

Neue Wege der Nachhaltigkeit in der chemienahen Produktion:

Eine Untersuchung am Beispiel einer Klebebandherstellung



DISSERTATION

zur Erlangung der Doktorwürde

von der Fakultät für Mathematik und Naturwissenschaften

der Bergischen Universität Wuppertal

-Doktor der Naturwissenschaften-

(Dr. rer. nat.)

vorgelegt von

Marco Braun (M. Sc.)

aus Wuppertal

Wuppertal, 13.06.2025

Die vorliegende Arbeit entstand in der Zeit
von September 2022 bis Juni 2025
unter der Leitung von
Herrn Prof. Dr. Hans-Willi Kling
im Arbeitskreis
Management chemischer Prozesse und Analytische Chemie
der Bergischen Universität Wuppertal

Ich versichere, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig im Arbeitskreis Management chemischer Prozesse und Analytische Chemie unter der Leitung von Herrn Prof. Dr. Hans-Willi Kling durchgeführt und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe.

Wuppertal, den 13.06.2025

Marco Braun

Danksagung

Zunächst möchte ich mich ganz herzlich bei Herrn Prof. Dr. Hans-Willi Kling für die Möglichkeit zur Anfertigung dieser Doktorarbeit in seinem Arbeitskreis bedanken. Sein fachlicher Rat, die zahlreichen anregenden Diskussionen sowie seine jahrelange Unterstützung haben wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Mit großer Geduld und außerordentlicher Hilfe, sowie jederzeit wertvollen Ratschlägen half er mir auch in schwierigen Situationen, den richtigen Weg wiederzufinden.

Mein besonderer Dank gilt außerdem Frau Mekelburger sowie der gesamten Coroplast Gruppe für die Möglichkeit, diese Arbeit im Unternehmen durchführen zu dürfen und für die kontinuierliche Unterstützung während des gesamten Promotionsvorhabens.

Weiterhin danke ich besonders Herrn Dr. Ralf Rönisch für das entgegengebrachte Vertrauen und die uneingeschränkte Unterstützung über die vergangenen Jahre hinweg. Mit seinen fachlichen, aber auch persönlichen Ratschlägen half er mir auf dem richtigen Weg zu bleiben und gab mir Raum für meine persönliche Weiterentwicklung.

Mein Dank gilt ebenso Herrn Guido Vorwerk für seine unermüdliche Hilfe und die stets offenen, bereichernden Gespräche. Dem gesamten BE-Team danke ich herzlich für die freundliche Aufnahme, die kollegiale Zusammenarbeit und die jederzeit verlässliche Unterstützung bei allen Fragen und Herausforderungen.

Von ganzem Herzen danke ich meinen Eltern und Brüdern, die mich über all die Jahre hinweg begleitet haben – mit Geduld, Verständnis und unermüdlichem Rückhalt.

Mein tiefster Dank gilt meiner Frau Anastasija. Sie hat mich nicht nur durch mein Studium und die Promotion begleitet, sondern war mir in jeder Lebenslage eine unerschütterliche Stütze. Mit Liebe, Geduld und klugem Rat hat sie mir Halt gegeben, Kraft geschenkt und mich stets daran erinnert, worauf es wirklich ankommt. Ohne sie wäre dieser Weg so nicht möglich gewesen.

Abkürzungsverzeichnis

°C	Grad Celsius
ΔH	Verdampfungsenthalpie
ΔH _f	Schmelzenthalpie
µV	Microvolt
µVs	Microvoltsekunde
B2B	Business to business
B2C	Business to consumer
C	Wärmekapazität
c	Stoffmengenkonzentration
cm	Zentimeter
CSRD	Corporate Sustainability Reporting Directive
CO	Kohlenstoffmonoxid
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CO _{2e}	Kohlenstoffdioxid-Äquivalente
DNK	Deutscher Nachhaltigkeitskodex
DSC	Differential Scanning Calorimetry
g	Gramm
GC	Gaschromatographie
GCxFID	Gaschromatographie/ Flammenionisationsdetektor
GCxMS	Gaschromatographie/Massenspektrometrie
Gew%	Gewichtsprozent
GHG	Greenhouse Gas
g/m ²	Flächengewicht
J/g*K	spezifische Wärmekapazität

K	Kelvin
kWh	Kilowattstunde
kg	Kilogramm
L	Liter
LCA	Life Cycle Analysis
lfm	Laufmeter
m	Masse
m^2	Quadratmeter
m^3	Kubikmeter
mg	Milligramm
MJ	Megajoule
ml	Milliliter
mm	Millimeter
MS	Massenspektrometer
PA	Polyamid
PCF	Product Carbon Footprint
PE	Polyethylen
PEF	Product Environmental Footprint
PET	Polyethylenterephthalat
PP	Polypropylen
PSA	Pressure Sensitive Adhesive
PVC	Polyvinylchlorid
Q	Energie
s	Sekunde
t	Zeit
t	Tonne

T	Temperatur
TfS	Together for Sustainability
THG	Treibhausgase
UN	United Nations
UNCED	United Nations Conference on Environment and Development
UV	Ultraviolettstrahlung
V	Volumen
VOC	Volatile Organic Compounds
w	Massenanteil

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
2	Zielsetzung	4
3	Theorie	5
3.1	Produktionszusammenhänge.....	5
3.2	Klebetheorien.....	9
3.3	Entwicklung der Nachhaltigkeit	14
3.4	Product Carbon Footprint-Normen und Berechnungsgrundlage.....	16
3.4.1	PCF in der Praxis: Stand der Technik und Berechnungsmethoden	16
3.4.2	Normen und Berechnungsstandards	17
3.4.3	Berechnung eines PCFs.....	21
3.5	Messung Enthalpie und Wärmekapazität mittels DSC-Messungen	23
4	Ergebnisse und Diskussion	25
4.1	Beispielberechnung eines PCF anhand eines Klebebandes	25
4.1.1	Produktionsprozess	27
4.1.2	Transport.....	32
4.1.3	Berechnung des gesamten PCFs	33
4.1.4	Prozess- und Produktoptimierung auf Basis von PCF- Berechnungen	34
4.1.5	Schlussfolgerung	36
4.2	Klebstoffvergleich	37
4.2.1	Theoretische Überlegungen zur Berechnung der Wärmekapazität von Klebstoffsystmen	39
4.2.2	Energieeinsatz pro Beschichtungsfläche	42
4.2.3	Energieeinsatz pro Beschichtungsfläche des Dispersionsklebers.....	45
4.2.4	Bestimmung des Energiebedarfes bei der Produktion mittels DSC-Messungen	46
4.2.5	Lösungsmittelklebstoff	57
4.2.6	Übertragung Labormodell auf Produktionsprozess	60
4.2.7	Schlussfolgerung Klebstoffvergleich	66
4.2.8	Performance-Betrachtung der Klebstoffsystme.....	69

4.3	Chemische Pyrolyse	73
4.3.1	Vorversuche zur Pyrolyse.....	75
4.3.2	Einfluss der Pyrolysetemperatur auf die Produktzusammensetzung.....	80
4.3.3	Literaturvergleich der Bildung von Benzoesäure bei einer PET-Pyrolyse.....	87
4.3.4	Verwendung von Benzoesäure.....	89
4.3.5	Pyrolyse von Terephthalsäure	89
4.3.6	Einfluss des Temperaturgradienten im Reaktor auf die Pyrolyse.....	91
4.3.7	Bestimmung der Ausbeute	101
4.3.8	Verwendung von Stützgas bei der Pyrolyse	102
4.3.9	Übertragung der PET-Pyrolyse auf eine Realprobe.....	105
4.3.10	Upscaling des Prozesses in einer Technikumsanlage.....	110
4.3.11	Vergleich der Laborversuche zu einem Technikumsversuch.....	112
5	Zusammenfassung und Ausblick	114
6	Geräteparameter und Analysemethoden	117
7	Quellen.....	119

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Ziele für nachhaltige Entwicklung der Vereinten Nationen. ¹⁰	2
Abbildung 2: Wirkungsweise eines Klebstoffes. ²⁴	9
Abbildung 3: Beispielbild einer Klebkraftmessung.	12
Abbildung 4: Beispielbild einer Scherkraftmessung.	13
Abbildung 5: Beispielbild eines Loop-Tack-Tests.	13
Abbildung 6: Schematische Darstellung einer Beschichtungsanlage. 1 Rohstoffrolle; 2 Klebstoffmischer; 3 Beschichtungskopf; 4 UV-Vernetzung; 5 Kühlcontainer; 6 Kühlwalze; 7 Mutterrolle.	27
Abbildung 7: Übersicht der CO _{2e} der Produktionsverbräuche.	31
Abbildung 8: Berechnung der Transportemissionen der verwendeten Rohstoffe.	32
Abbildung 9: Gesamtübersicht der beiden PCF-Werte der Kabelwickelbänder.	33
Abbildung 10: Auswertung der DSC-Messung der Indium Referenz.	48
Abbildung 11: Auswertung der DSC-Messung des Synthesekautschuk-Hotmelts.	50
Abbildung 12: Auswertung der DSC-Messung des UV-Acrylat Hotmelts.	51
Abbildung 13: Auswertung der DSC-Messung des Dispersionsklebstoffes.	52
Abbildung 14: Auswertung der Wärmekapazitätsmessung des Synthesekautschuk-Hotmelts.	54
Abbildung 15: Auswertung der Wärmekapazitätsmessung des UV-Acrylat-Hotmelts.	55
Abbildung 16: Auswertung der Wärmekapazitätsmessung des Dispersionsklebstoffes.	56
Abbildung 17: Auswertung der DSC-Messung des Lösungsmittelklebstoffes Durotak 1760.59	59
Abbildung 18: Auswertung der DSC-Messung des Lösungsmittelklebstoffes Durotak 2954.59	59
Abbildung 19: Grafische Darstellung der Ergebnisse des Klebstoffvergleiches.	67
Abbildung 20: Foto einer Randrolle.	75
Abbildung 21: Pyrolyse Reaktor mit Nebenabgang und Kühlung.	77
Abbildung 22: Erster Versuchsaufbau des Pyrolysereaktors.	78
Abbildung 23: Pyrolyse-Reaktor mit überarbeitetem Nebenabgang.	79
Abbildung 24: Kristalline Ablagerungen aus einer PET-Pyrolyse.	80
Abbildung 25: Chromatogramm des Pyrolyseproduktes des PET-Granulats bei 400 °C.	82
Abbildung 26: Chromatogramm des Pyrolyseproduktes des PET-Granulats bei 600 °C.	82
Abbildung 27: Chromatogramm des Pyrolyseproduktes des PET-Granulats bei 800 °C.	82
Abbildung 28: Benzoësäureanteil im Produkt bei unterschiedlichen Pyrolysetemperaturen.	85
Abbildung 29: Endgültiges Design des Pyrolysereaktors mit diversen Anschlussmöglichkeiten.	86
Abbildung 30: Schematische Darstellung der Spaltprodukte der PET-Pyrolyse.	88

Abbildung 31: Auswertung des Terephthalsäure-Pyrolyseproduktes bei 450 °C	90
Abbildung 32: Auswertung des Terephthalsäure-Pyrolyseproduktes bei 800 °C	90
Abbildung 33: Temperaturgradient im Reaktor bei 450 °C.	92
Abbildung 34: Temperaturgradient im Reaktor bei 650 °C.	93
Abbildung 35: Schematische Darstellung des Temperaturverlaufs innerhalb des Reaktors.	94
Abbildung 36: Temperaturmessung im Reaktor ohne Pyrolyse bei 450 °C.	95
Abbildung 37: Temperaturmessung im Reaktor ohne Pyrolyse bei 750 °C.	96
Abbildung 38: Temperaturmessung während Pyrolyse bei 500 °C mit Pyrolysebeginn bei 600 s.	98
Abbildung 39: Temperaturmessungen bei unterschiedlichen Höhen und Zeitpunkten der Pyrolyse.	99
Abbildung 40: Skizze des Reaktors mit den eingezeichneten Phasenübergängen. 1 Schmelze; 2 Terephthalsäure-Zone; 3 Benzoësäure-Zone.	100
Abbildung 41: Chromatogramm des Pyrolyseproduktes des PET-Granulates bei 0,2 bar Stützgas.	105
Abbildung 42: Chromatogramm des Pyrolyseproduktes des PET-Gewebes bei 450 °C.	105
Abbildung 43: Chromatogramm des Pyrolyseproduktes des PET-Gewebes bei 650 °C.	106
Abbildung 44: Chromatogramm des Pyrolyseproduktes des PET-Gewebes bei 800 °C.	106
Abbildung 45: Chromatogramm des Pyrolyseproduktes des Kabelwickelbandes bei 450 °C.	109
Abbildung 46: Schematische Darstellung des Pyrolysereaktors im Technikumsmaßstab.	110
Abbildung 47: Chromatogramm des Pyrolyseproduktes des Technikumsversuches.	112

1 Einleitung

Der Begriff der Nachhaltigkeit ist heutzutage in aller Munde, wird dabei vielfältig geprägt und in der Politik, Industrie und der Gesellschaft, teilweise unter vielfältigen Sichtweisen diskutiert, da der Begriff der Nachhaltigkeit auch nicht einheitlich definiert ist. Als wegweisender Bericht wurde mit „The Limits to Growth“ 1972 im Rahmen eines Projektes des Club of Rome eine Nachhaltigkeitsbetrachtung publiziert.¹ Dieser Bericht einer interdisziplinären Forschergruppe basiert auf einer systemdynamischen Modellierung, die die Wechselwirkungen zwischen Bevölkerungswachstum, industrieller Produktion, Ressourcennutzung, Umweltverschmutzung und landwirtschaftlicher Produktion untersucht.¹ Das grundlegende Konzept der Nachhaltigkeit ist aus der wachsenden gesellschaftspolitischen Wahrnehmung entstanden, dass sämtliche Ressourcen der Erde begrenzt sind. Daraus entstand die Erkenntnis, dass die Weltbevölkerung neue Wege finden muss, die vorhandenen Ressourcen nachhaltig zu nutzen, sodass auch zukünftige Generationen einen gesicherten Lebensraum ohne Einbußen ihrer Lebensqualität vorfinden.²

Der Begriff der Nachhaltigkeit erlangte weitere Bekanntheit durch den Brundtland-Bericht, offiziell auch bekannt als "Our Common Future", der 1987 von der Weltkommission für Umwelt und Entwicklung veröffentlicht wurde. Der Bericht war eine Antwort auf den Bericht des Club of Rome und definierte eine nachhaltige Entwicklung als "eine Entwicklung, die die Bedürfnisse der Gegenwart befriedigt, ohne zu riskieren, dass künftige Generationen ihre eigenen Bedürfnisse nicht befriedigen können."³

Der Brundtland-Bericht legte den Grundstein für zahlreiche internationale Initiativen und Abkommen, die sich mit dem Thema Nachhaltigkeit in unterschiedlichen Richtungen befassen.³ Ein wichtiger Meilenstein war die Konferenz der Vereinten Nationen über Umwelt und Entwicklung (UNCED) 1992 in Rio de Janeiro, die oft als "Erdgipfel" bezeichnet wird. Diese Konferenz führte zur Verabschiedung der Agenda 21.⁴ Darin wurde ein umfassender Aktionsplan erarbeitet, wie eine nachhaltige Entwicklung weltweit gefördert werden kann. Weitere bedeutende Gipfel, wie der Weltgipfel für nachhaltige Entwicklung 2002 in Johannesburg und die Konferenz der Vereinten Nationen über nachhaltige Entwicklung 2012 (Rio+20), bauten auf diesen Grundlagen auf und vertieften das internationale Engagement für Nachhaltigkeit.^{5,6}

Ein weiterer bedeutender Schritt war die Einführung der Millennium Development Goals der Vereinten Nationen im Jahr 2000. Hier wurden acht Ziele definiert, die vorrangig soziale und wirtschaftliche Aspekte abdeckten.⁷ Aufgrund des geringen Augenmerks auf ökologische

Nachhaltigkeit und globale Ungerechtigkeiten, wurden die Sustainable Development Goals (SDGs) durch die Vereinten Nationen im Jahr 2015, im Rahmen der 2030 Agenda für nachhaltige Entwicklung, erarbeitet.^{8,9} Durch die 17 SDGs wurden konkrete Ziele für eine nachhaltige Entwicklung beschrieben und definiert. Diese Ziele sind in Abbildung 1 dargestellt und zeigen, dass nachhaltige Entwicklung eine integrative und multidimensionale Herausforderung ist, die erstmalig neben ökologischen Aspekten auch ökonomische und soziale Aspekte zur Nachhaltigkeit einbringt. Diese Ziele setzen Maßstäbe und bieten zudem Definitionen für Unternehmen und Regierungen, um Strategien und Handlungsansätze für eine nachhaltige Weltwirtschaft konkret zu definieren.^{8,9}



Abbildung 1: Ziele für nachhaltige Entwicklung der Vereinten Nationen.¹⁰

Die chemische Industrie ist eine Schlüsselindustrie mit großem Einfluss auf alle anderen Industriezweige, sowie dem privaten Sektor, da sie viele industrielle Rohstoffe und Konsumtengüter weltweit aufwändig herstellt. Die Produktion in der chemischen Industrie ist traditionell mit hohen Ressourcenverbräuchen und Umweltbelastungen verbunden. Als eine Industrie mit hohen Emissionen und hohem Einsatz an Ressourcen steht das Thema Nachhaltigkeit daher mittlerweile, neben ökonomischen Faktoren, im Mittelpunkt zukünftiger strategischer Überlegungen von Chemie- und chemieverarbeitenden Unternehmen. Unternehmen des

Chemiesektors arbeiten daran, innovative Lösungen zu entwickeln, die ihre Produkte sowohl ökologisch verträglich als auch wirtschaftlich rentabel und damit zukunfts-fähig machen. Die chemische Industrie nimmt eine zentrale Rolle bei der Bereitstellung von Rohstoffen für viele weitere verarbeitende und fertigende Industrien ein. Somit ist die Chemieindustrie eine Schlüsselindustrie für die Fertigung jeglicher Produkte, aber auch für folgende nachhaltige Entwicklungen entlang der Wertschöpfungskette unerlässlich.^{11,12}

2 Zielsetzung

Das Ziel dieser Arbeit ist, die Nachhaltigkeit von Herstellungsprozessen in einem chemischen Unternehmen zu untersuchen, das verschiedene Chemikalien zu Produkten für Konsumenten und die Industrie in großem Maßstab verarbeitet. Dabei soll analysiert werden, inwieweit die Unternehmensstrategie zur nachhaltigen Produktion beträgt. Ziel ist es, spezifische Nachhaltigkeitskennzahlen zu entwickeln, die eine objektive Bewertung und Messbarkeit der ökologischen Auswirkungen dieser Prozesse ermöglichen. Anhand der gewonnenen Daten sollen Rückschlüsse gezogen und Verallgemeinerungen abgeleitet werden, um die Bedeutung und Umsetzung von Nachhaltigkeit im industriellen Kontext zu fördern.

Weiterführend liegt der Fokus auf der Optimierung der identifizierten Einflussfaktoren. Besonderes Augenmerk gilt dabei der Energieeffizienz der Klebrohstoffe. In diesem Zusammenhang ist es Ziel, Hilfestellungen für eine zukünftige nachhaltige Produktentwicklung bereitzustellen, sodass diese vereinfacht und frühzeitig im Entwicklungsprozess berücksichtigt werden können. Hierzu soll eine Analysenmethode vorgestellt werden, die eine einfache und schnelle Charakterisierung von Klebstoffproben im Labor ermöglicht. Auf Basis dieser Erkenntnisse soll ein Vergleich hinsichtlich energietechnischer Eigenschaften, sowie Performance der gängigen Klebstoffsysteme angestellt werden.

Zuletzt wird eine Möglichkeit zum Recycling von Klebebandabfällen entwickelt. Dafür ist ein Verfahren erforderlich, das den speziellen Herausforderungen von Klebebandabfällen gerecht wird.

3 Theorie

3.1 Produktionszusammenhänge

Die Automobilindustrie ist global eine der größten und bedeutendsten Industrien. Mit weltweit über 93,5 Millionen gebauten Kraftfahrzeugen im Jahr 2023 und einem jährlichen Umsatz von 2.564,84 Milliarden US-Dollar, spielt die Branche eine zentrale Rolle in der globalen Wirtschaft.^{13,14} Aufgrund der globalen Strukturen der Branche und den komplexen Produkten wird zwischen den unterschiedlichen Akteuren der Industrie unterschieden. Der Begriff OEMs (Original Equipment Manufacturers) beschreibt in der Automobilindustrie Erstausrüster oder Originalhersteller wie Volkswagen, BMW oder Mercedes-Benz. Diese Unternehmen entwickeln und produzieren die Endprodukte, prägen das Markenimage und stehen in direktem Kontakt mit den Endkunden. Tier 1-Zulieferer, wie beispielsweise Bosch oder Continental, liefern komplexe und oft fahrzeugspezifische Komponenten wie Motorsteuerungen, Bremsanlagen oder Infotainmentsysteme direkt an die OEMs. Die jeweiligen Komponenten werden in enger Zusammenarbeit und nach genauen Vorgaben der OEMs gefertigt. Tier 2- und Tier 3-Zulieferer sind für die Produktion einzelner Bauteile oder Materialien zuständig, die von Tier 1-Zulieferern weiterverarbeitet oder zu einem größeren Bauteil zusammengesetzt werden. Dazu gehören beispielsweise Hersteller von Kunststoffteilen, Metallerzeugnissen oder Elektronikbauteilen.^{15–17}

Das beispielhaft betrachtete Unternehmen gehört ebenfalls zu den Tier 2 Lieferanten und liefert seine Produkte an diverse Tier 1 Lieferanten, sowie zum Teil auch direkt an OEMs der Automobilindustrie. Für die Automobilindustrie fertigt das betrachtete Unternehmen unter anderem Kabelbäume, Hochvolt- und Datenleitungen als auch Kabelwickelklebebänder. Aufgrund anspruchsvoller Sicherheits- und Komfortansprüche in modernen Autos und besonders durch die rasante Entwicklung der Elektroautos steigen auch die Anforderungen an die entsprechenden elektrischen Leitungen im Auto. Da mittlerweile bis zu acht Kilometer Kabel in einem Auto verlegt werden, müssen diese werthaltig verlegt, abgeschirmt und geschützt werden.¹⁸ Die speziell entwickelten Kabelwickelklebebänder bündeln die einzelnen Kabel zu einem sogenannten Kabelbaum und schützen diesen vor mechanischen Belastungen, sowie Umwelteinflüssen und bieten zudem einen Geräusch- und Klapperschutz. Die unterschiedlichen Eigenschaften werden durch den Einsatz diverser textiler Trägermaterialien der Kabelwickelbänder erreicht.

Weitere Bereiche, in denen technische Klebebänder eingesetzt werden, sind vielfältig. Auch die Baubranche verfolgt nachhaltigere und energiesparende Möglichkeiten Häuser zu bauen.

Somit werden in der Baubranche Klebebänder und Klebstoffe als Klebe- und Dichtmassen sowohl für luftdichtes Bauen in energetischen Sanierungen sowie Neubauten als auch zur Abdichtung gegen Wasser verwendet. Hierbei werden diffusionsgeschlossene und -offene Klebebänder beispielsweise zur Abdichtung oder Abschluss einer Dampfsperre beim Hausbau genutzt, die Teil der Hausisolierung ist.¹⁹

Grundlegend besteht ein Klebeband meist aus zwei Hauptkomponenten: einem flexiblen Material, der sogenannte Träger und einem Haftklebstoff. Mögliche weitere Bestandteile eines Klebebandes sind eventuell notwendig für spezielle Applikationen oder zum Schutz der Klebefläche. Hierzu gehören zum Beispiel ein Fingerlift, eine Abdeckfolie oder Seitenscheiben.²⁰

Das Trägermaterial ist die Basis des Klebebandes und gibt dem Verbundsystem seine gewünschte Struktur und Festigkeit sowie mögliche weitere gewünschte Eigenschaften. Je nach Anwendungsfall werden dazu unterschiedliche Materialien verwendet. Im folgenden Absatz werden einige der am häufigsten verwendeten Trägermaterialien und -typen vorgestellt.^{20,21}

Papierträger werden oft für Abdeckbänder oder Paketband verwendet, da es sich leicht von der Klebebandrolle abreißen und nach der Anwendung zusammen mit der Verpackung recyceln lässt. Klebebänder mit Papierträger sind nicht für hohe Belastungen ausgelegt, sind dafür aber kostengünstig und einfach zu produzieren. Für Kunststofffolienträger werden häufig Materialien wie Polyvinylchlorid (PVC), Polypropylen (PP), Polyethylen (PE) oder Polyester (PET) genutzt. Diese Folien sind besonders robust und widerstandsfähig gegen Umwelteinflüsse wie Feuchtigkeit und Chemikalien und sind dabei vergleichsweise preisgünstig. Eine Kunststofffolie gepaart mit einem Kunststoffgelege wird oft für stabile Klebebänder wie Duct-Tape verwendet. Kunststoffgelege sind Gitternetze aus Kunststofffasern, die der Trägerfolie Stabilität in der Längs- und Querbelastung, gleichzeitig aber eine konstante und einfache händische Quereinreißbarkeit des Klebebandes ermöglichen. Ein Gaffer-Tape bringt ähnliche Eigenschaft mit, hierbei besteht das Trägermaterial jedoch aus einem Gewebe mit Beschichtung. Beide Varianten sind besonders reißfest und widerstandsfähig und halten hohen Belastungen stand und sind auch für dauerhafte Verklebungen geeignet. Klebebänder mit einer Metallfolie als Träger, wie Aluminium- oder Kupferfolien bieten eine ausgezeichnete Barriere gegen Feuchtigkeit, haben besonders gute Eigenschaften bei der Reflexion von Wärme, sind luftdicht und werden häufig für industrielle Anwendungen verwendet.

In der Automobilbranche finden, wie anfangs beschrieben, häufig Textilträger aus Polyester (PET) und Polyamid (PA) Anwendung. Je nach Anwendungsfall und gewünschten Eigenschaften werden für Kabelwickelbänder auch Träger aus Gewebe, Spinn- oder Nähvliese eingesetzt.^{20,21}

Der Klebstoff ist die klebende Schicht auf dem Trägermaterial, die dafür sorgt, dass das Klebeband auf unterschiedlichen Oberflächen haftet. Auf Klebebändern wird ein sogenannter PSA (Pressure Sensitive Adhesive), zu Deutsch Haftklebstoff, verwendet. Ein PSA-Klebstoff zeichnet sich dadurch aus, dass er kein Reaktivklebstoff ist, sondern durch aufgebrachten Druck an einer Oberfläche haftet. Im Gegensatz zu Reaktivklebstoffen ist bei Haftklebstoffen kein Lösungsmittel oder Hitze notwendig, um die Klebkraft auszubilden. PSAs kleben aufgrund ihrer viskoelastischen Eigenschaften und sind dadurch permanent klebrig. Durch die viskosen Eigenschaften des Klebstoffes, die durch eine aufgebrachte Druckkraft bei der Anwendung aktiviert werden, ist er in der Lage in die raue Oberfläche des zu beklebenden Substrates zu fließen. Dieser Effekt wird der viskose Fluss genannt. Ein Andrücken des Klebebandes verbessert die Benetzung der Oberfläche nochmals und hilft somit eine große Kontaktfläche auszubilden, die notwendig ist, um die volle Klebkraft auszubilden. Die elastischen Eigenschaften des Klebstoffes beeinflussen dessen interne Bindungskraft. Nach Applikation muss der Klebstoff weiterem Fluss widerstehen, um eine starke und dauerhafte Bindungskraft auszubilden und seine Eigenschaft nicht über die Zeit zu verlieren.²²

Es gibt verschiedene Arten von Haftklebstoffen, die je nach Anwendung und gewünschten Eigenschaften ausgewählt werden. Zu den heute gängigen Klebstoffsystmen gehören sogenannte 100 %-Systeme, wie Hotmelt-Klebstoffe und UV-Acrylat-Hotmelts. Eine weitere Gruppe der Klebstoffe sind die Lösungsmittelklebstoffe und Dispersionsklebstoffe. Die beschriebenen 100 %-Systeme unterscheiden sich insofern von Lösungsmittel- oder Dispersionsklebstoffen, dass sie nicht in einem Lösungsmittel gelöst transportiert oder verarbeitet werden.^{20,23}

Der Produktionsprozess eines Klebebandes, speziell unter Verwendung eines Trägermaterials, das mit einem Hotmelt-Klebstoff beschichtet wird, umfasst mehrere Prozessschritte und den Einsatz diverser Technologien. Das Trägermaterial wird bereitgestellt und wenn notwendig, einer Oberflächenbehandlung unterzogen. Eine gängige Methode der Oberflächenbehandlung ist die Corona-Vorbehandlung, bei der die Oberfläche des Materials durch eine Zunahme der Polarität modifiziert wird. Diese Behandlung verbessert die Verankerung des Klebstoffs auf dem Trägermaterial, indem sie die Adhäsionseigenschaften verbessert.²³

Der Hotmelt-Klebstoff, der in dieser Prozessbeschreibung beispielhaft herangezogen wird, ist ein schmelzbarer Haftklebstoff, der bei hohen Temperaturen flüssig aufgetragen wird und beim Abkühlen erstarrt. Die genaue Zusammensetzung der Rezeptur eines Hotmelt-Klebstoffs kann variieren, umfasst jedoch typischerweise Polymere wie Acrylate oder Kautschuke, synthetische Harze, Plastifizierungsmittel und Antioxidantien. Die einzelnen Bestandteile werden beispielsweise in einem Extruder vermischt und auf die notwendige

Beschichtungstemperatur erhitzt, um eine homogene Schmelze zu bilden. Typische Beschichtungstemperaturen für Hotmelt-Klebstoffe variieren von 130 °C bis 170 °C.²³

Die Beschichtung des Trägermaterials mit einem Hotmelt-Klebstoff erfolgt industriell häufig in einem kontinuierlichen Verfahren. Das Trägermaterial wird in der Beschichtungsmaschine als große Rohstoffrolle vorgelegt. Das Trägermaterial läuft dann auf definierten Bahnlinien durch die Maschine, die je nach Produkt variiert werden können. Dann wird der geschmolzene Klebstoff gleichmäßig in der spezifizierten Auftragsmenge auf die Trägeroberfläche aufgetragen. Für die Beschichtung gibt es unterschiedlichste Techniken, wovon zwei Verfahren besonders verbreitet sind. Einmal ist es das Schlitzdüsen (eng.: Slot Die) Auftragsverfahren- oder bei dem der Klebstoff durch eine definierte Schlitzweite auf das Trägermaterial aufgetragen wird. Durch die eingestellte Schlitzweite zum Auftragskopf, der Bahngeschwindigkeit des Trägermaterials, sowie anhand von Druck- und Temperatureinstellungen kann die spezifizierte Menge des Klebstoffauftrags, angegeben in g/m², eingestellt werden. Das andere Verfahren ist das Curtain-Coating (deut.: Vorhangsbeschichtung) -Auftragsverfahren, bei dem der Klebstoff durch einen definierten Schlitz auf das Trägermaterial fließt, ohne dass das Auftragswerk direkten Kontakt zum Trägermaterial hat. Bei textilen Trägermaterialien kann nach Aufbringen des Klebstoffes auf das Trägermaterial der Klebstoff durch eine Vakuumleiste in das Trägermaterial gezogen oder durch eine Laminierwalze eingedrückt werden, um die Verankerung von dem Klebstoff auf dem Trägermaterial zu verbessern. Nach Auftragen des Klebstoffs durchläuft das Material, je nach Anforderung, eine oder mehrere Kühlwalzen, die extern mit Wasser gekühlt werden, sodass der Klebstoff erstarrt und eine feste Haftschicht bildet.^{20,23}

