empfehlen. Die letztendliche Entscheidungsgrundlage sollten immer dynamische Investitionsrechnungen in Verbindung mit prozesstechnischen, ökologischen, sicherheitstechnischen und juristischen Daten bilden. Als weitere Anwendungsmöglichkeit verweist Zantow¹²⁰ auf Fälle mit zu großer Unsicherheit in Bezug auf Prognosedaten. Die Verwendung einer dynamischen Investitionsrechnung suggeriert dann nur Scheingenauigkeit.¹²¹

Wie Abbildung 26 zeigt, können statische Investitionsrechnungen in Kostenvergleiche, Gewinnvergleiche, Rentabilitätsvergleiche und Amortisationsvergleiche unterteilt werden.

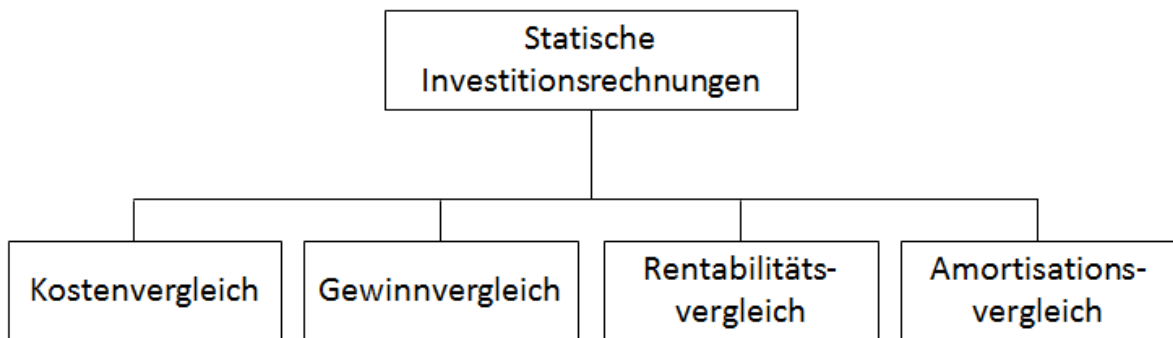


Abbildung 26: Statische Investitionsrechnungsverfahren¹²²

Der Zusammenhang der drei erstgenannten Verfahren wird dabei aus der Formel für die Gesamtkapitalrentabilität leicht ersichtlich:

$$\text{Gesamtkapitalrentabilität} = \frac{\text{Kapitalgewinn}}{\text{Gesamtkapital}} = \frac{(\text{Erlöse} - \text{Kosten}) + \text{Zinsen}}{\text{Gesamtkapital}}^{123}$$

¹¹⁹ Vgl. Müller, D. (2006), S. 221.

¹²⁰ Vgl. Zantow, R. (2004), S. 302.

¹²¹ Vgl. Zantow, R. (2004), S. 300 ff.

¹²² Quelle: in modifizierter Form übernommen von Zantow, R. (2004), S. 300.

¹²³ Vgl. Zantow, R. (2004), S. 300.

Typischerweise wird jede Form der Vermögensanlage durch das Streben nach Erfolg, Liquidität und Sicherheit geprägt. Diese Ziele stehen (teilweise) in Konkurrenz zueinander und werden in der Literatur als das „magische Dreieck der Vermögensanlage“ bezeichnet (siehe Abbildung 27). In der Regel nimmt die Rendite ab, je kürzer das eingesetzte Kapital fest veranlagt wird. Gleichzeitig kann aber mit einer höheren Rendite gerechnet werden, wenn die Investition mit einem höheren Risiko behaftet ist. Das bedeutet also, dass alle drei Ziele nicht im selben Umfang erfüllt werden können (= Zielkonflikt).¹²⁴

Der (erwartete) Erfolg von Investitionsalternativen kann bei der Verwendung von statischen Verfahren mit Hilfe eines Rentabilitätsvergleiches überprüft werden. Ein Maximum an Rendite kann entweder durch Minimierung der eingesetzten Mittel und/oder Gewinnmaximierung (Gewinnvergleich) erreicht werden. An dieser Stelle sei darauf verwiesen, dass alle Investitionsrechnungen das für die Investition erforderliche Gesamtkapital als gegeben annehmen. Die Gewinnmaximierung kann demnach ein mögliches Mittel zur Maximierung der Rendite sein. Bei gegebenen Erlösen steigt der Gewinn wiederum bei minimalen Kosten (Kostenvergleich). Eine Kostenminimierung kann demnach wiederum ein Mittel zur Gewinnmaximierung sein. Diese Beschreibung soll nicht nur den Zusammenhang dieser drei Rechnungsarten verdeutlichen sondern auch darauf hinweisen, dass die Maximierung der Rendite meist das übergeordnete Ziel im Hinblick auf den finanziellen Erfolg einer Investition ist. Ein Gewinnvergleich zwischen zwei Investitionsalternativen sollte also nur dann angewandt werden, wenn der Kapitaleinsatz vernachlässigt (gleich oder unbekannt) werden kann. Ein Kostenvergleich wiederum ist ausschließlich dann anzuwenden, wenn der Erlös von Investitionsalternativen vernachlässigt werden kann. Im Gegensatz dazu stehen beim vierten Verfahren (Amortisationsrechnung) die Liquidität und die Sicherheit im Mittelpunkt. Die Zeit bis zum vollständigen Rückfluss des investierten Betrages wird als Risikozeitspanne angesehen. Demnach sind Investitionsvorhaben mit geringer Amortisationsdauer grundsätzlich mit geringerem Risiko verbunden. Die Auswirkungen von Investitionen auf Prozesse, Produkte, Umwelt usw. können ebenfalls Risiken verursachen und sind deshalb mit Hilfe einer Argumenten Bilanz zu erfassen.¹²⁵

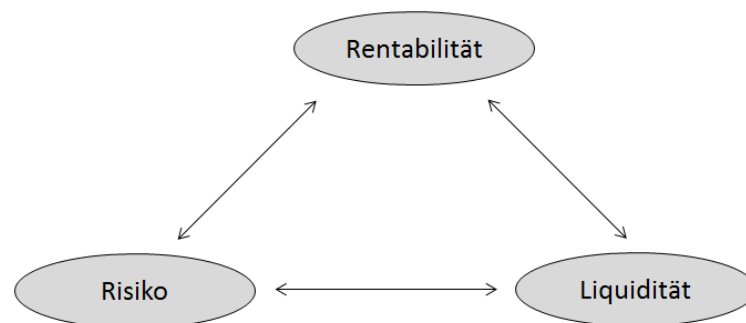


Abbildung 27: Dreieck der Vermögensanlage¹²⁶

¹²⁴ Vgl. Bleis, C. (2012), S. 3.

¹²⁵ Vgl. Zantow, R. (2004), S. 300 ff.

¹²⁶ Quelle: in modifizierter Form übernommen von Bleis, C. (2012), S. 3.

- **Kostenvergleichsrechnung**

Bei der Kostenvergleichsrechnung werden Investitionsalternativen mit identen Leistungsmerkmalen miteinander verglichen. Die erwirtschafteten Erlöse werden bei dieser Rechnungsart nicht berücksichtigt. Als Entscheidungsgrundlage stehen folglich ausschließlich die durch die Investition verursachten Kosten zur Verfügung. Die Kosten können entweder pro Periode oder pro Stück betrachtet werden. Ein Periodenvergleich unterstellt identen quantitativen und qualitativen Output (beispielsweise Ersatzinvestitionen). Bei Kapazitätsunterschieden (z.B.: Rationalisierungsinvestitionen) ist ein Stückkostenvergleich durchzuführen. Falls es zusätzlich zu einem Kapazitätsunterschied auch qualitative Differenzen zwischen den einzelnen Investitionsalternativen gibt, sind Gewinn- oder Rentabilitätsvergleiche anzuwenden.¹²⁷

Um die absolute Vorteilhaftigkeit eines Investitionsobjekts bei dieser Rechnungsart beurteilen zu können, muss im Vorfeld eine Obergrenze an Perioden- oder Stückkosten vorgegeben werden (= erwarteter Erlös). Beim Vergleich zwischen Investitionsalternativen ist hingegen jenes Investitionsobjekt als relativ vorteilhaft einzustufen, welches die geringsten Perioden- bzw. Stückkosten aufweist.¹²⁸

Grundsätzlich sollten bei dieser Rechnungsart sämtliche Kosten (siehe Tabelle 6), die durch die Investition verursacht werden, mit einbezogen werden. Bei einem einfachen Vergleich zwischen Alternativen (ohne nachfolgendem Gewinn- oder Rentabilitätsvergleich) kann die Rechnung auch auf jene Kosten beschränkt werden, die in unterschiedlicher Höhe vorliegen.¹²⁹

Tabelle 6: Auswahl an einzubeziehenden Kosten in der Kostenvergleichsrechnung¹³⁰

Variable Kosten (leistungsabhängige Kosten)	Fixkosten (leistungsunabhängige Kosten)
Löhne und Lohnnebenkosten	Kalkulatorische Abschreibungen
Material-, und Betriebsstoffkosten	Kalkulatorische Zinsen
Energiekosten	
Raumkosten	
Werkzeugkosten	
Instandhaltungs- und Reparaturkosten	

Die kalkulatorische Abschreibung beschreibt die tatsächliche Wertminderung von Anlagevermögen und spiegelt so den periodischen Verbrauch eines Investitionsobjekts

¹²⁷ Vgl. Heesen, B. (2010), S. 6 f.

¹²⁸ Vgl. Zantow, R. (2004), S. 303.

¹²⁹ Vgl. Zantow, R. (2004), S. 303.

¹³⁰ Vgl. Heesen, B. (2010), S. 7.

wieder. In den meisten Fällen wird bei der Kostenvergleichsrechnung von einer linearen Abschreibung ausgegangen wonach sich die Kosten für eine Periode folgendermaßen ergeben:¹³¹

$$\text{Kalkulatorische Abschreibung} = \frac{AW - RW}{N}$$

AW = Anschaffungswert, -kosten (GE)

RW = Restwert des Investitionsobjekts am Ende der kalkulierten Nutzungsdauer (GE)

N = Nutzungsdauer des Investitionsobjekts (ZE)

Die kalkulatorischen Zinsen ergeben sich aus der Multiplikation des durchschnittlich gebundenen Kapitals mit dem kalkulatorischen Zinssatz. Der kalkulatorische Zinssatz wiederum hängt von der Finanzierung der Investition ab. Bei reiner Eigenkapitalfinanzierung kann der Zins beispielsweise durch Addition eines Basiszinssatzes (risikofreie Anlage) mit einem Risikozuschlag berechnet werden. Bei der Finanzierung einer Investition über Eigen- und Fremdkapital kann der kalkulatorische Zinssatz unter Berücksichtigung der steuerlichen Abzugsfähigkeit von Fremdkapitalzinsen (1-s) folgendermaßen berechnet werden:¹³²

$$i = i_{EK} \cdot \frac{EK}{GK} + i_{FK} \cdot (1 - s) \cdot \frac{FK}{GK}$$

i = Kalkulatorischer Zinssatz

i_{EK} = Eigenkapitalzinssatz

i_{FK} = Fremdkapitalzinssatz

EK = Eigenkapital (GE)

FK = Fremdkapital (GE)

GK = Gesamtkapital (EK + FK)

s = Ertragssteuersatz eines Unternehmens

In der betrieblichen Praxis werden kalkulatorische Zinssätze jedoch nur selten für jedes Investitionsvorhaben berechnet. Je nach Investitionszweck gibt das Controlling einen kalkulatorischen Zinssatz vor, der bei der Durchführung des Investitionsantrags zu berücksichtigen ist. Die zweite benötigte Größe zur Berechnung der kalkulatorischen Zinsen ist das durchschnittlich gebundene Kapital. Die Höhe dieses Betrags richtet sich in erster Linie nach der Abschreibungsform des Investitionsobjektes. Bei Objekte ohne Abschreibung (Grundstücke) sind während der Nutzungsdauer die gesamten Anschaffungskosten gebunden. Bei Investitionsobjekte mit planmäßiger Abschreibung aber ohne Restwert am Ende der Nutzungsdauer ergibt sich das durchschnittlich gebundene Kapital aus der Hälfte der Anschaffungskosten. Die Situation mit

¹³¹ Vgl. Becker, H.P. (2013), S. 42.

¹³² Vgl. Becker, H.P. (2013), S. 43 f.

planmäßiger Abschreibung und mit Restwert am Ende der Nutzungsdauer ist grafisch durch Abbildung 28 dargestellt.¹³³

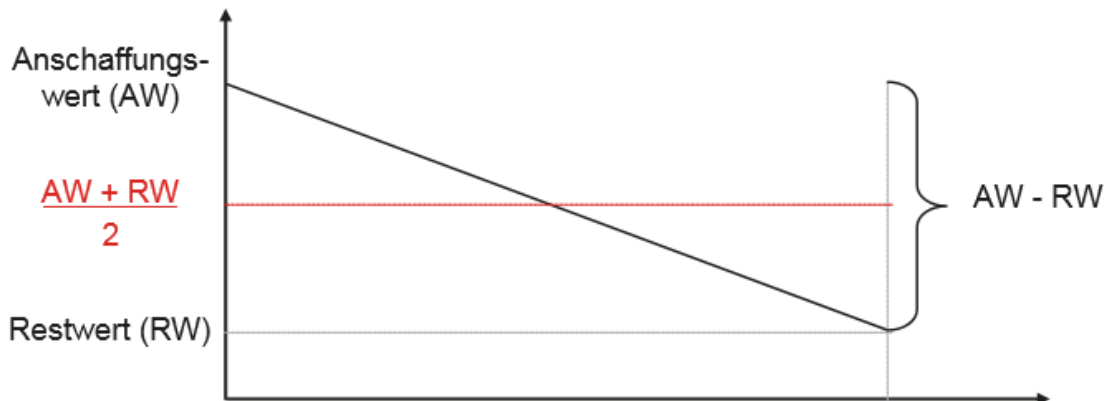


Abbildung 28: Grafische Darstellung des durchschnittlich gebundenen Kapitals¹³⁴

Somit können die kalkulatorischen Zinsen für Investitionsobjekte mit planmäßiger Abschreibung folgendermaßen berechnet werden:¹³⁵

$$\text{Kalkulatorische Zinsen} = i \cdot \frac{AW + RW}{2}$$

Durch Addition der laufenden Kosten mit den kalkulatorischen Abschreibungen und kalkulatorischen Zinsen ergeben sich wiederum die durchschnittlichen Periodenkosten eines Investitionsobjekts.¹³⁶

Periodenkosten = kalk. Abschreibung + kalk. Zinsen + laufende Kosten

$$K = \frac{AW - RW}{N} + i \cdot \frac{AW + RW}{2} + K_L$$

K = Durchschnittliche Periodenkosten (GE/ZE)

K_L = Laufende durch das Investitionsobjekt verursachte Kosten (GE/ZE)

N = Nutzungsdauer des Investitionsobjekts (ZE)

i = Kalkulatorischer Zinssatz auf das durchschnittlich durch die Investition gebundene Kapital bei linearer Abschreibung

AW = Anschaffungswert, -kosten (GE)

RW = Restwert des Investitionsobjekts am Ende der kalkulierten Nutzungsdauer (GE)

¹³³ Vgl. Becker, H.P. (2013), S. 43 f.

¹³⁴ Quelle: Heesen, B. (2010), S. 8.

¹³⁵ Vgl. Becker, H.P. (2013), S. 43.

¹³⁶ Vgl. Becker, H.P. (2013), S. 45.

Einschränkend kann für die Kostenvergleichsrechnung festgehalten werden:

- Identen Leistungserträge werden vorausgesetzt
- Die Auswirkung des Kapitaleinsatzes auf die Wirtschaftlichkeit (Rentabilität) wird nicht berücksichtigt
- Der zeitliche Anfall der Zahlungsströme wird nicht (vollständig) berücksichtigt
- Betriebliche Interdependenzen werden nicht berücksichtigt
- Auswirkungen auf die Zahlungsfähigkeit (Liquidität) werden nicht berücksichtigt
- Prozesstechnische, ökologische, sicherheitstechnische, soziale und rechtliche Auswirkungen (Risiken) werden nicht berücksichtigt

- **Gewinnvergleichsrechnung**

Im Gegensatz zur Kostenvergleichsrechnung wird neben den (durch die Investition verursachten) Kosten bei der Gewinnvergleichsrechnung auch die Auswirkung der Investition auf die Absatzpreise der Produkte berücksichtigt. Die Gewinnvergleichsrechnung steht in einem engen Naheverhältnis zur Kostenvergleichsrechnung und kann als Erweiterung betrachtet werden. Mit dieser Rechnungsart können folglich auch qualitative Unterschiede von Investitionsalternativen (bei vorhandener Datenlage) berücksichtigt werden. Wie beim Kostenvergleich kann der Periodengewinn oder (bei Kapazitätsunterschied) der Gewinn pro Stück berechnet werden.¹³⁷

Eine absolute Vorteilhaftigkeit ist bei der Gewinnvergleichsrechnung gegeben, wenn der Periodengewinn oder der Gewinn pro Stück größer Null ist. Die relative Vorteilhaftigkeit eines Investitionsobjektes wird hingegen durch den Vergleich der Investitionsalternativen hinsichtlich des Periodengewinns (Gewinn pro Stück) ermittelt.

Der Gewinn ergibt sich durch Subtraktion der angefallenen Kosten von den erzielten Umsatzerlösen in der betrachteten Periode. Die Gewinne werden in der Regel über die geplante Nutzungsdauer der Investition abgeschätzt und dann ein Durchschnittsgewinn pro Zeiteinheit (meist Jahr) berechnet. Vor allem bei Rationalisierungsinvestitionen werden oft keine Erlöse erzielt sondern bisherige Auszahlungen eingespart. In diesem Fall können die eingesparten Auszahlungen dem Investitionsobjekt als Erlöse zugeschrieben werden.¹³⁸

$$\text{Gewinn} = \text{Umsatzerlös} - \text{Kosten}$$

Einschränkend kann für die Gewinnvergleichsrechnung festgehalten werden:

- Die Auswirkung des Kapitaleinsatzes auf die Wirtschaftlichkeit (Rentabilität) wird nicht berücksichtigt
- Der zeitliche Anfall der Zahlungsströme wird nicht (vollständig) berücksichtigt
- Betriebliche Interdependenzen werden nicht berücksichtigt
- Auswirkungen auf die Zahlungsfähigkeit (Liquidität) werden nicht berücksichtigt
- Prozesstechnische, ökologische, sicherheitstechnische, soziale und rechtliche Auswirkungen (Risiken) werden nicht berücksichtigt

¹³⁷ Vgl. Heesen, B. (2010), S. 9 f.

¹³⁸ Vgl. Bleis, C. (2012). S. 2.

- **Rentabilitätsvergleichsrechnung**

Sobald sich Investitionsalternativen hinsichtlich ihres durchschnittlich gebundenen Kapitals voneinander unterscheiden und zugleich Investitionskapital nicht in unbegrenzter Höhe zur Verfügung steht, wird der finanzielle Erfolg (bei Verwendung von statischen Methoden) meist mit Hilfe eines Rentabilitätsvergleiches bestimmt.¹³⁹

Gewinn- bzw. Kostenvergleiche liefern in diesen Situationen keine aussagekräftigen Kennwerte, da es einen großen Unterschied macht ob ein Gewinn von 1.000 € mit einem Kapitaleinsatz von 10.000 € oder 1.000.000 € erzielt wurde.¹⁴⁰

Bei der Rentabilitätsvergleichsrechnung wird der durchschnittliche Periodengewinn einer Investition vor Zinsen (= Bruttorendite) mit dem durchschnittlich gebundenen Kapital ins Verhältnis gesetzt. Bei Rationalisierungsinvestitionen können anstelle des Gewinns auch durchschnittliche Kosteneinsparungen angesetzt werden.

$$\text{Rentabilität} = \frac{\text{Gewinn vor Zinsen}}{\text{durchschnittlicher Kapitaleinsatz}}^{141}$$

Der so berechnete Wert ergibt die Verzinsung des gebundenen Kapital (= Rentabilität). Eine absolute Vorteilhaftigkeit ist gegeben, wenn die Rentabilität einer Investition, die vom Unternehmen geforderte Mindestrendite (= kalkulatorischer Zinssatz) überschreitet. Eine direkte Vergleichbarkeit zwischen Investitionsalternativen ist allerdings nur unter folgenden Annahmen möglich:

1. Die Differenz des Kapitaleinsatzes kann zu gleicher Rendite veranlagt werden.
2. Der Kapitaleinsatz des kurzlebigeren Investitionsvorhabens kann zu gleicher Rendite wieder veranlagt werden.

Unter diesen Voraussetzungen ist die relative Vorteilhaftigkeit bei jener Investitionsalternative gegeben, welche die höchste Rentabilität aufweist.¹⁴²

Einschränkend kann für die Rentabilitätsvergleichsrechnung festgehalten werden:

- Der zeitliche Anfall der Zahlungsströme wird nicht (vollständig) berücksichtigt
- Betriebliche Interdependenzen werden nicht berücksichtigt
- Auswirkungen auf die Zahlungsfähigkeit (Liquidität) werden nicht berücksichtigt
- Prozesstechnische, ökologische, sicherheitstechnische, soziale und rechtliche Auswirkungen (Risiken) werden nicht berücksichtigt

¹³⁹ Vgl. Heesen, B. (2010), S. 10.

¹⁴⁰ Vgl. Zantow, R. (2004), S. 313.

¹⁴¹ Vgl. Müller, D. (2006), S.225.

¹⁴² Vgl. Heesen, B. (2010), S. 10 ff.

- **Amortisationsvergleichsrechnung**

Im Gegensatz zu den bisher betrachteten statischen Verfahren werden mit der Amortisationsrechnung die Ziele Sicherheit und Liquidität untersucht. Mit diesem Verfahren wird jener Zeitraum ermittelt, ab dem das eingesetzte Kapital (Anschaffungsauszahlung – Liquidationserlös) durch zukünftige Überschüsse wieder zurückerwirtschaftet wird. Diese Zeitspanne wird auch als Pay-back-time, Amortisationszeit oder Kapitalrückflusszeit bezeichnet. Es wird unterstellt, dass sich das Risiko einer Investition mit steigender Amortisationszeit erhöht. Das bedeutet je schneller das eingesetzte Kapital in Form von Rückflüssen zurückgewonnen werden kann, desto geringer ist das mit der Investition verbundene Risiko. Dieser Rückschluss ist allerdings nur bedingt zulässig, da die Auswirkungen der Investition auf Prozesse, Produkte, Umwelt und Mitarbeiter völlig unberücksichtigt bleiben. Wenn also in diesem Zusammenhang von Risiko gesprochen wird, dann wird ausschließlich auf das finanzwirtschaftliche Risiko, welches mit langer Kapitalbindung einhergeht, Bezug genommen. Aus diesem Grund wird die Amortisationszeit in dieser Masterarbeit nur als Kennwert zur Beurteilung der Liquidität und nicht zur Risikobeurteilung verwendet.¹⁴³

Eine absolute Vorteilhaftigkeit ist bei diesem Verfahren gegeben, wenn die Nutzungsdauer größer der Amortisationsdauer ist. Ab diesem Zeitpunkt werden mit der getätigten Investition Gewinne erwirtschaftet. Die relative Vorteilhaftigkeit liegt hingegen bei jener Investitionsalternative mit der geringsten Amortisationszeit vor. An dieser Stelle muss darauf hingewiesen werden, dass diese Rechnungsart niemals alleine sondern nur in Kombination mit Gewinn-, Kosten- oder Rentabilitätsvergleich zur Beurteilung von Investitionsobjekten herangezogen werden sollte. Mit der Amortisationsrechnung wird ausschließlich der Zeitraum bis zur Rückgewinnung des Kapitaleinsatzes betrachtet. Die Entwicklung nach der Amortisationszeit sowie die Wirtschaftlichkeit der Investition an sich bleiben unberücksichtigt.¹⁴⁴

Die statische Amortisationsrechnung kann mit Hilfe von zwei Methoden erfolgen:¹⁴⁵

- Durchschnittsmethode
- Kumulationsmethode

Bei der Durchschnittsmethode wird das eingesetzte Kapital durch die durchschnittlichen Rückflüsse in der betrachteten Zeiteinheit (meistens pro Jahr) dividiert:

$$\text{Amortisationszeit} = \frac{\text{Anschaffungskosten} - \text{Liquidationserlös}}{\text{Gewinn} + \text{Abschreibungen}}^{146}$$

¹⁴³ Vgl. Heesen, B. (2010), S. 12 ff.

¹⁴⁴ Vgl. Becker, H.P. (2013), S. 54 ff.

¹⁴⁵ Vgl. Heesen, B. (2010), S. 13.

¹⁴⁶ Vgl. Becker, H.P. (2013), S. 55.

Es wird also ein Durchschnittswert für die jährlichen Rückflüsse angesetzt und auf Basis dieser charakteristische Periode die Amortisationszeit berechnet.¹⁴⁷

Falls jedoch die jährlichen Rückflüsse nicht dieselbe Höhe aufweisen, so sollte auf die Kumulationsmethode zurückgegriffen werden. Diese Methode bedient sich (untypisch für statische Betrachtungen) mehrerer Perioden. Da jedoch der zeitliche Anfall der Rückflüsse wertmäßig unberücksichtigt bleibt, handelt es sich dennoch um ein statisches Rechnungsverfahren. Bei der Kumulationsmethode werden die jährlichen Rückflüsse aufsummiert bis die Summe dem eingesetzten Kapital entspricht. Dieser Zeitpunkt wird dann als Amortisationszeitpunkt t_a bezeichnet:

$$\text{Anschaffungskosten} - \text{Liquidationserlös} = \sum_{t=1}^{t_a} (\text{Gewinn} + \text{Abschreibungen})_t \quad {}^{148}$$

Um bei der Kumulationsmethode Amortisationszeiten kleiner der betrachteten Zeiteinheit (z.B.: Jahr) angeben zu können, wird vereinfacht von einer linearen Entwicklung der Amortisation zwischen zwei Zeiteinheiten ausgegangen. Der exakte Amortisationszeitpunkt kann dann mit Hilfe linearer Interpolation ermittelt werden.¹⁴⁹

Einschränkend kann für die Amortisationsrechnung festgehalten werden:

- Der Zeitraum nach Amortisationszeit bis Ende der Nutzungsdauer wird nicht berücksichtigt
- Der monetäre Erfolg (Gewinn, Rentabilität) von Investitionen wird nicht berücksichtigt
- Der zeitliche Anfall der Zahlungsströme wird nicht (vollständig) berücksichtigt
- Betriebliche Interdependenzen werden nicht berücksichtigt
- Prozesstechnische, ökologische, sicherheitstechnische, soziale und rechtliche Auswirkungen (Risiken) werden nicht berücksichtigt

3.3 Dynamische Investitionsrechnungsverfahren

Im Gegensatz zu den bisher betrachteten statischen Verfahren werden bei dynamischen Rechnungsarten keine Durchschnittswerte gebildet, sondern alle Ein- und Auszahlungen über die gesamte Nutzungsdauer erfasst und in die Bewertung mit einbezogen. Darüber hinaus bilden nicht Kosten und Erlöse sondern Zahlungsströme die Basis aller Berechnungen. Mit Hilfe der Zinseszinsrechnung wird der Barwert der Zahlungsströme ermittelt und somit berücksichtigt, dass Ein- bzw. Auszahlungen über die Nutzungsdauer hinweg auch in unterschiedlicher Höhe anfallen können. Die Zahlungsströme werden dabei auf einen definierten Zeitpunkt abgezinst (meist auf den

¹⁴⁷ Vgl. Müller, D. (2006), S.226 ff.