Danach kann eine Abdeckfolie, auch Release-Liner genannt, auf die Klebstoffseite des Klebebands aufgebracht werden, um den Klebstoff vor Verunreinigungen zu schützen und das Abrollen bei der Konfektionierung und Anwendung zu erleichtern. Weiterhin verhindert sie, dass noch flüssiger Klebstoff in die Rückseite des Klebebandes einzieht und die Rolle damit unbrauchbar macht. Diese Abdeckfolie besteht meist aus einem silikonisierten Papier oder einer silikonisierten Kunststofffolie.^{20,23}

Das beschichtete und behandelte Klebeband wird zum Ende des Beschichtungsprozesses auf große Mutterrollen gewickelt. Diese Mutterrollen werden im folgenden Konfektionierungsschritt zuerst in einem Umrollverfahren auf die gewünschte Länge und einen kleineren Kern gewickelt und im Anschluss auf die gewünschte Breite geschnitten. Eine weitere Möglichkeit ist die Verwendung eines Umrollschnitts, der das Umrollen und Schneiden in einem Schritt kombiniert. Eine Schneidemaschine, beispielsweise eine Rollenschneidemaschine oder Ultraschallschneidemaschine, zerschneidet die breite Mutterrolle in die gewünschte Endbreite.²⁰

Diese fertig konfektionierten Einzelrollen werden schließlich verpackt. Der Verpackungsprozess umfasst das Verschweißen der Rollen in Schutzfolie oder das Einlegen in Kartons, um sie vor Beschädigungen und Verschmutzung während des Transports zu schützen. Schlussendlich werden die Rollen oder Verpackungskartons mit Etiketten versehen, die Informationen wie die Produktbezeichnung, Herstellerdetails und eventuell Anwendungsanweisungen enthalten.²⁰

3.2 Klebetheorien

Das Prinzip des Klebens und dementsprechend die Funktionsweise von Klebebändern beruhen auf komplexen physikalischen Prozessen. Im Kern bestehen die Klebeeigenschaften aus dem Zusammenspiel von Adhäsion und Kohäsion. Adhäsion bezeichnet die Wechselwirkung der Anziehungskraft zwischen der Oberfläche des Haftklebstoffes und der Oberfläche, auf die er aufgebracht wird. Diese wird Substrat genannt. Die Kohäsion hingegen beschreibt die Anziehungskraft bzw. Festigkeit innerhalb des Klebstoffes selbst. Beispielhaft ist die prinzipielle Wirkungsweise eines Klebstoffes in Abbildung 2 dargestellt.^{23,24}

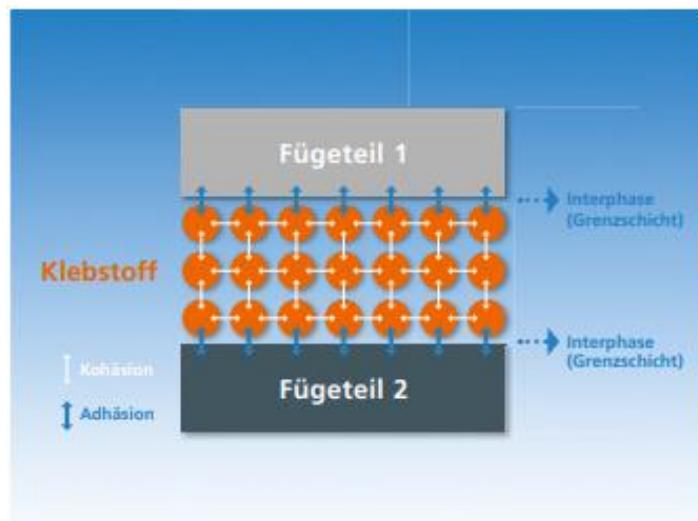


Abbildung 2: Wirkungsweise eines Klebstoffes.²⁴

Adhäsion tritt auf, wenn molekulare Kräfte zwischen unterschiedlichen Materialien wirken. Diese wirkenden Kräfte sind zum Beispiel Van-der-Waals-Kräfte. Bei der Applikation eines Klebebandes sorgt die Adhäsion dafür, dass der Klebstoff an einem Substrat haftet. Um eine starke Adhäsion auszubilden, muss eine gute Benetzbarkeit geschaffen werden. Eine gute

Oberflächenbenetzbarkeit wird durch die Fließfähigkeit des Klebstoffes und der Oberflächen-eigenschaften des Substrates beeinflusst sowie von der Einstellung des Klebstoffes.

Kohäsion hingegen bezeichnet die inneren Bindungskräfte innerhalb des Klebstoffes. Diese Kräfte halten die Klebstoffmoleküle zusammen und sorgen dafür, dass der Klebstoff eine zusammenhängende Masse bildet. Ein wirksamer Haftklebstoff benötigt ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Adhäsion und Kohäsion, um eine starke Haftung zum Substrat auszubilden, gleichzeitig jedoch eine ausreichende Viskosität, um eine gute Oberflächenbenetzung zu ermöglichen.^{22,23}

Eine weitere Möglichkeit für die Haftverbesserung stellt die Oberflächenmodifikation durch die Verwendung von Primern dar. Primer, auch Haftvermittler genannt, verbessern die Haftung zwischen Klebstoffen und dem Trägermaterial. Durch die Verwendung von Primern werden die Oberflächeneigenschaften des Trägermaterials verändert, indem die Oberfläche beispielsweise durch ein Aufquellen vergrößert oder indem Modifizierungen in Form von Silanen eingebracht werden. Zudem können sie als Vermittlungsschichten fungieren.²³

Der Klebstoff besteht aus Polymeren, Harzen und anderen Additiven, die zusammen spezifische Adhäsions- und Kohäsionseigenschaften bedingen. Das Anpressen des Klebebandes auf die Oberfläche verstärkt den Kontakt zwischen Klebstoff und Oberfläche, wodurch eine bessere Benetzung der Oberfläche ermöglicht wird.^{22,23}

Eine wichtige Eigenschaft hochwertiger Klebebänder ist, dass beim Ablösen des Klebebandes kein Klebstoffübertrag auf das Substrat stattfindet. Ein Klebstoffübertrag entsteht, wenn ein Adhäsionsbruch zum Träger vorliegt und beim Entfernen des Klebebandes der Klebstoff auf dem Substrat verbleibt. Verhindert wird ein Klebstoffübertrag nach der Anwendung dadurch, dass der Klebstoff bei der Beschichtung aufgrund der hohen Temperatur eine niedrigere Viskosität hat als im abgekühlten Zustand. Durch die geringe Viskosität entstehen bessere Fließ- und Benetzungseigenschaften. Nach dem Erkalten des Klebstoffes sinkt die Benetzungsfähigkeit, sodass die Verankerung auf dem Trägermaterial stärker ist als auf dem später zu beklebenden Substrat. Um den Effekt zu verstärken, kann durch chemische Vorbehandlungen oder durch physikalische Methoden die Oberflächenenergie des Trägermaterials zusätzlich erhöht werden.²³

Ein effektives Klebeband muss eine Reihe von Eigenschaften aufweisen, um in unterschiedlichen Anwendungen und Bedingungen erfolgreich zu funktionieren. Der Klebstoff muss seine Adhäsions- und Kohäsionseigenschaften über die Zeit beibehalten und möglichst widerstandsfähig gegen Alterung, UV-Strahlung und chemische Einflüsse sein. Der Klebstoff muss in einem breiten Temperaturbereich funktionsfähig bleiben und unterschiedlichen klimatischen Bedingungen standhalten. Dies umfasst Beständigkeit gegenüber Feuchtigkeit und

thermischen Einflüssen. Das Trägermaterial und der Klebstoff müssen als System mechanisch belastbar sein, um Zug- und Scherkräften standzuhalten, ohne zu reißen oder sich zu lösen. Das Klebeband muss auf diversen Substraten haften, in vielen Anwendungen muss das Klebeband auch wieder entfernt werden können, ohne Rückstände zu hinterlassen. Dies erfordert eine sorgfältige Balance der Klebstoffzusammensetzung und der Adhäsionskräfte.²³

In der Entwicklung und Qualitätssicherung von Klebebändern spielen verschiedene Tests eine entscheidende Rolle, um die Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit der Produkte zu testen und zu gewährleisten. Diese Tests sind notwendig, um sicherzustellen, dass Klebebänder den geforderten Spezifikationen und Anwendungsbedingungen entsprechen. Daher werden vor allem anwendungsorientierte Tests durchgeführt, sodass die erforderlichen Eigenschaften im Anwendungsfall garantiert werden können. Zu den gängigen Prüfverfahren gehört der Haftungstest, auch Adhäsionstest genannt, der die Fähigkeit des Klebebands misst, auf verschiedenen Oberflächen zu haften. Hierbei werden angelehnt an die DIN EN ISO 29862 Tests durchgeführt, bei denen ein Streifen des Klebebands in 180 oder 90-Grad-Winkel mit einer definierten Geschwindigkeit abgezogen wird und dabei die erforderliche Kraft zur Entfernung gemessen wird.²⁵ Diese Tests finden auf unterschiedlichen Substraten wie Edelstahl oder Holz und mit unterschiedlichen Klebebandbreiten statt. Diese Tests können dem spezifischen Anwendungsfall oder den geforderten Spezifikationen angepasst werden. Beispielhaft ist ein 180 °-Klebkrafttest in Abbildung 3 dargestellt.²⁵



Abbildung 3: Beispielbild einer Klebkraftmessung.

Weitere wichtige Tests sind die Scherfestigkeitstests, um den Widerstand einer Verklebung gegen eine statische Belastung zu prüfen. Diese werden durch den sogenannten Shear Adhesion Test gemessen, bei dem das Klebeband einer Scherkraft ausgesetzt wird. Der Test wird angelehnt an die DIN EN ISO 29863 durchgeführt.²⁶ Hierzu wird ein Klebeband auf eine Stahlplatte aufgeklebt und daran ein Gewicht aufgehängt. Diese Platten werden an einer Vorrichtung aufgehängt, wie in Abbildung 4 zu sehen. Je nach Spezifikation des Klebebandes werden dafür Gewichte von 100 g bis 6,25 kg verwendet und die Zeit bis zum Klebeversagen gemessen.²⁶



Abbildung 4: Beispielbild einer Scherkraftmessung.

Darüber hinaus wird die Messung der Oberflächenklebrigkeits oder des sogenannten "Tacks" durchgeführt, der die Soforhaftung des Klebebands klassifiziert. Der Loop Tack Test ist hierbei ein standardisiertes Verfahren nach FINAT 9, bei dem ein Klebebandstreifen zu einer Schlaufe geformt, auf eine standardisierte Oberfläche aufgebracht und wieder entfernt wird, um die dafür notwendige Kraft zu messen. Durch diesen Test ist es möglich, die Anfangshaf-
tung des Klebebands zu bewerten. Eine bespielhafte Durchführung des Loop Tack Tests ist in Abbildung 5 zu sehen.²⁷

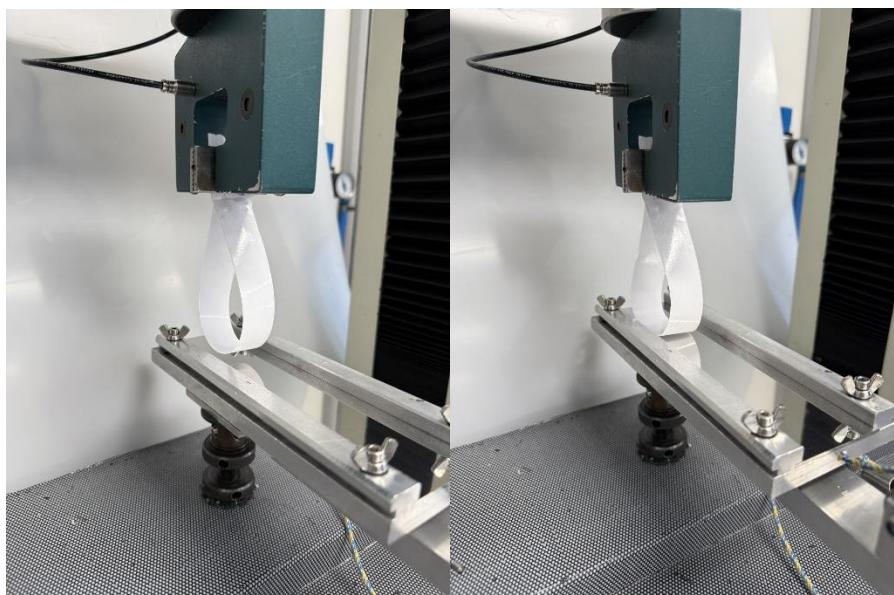


Abbildung 5: Beispielbild eines Loop-Tack-Tests.

Durch weitere Tests kann die Resistenz gegen Umwelteinflüsse bei der Anwendung beurteilt werden. Temperaturbeständigkeitstests geben Rückschlüsse auf die Leistung eines Klebebands unter extremen Temperaturbedingungen, sowohl bei hohen Temperaturen bis 200 °C, als auch bei niedrigen Temperaturen bis - 20 °C. Bei diesen Tests wird das Klebeband auf ein Substrat aufgebracht und in einem temperierten Ofen oder Kühlkammer für einen definierten Zeitraum gelegt. Danach werden die oben beschriebenen Peel Tests durchgeführt, um Veränderungen der Klebkraft darzustellen. Ebenso wichtig sind Alterungstests, die eine beschleunigte Alterung des Klebebandes in der Anwendung simulieren. Hierbei wird das Klebeband extremen Bedingungen wie erhöhte Temperatur, Luftfeuchtigkeit oder UV-Strahlung ausgesetzt, um die Langzeitbeständigkeit zu simulieren. Häufig werden extreme Bedingungen wie eine Anwendung bei 50 °C bei 95 % Luftfeuchtigkeit in Klimawechseltests getestet.²³

3.3 Entwicklung der Nachhaltigkeit

Nachhaltigkeit umfasst eine Vielzahl von Faktoren, die, wie bereits in der Einleitung beschrieben, über die ökologischen Aspekte hinausgehen. Der Begriff ökologische Nachhaltigkeit beschreibt grundlegend den Schutz und die Einsparung natürlicher Ressourcen sowie die Vorbeugung weiterer Umweltschäden. Dies beinhaltet beispielsweise Maßnahmen zur Reduzierung von direkten und indirekten Emissionen und zur Ressourceneffizienz, sowohl der verwendeten Rohstoffe als auch genutzter Energien. Ökonomische Nachhaltigkeit eines Unternehmens wird definiert als das Ziel, langfristige Wirtschaftlichkeit zu garantieren, zusammen mit der Fähigkeit, kontinuierlich wachsende Gewinne zu erzielen. Hierbei spielen Innovationsfähigkeit und die Anpassungsfähigkeit an sich verändernde Marktbedingungen sowie an neue regulatorische Vorgaben eine zentrale Rolle. Humanitäre oder soziale Nachhaltigkeit hingegen betont die Verantwortung eines Unternehmens gegenüber der Gesellschaft und seinen Mitarbeitern. Diese umfassen zum Beispiel faire Arbeitsbedingungen, Gleichstellung, soziale Gerechtigkeit, sowie die Sicherstellung von Gesundheit und Sicherheit am Arbeitsplatz.²⁸

Zusammen bilden die drei Säulen der Nachhaltigkeit ein integratives Konzept, das darauf abzielt, wirtschaftliche Rentabilität, ökologische Verantwortung und soziale Gerechtigkeit in Einklang zu bringen. In der Praxis bedeutet das, dass Unternehmen eine ganzheitliche Nachhaltigkeitsstrategie entwickeln müssen, die alle diese Aspekte berücksichtigt. Die Notwendigkeit einer solchen Nachhaltigkeitsstrategie ist nicht nur durch gesetzliche Vorgaben getrieben, sondern auch ein entscheidender Faktor für einen langfristigen Erfolg. Dadurch schafft ein Unternehmen die notwendige Resilienz, um in einem sich schnell verändernden globalen Markt zukunftsfähig zu sein. Die gesellschaftliche Relevanz von solchen Entscheidungen ist

in Hinsicht auf Umwelteinflüsse und sozialer Nachhaltigkeit enorm. Soziale Nachhaltigkeit ist jedoch ein komplexer Bereich und schlecht quantifizierbar. Zudem ist es für strategische Managemententscheidungen eines produzierenden Unternehmens auf Produkteinheit nicht von hoher Relevanz. Daher wird in dieser Arbeit besonders das Zusammenspiel aus ökologischer und ökonomischer Nachhaltigkeit betrachtet.²⁹

Die Betriebswirtschaftslehre entstand in ihren Grundzügen bereits ca. 3000 v. Chr.³⁰ Dort wurde, bedingt durch einen stetig wachsenden Handel, eine Handelsbuchführung notwendig. Damit waren erste Quantifizierung der Einnahmen und Ausgaben möglich. In den folgenden Jahrhunderten entstanden im Handel sowie in der Produktion, aufgrund von schnell wachsendem Handelsvolumen und stark verbesserten Technologien, immer neue Herausforderungen und Bedürfnisse an eine detaillierte Betrachtung der Wirtschaftlichkeit eines Unternehmens.³⁰ Um als Unternehmen langfristig erfolgreich zu sein, werden eine Vielzahl an Daten aus dem Ein- und Verkauf sowie aus der Produktion gesammelt und von mittlerweile gesamten Finanzabteilungen, die unter anderem eine Buchhaltung, Controlling sowie Steuerabteilungen beinhalten, gesammelt und ausgewertet. Daraus werden wirtschaftliche Prognosen erarbeitet, sodass auf zukünftige Marktentwicklungen schneller und präziser reagiert werden kann sowie eine dementsprechende Steuerung seiner Produktion möglich ist. Nur so ist ein nachhaltiges und langfristig stabiles Wirtschaften möglich.³⁰

Die ökologische Nachhaltigkeit ist im Vergleich dazu ein sehr junges Gebiet, welches lange aufgrund von angeblichen Mehrkosten bisher weitestgehend ignoriert wurde, sodass der Umwelt einen sehr geringen Stellenwert zugeschrieben wurde. Wie bereits erwähnt, wurden im Laufe der letzten Jahre viele Regularien und Absprachen, sowohl von Regierungen als auch von Industrieverbänden, getroffen. Weiterführend bedeuteten die strengeran Anforderungen, dass Großkonzerne Nachhaltigkeitsziele definieren und zwangsweise in ihre Geschäftsstrategien integrieren mussten. Dies umfasst die Entwicklung und Umsetzung von Sustainability Goals, die als Leitlinien für nachhaltiges Wirtschaften dienen. Um die Einhaltung der Ziele nachvollziehen zu können, werden sie mit spezifischen messbaren Indikatoren verbunden, die es ermöglichen, ihren Fortschritt zu verfolgen und die Strategien entsprechend fortlaufend anzupassen. Berichtet werden diese Nachhaltigkeitsziele und deren Einhaltung in Nachhaltigkeitsberichten nach DNK und der CSRD.³¹

Besonders das Zusammenspiel aus ökonomischer und ökologischer Nachhaltigkeit ist längst kein Widerspruch mehr. Ein effizienterer Produktionsprozess spart beispielsweise Kosten ein, verringert gleichzeitig aber auch Emissionen und mindert Ressourcenverbrauch. Weiterhin sind „grüne“ Produkte heutzutage sehr gefragt, sodass ein Unternehmen, das keine passende Nachhaltigkeitsstrategie vorweisen kann, zukünftig Absatzmärkte verliert. Das Label der „grünen“ Produkte stellt einen starken Marketingaspekt im Konsumentengeschäft (B2C-Geschäft)

dar. Mittlerweile werden die Nachhaltigkeitsziele und deren Einhaltung selbst bei Finanzierungen von Banken berücksichtigt und gewinnen damit auch in Geschäftsbeziehungen zwischen Unternehmen (B2B-Geschäft) stark an Bedeutung.³²

Den Fortschritt und das endgültige Erreichen dieser Ziele zu kontrollieren, ist jedoch ohne Messbarkeit und Quantifizierung der Ergebnisse nicht möglich. Hierzu wurde 2001 das Green House Gas-Protocol (GHG-Protocol) vorgestellt, welches die Basis zur Messung und Berichterstattung von Treibhausgasemissionen vorlegt. Das GHG-Protocol definiert grundlegende Leitlinien für die Bestimmung und Kommunikation von Emissionen. Jedoch liefert es kein Regelwerk mit klar definierten Einschränkungen für eine Bestimmung und Quantifizierung der Emissionen.³³

3.4 Product Carbon Footprint-Normen und Berechnungsgrundlage

3.4.1 PCF in der Praxis: Stand der Technik und Berechnungsmethoden

Wie bereits in Kapitel 3.3 beschrieben soll eine Kennzahl für ökologische Nachhaltigkeit vorgestellt werden. Hierzu hat sich der Product Carbon Footprint (PCF) in den letzten Jahren als Stand der Technik durchgesetzt, da er eine Vorschrift für Methoden zur Bewertung der Umweltauswirkungen von Produkten darstellt. Seit der Einführung des Konzepts der Nachhaltigkeit durch die BASF im Jahr 1990 haben sich industrielle Ziele parallel zu den Regierungsvorgaben stark weiterentwickelt. Ursprünglich wurde das Green House Gas-Protocol (GHG) als Basis für eine Treibhausgas-Bilanzierung veröffentlicht.³³ Daraus ergab sich erstmalig eine Betrachtungsgrundlage für Produkte, die Life Cycle Analysis (LCA), zu Deutsch Lebenszyklusanalyse. Diese betrachtet den gesamten Lebenszyklus eines Produktes, von der Entstehung über die Nutzungsphase und der Entsorgung. Der prägende englische Fachbegriff dazu ist die Cradle-to-Grave Betrachtung. Auf dieser Betrachtungsgrundlage baut der PCF auf, der jedoch im Gegensatz zum LCA den Lebenszyklus und Entsorgung des Produktes nicht betrachtet. Hier wird von einer Cradle-to-Gate Betrachtung gesprochen, da die Betrachtungsgrenze am Werkstor des jeweiligen Produzenten liegt. Der PCF hat sich in seiner Grundstruktur über die Jahre wenig verändert.^{34,35}

Die Berechnung und Bewertung des PCF erfolgt nach standardisierten Normen, insbesondere nach der DIN EN ISO 14067 und der DIN EN ISO 14044.^{36,37} Diese Normen bietet standardisierte Regularien zur Ermittlung des CO₂-Fußabdrucks eines Produkts. Spezifiziert werden die Normen von der Together for Sustainability (TfS) Initiative, die von führenden Unternehmen der chemischen Industrie gegründet wurde und deren Regularien diese sich verschrieben

haben.³⁸ Auch in der chemienahen Produktion ist die Betrachtung ökologischer und ökonomischer Nachhaltigkeitsaspekte von immer größer werdender Bedeutung. Der PCF leitet sich aus der Notwendigkeit ab, den Ausstoß von jeglichen Treibhausgasen, jedoch insbesondere von Kohlenstoffdioxid (CO₂), quantifizierbar und gestellte CO₂-Reduktionsziele kontrollierbar zu machen. In der Klimadiskussion spielt der Ausstoß von Treibhausgasemissionen eine zentrale Rolle, da sie maßgeblich zur globalen Erwärmung beitragen. Der PCF bietet dafür eine greifbare Kennzahl zur Bewertung der Umweltbelastung von Produkten und macht diese messbar und vergleichbar. Somit ermöglicht der PCF ebenfalls die Identifikation von Maßnahmen zur Emissionsreduktion. Obwohl es alternative Konzepte wie den ökologischen Rucksack und den Product Environmental Footprint (PEF) gibt, die weitere Umweltaspekte wie beispielsweise den Wasserverbrauch berücksichtigen, ändert dies die jeweiligen Untersuchungsergebnisse nur marginal und bietet keinen signifikanten Erkenntniszuwachs im Vergleich zum einfacher zu kalkulierenden PCF.³⁹ Da diese Konzepte industrieweit nicht die gleiche Akzeptanz gefunden haben wie der PCF werden sie hier nicht weiter betrachtet und diskutiert.

3.4.2 Normen und Berechnungsstandards

Wie bereits erwähnt hatte das Greenhouse Gas Protocol (GHG Protocol) die Basis für Lebenszyklusanalysen gelegt. Das GHG-Protocol ist ein weltweit anerkannter Standard zur Quantifizierung und Kommunikation von Treibhausgasemissionen (THG) in Unternehmen. Das GHG-Protocol wurde gemeinsam vom World Resources Institute (WRI) und dem World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) entwickelt. Die Entstehung des GHG-Protocols geht auf die späten 1990er Jahre zurück. Zu dieser Zeit wuchs das erste Bewusstsein für den Klimawandel und die Verantwortung von Unternehmen für ihre emittierten THG-Emissionen. Unternehmen, deren Investoren sowie Verbände und Regierungen forderten eine verlässliche und transparente Berichterstattung der CO₂-Emissionen, um negative Umweltauswirkungen durch die Produktionen zu minimieren. Das GHG-Protocol wurde erarbeitet, um eine einheitliche Betrachtung zu schaffen, indem es klare Leitlinien für die Bestimmung und die Vergleichbarkeit von Treibhausgasemissionen festlegt. Dadurch wurden Produktionen und Produkte auch industrieübergreifend vergleichbar. Diese Ergebnisse sind für Verbände und Regulierungsbehörden wichtig, da zunehmend Informationen über die Klimarisiken und -strategien von Unternehmen verlangt und überprüft werden müssen. Eine breite Kenntnis über die Emissionsfaktoren der eigenen Produktion unterstützen Unternehmen bei der Identifizierung von Effizienzpotenzialen der eigenen Produkte und Produktion, sowie bei der Entwicklung und Einhaltung von Reduktionsstrategien. Die Messung und Quantifizierung

von THG-Emissionen spielen eine zentrale Rolle in der Umsetzung und der Festlegung wissenschaftsbasierter Ziele, den sogenannten Science-Based Targets. Mit wachsendem Interesse an Klimazielen und den damit einhergehenden steigenden Regulierungen musste das GHG-Protocol weiterentwickelt werden. Es gibt eine verstärkte Betonung auf eine umfassende Berichterstattung von Scope 3-Emissionen, da diese oft den größten Anteil an den Gesamtemissionen eines Unternehmens ausmachen. Die Erfassung und Reduzierung von Scope 3-Emissionen ist jedoch komplex und erfordert eine enge und normierte Zusammenarbeit entlang der gesamten Lieferkette sowie die Entwicklung genauer und verlässlicher Datenerfassungsmethoden.

Nach dem GHG-Protocol werden die THG-Emissionen in drei Hauptkategorien unterteilt, die als Scopes bezeichnet werden.³³

Scope 1: Direkte Emissionen

Scope 1 umfasst alle direkten Treibhausgasemissionen aus Quellen, die einem Unternehmen gehören oder von ihm kontrolliert werden. Dazu gehören Emissionen aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe in firmeneigenen oder kontrollierten Anlagen, Fahrzeugen oder Maschinen sowie Emissionen aus industriellen Prozessen. Beispielhaft kann dafür die Verbrennung von Erdgas zur Beheizung von Betriebsgebäuden und Emissionen aus Verwendung von Kältemitteln genannt werden.

Scope 2: Indirekte Emissionen aus dem Energieverbrauch

Scope 2 beinhaltet indirekte Emissionen, die aus dem Verbrauch von eingekaufter Energie wie Strom, Wasserdampf, Wärme oder Kühlung entstehen. Diese Emissionen entstehen zwar physisch außerhalb des Unternehmens, werden jedoch aufgrund des Energieverbrauchs des Unternehmens verursacht. Hierzu zählen zum Beispiel Emissionen, die mit der Herstellung von Strom verbunden sind, die ein Unternehmen zur Beleuchtung, Heizung oder Kühlung seiner Gebäude sowie bei der eigentlichen Produktion verbraucht.

Scope 3: Sonstige indirekte Emissionen

Scope 3 enthält alle anderen indirekten Emissionen, die entlang der gesamten Wertschöpfungskette eines Unternehmens entstehen. Diese Emissionen sind nicht direkt unter der Kontrolle des Unternehmens. Unter Scope 3 werden 15 Unterkategorien definiert und diese weiter nach Upstream, den Emissionen, die vor der eigenen Geschäftstätigkeit anfallen und

Downstream, den Emissionen, die nach der eigenen Geschäftstätigkeit emittiert werden, unterscheiden. Für den PCF sind nur die Upstream Emissionen relevant, sodass nur die ersten acht Unterkategorien von Bedeutung sind. Darunter fallen beispielsweise eingekaufte Rohstoffe und Dienstleistungen, Kapitalgüter, Abfallaufkommen, Geschäftsreisen, sowie der Pendelverkehr der Mitarbeiter. Emissionen aus der Produktion von Rohstoffen, die ein Unternehmen einkauft, sowie Emissionen aus dem Transport von Gütern, die das Unternehmen verkauft, werden hier ebenfalls zusammengefasst und machen den Großteil der Scope 3-Emissionen aus.

Die Basis der PCF-Berechnung stellt die DIN ISO 14067:2019 dar. Die DIN ISO 14067 ist eine internationale Norm, die die Datensammlung, Berechnung und Kommunikation des Kohlenstoff-Fußabdrucks von Produkten (PCF, englisch: Product Carbon Footprint) festlegt. Sie normiert Prinzipien, Anforderungen und Richtlinien für die Quantifizierung und Kommunikation des PCF, der den gesamten Produktionsprozess eines Produktes inklusive seiner Vorprodukte bis zur Entstehung umfasst. Die Norm zielt darauf ab, die Transparenz und Vergleichbarkeit der Nachhaltigkeit von Produkten zu erhöhen, indem sie ein standardisiertes Vorgehen zur Berechnung der Emissionen definiert. Dies beinhaltet die Identifizierung der relevanten Lebenszyklusphasen und die Wahl geeigneter Emissionsfaktoren. Die Norm legt eine transparente und konsistente Dokumentation der Rohstoff- und Produktionsdaten fest.

Weiterhin gibt sie einen definierten Untersuchungsrahmen für die PCF-Berechnung vor. Dieser verlangt, dass der PCF in einer funktionellen, deklarierten Einheit dargestellt wird, um Vergleiche zwischen Produkten unterschiedlicher Hersteller sowie diverser Verpackungsgrößen und -arten zu ermöglichen. Angepasst an das jeweilige zu betrachtende Produkt werden hier SI-Einheiten wie Meter (m) oder Kilogramm (kg) für die Bezugnahme verwendet.

Für die Datensammlung wird ein iterativer Ansatz vorgeschrieben, um kontinuierliche Verbesserungen in der Datenqualität und Methodik zu gewährleisten. Die Norm sieht auch vor, dass spezifische Produktkategorie-Regeln (Product Category Rules, PCR) angewendet werden, um die PCF-Berechnung weiter zu standardisieren und zu spezifizieren. Die zugrundeliegende Betrachtungsweise der eingeschränkten Lebenszyklusanalyse des PCFs ist die cradle-to-gate Betrachtung. Sie schränkt die Betrachtung des Lebenszyklus eines Produktes von seiner Entstehung (cradle, zu Deutsch Wiege) bis zum Werkstor des Produzenten (gate, zu Deutsch Werkstor) ein. Somit werden bei den eingekauften Rohstoffen die Emissionen aller Prozesse der Herstellung und die jeweiligen Transporte inklusive ihrer gesamten Vorketten mitbetrachtet. In den Vorketten wird der gesamte Lebensweg der Emissionen, wie zum Beispiel Produktionsverbräuche, Gewässereinleitungen und Abfälle, mit einbezogen. So kann

eine gesamte Produktionskette eines Produktes nachvollzogen werden, genaue Produktionsemissionen der einzelnen Produzenten und Veredelungsschritte eingerechnet und Doppelzählungen sowie Unklarheiten vermieden werden.

Falls Lücken aufgrund fehlender Informationen innerhalb der Lieferkette auftreten, können Datenbankenwerte substituierend verwendet werden. Auf Basis von Datenbanken, die von privaten Anbietern wie SPHERA und Ecoinvent kostenpflichtig angeboten, aber auch vom Umweltbundesamt kostenlos zur Verfügung gestellt und verwaltet werden, können vorgefertigte Emissionswerte für unterschiedliche Rohstoffklassen und Emittenten recherchiert werden. Die Datenbank bildet ihre Daten der CO₂-Emissionen aus verschiedenen Referenzen, wie universitären Studien und berücksichtigt zudem zahlreiche öffentliche Datenquellen. Die Auswahl der passenden Emissionswerte aus den entsprechenden Datenbanken ist sehr zeitaufwändig und bedarf umfassendem Wissen und Erfahrung des Anwenders. Die Substitution mit passenden Datenbankwerten ist gerade bei hohen Veredelungsstufen der Produkte komplex und bedarf einiger Annahmen.

Als normierte Einheit für die berechneten Emissionen der jeweiligen Produkte und Prozesse wurde das Kohlenstoffdioxid-Äquivalent (CO_{2e}) vorgegeben, in der die jeweiligen Emittenten quantifiziert werden. Nach dem Kyotoprotokoll werden sieben Treibhausgase betrachtet und das „Global Warming Potential (GWP)“ dieser verglichen.⁴⁰ Eine Vergleichbarkeit und Normierung dieser Treibhausgasemissionen wurde ermöglicht, indem diese in CO₂-Äquivalente (CO_{2e}) umgerechnet wurden. Das GWP normiert die Wirkung aller Treibhausgase auf die Wirkung von CO₂.^{40,41}

Ergänzend zu der DIN EN ISO 14067 wurde, wie bereits erwähnt, von der chemischen Industrie die Together for Sustainability Initiative gegründet.³⁸ Diese spezifiziert die DIN EN ISO 14067 an einigen Stellen und passt sie an die speziellen Gegebenheiten und Anforderungen der chemischen Industrie an. Weitere industrielle Initiativen, wie Catena-X der Automobilindustrie, haben sich den gleichen Regeln unterworfen, um eine industrieübergreifende, standardisierte Berechnungsmethode zu schaffen, sodass Rohstoffe und Zwischenprodukte aus unterschiedlichen Industriezweigen in ihre Berechnung nahtlos eingefügt werden können.⁴²

Ein besonderes Augenmerk der TfS-Guideline liegt auf der Erfassung und Berichterstattung von Emissionen, die durch die vorgelagerten Wertschöpfungsketten entstehen, da diese einen erheblichen Anteil der Gesamtemissionen der chemischen Industrie ausmachen. Die TfS-Guideline betont die Notwendigkeit einer verbesserten Transparenz und Datenqualität innerhalb der Lieferketten. Sie bietet spezifische Regelungen für Mehrproduktssysteme sowie die Forderungen an Bewertung sowie Verbesserung der Datenqualität. Weiterhin werden spezifische Anforderungen für die Berichterstattung und Verifizierung von PCF-Daten festgelegt, die über

die allgemeinen Anforderungen der DIN EN ISO 14067 hinausgehen. Diese Erweiterungen und Detaillierungen sollen eine bessere Vergleichbarkeit schaffen und die Konsistenz der Daten innerhalb der Industrie gewährleisten.

Obwohl die DIN EN ISO 14067 eine einheitliche Methodik zur PCF-Berechnung bietet, wird kritisiert, dass diese standardisierte Vorgehensweise nicht immer für alle Produkttypen und -prozesse hinreichend alle Eventualitäten abdeckt. Die uniformen Vorgaben können beispielsweise spezifische Eigenheiten oder regionale Unterschiede zum Teil nur unzureichend berücksichtigen. Weiterhin wird kritisiert, dass der PCF nur eine sehr einseitige Sicht der Nachhaltigkeit betrachtet. Die in Kapitel 1 erklärten Begriffe der sozialen und ökonomischen Nachhaltigkeit werden bei dem PCF weitgehend nicht berücksichtigt. Zudem ist die Bestimmung des PCF sehr aufwändig, da eine große Menge an Produktionsdaten erhoben und verarbeitet sowie Rohstoffdaten bei Lieferanten angefordert werden müssen.

Unternehmen, die ihre Produktionsprozesse nachhaltiger gestalten wollen, nutzen den PCF als Kennzahl, um die ökonomische Nachhaltigkeit ihrer Produkte zu bewerten, zu vergleichen und zu optimieren. Somit kann bereits anhand theoretischer Überlegungen vor der praktischen Produktentwicklung der ökologische Einfluss verschiedener Rohstoffe oder die Substitution einzelner Produktbestandteile bewertet werden. Weiterhin ist der PCF mittlerweile neben den klassischen Produkteigenschaften, wie Kosten und Performance, ein weiteres Bewertungskriterium, um Produkte miteinander zu vergleichen. Nachhaltige Produkte sind nicht nur ökologisch vorteilhaft, sondern auch ökonomisch zukunftsfähig, da ein effizienteres Produkt häufig auch kostengünstiger ist. Unternehmen entwickeln zunehmend Strategien, die auf der Herstellung nachhaltiger Produkte basieren, um langfristig wettbewerbsfähig zu bleiben und gleichzeitig regulatorische Anforderungen zu erfüllen. Insgesamt hat sich der PCF industrieübergreifend als standardisierte Berechnungsmethode etabliert, da er die erste messbare und vergleichbare Kennzahl für die ökologische Bewertung eines Produktes darstellt und eine Kommunikation von nachhaltigen Produktkennzahlen entlang der Wertschöpfungskette ermöglicht.

3.4.3 Berechnung eines PCFs

Im folgenden Kapitel soll eine vollständige PCF-Berechnung erklärt und durchgeführt werden, wie sie in dem betrachteten Unternehmen anfällt. Die Datensammlung und Berechnung eines PCFs umfasst mehrere Schritte und fordert eine abteilungsübergreifende Zusammenarbeit innerhalb eines Unternehmens sowie dessen Lieferanten. Zuerst werden die Systemgrenzen und die Funktionseinheiten für das betrachtete Produkt von dem Anwender festgelegt. Das

Regelwerk für die Berechnung wird durch die TfS-Norm vorgegeben. Die Betrachtung des Lebenszyklus ist, wie bereits beschrieben, beschränkt auf die cradle-to-gate Betrachtung, so dass die Lebensphase und Entsorgung des Produktes nicht berücksichtigt werden. Die Funktionseinheit kann passend zum Produkt frei gewählt werden. Im Beispiel einer Klebebandproduktion wird die Einheit Quadratmeter (m^2) verwendet. Die gewählte Einheit macht eine Vergleichbarkeit über unterschiedliche Rollendimensionen sowohl bei Zwischenprodukten wie einer beschichteten Mutterrolle als auch bei fertig konfektionierten Rollen möglich. Damit ist eine interne Vergleichbarkeit im Produktionsumfeld und im Vertrieb gegeben und für Kunden mit großer Abnahmemenge eine handhabbare Beschreibungsgröße gewählt. Für private Endverbraucher oder zu Marketingzwecken ist eine Normierung der Einheit auf eine Rolle des spezifischen Klebebandes greifbarer. Diese Einheit bringt jedoch den Nachteil mit, dass eine Vergleichbarkeit zwischen unterschiedlichen Produktdimensionen schwierig ist und somit wird der Aufwand der Kommunikation der PCF-Werte aufwändiger. Dasselbe Produkt hätte aufgrund unterschiedlicher Abmessungen unterschiedliche PCF-Werte und müsste für jede Rollendimension ein eigener Wert berechnet und kommuniziert werden.

Sind diese grundlegenden Betrachtungsweisen festgelegt, kann mit der Datenerhebung gestartet werden. Dazu werden PCF-Werte für die eingesetzten Rohstoffe des betrachteten Produktes bei den jeweiligen Lieferanten angefordert. Eine Abfrage eines PCF-Wertes sollte neben dem spezifischen PCF-Wert, ebenfalls eine Nachfrage über den Versandort der Ware und der genauen Berechnungsmethode beinhalten. Durch diese zusätzlichen Informationen wird zum einen die standardisierte Berechnung der Lieferanten überprüft, zum anderen eine Berechnung der Transportemissionen ermöglicht.

Um die Emissionen der eigenen Produktion zu bestimmen, müssen Produktionsprozesse durchleuchtet und Emissionsquellen identifiziert werden. Dort werden entsprechende Energiemessungen, in Form von Strom- und Druckluftverbrauchsmessungen, während des Produktionsprozesses des betrachteten Produktes erhoben. Diese Produktionsverbräuche werden für jedes Produkt über ein Kalenderjahr gesammelt und daraus ein Durchschnittswert pro Quadratmeter errechnet.

Ein weiterer wichtiger Emissionsfaktor ist der Transport der Rohstoffe zu der Produktionsstätte. Hierzu werden die Informationen aus der Rohstoffabfrage genutzt, um die Transportwege zur eigenen Produktionsstätte zu berechnen.

Sind alle relevanten Daten gesammelt, wird die Kalkulation der Treibhausgasemissionen durch Nutzung spezifischer Emissionsfaktoren durchgeführt. Die gemessenen Produktionsverbräuche sowie die Transportwege können dann mit Umrechnungsfaktoren aus öffentlichen oder lizenzierten Datenbanken in CO_2 -Emissionen umgerechnet werden. Der gesamte

Prozess über die Abfrage der Rohstoffdaten, die Sammlung der Produktionsdaten und die Kommunikation der errechneten Werte an die Kunden erfordert eine enge Zusammenarbeit aller beteiligten Fachabteilungen. Diese Zusammenarbeit muss von dem Verantwortlichen für die PCF-Berechnung koordiniert und alle Angaben auf Plausibilität geprüft werden.

Die vorgestellten Normen geben sehr detaillierte Anleitungen für Berechnungen der PCFs. In der Praxis ist der abschätzende Charakter des PCF für Kundenanforderungen meist ausreichend, sodass die aufwändige, kleinteilige Betrachtung keine Anwendung findet.

3.5 Messung Enthalpie und Wärmekapazität mittels DSC-Messungen

Die Differential Scanning Calorimeter-Analyse bietet ein thermisches Verfahren, um thermodynamische und kinetische Informationen über diverse Stoffe und Gemische aus kleinsten Probemengen erhalten zu können. Eine Differential Scanning Calorimetry (DSC), zu Deutsch "Dynamische Differenzkalorimetrie", ist eine thermoanalytische Methode, die zur Messung von Wärmeflüssen verwendet wird, die bei Phasenübergängen und chemischen Reaktionen ablaufen. Diese Methode wird verwendet, um thermische Eigenschaften von Materialien zu untersuchen. Zu den analysierten Parametern gehören unter anderem die Glasübergangstemperatur, Schmelztemperatur, Kristallisationstemperatur sowie die damit verbundenen Wärmeströme und spezifischen Wärmekapazitäten. Das Grundprinzip der DSC basiert auf der Messung der Differenz der Wärmeflüsse einer Probe und einer Referenz, wenn beide gemeinsam kontrolliert aufgeheizt oder abgekühlt werden. Die DSC besteht aus zwei Aluminium-Tiegeln, wovon einer für die Probe und einer für die Referenz vorgesehen ist. Beide Tiegel werden in einem Ofen platziert, der die Temperatur entweder linear oder nichtlinear ändern kann. Typischerweise wird die Temperatur linear erhöht oder verringert, was als "Scanning" bezeichnet wird. Während des Scans werden die Temperaturdifferenzen und die zugeführte Wärme kontinuierlich aufgezeichnet. Die zentrale Komponente der DSC ist ein Sensor, der die Wärmeströme zu den beiden Tiegeln misst. Dieser Sensor ist so konzipiert, dass er die Differenz im Wärmefluss, die erforderlich ist, um die Probe und die Referenz bei der gleichen Temperatur zu halten, genau erfassen kann. Wenn die Probe eine Phasenänderung wie Schmelzen, Glasübergang, Kristallisation oder chemische Reaktion durchläuft, benötigt sie entweder mehr oder weniger Wärmeenergie im Vergleich zur Referenz, um die Temperatur zu ändern. Diese Änderung im Wärmebedarf führt zu einer Differenz im Wärmefluss, die vom Sensor über die Temperaturänderung detektiert wird. Bei einem endothermen Prozess, wie zum Beispiel beim Schmelzen, nimmt die Probe Wärme auf, wodurch der Wärmefluss zur Probe größer wird. Dies wird als Spalte im DSC-Diagramm dargestellt. Im Gegensatz

dazu gibt die Probe bei einem exothermen Prozess, wie zum Beispiel Kristallisation, Wärme ab, wodurch der Wärmefluss zur Probe kleiner wird, was ebenfalls als Signal im Diagramm sichtbar ist. Das Ergebnis eines DSC-Experiments ist eine kalorimetrische Kurve, die den Wärmefluss als Funktion der Temperatur oder der Zeit aufzeigt. Charakteristische Merkmale dieser Kurve wie Peaks oder Stufen geben Aufschluss über thermische Ereignisse und Übergänge in der Probe. Das Integral der Fläche gibt die Änderung der Enthalpie (ΔH) des Prozesses an. Hierüber können Informationen über thermodynamische Eigenschaften wie die Wärmekapazität der Probe berechnet werden.

Um mittels DSC die spezifische Wärmekapazität einer Probe zu bestimmen, kann die Cp-Vergleichsmethode, oder auch „Saphir-Methode“ genannt, angewendet werden.

Hierzu werden Messungen mit demselben Temperaturprogramm, sowie Geräteeinstellung durchgeführt. Zu Beginn wird eine Leermessung durchgeführt, bei der zwei leere Aluminiumtiegel gegeneinander vermessen werden. Damit kann eine Basislinie der DSC bestimmt werden, welche bei den folgenden Messungen mit einbezogen werden kann. Als zweites wird eine Saphir-Referenz gemessen, da diese einen bekannten Wärmekapazitätsverlauf hat, der in der Auswertungssoftware als Referenz hinterlegt ist. Zuletzt wird die Probe mit unbekannter Wärmekapazität nach gleicher Methode vermessen. Anhand des Wärmeflusses in Abhängigkeit zur Temperatur kann in einem rechnerischen Vergleich zwischen den Messsignalen der Saphir-Referenz und der Probe nun die spezifische Wärmekapazität berechnet werden. Diese Berechnung und Datenanalyse wurde über eine automatische Auswertung mit Hilfe der Software Netzscht Porteus durchgeführt.

4 Ergebnisse und Diskussion

4.1 Beispielberechnung eines PCF anhand eines Klebebandes

Der PCF ist die in der Industrie und auch in der Gesellschaft gebräuchliche Kennzahl zur Abschätzung der Nachhaltigkeit einer Produktion und dessen Produkte. Er schafft objektive Bewertungen und ermöglicht eine vergleichbare Betrachtung der Nachhaltigkeit eines Produktes. Der PCF soll im Folgenden anhand des Beispiels eines Klebebandes untersucht werden.

Entsprechend der beschriebenen Berechnungsmethode in Kapitel 3.4.1 wird hier im Folgenden beispielhaft eine Berechnung für ein Klebeband durchgeführt und das Vorgehen anhand reeller Produktions- und Rohstoffdaten berechnet und erklärt. Entgegen der gängigen Praxis wird der PCF hier sehr detailliert betrachtet, um die einzelnen Einflussfaktoren sauber herauszuarbeiten und Optimierungsoptionen entlang der Herstellungskette darzustellen.

Um den Einfluss der einzelnen Rohstoffe deutlich darzustellen, wird ein Klebeband beispielhaft herangezogen. Ein Klebeband besteht grundlegend aus einem Träger und einem darauf befindenden Klebstoff sowie einer Papierhülse, auf die es gewickelt ist. Anhand dieses Realbeispiels können Rohstoffeinflüsse dargestellt werden.

In dem betrachteten Unternehmen hat sich daher das Kabelwickelklebeband 8572 als geeignet herausgestellt. Ein Vorteil ist, dass sowohl eine Variante mit rezykliertem Trägermaterial als auch mit Virgin-Trägermaterial produziert wird. Das vergleichsweise betrachtete Kabelwickelband 8972 weist den gleichen technischen Aufbau auf und folgt demselben Produktions- und Konfektionierungsweg wie das 8572. Der einzige Unterschied im Aufbau der beiden Klebebänder ist, dass das Trägermaterial anstatt aus Virgin-PET aus Recycled-PET hergestellt wurde. Daher ist dieser Modellvergleich der technisch ähnlichen Klebebänder sehr gut geeignet, den Einfluss einer Rohstoffsubstitution auf den PCF darzustellen.

Bei dem Kabelwickelband 8572 handelt es sich um ein Klebeband mit einem globalen Handelsvolumen von etwas mehr als 4.000.000 m² im Jahr 2023 und damit zählt es zu den meistverkauften Klebebändern des betrachteten Unternehmens. So können belastbare Produktionsdaten sowie Informationen über Rohstoffe erhalten werden.

Beginnend werden über die vorliegende Stückliste des zu berechnenden Produktes die einfließenden Rohstoffe und deren Menge, bezogen auf die deklarierte Einheit, herausgearbeitet. Das 8572 und 8972 sind vom grundlegenden Aufbau des Klebbandes und der Produktionsschritte sowie der Verarbeitung sehr ähnlich und damit gut vergleichbar. Beide sind mit einem

schwarzen Virgin-PET-Nähvlies ausgestattet und weisen ein Flächengewicht von 180 g/m² auf. Als Klebstoff wird ein Synthesekautschuk-Hotmelt mit einem Auftragsgewicht von 160 g/m² verwendet.

Die entsprechenden CO_{2e}-Werte der eingesetzten Rohstoffe wurden bei den jeweiligen Lieferanten angefragt und auf Plausibilität geprüft. Die Plausibilitätsprüfung findet durch einen Vergleich mit Daten anderer Lieferanten oder den bereits erwähnten kommerziellen beziehungsweise freiverfügbaren Datenbanken statt. In den folgenden Tabelle 1 und Tabelle 2 sind vereinfachte Stücklisten mit den entsprechenden CO_{2e}-Werten der beschriebenen Rohstoffe sowie Auszüge der Berechnung für die einzelnen Bestandteile des fertigen Produktes aufgelistet.

Synthesekautschuk-Kleber

	CO _{2e} -Werte	Anteil
Füllstoffe	0,062 kgCO _{2e} /kg	15%
Harz	2,60 kgCO _{2e} /kg	35%
Polymer	4,50 kgCO _{2e} /kg	50%
Summe (gewichtet)	3,17 kgCO_{2e}/kg	100%

Tabelle 1: Auflistung der vereinfachten Klebstoffrezeptur und dessen CO₂-Werte.

Rohstoffrolle 180 g Nähvlies

	CO _{2e} -Werte
V-Faser	1,94 kg CO _{2e} /kg
R-Faser	1,04 kg CO _{2e} /kg
V-Garn	1,94 kg CO _{2e} /kg
R-Garn	1,04 kg CO _{2e} /kg

Tabelle 2: Auflistung des Aufbaus des Trägermaterials und dessen CO₂-Werte.

Bei den betrachteten Klebebändern liegt das Verhältnis der Flächengewichte von Klebstoffauftrag (160 g/m²) zu Trägermaterial (180 g/m²) nah beieinander. Daher haben beide einen ähnlichen Einfluss auf den gesamten PCF. Eine Änderung von Virgin-PET auf rezykliertes PET allein bedingt daher eine theoretisch mögliche CO_{2e}-Ersparnis von ungefähr 27 % bezogen auf den gesamten Rohstoffeinsatz. Im reinen Vergleich der beiden Trägermaterialien wird bezogen auf das Virgin-PET 54 % der CO₂-Emissionen eingespart.

Dieses Beispiel verdeutlicht die Signifikanz, bereits verwendete Materialien, falls möglich, mit rezyklierten Materialien zu substituieren und damit den PCF deutlich zu verringern.

4.1.1 Produktionsprozess

Nachdem alle CO_{2e}-Werte der verwendeten Rohstoffe vorliegen, muss der gesamte Produktionsprozess des Kabelwickelklebebandes betrachtet und die entsprechenden Energieverbräuche bei der Produktion aufsummiert und in CO₂-Emissionen umgerechnet werden.

Der gesamte Produktionsprozess beinhaltet zwei übergeordnete Prozesse. Zu Beginn wird das entsprechende Trägermaterial in einer Beschichtungsanlage mit dem spezifizierten Klebstoff beschichtet. In der folgenden Abbildung 6 ist der Aufbau der Beschichtungsanlage inklusive der Nebenaggregate dargestellt.

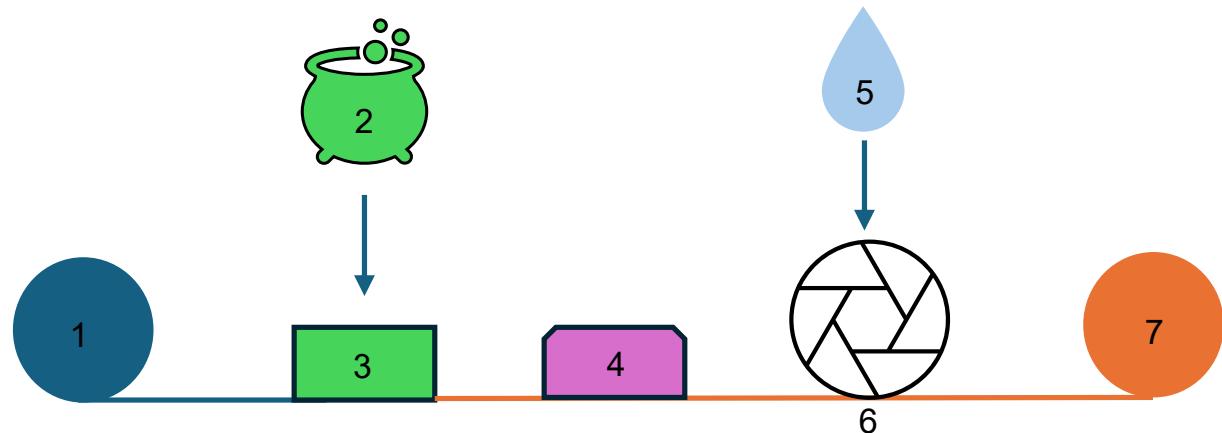


Abbildung 6: Schematische Darstellung einer Beschichtungsanlage. 1 Rohstoffrolle; 2 Klebstoffmischer; 3 Beschichtungskopf; 4 UV-Vernetzung; 5 Kühlcontainer; 6 Kühlwalze; 7 Mutterrolle.

Die Rohstoffrolle 1 wird in die Beschichtungsanlage eingelegt. Das Trägermaterial läuft dann auf vorgegebenen Bahnverläufen zuerst durch den Beschichtungskopf 3. Wurde mit einem UV-Acrylat Klebstoff beschichtet, durchläuft das Band die UV-Vernetzung 4. Wenn mit einem Synthesekautschukklebstoff beschichtet wurde, wird dieser Schritt übersprungen. Danach läuft das Band über eine bis zwei Kühlwalzen 6, abhängig von der notwendigen Kühlleistung. Zum Schluss wird das fertige Band als Mutterrolle 7 aufgewickelt und kann danach weiterverarbeitet werden. Die wichtigsten Nebenaggregate für den Beschichtungsprozess sind einmal der Klebstoffmischer 2, welcher den Klebstoff nach eingestellter Rezeptur bereitstellt. Falls

ein fertiger Klebstoff verwendet wird, kann anstelle des Mischers auch direkt ein Schmelzgerät angeschlossen werden. Das zweite wichtige Nebenaggregat ist der Kühlcontainer 4. Dieser ist für die allgemeine Kühlung der Anlage und besonders für den Betrieb der Kühlwalzen zuständig ist. Nicht aufgeführt ist eine Kompressorstation, welche Druckluft für den Maschinenbetrieb zentral bereitstellt.

Der zweite übergeordnete Prozess ist die Konfektionierung. Hier werden die großen beschichteten Rollen, genannt Mutterrollen, auf ihre spezifizierten Dimensionen gebracht und fertig verpackt. Dazu werden unterschiedliche Technologien angewendet, je nachdem, welches Material verarbeitet werden muss. In diesem Fall werden die Mutterrollen zuerst auf einer speziellen Maschine auf ihre spezifizierte Rollenlänge umgerollt und danach auf einer Schneidemaschine auf ihre spezifizierte Breite geschnitten. Anschließend werden die einzelnen Rollen in einer automatisierten Verpackungsanlage in Kartons verpackt. Die Beschichtungs- sowie die Konfektionierungsanlagen stehen zum Teil mit mehreren anderen Maschinen zusammen in einer Produktionshalle.

Bei der entsprechenden Produktion wird die benötigte Prozessenergie hauptsächlich durch Strom für den Anlagenbetrieb der beiden übergeordneten Prozesse, der Beschichtung und Konfektionierung, bereitgestellt. Zudem wird in den Prozessen zusätzlich Druckluft benötigt, welche zentral von strombetriebenen Kompressoren hergestellt wird und alle Anlagen bedient. Für diesen speziellen Beschichtungsprozess werden zwei Kühlwalzen in der Beschichtungsanlage benötigt, welche aus dem bereits erwähnten externen Kühlcontainer gespeist werden. Auch der Kühlcontainer nutzt Strom als Energiequelle. Einzig die Heizung der Produktionshallen benötigt Gas und bereitet die Wärme ebenfalls für alle Produktionshallen zentral zu.

Die Stromverbräuche wurden exemplarisch anhand eines repräsentativen Produktionsdurchlaufes des 8571 ermittelt. Dazu wurden die Zählerstände der Strommesseinrichtungen vor Start der Produktion und nach Ende der Produktion abgelesen und die Differenz gebildet. Der betrachtete Produktionslauf lief am 02.09.2022 von 8:53 Uhr bis 13:34 Uhr.

Zum übergeordneten Prozess der Beschichtung gehört neben der eigentlichen Beschichtungsanlage mit Auftragskopf und Motoren für den Antrieb der Anlage auch eine vorgeschaltete Klebstoffmischung und eine Klebstoffdosiereinheit. Eine Übersicht der Verbräuche der einzelnen Anlagenteile ist in folgender Tabelle 3 zu sehen.

Anlagenteil	Zählerstand–Start (kWh)	Zählerstand–Ende (kWh)
Klebstoffmischer	2227526	2227711
Beschichtungsanlage BPH	2623262	2623466
Klebstoffdosierung	504206	504249
Klebstoffmischung	66516	66581
Summe der Differenzen		497
Kühlwasseranlage		362,62
Gesamtsumme		859,62

Tabelle 3: Stromverbräuche des Beschichtungsprozesses.

Bei dem betrachteten Produktionslauf wurden an der Beschichtungsanlage, inklusive der externen Kühlwasseranlage, 859,62 kWh Strom verbraucht. Der Stromverbrauch wurde auf die produzierte Gesamtfläche des Auftrags von 28822,56 m² aufgeteilt. Damit ergibt sich ein Stromverbrauch von 0,0298 kWh/m².

Die Stromverbräuche der sonstigen passiven Bestandteile der Produktion, wie Computer, diverse handbetriebene elektrische Geräte sowie die Hallenbeleuchtung werden nicht betrachtet. Die handbetriebenen elektrischen Geräte werden zu Reparaturzwecken eingesetzt, sodass sie nicht für die Produktion direkt notwendig sind. Ihr Verbrauch kann daher nicht zugeordnet werden. Die weiteren Verbräuche sind nicht eindeutig mit den Produktionsmengen in Zusammenhang zu bringen und zudem ist der Einfluss vernachlässigbar gering. Folgendes Rechenbeispiel soll diese These unterstützen. In der Produktionshalle der Beschichtungsanlage sind 129 LED-Lampen zur Beleuchtung der Produktionsumgebung angebracht. Jede dieser Lampen hat einen Verbrauch von 45 Watt pro Stunde. Zusätzlich sind 10 Computer zur Steuerung der Anlage sowie zur Bearbeitung diverser Aufgaben vorhanden, die jeweils 65 Watt pro Stunde verbrauchen. Insgesamt entsteht dadurch ein Verbrauch von 29,5 kWh für eine Produktionszeit von 4:34 Stunden, der im Vergleich zu dem Verbrauch des Beschichtungsprozesses mit einem Verbrauch von 859,62 kWh vernachlässigbar ist.

Wie bereits erwähnt, wird die benötigte Druckluft für die Beschichtung zentral in einer Kompressorstation zubereitet. Dadurch konnten die Druckluftverbräuche nicht direkt mit einer speziellen Anlage korreliert werden. Daher wurden zur Verbrauchsbestimmung Messgeräte zur Durchflussmessung an allen Druckluftzugängen der gesamten Beschichtungsanlage installiert. Die kontinuierliche Druckluftmessungen zeichnet den Druckluftverbrauch in Kubikmetern auf, sodass der angegebene Verbrauch in m³ über einen Datenbankwert in CO_{2e} umgerechnet werden kann. Die Druckluftverbräuche sind in folgender Tabelle 4 aufgelistet.

Druckluftverbrauch Produktionsprozess 8572			
Produktionslauf 1	132,36 kWh	10501 lfm	0,0126 kWh/lfm
Produktionslauf 2	262,86 kWh	16349 lfm	0,0161 kWh/lfm
Produktionslauf 3	207,96 kWh	19075 lfm	0,0109 kWh/lfm
Mittelwert			0,0131 kWh/lfm

Tabelle 4: Druckluftverbräuche während des Beschichtungsprozesses.

Ein weiterer betrachteter Faktor ist der Heizungsverbrauch der Produktionshallen, die für den Prozess relevant sind. Die Heizungsanlage wird zentral betrieben und speist mehrere Produktionshallen. Um die Verbräuche der Heizung auf eine spezifische Anlage zurückzuführen, kann über den Flächenanteil der Maschine ein Anteil der benötigten Heizmenge errechnet werden.

Die Heizung in dem Gebäude der Konfektionierung versorgt insgesamt 27.273 m², darunter auch das Gebäude, in dem die Beschichtungsanlage steht. Davon belegt die Beschichtungsanlage einen Flächenanteil von 5 %. Trotzdem wird für die Berechnung die gesamte Fläche betrachtet, da unabhängig der sonstigen Auslastung für die Produktion die gesamte Halle beheizt werden muss. Die Konfektionierung befindet sich in einer Halle, welche die Einzelschritte der Umwicklung, des Schneidens und der Verpackung zusammenfasst. Der Konfektionierungsbereich hat damit einen Flächenanteil von 6,2 % an der Gesamtfläche.