¹⁴⁸ Vgl. Müller, D. (2006), S.226.

¹⁴⁹ Vgl. Zantow, R. (2004), S. 317.

Zeitpunkt unmittelbar vor der Investitionsdurchführung) oder auf einen Zeitpunkt nach Ende der Nutzungsdauer aufgezinnt. Bei allen dynamischen Verfahren werden Investitionen demnach als Zahlungsreihen betrachtet, die aus Ein- und Auszahlungen bestehen. Die Investition beginnt mit einer Auszahlung zum Zeitpunkt null (Anschaffungsauszahlung). Während der gesamten Nutzungsdauer fallen fixe (Betriebsbereitschaft) und laufende Auszahlungen (Material, Energie, Personal, etc.) an. Einzahlungen entstehen durch den Verkauf von Produkten, Liquidationserlöse oder bei Rationalisierungsinvestitionen durch vermiedene Auszahlungen.¹⁵⁰ An dieser Stelle muss darauf hingewiesen werden, dass alle Aufwendungen, die nicht auszahlungswirksam werden (Abschreibungen, kalkulatorische Zinsen) sowie Erträge, die nicht einzahlungswirksam werden (Auflösung von Rückstellungen), bei dynamischen Verfahren nicht erfasst werden dürfen.¹⁵¹

Zu den wichtigsten Vertretern der dynamischen Investitionsrechnung zählen die Kapitalwertmethode, die Annuitätenmethode, die Methode des internen Zinssatzes und die dynamische Amortisationsrechnung (siehe Abbildung 29). Diese vier Verfahren werden im folgenden Abschnitt detailliert beschrieben und ihre jeweiligen Vor- und Nachteile diskutiert. Aus der einführenden Beschreibung der dynamischen Investitionsrechnung ist bereits ihre Überlegenheit gegenüber statischen Methoden ersichtlich. In der betrieblichen Praxis kommen dynamische Verfahren dennoch in erster Linie bei größeren Investitionsvorhaben auf Grund ihrer vermeintlich komplexen Anwendung zum Einsatz.¹⁵²

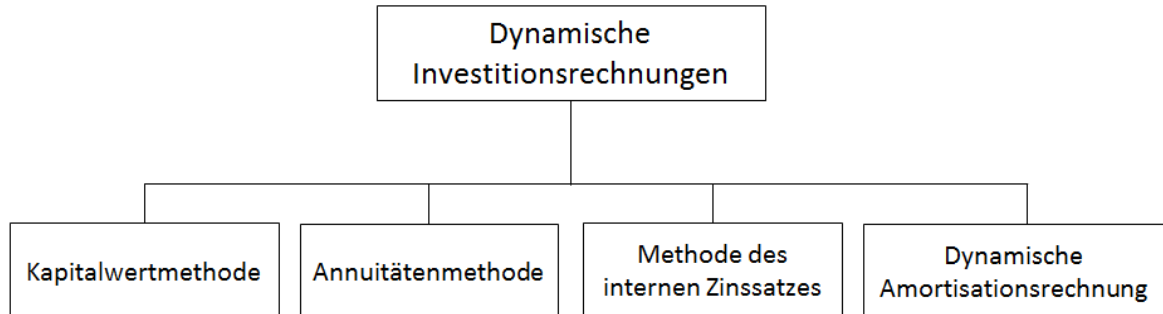


Abbildung 29: Dynamische Investitionsrechnungsverfahren¹⁵³

Wie bereits erwähnt wird der unterschiedliche zeitliche Anfall der Zahlungsströme mit Hilfe der Zinseszinsrechnung berücksichtigt. Dabei wird der auf einen Bezugszeitpunkt auf- oder abgezinste Betrag als Barwert bezeichnet. Um den Zukunftswert (Barwert zum Zeitpunkt n) einer gegenwärtigen Zahlung berechnen zu können, muss ihr Zeitwert mit einem Aufzinsungsfaktor multipliziert werden:¹⁵⁴

¹⁵⁰ Vgl. Zantow, R. (2004), S. 321.

¹⁵¹ Vgl. Heesen, B. (2010), S. 15 ff.

¹⁵² Vgl. Heesen, B. (2010), S. 15.

¹⁵³ Quelle: in modifizierter Form übernommen von Götz, U. (2008), S. 70.

¹⁵⁴ Vgl. Heesen, B. (2010), S. 58 f.

$$\text{Zukunftswert} = \text{Zeitwert} \cdot (1 + i)^n$$

i = Kalkulationszinssatz

n = Perioden (Jahre)

$(1+i)^n$ = Aufzinsungsfaktor

Um hingegen den gegenwärtigen Wert (Barwert zum Zeitpunkt null) einer zukünftigen Zahlung berechnen zu können, muss ihr Zeitwert abgezinst (diskontiert) werden.¹⁵⁵

$$\text{Barwert} = \text{Zeitwert} \cdot \frac{1}{(1 + i)^n}$$

Der Kalkulationszinssatz erfüllt bei dynamischen Verfahren neben der Aufgabe zeitlich unterschiedlich anfallende Zahlungsströme vergleichbar zu machen, auch die Aufgabe die Kapitalkosten (bei statischen Verfahren durch kalkulatorische Zinsen berücksichtigt) wiederzugeben. Für die Ermittlung des Kalkulationszinssatzes werden zwei unterschiedliche Denkmuster (Konzept der Opportunitätskosten – Konzept der durchschnittlichen Kapitalkosten) verwendet. Bei dem Konzept der Opportunitätskosten wird eine erwartete Mindestrendite festgelegt, welche durch die Investition erwirtschaftet werden muss. Anstatt die zur Verfügung stehenden Mittel für die Finanzierung der geplanten Investition zu verwenden, hätten diese ebenso am Kapitalmarkt angelegt werden können. Die dadurch entgangenen Einkünfte sind demnach ebenfalls zu berücksichtigen. Der Kalkulationszinssatz ergibt sich dann in der Regel aus dem Zinssatz für langfristiges Fremdkapital inklusive einem Risikozuschlag. Das Konzept der durchschnittlichen Kapitalkosten besagt hingegen, dass der Kalkulationszinsfuß mindestens gleich den durchschnittlichen Kapitalkosten der Unternehmung sein muss. Ist ein Unternehmen also zu 60% über Fremdkapital (Zinssatz 7%) und zu 40% über Eigenkapital (Rendite 25%) finanziert, ergibt sich ein Kalkulationszinssatz von 14,2%. In der betrieblichen Praxis wird in der Regel dem Konzept der Opportunitätskosten Vorzug gegeben.¹⁵⁶

- **Kapitalwertmethode**

Die Kapitalwertmethode wird oft als das dynamische Äquivalent zur Gewinnvergleichsrechnung bezeichnet. Mit dieser Methode werden Zahlungsüberschüsse (abgezinst auf den Zeitpunkt null) unterschiedlicher Investitionsalternativen miteinander verglichen. Während die Gewinnvergleichsrechnung auf charakteristischen Perioden (Durchschnittswerten) basiert, müssen bei der Kapitalwertmethode alle Zahlungsströme über die die gesamte Nutzungsdauer hinweg erfasst und vergleichbar gemacht werden. Zu diesem Zweck werden alle Ein- und Auszahlungen auf den

¹⁵⁵ Vgl. Heesen, B. (2010), S. 60 f.

¹⁵⁶ Vgl. Staehlin, E. (1993), S. 55 ff.

Zeitpunkt der Anschaffungsauszahlung mit dem Kalkulationszinssatz i abgezinst (diskontiert):¹⁵⁷

$$K_0 = -A_0 + \sum_{t=1}^n \frac{E_t - A_t}{(1+i)^t} + \frac{L}{(1+i)^n}$$
¹⁵⁸

K_0 = Kapitalwert zum Zeitpunkt null

A_0 = Anschaffungsauszahlung zum Zeitpunkt null

n = Nutzungsdauer (Jahre)

E_t = Einzahlung zum Zeitpunkt t

A_t = Auszahlung zum Zeitpunkt t

L = Liquidationserlös

Der Kapitalwert entspricht demnach der Summe aller auf Zeitpunkt null (unmittelbar vor Investitionsbeginn) abgezinsten Ein- und Auszahlungen, die mit der Investition in Verbindung gebracht werden können. Ein positiver Kapitalwert bedeutet für den Investor, dass alle eingesetzten Mittel durch die Investition wieder erwirtschaftet und diese zusätzlich während der Investitionsdauer mit dem Kalkulationszinsfuß i verzinst werden. Der darüber hinaus generierte Überschuss ist gleich der Höhe des positiven Kapitalwerts. Somit ist eine absolute Vorteilhaftigkeit automatisch bei positivem Kapitalwert gegeben. Bei unterschiedlichen Investitionsalternativen ist jene mit dem höchsten Kapitalwert zu wählen (= relative Vorteilhaftigkeit). Wie auch bei allen statischen Methoden wird unterstellt, dass der Investor bei Unterschieden hinsichtlich Nutzungsdauer und Anschaffungsauszahlung, die ihm zur Verfügung stehenden freien Mittel jederzeit zum Kalkulationszinsfuß anlegen kann.¹⁵⁹

Einschränkend kann für die Kapitalwertmethode festgehalten werden:

- Die Auswirkung des Kapitaleinsatzes auf die Wirtschaftlichkeit (Rentabilität) wird nicht berücksichtigt
- Betriebliche Interdependenzen werden nicht berücksichtigt
- Auswirkungen auf die Zahlungsfähigkeit (Liquidität) werden nicht berücksichtigt
- Prozesstechnische, ökologische, sicherheitstechnische, soziale und rechtliche Auswirkungen (Risiken) werden nicht berücksichtigt
- Die Anlage freier Mittel zum Kalkulationszinsfuß wird vorausgesetzt (= vollkommener Kapitalmarkt)

¹⁵⁷ Vgl. Zantow, R. (2004), S. 324 f.

¹⁵⁸ Vgl. Becker, H.P. (2013), S. 60 ff.

¹⁵⁹ Vgl. Müller, D. (2006), S.232 ff.

- **Annuitätenmethode**

Die Annuitätenmethode steht in einem engen Naheverhältnis zur Kapitalwertmethode. Während bei letzterer der gesamte (durch die Investition generierte) Überschuss berechnet wird, werden mit Hilfe der Annuitätenmethode gleich hohe periodische Zahlungsüberschüsse ermittelt. Als Annuität wird demnach eine äquivalente und äquidistante Zahlungsreihe bezeichnet. Das bedeutet der Kapitalwert wird in Beträge von gleichem Wert (äquivalent) und gleicher Periodizität (äquidistant) unterteilt. Die Annuität kann bei bereits berechnetem Kapitalwert einfach durch Multiplikation mit dem Wiedergewinnungsfaktor ermittelt werden:¹⁶⁰

$$A = K_n \cdot \frac{(1+i)^n \cdot i}{(1+i)^n - 1}^{161}$$

A = Annuität

K_n = Kapitalwert zum Zeitpunkt n

$\frac{(1+i)^n \cdot i}{(1+i)^n - 1}$ = Wiedergewinnungsfaktor

Bei positiver Annuität ist in jedem Fall absolute Vorteilhaftigkeit gegeben. Sie entspricht dem Betrag, der dem Investor bei Durchführung der Investition in jeder Periode zur Verfügung steht.¹⁶² Beim Vergleich von Investitionsalternativen wird durch die Annuitätenmethode berücksichtigt, dass ein in kürzerer Zeitspanne erwirtschafteter Kapitalwert besser bewertet werden muss. Die frei werdenden Mittel könnten ja möglicherweise zu besseren Konditionen als zum Kalkulationszinssfuß wieder veranlagt werden. Falls jedoch (wie bei der Kapitalwertmethode unterstellt) davon ausgegangen muss, dass freie Mittel nur zum Kalkulationszinssatz veranlagt werden können, müssen die Annuitäten der Investitionsobjekte auf gleiche Zeiträume bezogen werden. Dies führt zwangsweise zum selben relativen Ergebnis wie bei Verwendung der Kapitalwertmethode. Ist hingegen davon auszugehen, dass eine Investition nach Ablauf ihrer Nutzungsdauer immer zu gleichen Bedingungen (Verzinsung) wiederholt werden kann, ist eine kombinierte Anwendung der Kapitalwert- und Annuitätenmethode sinnvoll. Durch Division der Annuität mit dem Kalkulationszinssatz kann der Barwert der ewigen Rente berechnet werden:¹⁶³

$$\text{Kapitalwert} = \frac{\text{Annuität}}{\text{Kalkulationszinssatz}}^{164}$$

¹⁶⁰ Vgl. Becker, H.P. (2013), S. 65 ff.

¹⁶¹ Vgl. Becker, H.P. (2013), S. 66.

¹⁶² Vgl. Becker, H.P. (2013), S. 65 ff.

¹⁶³ Vgl. Götz, U. (2008), S. 93 ff.

¹⁶⁴ Vgl. Götz, U. (2008), S. 95.

Dieses Beispiel soll zeigen, dass bei Verwendung einer bestimmten Rechnungsart immer die zu Grunde liegenden Annahmen für den konkreten Anwendungsfall auf Plausibilität geprüft werden müssen.

Einschränkend kann für die Annuitätenmethode festgehalten werden:

- Die Auswirkung des Kapitaleinsatzes auf die Wirtschaftlichkeit (Rentabilität) wird nicht berücksichtigt
- Betriebliche Interdependenzen werden nicht berücksichtigt
- Auswirkungen auf die Zahlungsfähigkeit (Liquidität) werden nicht berücksichtigt
- Prozesstechnische, ökologische, sicherheitstechnische, soziale und rechtliche Auswirkungen (Risiken) werden nicht berücksichtigt
- Annahmen bezüglich der Veranlagung freier Mittel müssen definiert werden

• Methode des internen Zinssatzes

Die Methode des internen Zinssatzes (auch IRR - Internal Rate of Return genannt) ist sowohl mit der Kapitalwertmethode wie auch mit dem statischen Rentabilitätsvergleich verwandt. Die Rechnung an sich ähnelt stark der Kapitalwertmethode. Bei der verglichenen Zielgröße handelt es sich jedoch um das Verhältnis der diskontierten Überschüsse zum eingesetzten Kapital. Mit dieser Kenngröße wird angegeben, welcher Kalkulationszinssatz zu einem Kapitalwert von null bei Ablauf der Nutzungsdauer des Investitionsobjektes führt. Dies impliziert eine Annuität von exakt null und eine mit der Nutzungsdauer übereinstimmende Amortisationsdauer (= Break Even). Abbildung 30 zeigt grafisch die eben beschriebene Situation.¹⁶⁵

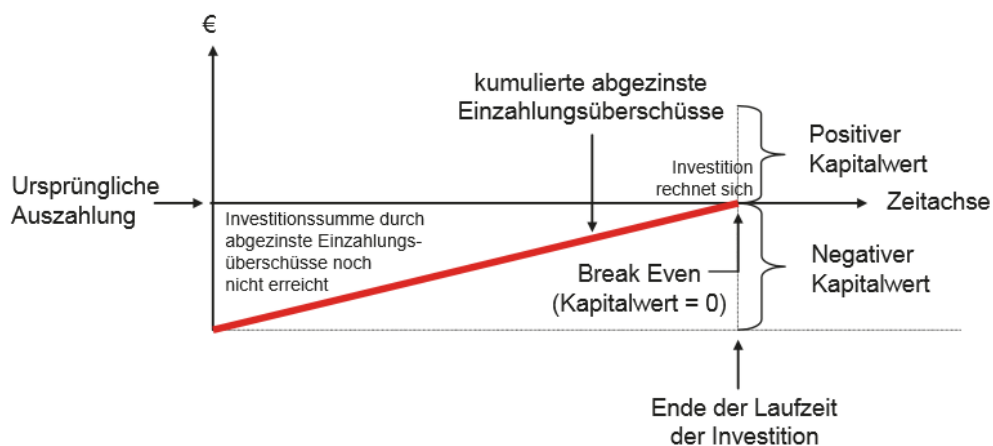


Abbildung 30: Grafische Darstellung des internen Zinssatzes¹⁶⁶

Somit ist eine absolute Vorteilhaftigkeit immer dann gegeben, wenn der interne Zinssatz größer als der Kalkulationszinssatz ist. Die positive Differenz aus Kalkulationszinssatz und internen Zinssatz wird auch als Investitionsmarge bezeichnet.

¹⁶⁵ Vgl. Heesen, B. (2010), S. 58 f.

¹⁶⁶ Quelle: Heesen, B. (2010), S. 59.

Beim Vergleich von Investitionsalternativen ist jenes Investitionsobjekt relativ vorteilhaft, welches den größten internen Zinssatz aufweist.¹⁶⁷

Für die Berechnung des internen Zinssatzes stehen mehrere Möglichkeiten zur Verfügung. Wie bereits erwähnt muss jener Zinssatz ermittelt werden, welcher einen Kapitalwert von null am Ende der Nutzungsdauer ergibt:

$$0 = -A_0 + \sum_{t=1}^n \frac{E_t - A_t}{(1+r)^t} \quad 168$$

A_0 = Anschaffungsauszahlung zum Zeitpunkt null

n = Nutzungsdauer (Jahre)

E_t = Einzahlung zum Zeitpunkt t

A_t = Auszahlung zum Zeitpunkt t

r = interner Zinssatz

Diese Gleichung kann bis zu einer Periode von $n = 4$ mathematisch mit Hilfe von Lösungsformeln exakt berechnet werden. Da jedoch die Anwendung dieser Formeln mit großem Aufwand verbunden ist, werden in der betrieblichen Praxis immer Näherungsverfahren zur Bestimmung des internen Zinssatzes verwendet. Dabei können zeitaufwendige Iterationsschleifen (Trail-and-Error-Methode) beispielsweise mit Hilfe des „Regula-Falsi“-Verfahrens vermieden werden.¹⁶⁹

$$r = i_1 + K_1 \cdot \frac{i_2 - i_1}{K_1 - K_2} \quad 170$$

K_1 = positiver Kapitalwert bei einem Zinssatz von i_1

K_2 = negativer Kapitalwert bei einem Zinssatz von i_2

i_1 = Versuchszinssatz 1, der einen positiven Kapitalwert zur Folge hat

i_2 = Versuchszinssatz 2, der einen negativen Kapitalwert zur Folge hat

Dabei müssen im Vorfeld der Berechnung zwei Zinssätze ermittelt werden, welche einmal einen positiven Kapitalwert (i_1) und einmal einen negativen Kapitalwert (i_2) zur Folge haben. Der interne Zinssatz wird dann durch lineare Interpolation ermittelt. Die Genauigkeit des Verfahrens, wird in erster Linie durch die Wahl der Zinssätze bestimmt. Umso geringer die Differenz zwischen den Vergleichszinssätzen ist, desto höher wird die Genauigkeit des Endergebnisses. Bei der Berechnung des internen Zinssatzes treten vor allem dann Probleme auf, sobald Zahlungsreihen mit

¹⁶⁷ Vgl. Götz, U. (2008), S. 96 f.

¹⁶⁸ Vgl. Becker, H.P. (2013), S. 63.

¹⁶⁹ Vgl. Heesen, B. (2010), S. 59 ff.

¹⁷⁰ Vgl. Heesen, B. (2010), S. 60 f.

mehrfachem Vorzeichenwechsel vorliegen. Dieser Umstand kann zu mehreren Nullstellen und somit zu keiner eindeutigen Lösung führen. Deshalb sollte die Methode des internen Zinssatzes eher als Zusatzinformation und nicht als alleiniges Entscheidungskriterium verwendet werden.¹⁷¹

Eine Alternative bietet die Verwendung des Annuitätenfaktors, welcher durch Abgleich mit entsprechenden Tabellenverzeichnissen¹⁷² ebenfalls auf einfache Art und Weise den internen Zinssatz liefert:

$$\text{Annuitätenfaktor} = \frac{A_0}{E_\emptyset - A_\emptyset} \quad 173$$

A_0 = Anschaffungsauszahlung zum Zeitpunkt null

E_\emptyset = Durchschnittliche Einzahlung

A_\emptyset = Durchschnittliche Auszahlung

Einschränkend kann für die Methode des internen Zinssatzes festgehalten werden:

- Betriebliche Interdependenzen werden nicht berücksichtigt
- Auswirkungen auf die Zahlungsfähigkeit (Liquidität) werden nicht berücksichtigt
- Prozesstechnische, ökologische, sicherheitstechnische, soziale und rechtliche Auswirkungen (Risiken) werden nicht berücksichtigt
- Die Anlage freier Mittel zum Kalkulationszinsfuß wird vorausgesetzt (= vollkommener Kapitalmarkt)
- Investitionen mit mehrfachem Vorzeichenwechsel liefern keine sinnvollen Ergebnisse
- Näherungslösung (ab Gleichung 4ten Grades)

- **Dynamische Amortisationsrechnung**

Diese Methode (vergleiche statische Amortisationszeit) untersucht primär die Ziele Sicherheit (ausschließlich aus finanzwirtschaftlicher Sicht) und Liquidität. Mit der dynamischen Amortisationszeit wird jene Zeitspanne ermittelt, bis die Anschaffungsauszahlung durch Einzahlungsüberschüsse (inklusive Verzinsung durch den Kalkulationszinsfuß) wieder zurückgewonnen wird. Es wird also jener Zeitpunkt gesucht, welcher einen Kapitalwert von exakt null aufweist (siehe Abbildung 31). Sobald die Nutzungsdauer größer der Amortisationsdauer ist, werden mit der Investition Gewinne erwirtschaftet und eine absolute Vorteilhaftigkeit ist jedenfalls gegeben. Beim Vergleich mehrerer Investitionsalternativen ist jenes Investitionsobjekt zu wählen, welches die geringste Amortisationszeit aufweist. Der einzige Unterschied

¹⁷¹ Vgl. Heesen, B. (2010), S. 60 ff.

¹⁷² Vgl. Staehlin, E. (1993), S. 190 f.

¹⁷³ Vgl. Staehlin, E. (1993), S. 63 ff.

zur statischen Amortisationszeit besteht darin, dass die Verzinsung des Kapitals in die Berechnung mit eingeht.¹⁷⁴

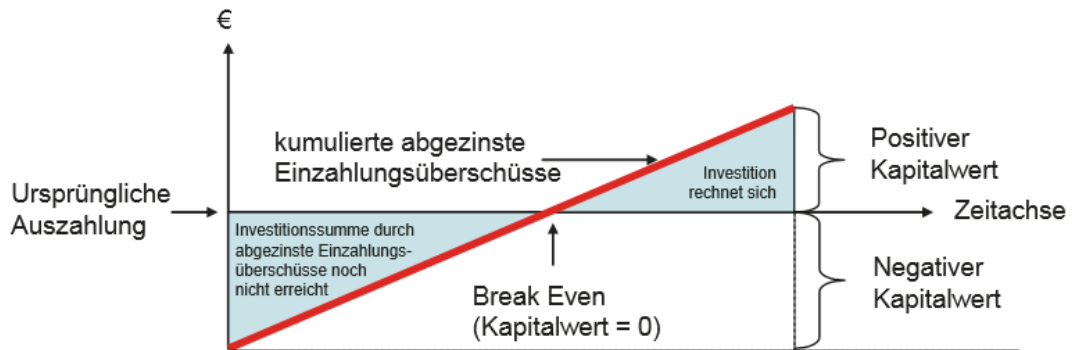


Abbildung 31: Grafische Darstellung der dynamischen Amortisationszeit ohne Vorzeichenwechsel der Einzahlungsüberschüsse¹⁷⁵

Die Problematik von Vorzeichenwechsel innerhalb der Zahlungsreihen wurde schon im letzten Abschnitt angesprochen und wird an dieser Stelle grafisch gezeigt (siehe Abbildung 32). Fallen während der Nutzungsdauer größere Auszahlungen an, können die diskontierten Einzahlungsüberschüsse nach Erreichen des Break-Even-Punktes noch einmal unter den ursprünglichen Kapitaleinsatz fallen. Dieser Umstand führt zu mehreren Nullstellen und zu keinem eindeutigen Ergebnis. Dieser konkrete Anwendungsfall kann weder durch die interne Zinssatz-Methode noch mit Hilfe der dynamischen Amortisationszeit charakterisiert werden.¹⁷⁶

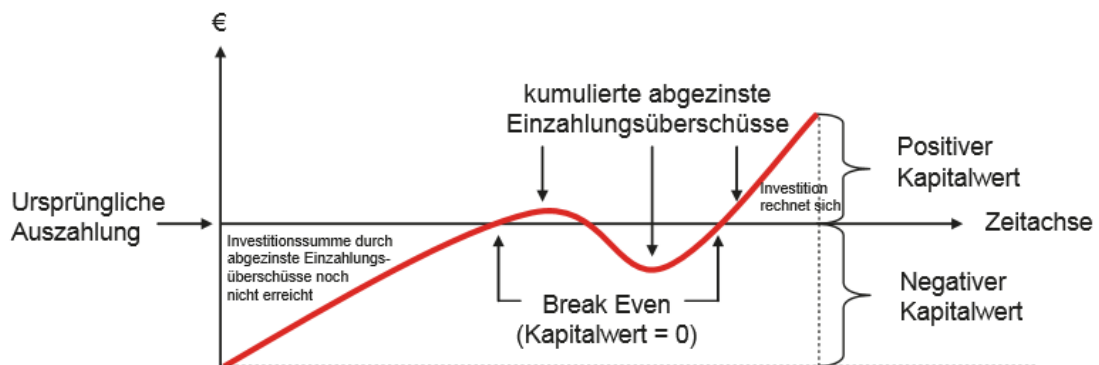


Abbildung 32: Grafische Darstellung der dynamischen Amortisationszeit mit Vorzeichenwechsel der Einzahlungsüberschüsse¹⁷⁷

Bei der Berechnung der dynamischen Amortisationszeit werden die diskontierten Einzahlungsüberschüsse jeder Periode von der Anschaffungsauszahlung abgezogen bis der Kapitalwert erstmals positiv wird. Die exakte Berechnung erfolgt dann mit Hilfe linearer Interpolation:

¹⁷⁴ Vgl. Götz, U. (2008), S. 107 ff.

¹⁷⁵ Quelle: Heesen, B. (2010), S. 41.

¹⁷⁶ Vgl. Heesen, B. (2010), S. 41 ff.

¹⁷⁷ Quelle: Heesen, B. (2010), S. 42.

$$\text{Dynamische Amortisationszeit} = t_{K_1} - \frac{K_1}{K_2 - K_1}^{178}$$

t_{K_1} = Zeitpunkt des letzten negativen Kapitalwerts

K_1 = letzter negativer Kapitalwert

K_2 = erster positiver Kapitalwert

Einschränkend kann für die dynamische Amortisationszeit festgehalten werden:

- Der Zeitraum nach Amortisationszeit bis Ende der Nutzungsdauer wird nicht berücksichtigt
- Der monetäre Erfolg (Gewinn, Rentabilität) von Investitionen wird nicht berücksichtigt
- Die Anlage freier Mittel zum Kalkulationszinsfuß wird vorausgesetzt (= vollkommener Kapitalmarkt)
- Betriebliche Interdependenzen werden nicht berücksichtigt
- Prozesstechnische, ökologische, sicherheitstechnische, soziale und rechtliche Auswirkungen (Risiken) werden nicht berücksichtigt
- Investitionen mit mehrfachem Vorzeichenwechsel liefern keine sinnvollen Ergebnisse

3.4 Methoden bei unsicherer Datenlage

Eine alle Investitionsrechnungsarten vereinende Grundbedingung, um sinnvolle Ergebnisse zu erhalten, sind verlässliche (sichere) Eingangsdaten. In vielen Anwendungsfällen können jedoch weder zukünftige Zahlungsströme, noch Nutzungsdauer oder Anschaffungsauszahlung eines Investitionsobjektes exakt vorhergesagt werden. Liegt also eine unsichere Datenlage vor, muss zuerst zwischen Risiko und Ungewissheit unterschieden werden. Eine Risikosituation ist immer dann gegeben, sobald die Wahrscheinlichkeiten für das Eintreten unterschiedlicher, entscheidungsrelevanter Ereignisse bekannt sind. Dabei spielt es keine Rolle ob die verwendeten Wahrscheinlichkeitsverteilungen empirisch ermittelt wurden oder auf subjektiven Erfahrungen (Expertenmeinung) beruhen. Sind jedoch keine Wahrscheinlichkeitsverteilungen bekannt, handelt es sich um eine Entscheidung unter Ungewissheit.¹⁷⁹

Es existieren zahlreiche Verfahren, die es ermöglichen das vorliegende Risiko oder die Ungewissheit soweit zu berücksichtigen, dass dennoch eine ökonomisch sinnvolle Entscheidung getroffen werden kann. Im folgenden Abschnitt wird dazu das Korrekturverfahren, die Risikoanalyse und die Sensitivitätsanalyse näher vorgestellt.

¹⁷⁸ Vgl. Heesen, B. (2010), S. 42.

¹⁷⁹ Vgl. Götz, U. (2008), S. 343 ff.

- **Korrekturverfahren**

Bei Anwendung von Korrekturverfahren werden die ursprünglichen Schätzwerte der Eingangsgrößen (Kalkulationszinssatz, Zahlungsgrößen oder Nutzungsdauer) mit Risikozuschlägen oder –abschlägen versehen. Dies kann in einfachster Ausprägung durch Erhöhung des Kalkulationszinsfußes um einen Risikofaktor erfolgen. Neben der Korrektur einer einzelnen Eingangsgröße, besteht auch die Möglichkeit alle mit Unsicherheit behafteten Parameter abzuändern. Diese Vorgehensweise führt oft dazu, dass Investitionsvorhaben deutlich schlechter als in der Realität dargestellt werden, da ausschließlich negative Abweichungen berücksichtigt werden. Außerdem erfolgt die Wahl der Korrekturfaktoren in der Regel pauschal und nach subjektivem Empfinden. Trotz der eben erwähnten Nachteile werden Korrekturerfahren auf Grund ihrer simplen Methodik in Unternehmen häufig angewendet.¹⁸⁰

- **Risikoanalysen**

Dieses Verfahren kann, wie der Name bereits vermuten lässt, ausschließlich in Risikosituationen (also bei bekannten Wahrscheinlichkeitsverteilungen) angewendet werden. Auf Basis der Wahrscheinlichkeitsverteilungen aller Eingangsgrößen wird eine Dichtefunktion für die betrachtete Zielgröße ermittelt.¹⁸¹

Bei der Wahl der Wahrscheinlichkeitsverteilungen kann sowohl auf diskrete (falls bekannt) als auch auf kontinuierliche Verteilungen (Normal-, Dreiecks- oder Trapezverteilung) zurückgegriffen werden. Typischerweise wird der Verteilungstyp vorgegeben und die dafür benötigten Parameter abgeschätzt. Bei Unterstellung einer Normalverteilung müssen etwa Erwartungswert und Standardabweichung vorgegeben werden. Bei Verwendung einer Dreiecksverteilung werden hingegen der Erwartungswert sowie ein unterer und ein oberer Grenzwert benötigt. Falls möglich, sollte bei Ermittlung der Wahrscheinlichkeitsverteilungen auf empirische Werte oder Expertenmeinungen zurückgegriffen werden. Als nächster Schritt müssen bei der Durchführung einer Risikoanalyse alle Abhängigkeiten zwischen den als unsicher eingestuftem Eingangsgrößen ermittelt werden. Diese Abhängigkeiten finden dann in Form von Korrelationskoeffizienten Berücksichtigung. Die darauf folgende Rechnung wird (je nach Komplexität) entweder analytisch oder simulativ durchgeführt. Da im Regelfall mehrere unsichere Eingangsgrößen vorliegen, findet der rein analytische Ansatz allerdings nur in seltenen Fällen Anwendung. Die simulative Methode bedient sich einer Vielzahl an Rechnungsdurchläufen (Schleifen). Bei jeder Schleife erfolgt eine zufällige Ziehung (entsprechend den Wahrscheinlichkeitsverteilungen) aller Eingangsgrößen, aus welchen dann die Zielgröße ermittelt wird. Aus dieser Vielzahl an Durchgängen kann dann eine Wahrscheinlichkeitsverteilung (Dichtefunktion) für die betrachtete Zielgröße ermittelt werden (siehe Abbildung 33). Aus dem Kurvenverlauf der berechneten Dichtefunktion lassen sich im Anschluss wichtige Erkenntnisse

¹⁸⁰ Vgl. Müller, D. (2006), S.251 f.

¹⁸¹ Vgl. Müller, D. (2006), S.254.

ableiten. So ist ein flacher Anstieg der Verteilungsfunktion beispielsweise ein Zeichen für eine große Streuung der betrachteten Zielgröße. Außerdem kann eine Verlustwahrscheinlichkeit für das untersuchte Investitionsvorhaben angegeben werden. Wie Abbildung 33 zeigt, kann diese Wahrscheinlichkeit aus dem Schnittpunkt der X-Achse (in diesem Fall der Kapitalwert) beim Wert null mit der Verteilungsfunktion abgelesen werden. Außerdem kann ein Erwartungswert und eine Standardabweichung für die betrachtete Zielgröße angegeben werden. Obwohl dieses Verfahren große Vorteile vor allem gegenüber dem Korrekturverfahren aufweist, wird es in der betrieblichen Praxis eher selten verwendet. Der Grund liegt vor allem in der äußerst schwierigen Datenerhebung. Viele Investitionsvorhaben besitzen derartige Alleinstellungsmerkmale, die weder empirische noch subjektive Angaben zur Wahrscheinlichkeitsverteilung bestimmter Eingangsgrößen erlauben.¹⁸²

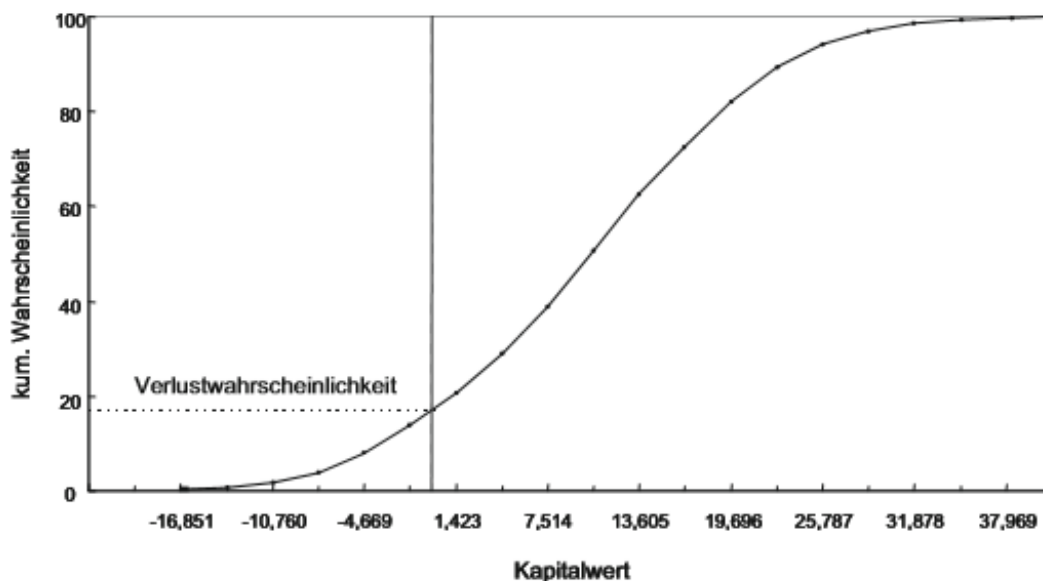


Abbildung 33: Dichtefunktion des Kapitalwerts¹⁸³

- **Sensitivitätsanalyse**

Mit Hilfe der Sensitivitätsanalyse kann aufgezeigt werden, welcher Zusammenhang zwischen den Inputgrößen (Nutzungsdauer, Zahlungsströme, Verkaufspreise, Kalkulationszinssätze, etc.) und dem Ergebnis der Investitionsrechnung besteht. Es wird also überprüft, welchen Einfluss eine veränderte Eingangsgröße auf die Zielgröße ausübt. Dies kann durch zwei Methoden erfolgen:¹⁸⁴

- Berechnung von Grenzwerten
- Berechnung unterschiedlicher Szenarien

¹⁸² Vgl. Götz, U. (2008), S. 376 ff.

¹⁸³ Quelle: Götz, U. (2008), S. 379.

¹⁸⁴ Vgl. Staehlin, E. (1993), S. 110 f.

Bei der Berechnung von Grenzwerten muss zuerst Klarheit darüber geschaffen werden, welche Eingangsgrößen mit Unsicherheit behaftet sind und somit näher untersucht werden müssen. Diese Eingangsgrößen können anschließend entweder kombiniert oder isoliert voneinander betrachtet werden. Ein Beispiel für eine isolierte Betrachtung ist die Berechnung einer kritischen Absatzmenge, ab der (bei gleichbleibenden Restdaten) am Ende der Nutzungsdauer ein Kapitalwert von null erreicht wird. Es wird in diesem Beispiel also genau jene Absatzmenge ermittelt, die eine absolute Vorteilhaftigkeit der gesamten Investition zur Folge haben würde. Diese Darstellung ermöglicht dem Entscheidungsträger, durch Vergleich mit entsprechenden Marktstudien, auf einfache Art und Weise, die Wahrscheinlichkeit für das Erreichen von absoluter Vorteilhaftigkeit einzuschätzen.¹⁸⁵

Eine weitere Möglichkeit bietet die Berechnung unterschiedlicher Varianten. Hier kann eine unsichere Eingangsgröße beispielsweise um einen bestimmten Prozentsatz (+/- 10%) variiert oder unterschiedliche Szenarien eines vorliegenden Konzeptes berechnet werden. Die Auswirkungen auf die betrachtete Zielgröße werden anschließend analysiert und dem Entscheidungsträger präsentiert. Diese Form der Sensitivitätsanalyse zeigt nicht nur erfolgskritische Inputparameter auf sondern bietet die Möglichkeit Auswirkungen bestimmter Ereignisse im Vorfeld besser abschätzen und einordnen zu können.¹⁸⁶

Die Sensitivitätsanalyse hat in der betrieblichen Praxis große Bedeutung und zählt auf Grund ihrer universalen Anwendbarkeit (für alle Investitionsrechnungsarten geeignet) und ihrer einfachen Handhabung zum wichtigsten Verfahren bei unsicherer Datenlage.¹⁸⁷

¹⁸⁵ Vgl. Müller, D. (2006), S.252 ff.

¹⁸⁶ Vgl. Götz, U. (2008), S. 363 ff.

¹⁸⁷ Vgl. Staehlin, E. (1993), S. 111 f.

4 Praktische Fallstudie

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Praxisarbeit, welche im Rahmen dieser Masterarbeit bei Hirschmann Automotive GmbH durchgeführt wurde, festgehalten und analysiert. Zuerst wird eine kurze Übersicht von dem betrachteten Unternehmen gegeben. Danach wird das werkstoffliche Recycling der Produktionsabfälle (Angüsse aus thermoplastischen Kunststoffen) am Standort Rankweil im Detail beleuchtet (= Ist-Zustand) und die absolute Vorteilhaftigkeit dieses extern ausgelagerten Aufbereitungsprozesses überprüft. Neben der Schaffung einer objektiven Datenbasis für den Kunststoffrecyclingprozess in Rankweil, war das Ziel dieser Masterarbeit In-house Alternativen aufzuzeigen und diese nach wirtschaftlichen und technischen Kriterien zu beurteilen. Wie Abbildung 9 zeigt, stehen vier Möglichkeiten (Konzepte) zur Verfügung. In einem ersten Schritt wurden alle Konzepte auf monetärer Basis unter Verwendung von dynamischen Investitionsrechnungen untersucht. Darüber hinaus wurden mögliche technische Risiken beziehungsweise Schwachpunkte der Konzepte analysiert und in Form einer Argumente Bilanz festgehalten. Auf Grundlage dieser ersten Analyse wurden zwei Konzepte zur näheren Untersuchung ausgewählt. Für diese beiden Konzepte wurden detaillierte Sensitivitätsanalysen durchgeführt, um aufzuzeigen, welchen Einfluss unterschiedliche Szenarien auf die betrachteten Zielgrößen (Kapitalwert, Amortisationsdauer und interner Zinssatz) haben können.

4.1 Beschreibung des untersuchten Unternehmens

Im Jahr 1959 wurde unter dem Namen „Richard Hirschmann Electronic GmbH“ in Rankweil ein Produktions- und Forschungsunternehmen von Geräten zur Nachrichtenübertragung (Antennen, Empfänger, etc.) gegründet. 1980 wurde das Sortiment auf Steckverbindungen erweitert, welche bis heute neben Fahrwerksverkabelungen, Spezial-Kabel-Assemblies und sensorischen Elementen wichtige Bestandteile des Produktportfolios sind. Im Jahr 2003 wurde das Unternehmen von der F&R Industrie Invest GmbH übernommen und der Firmenname auf „Hirschmann Automotive GmbH“ geändert.¹⁸⁸

Heute umfasst Hirschmann Europa neben dem Hauptsitz in Rankweil noch Standorte in Vestin (Tschechien), Judetul Mures (Rumänien) und Kenitra (Marokko). Diese Standorte werden als „verlängerte Werkbank“ von Rankweil aus ohne eigenständigen Vertrieb oder Forschung und Entwicklung geführt. Auch die Materialplanung wird vom Hauptsitz Rankweil übernommen. Neben den eben genannten Standorten besitzt die Hirschmann Automotive GmbH noch Standorte in San Miguel (Mexiko) und Nantong (China), welche mit eigener Entwicklungs- und Vertriebsabteilung vor allem den amerikanischen und chinesischen Markt beliefern. Das Unternehmen beschäftigt

¹⁸⁸ Vgl. Hirschmann, <https://www.hirschmann-automotive.com/unternehmen/chronik/> (Zugriff: 23.04.2017).

weltweit rund 4800 Mitarbeiter (Stand 2016) und erzielte im Jahr 2016 einen Umsatz von 300 Millionen €. ¹⁸⁹



Abbildung 34: Steckverbindungen (links) und Spezial-Kabel-Assemblies (rechts) aus dem Produktsortiment der Hischmann Automotive GmbH ¹⁹⁰

4.2 Analyse der Ausgangssituation

Diese Masterarbeit beschränkt sich auf das werkstoffliche Recycling bestimmter Kuppelprodukte (siehe Abbildung 35), welche beim Spritzgießen thermoplastischer Kunststoffe in einem unterschiedlichen prozentualen Verhältnis zum fertigen Produkt anfallen können. Der Anschnitt (unmittelbare Verbindung zum Produkt) dieser Angüsse wird von den Konstrukteuren in Rankweil als Tunnelanguss ausgeführt, sodass es beim Entformungsvorgang der Formteile aus dem Spritzgießwerkzeug, zu einer automatischen Trennung zwischen Kuppelprodukt und Bauteil kommt.



Abbildung 35: Typische Kuppelprodukte (Angüsse) aus dem Spritzgießverfahren

Die beiden Formteile (Anguss + Produkt) werden über ein Förderband zu einer Separiertrommel geleitet (siehe Abbildung 36) und dort räumlich voneinander getrennt. In regelmäßigen Abständen werden die Sammelbehälter mit Angussmaterial in Tonnen, welche direkt neben den Fertigungsanlagen positioniert sind, entleert. Um Materialvermischungen zu vermeiden besitzt jede Fertigungsanlage (Spritzgießmaschine) eine eigene Tonne mit Materialplakette.

¹⁸⁹ Vgl. Battisti, M. (2017), unveröffentlichtes internes Schreiben.

¹⁹⁰ Quelle: Ströhle, J. (2016), S.21.



Abbildung 36: Aufnahme aus der untersuchten Produktionshalle

Die vollen Tonnen (Fassungsvermögen zwischen 30 und 50 kg an Angussmaterial) werden von Produktionsmitarbeitern zu einem 170 Meter entfernten Sammelpunkt (siehe Abbildung 37 – Rot markierte Linie) gebracht. Die Angüsse werden dort mit Hilfe einer Schredderanlage vorzerkleinert und in Oktabins typenrein gesammelt. Zusätzlich zu den Angüssen des Standortes Rankweil werden hier auch Oktabins mit Sekundärmaterial von Lohnspritzern (übernehmen fallweise Aufträge für den Standort Rankweil) sowie vom Standort Kenitra (Marokko) zwischengelagert. Ein Teil dieser Produktionsabfälle wird an Recyclingunternehmen verkauft oder von diesen kostenlos entsorgt. Der überwiegende Anteil des Sekundärrohstoffes wird jedoch im Wochentakt per LKW zu einem Lohnrecyclingunternehmen nach Deutschland transportiert. Dieses Recyclingunternehmen übernimmt darüber hinaus auch für alle weiteren Standorte von Hirschmann Europa die Angussaufbereitung. Die vorzerkleinerten Kuppelprodukte werden dort weiter zerkleinert (gemahlen) und anschließend über Extruderanlagen unter Zusatz von Additiven (hauptsächlich Pigmente) zu Regenerat aufbereitet. Das gesamte aufbereitete Regenerat aller Standorte (von Hirschmann Europa) wird per LKW im Wochenzyklus nach Rankweil geliefert und dort gelagert. Das typenreine Regenerat darf fallweise (entsprechend den Kundenvereinbarungen) in einem bestimmten prozentualen Verhältnis (meist 30%) zum Originalmaterial im gleichen Produktionsprozess wieder eingesetzt werden. Die Materialplanung wird dabei für ganz Europa von Rankweil aus durchgeführt und so das Regenerat, entsprechend dem Bedarf der einzelnen Standorte, wieder verteilt.

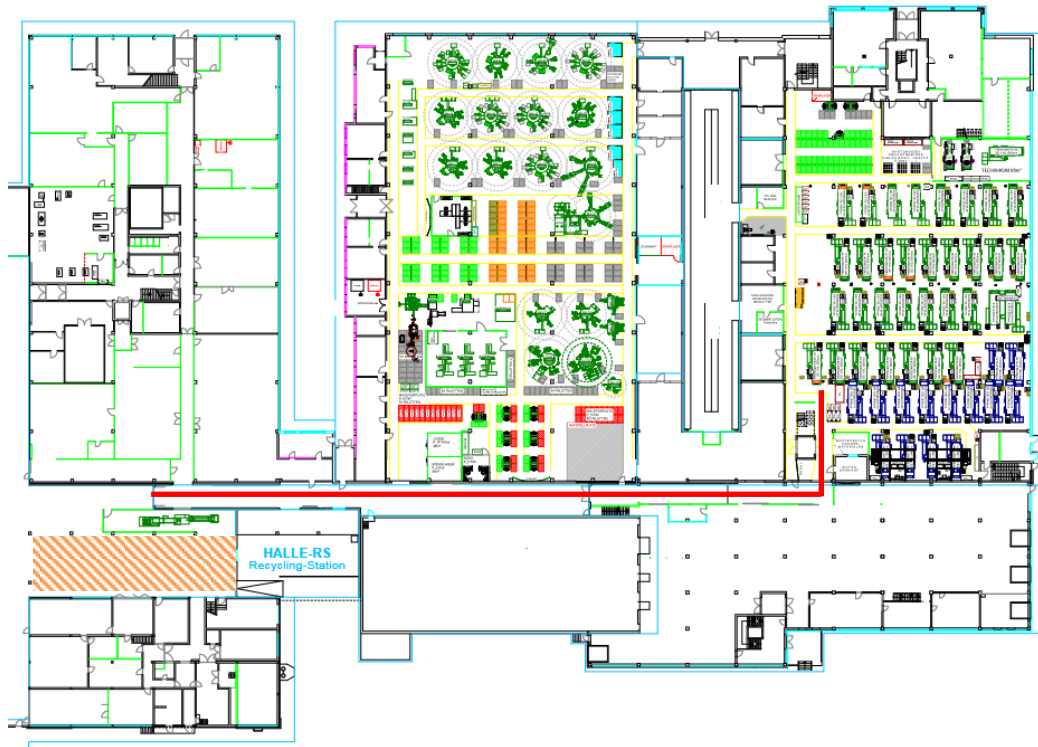


Abbildung 37: Layout vom Standort Rankweil – Rot markiert der Weg aus der Produktionshalle zur Sammelstation (Schredder)

Abbildung 38 zeigt grafische den eben beschriebenen Aufbereitungskreislauf als Ablaufdiagramm:

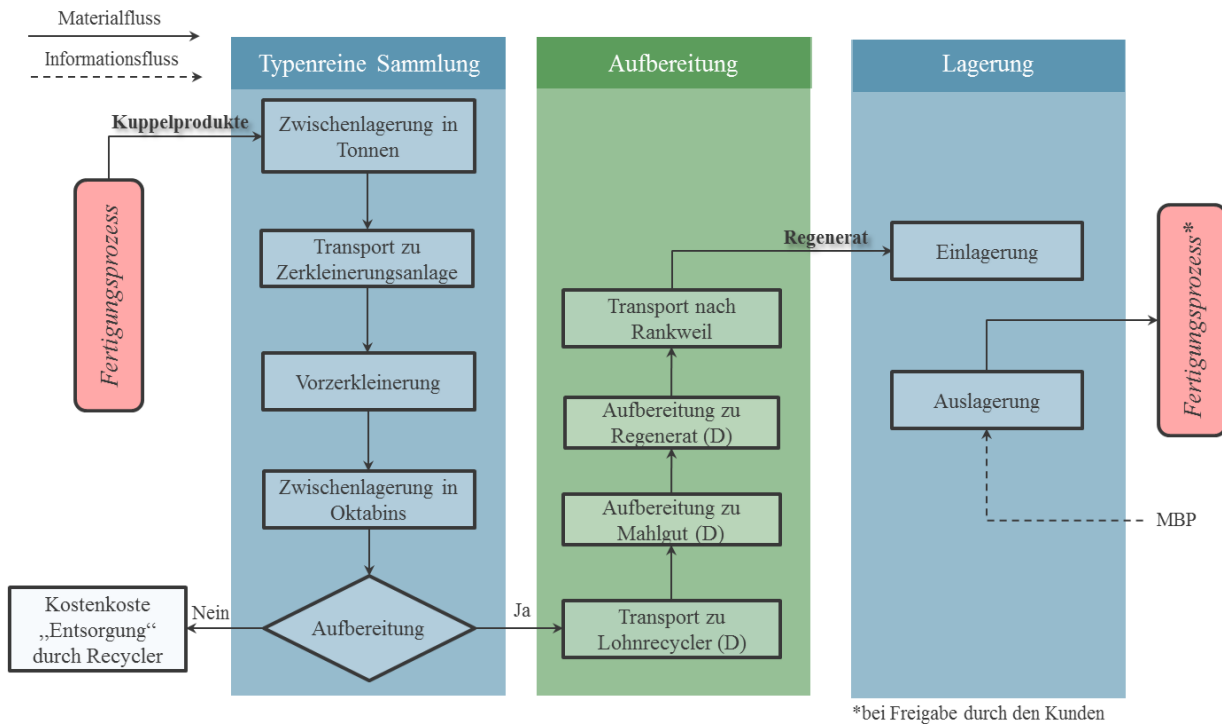


Abbildung 38: Ablaufdiagramm des Aufbereitungsprozesses am Standort Rankweil¹⁹¹

¹⁹¹ Quelle: Eigene Darstellung

Als erster Schritt der Datenerhebung wurden die jährlichen Mengen jener thermoplastischen Sekundärrohstoffe, die ausschließlich am Standort Rankweil anfallen, ermittelt. Aus rechtlichen Gründen dürfen in der vorliegenden Masterarbeit nur firmeninterne Materialbezeichnungen in 9stelliger Nummernform und keine exakten Typenbezeichnungen verwendet werden. Um dem Leser dennoch eine Vorstellung darüber zu geben, welcher Materialfamilie die jeweilige Materialnummer zugeordnet werden kann, wird mit Tabelle 7 eine entsprechende Gegenüberstellung gezeigt. Nach dem derzeitigen Stand (2017) werden ausschließlich die bunt markierten (285-239-357) Materialien aus Tabelle 7 aufbereitet. Die Kuppelprodukte aller weiteren angeführten Materialien werden entweder verkauft oder kostenlos entsorgt.