Der Energieverbrauch der Heizung wurde im Mittel über zwei Jahre ermittelt und auf eine mittlere Heiztemperatur normiert.

2020: 3.500.000 kWh/a;

2021: 3.900.000 kWh/a

Der Mittelwert des Heizungsverbrauch liegt somit bei 3.700.000 kWh pro Jahr.

Um eine Korrelation zwischen Heizverbrauch und einem produzierten Produkt herzustellen, muss mit Vereinfachungen und Annäherungen gerechnet werden. Dazu wurde der Gasverbrauch der Heizung über die Maschinenlaufzeit während des Produktionsprozesses berechnet. Auf die anteilige Fläche wurden 41.4400 kWh/a verbraucht und somit wird umgerechnet ein Verbrauch von 47,31 kWh/h erhalten. Während der Produktionszeit von 4:34 Stunden wird somit ein Gasverbrauch von 223,28 kWh errechnet. In dem Produktionszeitraum wurde eine

Fläche von 28.822,56 m² beschichtet, sodass ein Gasverbrauch von 0,0077 kWh/m² erhalten wird.

Der Heizungsverbrauch ist ein saisonaler Einfluss in dem Produktionsprozess, da nur in den Wintermonaten geheizt wird. Um den PCF konform nach DIN EN ISO 14067 zu berechnen, müssen die gesamten Produktionsverbräuche eines Produktes über ein Jahr gemittelt werden, um grundlegend saisonale Einflüsse bei der Berechnung auszuschließen. Der Heizungsverbrauch wird somit auf die produzierte Gesamtmenge aller Produktionsläufe in einem Jahr umgelegt.

Rüstzeiten sowie Wartung und Maschinenstillstand können nicht exakt einem Produkt zugerechnet werden, sodass die dabei entstehenden Energieverbräuche beim PCF nicht betrachtet werden. Diese Verbräuche könnten mittels eines Durchschnittswertes auf die jeweiligen Produkte umgelegt werden, dies ist jedoch nach der zugrundeliegenden DIN EN ISO 14067 nicht erforderlich. Für diese wissenschaftliche Untersuchung ist eine solche Betrachtung ebenfalls nicht zielführend, da hier speziell ein Produkt betrachtet und die Einflussmöglichkeiten einer nachhaltigen Produktentwicklung herausgestellt werden sollen. Eine durchschnittliche Untersuchung der oben genannten Faktoren, würde die absoluten Emissionen realistischer darstellen, jedoch ist es hier nicht das Ziel.

In folgender Abbildung 7 sind alle Produktionsverbräuche in Relation zueinander dargestellt. Knapp über 50 % der Emissionen entstehen durch den direkten Stromverbrauch der Produktionsanlagen. Etwa 35 % entfallen auf die Herstellung der Druckluft und die restlichen 15 % auf die Emissionen der Heizung.

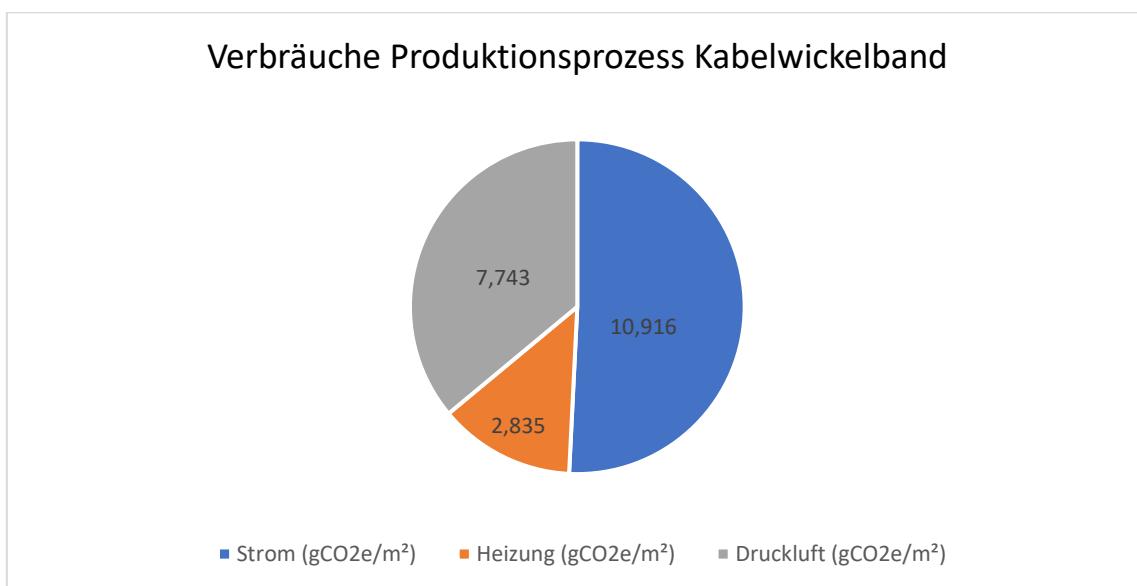


Abbildung 7: Übersicht der CO₂e der Produktionsverbräuche.

Nach DIN EN ISO 14067 ist der Emissionsfaktor für Ökostrom 0 kgCO_{2e}. Da das betrachtete Unternehmen vollständig zertifizierten Ökostrom für das gesamte Werk bezieht, sind die gesamten Stromverbräuche der Produktion mit dem Faktor 0 zu multiplizieren.

4.1.2 Transport

Als letzter Schritt wird der Transport der einzelnen Rohstoffkomponenten berechnet. Dazu wird die zurückgelegte Distanz der Rohstoffe vom Lagers des Lieferanten zu dem produzierenden Werk bestimmt. In diesem Beispiel werden die Anteile der Klebstoffkomponenten nach der Stückliste verrechnet. Diese werden auf die Einheit tkm umgerechnet, indem die zu transportierende Menge des Materials in der Einheit t mit der zurückgelegten Distanz vom Erzeuger bis zum Verarbeitungsort in der Einheit km multipliziert wird. Gleiches geschieht mit dem Trägermaterial. Anschließend wird der erhaltene Wert mit den entsprechenden CO_{2e}-Umrechnungsfaktoren für das jeweilig tatsächlich genutzte Transportmittel multipliziert. Beispielsweise kann dort zwischen einem Lastzug und einem Containerschiff, aber auch einem Binnenschiff, unterschieden werden.

In folgender Abbildung 8 ist eine solche Berechnung beispielhaft aufgeführt.

Transport	Standort	Transportmittel	Strecke (km)	t	tkm	kgCO _{2e}
Polymer	China	Schiff	19814	0,2315	4587,51	54,18
Antioxidant	Korea	Schiff	20384	0,0023	47,22	0,56
Prozessöl	Ludwigshafen	LKW	293	0,0093	2,71	0,14
Füllstoff	Köln	LKW	58	0,0699	4,05	0,20
Flüssigharz	Middelburg	LKW	241	0,0235	5,65	0,28
Polymer	Belgien	LKW	539	0,1627	97,48	4,89
PET-Gewebe	China	LKW	20048	0,5616	11258,96	132,97
						193,22 kgCO _{2e} /Auftrag
						0,062 kgCO _{2e} /m ²

Abbildung 8: Berechnung der Transportemissionen der verwendeten Rohstoffe.

4.1.3 Berechnung des gesamten PCFs

Zuletzt werden alle gesammelten und berechneten Emissionen, auf die Betrachtungseinheit normiert, zusammengerechnet. In diesem Beispiel wird daher für das Virgin-Kabelwickelband ein PCF von 1,072 kgCO₂e/m² erhalten, hingegen für das rezyklierte Kabelwickelband ein Wert von 0,79 kgCO₂e/m², wie in folgender Abbildung 9 zu erkennen.

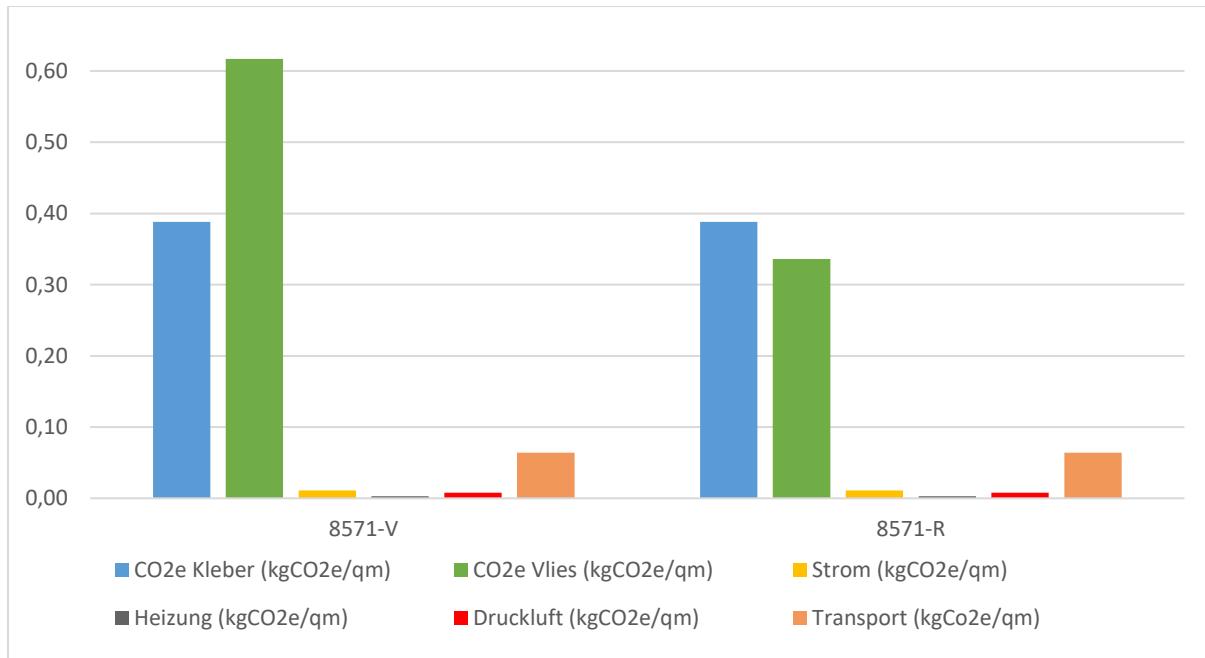


Abbildung 9: Gesamtübersicht der beiden PCF-Werte der Kabelwickelbänder.

Bei der Berechnung des PCF beeinflussen verschiedene Faktoren das Ergebnis. Ein tiefgehendes Verständnis dieser Einflussfaktoren ist entscheidend, um fundierte Entscheidungen zur Reduktion des CO₂-Fußabdrucks von Produkten treffen zu können. Die aufgezeigten Emissionstendenzen, die sich durch dieses Rechenbeispiel eines Kabelwickelklebebandes ergeben, sind grundlegend repräsentativ für alle Arten von Klebebändern, da sie typische Strukturen und Materialkombinationen abbilden. Dennoch ist zu berücksichtigen, dass sich bei anderen Klebebandtypen Unterschiede in der Zusammensetzung und dem Produktionsprozess ergeben können. So kann dies zu leichten Abweichungen der prozentualen Anteile sowie Verschiebungen der Emissionsschwerpunkte mehr auf Seiten der Trägermaterialien oder Klebstoffe führen. Solche Verschiebungen sind insbesondere abhängig vom jeweiligen Produktdesign, der Funktionalität des Klebebands sowie den eingesetzten Rohstoffen. Diese potenziellen Unterschiede verändern jedoch nicht die grundsätzlichen Aussagen und

Tendenzen, die aus der Analyse abgeleitet wurden, sondern stellen vielmehr produktspezifische Nuancierungen dar, die bei einer detaillierten CO₂-Bilanzierung berücksichtigt werden sollten.

Aus dem aufgezeigten Beispiel ist deutlich zu erkennen, dass die eingesetzten Rohstoffe den Großteil des PCFs ausmachen. Im Vergleich der nahezu identischen Produkte ergibt sich der Gesamtrohstoffeinfluss bei dem Produkt mit Virgin-Trägermaterial von 92 % im Vergleich zu 89 % bei dem Produkt mit rezyklierten Träger. Im direkten Vergleich der Trägermaterialien ist eine Ersparnis von 55 % zu sehen. Somit ist zu erkennen, dass große CO₂-Einsparpotenziale in der Rohstoffauswahl liegen, welches besonders im Vergleich des Virgin-PET-Trägermaterials zum rezyklierten PET-Trägermaterial deutlich wird.

Der Einfluss der eigenen Produktionsemissionen, wie in obiger Abbildung 9 zu sehen, ist mit 2 % in der Gesamtbetrachtung des PCF sehr gering. Eine einfache Möglichkeit, die THG-Emissionen in der eigenen Produktion zu senken, ist die Verwendung von Ökostrom. Wie bereits erwähnt hat Ökostrom einen Emissionsfaktor von 0 kgCO₂e, sodass rechnerisch die Produktionsverbräuche, ausgenommen die Heizungsverbräuche, keinen Einfluss mehr auf den PCF haben. Eine Umstellung von gewöhnlichem Strom auf Ökostrom ist eine kostengünstige Option, eine sofortige Ersparnis von ungefähr 2 % des PCFs zu erhalten, ohne direkte Änderungen am Produkt oder der Produktion vornehmen zu müssen.

Der dritte Einflussbereich sind die Transportemissionen. Die Transporte der Rohstoffe von den jeweiligen Lieferanten zu dem Produktionsort machen mit einem Anteil von ungefähr 8 % des PCFs den zweitgrößten Anteil der Emissionen nach den Rohstoffen aus.

4.1.4 Prozess- und Produktoptimierung auf Basis von PCF- Berechnungen

Wie in Kapitel 4.1.3 dargestellt können die unterschiedlichen Emissionsfaktoren eines Produktes gut identifiziert und quantifiziert werden sowie die jeweiligen Einflussfaktoren voneinander abgegrenzt werden. Die Rohstoffe haben einen Anteil von ungefähr 90 % an den Emissionen. Der Vergleich zwischen dem Virgin-Trägermaterial zum rezyklierten Trägermaterial macht deutlich, dass eine Rohstoffsubstitution den PCF deutlich senken kann. Eine Substitution von Rohstoffen erfordert jedoch einen langwierigen und aufwändigen Qualifizierungsprozess, der diverse Abteilungen fordert. Der Prozess einer neuen Rohstoffauswahl bedingt eine aufwändige Suche von geeigneten Lieferanten und Rohstoffen als auch die Frage nach konstanter Qualität und Verfügbarkeit der neuen Rohstoffe. Bei einem Materialqualifizierungsprozess müssen diverse Tests der neuen Materialien, Auditierungen des Lieferanten sowie

Änderung oder Neuanlegungen der Produktspezifikationen durchgeführt werden. Ein grundlegendes Problem bei rezyklierten, aber besonders bei biobasierten Materialien, ist die Unsicherheit der Versorgungslage sowie die Konstanz der Rohstoffeigenschaften. Gerade in der Automobilindustrie sind Änderungen an einem bereits qualifizierten Produkt sehr kritisch, da neue Qualifizierungen des Produktes und der Produktion sowie Änderung der Produktspezifikation notwendig sind. Damit einher gehen hohe Entwicklungs- und Testkosten und möglicherweise höhere Rohstoffpreise, sodass eine Umstellung der Rohstoffe häufig kurzfristig einen finanziellen Nachteil sowie einen hohen Arbeitsaufwand mit sich bringt.

Die direkten Produktionsemissionen haben einen Anteil von 2 % am gesamten PCF. Den PCF über Energieeinsparungen durch Prozessoptimierung oder einer nachhaltigen Entwicklung der Produkte zu senken ist eine weitere Möglichkeit, die jedoch gesamtheitlich betrachtet wenig Einfluss nimmt. Jedoch ist dies der einzige Einflussbereich, der direkt beim Produzenten liegt. Gerade Prozessoptimierungen erfordern viel finanziellen Aufwand und bedingen gleichzeitig viel Arbeitsaufwand der Prozessingenieure, der Produktion und der Entwicklungsabteilung. Weiterhin ist, wie in Kapitel 4.1.3 beschrieben, der Einfluss der Emissionen aus Stromverbräuchen bei Nutzung von Ökostrom gleich Null zu setzen. Da die rechnerische Möglichkeit besteht, über einen Zertifikatskauf die Emissionen zu senken, ist eine Investition in Prozessoptimierungen aus Sicht einer PCF-Reduktion nicht rentabel. Der Vergleich interner Strompreise des betrachtenden Unternehmens verdeutlicht dies nochmal. Der interne Verrechnungswert für den Ökostrom ist 25 ct/kWh im Vergleich zu 10 ct/kWh für den normalen Strommix. Absolut betrachtet entsteht in dem Fall des betrachtenden Unternehmens eine Preisdifferenz von ungefähr 30.000 € zwischen Ökostrom und normalem Strom für eine beispielhafte Verbrauchsberechnung.

Die Transportemissionen haben mit einem Anteil von 8 % den zweitgrößten Einfluss auf den PCF. Grundlegende Einsparungen der Transportemissionen können durch den Wechsel auf örtlich nah gelegene Lieferanten erreicht werden. Weiterhin können effiziente Rohstofflieferungen mit kleinem Verpackungsvolumen den PCF verringern, da somit mehr Rohstoff oder Produkt in einer Ladung transportiert werden kann. Diese theoretischen Überlegungen sind jedoch in der Praxis schwierig umzusetzen. Besonders Rohstoffe wie technische Textilien und Chemikalien, wie Klebstoffe und deren Bestandteile, werden nur an wenigen Standorten gefertigt. Selbst wenn potenzielle Rohstoffe auch bei anderen Lieferanten in näherer räumlicher Umgebung vorhanden sind, ist eine Requalifizierung aufwändig und zum Teil nicht möglich. Dieser erhebliche Aufwand steht nicht in Relation zu der möglichen CO₂-Ersparnis. Werden jedoch sowieso neue Materialien gesucht, kann eine Standorthähe zukünftig Teil der Bewertungskriterien werden.

4.1.5 Schlussfolgerung

Der PCF hat sich industrieübergreifend als zentrale Kennzahl zur Bewertung der ökologischen Nachhaltigkeit von Produkten etabliert. Trotz seiner einseitigen Fokussierung auf CO₂-Emissionen bietet er eine wichtige Grundlage für die Identifikation und Umsetzung von Maßnahmen zur Emissionsreduktion der eigenen Produktion und entlang der Lieferkette. Auch wenn bei den hier betrachteten Produkten die großen Emissionsquellen bei den Rohstoffen und dessen Transport liegen, kann ein Unternehmen nur direkten Einfluss auf die eigene Produktzusammensetzung und dessen Produktion nehmen. Eine Limitierung des PCFs stellt sich beispielsweise durch die in Kapitel 4.1.4 beschriebene Reduktion der Stromemissionen durch Einkauf von Ökostrom dar. Nach dieser Logik würden sich keinerlei Optimierungen der Produktion und dessen Abläufe lohnen, da sie keine Verbesserung des PCF bringen würde. Unabhängig von dem PCF als Kennzahl würde eine energieeffizientere Produktion Stromkosten sparen sowie das Stromnetz in Summe entlasten. Somit sind weitere Optimierung der Produkte, der Produktion und der Abfallentsorgung nicht nur für ökologische Einsparungen, sondern auch für ökonomische Einsparungen sinnvoll. Eine Stromeinsparung im Produktionsprozess mindert Stromkosten, sodass mehr Marge an dem produzierten Produkt entsteht, reelle Emissionen gleichzeitig eingespart und Ressourcen allgemein geschont werden.

Die Integration ökologischer und ökonomischer Nachhaltigkeitsaspekte in die Produktentwicklung und Unternehmensstrategien ist entscheidend, um langfristig eine nachhaltige Entwicklung zu gewährleisten.

4.2 Klebstoffvergleich

In Kapitel 4.1 wurde eine Betrachtung eines Produktes nach dem Muster einer PCF-Berechnung anhand einer Klebebandproduktion entwickelt. Daraus wurde klar, dass der Beitrag des produzierenden Unternehmens an dem gesamten PCF nur aus den Energieverbräuchen der Produktion kommt. Da dieser Einfluss gesamtheitlich betrachtet sehr gering ist, kann bereits im frühen Entwicklungsstadium Einfluss auf das Produktdesign genommen werden, um es möglichst nachhaltig zu gestalten. Bisher sind für ökologisches Produktdesign wenige Erkenntnisse vorhanden und es existieren keine direkten Hilfestellungen für eine nachhaltige Produktentwicklung.

Da in dem betrachteten Unternehmen die Beschichtung von Klebebändern eine große Rolle spielt und dies einen bedeutenden Einfluss auf die CO₂-Bilanz der betrachteten Produktion hat, soll im Folgenden die Effizienz, der bereits am Markt üblichen Klebstoffsysteme untersucht werden. Hierzu soll beleuchtet werden, welche der gängigen Klebstoffsysteme aus Sicht der ökologischen und ökonomischen Nachhaltigkeit sowie ihrer Performance insgesamt vorteilhaft sind.

Um eine Handlungsempfehlung geben zu können, wohin die Entwicklung der Klebstoffe in den nächsten Jahren getrieben werden soll, werden die aktuell relevanten Varianten der Klebstoffsysteme untersucht. Klebstoffe werden zum Teil als bereits fertiges System eingekauft, sodass die einzelnen Bestandteile zum Teil unbekannt sind. Hierzu muss eine experimentelle Methode erarbeitet werden, um eine Abschätzung der Energieeffizienz bei der Produktion vornehmen zu können. Um eine fundierte und komplette Beurteilung der Klebstoffe zu ermöglichen, werden weiterhin sowohl Definitionen als auch Unterschiede und Gemeinsamkeiten dieser Systeme beschrieben und betrachtet.

Bei den ersten breit eingesetzten Klebstoffen wurde typischerweise der Klebstoff, welcher hauptsächlich aus Polymeren und Harzen besteht, in organischen Lösungsmitteln, wie Toluol, Aceton oder Ethylacetat gelöst und dadurch die Viskosität des Klebstoffes für die Applikation verringert, sodass eine gute Benetzung sowie eine einfache Handhabung in der Applikation ermöglicht wird. Durch Abdampfen des Lösungsmittels härtet der Klebstoff aus. Aufgrund der dabei entweichenden flüchtigen organischen Bestandteile (VOCs) birgt der Umgang mit Lösungsmittelklebern potenzielle Gesundheitsrisiken, sodass geeignete Schutzmaßnahmen und Produktionsbedingungen eingehalten werden müssen. Neben den direkten Belastungen der Arbeiter entstehen ökologische Nachteile durch austretendes VOC. VOCs beeinträchtigen die Luftqualität und fördern den Treibhauseffekt. Um diese Probleme einzudämmen, sind diverse Schutzmaßnahmen, wie beispielsweise gut belüftete Arbeitsbereiche sowie persönliche

Schutzausrüstung bei der Handhabung und Produktion solcher Klebstoffe notwendig. Um die Umwelteinflüsse durch die entweichenden VOCs zu verringern, die gerade bei der industriellen Applikation eines Lösungsmittelklebstoffes entstehen, werden leistungsstarke Absauganlagen mit mehrfachen Filtersystemen eingesetzt, die große Mengen des abgedampften Lösungsmittels auffangen. Das aufgefangene Lösungsmittel wird dann in einer sogenannten Lösungsmittelrückgewinnungsanlage gesammelt. Ein solches Auffangen des Lösungsmittels ist aufwändig und wird mit Hilfe von EX-geschützten Absauganlagen gewährleistet. Das darin gesammelte Kondensat ist meist verunreinigt und besteht aus einer Mischung von unterschiedlichen Lösungsmitteln. Daher wird das Lösungsmittel meist in Blockheizkraftwerken verbrannt, um Energie für den Produktionsprozess zurückzugewinnen. Eine erneute Nutzung des Lösungsmittels ist aufgrund der Mischung verschiedenster Lösungsmittel meist nicht wirtschaftlich. Die Verwendung von Lösungsmittelklebstoffen beschränkt sich heutzutage hauptsächlich auf Anwendungen, die besondere Eigenschaften an den Klebstoff voraussetzen. Besonders ihre Chemikalien- und UV-Beständigkeit sowie ihre gute Resistenz gegen Wasser machen sie für maritime Anwendungen und in der Luft- und Raumfahrtindustrie unverzichtbar.

Für Lösungsmittelklebstoffe wurden aufgrund ihrer beschriebenen Umweltbelastung durch die notwendigen organischen Lösungsmittel Alternativen gesucht. Eine schnelle Lösung dazu war, die organischen Lösungsmittel durch Wasser zu ersetzen und den Klebstoff darin zu emulgieren, anstatt ihn zu lösen. Die entstandenen wässrigen Systeme, sogenannte Dispersionsklebstoffe haben daraufhin die Lösungsmittelklebstoffe weitestgehend ersetzt. Bei Dispersionsklebstoffen werden die Polymere mit Hilfe von Dispergiermitteln in Wasser stabilisiert und gleichmäßig verteilt. Sie sorgen für eine stabile Emulsion und verhindern ein Verklumpen des Klebstoffes. Wie auch bei den organischen Lösungsmittelklebstoffen muss das Wasser nach der Beschichtung entfernt werden, sodass der Kleber trocknet und seine Hafteigenschaften ausbildet. Diese Technologie wird als umweltfreundlicher angesehen, da Wasser im Gegensatz zu organischen Lösungsmitteln eingesetzt wird. Ihre Verarbeitung erfordert jedoch längere Trocknungszeiten und spezielle Trocknungsanlagen. Das abgedampfte Wasser ist nach der Verwendung verschmutzt und muss in Kläranlagen aufbereitet werden.

Beide Systeme haben den Nachteil, dass die Flüssigkeit im Rohstoff immer mittransportiert und entfernt werden muss. Der Feststoffanteil bei solchen Klebstoffen liegt typischerweise im Bereich von 40-70 %. Dies würde, je nach Ansatz und Rezeptur, ungefähr 40-70 % höhere CO_{2e}-Emissionen des Transportes bedingen.

Mittlerweile werden oftmals sogenannte 100 %-Klebstoffsysteme verwendet. Das sind Schmelzklebstoffe, auf Englisch Hotmelt, die in der Beschichtung ohne jegliches Lösungsmittel auskommen. Bei den Kautschuk-Hotmelt-Klebstoffen werden die einzelnen Bestandteile, wie Polymer, Harz und Füllstoffe, in einem Extruder gemischt und erhitzt, sodass eine

homogene zähflüssige Masse entsteht. Diese Klebstoffmasse wird dann als fertiger Klebstoff auf das Trägermaterial beschichtet. Der Hotmelt-Klebstoff erreicht seine gewünschten Klebe-eigenschaften nach dem Abkühlen. Eine Weiterentwicklung der Kautschuk-Hotmelts sind die UV-Acrylat Hotmelts. Diese sind Prä-Polymeren aus vorvernetztem Material, das erhitzt und dann ebenfalls flüssig beschichtet wird. Nach der Beschichtung wird durch UV-Bestrahlung eine radikalische Nachpolymerisation des Klebstoffes angeregt, sodass der Klebstoff seine Hafteigenschaften ausbildet.

Die 100 %-Klebstoffsysteme bieten den Vorteil, dass kein Lösungsmittel nach der Beschichtung entfernt werden muss. Weiterhin muss kein Lösungsmittel im Rohstoff transportiert werden, somit ist auch der Transport effizienter. Die Beschichtung ist zudem präziser und weniger fehleranfällig im Vergleich zu den Flüssigsystemen.

4.2.1 Theoretische Überlegungen zur Berechnung der Wärmekapazität von Klebstoffsystemen

Für einen Vergleich auf Basis ökologischer Nachhaltigkeit, werden die in Kapitel 4.2 beschriebenen Klebstoffsysteme auf ihre Energieeffizienz untersucht. Der Energieaufwand bei den Beschichtungsprozessen eines Klebstoffes gibt Rückschlüsse darauf, wieviel Energie insgesamt bei der Produktion aufgewendet werden muss, sodass daraus indirekt Rückschlüsse auf den PCF gezogen werden können. Da ein erheblicher Anteil des Energieverbrauches während der Produktion an einer Hotmelt-Beschichtungsanlage aus dem Aufschmelzen und Abkühlen des Klebstoffes besteht, kann darauf der Großteil der Produktionsemissionen zurückgeführt werden. Bei der Klasse der Lösungsmittel- und Dispersionsklebstoffe entfällt das Aufschmelzen, jedoch ist das Abdampfen der jeweiligen Flüssigkeit ein energiereicher Prozess.

Um solche nachhaltigen Überlegungen in die Entwicklung von Klebstoffen sowie eine energieeffizientere Produktion zu ermöglichen, sollten Informationen über die Energieeffizienz der Rohstoffe möglichst früh in den Entwicklungsprozess integriert werden. Da die Beschichtungsprozesse, wie oben beschrieben, den größten Energieeinfluss in dem Produktionsprozess haben, muss der benötigte Energieaufwand dafür bestimmt werden. Problematisch ist, dass häufig solche produktsspezifischen Verbrauchsdaten aus der Produktion nicht oder nur unzureichend vorliegen. Besonders für Firmen ohne Prozessanalytik ist eine solche Bewertung daher nicht möglich. Für einen solchen Fall soll eine Handlungsempfehlung entwickelt

werden, die schnell und einfach Rückschlüsse auf eine ökonomische und gleichzeitig ökologische Bewertung der Produkte ermöglicht. Dazu soll entlang der PCF-Betrachtung eine Bandbreite von Handlungsempfehlungen erarbeitet werden.

Eine Indikation über den notwendigen Energieaufwand bei den Produktionsprozessen gibt die spezifische Wärmekapazität der Klebstoffsysteme sowie je nach Art des Klebstoffes auch die Schmelzenthalpie. Die spezifische Wärmekapazität eines Materials gibt an, wie viel Wärmeenergie benötigt wird, um die Temperatur einer definierten Masse des Materials um eine bestimmte Temperatur zu erhöhen. Sie wird in Joule pro Gramm Kelvin ($J/g^{\circ}K$) angegeben. Für komplexe Materialien wie Klebstoffsysteme, die aus einer Mischung verschiedener Bestandteile bestehen, wird die spezifische Wärmekapazität als gewichteter Mittelwert der spezifischen Wärmekapazitäten der einzelnen Bestandteile abgeschätzt.

Zunächst werden hierzu theoretische Berechnungen angestellt, um die spezifische Wärmekapazität der Klebstoffsysteme zu bestimmen. So ist eine Abschätzung der Energieeffizienz vorab möglich, ohne aufwändige Laborversuche durchzuführen. Daher kann eine solche Berechnung bereits zu Beginn einer Klebstoffentwicklung verwendet werden, um die Entwicklung dahingehend zu steuern. Dies spart Labor- oder Produktionsversuche, die großen ökonomischen und ökologischen Aufwand bedeuten.

4.2.1.1 Berechnung der Wärmekapazität eines Synthesekautschuk-Hotmelt-Klebers

Angelehnt an die Rezeptur des bereits beschriebenen Synthesekautschukklebstoffes, besteht ein solcher Hotmelt-Kleber aus ungefähr 50 % SIS-Polymer (Styrene-Isoprene-Styrene Polymer), ungefähr 35 % Festharz (aliphatisches Petroleum- oder Kohlenwasserstoffharz) und ungefähr 15 % Füllstoffen, wie hier Calciumcarbonat. Da keine Literaturwerte für das Festharz gefunden werden konnten, wurde substituierend mit dem Wert des SIS-Polymers gerechnet.