Tabelle 7: Zuordnung firmeninterner Materialnummern zu den jeweiligen Materialfamilien

Firmeninterne Materialnummer	Materialname
101-107-000	Polyoxymethylen
101-060-000	Polyphthalamid mit 35% Glasfaseranteil
101-067-000	Polyamid mit 35% Glasfaseranteil
101-422-000	Polyamid 6.6 mit 30% Glasfaseranteil
101-097-000	Polybutylenterephthalat mit 10% Glasfaseranteil
101-285-000	Polyamid 6.6 mit 25% Glasfaseranteil
101-239-000	Polyamid 6.6 mit 25% Glasfaseranteil
101-357-000	Polyamid 6 mit 30% Glasfaseranteil

Die in Abbildung 39 und Abbildung 40 grafisch gezeigten Daten wurden im Zeitraum Dezember 2015 bis Dezember 2016 bei der Firma Hirschmann am Standort Rankweil erhoben. Abbildung 39 gibt dabei einen mengenmäßigen (Tonnen/Jahr) Überblick jener Sekundärmaterialien, welche aktuell nicht aufbereitet werden. Hier zeigen vor allem Polyoxymethylen (101-107-000) und Polyphthalamid (101-060-000) auf Grund ihrer hohen jährlichen Mengen (108 bzw. 61 Tonnen) ein großes Potential auf. Regenerat darf grundsätzlich nur nach Freigabe durch den Kunden wieder im Produktionsprozess eingesetzt werden. Dennoch gilt es vor allem für diese beiden Materialgruppen ökonomisch sinnvolle Verwendungszwecke zu prüfen.

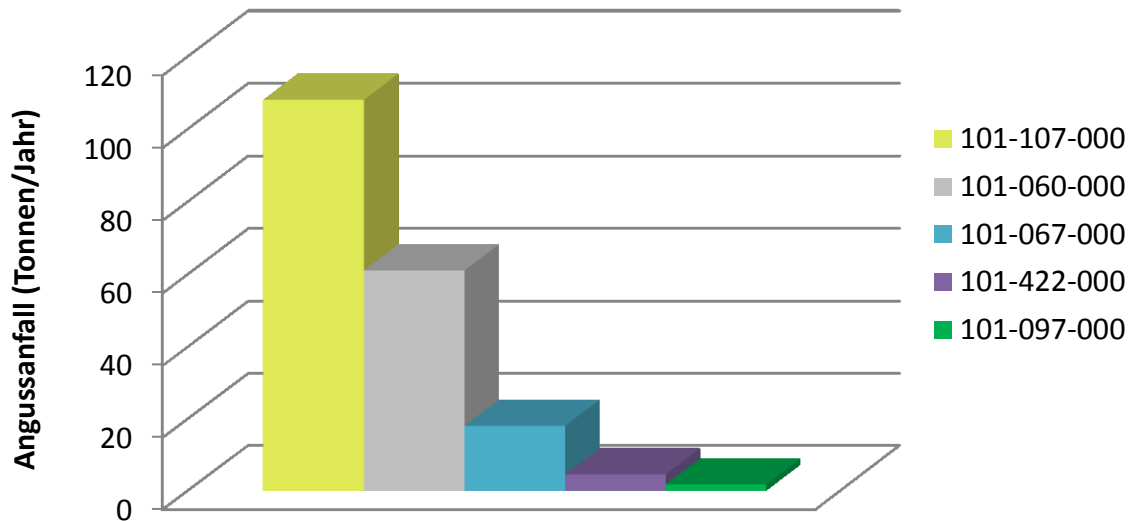


Abbildung 39: Jährliche Menge an nicht aufbereiteten Sekundärrohstoff am Standort Rankweil

Abbildung 40 zeigt die jährliche Menge an Angüssen, welche ausschließlich am Standort Rankweil anfallen, aufbereitet und wieder im Produktionsprozess als Regenerat eingesetzt werden. Zu erwähnen ist außerdem, dass sich die beiden Polyamid 6.6-Typen (285 bzw. 239) weder in ihrem chemischen Aufbau noch in ihren Materialeigenschaften unterscheiden. Als einziger Unterschied ist hier der Rohstoffhersteller zu nennen. Diese Tatsache bietet vor allem bei der Konzeption der In-house Aufbereitungsanlagen große Vorteile, da mit identen Prozesseinstellungen gearbeitet werden kann. Der Vergleich zeigt, dass am Standort Rankweil die Materialfamilie Polyamid 6.6 mit 25 % Glasfasern (285 und 239) rund 93% der gesamten aufzubereiteten Materialmenge ausmacht. Die in diesem Diagramm gewählte Farbkodierung (rot = 285; blau = 239; grün = 357) wird im weiteren Verlauf der praktischen Fallstudie zum Zweck der einfacheren Zuordnung beibehalten.

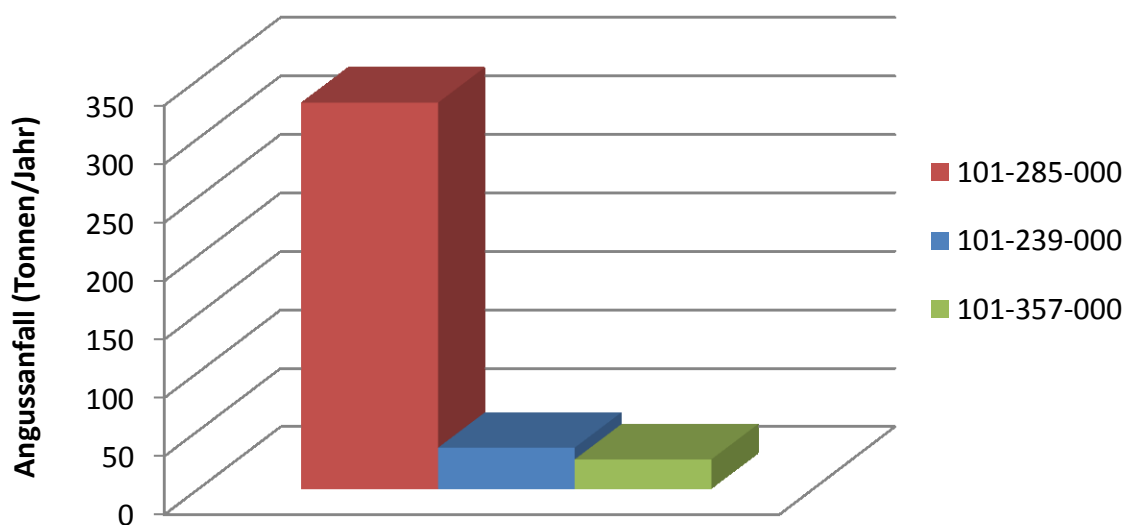


Abbildung 40: Jährliche Menge an aufbereitetem Sekundärrohstoff am Standort Rankweil

Bei der Durchführung von dynamischen Investitionsrechnungen werden zukünftige Mengen an Sekundärmaterial als Eingangsgrößen benötigt. Um einen Eindruck über die Entwicklung dieser Materialströme am Standort Rankweil zu bekommen, wurde die erhobene Menge an Sekundärmaterial für den Zeitraum September 2016 bis Dezember 2016 mit dem Neuwarenbedarf dieser Zeitspanne verglichen. Hier zeigt sich (siehe Tabelle 8) ein Verhältnis von rund 36 % (Angussanfall zu Neuware). Unter der Annahme, dass dieses Verhältnis konstant bleibt, wurde über den vorkalkulierten Neuwarenbedarf, die zu erwartende Menge an Sekundärmaterial für den Zeitraum September 2017 bis Dezember 2017 abgeschätzt. Das Ergebnis zeigt eine rund 19%ige Steigerung. Nach Rücksprache mit den Verantwortlichen der Firma Hirschmann wurde vereinbart die zukünftigen Materialströme als Eingangsgröße der Investitionsrechnung konstant (bezogen auf den Stand 2016) zu halten. Es wurde also ein bewusst pessimistischer Ansatz bei allen Kalkulationen gewählt.

Tabelle 8: Abschätzung des zukünftigen Angussanfalls am Standort Rankweil

Betrachtete Materialgruppen	101-285-000 + 101-239-000 + 101-357-000
Neuwarenbedarf (9.2016 bis 12.2016)	453.483 kg
Angussanfall (9.2016 bis 12.2016)	163.000 kg
Verhältnis Anguss zu Neuware	36 %
Neuwarenbedarf (9.2017 bis 12.2016)	540.186
Geschätzter Angussanfall (9.2017 bis 12.2016)	194.164 kg

Abschließend werden in diesem Zusammenhang die Materialströme (Sekundärmaterial) aller Standorte von Hirschmann Europa gezeigt (siehe Abbildung 41). Auffällig ist, dass sich Angussanfall und Regeneratbedarf weder bezogen auf den Standort noch global gesehen (mit Ausnahme von 101-285-000) decken. Auf Grund der zentralen Materialplanung können die standortbezogenen Unterschiede sehr einfach ausgeglichen werden. Der Hauptgrund für diese Differenz liegt bei den Kundenvorschriften. Wie bereits erwähnt darf Regenerat nur nach Absprache mit den Kunden in definierten Produkten wieder eingesetzt werden. Die zentrale Lagerung und Logistik von Rankweil aus ermöglicht es diesem Umstand auf einfache Art und Weise Rechnung zu tragen. Bei In-house Konzepten, welche auf eine globale Lösung des Aufbereitungsprozesses abzielen, scheint eine isolierte Variante (jeder Standort verwaltet sein Sekundärmaterial selbst) nicht möglich zu sein. Als negative Folge der globalen Differenz ergeben sich für die beiden betroffenen Materialtypen (239 und 357) höhere Lagerkosten (siehe Tabelle 10). Das überschüssige Regenerat wird nach aktuellem Stand als Puffer eingelagert und senkt so die Lagerumschlaghäufigkeit deutlich. Der Fluss an Sekundärmaterial wurde als Sankey-Diagramm (Flussdiagramm mit mengenproportionalen Pfeilen) festgehalten (siehe Anhang).

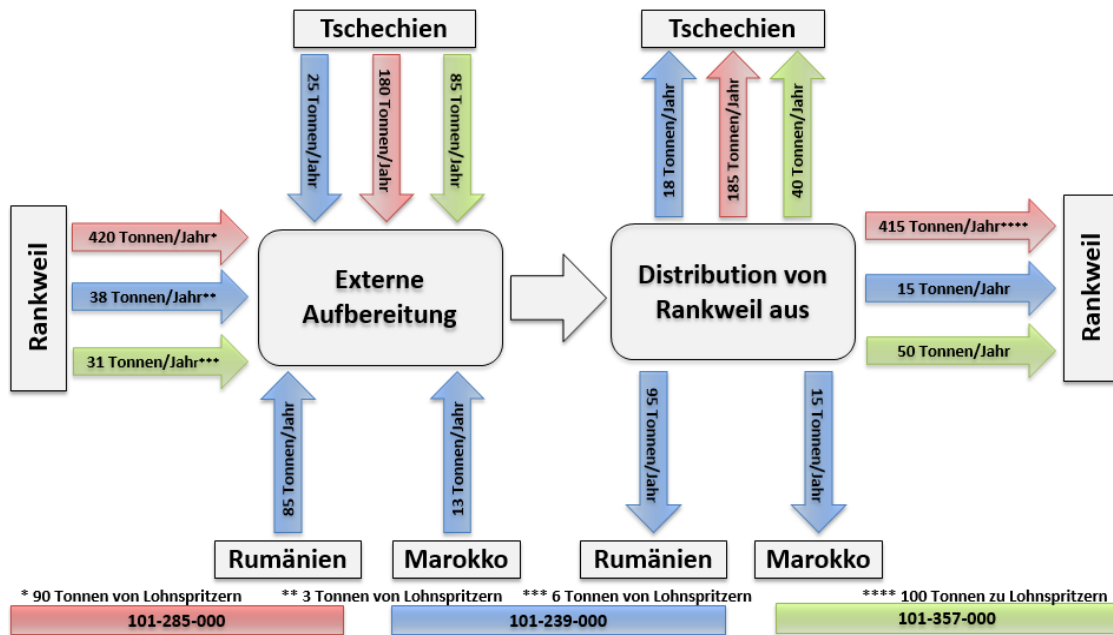


Abbildung 41: Grafische Darstellung des Regenerat-Materialstroms von Hirschmann Europa¹⁹²

Als weiterer Schritt der Datenerhebung wurden alle Kosten, die mit dem aktuellen Aufbereitungsprozess direkt zugerechnet und werden können, erhoben. Tabelle 9 zeigt eine Zusammenfassung jener Kosten, welche der typenreinen Sammlung am Standort Rankweil zuzuordnen sind. Die Energie-, Wartungs- und Raumkosten der Schredderanlage wurden dabei anteilig (Kostenschlüssel = Materialmenge) den jeweiligen Materialgruppen zugewiesen. Auf Grund der nahezu identen Schüttdichte ergaben sich nach einem Bezug auf die Materialmenge (Kosten pro Kilogramm) keine Differenzen zwischen den drei betrachteten Materialtypen.

Tabelle 9: Kalkulation der Kosten pro Kilogramm für die typenreine Sammlung aller aufzubereitenden Materialien

Materialnummer	101-285-000	101-239-000	101-357-000
Materialmenge	330 Tonnen/Jahr	35 Tonnen/Jahr	25 Tonnen/Jahr
Personalkosten (Transport zum Schredder)	0,089 €/kg	0,089 €/kg	0,089 €/kg
Personalkosten (Schredder)	0,080 €/kg	0,080 €/kg	0,080 €/kg
Raumkosten	0,044 €/kg	0,044 €/kg	0,044 €/kg
Energie-, Wartungs- sowie Hilfs-, und Betriebsstoffkosten	0,027 €/kg	0,027 €/kg	0,027 €/kg
Kosten für typenreine Sammlung	0,24 €/kg	0,24 €/kg	0,24 €/kg

¹⁹² Quelle: Eigene Darstellung

Tabelle 10 zeigt die Kosten für Transport und Aufbereitung der Produktionsabfälle. Aus dem globalen Unterschied von Angussanfall und Regeneratbedarf ergeben sich für die Materialtypen 239 und 357 deutlich geringere Lagerumschlaghäufigkeiten und somit bezogen auf die Menge höhere Lagerkosten.

Tabelle 10: Kalkulation der Kosten pro Kilogramm für Aufbereitung, Transport, Lagerung und Einsatz aller aufzubereitenden Materialien

Materialnummer	101-285-000	101-239-000	101-357-000
Transportkosten (nach Deutschland)	0,06 €/kg		
Dienstleistungskosten (Aufbereitung)	0,8 €/kg		
Transportkosten (nach Rankweil)	0,06 €/kg		
Dienstleistungs- und Transportkosten	0,92 €/kg		
Lagerkosten	0,022 €/kg	0,052 €/kg	0,076 €/kg

Ein einfacher Kostenvergleich mit dem Preis für Neuware (siehe Abbildung 42) zeigt, dass für diese Form der Kreislaufwirtschaft eine absolute Vorteilhaftigkeit in jedem Fall gegeben ist. Unter der Annahme eines mittleren Preises von 2,85 €/kg für Neuware und einer ansonsten „kostenlosen Entsorgung“ der Kuppelprodukte ergeben sich jährliche Einsparungen in der Höhe von 930 000 € (unter Einbezug von Aufbereitungs-, Transport- und Lagerkosten für Regenerat) alleine für den Standort Rankweil (inklusive den Angüssen der Lohnspritzer).

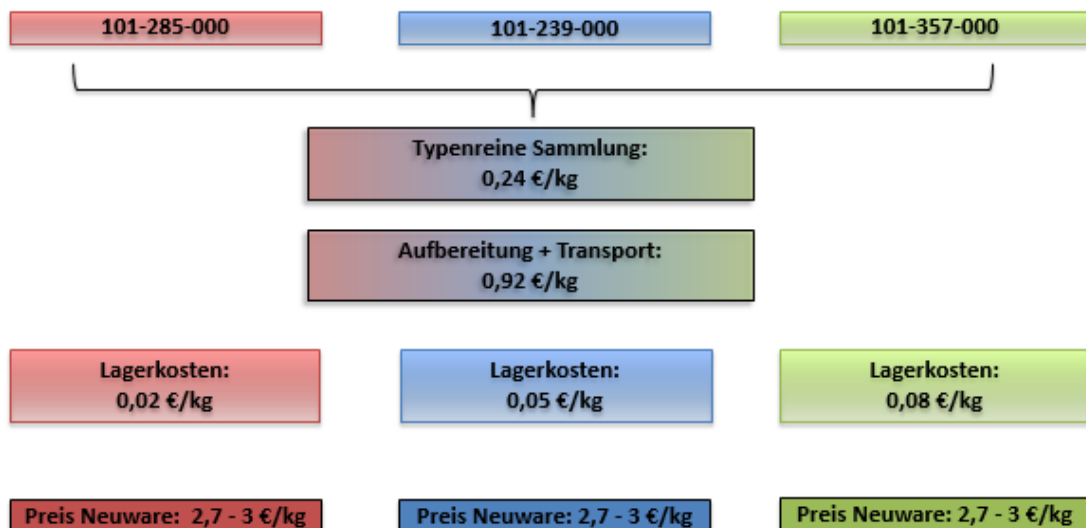


Abbildung 42: Vergleich der Kosten für die externe Aufbereitung mit dem Preis des Originalmaterials¹⁹³

¹⁹³ Quelle: Eigene Darstellung

4.3 Analyse des Konzeptes 1: Zentralmühlen

Bei der innerbetrieblichen Materialaufbereitung von thermoplastischen Produktionsabfällen stehen vier unterschiedliche Varianten zur Verfügung (siehe Abbildung 9). Als erstes dieser Konzepte wird im folgenden Abschnitt die Zentralmühle näher vorgestellt und aus wirtschaftlicher und technischer Sicht bewertet. Das Rezyklat unterscheidet sich hier deutlich vom aktuell extern bezogenen Material (Regenerat). Die Kuppelprodukte werden ausschließlich an Schneidemühlen zerkleinert und nicht wie bisher an Extruderanlagen aufgeschmolzen. Dadurch bietet sich jedoch keine Möglichkeit im Zuge der Materialaufbereitung flüchtige Bestandteile (z.B.: Feuchtigkeit) aus dem Sekundärmaterial (über Entgasungszonen) zu entfernen. Bei polaren Kunststoffen wie Polyamiden ist ein definiertes (geringes) Restfeuchteniveau bei der Verarbeitung von größter Bedeutung. Polyamide werden deshalb vor der Verarbeitung getrocknet, um einen hydrolytischen Abbau des Materials während der Verarbeitung auszuschließen. Das bezogene Polyamid (gilt für 285, 239 und 357 sowohl für Neuware wie auch für Regenerat) darf laut internen Vorschriften bei der Anlieferung nur eine Restfeuchte von maximal 0,2 % aufweisen. Während der Lagerung kann das in Polyethylenfolie eingeschweißte Material nur in sehr geringem Ausmaß weiter Feuchtigkeit aufnehmen. Sofern die Zeit der Vortrocknung nicht verändert wird, bedeutet dieser Umstand, dass die maximale Zeit der Angussaufbereitung bei Konzept 1 (Zentralmühlen) durch die Feuchtigkeitsaufnahme des Sekundärmaterials bestimmt wird. Abbildung 43 zeigt Restfeuchtemessungen in Abhängigkeit der Zeit von Angüssen, welche bei Produktionsbedingungen ausgelagert wurden. Das kritische Niveau von 0,2 % Restfeuchte wird bereits nach 18 Stunden erreicht. Dieser Umstand hat zur Folge, dass die Angüsse nicht gelagert werden dürfen sondern jeden Tag aufzubereiten sind. Jene Angüsse, die von Lohspritzern oder vom Standort Kenitra angeliefert werden, können mit diesem Konzept keinesfalls aufbereitet werden. Dadurch beschränkt sich die jährliche Materialmenge auf jene Angüsse, die ausschließlich am Standort Rankweil selbst anfallen (siehe Abbildung 40).

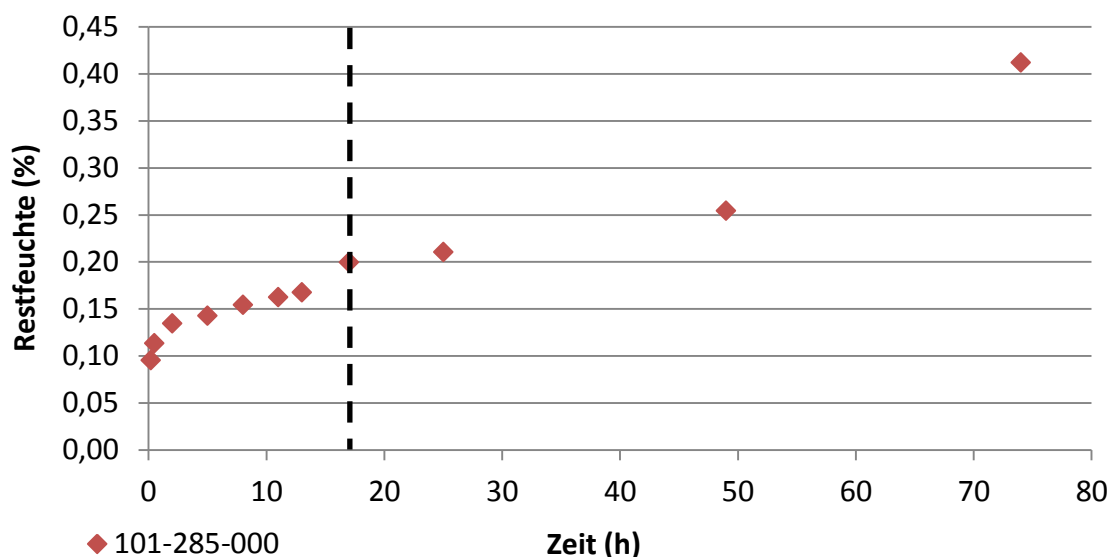


Abbildung 43: Restfeuchtemessung der Angüsse in Abhängigkeit der Zeit bei Auslagerung zu Produktionsbedingungen

Die Auswirkungen dieser drastischen Umstellung auf das Rezyklat selbst, wurden im Rahmen dieser Abschlussarbeit nicht näher untersucht. Es wird jedoch vermutet, dass es durch den Plastifizierungsprozess in Extrusionsanlagen zu einem thermisch bedingten Abbau der Molekülketten kommt, welcher in einem geringeren (mechanischen) Eigenschaftsniveau resultiert. Diese Problematik könnte bei Verwendung von Mahlgut vermieden werden.

Neben den Materialeigenschaften ist vor allem die Prozessfähigkeit an den Fertigungsanlagen von zentraler Bedeutung. Zu diesem Zweck wurden für ein ausgewähltes Produkt (Materialtyp: 101-285-000) mehrere Prozessfähigkeitsanalysen durchgeführt. Dafür wurden pro Einstellung 128 Bauteile hergestellt und das Teilgewicht, die Dosierzeit und der Restmassepolster aufgezeichnet (= „Hirschmann Standard“). Tabelle 11 zeigt, dass für alle Mahlgutvariationen (V01 bis V05) ausschließlich das Teilgewicht (Ausnahme Restmassepolster für V02) innerhalb des geforderten Zielbereichs (cp-Wert von > 2) liegt. Die unregelmäßige Korngröße sowie der nicht zu vermeidende Staubanteil im Mahlgut haben deutlich höhere Schwankungen der Dosierzeit sowie des Restmassepolsters zur Folge. Die Streubreite (6-fache Standardabweichung) liegt nicht mehr innerhalb der intern definierten Toleranzbreite für diesen Prozess. Somit kann abschließend festgehalten werden, dass eine Prozessfähigkeit nach internem Standard mit dem aktuellen Anlagenequipment bei der Verwendung von Mahlgut nicht gegeben ist.

Tabelle 11: Ergebnis der Prozessfähigkeitsanalyse für das Material 101-285-000

Materialnummer Neuware: 101-285-000	Cp-Wert Dosierzeit	Cp-Wert Restmassepolster	Cp-Wert Teilgewicht
Aktueller Prozess (30% Regenerat)	4,01	2,22	3,59
V01: 90% Neuware mit 10% Mahlgut	1,73	1,52	4,31
V02: 70% Neuware mit 30% Mahlgut	1,03	2,11	4,34
V03: 60% Neuware mit 40% Mahlgut	0,84	1,90	4,34
V04: 50% Neuware mit 50% Mahlgut	0,39	1,90	4,13
V05: 100% Mahlgut	0,5	1,07	4,52

Die detaillierte Auslegung des Konzeptes 1 wurde in starker Anlehnung an die Literatur (siehe Abbildung 16) gemeinsam mit einem Anlagenhersteller durchgeführt. Aus rechtlichen Gründen dürfen die exakten Daten der konzipierten Anlagen (gilt für alle Konzepte) sowie die entsprechenden Anlagenhersteller nicht genannt werden.

Als Systemgrenze des geplanten Veränderungsprozesses wurde von der Firma Hirschmann vorgegeben, dass der aktuelle Sammelprozess der Kuppelprodukte in der Produktion (siehe Kapitel 4.2) nicht verändert werden darf. Die Positionierung der Zentralmühlen wurde darüber hinaus von den räumlichen Gegebenheiten am Standort Rankweil stark eingeschränkt. Nach Rücksprache mit dem Gebäudemanagement

konnte nur ein einziger möglicher Standort definiert werden (siehe Abbildung 36 – orange markierter Bereich). Die Tonnen mit Angusmaterial müssen nach diesem Konzept also weiterhin zu einem rund 170 Meter von der Produktionshalle entfernten Punkt transportiert werden. Das Konzept setzt sich aus zwei Aufbereitungslinien zusammen, welche aus einer großen (Durchsatz 300 bis 350 kg pro Stunde) und einer kleineren Schneidemühle (Durchsatz rund 100 bis 150 kg pro Stunde) samt Peripherie bestehen. Dadurch können Vermischungen zwischen den beiden Materialfamilien (Polyamid 6 und Polyamid 6.6) durch unzureichende Reinigung vor dem Materialwechsel definitiv ausgeschlossen werden. Die Beschickung der Förderbänder erfolgt bei beiden Aufbereitungslinien mit Hilfe von Kippvorrichtungen, welche speziell für die Geometrie der Angusstonnen ausgelegt wurden. Um Verunreinigungen mit metallischen Gegenständen auszuschließen, wurden beide Förderbänder mit Metallsuchspulen versehen. Nach dem Mahlvorgang wird das Rezyklat über ein Gebläse in eine Entstaubungsanlage (Abscheidezyklon) gefördert. Die Rohrleitung zwischen Mühle und Zyklon wurde darüber hinaus mit einem zusätzlichen Metallausscheidegerät versehen, um metallische Partikel, welche durch Abrasion während des Mahlvorgangs entstehen, aussondern zu können. Das entstaubte Mahlgut wird in Oktabins typenrein gesammelt und mit einer Polyethylenfolie verschweißt (um eine Restfeuchteaufnahme bei der Lagerung auszuschließen). Der Aufbereitungsprozess nach Konzept 1 wird grafisch durch Abbildung 44 gezeigt.

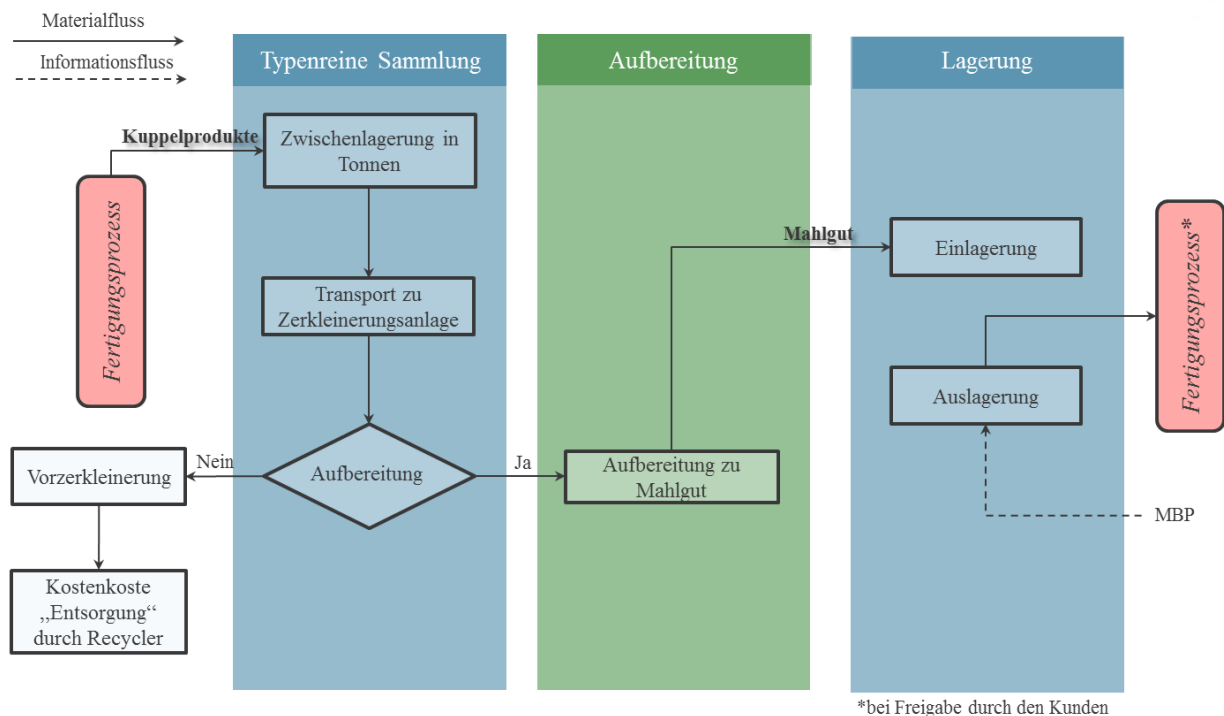


Abbildung 44: Ablaufdiagramm nach Konzept 1¹⁹⁴

Die Anschaffungsauszahlungen setzen sich bei diesem Konzept aus den Kosten für beide Aufbereitungslinien, den Kosten für den Umbau der Halle (wurde vom Gebäudemanagement abgeschätzt) und den Validierungskosten für ausgewählte

¹⁹⁴ Quelle: Eigene Darstellung

Produktfamilien zusammen (siehe Tabelle 12). Alle Produkte, bei denen der Einsatz von Regenerat laut Kundenvereinbarung erlaubt ist, wurden beim Produktionsstart mit Originalmaterial und einem prozentuellen Anteil an Regenerat validiert. Wie bereits erwähnt, unterscheiden sich die Materialeigenschaften von Mahlgut und Regenerat deutlich. Demzufolge kann nicht automatisch davon ausgegangen werden, dass die Produkte nach der Umstellung auf Mahlgut weiterhin alle Kundenanforderungen erfüllen. Nach Rücksprache mit Vertretern der Firma Hirschmann wurde bei der folgenden Berechnung von einer Teilvalidierung ausgegangen. Das bedeutet, dass nur ausgewählte Produktfamilien validiert werden und bei positivem Ausgang auf eine Validierung aller Produkte verzichtet wird (→ Risiko von Produktausfällen ist bei diesem Szenario gegeben!).

Tabelle 12: Zusammenfassung aller Anschaffungsauszahlungen für Konzept 1

	Zentralmühle 1 (Durchsatz 300 – 350 kg/h)	Zentralmühle 2 (Durchsatz 100 – 150 kg/h)
Kippvorrichtung	19.430 €	19.430 €
Förderband	4.120 €	3.255 €
Metallsuchspule	5.740 €	5.530 €
Schneidemühle inkl. Entstaubungsanlage	40.910 €	13.815 €
Metallabscheider	5.462 €	5.462 €
Gesamtkosten (Anlagen)	123.154 €	
Kosten für Hallenumbau	150.000 €	
Validierungskosten	100.000 €	
Anschaffungsauszahlung	373.154 €	

Die jährlichen Auszahlungen dieses Konzeptes beinhalten die Kosten für Sammlung und Transport der Angüsse aus der Produktionshalle zur Aufbereitungsanlage. Außerdem wurden Personalkosten für die Bedienung der Mühlen, Energiekosten (laut Anlagenhersteller), Wartungskosten (laut Anlagenhersteller), Raumkosten und Kosten für Hilfs- und Betriebsstoffe veranschlagt. Als Referenz zur Bewertung dient für alle Konzepte die in Kapitel 4.2 beschriebene Ausgangssituation. Da sich weder Lagerung noch Einsatz des Sekundärmaterials bei der Umsetzung von Konzept 1 verändern, wurden diese Punkte aus der vergleichenden Investitionsrechnung ausgespart. Tabelle 13 zeigt übersichtlich eine Gegenüberstellung aller laufenden Auszahlungen.

Tabelle 13: Zusammenfassung aller jährlichen Auszahlungen für Konzept 1

Materialnummer	101-285-000	101-239-000	101-357-000
Materialmenge	330 Tonnen/Jahr	35 Tonnen/Jahr	25 Tonnen/Jahr
Personalkosten (Transport zur Anlage)	34.754 €/Jahr		
Personalkosten (Anlagenbetrieb)	37.142 €/Jahr		8.575 €/Jahr
Energiekosten (Mühle)	2.474 €/Jahr		204 €/Jahr
Wartungskosten (Mühle)	9.485 €/Jahr		4.688 €/Jahr
Hilfs- und Betriebsstoffkosten	2.730 €/Jahr		
Raumkosten	29.700 €/Jahr		
Laufende Auszahlungen	129.752 €/Jahr		

Da bei diesem Aufbereitungsprozess keine Möglichkeit gegeben ist ein definiertes Restfeuchteniveau einzustellen, beschränkt sich die aufzubereitende Materialmenge auf jene Angüsse, die ausschließlich am Standort Rankweil anfallen. Das bedeutet wiederum, dass die Angüsse der Lohnspritzer und des Standortes Kenitra, welche ebenfalls in Rankweil zwischengelagert werden, weiterhin nach Deutschland zur Aufbereitung geschickt werden müssen. Als pessimistischer Ansatz wurde davon ausgegangen, dass somit keine Transportkosten eingespart werden können. Bei dieser Berechnung wird außerdem von einem 10 jährigen, konstanten Materialstrom an Sekundärmaterial ausgegangen. Wie Tabelle 8 zeigt, wird damit der zukünftige Angussanfall bewusst unterschätzt (= pessimistisches Szenario). Die einzusparenden jährlichen Auszahlungen setzen sich aus der Differenz der jährlichen Auszahlungen nach dem Ist-Zustand und den laufenden Auszahlungen nach Konzept 1 zusammen. Die Nutzungsdauer der Aufbereitungslinien wurde auf 10 Jahre (Minimum laut Anlagenhersteller) bei einem Restwert von 0 € festgesetzt. Der Kalkulationszinsfuß wurde vom Controlling mit 12 % vorgegeben (siehe Tabelle 14).

Tabelle 14: Weitere Eingangsgrößen der Investitionskostenrechnung für Konzept 1

Nutzungsdauer	10 Jahre
Restwert der Anlagen	0 €
Kalkulationszinsfuß	12 %
Materialmenge (Angüsse)	390 Tonnen/Jahr
Jährliche Auszahlungen nach aktuellem Aufbereitungsprozess	$390.000 \text{ kg} \cdot (0,8 + 0,243) \text{ €/kg} = 406.770 \text{ €}$

Die Durchführung der dynamischen Investitionsrechnung wird durch Tabelle 15 gezeigt. Abbildung 45 zeigt darauf aufbauend die Entwicklung des Kapitalwertes für die festgelegte Nutzungsdauer von 10 Jahren. Trotz pessimistischen Szenarios (konstanter Angussanfall) wird bereits im zweiten Jahr ein positiver Kapitalwert erreicht. Der Kapitalwert dieses Investitionsvorhabens beträgt insgesamt 1.192.059 € bei einem Kapitaleinsatz (Anschaffungsauszahlungen) von 373.154 €.

Tabelle 15: Zusammenfassung der dynamischen Investitionsrechnung für Konzept 1

Jahr	Anschaffungsauszahlung	Eingesparte Auszahlungen	Abzinsungsfaktor	Barwert	Kapitalwert
0	-373154		1,000	-373154	-373154
1		277018	0,893	247338	-125817
2		277018	0,797	220837	95021
3		277018	0,712	197176	292196
4		277018	0,636	176050	468246
5		277018	0,567	157187	625434
6		277018	0,507	140346	765780
7		277018	0,452	125309	891089
8		277018	0,404	111883	1002972
9		277018	0,361	99895	1102867
10		277018	0,322	89192	1192059

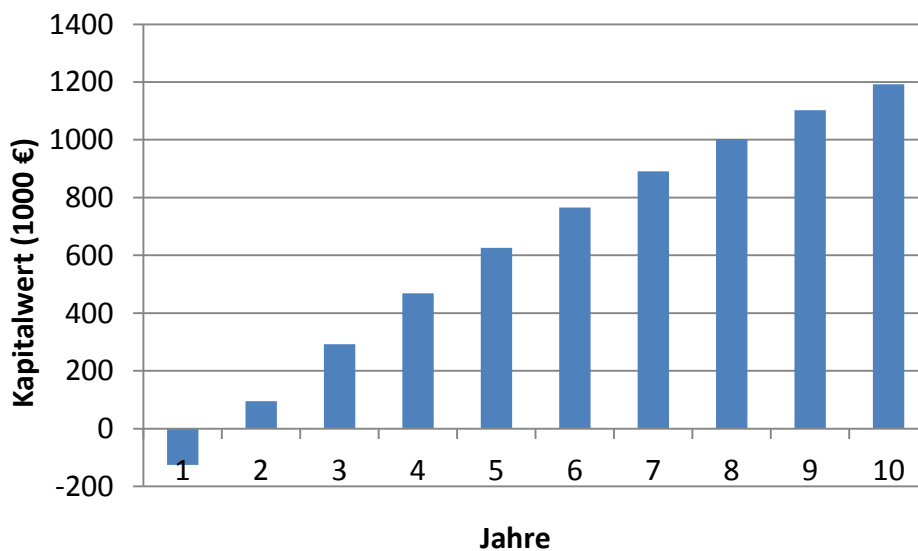


Abbildung 45: Grafische Darstellung der Kapitalwertentwicklung für Konzept 1

Wie Tabelle 16 zeigt, beträgt die Amortisationsdauer 19 Monate und der interne Zinssatz dieses Investitionsvorhabens 73,8 %. Diese extrem hohe Wirtschaftlichkeit wird vor allem durch die Aussparung des Extrusionsprozesses während der Aufbereitung erreicht. Das Konzept 1 erweist sich somit aus rein monetärer Sicht als ausgesprochen profitabel.

Tabelle 16: Ergebnisse der dynamischen Investitionsrechnung für Konzept 1

Dynamische Amortisationsdauer	19 Monate
Kapitalwert	1.192.059 €
Annuität	210.976 €
Interner Zinssatz	73,8 %

Neben den beiden Zielen Erfolg und Liquidität spielt insbesondere der Sicherheitsgedanke bei jeder Form der Vermögensanlage eine wichtige Rolle. Hier müssen abschließend für Konzept 1 einige Einschränkungen festgehalten werden. Wie bereits erwähnt ist die Prozessfähigkeit unter Verwendung des aktuellen Anlagenequipment nicht gegeben (→ Prozessrisiko). Außerdem wurde bei dieser Berechnung nur von einer Teilvalidierung ausgegangen. In diesem Szenario kann demnach ein materialbedingter Produktausfall nicht gänzlich ausgeschlossen werden. Darüber hinaus wurde mit den Kunden der Einsatz von Regenerat vereinbart, was bei unterlassener Offenlegung zu Klagen führen könnte (→ rechtliches Risiko). Die eben diskutierten Vor- und Nachteile des Konzeptes 1 wurden mit Tabelle 17 abschließend noch einmal zusammengefasst.

Tabelle 17: Gegenüberstellung der wichtigsten Vor- und Nachteile des Konzeptes 1

Vorteile	Nachteile
Geringe Amortisationsdauer (19 Monate)	Prozessfähigkeit nicht gegeben
Geringer Kapitaleinsatz	Teilvalidierung → Risiko eines materialbedingten Produktausfalls
Hohe Rentabilität (interner Zinssatz > 73%)	Kundenvereinbarungen wurden mit Regenerat getroffen
Kein thermisch bedingter Kettenabbau bei der Aufbereitung → höheres mechanisches Eigenschaftsniveau	Angüsse der Lohnspritzer können mit diesem Konzept nicht aufbereitet werden → weiterhin Transportkosten
Einsparung eines Prozessschrittes bei der Aufbereitung	Kein definiertes Restfeuchteniveau des Sekundärmaterials (Mahlgut)
	Gemischter Einsatz von Regenerat und Mahlgut in der Produktion

4.4 Analyse des Konzeptes 2: Beistellmühle

Als zweites Konzept wird im folgenden Abschnitt die Beistellmühle näher vorgestellt und analysiert. Beistellmühlen können direkt neben Fertigungsanlagen (Spritzgießmaschinen) positioniert werden. Die Beschickung erfolgt entweder über Handlinggeräte („Angusspicker“) oder über ein Förderband. Die in diesem Konzeptvorschlag ausgewählte Beistellmühle wurde von ihren Abmaßen so ausgelegt, dass sie sowohl unter als auch nach der Separiertrommel (siehe Abbildung 36) positioniert werden kann. Die Angüsse werden im Mahlraum der Schneidemühle so lange zerkleinert bis die Teilchen durch ein Sieb definierter Größe (4 - 8 mm) durchrutschen können. Das Mahlgut wird anschließend im unteren Bereich der Mühle (Mahlkasten) gesammelt und über ein Saugfördergerät automatisch in einen Trichter eines gravimetrischen Dosiersystems, welches direkt an der Spritzgießmaschine angebracht werden kann, transportiert. Hier wird mit Hilfe einer Wiegezeile für jeden Schuss eine vorher definierte Menge an Mahlgut dem Originalmaterial beigemischt. Abbildung 46 zeigt grafisch den eben beschriebenen Aufbereitungsprozess. Beistellmühlen weisen den kleinst möglich geschlossenen Recyclingkreislauf aller innerbetrieblichen Aufbereitungsanlagen (für thermoplastische Produktionsabfälle) auf. Zu ihren größten Vorteilen zählt, dass die Prozessschritte Sammlung und Lagerung vermieden werden können. Dem gegenüber steht eine deutlich geringere Flexibilität verglichen mit zentralen Aufbereitungslösungen.

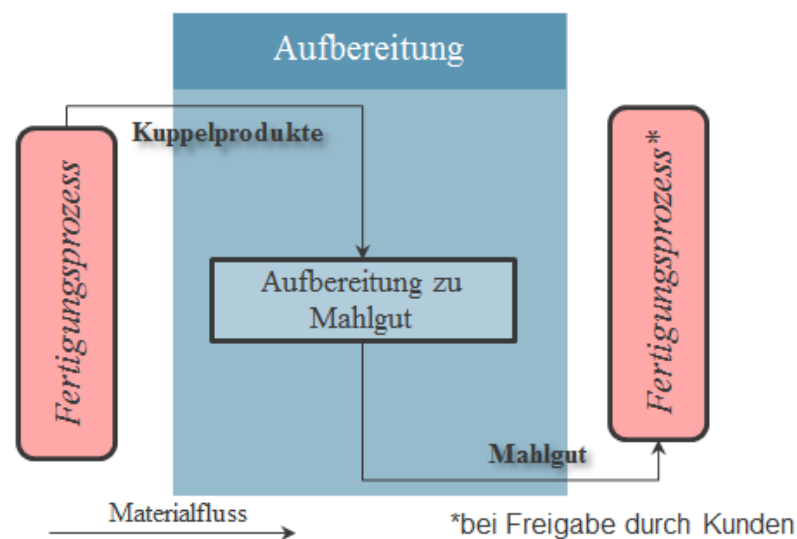


Abbildung 46: Aufbereitungsprozess nach Konzept 2¹⁹⁵

Dieses eben beschriebene Konzept ist in vielen Spritzgießunternehmen gängige Praxis und seit Jahren Stand der Technik. Es findet jedoch vor allem in jenen Betrieben großen Zuspruch, wo an den Fertigungsanlagen über Monate oder Jahre hinweg immer dasselbe Produkt hergestellt wird (= geringe Flexibilität). Die Produktionsplanung der Firma Hirschmann ist im Gegensatz dazu höchst flexibel

¹⁹⁵ Quelle: Eigene Darstellung

ausgerichtet. Alle 44 Spritzgießmaschinen am Standort Rankweil sind bis auf wenige Ausnahmen baugleich, sodass an jeder Maschine jedes Bauteil produziert werden kann. Darüber hinaus finden Werkzeugwechsel an den Anlagen am Standort Rankweil durchschnittlich alle zwei bis drei Tage statt. Bei der Produktionsplanung wird keine Rücksicht auf zuvor verarbeitete Materialtypen oder Produkte genommen. Das bedeutet, dass an bestimmten Tagen an allen Maschinen Produkte mit Regeneratzusatz laufen können und an bestimmten Tagen ausschließlich Produkte mit Regeneratverbot. Es ist also nicht möglich nur bestimmte Maschinen mit Beistellmühlen auszustatten, vielmehr müssten Beistellmühlen, Saugfördergeräte und gravimetrische Dosiersysteme an allen Spritzgießmaschinen angebracht werden. Dies ist jedoch auf Grund der Platzverhältnisse in der Produktionshalle nicht möglich. Außerdem müssen die Beistellmühle und das Saugfördergerät nach jedem Materialwechsel an der Maschine gereinigt werden, was eine deutliche Erhöhung der Rüstzeit zur Folge haben würde. Nicht zuletzt aus den hier genannten Gründen, wurde von der Firma Hirschmann schon zu Beginn der Praxisarbeit entschieden, dass die Beistellmühle als Gesamtkonzept für den Standort Rankweil nicht in Frage kommen kann. Um die Wirtschaftlichkeit dieses Konzeptes dennoch untersuchen zu können, wurde ein bestimmtes Produkt (2-pol Sealstar Schutzkragen) ausgewählt, welches entgegen der Produktionsphilosophie von Hirschmann seit März 2016 ausschließlich an derselben Spritzgießmaschine hergestellt wird. Dieses Produkt weist ideale Rahmenbedingungen für den Einsatz einer Beistellmühle auf. Laut Kundenvereinbarung darf beim untersuchten Produkt 30% Regenerat im Verhältnis zum Schussgewicht beigemischt werden. Wie Tabelle 18 zeigt, kann demnach die gesamte Angussmenge rückgeführt werden. Die Jahresmenge an Angussmaterial wurde ferner aus den erhobenen Daten (22.03.2016 bis 21.07.2016) abgeschätzt (extrapoliert).

Tabelle 18: Daten zum untersuchten Fallbeispiel für Konzept 2

Artikelbezeichnung	2-pol Schutzkragen (Sealstar)
Materialtyp	101-285-000
Werkzeugkavitäten	16
Schussgewicht	31,041 g
Teilegewicht pro Schuss	22,192 g
Angussgewicht/Schussgewicht	28,5 %
Angussgewicht/Teilegewicht	39,9 %
Produzierte Teile (22.03.2016 bis 21.07.2016)	11.909.312 Bauteile
Geschätzte Jahresmenge	35.727.936 Bauteile
Geschätzte Jahresmenge an Angüsse	19.757 kg

Die Anschaffungsauszahlungen dieses Konzeptes setzen sich, wie Tabelle 19 zeigt, neben den Kosten der Scheidemühle aus den Kosten des gravimetrischen Dosiersystems und des Saugfördergeräts, sowie aus Montagekosten und aus Validierungskosten zusammen. In dieser Berechnung wurde die Neuvalidierung des untersuchten Produktes auf Grund der Materialumstellung (Mahlgut statt Regenerat) bereits berücksichtigt. Das Risiko eines materialbedingten Produktausfalls ist hier bei positivem Ausgang der Validierung minimal.

Tabelle 19: Zusammenfassung aller Anschaffungsauszahlungen für Konzept 2

Beistellschneidemühle	4.702 €
Gravimetrisches Dosiergerät	7.184 €
Saugfördergerät	1.140 €
Gesamtkosten (Anlage)	13.026 €
Validierungskosten	20.000 €
Montagekosten	224 €
Anschaffungsauszahlung	33.250 €

Wie Tabelle 20 zeigt, beschränken sich die jährlichen Auszahlungen des Konzeptes 2 auf Energie- und Wartungskosten. Hier wird auf einem Blick der große Vorteil von Beistellmühlen ersichtlich. Verglichen mit Konzept 1 (siehe Tabelle 13) fallen weder Kosten für die Sammlung des Sekundärmaterials noch Personalkosten bei der Aufbereitung an. Zusätzlich können auch jene Kosten eingespart werden, die mit Lagerung und Wiedereinsatz in der Produktion in Verbindung stehen (siehe Tabelle 10). Als Referenz dient bei der Durchführung der dynamischen Investitionsrechnung (wie bei allen Konzepten) die Ausgangssituation.

Tabelle 20: Zusammenfassung aller jährlichen Auszahlungen für Konzept 2

Energiekosten	1.391 €/Jahr
Wartungskosten	2.844 €/Jahr
Laufende Auszahlungen	4.235 €/Jahr

Die Menge an Sekundärmaterial wurde in einem Zeitraum von vier Monaten (siehe Tabelle 18) erhoben und darauf aufbauend eine potentielle Angussmenge pro Jahr abgeschätzt. Die jährlich einzusparenden Auszahlungen ergeben sich aus der Differenz der laufenden Auszahlungen zur Ausgangssituation. Bei diesem Konzept werden sowohl die Kosten für Sammlung, Transport, externer Aufbereitung und Lagerung eingespart. Die Nutzungsdauer wurde auf 10 Jahre (Minimum laut Anlagenhersteller) bei einem Restwert der Anlage von 0 € festgesetzt. Der

Kalkulationszinsfuß von 12 % (Vorgabe des Controllings) bleibt, verglichen mit Konzept 1, unverändert (siehe Tabelle 21).

Tabelle 21: Weitere Eingangsgrößen der Investitionskostenrechnung für Konzept 2

Nutzungsdauer	10 Jahre
Restwert der Anlagen	0 €
Kalkulationszinsfuß	12 %
Materialmenge (Angüsse)	19.757 kg/Jahr
Jährliche Auszahlungen nach aktuellem Aufbereitungsprozess	$19.757 \text{ kg} \cdot (0,243 + 0,92 + 0,0215) \text{ €/kg} =$ 23.402 €

Die Durchführung der dynamischen Investitionsrechnung wird für Konzept 2 mit Tabelle 22 gezeigt. Abbildung 47 zeigt ferner die Entwicklung des Kapitalwertes über die gesamte Nutzungsdauer von 10 Jahren. Ein positiver Kapitalwert wird trotz Neuvalidierung des untersuchten Produktes unmittelbar im dritten Jahr der Nutzungsdauer erreicht. Der Kapitalwert beträgt bei diesem Fallbeispiel 75.046 € bei einem Kapitaleinsatz von 33.250 €.

Tabelle 22: Zusammenfassung der dynamischen Investitionsrechnung für Konzept 2

Jahr	Anschaffungs- auszahlung	Eingesparte Auszahlungen	Abzinsungsfaktor	Barwert	Kapitalwert
0	-33250		1,000	-33250	-33250
1		19167	0,893	17113	-16137
2		19167	0,797	15279	-857
3		19167	0,712	13642	12785
4		19167	0,636	12181	24966
5		19167	0,567	10876	35841
6		19167	0,507	9710	45552
7		19167	0,452	8670	54222
8		19167	0,404	7741	61963
9		19167	0,361	6912	68874
10		19167	0,322	6171	75046

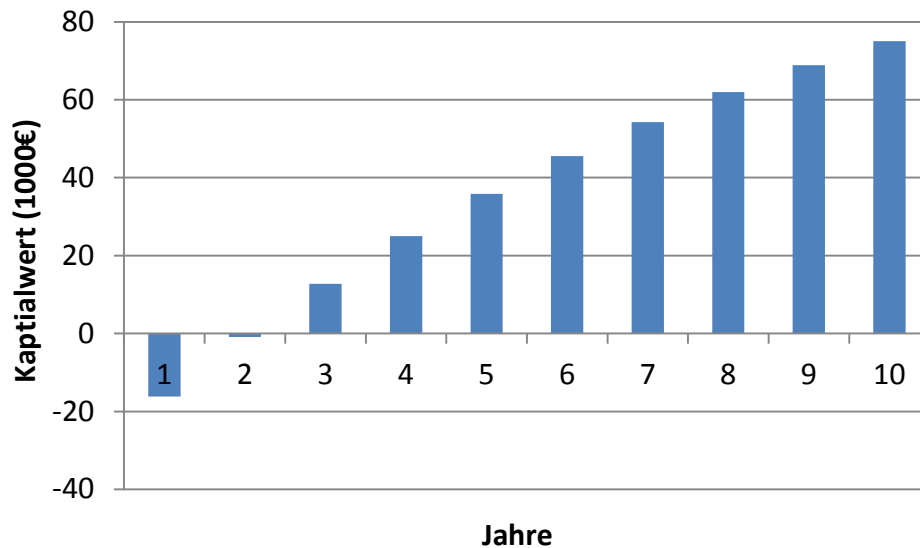


Abbildung 47: Grafische Darstellung der Kapitalwertentwicklung für Konzept 2

Tabelle 23 zeigt die Ergebnisse der dynamischen Investitionsrechnung. Die Amortisationsdauer beträgt in diesem Fallbeispiel 25 Monate bei einem internen Zinssatz von 57%. Der geringere interne Zinssatz verglichen mit Konzept 1 ist vor allem auf die Neuvalidierung des betrachteten Produktes zurückzuführen. Im Gegensatz zu Konzept 1 besteht dadurch (bei positivem Ausgang der Validierung) kein zusätzliches Risiko eines materialbedingten Produktausfalls.