Im Folgenden sind die spezifischen Wärmekapazitäten dieser Bestandteile aufgelistet.

- SIS Polymer: $2,44 \text{ J}/(\text{g}^{\circ}\text{K})^{43}$
- Festharz: $2,44 \text{ J}/(\text{g}^{\circ}\text{K})$
- Calciumcarbonat: $0,82 \text{ J}/(\text{g}^{\circ}\text{K})^{44}$

Die spezifische Wärmekapazität c_{gesamt} des Hotmelt-Klebers wird als gewichteter Mittelwert nach folgender Formel 1 berechnet:

$$(1) C_{\text{gesamt}} = w_1 \cdot c_1 + w_2 \cdot c_2 + w_3 \cdot c_3$$

Hierbei sind:

- $w_1 = 0,50$ (Massenanteil SIS Polymer)
- $w_2 = 0,35$ (Massenanteil Festharz)
- $w_3 = 0,15$ (Massenanteil Calciumcarbonat)
- $c_1 = 2,44 \text{ J/(g*K)}$
- $c_2 = 2,44 \text{ J/(g*K)}$
- $c_3 = 0,82 \text{ J/(g*K)}$

Diese Werte werden in Formel 1 eingesetzt und die spezifische Wärmekapazität berechnet.

$$c_{\text{gesamt}} = (0,50 * 2,44) + (0,35 * 2,44) + (0,15 * 0,82) = 2,20 \text{ J/(g*K)}$$

Nach dieser Berechnung beträgt die spezifische Wärmekapazität eines Synthesekautschuk-Hotmelt-Klebstoffes etwa 2,20 J/(g*K).

Für eine Masse des Klebers von $m = 1000 \text{ g}$ ergibt sich die spezifische Gesamtwärmekapazität (C) des Klebstoffes nach folgender Formel 2.

$$(2) C = c_{\text{gesamt}} * m$$

$$C = 2,20 \text{ J/(g*K)} * 1000 \text{ g} = 2200 \text{ J/K}$$

4.2.1.2 Berechnung der Wärmekapazität des UV-Acrylat-Hotmelt-Klebstoffes

Die Rezeptur eines verwendeten UV-Acrylat-Hotmelt-Klebstoffs besteht vollständig aus einem zugekauften UV-Acrylat Hotmelt, ohne Füllstoffe oder andere Additive. Die spezifische Wärmekapazität des UV-Acrylates liegt bei etwa $1,2 \text{ J}/(\text{g}^*\text{K})^{45}$. Die Rezeptur ist angelehnt an das BASF UV-Acrylat AcResin.

$$c_{\text{gesamt}} = 1,2 \text{ J}/(\text{g}^*\text{K})$$

Für eine Masse des Klebstoffes von $m = 1000 \text{ g}$ ergibt sich die spezifische Gesamtwärmekapazität C des Klebstoffs wieder nach Formel 2.

$$C = 1,2 \text{ J}/(\text{g}^*\text{K}) * 1000 \text{ g} = 1200 \text{ J/K}$$

4.2.2 Energieeinsatz pro Beschichtungsfläche

4.2.2.1 Berechnung Synthesekautschuk

Aus den errechneten Werten für die theoretische spezifische Wärmekapazität des Synthesekautschuk-Hotmelt-Klebers kann mit Hilfe des spezifizierten Auftragsgewichts von 125 g berechnet werden, wie viel Energie bei der Beschichtung theoretisch aufgewendet werden muss, wenn der Kleber auf seine Auftragstemperatur von $185 \text{ }^\circ\text{C}$ erhitzt werden soll. Die Wärmemenge berechnet sich nach folgender Formel 3.

$$(3) Q = m * c * \Delta T$$

Hierbei ist Q die benötigte Energie in Joule (J), m die Masse des Klebstoffes in Gramm (g), c die bereits berechnete spezifische Wärmekapazität in Joule pro Gramm und Kelvin ($\text{J}/(\text{g}^*\text{K})$) und ΔT die Temperaturänderung in Kelvin (K). Die Temperaturänderung des Klebstoffes wird von der Raumtemperatur $T_{\text{Start}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ zur Beschichtungstemperatur von $T_{\text{Ende}} = 185 \text{ }^\circ\text{C}$ berechnet, sodass eine Temperaturerhöhung von 165 K stattfindet.

In die Formel 3 werden somit die folgenden spezifischen Werte eingefügt und die benötigte Wärmemenge berechnet.

- m = 125 g (Masse des Synthesekautschuk-Hotmelt-Klebers)

- c = 2,20 J/(g*K) (spezifische Wärmekapazität des Synthesekautschuk-Hotmelt-Klebers)

$$Q = 125 \text{ g} * 2,20 \text{ J}/(\text{g}\cdot\text{K}) * 165 \text{ K} = 45375 \text{ J}$$

$$Q = 45,38 \text{ kJ}$$

Um eine reale Beschichtungsmenge des Synthesekautschuk-Hotmelt-Klebstoff von 125 g von der Ausgangstemperatur 20 °C auf eine Temperatur von 185 °C zu erhitzen, werden demnach rechnerisch 45,38 kJ an Energie benötigt. Vernachlässig hierbei wird die aufgewendete Energie bei Mischung des Klebstoffes, da der Extruder sowohl den Klebstoff mischt und dadurch direkt erwärmt.

4.2.2.2 Berechnung UV-Acrylat Hotmelt

Wie bereits für den Synthesekautschuk-Hotmelt-Klebstoff wird die benötigte Wärmemenge für einen reellen Beschichtungsprozess auch für den UV-Acrylat Hotmelt-Klebstoff berechnet. Aufgrund der anderen Klebstoffart und -technologie wird von dem UV-Acrylat weniger Klebstoffauftrag pro Quadratmeter im Vergleich zum Synthesekautschuk benötigt, um die spezifizierten Eigenschaften zu erreichen. Um die Energiemenge zu berechnen, die benötigt wird, um die spezifizierten 80 g Auftragsgewicht des UV-Acrylats von der Ausgangstemperatur 20 °C auf die Beschichtungstemperatur von 130 °C zu erhitzen, wird erneut Formel 3 zur Berechnung der Wärmemenge verwendet:

- m = 80 g (Masse des UV-Acrylats)

- c = 1,2 J/(g*K) (spezifische Wärmekapazität des UV-Acrylats)

- ΔT = 110 K

$$Q = 80 \text{ g} * 1,2 \text{ J}/(\text{g}\cdot\text{K}) * 110 \text{ K} = 10560 \text{ J}$$

$$Q = 10,56 \text{ kJ}$$

Um 80 g UV-Acrylat von der Ausgangstemperatur 20 °C auf eine Temperatur von 130 °C zu erhitzen, werden 10,56 kJ an Wärmeenergie benötigt. Ein weiterer entscheidender Faktor bei UV-Acrylaten ist die Vernetzung des Klebstoffes. Dies wird durch UV-Lampen gewährleistet, die mit einer definierten Strahlungsintensität von ungefähr 0,65 kJ/m² das beschichtete Klebeband bestrahlen.

4.2.2.3 Berechnung der Wärmekapazität des Dispersionsklebstoffes

Die gleiche Betrachtung wie bereits im Vergleich von Synthesekautschuk und UV-Acrylaten geschehen, wird ebenfalls mit den Dispersionsklebstoffen durchgeführt.

In diesem Beispiel wird die Wärmekapazität eines Dispersionsklebstoffs berechnet, der aus einem Feststoffanteil von 50 % und einem wässrigen Anteil von 50 % besteht. Der Feststoffanteil ist aus 70 % 2-Ethylhexylacrylat (2-EHA) und 30 % Butylacrylat zusammengesetzt.

Wasser besitzt laut Literatur eine spezifische Wärmekapazität von 4,22 J/(g*K)⁴⁶. Das 2-Ethylhexylacrylat (2-EHA) eine spezifische Wärmekapazität von 1,97 J/(g*K)⁴⁷ und das Butylacrylat von etwa 1,96 J/(g*K)⁴⁶.

Die spezifische Wärmekapazität des Feststoffanteils $c_{\text{Feststoff}}$ wird als gewichteter Mittelwert der spezifischen Wärmekapazitäten der beiden Bestandteile berechnet. Daraus ergibt sich ein gewichteter Wert von $c_{\text{Feststoff}} = 1,967 \text{ (J/g*K)}$.

Die Gesamtwärmekapazität c_{Gesamt} des Klebstoffsystems wird als gewichteter Mittelwert der spezifischen Wärmekapazitäten des Wassers und der Feststoffanteile berechnet:

$$c_{\text{Gesamt}} = (0,50 * 4,22) + (0,50 * 1,967) = 3,094 \text{ J/(g*K)}$$

Die spezifische Wärmekapazität des Dispersionsklebstoffs beträgt etwa 3,09 J/(g*K). Bei einer Masse von 1 kg hätte dieser Klebstoff eine Wärmekapazität von 3,09 kJ/K.

4.2.3 Energieeinsatz pro Beschichtungsfläche des Dispersionsklebers

Um die benötigte Energiemenge zu berechnen, die benötigt wird, um das Wasser aus dem Dispersionskleber durch Trocknung zu entfernen, muss die Energiemenge berechnet werden, die erforderlich ist, um das Wasser zu erhitzen und zu verdampfen. Ein typisches Auftragsgewicht für ein Klebeband mit Dispersionsklebstoff sind 38 g nasse Klebstoffbeschichtung. Nach der Trocknung verbleiben somit 19 g Klebstoff auf dem Trägermaterial.

Zunächst wird das Erhitzen des Klebstoffsystems berechnet. Dazu muss der Klebstoff von der Umgebungstemperatur auf die Siedetemperatur von Wasser erhitzt werden. Dabei wird angenommen, dass die Umgebungstemperatur 20 °C beträgt und die Siedetemperatur 100 °C. Daraus ergibt sich eine Temperaturänderung von 80 °C.

Die spezifische Wärmekapazität von Wasser ist 4,22 J/(g*K). Die Energie, die erforderlich ist, um das Wasser zu erhitzen, beträgt somit nach Formel 3.

$$Q_{\text{Heizen}} = 38 \text{ g} * 4,22 \text{ J/(g*K)} * 80 \text{ K} = 12828,8 \text{ J}$$

$$Q_{\text{Heizen}} = 12,83 \text{ kJ}$$

Um das Wasser zu verdampfen, muss die Verdampfungsenthalpie von Wasser überwunden werden, die etwa 2257 J/g⁴⁸ beträgt. Die Energie, die erforderlich ist, um das Wasser zu verdampfen, beträgt:

$$Q_{\text{Verdampfung}} = m * \Delta H_{\text{Verd}}$$

$$Q_{\text{Verdampfung}} = 19 \text{ g} * 2257 \text{ J/g} = 42883 \text{ J}$$

$$Q_{\text{Verdampfung}} = 42,88 \text{ kJ}$$

Die gesamte Energie, die benötigt wird, um das Wasser aus dem Dispersionskleber zu entfernen, ist die Summe der Heiz- und Verdampfungsenthalpie:

$$Q_{\text{Gesamt}} = Q_{\text{Verdampfung}} + Q_{\text{Heizen}}$$

$$Q_{\text{Gesamt}} = 12,83 \text{ kJ} + 42,88 \text{ kJ} = 55,71 \text{ kJ}$$

Die benötigte Gesamtenergie, um das Wasser aus einer Auftragsmenge von 38 g des Dispersionsklebers zu entfernen, beträgt demnach 55,71 kJ.

4.2.4 Bestimmung des Energiebedarfes bei der Produktion mittels DSC-Messungen

Eine theoretische Berechnung, wie in den vorangegangenen Kapiteln, ist eine schnelle Methode, um die Wärmekapazität eines Stoffes zu berechnen. Problematisch ist die Durchführung einer solchen Berechnungen jedoch bei neuartigen Klebstoffrezepturen und Entwicklungen von Lieferanten, deren Inhalt zum Teil unbekannt ist. Dort sind möglicherweise keine Datenbankwerte vorhanden und eine Auskunft von Lieferanten über die Wärmekapazität des Klebstoffes oder dessen Bestandteile ist unwahrscheinlich. Selbst bei bereits bekannten Inhaltsstoffen, wie der oben genannten Klebstoffe, waren zum Großteil nur substituierende Literaturwerte für die Wärmekapazität zu finden, da es eine untypische physikalische Aussage bei Polymeren ist und daher nicht im technischen Datenblatt oder allgemeinen Materialdatenbanken zu finden ist.

Um eine schnellere und spezifischere Abschätzung über den voraussichtlichen Energiebedarf eines Klebstoffes während des Produktionsprozesses treffen zu können, soll eine experimentelle Methode für die Bestimmung der Energieeinflüsse erarbeitet und vorgestellt werden.

Als ein Analyseverfahren im Labormaßstab bietet die DSC eine Option, empirische Aussagen über den Energiebedarf zur Applikation des Klebstoffes zu treffen und diese auf Basis der Ergebnisse vergleichbar zu machen. In der DSC werden Wärmekapazitäten sowie Schmelzenthalpien der Klebstoffe bestimmt. Bei den Klebstoffsystmen handelt es sich um komplexe Gemische, die erhitzt und abgekühlt werden und bei denen zum Teil Lösungsmittel abdestilliert werden muss. Dabei laufen diverse physikalische Prozesse wie beispielsweise Phasenübergänge, Schmelzprozesse der Klebstoffe oder ein Verdampfen des Lösungsmittels ab. Für diese Untersuchung ist unerheblich, welcher physikalische Prozess für den Energieaufwand verantwortlich ist, da hier der reale Beschichtungsprozess annähernd simuliert werden soll. Auch absolute Werte der Messungen sind für diese Betrachtung nicht relevant, sondern nur der relative Vergleich der benötigten Energiemenge zwischen den jeweiligen Klebstoffsystmen. Die theoretischen Hintergründe zu einer DSC-Messung wurden bereits in Kapitel 3.5 beschrieben.

Die Durchführung einer DSC-Messung zur Bestimmung der Wärmekapazität oder der Schmelzenthalpie eines Materials beginnt mit der Probenvorbereitung. Eine kleine Menge des zu untersuchenden Materials wird in einen Aluminiumtiegel gegeben und dieser verpresst,

sodass die Probe fest verschlossen wird. Wichtig hierbei ist, eine kleine Öffnung in den Deckel zu stanzen, sodass entstehende Gase entweichen und ein Druckausgleich stattfinden kann. Dies verhindert eine ungewollte Ruptur des Tiegels während der Messung. Parallel dazu wird ein leerer Referenziegel vorbereitet. Beide Tiegel werden gewogen, um die Masse der Tiegel sowie der Probe zu bestimmen. Danach werden die Tiegel in die Messzelle des DSC-Geräts eingesetzt und die Maschine auf ihre Ausgangstemperatur temperiert.

Das DSC-Gerät führt ein vorgegebenes Temperaturprogramm durch, bei dem die Temperatur der Messkammer zunächst mit einer konstanten Heizrate erhöht und anschließend kontrolliert gesenkt wird. Während dieses Prozesses erfassst das Gerät die Temperaturdifferenz zwischen dem Probentiegel und dem Referenziegel. Der resultierende, korrigierte Wärmestrom reflektiert die spezifischen thermischen Eigenschaften der Probe und wird in Abhängigkeit von der Temperatur aufgezeichnet.

4.2.4.1 Kalibrierung der DSC

Zur Kalibrierung der DSC wurde nach der beschriebenen Saphir-Methode Indium als Referenzmaterial aufgrund seines bekannten Schmelzpunktes und -enthalpie verwendet.⁴³

Für die Kalibrierung wurde eine Indiumreferenz eingewogen und anstelle des Probentiegels vermessen. Ein leerer Referenziegel aus Aluminium wurde parallel vorbereitet und gewogen. Die Referenz und der Tiegel wurden in die Messzellen des DSC-Geräts eingesetzt. Das Temperaturprogramm deckt den Temperaturbereich zwischen 140 °C und 160 °C ab, in dem Indium schmilzt. Während des gesamten Temperaturzyklus misst die DSC die Temperatur. Der Schmelzpunkt von Indium von 156,6 °C⁴⁹ erscheint im DSC-Diagramm als endothermer Peak, und laut Literatur beträgt die Schmelzwärme (ΔH_f) 28,45 J/g und die spezifische Wärmekapazität 0,233 J/g*K⁵⁰.

Die Schmelzenthalpie einer Probe kann über die Integralfläche der Indium-Referenz-Kalibrierung normiert werden. Für die Kalibriermessung wurde die Probe 10 Minuten bei 30 °C equilibriert und dann mit einer Aufheizrate von 10 K/min auf 180 °C erwärmt, danach bei gleicher Rate auf 30 °C abgekühlt und dann wieder auf 180 °C erwärmt. Hierzu wurde eine Indium-Referenz mit einem Gewicht von $m = 13,58$ mg verwendet. Es wurden drei Referenzmessungen aufgenommen. Ein Messergebnis ist beispielhaft in Abbildung 10 dargestellt.

Bei den drei Referenzmessungen ergaben sich folgende Ergebnisse für die Integralflächen der Messungen. Multipliziert mit dem Gewicht der Referenzprobe wird der thermische Fluss erhalten.

Messung	Integralfläche ($\mu\text{Vs}/\text{mg}$)	Thermischer Fluss (μVs)
Referenz 1	97,8	1328,124
Referenz 2	98,9	1343,062
Referenz 3	98,37	1335,8646
Mittelwert		1335,6835

Tabelle 5: Ergebnisse der DSC-Messungen der Indium Referenz.

Somit entspricht der durchschnittliche thermische Fluss von 1335,68 μVs einer Schmelzenthalpie von 28,5 J/g. Daraus wird der Umrechnungsfaktor für die Enthalpie von 21,34 mJ/g erhalten.

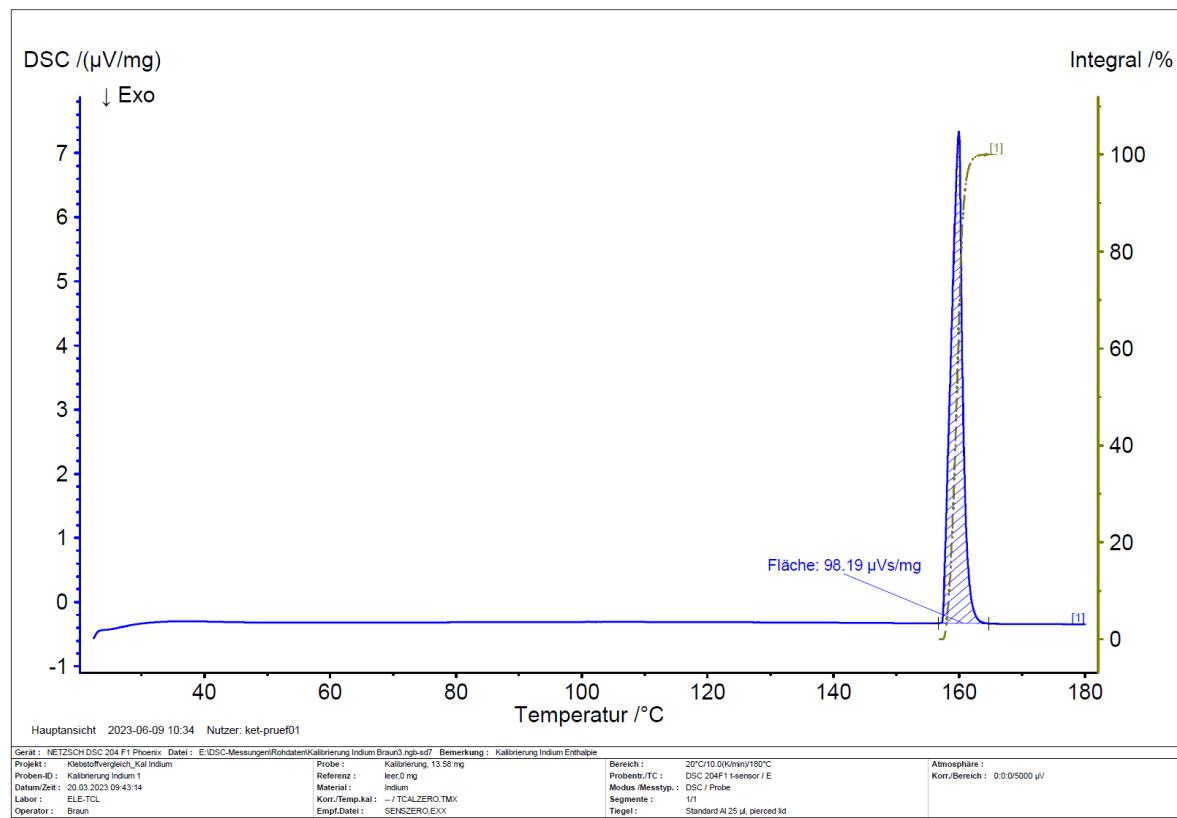


Abbildung 10: Auswertung der DSC-Messung der Indium Referenz.

4.2.4.2 Bestimmung des Wärmebedarfes des Aufheizprozesses

Nach gleicher Methode wie in Kapitel 4.2.4.1 beschrieben wurden die bereits theoretisch betrachteten Klebstoffsysteme in der DSC vermessen. Für die Bestimmung der Gesamtenthalpie des Aufheizprozesses des Synthesekautschuk-Hotmelts wurden drei DSC-Messungen durchgeführt. Als Probe wurde fertig gemischter Klebstoff aus der Produktion verwendet. Dazu wurde jeweils ein kleines Stück Klebstoff abgetrennt und auf einer Feinwaage gewogen. Die Probe wurde daraufhin in einen tarierten Aluminium-Tiegel gegeben und gegen einen leeren Referenzriegel in der DSC vermessen.

Die Messergebnisse, sowie der errechnete Mittelwert der Ergebnisse sind in folgender Tabelle 6 aufgeführt.

Messung	Integralfläche (μ Vs/mg)	Probengewicht (mg)	Thermischer Fluss (μ Vs)
HSK-1	570,9	17,45	10047,84
HSK-2	483,0	18,88	9.119,04
HSK-3	476,2	18,92	9.009,70
Mittelwert			9.392,19
Enthalpie (J/g)			200,40

Tabelle 6: Ergebnisse der DSC-Messungen des Synthesekautschuk-Hotmelts.

Multipliziert mit dem Umrechnungsfaktor für die Schmelzenthalpie der Indium-Referenz von 21,34 mJ/g, wurde für den Synthesekautschuk-Hotmelt eine gemittelte Gesamtenthalpie des Aufheizprozesses von 200,40 J/g errechnet.

Beispielhaft wird das Ergebnis einer DSC-Messung in folgender Abbildung 11 gezeigt.

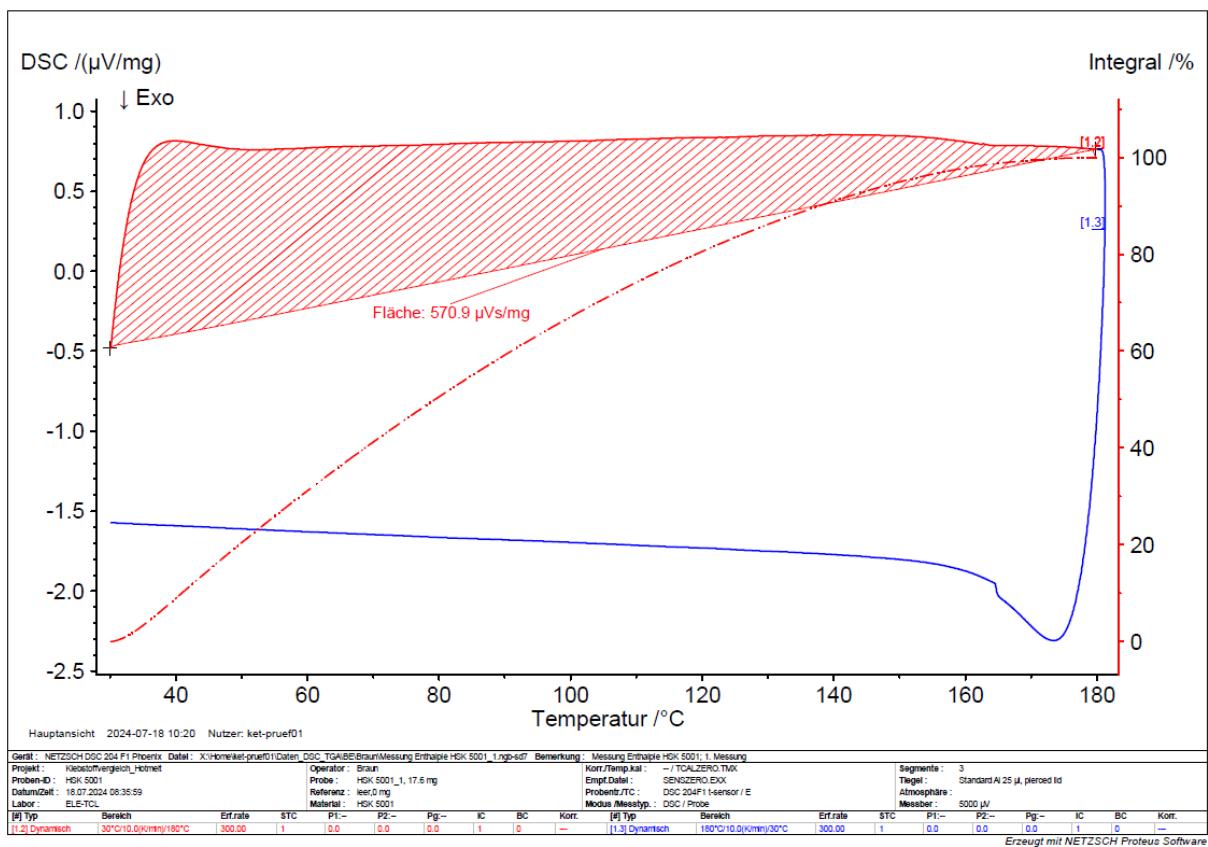


Abbildung 11: Auswertung der DSC-Messung des Synthesekautschuk-Hotmelts.

Die Gesamtenthalpie des Aufheizprozesses des UV-Acrylat-Hotmelts wurde ebenfalls als Dreifachbestimmung durchgeführt.

Die Messergebnisse und der errechnete Mittelwert der DSC-Messungen sind in folgender Tabelle 7 aufgeführt.

Messung	Integralfläche ($\mu\text{Vs}/\text{mg}$)	Probengewicht (mg)	Thermischer Fluss (μVs)
HSX-1	611,7	17,45	10.674,17
HSX-2	549,7	17,08	9338,88
HSX-3	516,9	17,33	8.957,88
Mittelwert			9.673,64
Enthalpie (J/g)			206,41

Tabelle 7: Ergebnisse der DSC-Messungen des UV-Acrylat Hotmelts.

Multipliziert mit dem Umrechnungsfaktor für die Schmelzenthalpie der Indium-Referenz von 21,34 mJ/g, wurde für das UV-Acrylat eine gemittelte Gesamtenthalpie des Aufheizprozesses von 206,41 J/g errechnet.

Beispielhaft wird das Ergebnis einer DSC-Messung in folgender Abbildung 12 gezeigt.

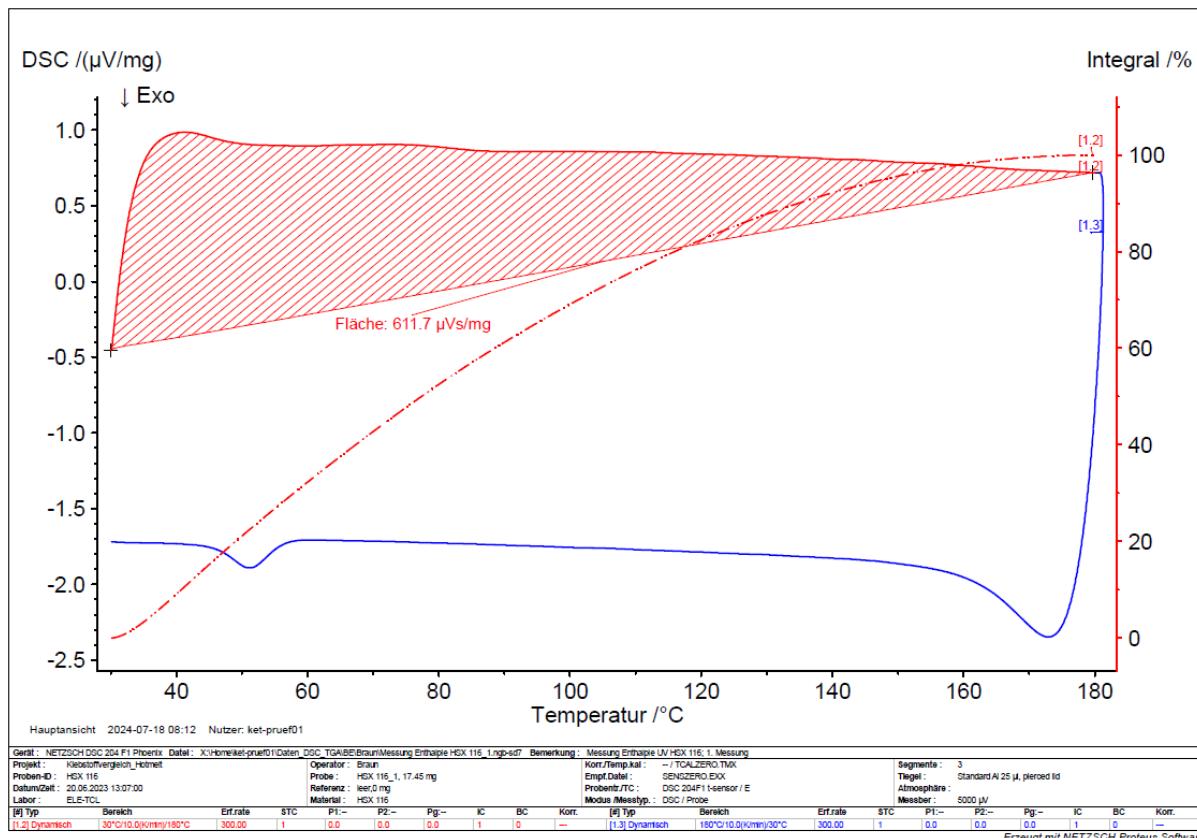


Abbildung 12: Auswertung der DSC-Messung des UV-Acrylat Hotmelts.

Zur Messung der Gesamtenthalpie des Aufheizprozesses des Dispersionsklebstoffes wurde die fertige Klebstoffmischung durch Rühren homogenisiert. Von der Mischung wurde ein Tropfen mit einer Nadel aufgenommen und dieser in einen tarierten Aluminiumtiegel eingefüllt.

Die Messergebnisse und der errechnete Mittelwert der DSC-Messungen sind in folgender Tabelle 7 aufgeführt.

Messung	Integralfläche (μ Vs/mg)	Probengewicht (mg)	Thermischer Fluss (μ Vs)
WD-4	2715	23,45	63666,75
WD-2	3725	12,99	48387,75
WD-3	3926	14,04	55121,04
Mittelwert			55725,18
Enthalpie (J/g)			1189,18

Tabelle 8: Ergebnisse der DSC-Messung des Dispersionsklebstoffes.