Tabelle 23: Ergebnisse der dynamischen Investitionsrechnung für Konzept 2

Dynamische Amortisationsdauer	25 Monate
Kapitalwert	75.046 €
Annuität	13.282 €
Interner Zinssatz	57 %

Abschließend kann festgehalten werden, dass sich das Konzept Beistellmühle unter idealen Rahmenbedingungen (Produkt wird über langen Zeitraum an derselben Fertigungsanlage produziert) als äußerst profitabel erweist. Als größter Vorteil dieses Konzeptes kann die direkte Rückführung der Produktionsabfälle an den Fertigungsanlagen angeführt werden. Dadurch können Kosten für Sammlung, Personal bei der Aufbereitung, Lagerung und Wiedereinsatz eingespart werden. Als weitere Vorteile sind die vermuteten höheren mechanischen Eigenschaften des Mahlguts und das geringere Risiko einer Materialvermischung (durch direkte Rückführung des Sekundärmaterials) zu nennen. Dem gegenüber steht eine geringe Flexibilität, die eine Umsetzung als Gesamtkonzept am Standort Rankweil verhindert. Dennoch bietet sich eine situative Einführung bei Produkten mit hohen Fertigungsmengen, wie im Fallbeispiel gezeigt, an. Wie schon bei Konzept 1 erwähnt, führt Mahlgut unweigerlich zu einer unregelmäßigen Korngröße und einem deutlich höheren Staubanteil. Diese Faktoren bewirken Prozessschwankungen, die den Anforderungen der Firma

Hirschmann nach aktuellem Standard nicht genügen. Darüber hinaus bleibt auch das rechtliche Risiko, bei unterlassener Offenlegung der Materialumstellung (Mahlgut statt Regenerat) bestehen (siehe Tabelle 24).

Tabelle 24: Gegenüberstellung der wichtigsten Vor- und Nachteile des Konzeptes 2

Vorteile	Nachteile
Geringe laufende Auszahlungen	Als Gesamtkonzept nicht geeignet
Kleinst möglich geschlossener Recyclingkreislauf	Prozessfähigkeit nach internem Standard nicht gegeben
Risiko einer Materialvermischung während der Aufbereitung geringer	Kundenvereinbarungen wurden mit Regenerat getroffen
Kein thermisch bedingter Kettenabbau bei der Aufbereitung → höheres mechanisches Eigenschaftsniveau	Kein definiertes Restfeuchteniveau des Sekundärmaterials (Mahlgut)

4.5 Analyse des Konzeptes 3: Zentralmühlen mit Extruder

In den beiden folgenden Abschnitten werden zwei innerbetriebliche Lösungen mit Regenerat als Endprodukt der Aufbereitung vorgestellt. Zunächst wird auf das Konzept 3, welches auf Zentralmühlen mit nachgeschaltetem Extruder basiert, näher eingegangen. Wie bei allen zentralen Aufbereitungsvarianten, wurde auch bei diesem Konzeptvorschlag die Sammlung der Angüsse in der Produktion in seiner aktuellen Form (Tonnen) beibehalten. Als Standort der Aufbereitungsanlagen steht ausschließlich die in Abbildung 37 orange markierte Fläche zur Verfügung. Diese Tatsache bedingt einen 170 Meter langen Transport der Tonnen mit Kuppelprodukten. Die ausgewählte Extrusionsanlage benötigt als Input Partikel mit einer Teilchengröße < 6 mm. Demnach müssen die Angüsse in einem ersten Prozessschritt an Mühlen zerkleinert werden. Das Konzept der beiden in Kapitel 4.3 vorgestellten Aufbereitungslinien, basierend auf einer großen (Durchsatz 300 bis 350 kg/h) und einer kleineren Schneidemühle (Durchsatz 100 bis 150 kg/h), wurde dafür beibehalten. Die Beschickung der Mühlen erfolgt über Förderbänder mit entsprechenden Kippvorrichtungen. Das an den Zentralmühlen hergestellte Mahlgut wird in Oktabsins zwischengelagert und anschließend über ein Saugfördergerät in den Trichter einer Extrusionsanlage eingezogen. Dort wird es im Extruder durch Energiezufuhr (Heizbänder und Schererwärmung) aufgeschmolzen (plastifiziert). Neben einer Entgasungszone, mit deren Hilfe flüchtige Bestandteile aus der Schmelze (Feuchtigkeit) entfernt werden können, besteht die Möglichkeit Additive (z.B.: Pigmente, Füllstoffe) in diesem Prozessschritt beizumengen. Das plastifizierte Material tritt in Form von Strängen aus der Extrusionsanlage aus und wird anschließend durch ein Wasserbad geleitet. Im erstarrten Zustand werden diese Stränge dann von scharfen Messern abgeschlagen. Als Endprodukt kann so Regranulat bzw. Regenerat

(bei Additivierung) gewonnen werden, welches in Partikelgröße und Form dem Originalmaterial ident ist. Das (mechanische) Eigenschaftsprofil dieses Rezyklates ist im Regelfall unter jenem des Originalmaterials anzusiedeln. Durch die thermische Belastung während der Verarbeitung und der Aufbereitung kommt es (abhängig von der Polymerfamilie) zu einem mehr oder weniger starken Abbau der Molekülketten. Das so gewonnene Regenerat ist jedoch in jedem Fall dem aktuell extern bezogenen Sekundärmaterial ident. Somit stellt das Konzept 3 ausschließlich eine Eingliederung des Aufbereitungsprozesses dar, die (verglichen mit der Ausgangssituation) keine (negativen) Auswirkungen auf die Eigenschaften des Regenerats hat. Eine Neuvalidierung der Produkte ist demnach nicht erforderlich. Der eben beschriebene Aufbereitungsprozess wird noch einmal grafisch durch Abbildung 48 gezeigt.

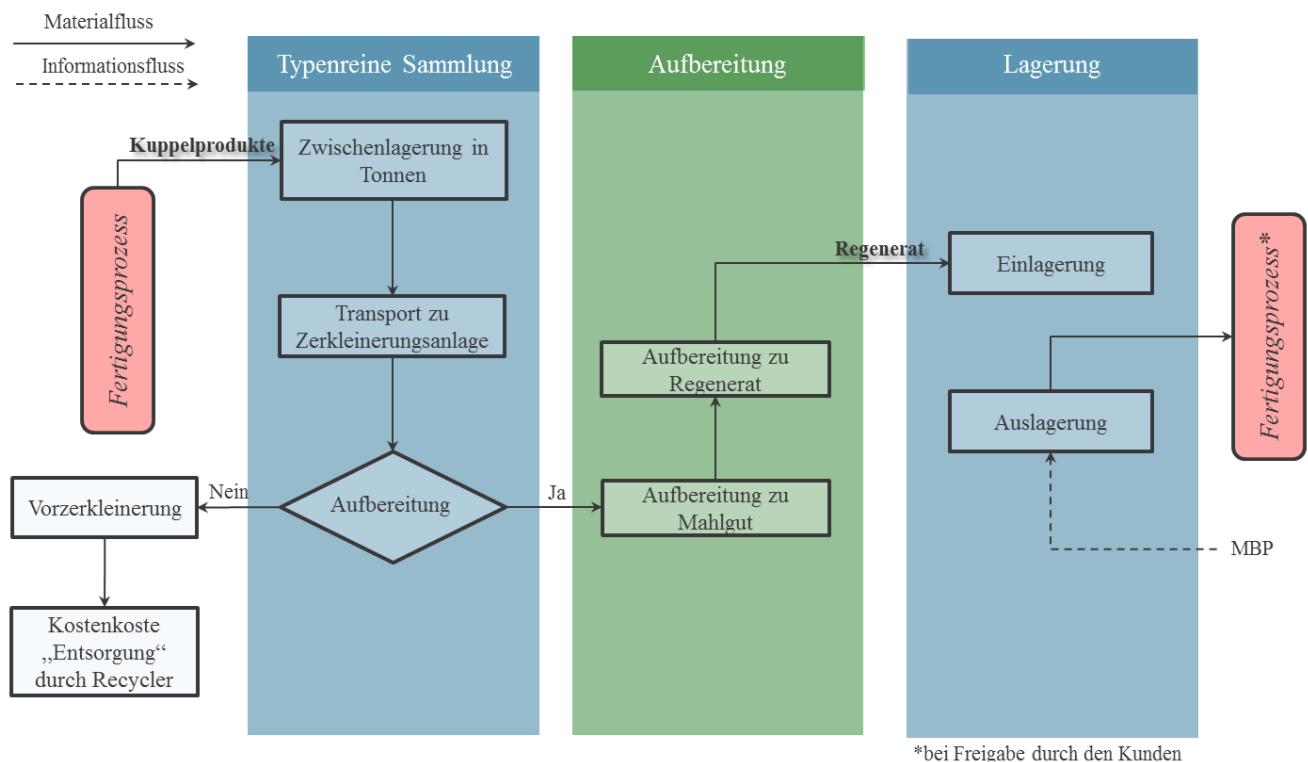


Abbildung 48: Ablaufdiagramm nach Konzept 3¹⁹⁶

Die Anschaffungsauszahlungen dieses Konzeptes setzen sich, wie Tabelle 25 zeigt, aus Anlagenkosten (inklusive Inbetriebnahme) und Kosten für den Hallenumbau (wurde vom Gebäudemanagement abgeschätzt) zusammen. Die höheren Kosten beim Umbau (vergleiche Konzept 1) ergeben sich vor allem durch eine Klimatisierung der Halle. Auf Grund der Abwärme der Extrusionsanlage ist diese aus arbeitsrechtlicher Sicht zwingend erforderlich. Darüber hinaus entstehen vor allem im Bereich der Entgasungszone Dämpfe, welche mit Absauganlagen filtriert und in die Außenluft geleitet werden müssen. Zusätzlich zu den Kippvorrichtungen der beiden Mühlen, welche speziell für die Form der Angusstonnen konzipiert wurden, wird eine Vorrichtung zur Beschickung durch Oktabins benötigt. Die Angusse der Lohnspritzer sowie des Standortes Kenitra werden zurzeit in dieser Form angeliefert.

¹⁹⁶ Quelle: Eigene Darstellung

Tabelle 25: Zusammenfassung aller Anschaffungsauszahlungen für Konzept 3

	Zentralmühle 1 (Durchsatz 300 – 350 kg/h)	Zentralmühle 2 (Durchsatz 100 – 150 kg/h)
Kippvorrichtung (Tonnen)	19.430 €	19.430 €
Kippvorrichtung (Oktabins)	28.600 €	
Förderband	4.120 €	3.255 €
Metallsuchspule	5.720 €	5.530 €
Schneidemühle inkl. Entstaubungsanlage	40.910 €	13.815 €
Fördergerät	3.218 €	
Metallabscheider	5.462 €	
Doppelschneckenextruder (inkl. Inbetriebnahme)	366.610 €	
Gesamtkosten (Anlagen)	516.100 €	
Kosten für Hallenumbau	350.000 €	
Anschaffungsauszahlung	866.100 €	

Bei diesem Konzeptvorschlag besteht die Möglichkeit mit Hilfe einer Entgasungszone ein definiertes Restfeuchteniveau für das aufbereitete Rezyklat einzustellen. Somit können neben den Angüssen des Standortes Rankweil auch jene der Lohnspritzer und des Standortes Kenitra, welche bei Anlieferung in Rankweil ein undefiniertes Feuchtigkeitsniveau besitzen, aufbereitet werden. Der jährliche Materialstrom erhöht sich dadurch, verglichen mit Konzept 1, von 390 auf 502 Tonnen. Die laufenden Auszahlungen des Konzeptes 3 sind in Tabelle 26 zusammengefasst. Diese setzen sich aus Kosten für den innerbetrieblichen Transport zu den Mühlen, Personalkosten (Mühlen + Extruder), Energiekosten (Mühlen + Extruder), Wartungskosten (Mühlen + Extruder), Raumkosten und Hilfs- und Betriebsstoffkosten zusammen. Verglichen mit Konzept 1 ergibt sich eine deutliche Steigerung aller jährlichen Auszahlungen durch den zusätzlichen Prozessschritt des Extrudierens.

Tabelle 26: Zusammenfassung aller jährlichen Auszahlungen für Konzept 3

Materialnummer	101-285-000	101-239-000	101-357-000
Materialmenge	420 Tonnen/Jahr	51 Tonnen/Jahr	31 Tonnen/Jahr
Personalkosten (Transport zu den Anlagen)	34.754 €/Jahr		
Personalkosten (Mühle)	47.110 €/Jahr		10.255 €/Jahr
Energiekosten (Mühle)	3.200 €/Jahr		204 €/Jahr
Wartungskosten (Mühle)	9.485 €/Jahr		4.688 €/Jahr
Personalkosten (Extruder)	46.446 €		
Energiekosten (Extruder)	12.303 €		
Wartungskosten (Extruder)	35.924 €		
Hilfs- und Betriebsstoffkosten	3.478 €/Jahr		
Raumkosten	29.700 €/Jahr		
Laufende Auszahlungen	237.583 €/Jahr		

Die Nutzungsdauer wurde auf 10 Jahre festgesetzt (Minimum laut Anlagenhersteller). Die jährlich eingesparten Auszahlungen ergeben sich aus der Differenz zur Ausgangssituation (siehe Tabelle 27). Neben den Kosten für die externe Aufbereitung und der innerbetrieblichen Sammlung wurden hier auch die Transportkosten (nach Deutschland) mit einbezogen. Im Gegensatz zu Konzept 1 können in diesem Szenario alle am Standort Rankweil anfallenden oder zwischengelagerten Angüsse aufbereitet werden. Der Kalkulationszinsfuß beträgt für dieses Investitionsvorhaben gemäß dem Controlling der Firma Hirschmann 12 %.

Tabelle 27: Weitere Eingangsgrößen der Investitionskostenrechnung für Konzept 3

Nutzungsdauer	10 Jahre
Restwert der Anlagen	0 €
Kalkulationszinsfuß	12 %
Materialmenge (Angüsse)	390 Tonnen/Jahr (Rankweil) 112 Tonnen/Jahr (Lohnspritzer + Kenitra)
Jährliche Auszahlungen nach aktuellem Aufbereitungsprozess	$390.000 \text{ kg} \cdot (0,92 + 0,243) \frac{\text{€}}{\text{kg}} + 112.000 \text{ kg} \cdot 0,92 \frac{\text{€}}{\text{kg}} = 556.610 \text{ €}$

Die Durchführung der dynamischen Investitionsrechnung wurde in Tabellenform festgehalten (siehe Tabelle 28). Abbildung 49 zeigt zusätzlich die Entwicklung des Kapitalwertes in grafischer Form. Ein positiver Kapitalwert wird bei Konzept 3 erst im vierten Jahr erreicht. Trotz eines deutlich höheren Kapitaleinsatzes (verglichen mit Konzept 1) wird mit diesem Investitionsvorhaben ein geringerer Kapitalwert von 936.474 € erreicht.

Tabelle 28: Zusammenfassung der dynamischen Investitionsrechnung für Konzept 3

Jahr	Anschaffungsauszahlung	Eingesparte Auszahlungen	Abzinsungsfaktor	Barwert	Kapitalwert
0	-866100		1,000	-866100	-866100
1		319027	0,893	284846	-581254
2		319027	0,797	254326	-326928
3		319027	0,712	227077	-99851
4		319027	0,636	202747	102897
5		319027	0,567	181025	283921
6		319027	0,507	161629	445550
7		319027	0,452	144312	589862
8		319027	0,404	128850	718712
9		319027	0,361	115044	833756
10		319027	0,322	102718	936474

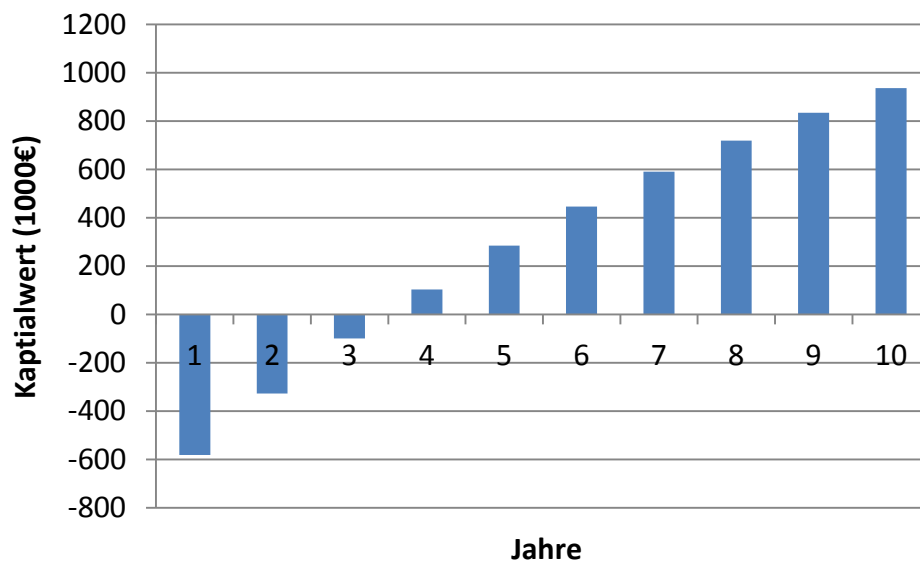


Abbildung 49: Grafische Darstellung der Kapitalwertentwicklung für Konzept 3

Wie Tabelle 29 zeigt beläuft sich die Amortisationsdauer auf 42 Monate. Der interne Zinssatz beträgt 35%. Trotz deutlicher Einbußen aller monetärer Bewertungskriterien (vergleiche Konzept 1) erweist sich dieses Konzept über eine Nutzungsdauer von 10 Jahren als profitabel. Kritisch sind jedoch die hohe Amortisationszeit und das damit verbundene finanzwirtschaftliche Risiko anzumerken. Bei der Berechnung wurde ein konstanter Materialstrom für die kommenden 10 Jahre angenommen. Der Einsatz von Rezyklat muss jedoch durch die Kunden von Hirschmann Automotive freigegeben werden. Eine strategische Entscheidung (auf Kundenseite) künftig kein Regenerat einzusetzen, könnte den Sekundärmaterialbedarf und somit das Erfolgspotential aller innerbetrieblichen Aufbereitungskonzepte deutlich reduzieren. Sollte es demnach zu einer drastischen Reduktion oder zu einem generellen Verbot von Regenerat in den ersten vier Jahren nach Umsetzung dieses Konzeptes kommen, ist ein negativer Kapitalwert nicht auszuschließen (= finanzwirtschaftliches Risiko).

Tabelle 29: Ergebnisse der dynamischen Investitionsrechnung für Konzept 3

Dynamische Amortisationsdauer	42 Monate
Kapitalwert	936.474 €
Annuität	165.741 €
Interner Zinssatz	35 %

Abschließend werden noch einmal die wichtigsten Vor- und Nachteile des Konzeptes 3 diskutiert (siehe Tabelle 30). Im Vergleich zu Konzept 1 kommt es durch den zusätzlichen Prozessschritt des Extrudierens zu deutlichen Einbußen hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit. Vor allem der interne Zinssatz wird durch höhere Anschaffungsauszahlungen (bei ähnlichem Kapitalwert) drastisch reduziert (von 73,8 % auf 35 %). Die Amortisationsdauer erhöht sich darüber hinaus auf 42 Monate. Die Eingangsgröße Materialstrom ist durch eine starke Kundenabhängigkeit mit Unsicherheit behaftet. Auf Grund dieser Tatsache, der langen Amortisationsdauer und der hohen Anschaffungsauszahlungen besteht für dieses Investitionsvorhaben jedenfalls ein gewisses finanzwirtschaftliches Risiko. Dem gegenüber stehen minimale Prozess- und Produktausfallrisiken. Außerdem kann das Erfolgspotential um die Angussmengen der Lohnspritzer und des Standortes Kenitra erweitert werden.

Tabelle 30: Gegenüberstellung der wichtigsten Vor- und Nachteile des Konzeptes 3

Vorteile	Nachteile
Keine Materialunterschiede zur Ausgangssituation → kein zusätzliches Prozess- oder Produktausfallsrisiko	Hohe Anschaffungsauszahlung
Keine Validierungskosten	Lange Amortisationsdauer → finanzwirtschaftliches Risiko
Definiertes Restfeuchteniveau des Sekundärmaterials	Thermisch bedingter Kettenabbau durch Aufbereitung

4.6 Analyse des Konzeptes 4: Schredder-Extruderanlage

In diesem Abschnitt wird das Konzept 4, welches auf einer innovativen Schredder-Extruderanlage basiert, vorgestellt und bewertet. Gleich dem Konzept 3 wird als Endprodukt der Aufbereitung Regranulat oder Regenerat (bei Additivierung) gewonnen. Dieses Material ist hinsichtlich aller Eigenschaften, Form und Partikelgröße dem aktuell extern bezogenen Sekundärmaterial ident. Bei diesem Konzept sind folglich keine negativen (materialbedingten) Auswirkungen auf Prozesse oder Produkte zu erwarten. Die Sammlung der Produktionsabfälle in Tonnen bleibt auch bei diesem Konzeptvorschlag unverändert (Systemgrenze laut Hirschmann). Die Beschickung der Anlage erfolgt über eine Kippvorrichtung (spezielle Konstruktion für Tonnen oder Oktabins) mit anschließendem Förderband. Wie Abbildung 50 zeigt, wurde das Förderband mit einer Metallsuchspule ausgestattet, die den Einzug metallischer Partikel verhindern soll.

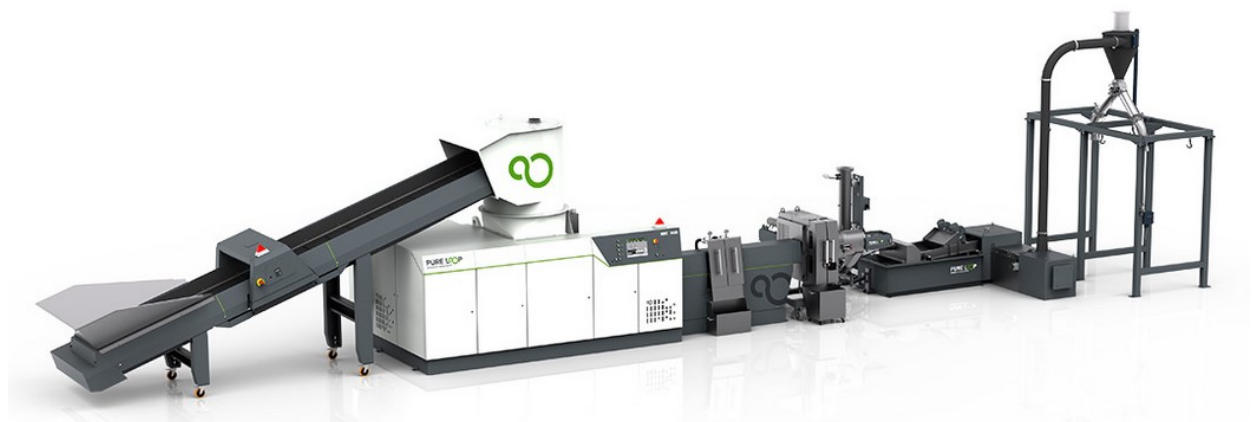


Abbildung 50: Schredder-Extruderanlage in der ausgewählten Ausführung¹⁹⁷

¹⁹⁷ Quelle: PureLoop, http://www.pureloop.at/de/isec_produk (Zugriff: 27.11.2016)

Die Angüsse werden mit Hilfe eines Einwellenzerkleinerers auf eine definierte Partikelgröße gemahlen und so der direkte Einzug des Materials in den nachfolgenden Extruder ermöglicht. Das vorzerkleinerte Material wird unter Energiezufuhr im Extruder aufgeschmolzen (plastifiziert). Mit Hilfe einer Entgasungszone (siehe Abbildung 19) kann ein definiertes Restfeuchteniveau des Endproduktes sichergestellt werden. Die Schmelze wird abschließend filtriert und in Strangform durch ein Wasserbad geleitet. Die abgekühlten Stränge werden von scharfen Messern (Granulierung) abgeschlagen und über ein Gebläse direkt in Oktabins gefördert. Abbildung 51 zeigt grafisch den eben beschriebenen Aufbereitungsprozess.