Multipliziert mit dem bestimmten Umrechnungsfaktor für die Schmelzenthalpie der Indium-Referenz von 21,34 mJ/g, wurde für den Dispersionsklebstoff eine gemittelte Gesamtenthalpie des Aufheizprozesses von 1.189,18 J/g berechnet.

Beispielhaft wird das Ergebnis einer DSC-Messung in folgender Abbildung 13 gezeigt.

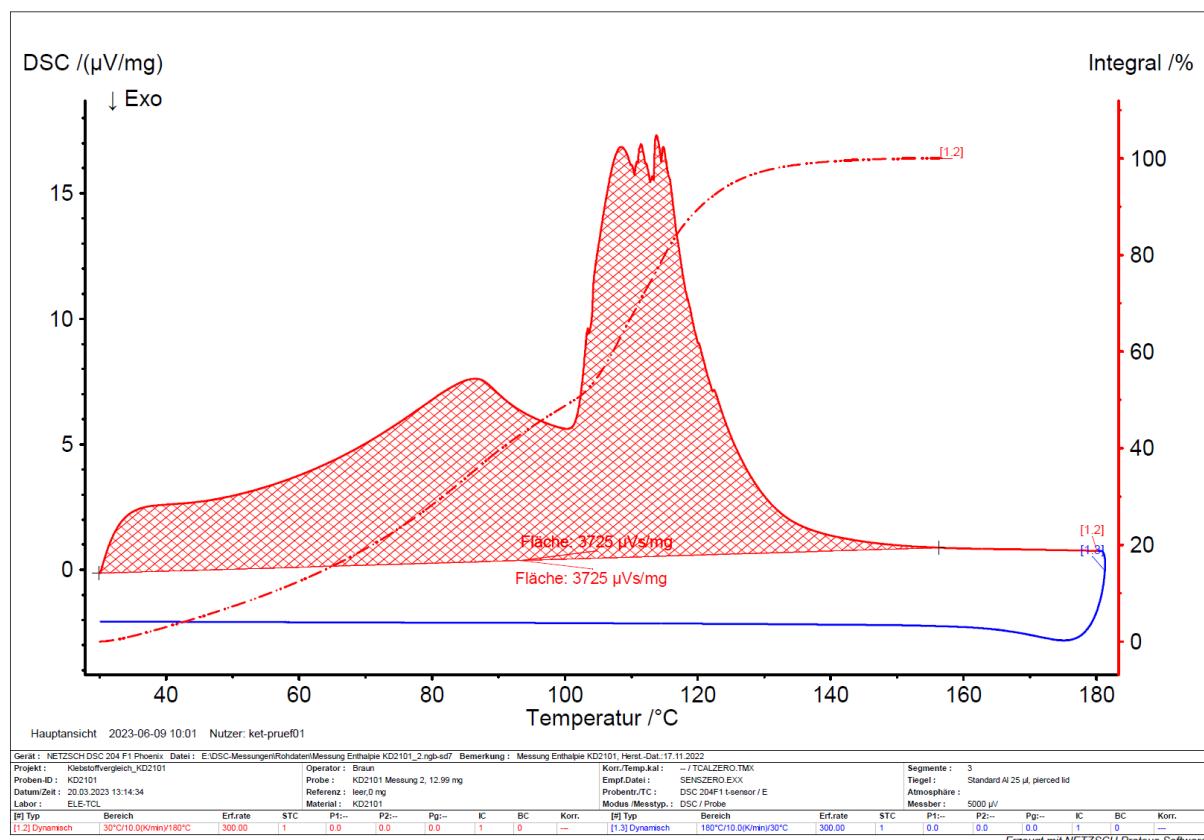


Abbildung 13: Auswertung der DSC-Messung des Dispersionsklebstoffes.

Im Vergleich der DSC-Diagramme der beiden Hotmelt-Systeme ist, wie zu erwarten, ein ähnliches Schmelzverhalten erkennbar. Beide Systeme schmelzen im Bereich von 30 °C bis 40 °C kontinuierlich auf und bleiben bis Ende des Temperaturprogrammes bei 180 °C flüssig, ohne weitere Veränderung der Aggregatzustände. Der Abkühlungsprozess läuft genau gegebenenfalls ab. Es ist eine konstante Abkühlung der Proben zu erkennen. Auffällig ist, dass die Abkühlungskurve der UV-Acrylate einen leichten Peak bei 50 °C aufweist, der anzeigt, dass die Probe wieder erstarrt. Da keine Lösungsmittel enthalten sind, sind keine Peaks in der Aufheizphase durch plötzliches Verdampfen von Lösungsmitteln zu sehen. In den Diagrammen des Dispersionsklebstoffes hingegen ist ein leichter Kurvenanstieg bis 90 °C zu erkennen. Danach sinkt die Kurve leicht, worauf ein senkrechter Peak bei ungefähr 100 °C zu sehen ist, der auf das Verdunsten des Wasseranteils in der Probe hinweist. Das Verdunsten des Wassers macht den Großteil der zur Beschichtung benötigten Energiemenge aus. In der Abkühlphase sind keine weiteren Peaks zu erkennen, da das Wasser bereits aus der Probe entwichen ist und somit nur die Erkaltung des Feststoffanteils zu beobachten ist. Die Abkühlphase zeigt eine ähnliche Charakteristik wie bei den beiden Hotmeltklebstoffen.

4.2.4.3 Wärmekapazität der Klebstoffsysteme

Wie in der Einleitung zum Kapitel 4.2.1 beschrieben, ist die spezifische Wärmekapazität eine wichtige Größe für die Darstellung des notwendigen Energieaufwandes während eines Beschichtungsprozesses. Dabei wird die Wärmekapazitätsmessung und Auswertung der Klebstoffsysteme wie in der Theorie in Kapitel 3.5 beschrieben. Die Probenvorbereitung verlief analog zu den beschriebenen Abläufen in Kapitel 4.2.4.2.

In Tabelle 9 sind Ergebnisse der Wärmekapazitätsmessung mittels Vergleichsmethoden-Auswertung dargestellt.

Messung	Wärmekapazität (J/g*K)
HSK-1	4,215
HSK-2	4,468
HSK-3	4,501
Mittelwert	4,39

Tabelle 9: Ergebnisse der Wärmekapazitätsmessung des Synthesekautschuk-Hotmelts.

Beispielhaft wird der Verlauf der Wärmekapazität über die Temperaturerhöhung des Synthesekautschuk-Klebstoffes in Abbildung 14 dargestellt.

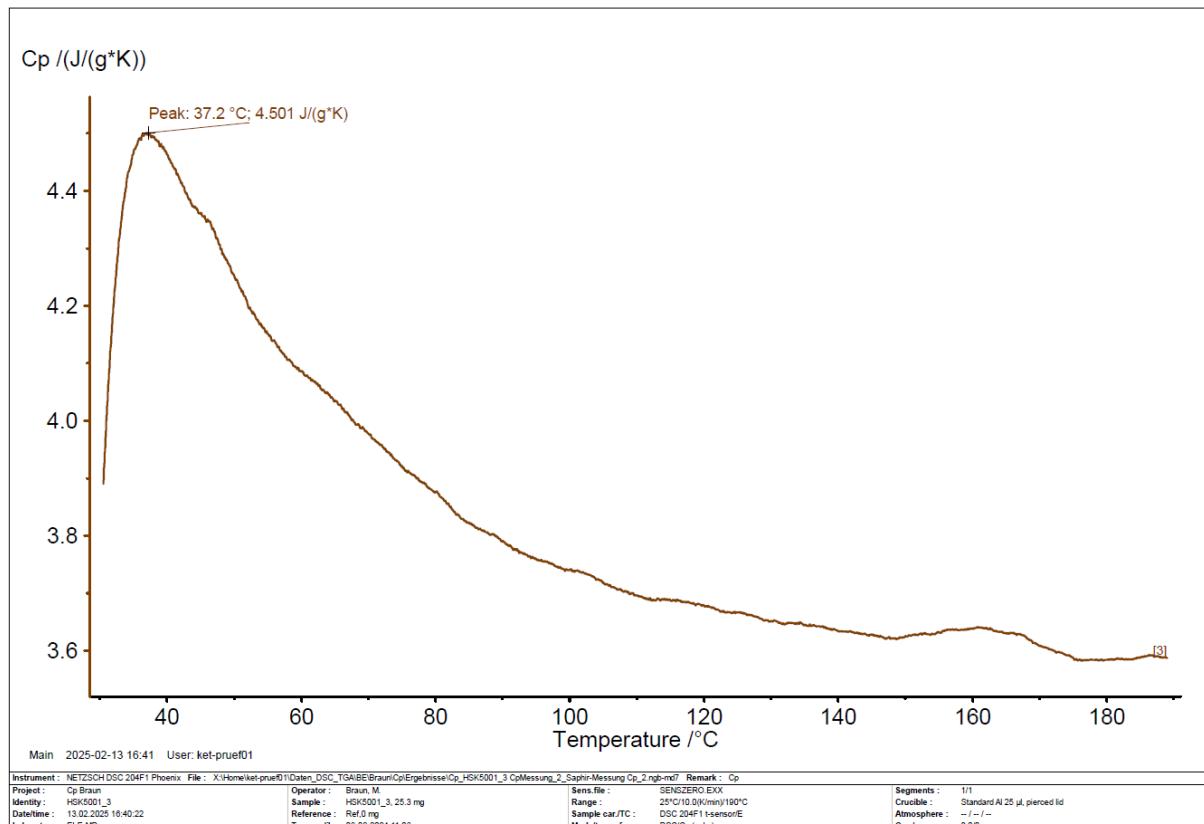


Abbildung 14: Auswertung der Wärmekapazitätsmessung des Synthesekautschuk-Hotmelts.

Wie beim Synthesekautschuk-Klebstoff beschrieben wurde auch für den UV-Acrylat-Klebstoff die spezifische Wärmekapazität bestimmt. In Tabelle 10 sind Ergebnisse der Wärmekapazitätsmessung mittels Vergleichsmethoden-Auswertung dargestellt.

Messung	Wärmekapazität ($\text{J}/(\text{g}^*\text{K})$)
HSX-1	5,072
HSX-2	5,530
HSX-3	5,158
Mittelwert	5,253

Tabelle 10: Ergebnisse der Wärmekapazitätsmessung des UV-Acrylat-Hotmelts.

Beispielhaft wird der Verlauf der Wärmekapazität über die Temperaturerhöhung des UV-Acrylat-Klebstoffes in Abbildung 15 dargestellt.

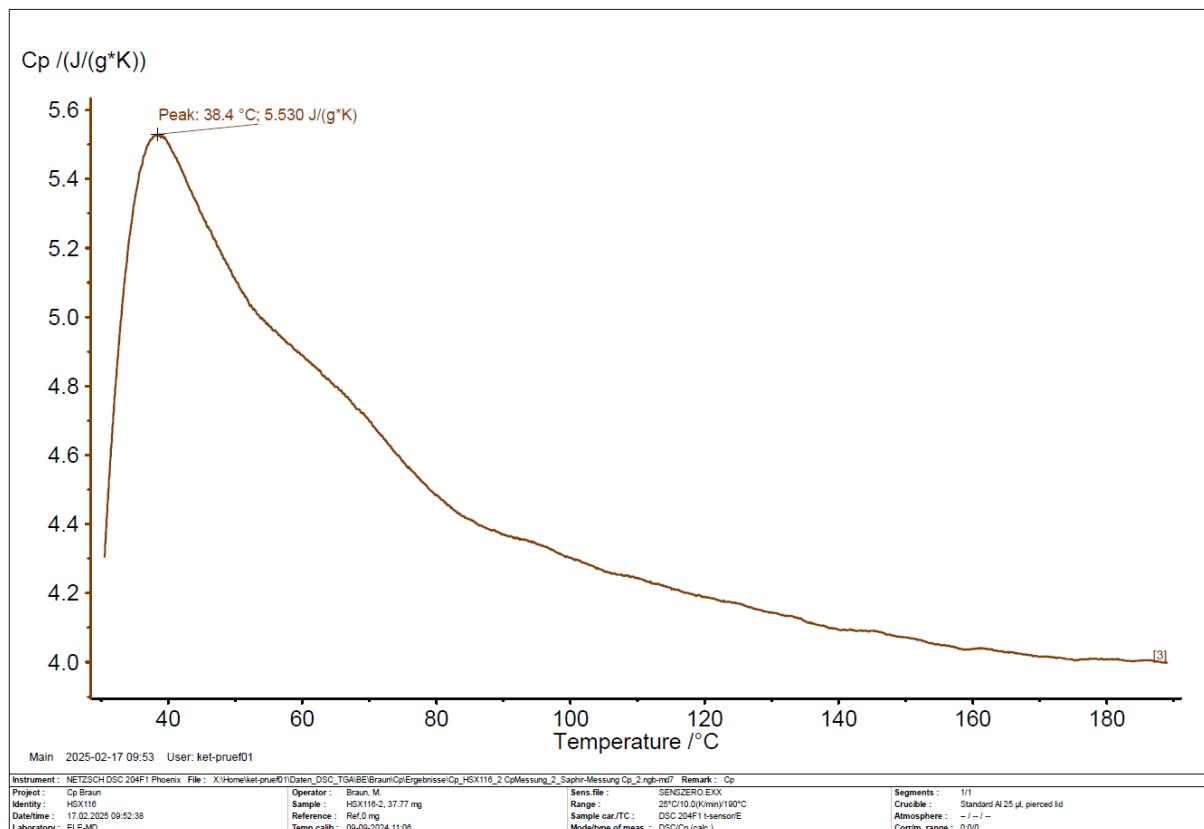


Abbildung 15: Auswertung der Wärmekapazitätsmessung des UV-Acrylat-Hotmelts.

Zum Vergleich wurde auch für den Dispersionsklebstoff die spezifische Wärmekapazität bestimmt. In Tabelle 11 sind Ergebnisse der Wärmekapazitätsmessung mittels Vergleichsmethoden-Auswertung dargestellt.

Messung	Wärmekapazität (J/g*K)
WD-1	53,682
WD-2	53,648
WD-3	48,456
Mittelwert	51,929

Tabelle 11: Ergebnisse der Wärmekapazitätsmessung des Dispersionsklebstoffes.

Beispielhaft wird der Verlauf der Wärmekapazität über die Temperaturerhöhung des Dispersionsklebstoffes in Abbildung 16 dargestellt.

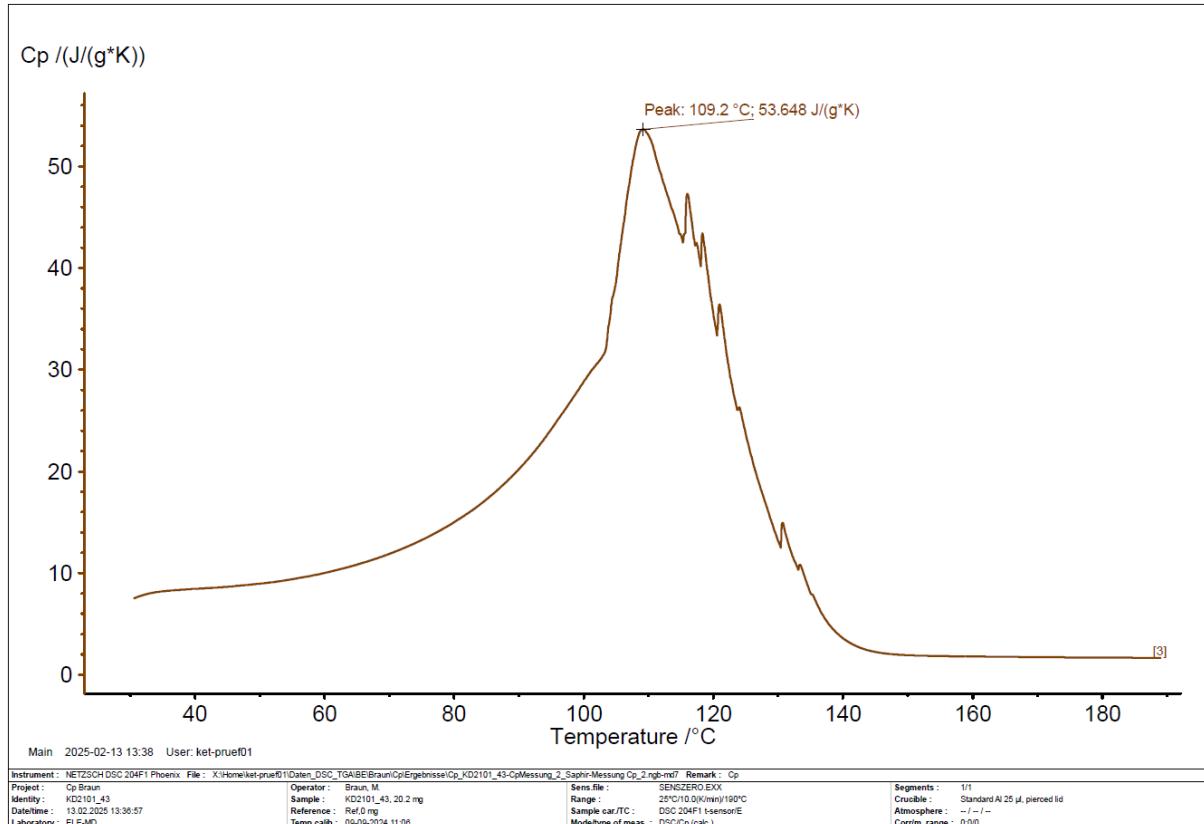


Abbildung 16: Auswertung der Wärmekapazitätsmessung des Dispersionsklebstoffes.

Wie zu erwarten war die Verlaufskurve der Wärmekapazität des Synthesekautschuk-Klebstoffes und des UV-Acrylats sehr ähnlich. Der Synthesekautschuk-Klebstoff weist eine etwas geringere Wärmekapazität von 4,39 $\text{J}/\text{g}^*\text{K}$ im Vergleich zu 5,25 $\text{J}/\text{g}^*\text{K}$ auf. Dies zeigt, dass der Energieverbrauch bei der Auftragung der beiden Klebstoffe ähnlich ist. Diese Beobachtung passt auch zur realen Beschichtungsart, die im Vergleich der beiden Klebstoffsysteme sehr ähnlich ist.

Der Verlauf der Wärmekapazitätskurve bei dem Dispersionsklebstoff hingegen weist eine signifikant abweichende Charakteristik auf. Der größte Energieaufwand tritt bei ungefähr 110 $^\circ\text{C}$ auf, da an dieser Stelle die Verdampfungsenthalpie des Wassers aufgebracht werden muss. In diesem Temperaturbereich überlagern, wie bereits beschrieben, mehrere Einflussfaktoren wie insbesondere die Phasenübergänge des Wassers. Daher beschrieben die 51,93 $\text{J}/\text{g}^*\text{K}$ nicht die Wärmekapazität des Klebstoffes, sondern den gesamten Energieaufwand, der für den Trocknungsprozess erforderlich ist.

Bemerkenswert ist der zehnfach höhere Energieaufwand des Dispersionsklebstoffes im Vergleich zu den beiden Hotmelt-Systemen.

Der Vergleich und die Diskussion der Ergebnisse sind in Kapitel 4.2.7 gegeben.

4.2.5 Lösungsmittelklebstoff

Die untersuchten Hotmelt-Klebstoffsysteme und der Dispersionsklebstoff werden in dem betrachteten Unternehmen für die Klebebandproduktion verwendet. Von diesen Klebstoffsystmen können aufgrund des bekannten Inhaltes sowohl näherungsweise theoretische Berechnungen als auch DSC-Messungen durchgeführt werden, um Rückschlüsse auf die Energieeffizienz zu ziehen. Im Vergleich dazu ist der Inhalt des Lösungsmittelklebstoffes unbekannt, da dieser als fertige Mischung eingekauft wurde. Da keine Informationen über die Zusammensetzung sowie die verwendeten Rohstoffe bekannt sind, ist eine theoretische Berechnung der spezifischen Wärmekapazität nicht möglich. Daher bleibt eine Analyse mittels DSC die einzige Möglichkeit, Aussagen in einem frühen Stadium der Entwicklung über die Energieeffizienz der eingekauften Klebstoffe zu treffen. Hieran kann die postulierte These aus dem vorherigen Kapitel 4.2.4 überprüft werden. Ein Lösungsmittelklebstoff müsste aufgrund des Abdampfungsprozesses des Lösungsmittels mehr Energie für die Beschichtung benötigen als ein Hotmelt-Klebstoff. Im Vergleich zum Dispersionsklebstoff jedoch müsste aufgrund des niedrigeren Siedepunktes und der niedrigen Verdampfungswärme der organischen Lösungsmittel weniger Energieaufwand zur Beschichtung notwendig sein. Im Vergleich der Verdampfungsenthalpien wird diese Theorie deutlich. Wenn beispielhaft Aceton zu Wasser als Lösungsmittel verglichen wird, ist etwa die 4,5-fache Energiemenge für die Verdampfung des Wassers notwendig. In Kapitel 4.2.4.3 wurde bereits deutlich, dass die Wärmekapazitätsmessung bei Dispersionsklebstoffen aufgrund des Verdampfungsvorgangs des Wassers nicht sinnvoll ist.

Zur beispielhaften Betrachtung der Lösungsmittelklebstoffe wurde das Durotak 1760 und Durotak 2954 nach derselben Methode wie in den vorherigen Kapiteln erklärt einer DSC-Messung unterzogen. Die Ergebnisse sind in den folgenden Tabelle 12 und Tabelle 13 aufgelistet.

Messung	Integralfläche (μ Vs/mg)	Probengewicht (mg)	Thermischer Fluss (μ Vs)
Durotak 1760-1	692,2	10,59	7330,40
Durotak 1760-2	761,8	11,80	8989,24
Durotak 1760-3	748,3	11,34	8485,72
Mittelwert			8268,45
Enthalpie (J/g)			176,45

Tabelle 12: Ergebnisse der DSC-Messungen der Lösungsmittelklebstoffe.

Messung	Integralfläche (μ Vs/mg)	Probengewicht (mg)	Thermischer Fluss (μ Vs)
Durotak 2954-1	742,5	13,52	10038,60
Durotak 2954-2	758,6	14,10	10696,26
Durotak 2954-3	751,2	17,62	13236,14
Mittelwert			11,323,67
Enthalpie (J/g)			241,65

Tabelle 13: Ergebnisse der DSC-Messungen der Lösungsmittelklebstoffe.

Multipliziert mit dem bestimmten Umrechnungsfaktor aus der Indium-Kalibrierung für die Schmelzenthalpie von 21,34 mJ/g wird für das Durotak 1760 eine Gesamtenthalpie von 176,45 J/g errechnet und für das Durotak 2954 eine Gesamtenthalpie von 241,65 J/g.

Beispielhaft wird der Verlauf des Gesamtenergieaufwandes über die Temperaturerhöhung des Durotak 1760 in Abbildung 17 und des Durotak 2954 in Abbildung 18 dargestellt.

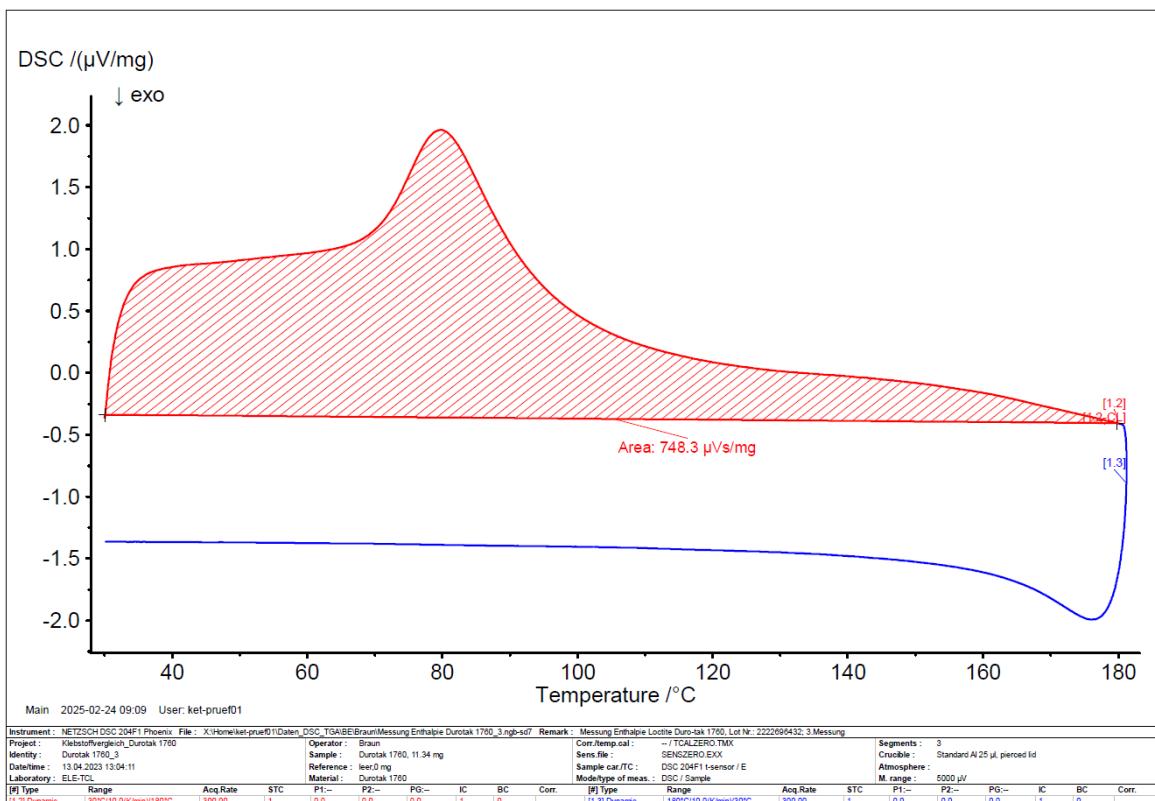


Abbildung 17: Auswertung der DSC-Messung des Lösungsmittelklebstoffes Durotak 1760.

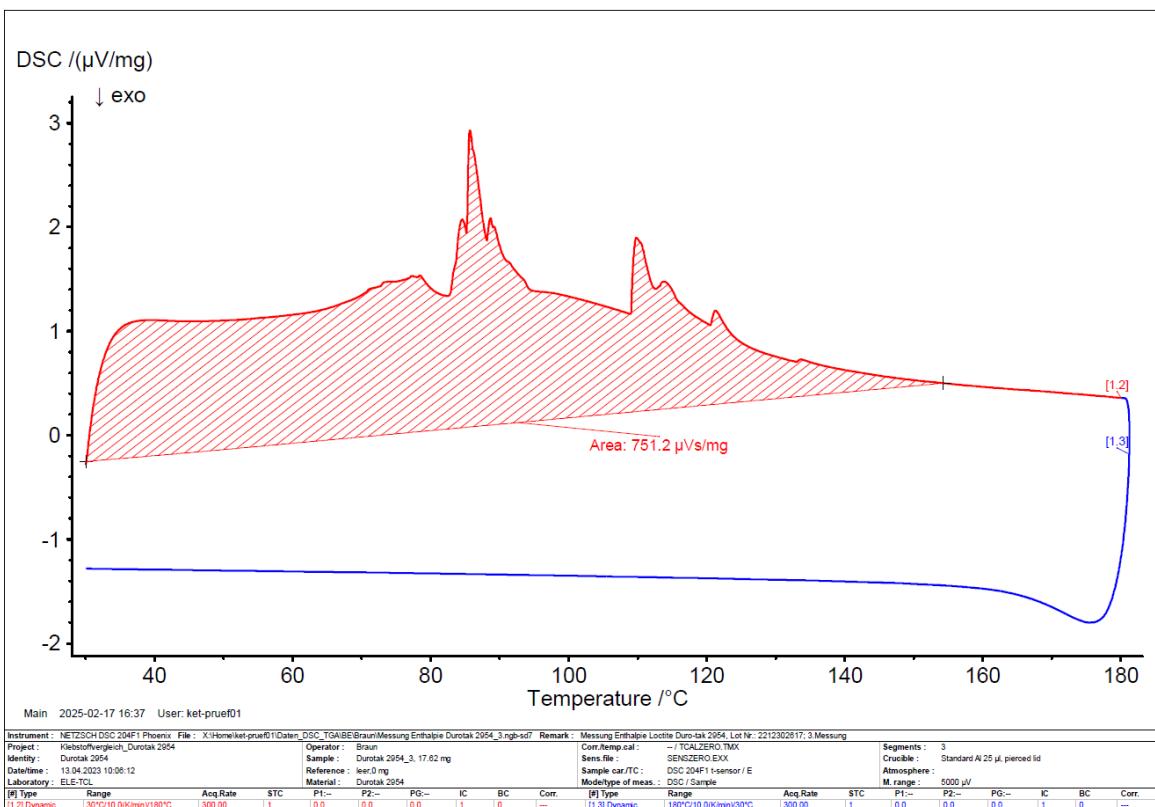


Abbildung 18: Auswertung der DSC-Messung des Lösungsmittelklebstoffes Durotak 2954.

Bei der Betrachtung der DSC-Diagramme fällt besonders die unterschiedliche Peakform zwischen dem Durotak 2954 und 1760 auf. Beim Durotak 1760 in Abbildung 17 ist ein einzelner, breiter Lösungsmittelpeak bei etwas unter 80 °C zu erkennen. Beim Durotak 2954 in Abbildung 18 hingegen ist ein dreigeteilter Peak zu erkennen, bei dem der höchste Peak bei ungefähr 85 °C zu sehen ist. Dies deutet darauf hin, dass im Durotak 1760 nur ein Lösungsmittel, oder eine Mischung aus Lösungsmitteln mit ähnlichem Siedepunkt vorliegt. Die komplexere Peakform deutet beim Durotak 2954 hingegen darauf hin, dass eine Mischung aus mehreren Lösungsmitteln vorliegt, was eine Aufbereitung der aufgefangenen Lösungsmittel in einem Produktionsprozess verkompliziert. Zudem ist aufgrund des höheren Siedepunktes der verwendeten Lösungsmittel im Durotak 2954 eine 60 % höhere Gesamtenthalpie im Vergleich zum Durotak 1760 zu beobachten.

Die vollständige Diskussion der Ergebnisse folgt in Kapitel 4.2.7.

4.2.6 Übertragung Labormodell auf Produktionsprozess

Die Aussagen der Energieeffizienz der Klebstoffsysteme anhand theoretischer Herleitungen sowie der DSC-Untersuchungen zeigen den gleichen Trend auf. In diesem Kapitel sollen diese Erkenntnisse auf ihre Aussagekraft hinsichtlich einer realen Produktion untersucht werden. Bei einer DSC-Messung sowie einer theoretischen Berechnung wird die benötigte Energie für den Schmelzprozess des Klebstoffes auf molekularer Ebene physikalisch betrachtet. Unter realen Beschichtungsbedingungen in der Serienfertigung muss neben den beschriebenen physikalischen Einflüssen auch die gesamte Anlage beheizt und gekühlt werden sowie für Fördermaßnahmen notwendige Motoren betrieben werden. Daher spielen neben den Energieeinflüssen für die Klebstofferwärmung Energieverluste an der Maschine in der Praxis eine große Rolle. Neben den physikalischen Hürden muss somit die Effizienz der Maschine mitberücksichtigt werden. Um die Energieeffizienz dieser Klebstoffsysteme im realen Beschichtungsprozess zu vergleichen, wurde der Stromverbrauch während der Beschichtung an den jeweiligen Produktionsanlagen mit Hilfe von festinstallierten Energierzählern gemessen. Hierbei wurde der Stromverbrauch der Kühlanlage miteinbezogen, da die erbrachte Energie für den Schmelzprozess des Klebstoffes durch eine Abkühlung des beschichteten Klebebandes wieder ausgetragen werden muss, damit der Klebstoff erstarrt. Bei der betrachteten Beschichtungsanlage wird ein geschlossenes Kühlwassersystem verwendet, sodass kein Wasserverbrauch in der ökonomischen und ökologischen Betrachtung berücksichtigt wurde.

Die beiden beispielhaft betrachteten Produkte basieren auf dem gleichen Trägermaterial, um eine reine Vergleichbarkeit auf Basis des Klebstoffes zu gewährleisten. Als Trägermaterial

wurde ein 160 g PET-Gewebe eingesetzt. Das Synthesekautschuk-Band wurde mit 125 g Klebstoff beschichtet, das UV-Acrylat-Band aufgrund dessen Spezifikation hingegen mit 80 g Klebstoff. Die unterschiedlichen Auftragsgewichte der zwei betrachteten Klebebänder begründen sich durch die spezifischen Performance-Eigenschaften der Klebstoffsysteme sowie der unterschiedlichen Auftragsarten. Bei dem Synthesekautschuk-Band wird ungefähr mit einer Beschichtungsgeschwindigkeit von 130 m/min gearbeitet, das UV-Acrylat hingegen wird ungefähr mit 100 m/min beschichtet.

Im Vergleich der beiden Hotmelt Systeme wurde dieselbe Beschichtungsanlage herangezogen. Schematisch ist eine solche Anlage in Abbildung 6 dargestellt. Diese Beschichtungsanlage ist eine Hybridanlage, welche unterschiedliche Bahnführungen vorweist, sodass sowohl Synthesekautschuke als auch UV-Acrylate beschichtet werden können. Die Beschichtung des Synthesekautschuks läuft mittels einer TC-Schlitzdüse (True Coat) mit Rollstab ab, der den Klebstoff in das Trägermaterial drückt, sodass eine bessere Verankerung des Klebstoffes im Trägermaterial ermöglicht wird.

Die UV-Acrylate werden durch ein Curtain-Coating-Verfahren aufgebracht, ohne den Kleber zusätzlich anzudrücken. Die Bahnführung unterscheidet sich, abgesehen von den unterschiedlichen Auftragsarten, dadurch, dass das Klebeband mit dem UV-Acrylat nach der Beschichtung durch einen Vernetzungstunnel mit UV-Lampen geleitet wird. Hier werden bis zu 11 UV-Lampen für die Vernetzung eingesetzt. Die benötigte Energie der Lampen wird aus der Beschichtungsgeschwindigkeit und dem Auftragsgewicht in Vorversuchen auf Laboranlagen bestimmt. Je nach Kühlbedarf, laufen beide Bänder über bis zu zwei Kühlwalzen, die mit Wasser aktiv auf 12 °C gekühlt werden.

Für die Auswertung der Energieverbräuche wurden jeweils zehn Produktionsläufe zur Bewertung herangezogen.

Produktionsläufe UV-Acrylat-Hotmelt

Datum	FA	Produktionsmenge (m ²)	Verbrauch (kWh)	Verbrauch (kWh/m ²)
17.04.2024	8372438	1492,07	5337,81	0,06279777
21.04.2024	8377074	1058,73	3155,71	0,04508157
21.04.2024	8381325	1747,90	6229,58	0,0622958
07.03.2024	8337405	1184,50	4486,4	0,06409143
12.03.2024	8343499	923,64	3337,97	0,05894245
15.03.2024	8346908	557,52	1835,24	0,045881
28.03.2024	8355986	1174,89	4343,74	0,06205343
05.04.2024	8368222	316,07	1130,23	0,0565115
05.04.2024	8368226	699,57	2506,65	0,07161857
30.04.2024	8381326	1998,57	7336,24	0,06669309
			Mittelwert	0,05959666

Tabelle 14: Auswertung der Beschichtungsverbräuche des UV-Acrylat-Hotmelts.

Produktionsläufe Synthesekautschuk-Hotmelt

Datum	FA	Produktionsmenge (m ²)	Verbrauch (kWh)	Verbrauch (kWh/m ²)
14.04.2024	8368283	431,05	958,55	0,02130111
30.04.2024	8388847	339,60	1399,46	0,0349865
06.05.2024	8385831	410,66	947,01	0,02367525
21.04.2024	8377183	221,85	341,69	0,0170845
10.05.2024	8396007	231,36	510,75	0,0255375
17.05.2024	8405158	145,02	404,23	0,0202115
12.02.2024	8315773	545,28	1178,94	0,019649
22.01.2024	8300043	328,71	788,22	0,0315288
30.01.2024	8302185	109,07	330,75	0,033075
07.01.2024	8283014	256,69	618,93	0,0309465
			Mittel	0,02579957

Tabelle 15: Auswertung der Beschichtungsverbräuche des Synthesekautschuk-Hotmelts.

Bei Auswertung der Produktionsverbräuche ist der 131 % höhere Verbrauch im Mittel des UV-Acrylat-Klebebandes im Vergleich zum Synthesekautschuk auffällig. Der höhere Stromverbrauch des UV-Acrylats liegt vor, obwohl 56 % mehr Synthesekautschukkleber pro Quadratmeter aufgetragen wurde (125 g Synthesekautschuk zu 80 g UV-Acrylat) und die Beschichtungstemperatur des Synthesekautschuks um 55 °C höher ist als die des UV-Acrylats (185 °C Synthesekautschuk zu 130 °C UV-Acrylat). Um eine Vergleichbarkeit der Klebstoffe herzustellen, werden die Verbräuche ebenfalls auf ein Kilogramm normiert, sodass spezifische Auftragsgewichte nicht ausschlaggebend sind für den Vergleich der unterschiedlichen Klebstofftechnologien.

Hochgerechnet auf jeweils 1 kg beschichteten Klebstoff ergibt sich für den Synthesekautschuk ein Stromverbrauch von 0,21 kWh/kg und für das UV-Acrylat ein Verbrauch von 0,75 kWh/kg. Bei gleicher Auftragsmenge wäre der Stromverbrauch der UV-Acrylat-Beschichtung somit um 257 % höher.

Der höhere Energieverbrauch des UV-Acrylats ist durch die Verwendung von UV-Lampen zu erklären, die für die Vernetzung notwendig sind. Ein Mehrverbrauch der Maschine aufgrund der geänderten Bahnführung und der unterschiedlichen Geschwindigkeit ist in diesem Zusammenhang vernachlässigbar.

4.2.6.1 Beschichtung Dispersionsklebstoff

Für die Untersuchung der Beschichtung des Dispersionsklebers wurde die O1 (Olbrich-Anlage) herangezogen. Hierzu wurden die Produkte 651 und 653 betrachtet, die sich aus dem gleichen PVC-Trägermaterial mit 115 µm Dicke und dem gleichen Klebstoffsyste zusammensetzen.

Beschichtet wird mit 38 g/m² Dispersionsklebstoff bei Raumtemperatur, sodass das Fertigprodukt nach Trocknung einen Kleberauftrag von 19 g/m² hat. Standardgemäß wird mit einer Geschwindigkeit von 28 m/min beschichtet und Wickel in einer Länge von 33 m mit einer Breite von 640 mm produziert.

Die Trocknung des Klebers wird von einer Thermalölheizung gewährleistet. Der Trockungs-kanal hat drei Temperaturzonen mit einer Gesamtlänge von 40 m. Die erste Zone ist auf 80 °C, die zweite auf 120 °C und die dritte auf 140 °C konstant geheizt.

Produktionsläufe Dispersionsklebstoff

Datum	FA	Produktionsmenge (m ²)	Verbrauch (kWh)	Verbrauch (kWh/m ²)
31.05.2024	8420286	3060	2285,39	0,747
15.05.2024	8405186	1800	1739,22	0,966
07.05.2024	8393454	1800	1535,06	0,853
05.04.2024	8368399	900	816,33	0,907
23.04.2024	8381267	1800	1441,30	0,801
04.06.2024	8421643	3600	2731,85	0,759
29.05.2024	8416918	1800	1711,87	0,951
27.05.2024	8412884	3600	2274,77	0,632
17.05.2024	8405325	3600	3323,55	0,923
09.05.2024	8397761	5400	4983,84	0,923
			Mittelwert	0,838

Tabelle 16: Auswertung der Beschichtungsverbräuche des Dispersionsklebstoffes.

Der Mittelwert der Produktionsverbräuche des Dispersionsklebstoffes liegt bei 0,838 kWh/m². Im Vergleich zum UV-Acrylat-Klebstoff bedeutet das einen Mehrverbrauch von 1.306%, im Vergleich zum Synthesekautschuk-Klebstoff sogar von 3.148%. Der immense Mehrverbrauch im Vergleich zu den beiden Hotmelt-Systemen kommt zustande, obwohl nur 38 g Klebstoff aufgetragen werden. Im Vergleich zum trockenen Auftragsgewicht von 19 g wird die geringe Energieeffizienz des Dispersionsklebstoffes noch deutlicher. Hochgerechnet auf 1 kg beschichteten Klebstoff ergibt sich für den Dispersionsklebstoff ein Stromverbrauch von 44,01 kWh/kg. Im Vergleich zum UV-Acrylat bei gleicher Auftragsmenge wäre der Stromverbrauch somit um 5.768 % höher und im Vergleich zum Synthesekautschuk sogar um 20.857 % höher.

4.2.7 Schlussfolgerung Klebstoffvergleich

In folgender Tabelle 17 sind alle Messergebnisse dieses Kapitels zusammenfassend dargestellt.

Klebstoff	Synthese-kautschuk	UV-Acrylat	Dispersion	Durotak-2954	Durotak-1760
spez. Wärmekapazität (Theorie) (J/g*K)	1,55	1,20	3,03		
Energieverbrauch Be-schichtung (kWh/m ²)	45,38	10,56	55,71		
Enthalpie (DSC) (J/g)	200,40	206,41	1189,18	241,65	176,45
Spezifische Wärmeka-pazität (DSC) (J/g*K)	4,39	5,25	51,93		
Produktionsverbräuche (kWh/kg)	0,21	0,75	44,01		

Tabelle 17: Ergebnisse des Klebstoffvergleiches.

In diesem Kapitel wurden diverse Betrachtungen der Energieeffizienz von unterschiedlichen Klebstoffsystmen vorgestellt. Die theoretische Berechnung stellen eine schnelle Möglichkeit für den Vergleich der notwendigen Energiemenge während des Beschichtungsprozesses dar. Als problematisch hat sich jedoch herausgestellt, dass keine spezifischen Literaturdaten für die eingesetzten Rohstoffe vorhanden waren. Dies bedingt einen nicht einschätzbar Fehlern in den Ergebnissen, sodass die Berechnungen für eine Betrachtung der Energieeffizienz spezieller Klebstoffrezepte nicht sinnvoll sind. Allein der Vergleich zwischen den theoretisch errechneten spezifischen Wärmekapazitäten und den an der DSC bestimmten Wärmekapazitäten zeigt, dass nicht einmal der gleiche Trend erkennbar ist. Nutzbar wird eine theoretische Berechnung, sobald spezifische Daten der Lieferanten für die jeweiligen Rohstoffe vorliegen. Aktuell werden spezifische Wärmekapazitäten jedoch nicht für die Klebstoffrohstoffe angegeben.

Die DSC-Messungen sowohl für die spezifische Wärmekapazität als auch für den gesamten Wärmebedarf beim Beschichtungsprozess zeigt den erwarteten Trend des Wärmebedarfs im Vergleich der Klebstoffsysteme.

Der Synthesekautschuk-Klebstoff und der UV-Acrylat-Klebstoff zeigen ähnliche Werte der Enthalpie sowie der spezifischen Wärmekapazität. Dieses Ergebnis war zu erwarten, da beide Systeme ähnliche Beschichtungsarten und -bedingungen vorweisen. Der im Vergleich dazu deutlich höhere Energieaufwand sowie Wärmekapazität des Dispersionsklebstoffes war ebenfalls auf Grund des hohen Wassergehalts in der Klebstoffzusammensetzung zu erwarten. Eine grafische Darstellung der Ergebnisse ist in folgender Abbildung 19 zu sehen.

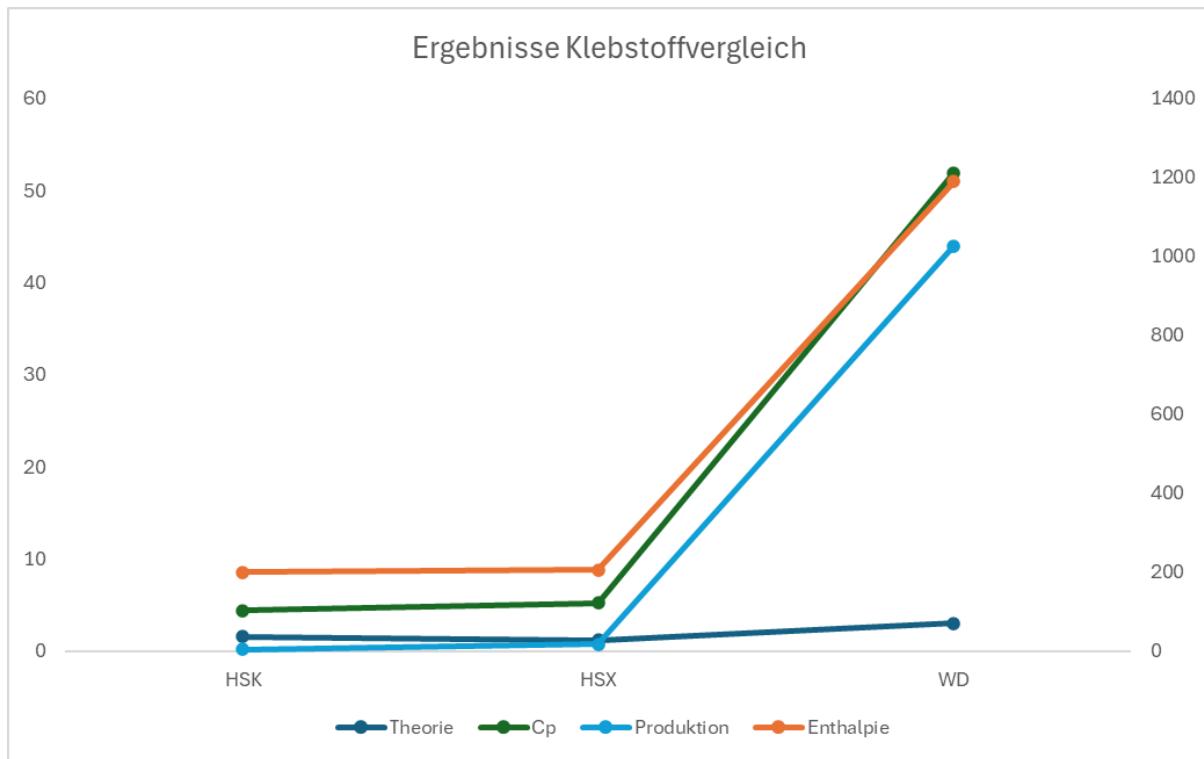


Abbildung 19: Grafische Darstellung der Ergebnisse des Klebstoffvergleiches.

Auffällig hierbei ist der gleiche Trend bei den unterschiedlichen Ergebnissen. Einzig die theoretische Berechnung des Dispersionsklebstoffes fällt aus dem Trend. Dies ist auf die ungenauen Literaturwerte zurückzuführen.

Im Vergleich der gemessenen Wärmekapazitäten zu den theoretischen Berechnungen fällt eine große Abweichung, besonders bei dem Dispersionsklebstoff, auf. Zum Teil ist es, wie beschrieben, auf die schlechte Verfügbarkeit und Qualität der Literaturwerte zurückzuführen. Gleichzeitig werden in der DSC mehrere Einflüsse, wie beispielsweise Phasenübergänge und

Schmelzprozesse, überlagernd dargestellt. Diese Einflüsse addieren sich zum Teil auf, so dass eine reine Bestimmung der Wärmekapazität, wie von den hier vorliegenden komplexen Klebstoffmischungen, nicht möglich ist. Wie bereits in Kapitel 4.2.4 beschrieben ist für die Energieeffizienzbetrachtung von Klebstoff eine gesamtheitliche Betrachtung der Energieeinflüsse und dessen Übertragung in einen realen Beschichtungsprozess vollkommen ausreichend.

Die Messung der beiden Lösungsmittelklebstoffe verdeutlicht zwei Punkte. Erstens beweist es, dass die DSC-Methode geeignet ist, um eine energieeffizienzbasierende Betrachtung von unbekannten Klebstoffen durchzuführen. Die Ergebnisse der DSC-Messungen passen zu der postulierten Theorie, dass Lösungsmittelklebstoffe energieeffizienter sind als Wasserdispersionsklebstoffe, da Lösungsmittel aufgrund ihrer geringeren Verdampfungsenthalpien leichter zu entfernen sind. Zweitens zeigt der Vergleich der DSC-Diagramme, dass ähnliche Klebstoffe trotzdem unterschieden werden können. Beide Lösungsmittelklebstoffe scheinen optisch und von den angegebenen Eigenschaften sehr ähnlich zu sein. Die DSC-Messungen machen jedoch klare Unterschiede in der Rezeptur und damit in der Energieeffizienz deutlich.

Die Auswertung der realen Beschichtungsaufträge bestätigt den Trend der DSC-Messungen. Eine erwartete Abweichung trat bei dem Energieverbrauch des UV-Acrylat-Klebstoffes auf, da bei der Beschichtung der Faktor der UV-Vernetzung mittels UV-Lampen hinzukommt. Dieser Faktor konnte bei der DSC-Messung nicht berücksichtigt werden und macht augenscheinlich einen großen Unterschied im Vergleich zum Synthesekautschuk aus. Für die Vernetzung werden an der betrachteten Beschichtungsanlage Quecksilberdampflampen verwendet, die eine schlechte Energieeffizienz besitzen. Der Großteil der eingesetzten Energie wird als Wärmestrahlung emittiert, wodurch die Vernetzung sehr energiereich ist. Aus den Ergebnissen dieser Untersuchung ergeben sich zwei Stellschrauben für eine nachhaltige Entwicklung der Hotmelt-Klebstoffe. Einerseits kann die Rezeptur so angepasst werden, dass ein niedrigerer Schmelzpunkt erreicht wird. Dadurch wäre weniger Energieaufwand beim Aufschmelzen sowie bei der Abkühlung notwendig und die Beschichtungstemperatur könnte dementsprechend gesenkt werden. Dadurch würde jedoch auch die Temperaturstabilität des Klebebandes in der Anwendung leiden. Als zweiten Ansatzpunkt können die Prozessführung und Beschichtungsbedingungen optimiert werden. Weniger Energieverluste durch den Einsatz von LED-UV-Lampen anstelle der Quecksilberdampflampen, die weniger effizient und mit deutlich höherem Wärmeverlusten bestrahlen, würde ebenfalls große Energieeinsparungen möglich machen. Zudem weisen die LED-Lampen eine fünfmal längere Lebensdauer als Quecksilberdampflampen auf, sodass die Betriebskosten grundlegend sinken.

Anhand dieser Untersuchungen kann festgestellt werden, dass 100 %- Systeme wie Synthesekautschuk und UV-Acrylat-Hotmelts die energieeffizientesten Klebstoffsysteme in Bezug

auf die Verarbeitung darstellen. Sie sind zudem einfach zu verarbeiten, bieten gute Eigenschaften und benötigen keine aufwändige Trocknung nach der Beschichtung. Einzig die UV-Vernetzung verschlechtert die Energieeffizienz des UV-Acrylats deutlich im Vergleich zum Synthesekautschuk-Klebstoff. Zum Teil weniger Energie benötigen die Lösungsmittelklebstoffe im nachgestellten Beschichtungsprozess. Die ökologischen Nachteile sowie die aufwendige Prozessführung, der ineffiziente Transport und die Entsorgung des Lösungsmittels bedingen, dass Lösungsmittelklebstoffe mittlerweile nur noch in speziellen Anwendungsfällen zum Zuge kommen, in denen ihre speziellen Eigenschaften unbedingt notwendig sind. Dispersionsklebstoffe sind mit Abstand die ineffizientesten Systeme in Bezug auf den Energieverbrauch bei einer Beschichtung sowie ihrer Transportemissionen und des produzierten Abwassers.

4.2.8 Performance-Betrachtung der Klebstoffsysteme

In den vorherigen Kapiteln wurden die Klebstoffsysteme rein auf die Energieeffizienz untersucht und ihre ökologischen Einflüsse diskutiert. In der Anwendung sind die wichtigsten Aspekte bei der Auswahl des Klebstoffes jedoch, dass sie passende Eigenschaften für den angedachten Anwendungsfall vorweisen können sowie möglichst preisgünstig sind. Das Ziel einer Produktentwicklung sollte daher das Zusammenspiel aus ökonomischen und ökologischen Zielen sowie guter Performance der Produkte abbilden und diese in Einklang stellen. Daher soll diese wichtige Betrachtungsweise ebenfalls in dieser Arbeit Platz finden, auch wenn sie nicht zum Kontext der Arbeit passt.

Die ökologische Bewertung wurde durch den PCF als Kennzahl in den vorherigen Kapiteln dargestellt. Ein ökonomischer Vergleich von Klebstoffsystemen oder auch von Klebebändern soll hier nicht angeführt werden.

Im Vergleich der vier vorgestellten Klebstoffsysteme stellen sich einige klare Differenzierungspunkte im Vergleich der speziellen Eigenschaften dar. Synthesekautschuk-Hotmelts zeichnen sich durch eine starke Anfangshaftung aus. Sie bieten dazu grundlegend eine gute Flexibilität bei niedrigen Temperaturen. Wie bereits beschrieben werden Synthesekautschuk-Hotmelts in einem erhitzten Zustand aufgetragen. Die Beschichtung erfordert spezielle Geräte zum Schmelzen und Auftragen des Klebstoffs. Sie benötigen neben der Abkühlphase keine weitere Trocknungszeit, was den Produktionsprozess beschleunigt und die weitere Verarbeitung sowie Lagerung vereinfacht. Die 100%-Systeme kommen während des

Beschichtungsprozesses ohne Lösungsmittel aus, werden vor der Beschichtung somit nur in einen flüssigen Zustand erhitzt und erstarren bei Abkühlung wieder. Dies macht eine schnelle und lösungsmittelfreie Verarbeitung möglich. Im Vergleich zu anderen 100%-Systemen wie dem UV-Acrylat sind sie dazu preiswert. Im Gegenzug sind sie empfindlich gegenüber Umwelteinflüssen wie Sonneneinstrahlung und Hitze. Daher sind sie für Outdooranwendungen oder Anwendungen bei hohen Temperaturen nicht geeignet.

UV-Acrylat-Hotmelts als weiteres 100%-Klebstoffsystem bieten im Vergleich zu den Synthesekautschuk-Hotmelts eine ausgezeichnete Beständigkeit gegen Wärme, Chemikalien und UV-Strahlung. Sie haben eine vergleichsweise hohe Endfestigkeit und können zudem transparent aushärten, was sie für optisch anspruchsvolle Anwendungen geeignet macht. UV-Acrylate werden ähnlich wie Synthesekautschuk-Hotmelts aufgetragen. Zusätzlich ist jedoch eine Vernetzung des Klebstoffes nach der Beschichtung notwendig, die durch UV-Bestrahlung erfolgt. Dies erfordert eine spezielle UV-Lichtquelle, um die Photoinitiatoren im Klebstoff zu aktivieren. Die Vernetzung findet nur während der Bestrahlung statt, der Klebstoff vernetzt nach der Produktion nicht mehr nach. Diese Vernetzung des Klebstoffes bedingt eine gute Beständigkeit des Klebstoffes gegen Umwelteinflüsse wie Hitze und Sonneneinstrahlung. Weiterhin ist durch präzise Bestrahlung eine Steuerung des Vernetzungsgrades möglich, welches eine genaue Einstellung der Klebeigenschaften möglich macht. Nachteilig sind durch die Notwendigkeit einer UV-Lichtquelle für die Vernetzung die daraus resultierenden höheren Investitionskosten für die Beschichtungsanlagen sowie höhere Produktionskosten durch den erhöhten Energieverbrauch. Durch die notwendige Bestrahlung des Klebstoffes ist die Aushärtungstiefe bei hohen Auftragsmengen als auch die Beschichtungsgeschwindigkeit begrenzt. Neue Lampenvarianten aus LED können die Energiekosten sowie den Kühlbedarf der Belichtungseinheit drastisch senken. Die Investition sowie der Aufwand für die Anpassung der Produktionsprozesse in eine neue Lampentechnik sind jedoch hoch.

Dispersionsklebstoffe sind wasserbasierte Klebstoffe, bei denen Polymerpartikel mit Hilfe von Tensiden in Wasser dispergiert sind. Der Feststoffanteil in der Dispersion liegt meist bei 40 - 70 %. Diese Klebstoffe werden bei Raumtemperatur beschichtet und trocknen durch Verdunstung des Wassers. Dies macht den Prozess sicher und verringert gesundheitliche Risiken im Vergleich zu Lösungsmittelklebstoffen, erfordert jedoch eine Trocknung des Klebstoffes und einen dementsprechend hohen Energieeinsatz. Der häufigste herausgestellte Vorteil der Dispersionsklebstoffe ist ihre Umweltfreundlichkeit, da zumindest bei der Beschichtung und Anwendung lösungsmittelfrei gearbeitet wird. Im Vergleich zu 100 %-Klebstoffsystemen sind sie dazu kostengünstiger. Durch den hohen Wasseranteil ist eine Beschichtung bei hoher Luftfeuchtigkeit in der Produktionsumgebung schwierig und die Beständigkeit gegen Feuchtigkeit und Chemikalien während und nach der Applikation gering. Problematisch ist ebenfalls,

dass Feststoff- und organische Anteile in dem abgeschiedenen Wasser zu finden sein können. Das entfernte Wasser könnte somit mit Monomeren, Tensiden und Bindemitteln verunreinigt werden, die die Umwelt belasten und eine aufwändige Abwasseraufbereitung nötig machen.

Als Alternative zu den thermalölbetriebenen Trocknungsanlagen können auch Ultraschalltrocknungsverfahren verwendet werden. Hierbei wird eine akustische Trocknungsmethode eingesetzt, bei der durch Ultraschallwellen die Grenzschicht gebrochen wird und der Trocknungsprozess somit effizienter wird. Die Technologie verspricht eine 70% höhere Bahngeschwindigkeit, sowie eine 75 %ige Energieersparnis. Nachteilig sind hohe Investitionen bei Anschaffung und Implementierung sowie eine daraus resultierende laute Arbeitsumgebung, die eine Nutzung dieser Technologie im betrachteten Umfeld erschwert.

Bei Lösungsmittelklebstoffen liegen die Polymere gelöst in organischen Lösungsmitteln vor. Diese Klebstoffe härteten durch Verdunstung des Lösungsmittels aus. Daher erfordert der Produktionsprozess eine gute Belüftung und hohe Sicherheitsmaßnahmen (EX-Schutz) aufgrund des abgedampften Lösungsmittels. Häufig werden die entfernten Lösungsmittel in einem Blockheizkraftwerk für die Energierückgewinnung genutzt. Eine Gefahr der Emission von flüchtigen organischen Verbindungen (VOCs) besteht trotzdem über Leckagen in der Lüftungsanlage sowie aus den Abgasen des Blockheizkraftwerkes. Eine vollständige Trocknung des Klebstoffes ist zudem nicht möglich. Daher verbleibt ein gewisser Anteil an Lösungsmittel auch nach der Trocknung im Kleber, sodass Emissionen auch während der Lagerung oder nach der Applikation entstehen können. Die Belastung durch VOCs ist problematisch, da dadurch die Gesundheit von Anwendern und Produktionsmitarbeitern sowie die Umwelt gefährdet wird. Daraus ergeben sich weitere Nachteile bei der Anwendung, indem hohe Sicherheitsvorkehrungen und auch Einschränkungen durch gesetzliche Vorschriften möglich sind. Anstelle des Verbrennens der Lösungsmittel könnte durch ein Auffangen der Lösungsmittel und Rezyklieren Kreislaufwirtschaft betrieben werden. Ein solches Verfahren ist jedoch aktuell nicht wirtschaftlich. Vorteile der Lösungsmittelklebstoffe sind eine starke und dauerhafte Haltung sowie eine schnelle Aushärtung während der Applikation. Weiterhin sind sie sehr beständig gegen Umwelteinflüsse wie Feuchtigkeit und Chemikalien.

Jedes der betrachteten Klebstoffsysteme hat spezifische Vor- und Nachteile, die je nach Anwendungsbereich und Preisgestaltung des Produktes unterschiedlich gewichtet werden. Synthesekautschuk-Hotmelts und UV-Acrylat-Hotmelts bieten schnelle Aushärtung und hohe Klebeleistung, sind jedoch teurer als Dispersionsklebstoffe. Dispersionsklebstoffe sind sicher in der Produktion und Anwendung, jedoch energieaufwändig in der Produktion und wenig beständig gegen Umwelteinflüsse. Lösungsmittelklebstoffe bieten sehr hohe Klebkräfte, bringen aber gesundheitliche und umwelttechnische Probleme mit sich. Die Wahl des geeigneten

Klebstoffs hängt von einer Vielzahl von Faktoren ab. Zu berücksichtigen sind zum Beispiel die spezifischen Anforderungen der Anwendung, das zu beklebende Substrat, die gewünschte Produktionsgeschwindigkeit, die Umweltanforderungen und die preisliche Einordnung des Endprodukts.

4.3 Chemische Pyrolyse

Aus den Erkenntnissen der PCF-Betrachtung in Kapitel 4.1 ist deutlich geworden, dass große Einflussmöglichkeiten in der Auswahl geeigneter Rohstoffe und des Produktdesigns liegen. Da sich die direkten Einflussbereiche für ein produzierendes Unternehmen auf die Rohstoffauswahl, das Produktdesign und die Produktionsverbräuche beschränken, wurden weitere Optionen betrachtet. Hierzu wurde eine vollständige Betrachtung der Produktion und dessen Seitenströme vorgenommen.

In der regulären Klebebandproduktion entsteht Ausschuss in Form von Randabschnitten bei der Konfektionierung. Zudem fällt regelmäßig Ausschuss beim Einfahren der Maschinen sowie zum Teil fehlerhafte Ware bei der Produktion an. Diese werden aktuell gesammelt und einer thermischen Verwertung zugeführt.

Ein wesentlicher Bereich der Produktnachhaltigkeit wird bestimmt durch die eingesetzten Rohstoffe sowie der Verwendung des ausgedienten Produktes und der Produktionsreste. Dabei stellt sich die Frage, ob die anfallenden Abfälle im Einklang mit einem Kreislaufwirtschaftsgedanken zu rezyklieren und sinnvoll in neue Rohstoffe umzuarbeiten sind. Im Rahmen dieser Arbeit wurde evaluiert, wie diese Reststoffe rezykliert werden können. Weiterhin kann so eine Alternative zur klassischen thermischen Verwertung aufgezeigt werden und eine nachhaltigere Verwendung der Abfälle präsentiert werden. Dadurch können neben den ökologischen Vorteilen auch ökonomische Vorteile erwartet werden.