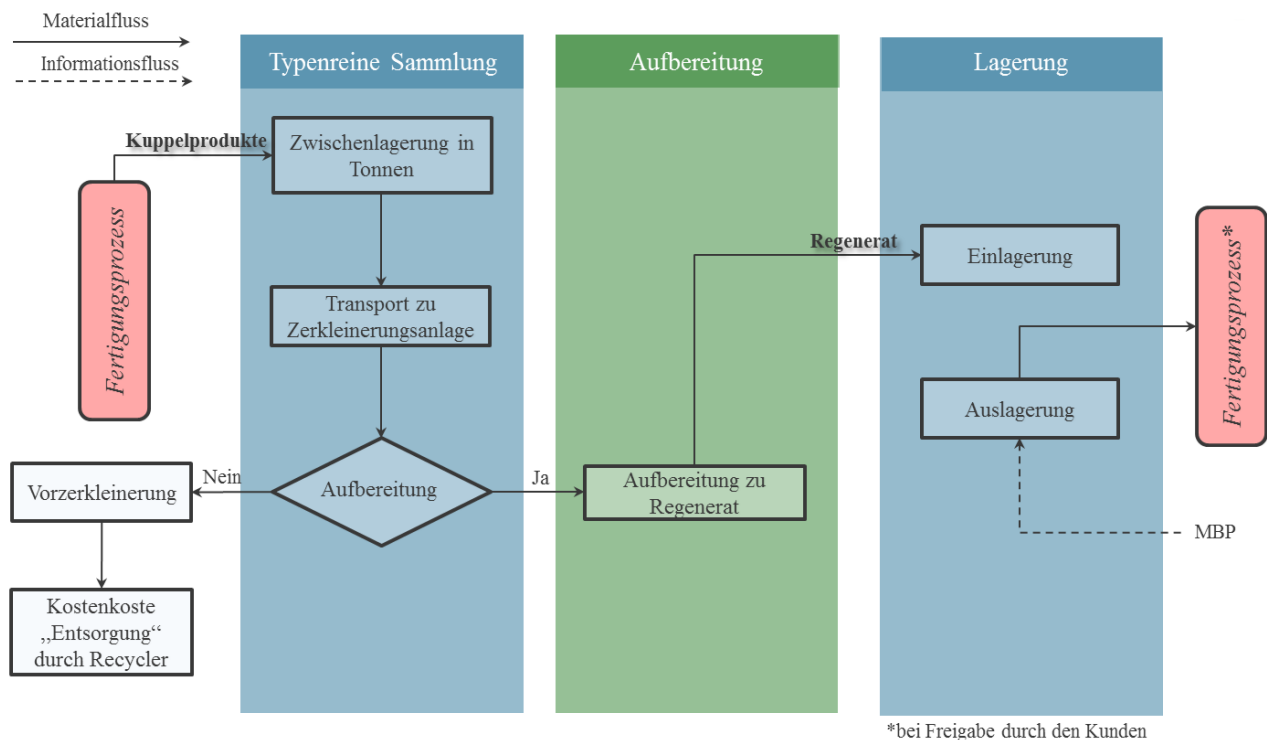


Abbildung 51: Ablaufdiagramm nach Konzeptes 4¹⁹⁸

Die Anschaffungsauszahlungen dieses Konzeptes setzen sich (siehe Tabelle 31) aus Kosten für die Anlage selbst (inklusive Inbetriebnahme), Kosten für zwei Kippvorrichtungen (einmal für Angusszuführung über Tonnen, einmal für Zuführung über Oktabins) und den Kosten für den Umbau der ausgewählten Halle zusammen. Die Abwärme dieser Anlage bedingt (wie für Konzept 3) eine Klimatisierung der Halle. Darüber hinaus muss die Filtration und Absaugung aller flüchtigen Bestandteile, die während der Entgasung aus der Schmelze entweichen können, sichergestellt werden. Diese Punkte erhöhen die Kosten für den Hallenumbau, verglichen mit Konzept 1, deutlich. Die Anschaffungsauszahlungen liegen rund 55.000 € über jenen des Konzeptes 3 und sind somit die höchsten aller vorgestellten Konzepte.

¹⁹⁸ Quelle: Eigene Darstellung

Tabelle 31: Zusammenfassung aller Anschaffungsauszahlungen für Konzept 4

Kippvorrichtung (Oktabins)	28.600 €
Kippvorrichtung (Tonnen)	19.430 €
Schredder-Extruderanlage	522.400 €
Kosten für Hallenumbau	350.000 €
Anschaffungsauszahlung	920.430 €

Die Entgasungszone der Anlage ermöglicht die Aufbereitung von Angüssen unbestimmter Restfeuchte. Somit können alle am Standort Rankweil anfallenden oder angelieferten (von Lohnspritzer und Standort Kenitra) Kuppelprodukte aufbereitet werden. Die jährlichen Auszahlungen setzen sich aus den Kosten für die innerbetriebliche Angussammlung samt Transport zum Aufbereitungsstandort, Personalkosten (Anlagenbetrieb), Energiekosten, Raumkosten, Wartungskosten, und Hilfs- und Betriebsstoffkosten zusammen (siehe Tabelle 32). Der Vergleich mit Tabelle 26 zeigt, dass durch den integrierten Prozessschritt der Angusszerkleinerung, die laufenden Auszahlungen deutlich reduziert werden können. Die Zeit der Materialaufbereitung wird halbiert und dadurch auch die Personalkosten. Darüber hinaus werden Energiekosten minimiert.

Tabelle 32: Zusammenfassung aller jährlichen Auszahlungen für Konzept 4

Materialnummer	101-285-000	101-239-000	101-357-000
Materialmenge	420 Tonnen/Jahr	51 Tonnen/Jahr	31 Tonnen/Jahr
Personalkosten (Transport zur Anlage)	34.754 €/Jahr		
Personalkosten (Anlagenbetrieb)	49.582 €		
Energiekosten	11.897 €		
Wartungskosten	67.077 €		
Hilfs- und Betriebsstoffkosten	3.514 €/Jahr		
Raumkosten	29.700 €/Jahr		
Laufende Auszahlungen	196.524 €/Jahr		

Die Nutzungsdauer dieser Anlage beträgt laut Hersteller mindestens 10 Jahre. Dabei wurde nach Ablauf kein Restwert angenommen. Der in der Investitionsrechnung verwendete Kalkulationszinsfuß wurde vom Controlling der Firma Hirschmann mit 12 % vorgegeben. Die jährlichen Auszahlungen nach aktuellem Stand ergeben sich aus den Kosten für die innerbetriebliche Sammlung (nur Angüsse vom Standort Rankweil),

Transportkosten (nach Deutschland) und Kosten für die externe Aufbereitung. Die Differenz zu den laufenden Auszahlungen des Konzeptes 4 bilden die jährlich eingesparten Auszahlungen.

Tabelle 33: Weitere Eingangsgrößen der Investitionskostenrechnung für Konzept 4

Nutzungsdauer	10 Jahre
Restwert der Anlagen	0 €
Kalkulationszinsfuß	12 %
Materialmenge (Angüsse)	390 Tonnen/Jahr (Rankweil) 112 Tonnen/Jahr (Lohnspritzer + Kenitra)
Jährliche Auszahlungen nach aktuellem Aufbereitungsprozess	$390.000 \text{ kg} \cdot (0,92 + 0,243) \frac{\text{€}}{\text{kg}} + 112.000 \text{ kg} \cdot 0,92 \frac{\text{€}}{\text{kg}} = 556.610 \text{ €}$

Die wichtigsten Daten der durchgeführten Investitionsrechnung können der Tabelle 34 entnommen werden. Abbildung 52 zeigt zusätzlich die Entwicklung des Kapitalwertes. Ein Break-even wird bei diesem Investitionsvorhaben unmittelbar im vierten Jahr erreicht. Der Kapitalwert ist mit 1.114.137 € nahezu ident mit jenem des Konzeptes 1 und liegt somit deutlich über dem Kapitalwert des Konzeptes 3.

Tabelle 34: Zusammenfassung der dynamischen Investitionsrechnung für Konzept 4

Jahr	Anschaffungs- auszahlung	Eingesparte Auszahlungen	Abzinsungsfaktor	Barwert	Kapitalwert
0	-920430		1,000	-920430	-920430
1		360086	0,893	321505	-598925
2		360086	0,797	287058	-311866
3		360086	0,712	256302	-55564
4		360086	0,636	228841	173277
5		360086	0,567	204323	377600
6		360086	0,507	182431	560031
7		360086	0,452	162885	722915
8		360086	0,404	145433	868348
9		360086	0,361	129851	998199
10		360086	0,322	115938	1114137

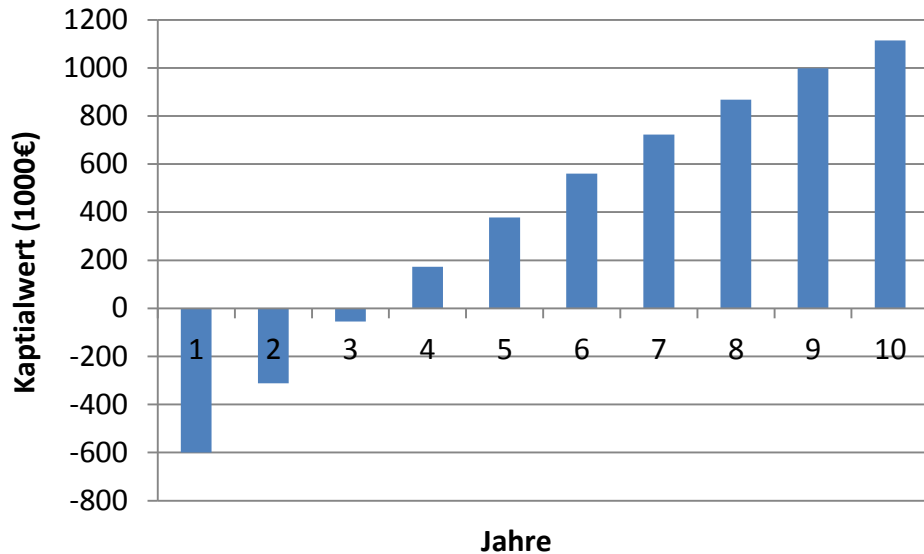


Abbildung 52: Grafische Darstellung der Kapitalwertentwicklung für Konzept 4

Der Vergleich von Tabelle 35 mit Tabelle 29 zeigt, dass dieses Investitionsvorhaben aus wirtschaftlicher Sicht dem Konzept 3 klar überlegen ist. Bei gleichem qualitativem Output kann durch die Integration des Prozessschrittes der Angusszerkleinerung sowohl die Amortisationsdauer reduziert als auch der interne Zinssatz (trotz höheren Anschaffungsauszahlungen) gesteigert werden. Als erste Bilanz wird somit festgehalten:

Das Konzept 3 kommt als innerbetriebliche Aufbereitungslösung für den Standort Rankweil nicht in Frage.

Die Umsetzung des Konzeptes 2 (als Gesamtlösung) ist auf Grund der Platzverhältnisse in der Produktionshalle und der Produktionsphilosophie der Firma Hirschmann nicht möglich.

Somit verbleiben die Konzepte 1 (Endprodukt Mahlgut) und 4 (Endprodukt Regenerat) zur näheren Analyse.

Tabelle 35: Ergebnisse der dynamischen Investitionsrechnung für Konzept 4

Dynamische Amortisationsdauer	39 Monate
Kapitalwert	1.114.137 €
Annuität	197.185 €
Interner Zinssatz	37,5 %

Abschließend werden die wichtigsten Vor- und Nachteile des Konzeptes 4 noch einmal zusammengefasst:

Die Plastifizierung der Kuppelprodukte bedingt einen thermischen Abbau der Molekülketten, welcher in geringeren mechanischen Eigenschaften (verglichen mit Mahlgut) resultieren kann. Dem gegenüber steht die Möglichkeit durch diese Form der

Aufbereitung flüchtige Bestandteile aus der Schmelze zu entfernen und so ein definiertes Restfeuchteniveau des Rezyklates sicherzustellen. Das mit der Schredder-Extruderanlage produzierte Regenerat ist jedenfalls dem aktuell extern bezogenen Sekundärmaterial ident. Somit sind keine zusätzlichen (materialbedingten) Prozessschwankungen oder Produktausfälle zu erwarten. Aus rechtlicher Sicht ist die Eingliederung dieses Aufbereitungsprozesses ebenfalls völlig unkritisch zu sehen. In den relevanten Verträgen wurde von den Kunden der Einsatz von Regenerat freigegeben, ohne nähere Vorgaben zur Herstellung zu machen. Durch die qualitative Gleichwertigkeit zum aktuell verwendeten Regenerat kann auf eine Neuvalidierung verzichtet werden. Aus wirtschaftlicher Sicht zeigt sich das Konzept 4 bei einer Nutzungsdauer der Anlage von 10 Jahren und einem konstanten Materialstrom als überaus profitabel. Der Kapitalwert dieses Investitionsvorhabens beträgt 1.114.137 € bei einem internen Zinssatz von 37,5 %. Kritisch müssen jedoch die hohen Anschaffungsauszahlungen (920.430 €) und die lange Amortisationsdauer (39 Monate) erwähnt werden. Der bei dieser Berechnung verwendete, konstante Materialstrom ist auf Grund starker Kundenabhängigkeit mit Unsicherheit behaftet. Eine strategische Entscheidung auf Kundenseite künftig kein Regenerat in ihren Produkten einzusetzen, könnte den Regeneratbedarf und somit das Erfolgspotential schlagartig reduzieren.

Tabelle 36: Gegenüberstellung der wichtigsten Vor- und Nachteile des Konzeptes 4

Vorteile	Nachteile
Keine Materialunterschiede zur Ausgangssituation → kein zusätzliches Prozess- oder Produktausfallsrisiko	Höchsten Anschaffungsauszahlungen
Keine Validierungskosten	Lange Amortisationsdauer → finanzwirtschaftliches Risiko
Definiertes Restfeuchteniveau des Sekundärmaterials	Thermisch bedingter Kettenabbau durch die Aufbereitung
Regeneratherstellung in einem Prozessschritt	

4.7 Sensitivitätsanalysen

Im folgenden Abschnitt werden die bevorzugten Konzepte 1 (Zentralmühlen) und 4 (Schredder-Extruderanlage) mit Hilfe von Sensitivitätsanalysen näher untersucht. Mit dieser Methode können die Auswirkungen unsicherer Eingangsdaten auf ökonomische Zielgrößen wie Kapitalwert oder interner Zinssatz dargestellt und analysiert werden.

- **Konzept 1**

Als zu variierende Parameter wurden die Anschaffungsauszahlungen, die Nutzungsdauer, die Höhe des jährlichen Materialstroms und die zwei bestimmenden Größen der laufenden Auszahlungen (Energie-, und Wartungskosten, Personalkosten) ausgewählt.

Die Anschaffungsauszahlungen setzen sich bei Konzept 1 aus Anlagenkosten, Kosten für den Umbau der Halle und Validierungskosten (für ausgewählte Produkte) zusammen. Die beiden erstgenannten Größen basieren auf bindenden Angeboten sowie den Einschätzungen von Experten des Gebäudemanagements. Eine große Variation dieser beiden Inputparameter ist nicht zu erwarten. Wie Abbildung 53 zeigt, weist der Kapitalwert dieses Investitionsvorhabens überdies eine geringe Sensitivität gegenüber Veränderungen im Bereich der Anschaffungsauszahlungen auf. Selbst ein Anstieg dieses Parameters um 80% würde einen Kapitalwert von 893 536 € mit einem internen Zinssatz von knapp 40% zur Folge haben. Die dritte Größe der Anschaffungsauszahlungen wird durch die Validierungskosten bestimmt. In der Rechnung von Kapitel 4.3 wurde von einer Teilvalidierung ausgegangen. Das bedeutet, dass nur ausgewählte Produkte auf Grund der Materialumstellung validiert werden und bei positivem Ausgang auf eine Validierung aller Produkte verzichtet wird. Diese Vorgehensweise birgt das latente Risiko eines materialbedingten Produktausfalls in sich. Um diesen Risikoaspekt vollkommen auszuschließen, müssen alle Produkte, bei denen aktuell Rezyklat eingesetzt wird, nach der Umstellung auf Mahlgut neuerlich validiert werden. Der Einfluss dieser Entscheidung hat einen negativen Kapitalwert in Millionenhöhe (siehe Abbildung 53) zur Folge. Die Sensitivitätsanalyse zeigt demnach, dass die Vorgehensweise einer Teilvalidierung alternativlos ist und das Risiko eines materialbedingten Produktausfalls bei diesem Konzept jedenfalls in Kauf genommen werden muss.

Ein mit großer Unsicherheit behafteter Parameter ist der jährliche Materialstrom. Bei der in Kapitel 4.3 durchgeführten Investitionsrechnung wurde von einem konstanten Materialstrom über die nächsten 10 Jahre ausgegangen. Forcastzahlen lassen hingegen einen deutlichen Anstieg vermuten. Da der Einsatz von Regenerat durch die Kunden von Hirschmann Automotive vorgegeben wird, kann trotz dieser Zahlen kein zuverlässiger Trend vorhergesagt werden. Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse zeigen, dass dieser Parameter zusätzlich den stärksten Einfluss auf die beiden Zielgrößen ausübt. Ein negativer Kapitalwert, der somit die Vorteilhaftigkeit dieses Investitionsvorhabens gefährdet, wird jedoch erst bei einem Rückgang von mehr als 75% erreicht. Ein derartiges Szenario ist nach aktuellem Stand nicht realistisch.

Die Nutzungsdauer dieses Investitionsvorhabens wurde vom Anlagenhersteller vorgegeben. Bei dem verwendeten Wert (10 Jahre) handelt es sich um das absolute Minimum. Praxisbeispiele zeigen, dass eine Nutzungsdauer von mehr als 15 Jahren bei Schneidemühlen keine Seltenheit darstellt. Dieser Parameter hat nach dem Materialstrom den größten Einfluss auf den Kapitalwert und den internen Zinssatz. Ein negativer Kapitalwert wird erst bei einem Rückgang von mehr als 80% erreicht. Dieses Szenario kann ebenfalls als unwahrscheinlich eingestuft werden.

Darüber hinaus wurden die zwei bestimmenden Größen der laufenden Auszahlungen (Energie- und Wartungskosten sowie Personalkosten) in einem Bereich von $\pm 80\%$

variiert. Diese Parameter zeigen einen sehr geringen Einfluss auf den Kapitalwert und den internen Zinssatz. Somit kann abschließend festgehalten werden, dass nach aktuellem Stand kein realistisches Szenario (mit Ausnahme einer Vollvalidierung) die Vorteilhaftigkeit dieses Investitionsvorhabens gefährdet und das finanzwirtschaftliche Risiko als äußerst gering eingestuft werden kann.

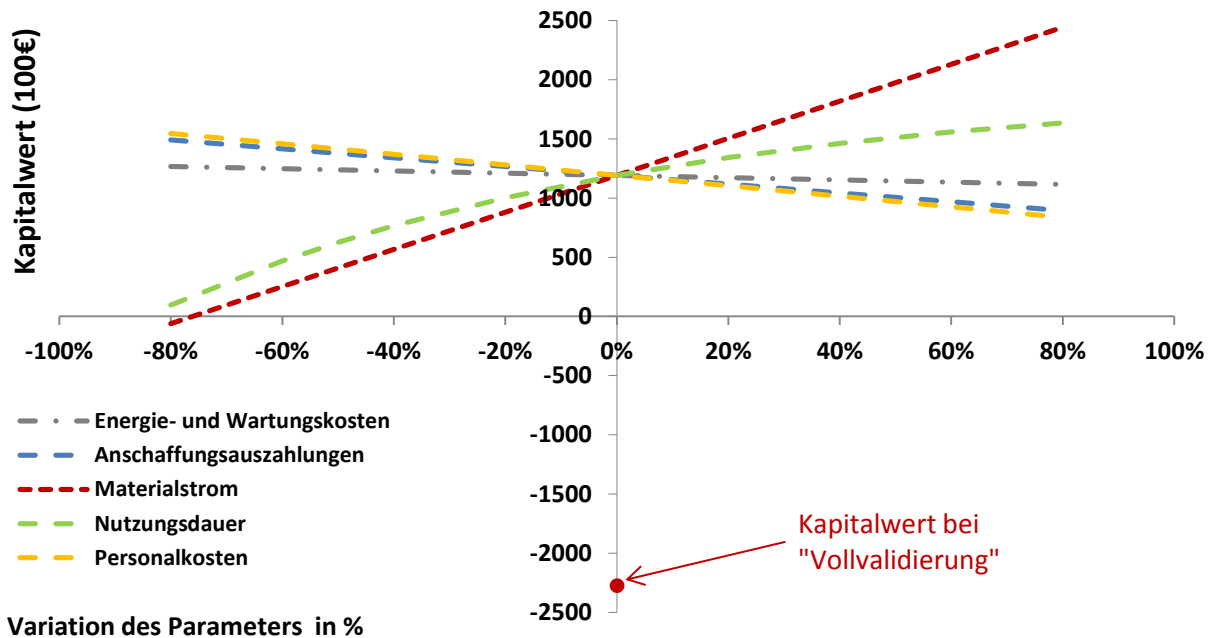


Abbildung 53: Sensitivität des Kapitalwertes auf ausgewählte Eingangsgrößen (Konzept 1)

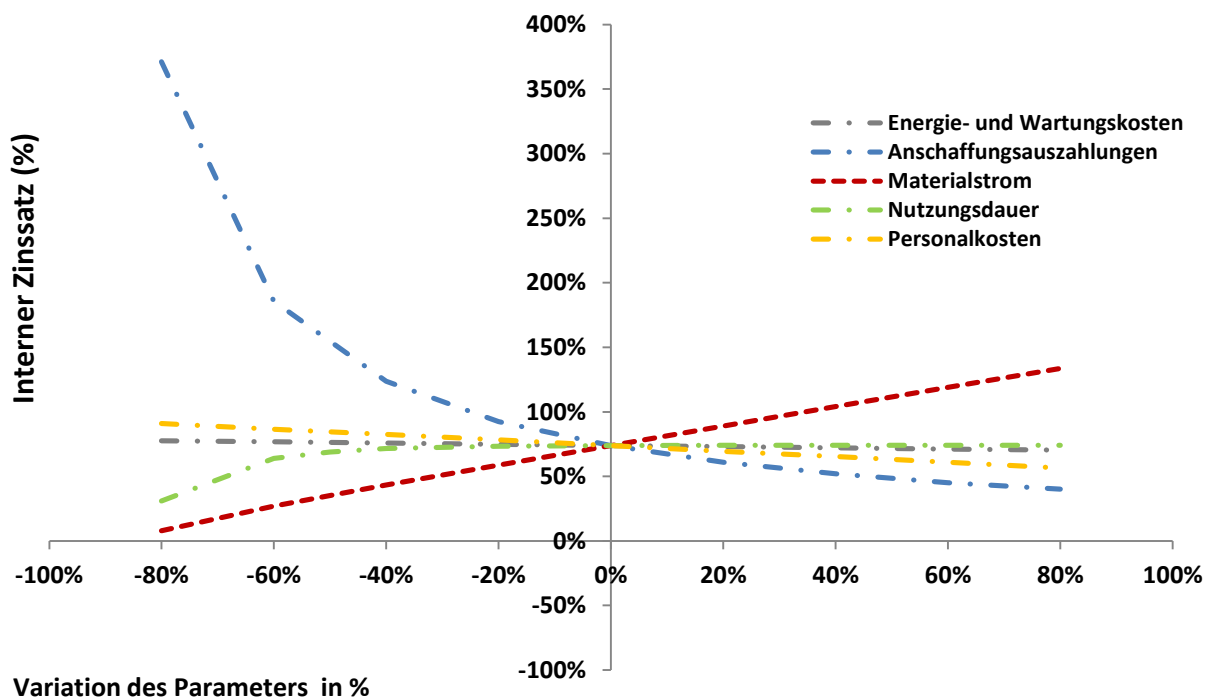


Abbildung 54: Sensitivität des internen Zinssatzes auf ausgewählte Eingangsgrößen (Konzept 1)

- **Konzept 4**

Bei der Sensitivitätsanalyse des Konzeptes 4 wurden die Anschaffungsauszahlungen, der Materialstrom, die Nutzungsdauer und drei Größen der laufenden Auszahlungen (Wartungs-, Energie-, und Personalkosten) variiert.

Die Anschaffungsauszahlungen setzen sich bei diesem Konzeptvorschlag aus den Anlagenkosten und jenen Kosten zusammen, die der Umbau der ausgewählten Halle (geplanter Aufbereitungsstandort) mit sich bringt. Beide Inputgrößen können als sicher eingestuft werden, da sie auf bindenden Angeboten oder Expertenmeinungen des Gebäudemanagements beruhen. Der Kapitalwert weist zusätzlich eine geringe Sensitivität gegenüber den Anschaffungsauszahlungen auf. Selbst eine Erhöhung dieses Faktors um 80% würde die absolute Vorteilhaftigkeit dieses Investitionsvorhabens nicht gefährden.

Änderungen beim Materialstrom haben hingegen starken Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit. Überdies ist dieser Faktor mit großer Unsicherheit behaftet. Ein zuverlässiger Trend über die nächsten 10 Jahre kann für diese Größe auf Grund starker Kundenabhängigkeit nicht vorhergesagt werden. Die Analyse zeigt, dass ab einem Rückgang von ca. 55% mit einem negativen Kapitalwert zu rechnen ist. Dieses Szenario ist nach aktuellem Stand eher unwahrscheinlich, kann jedoch nicht kategorisch ausgeschlossen werden. Damit bleibt ein bestimmtes finanzwirtschaftliches Restrisiko für diesen Konzeptvorschlag bestehen. Als optimistisches Szenario wurde außerdem von der Aufbereitung aller Kuppelprodukte (Hirschmann Europa) am Standort Rankweil ausgegangen. Die Kapazität der ausgewählten Anlage würde eine derartige Vorgehensweise erlauben. Aus aktueller Sicht sprechen jedoch die eingeschränkten Platzverhältnisse gegen eine Umsetzung. Wie Abbildung 55 zeigt, könnte der Kapitalwert dadurch mehr als verdoppelt werden (bei einer Amortisationsdauer von 22 Monaten). Dieses Szenario zeigt das große Erfolgspotential der Schredder-Extruderanlage bei Kapazitätsauslastung auf. Es gilt somit gemeinsam mit dem Gebäudemanagement Lösungen zu erarbeiten, die einer Umsetzung ermöglichen.

Die Nutzungsdauer der Anlage wurde durch den Hersteller vorgegeben. Auf Grund der Neuwertigkeit dieser Technologie gibt es noch keine Praxisbeispiele, die eine Nutzungsdauer von mehr als 6 Jahren (bei vergleichbarem Materialinput) belegen können. Die Sensitivitätsanalyse zeigt den starken Einfluss dieses Faktors auf den Kapitalwert und vor allem auf den internen Zinssatz. Ein negativer Kapitalwert wird jedoch erst bei einer Reduktion um mehr als 65% erreicht. Ein derartiges Szenario konnte durch Fallbeispiele des Anlagenherstellers entkräftet werden.

Die drei untersuchten und bestimmenden Größen der laufenden Auszahlungen (Energie-, Wartungs- und Personalkosten) zeigen einen geringen Einfluss auf den Kapitalwert und den internen Zinssatz. Selbst ein Anstieg dieser Kosten um mehr als 80% würde die absolute Vorteilhaftigkeit dieses Investitionsvorhabens nicht bedrohen. Es kann somit festgehalten werden, dass die Vorteilhaftigkeit dieses Investitionsvorhabens als relativ sicher eingestuft werden kann. Die lange Amortisationsdauer birgt dennoch auf Grund der starken Kundenabhängigkeit beim Einsatz von Regenerat ein gewisses finanzwirtschaftliches Risiko in sich.

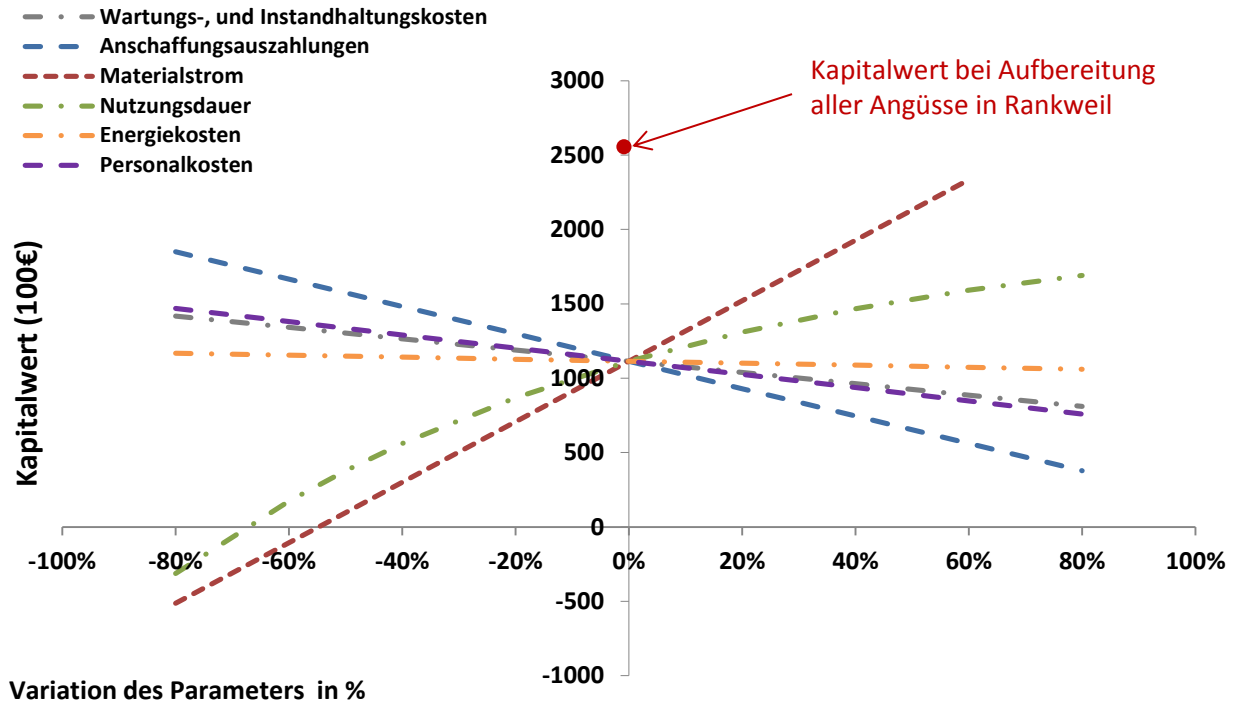


Abbildung 55: Sensitivität des Kapitalwertes auf ausgewählte Eingangsgrößen (Konzept 4)

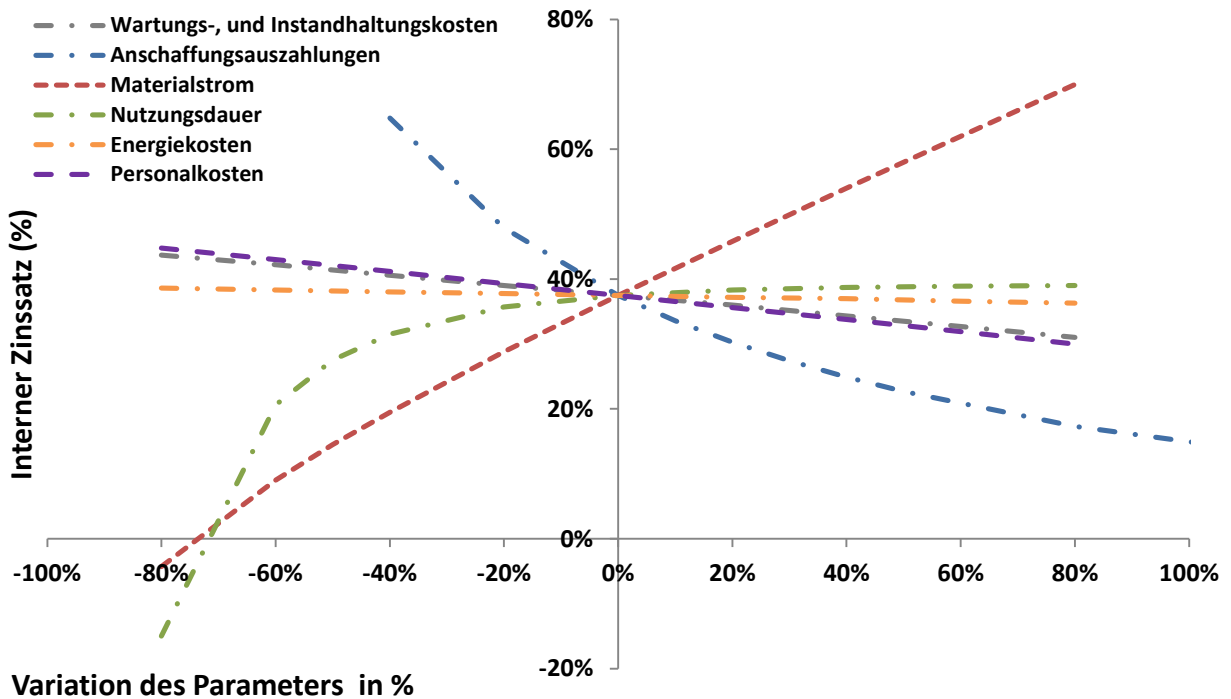


Abbildung 56: Sensitivität des internen Zinssatzes auf ausgewählte Eingangsgrößen (Konzept 4)

5 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel dieser Masterarbeit war es das werkstoffliche Recycling der Firma Hirschmann Automotive GmbH am Standort Rankweil im Detail zu untersuchen, sowie innerbetriebliche Alternativen zum derzeit extern ausgelagerten Aufbereitungsprozess zu finden und diese nach technischen und ökonomischen Kriterien zu bewerten. Das Recycling beschränkt sich an diesem Standort auf Produktionsabfälle aus thermoplastischen Kunststoffen, die bei einem bestimmten Verarbeitungsverfahren (Spritzgießen) in unterschiedlich großen prozentualen Anteilen zum Bauteil anfallen können. Der Anschnitt (unmittelbare Verbindung von Anguss und Produkt) wird von den Konstrukteuren stets als Tunnelanguss ausgeführt. Dadurch kommt es bei der Entformung (Formteil wird durch Auswerferstifte aus dem Werkzeug gedrückt) automatisch zu einer Trennung von Kuppelprodukt und Bauteil. Die beiden Formteile werden anschließend über ein Förderband zu einer Separiertrommel geleitet und dort räumlich voneinander getrennt. Neben allen Spritzgießmaschinen am Standort Rankweil sind mit Plaketten (um Materialvermischungen zu vermeiden) versehene Tonnen positioniert, die den Angüssen (= Kuppelprodukte) als Zwischenlager dienen. Diese Tonnen sind aktuell von der Produktionshalle zu einem 170 Meter entfernten Sammelpunkt zu transportieren. Dort werden die Kuppelprodukte an einem Schredder zerkleinert (um Transportvolumen einzusparen) und in Oktabins typenrein gesammelt. Ein Teil der Produktionsabfälle wird von lokalen Recyclingunternehmen „kostenlos entsorgt“. Der überwiegende mengenmäßige Anteil wird jedoch im Wochentakt per LKW zu einem Lohnrecyclingunternehmen nach Deutschland transportiert und dort zu Regenerat (als Additive werden hauptsächlich Pigmente eingesetzt) aufbereitet. Dieser Sekundärrohstoff ist in Form und Partikelgröße dem Originalmaterial ident. Auf Grund der thermischen Belastung während der Aufbereitung (→ Abbau von Molekülketten) nimmt jedoch das (mechanische) Eigenschaftsniveau abhängig von der Materialfamilie mehr oder weniger stark ab. Laut Kundenvereinbarungen darf dieser Sekundärrohstoff bei bestimmten Bauteilen im selben Produktionsprozess zu einem definierten Anteil (meist 30 %) wieder eingesetzt werden.

Zu Beginn der praktischen Fallstudie waren keine konkreten Daten zu diesem hier beschriebenen Aufbereitungsprozess vorhanden. Um vergleichende Investitionsrechnungen mit Alternativkonzepten durchführen zu können, wurde der Strom an Sekundärmaterial im Zeitraum Dezember 2015 bis Dezember 2016 für alle Standorte von Hirschmann Europa erhoben. Die Materialplanung, Lagerung und Logistik wird aktuell für diese Standorte von Rankweil aus durchgeführt. Das gesamte, in Deutschland aufbereitete, Regenerat wird folglich nach Rankweil transportiert, dort gelagert und entsprechend dem Bedarf der Standorte wieder verteilt. Diese zentrale Materialplanung erlaubt es standortbezogene Unterschiede zwischen Angussanfall und Regeneratbedarf einfach auszugleichen. In einem weiteren Schritt wurden am Standort Rankweil alle Tätigkeiten, welche mit dem Aufbereitungsprozess in Verbindung stehen, erfasst und diesen Kosten zugeordnet. Ein Vergleich mit dem Preis für Neuware zeigt, dass eine absolute Vorteilhaftigkeit bei der Aufbereitung dieser Produktionsabfälle in

jedem Fall gegeben ist. Durch diese Form der Kreislaufwirtschaft können (unter der Annahme einer ansonsten „kostenlosen Entsorgung“ der Kuppelprodukte) allein am Standort Rankweil jährlich rund 930.000 € eingespart werden.

Auf Basis einer Literatur- bzw. Internetrecherche wurden vier innerbetriebliche Alternativkonzepte zum aktuellen Aufbereitungsprozess ausgearbeitet und gemeinsam mit Anlagenherstellern speziell auf die Anforderungen des Standortes Rankweil abgestimmt. Das Konzept 1 besteht aus zwei Aufbereitungslinien, welche auf einer großen (Durchsatz rund 350 kg/h) und einer kleineren Schneidemühle (Durchsatz rund 150 kg/h) basieren. Die Angüsse werden weiterhin in der Fertigung in Tonnen gesammelt und zu dem rund 170 Meter entfernten Sammelpunkt gebracht. Dort erfolgt die Aufbereitung der Angüsse zu Mahlgut, das in Oktabins typenrein gesammelt wird. Das Sekundärmaterial unterscheidet sich bei diesem Konzept deutlich vom aktuell extern bezogenen Regenerat. Der gesamte Prozessschritt der Extrusion wird ausgespart. Dadurch kann kein definiertes Restfeuchteniveau des Sekundärmaterials, während der Aufbereitung (z.B.: über Entgasungszonen), eingestellt werden. Das Feuchtigkeitsniveau des Rezyklates ist folglich von der Auslagerungszeit der Angüsse abhängig und darf, wie Abbildung 43 zeigt, nicht mehr als 18 Stunden betragen. In Rankweil werden neben eigenen Angüssen noch Kuppelprodukte von lokalen Lohnspritzern (übernehmen fallweise Aufträge) und vom Standort Kenitra zwischengelagert. Diese Angüsse besitzen ein völlig undefiniertes Restfeuchteniveau und müssen bei diesem Konzeptvorschlag weiterhin nach Deutschland zur Aufbereitung geschickt werden. Als weitere Nachteile des Mahlgutes sind der Staubgehalt und die unregelmäßige Korngröße anzuführen. Diese beiden Faktoren bewirken deutlich höhere Prozessschwankungen, die den internen Anforderungen nicht mehr genügen. Dem gegenüber steht eine extrem hohe Wirtschaftlichkeit dieses Konzeptes. Bei einer Nutzungsdauer von 10 Jahren (Minimum laut Anlagenhersteller) ergibt sich bei konstantem Materialstrom ein Kapitalwert von 1.192.059 € bei einem internen Zinssatz von über 73 %. Einschränkend ist jedoch festzuhalten, dass bei dieser Rechnung nur von einer Teilvalidierung ausgegangen wurde. Es werden demnach nur wenige ausgewählte Produkte neuerlich validiert (überprüft ob Kunden- und Normanforderungen erfüllt sind) und bei positivem Ergebnis davon ausgegangen, dass die Materialumstellung für alle Produkte keine negativen Auswirkungen zur Folge hat. Diese Vorgehensweise birgt das latente Risiko eines materialbedingten Produktausfalls in sich. Durch eine Sensitivitätsanalyse wurde gezeigt, dass diese Vorgehensweise alternativlos ist. Eine Prüfung aller Produkte würde einen negativen Kapitalwert in Millionenhöhe bedeuten. Der enormen Wirtschaftlichkeit dieses Konzeptes stehen also hohe Prozess- und Produktausfallrisiken gegenüber.

Das Konzept 2 beruht auf einer Beistellmühle, die direkt nach oder unter der Separiertrommel platziert werden kann. Die Angüsse fallen automatisch in den Trichter der Mühle und werden dort zerkleinert. Das Mahlgut wird über ein Saugfördergerät auf ein gravimetrisches Dosiersystem, welches direkt an der Maschine angebracht werden kann, gefördert. Das Sekundärmaterial wird hier mit Hilfe von Wiegezellen in einem definierten Verhältnis dem Originalmaterial beigemischt. Dadurch können die Prozessschritte Sammlung und Lagerung völlig vermieden werden. Diesen Vorteilen steht eine deutlich geringere Flexibilität verglichen mit zentralen Aufbereitungslösungen

gegenüber. Die Produktionsphilosophie am Standort Rankweil ist jedoch auf höchste Flexibilität ausgerichtet. Nahezu alle Spritzgießmaschinen sind baugleich ausgeführt, sodass alle Produkte an allen Maschinen hergestellt werden können. Das wiederum bedeutet, dass alle Fertigungsanlagen in Rankweil mit Beistellmühlen, Saugfördergeräte und gravimetrischen Dosiersystemen ausgestattet werden müssten. Dies ist auf Grund der Platzverhältnisse in der Produktionshalle nicht möglich. Außerdem finden Werkzeug- und somit Produktwechsel in Rankweil durchschnittlich alle 2 bis 3 Tage statt. Bei unterschiedlicher nachfolgender Materialtype müsste die gesamte Peripherie (Mühle, Saugfördergerät, Dosiersystem) gereinigt werden, was eine enorme Erhöhung der Rüstzeit zur Folge haben würde. Somit kommt das Konzept 2 als Gesamtsystem für Rankweil nicht in Frage. Mit Hilfe einer dynamischen Investitionsrechnung wurde allerdings gezeigt, dass sich dieses Konzept für Dauerläufer (ein Produkt wird immer an derselben Maschine hergestellt) als höchst profitabel erweisen kann.

Das Konzept 3 ist im Wesentlichen eine Erweiterung des Konzeptes 1 um eine Extrusionsanlage. Der an den Schneidemühlen hergestellte und in Oktabs zwischengelagerte Sekundärrohstoff wird über Saugfördergeräte in den Trichter dieser Anlage eingezogen. Der thermoplastische Kunststoff wird dort unter Energiezufuhr (Heizbänder + Scherwärme) aufgeschmolzen (plastifiziert). Somit können einerseits Zusatzstoffe beigemischt (z.B.: Pigmente oder Glasfasern) und andererseits flüchtige Bestandteile aus der Schmelze entfernt werden. Diese Tatsache ermöglicht die Aufbereitung von Angüssen mit undefinierter Restfeuchte (Lohnspritzer und Kenitra). Als Endprodukt liegt Regranulat oder bei Additivierung Regenerat vor. Dieses Material ist dem aktuell extern bezogenen Sekundärmaterial ident. Es können somit zusätzliche materialbedingte Prozessrisiken oder Produktausfälle ausgeschlossen werden. Eine Neuvalidierung ist ebenfalls nicht erforderlich. Durch die Extrusionsanlage fallen neben zusätzliche Anlagenkosten auch Kosten für eine Absaugung und Kosten für eine Klimaanlage an (um Abwärme der Anlage auszugleichen). Dadurch werden die Anschaffungsauszahlungen drastisch erhöht und trotz höherem Materialstrom (Lohnspritzer und Kenitra) der Kapitalwert verglichen mit Konzept 1 reduziert. Dem geringeren Prozess- und Produktausfallrisiko ist demnach ein geringerer (möglicher) wirtschaftlicher Erfolg geschuldet.

Das Konzept 4 besteht aus einer innovativen Schredder-Extruderanlage. Die beiden Tätigkeiten Zerkleinerung und Plastifizierung können mit diesem System in einem Prozessschritt durchgeführt werden. Als Endprodukt der Aufbereitung wird Regranulat oder bei Additivierung Regenerat gewonnen, das aus technischer Sicht dem aktuellen Sekundärmaterial ident ist. Der wirtschaftliche Vergleich zeigt, dass der integrierte Prozessschritt der Angusszerkleinerung deutlich geringere laufende Auszahlungen zur Folge hat. Dadurch kann sowohl der Kapitalwert als auch der interne Zinssatz (verglichen mit Konzept 3) gesteigert werden.

Somit scheiden sowohl Konzept 2 (als Gesamtkonzept ungeeignet) als auch Konzept 3 (geringere Wirtschaftlichkeit bei gleichem qualitativem Output) als Alternativlösung für den Standort Rankweil aus.

Die Entscheidung zwischen Konzept 1 und 4 gestaltet sich als deutlich schwieriger. Der höheren Wirtschaftlichkeit und finanzwirtschaftlichen Sicherheit (geringere

Anschaffungsauszahlungen und Amortisationsdauer) des Konzeptes 1 stehen hohe Prozess- und Produktausfallrisiken gegenüber. Der Vergleich mit dem Ist-Zustand zeigt für beide Konzepte jedenfalls eine Einschränkung der Flexibilität durch höhere Fixkosten (kalkulatorische Abschreibungen, kalkulatorische Zinsen).

Um eine objektive Entscheidung herbeizuführen müssen gemeinsam mit der Firma Hirschmann technische und wirtschaftliche Beurteilungskriterien (Erfolg, finanzwirtschaftliche Sicherheit, Auswirkungen auf Produkte und Prozesse, Flexibilität, Liquidität) festgelegt und entsprechend gewichtet werden. Dies ermöglicht die Durchführung einer Nutzwertanalyse unter Einbezug qualitativer Parameter. In der vorliegenden Masterarbeit wurde überdies ausschließlich der Standort Rankweil betrachtet. Eine globale Sichtweise auf den Aufbereitungsprozess aller Standorte kann Interdependenzen aufzeigen und so die Entscheidungsfindung ebenfalls beeinflussen. Da dies mit einem erheblichen zeitlichen und personellen Aufwand verbunden ist, sollte zuerst überprüft werden, ob die vorliegenden Informationen bereits für eine eindeutige Entscheidungsfindung durch Festlegung von Muss-Kriterien (z.B.: Prozesssicherheit) ausreichen.

Literaturverzeichnis

Bauer, E; Brinkmann, S.; Osswald, T.A.; Schmachtenberg, E. (2007): Saechtling Kunststoff Taschenbuch. München: Carl Hanser Verlag. ISBN 978-3-446-40352-9.

Battisti, M. (2017): Masterarbeit. Unveröffentlichtes internes Schreiben. Hirschmann Automotive GmbH, Rankweil, 24.07.2017.

Becker, H.P. (2013): Investition und Finanzierung: Grundlagen der betrieblichen Finanzwirtschaft. Wiesbaden: Springer Gabler. ISBN 978-3-658-00378-4.

Bleis, C. (2012): Grundlagen Investition und Finanzierung: Lehr- und Arbeitsbuch. München: Oldenbourg Verlag. ISBN 978-3-486-70257-6.

Britzelmaier, B. (2013): Controlling: Grundlagen, Praxis, Handlungsfehler. München: Pearson. ISBN 978-3-86894-104-3.

Colsman, B. (2013): Nachhaltigkeitscontrolling: Strategien, Ziele, Umsetzung. Wiesbaden. Berlin: Springer Verlag. ISBN 978-3-8349-3599-1.

Ehrenstein, G.W.; Kuhmann, K. (1993): Recycling von Thermoplasten: Literaturrecherche. Würzburg: Süddeutsches Kunststoff-Zentrum. ISBN: 3-9802740-3-9.

Frick, A.; Stern, C. (2011): Praktische Kunststoffprüfung. München: Carl Hanser Verlag. ISBN: 978-3-446-40942-2.

Götz, U. (2008): Investitionsrechnung: Modelle und Analysen zur Beurteilung von Investitionsvorhaben. Berlin: Springer Verlag. ISBN 978-3-540-78873-7.

Guiton, P.; Seggern, J.; Bailys, B.; Vanderveen, J. (2008): Einsatz von Rezyklaten in Führungssystemen der Ansaugluft. In: Motortechnische Zeitschrift, Jg. 69, Nr. 10, S. 852 – 857.

Hausladen, G. (2007): Materialeinsatz optimieren. In: Kunststoffe, Jg. 97, Nr. 4, S. 95-97.

Heesen, B. (2012): Investitionsrechnung für Praktiker: Fallorientierte Darstellung der Verfahren und Berechnungen. Wiesbaden: Springer Verlag. ISBN 978-3-8349-4039-1.

Hellerich, W.; Beilstein, G.H.; Bauer, E. (2011): Werkstoffführer Kunststoffe: Eigenschaften, Prüfung, Kennwerte. München: Carl Hanser Verlag. ISBN: 978-3-446-42436-4.

Hess, V. (1992): Wirtschaftliche Zerkleinerungs- und Recyclingverfahren für Kunststoffabfälle. In: Menges, G. u.a. (Hrsg.): Recycling von Kunststoffen. München: Carl Hanser Verlag. ISBN 3-446-16437-5.

Johannaber, F.; Michaeli, W. (2004): Handbuch Spritzgießen. München: Carl Hanser Verlag. ISBN 3-446-22966-3.

Kaminsky, W.; Sinn, H. (1995): Petrochemische Verfahren zur Kunststoffverwertung. In: Bandrup, J. u.a. (Hrsg.): Die Wiederverwertung von Kunststoffen. München: Carl Hanser Verlag. ISBN 3-44-17412-5.

Linder, S. (2006): Investitionskontrolle: Grundzüge einer verhaltensorientierten Theorie. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag. ISBN 978-3-8350-0600-3.

Mauch, K.F. (1984): Aufbereiten von Polyolefinen auf zweiwelligen gleichläufigen Schneckenknetern. In: Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): Aufbereiten von Polyolefinen. Düsseldorf: VDI-Verlag. ISBN 3-18-404109-3.

Michaeli, W.; Bittner, M. (1992): Materielles Recycling thermoplastischer Kunststoffabfälle. In: Chemie Ingenieur Technik, Jg. 64, Nr. 5, S. 422-429.

Michaeli, W.; Greif, H.; Kretzmar, G.; Kaufmann, H.; Bertuleit, R. (1993): Technologie des Spritzgießens: Lern- und Arbeitsbuch. München: Carl Hanser Verlag. ISBN 3-446-15813-8.

Müller, D. (2006): Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre für Ingenieure. Berlin: Springer Verlag. ISBN 978-3-540-32194-1.

Müller-Hedrich, B.W.; Schünemann, G.; Zdrowomyslaw, N. (2006): Investitionsmanagement: Systematische Planung, Entscheidung und Kontrolle von Investitionen. Renningen: Expert Verlag. ISBN 978-3-8169-2558-3.

o.V. (2017): Hirschmann Chronik. URL: <https://www.hirschmann-automotive.com/unternehmen/chronik> (Zugriff: 23.04.2017).

o.V. (2016): Isec. URL: http://www.pureloop.at/de/isec_produkt (Zugriff: 27.11.2016).

o.V. (2016): Schneidemühlen. URL: <http://www.wanner-technik.de/schneidmuehlen/baby> (Zugriff: 26.11.2016).

ÖNORM EN ISO 1043-1: 2012-02: Kunststoffe – Kennbuchstaben und Kurzbezeichnungen; Teil 1: Basis-Polymere und ihre besonderen Eigenschaften (ISO 1043-1:2011).

ÖNORM EN ISO 1043-2: 2012-02: Kunststoffe – Kennbuchstaben und Kurzzeichen; Teil 2: Füllstoffe und Verstärkungsstoffe (ISO 1043-2:2011).

ÖNORM EN ISO 1043-3: 2015-09: Kunststoffe – Kennbuchstaben und Kurzzeichen; Teil 3: Weichmacher (ISO 1043-3:2015).

ÖNORM EN ISO 1043-4: 1999-10: Kunststoffe – Kennbuchstaben und Kurzzeichen; Teil 4: Flammschutzmittel (ISO 1043-4:1998).

Pitz, T. (2000): Recycling aus produktionstheoretischer Sicht. Berlin: Springer Verlag. ISBN: 978-3-662-12901-2.

Poggensee, K. (2009): Investitionsrechnung: Grundlagen-Aufgaben-Lösungen. Wiesbaden: Springer Gabler. ISBN 978-3-8343-1016-5.

Stahelin, E. (1993): Investitionsrechnung: Investitionspolitik und Investitionsrechnung: Konzept und Vergleich der Investitionsrechnungsmethoden: Berücksichtigung der Inflation und Steuern. 8. Auflage. Chur: Verlag Rüegger AG. ISBN 3 7253 0483 1.

Ströhle, J. (2016): Firmenpräsentation. unveröffentlichte Power-Point Präsentation. Hirschmann Automotive GmbH, Rankweil, 28.12.2016.

Uske, K. (2002): Kosten reduzieren: Einsatz von Mahlgut in der Spritzgießverarbeitung. In: Kunststoffe, Jg. 92, Nr. 8, S. 61-62.

WCED (1987): Our Common Future (Brundtland Report), Oxford University Press

Wohlfahrt-Laymann, H. (1992): Aufschmelzen und Granulieren. In: Menges, G. u.a. (Hrsg.): Recycling von Kunststoffen. München: Carl Hanser Verlag. ISBN 3-446-16437-5.

Woidasky, J. (2008): Kunststoffe und Bauteile. In: Eyerer, P. u.a. (Hrsg.): Polymer Engineering – Technologien und Praxis. Berlin: Springer Verlag. ISBN 978-3-540-72402-5, S. 610 – 618.

Zantow, R. (2004): Finanzierung: Die Grundlagen des modernen Finanzmanagement. München: Pearson Studium. ISBN 3-8273-7088-4.

Zvezdov, D.; Schaltegger, S. (2012): Nachhaltigkeitscontrolling: mehr als nur ein Konzept. In: Zeitschrift für Controlling & Management. Jg. 56, H. 4, S. 276-278.

Anhang