In dem betrachteten Unternehmen entstanden für ein betrachtetes Jahr 1978 t PET-, 435 t PA- sowie 256 t PE-Beiproducte, welche als Randabschnitte bei der Konfektionierung oder durch Fehlproduktion als Ausschuss anfallen. Die Ausschüsse sind zum Großteil beschichtete Klebebänder, welche daher nicht sortenrein mechanisch rezykliert werden können, sondern nur als Verbund. Die Ausschussquote liegt im Fall dieser Firma bereits bei unter 1 %. Eine weitere Optimierung der Ausschussquote ist aufgrund von Prozessführung und der eingesetzten Anlagen schwer möglich. Durch die thermische Entsorgung dieser Abfallmengen ergaben sich in dem Betrachtungsjahr Kosten von über 550.000 € für die betrachtete Firma.

Problematisch bei einem Klebebandsystem ist, dass ein stark verbundenes System vorliegt, bei dem der Kleber nicht ohne weiteres vom Träger entfernt werden kann. Mechanische Recycling-Verfahren sind somit ausgeschlossen. Grundlegendes Problem bei einem mechanischen Recycling ist, dass es auch mit einem 100 %-System, wie beispielsweise PET-Flaschen, nicht unbegrenzt wiederholt werden kann. Nach mehrfachem stofflichem Recycling wird die Kettenlänge des Polymers so stark verringert, dass die mechanische Belastbarkeit

abnimmt. Diese Rezyklate sind dann nicht mehr für den ursprünglichen Zweck einsetzbar und somit kommt es zu einem Downgrading des Stoffes.⁵¹

Eine neue Verwendung der Abfallströme ist in Hinsicht auf den PCF, einer ökonomischen Betrachtung und im Gedanken der Nachhaltigkeit vielversprechend.

Aufgrund der genannten Nachteile eines stofflichen Recyclings ist ein Verfahren notwendig, welches den Klebebandabfall als Verbundsystem rezyklieren kann und den Abfall umarbeitet, sodass er stofflich wieder verwertbar wird. Ein stoffliches Recycling ist aufgrund der notwendigen mechanischen Trennung der Bestandteile mit vertretbarem Aufwand nicht möglich. Dies wird bedingt durch die starke Verbindung aufgrund des Designs eines Klebebandes. Um die beiden Komponenten voneinander zu trennen, wäre somit nur ein solvolytisches Verfahren geeignet. Problematisch bei einer solchen Extraktion ist jedoch, dass mit einer großen Menge an Lösungsmitteln gearbeitet werden muss. Die Lösungsmittel müssen nach der Extraktion aus dem Klebstoff entfernt werden, sodass eine komplexe Aufbereitung der Klebstoffe notwendig wird. Insgesamt ist der ökonomische Aufwand eines solvolytischen Verfahrens damit sehr hoch sowie ökologisch unverträglich mit heutigen Standards und technisch nicht praktikabel. Weiterhin muss bei einem solchen Verfahren, wie auch bei einem mechanischen Recycling, sortenrein gearbeitet werden, woraus zusätzlich ein hoher Aufwand und Komplexität entsteht. Somit ist ein solches Verfahren in diesem Zusammenhang nicht geeignet.

Eine weitere Möglichkeit ist eine Aufarbeitung der Abfälle mittels chemischer Pyrolyse, um aus dem Verbundsystem neue werthaltige Stoffe zu erhalten. Hierbei wird grundlegend in einem thermischen Zersetzungssprozess organisches Material, unter Luftausschluss erhitzt, sodass die chemischen Bindungen aufbrechen und das Material in kurzkettige Anteile zerfällt. Abhängig vom eingesetzten Rohstoff und den Pyrolysebedingungen wie Temperatur, Druck und Verweildauer können unterschiedliche Produkte aller Aggregatzustände entstehen und isoliert werden. Im Idealfall entfällt bei einer Pyrolyse der komplette Aufarbeitungsprozess der Abfälle, sodass das Verfahren deutlich einfacher in der Umsetzung wird und eine sortenreine Trennung nicht erfordert.

Nach Abwägung beider Optionen der Abfallaufbereitung wurde der Fokus auf die Pyrolyse gelegt. Für die Machbarkeitsanalyse der chemischen Pyrolyse in dem beschriebenen Zusammenhang wurde der größte Abfallstrom des betrachteten Unternehmens herangezogen. In diesem Unternehmen fallen jährlich ungefähr 1978 t diverser PET-Abfälle an. Hierzu gehören die bereits beschriebenen Vliese, Gewebe sowie andere PET-haltige Textilien. Diese werden sowohl mit Synthesekautschukkleber als auch mit UV-Acrylat-Klebstoffen beschichtet, aber nicht sortenrein getrennt. Von diesen Abfällen fallen bei der Konfektionierung große Mengen an Randabschnitten mit Papierkern an, wie in folgender Abbildung 20 zu sehen.



Abbildung 20: Foto einer Randrolle.

Weiterhin fällt Ausschuss durch fehlerhafte Ware an, welche zum Teil ebenfalls den Papierkern der Rollenhülse beinhaltet. Die diversen Abfälle werden nicht getrennt gesammelt, so dass ein geeignetes Verfahren auf einen gemischten Abfallstrom anwendbar sein muss.

4.3.1 Vorversuche zur Pyrolyse

In der Literatur werden Pyrolysereaktoren in unterschiedlichen Bauweisen vorgestellt. Häufig werden hier Kombinationen mit Wirbelschichtreaktoren oder Extrudern verwendet.⁵²

Die beschriebenen Reaktortypen sind speziell konstruierte Reaktoren, welche aufwändig hergestellt und individuell auf den geforderten Prozess angepasst werden. Die Dimensionen der Reaktoren sind aufgrund ihrer Komplexität und Kosten häufig auf Technikumsanlagen oder größer ausgerichtet. Kleine Laboranlagen sind dabei selten erwähnt.

Für erste Laborversuche und eine Machbarkeitsstudie ist eine Investition in eine Technikumsanlage nicht praktikabel, zumal ein optimales Design des Reaktors nicht im Voraus abzuschätzen ist. Daher musste nach Alternativen gesucht werden, um eine Pyrolyse im Labormaßstab mit kleinen Mengen durchführen zu können. Handhabbare Versuchsmengen für die

Pyrolyseanlage sollen zwischen 2 g und 80 g liegen, sodass zu Beginn eine schnelle Versuchsdurchführung möglich ist sowie der Materialverbrauch und somit der Aufwand der Probenvorbereitung und Gerätgereinigung gering bleiben. Eine Pyrolyse zeichnet sich dadurch aus, dass die thermische Zersetzung der Probe unter Sauerstoffausschluss stattfindet. Ein passender Versuchsaufbau sollte daher möglichst dicht sein und somit einen Sauerstoffeintrag in den Reaktionsraum verhindern.

4.3.1.1 Erste Vorversuche zur Evaluierung eines Reaktordesigns

Nach ersten Überlegungen wurde ein Rohrofen als Reaktor ausprobiert. Dieser besteht aus einem ca. 40 cm langen Quarzglasrohr, welches auf beiden Seiten eine Öffnung mit 3 cm Durchmesser hat. Das Rohr liegt waagerecht in dem Rohrofen und wird auf gesamter Länge umschlossen und beheizt.

Problematisch hierbei war zum einen die Probenförderung im Reaktor. Aufgrund des heißen Glasrohrs klebten die Klebebandreste bereits am Eingang des Rohres, sodass das Bestücken des Reaktors nur bei kleinsten Mengen möglich war.

Bei Bestückung von so kleinen Mengen kam das nächste Problem auf, dass die geschmolzene Probe nicht durch die Röhre geschoben werden konnte. Die Probenförderung wurde mittels eines Metallhakens manuell vorgenommen. An diesem Haken klebten jedoch die aufgeschmolzenen Reste aufgrund der kälteren Oberfläche, sodass ein ständiger Abtrag des Eduktes aus dem Reaktor stattfand. Somit konnte das Material nicht konstant erhitzt werden und eine Wiederholbarkeit des Versuches war nicht gegeben.

Weiterhin konnte das Produkt nicht vernünftig extrahiert werden. Optisch war eine flüssige Schmelze zu erkennen, die aufgrund der waagerechten Lage des Rohres nicht sauber entnommen werden konnte. An der Auslassseite konnte das entstehende Aerosol nicht verlustfrei aufgefangen werden. Nach Ende der Reaktion konnte Produkt herausgekratzt werden, jedoch war es verunreinigt mit Reststoffen, die nicht vollständig pyrolysiert waren. Es konnte zudem nicht sichergestellt werden, dass das erhaltene Produkt der gewünschten Temperatur ausgesetzt war, da eine homogene Temperaturverteilung sowie eine definierte Verweildauer des Produktes nicht gegeben war.

Insgesamt ist die manuelle Versuchsführung mit dem Rohrofen sehr aufwändig, kompliziert und ein Sauerstoffausschluss kann nicht garantiert werden. Das größte Problem ist jedoch, dass kein Produkt aufgefangen werden konnte und eine wiederholgenaue Versuchsführung nicht möglich war. Daher wurde diese Reaktorausführung für weitere Versuche verworfen.

Ausgehend von Erfahrungen aus dem Arbeitskreis wurde nach weiteren Überlegungen ein vertikal positionierter Ofen als vorteilhaft gesehen. Einerseits wurde dadurch das Einfüllen der Probe vereinfacht, gleichzeitig musste die Probe nicht manuell durch den Reaktor gefördert werden, da nach einmaliger Zugabe der Probe eine Schmelze entsteht. So wurde das gesamte Edukt aufgeheizt und konnte pyrolysiert werden. Weiterhin ist bei diesem Reaktordesign nur ein Ein- und Auslass vorhanden, sodass flüchtige Produkte einfacher aufgefangen werden können.

Passend zu diesen Überlegungen wurde ein elektrisch betriebener Muffelofen mit Regelung herangezogen und ein passender Einsatz konstruiert, der aus einem 38,1 mm Edelstahlrohr besteht. Am oberen Ende des Rohres wurde ein 3 mm Nebenabgangsrohr angeschweißt, durch das Gase entweichen können. Der Reaktor ist in folgender Abbildung 21 zu sehen.



Abbildung 21: Pyrolyse Reaktor mit Nebenabgang und Kühlung.

Dieser Nebenabgang war mit einem Metallmantel umhüllt, sodass dieser mit Kühl- oder Heizmedien wahlweise gekühlt oder geheizt werden konnte, wie in Abbildung 22 zu sehen. Das obere Ende des Rohres wurde mit einem Schlauchadapter an einen Silikonschlauch

angeschlossen. Der Silikonschlauch diente als luftdichte Produktschleuse, sodass dort das Versuchsmaterial eingefüllt und dann mit einem Stopfen verschlossen werden konnte. So wurden alle entstehenden Gase und flüchtige Produkte durch den Nebenausgang gezwungen. An den Nebenausgang wurde eine Kühlfalle mit dahinter geschalteten Waschflaschen angeschlossen. In der Kühlfalle soll das Produkt aufgefangen werden. Die Waschflaschen dichten die Apparatur ab, sodass ein Eindringen von frischer Luft verhindert wurde, gleichzeitig aber entstehender Druck entweichen konnte.



Abbildung 22: Erster Versuchsaufbau des Pyrolysereaktors.

Bei ersten Vorversuchen mit diesem Aufbau wurde ein PET-Gewebe für die Pyrolyse eingesetzt. Um die geeignete Pyrolysetemperatur zu definieren, wurde auf typische Verarbeitungstemperaturen der Petrochemie geschaut. Hier liegen bekannte Temperaturen für beispielsweise das Hydrocracking im Bereich von 250 - 400 °C.⁵³

Für den ersten Versuch wurde der Reaktor daher auf 400 °C geheizt, die Gewebestücke zerkleinert und in den Reaktor gefüllt. Bei Reaktionsbeginn wurde eine Aerosolentwicklung

beobachtet, die leicht in die Kühlzelle zog. Die Menge des Aerosols war jedoch so gering, dass kein Produkt extrahiert werden konnte. Dazu wurde beobachtet, dass ein weißer Feststoff im Nebenausgang kristallisierte und dieser dadurch verstopft wurde, sodass kein weiteres Aerosol in die Kühlzelle übergehen konnte. Daraufhin wurde eine elektrische Begleitheizung, wie in Abbildung 22 zu sehen, um den Nebenabgang gewickelt, um diesen zu erwärmen und eine vorzeitige Resublimierung des Produktes und damit ein Verstopfen des Nebenabganges zu verhindern. Durch die Begleitheizung kristallisierte der Feststoff zeitlich etwas später, der Nebenabgang war trotzdem vor Versuchsende verstopft, da das doppelwandige Rohr gut isolierte.

Da die eingebaute Kühlung des doppelwandigen Nebenabganges für die Produktextraktion und Versuchsführung hinderlich war, wurde anstelle des eingeschweißten kleinen Nebenabgangs ein einwandiges 5 mm Edelstahlrohr mit einem Gewinde an dem Reaktor angebracht. Dadurch war ein direkter Wärmeübertrag des Heizmantels möglich und das Rohr verstopfte bei weiteren Versuchen nicht mehr. Zudem war durch das eingebaute Gewinde eine Reinigung der Apparatur vereinfacht. Der optimierte Nebenabgang ist in folgender Abbildung 23 zu sehen.



Abbildung 23: Pyrolyse-Reaktor mit überarbeitetem Nebenabgang.

Ein zweiter Vorversuch mit den Gewebestücken wurde erneut bei 400 °C durchgeführt. Aufgrund des erwärmten Nebenabgangs schlug sich eine sehr geringe Menge des Aerosols in der Kühlfalle in Form von weißem Nebel nieder. Da nur eine sehr geringe Menge an Produkt erhalten wurde, konnte dieses nicht untersucht werden. Während des Versuches konnte ebenfalls eine leichte Gasentwicklung anhand der Waschflaschen beobachtet werden. Beim Öffnen des Reaktors waren einige weiße Kristalle am oberen Rand des Reaktors zu sehen, wie in Abbildung 24 zu sehen. Diese wurden aufgefangen und mittels GCxMS qualitativ analysiert. Eine erste qualitative Analyse zeigte, dass die Kristalle fast reine Benzoesäure sowie kleine Anteile von Benzoesäurederivaten enthalten.



Abbildung 24: Kristalline Ablagerungen aus einer PET-Pyrolyse.

4.3.2 Einfluss der Pyrolysetemperatur auf die Produktzusammensetzung

Die orientierenden Vorversuche der PET-Pyrolyse wurden bei Temperaturen von 400 °C bis 500 °C durchgeführt und lieferten ähnliche Ergebnisse in der Produktzusammensetzung. Für die weiteren Versuche wurde reines PET-Granulat verwendet, da die Handhabung von Granulat im Vergleich zu einem Klebeband genauer und die Bestückung des Reaktors einfacher war. Zudem kann hierdurch eine einfachere Produktzusammensetzung erwartet werden, wodurch die Analyse vereinfacht und die Produktzusammensetzung leichter zu erklären ist.

Um die Produktzusammensetzung in Abhängigkeit von der Pyrolysetemperatur definieren zu können, wurde eine Versuchsreihe mit unterschiedlichen Pyrolysetemperaturen erstellt. Für den geeigneten Temperaturbereich der Versuchsreihe wurde im Bereich von 400 °C bis

900 °C pyrolysiert und die erhaltenen Produkte mittels GCxMS-Kopplung identifiziert und quantifiziert. Die Analysenmethode der GCxMS wurde auf eine GCxFID übertragen, um die einzelnen Substanzen in ihrer Konzentration abzuschätzen. Besonders relevant waren hierbei die Anteile der markierten Substanzen. Dies ist notwendig, da eine Analyse mittels Massenspektrometrie aufgrund der stark unterschiedlichen Ionisierungswahrscheinlichkeiten keine Rückschlüsse auf Quantitäten möglich macht. An einer GCxFID kann erst in erster Näherung eine quantitative Betrachtung der Produktzusammensetzung realisiert werden, indem davon ausgegangen wird, dass ein Massenprozent einem Flächenprozent entspricht.

Der Versuchsaufbau war derselbe wie der in Kapitel 4.3.1 beschriebene und in Abbildung 22 dargestellte. Die jeweilige Pyrolysetemperatur wurde am Ofen eingestellt und mit der Zugabe des Eduktes gewartet, bis der Reaktor vollständig aufgewärmt und die Ofentemperatur konstant war.

Bei 400 °C war nur sehr leichte Aerosolentwicklung zu beobachten, sodass anfangs nahezu kein Übertrag von Aerosol in die Kühlfalle zu sehen war. Nach ungefähr 20 Minuten war eine leichte Ansammlung weißer Kristalle im Hals des Kühlers zu beobachten.

Bei 450 °C entstand weißes Aerosol, das sich als weiße Kristalle in der Kühlfalle niederschlug. Gleichermaßen war bei 500 °C, 550 °C und 600 °C zu beobachten. Bei diesen Versuchen konnte mit steigender Temperatur eine stärkere und schnellere Aerosolentwicklung beobachtet werden. Zudem konnte mit steigender Pyrolysetemperatur auch mehr Feststoff im Kühler aufgefangen werden, was auf die stärkere Aerosolentwicklung zurückzuführen ist. Bei 650 °C und 700 °C war ebenfalls eine starke Aerosolentwicklung zu erkennen, jedoch war das abgelagerte Produkt im Kühler von leicht plastischer Konsistenz und von gelblicher bis hellbrauner Farbe. Bei 800 °C, 900 °C und 1000 °C war eine sehr starke Aerosolentwicklung zu beobachten. Bei diesen Versuchen konnte eine schlagartige und sehr starke Gasbildung in den Waschfalschen beobachtet werden. Im Vergleich dazu, war bei den Versuchen mit niedrigerer Temperatur nur eine leichte, konstante Gasentwicklung zu erkennen. Diese Beobachtung lässt die Vermutung zu, dass bei höheren Temperaturen eine hohe Gasentwicklung stattfindet. Bei den Versuchen ab 800 °C wurde eine schwarz-braune Flüssigkeit erhalten, die in der Kühlfalle aufgefangen wurde. Das hier erhaltene Produkt erinnerte anhand der Farbe und Viskosität an ein typisches Pyrolyseöl, wie in der Literatur allgemeinhin beschrieben.

Die erhaltenen Produkte der jeweiligen Pyrolyseversuche wurden mittels GCxMS-Kopplung identifiziert. So wurden die gemessenen Massenspektren mit der NIST Datenbank abgeglichen.

Beispielhaft werden in den folgenden Abbildung 25, Abbildung 26 und Abbildung 27 die MS-Chromatogramme der Versuche bei 400 °C, 600 °C und 800 °C dargestellt.

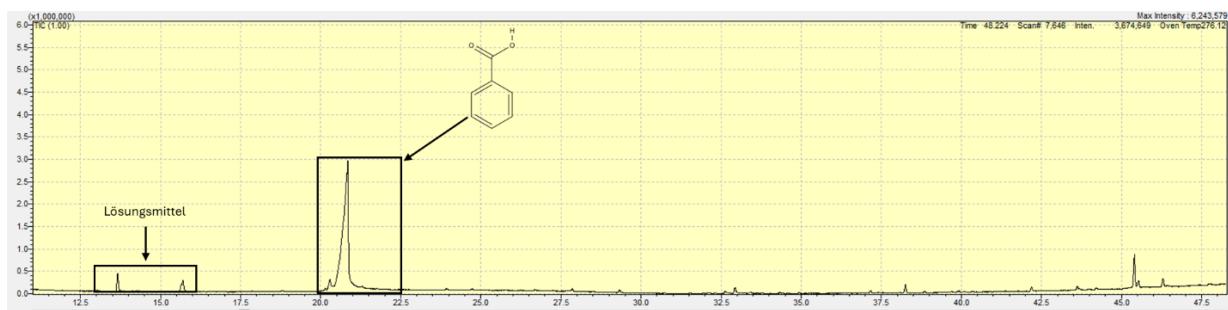


Abbildung 25: Chromatogramm des Pyrolyseproduktes des PET-Granulats bei 400 °C.

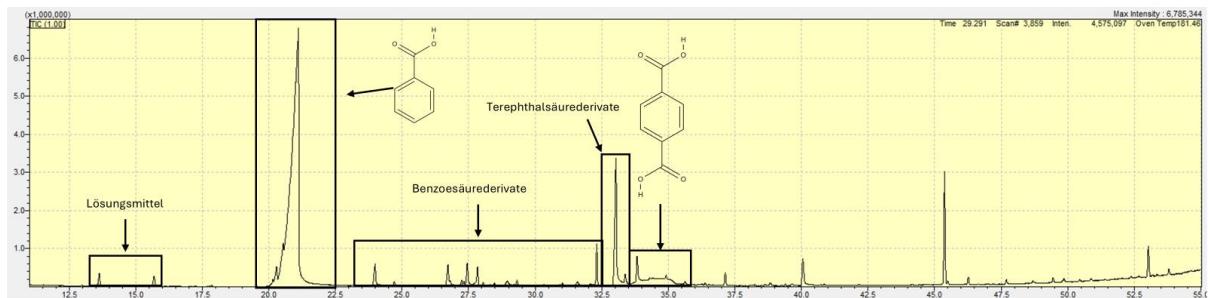


Abbildung 26: Chromatogramm des Pyrolyseproduktes des PET-Granulats bei 600 °C.

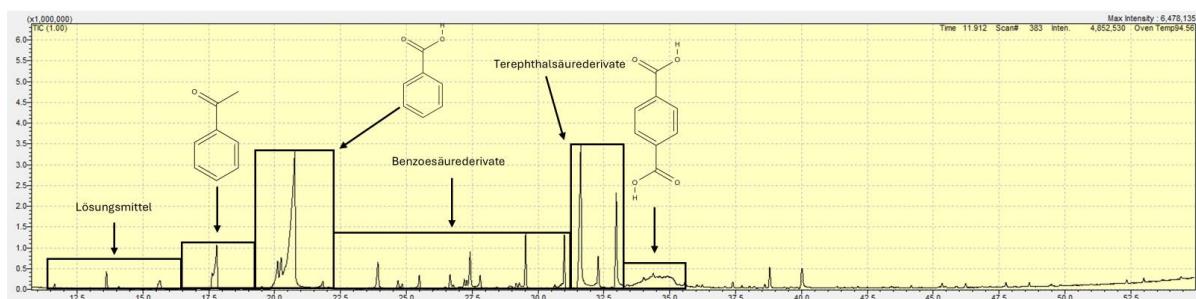


Abbildung 27: Chromatogramm des Pyrolyseproduktes des PET-Granulats bei 800 °C.

Die Ergebnisse der jeweiligen Inhaltsstoffe sowie deren Mengenanteile sind in folgender Tabelle 18 dargestellt.

Temperatur	Bestandteile
400 °C	Benzoesäure (100%)
450 °C	Benzoesäure (100%)
500 °C	Vinylbenzoat (5%); Benzoesäure (77%); Terephthalsäure (9%) Biphenyl (3%); Acetylbenzoesäure (5%)
550 °C	Benzoesäure (69%); Terephthalsäure (10%); Biphenyl (3%) Acetylbenzoesäure (11%); Ethylenglycoldibenzoat (2%)
600 °C	Benzoesäure (71%); Benzoesäurederivate (4%); Acetylbenzoesäure (10%); Biphenylcarbonsäure (3%); Terephthalsäure (9%); Ethylenglycoldibenzoat (3%)
650 °C	Benzoesäure (62%); Vinylbenzoat (4%); Biphenyl (5%) Acetophenon (8%); Acetylbenzoesäure (19%); Terephthalsäure (5%)
700 °C	Benzoesäure (45%); Vinylbenzoat (8%); Acetophenon (1,5%) Benzoesäurederivate (2%); Biphenyl (5%); Terephthalsäure (13%) Acetylbenzoesäure (21%); Biphenylcarbonsäure (3%)
750 °C	Benzoesäure (56%); Vinylbenzoat (6%); Biphenyl (4%) Terephthalsäure (15%); Acetylbenzoesäure (15%); Biphenylcarbonsäure (3%)
800 °C	Benzoesäure (36%); Vinylbenzoat (7%); Acetophenon (4%) Biphenyl (5%); Acetylbenzoesäure (11%); Biphenylcarbonsäure (3%) Ethylenglycoldibenzoat (19%); Terephthalsäure (15%)

Tabelle 18: Produktzusammensetzung bei unterschiedlichen Pyrolysetemperaturen.

Bei den beschriebenen Temperaturversuchen des PET-Granulats ist zu erkennen, dass die Benzoesäure mit höchster Reinheit bei 400 °C und 450 °C erhalten werden konnte. Eine annähernd ähnlich hohe Reinheit konnte zudem bei 500 °C erhalten werden.

Weiterhin wird bei den Versuchen deutlich, dass bei steigender Temperatur die Produktzusammensetzung komplexer wird. Daraus kann postuliert werden, dass bei steigender

Temperatur schnellere und dadurch mehr Spaltungsreaktionen ablaufen. So werden größere Moleküle mehrfach weiter gespalten, welches in vielfältigeren Rekombinationen resultiert. Daher ist die größte Variation unterschiedlicher Produkte in dem Pyrolyseprodukt zu finden, welches bei den Temperaturen von 700 °C bis 800 °C erhalten wird. Eine Diskussion der mechanistischen Abläufe wird in Kapitel 4.3.3 behandelt.

Die getrennt verlaufenden Spaltungs- und Rekombinationsreaktionen finden so lange statt, bis ein Molekül eine ausreichende Flüchtigkeit besitzt, um aus der Pyrolysezone zu entweichen. Außerhalb der Pyrolysezone ist die Wärmeenergie zu gering für weitere Spaltungsreaktionen. Überraschend ist der Nachweis einer signifikanten Menge an Terephthalsäure im Produkt. Mit einem Sublimationspunkt der Terephthalsäure von 404 °C kann davon ausgegangen werden, dass die Terephthalsäure an Kaltstellen im Reaktor anlagert, aggregiert und wieder in die Schmelze zurückfällt. Bis zu einer Temperatur von 600 °C ist ein hoher Benzoësäureanteil von 71 % zu erkennen. Aufgrund des Siedepunktes von 250 °C kann die Benzoësäure im Reaktorraum nicht kondensieren. Daher verbleibt sie in der Gasphase, wird aufgrund der vorherrschenden Thermik aus dem Reaktorraum ausgetragen und unterliegt keinen weiteren Spaltungsreaktionen. Im Vergleich dazu kann die Terephthalsäure aufgrund ihrer hohen Sublimationstemperatur im Reaktorraum aggregieren und weitere Spaltungen durchlaufen. Bereits bei einer Temperatur von 700 °C verringert sich der Anteil der Benzoësäure auf 45 %. Ab einer Temperatur von 800 °C ist sie nur noch zu 36 % anteilig vorhanden. Daraus ist zu schließen, dass die Benzoësäure bei hohen Temperaturen ab 700 °C nicht schnell genug aus der Pyrolysezone entweichen kann, sodass sie weiteren Spaltungsreaktionen unterliegt. Eine Übersicht der Benzoësäureanteile im Verhältnis zur Pyrolysetemperatur ist in folgender Abbildung 28 dargestellt.

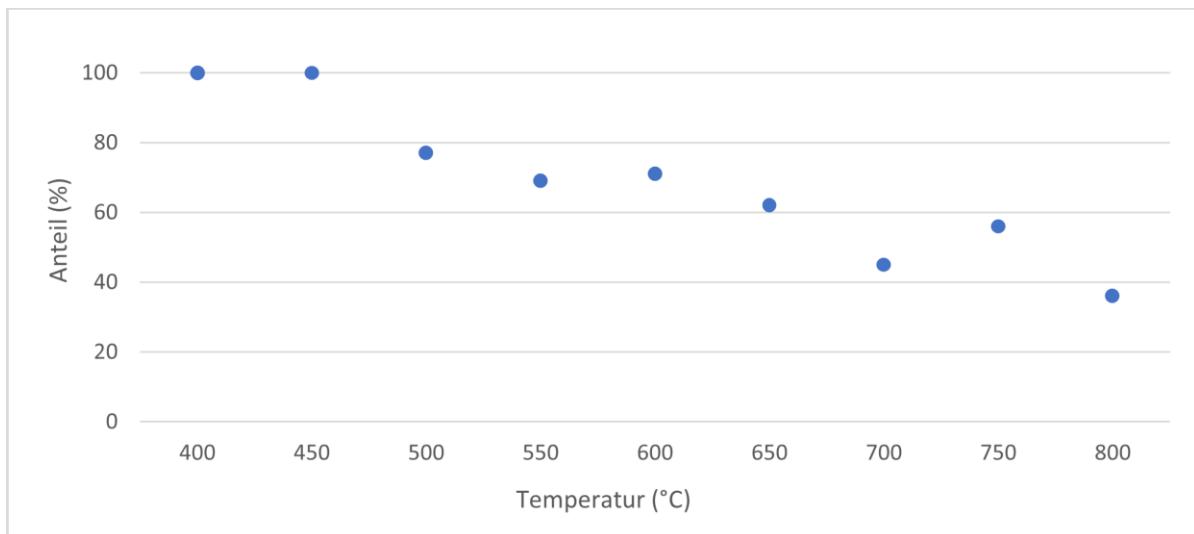


Abbildung 28: Benzoësäureanteil im Produkt bei unterschiedlichen Pyrolysetemperaturen.

Weiterhin ist bei diesen Versuchen aufgefallen, dass der in Abbildung 23 dargestellte Reaktor nicht optimal ist für die Extraktion von Aerosolen. Der Nebenausgang, der für die Produktgewinnung genutzt wird, wurde schnell von aggregierenden Feststoffen zugesetzt, wodurch eine kontinuierliche Produktentnahme nicht möglich ist. Weitere Versuche, wie zum Beispiel Temperaturmessungen innerhalb des Reaktors, waren aufgrund des geringen Rohrdurchmessers ebenfalls erschwert.

Daher wurde ein neuer Reaktor konstruiert, welcher aus einer Edelstahlhülse besteht, die den Ofenraum vollständig ausnutzt. Der neue Reaktor besitzt ein größeres Volumen und durch die größere Öffnung ist er leichter zu reinigen. Weiterhin verfügt er über Kupferringdichtungen. Der neue Reaktor ist in folgender Abbildung 29 dargestellt.



Abbildung 29: Endgültiges Design des Pyrolysereaktors mit diversen Anschlussmöglichkeiten.

Aufgrund des neuen Designs ist eine bessere Wärmeübertragung in den Reaktor mit geringeren Temperaturverlusten zu erwarten. Weiterhin ist bei dieser Reaktorkonfiguration ein größerer Einlass mit 5,5 cm Durchmesser vorhanden. Dadurch ist das Einfüllen des Versuchsmaterials schneller und unkomplizierter, da es beim Einfüllen keinen Kontakt zu den warmen Seitenwänden bekommt und daran hängenbleibt. Außerdem wurde der Reaktor dahingehend optimiert, dass ein Flanschdeckel aufgeschraubt werden kann. Dieser bietet diverse Anschlussmöglichkeiten, sodass beispielweise Temperaturfühler daran befestigt werden können. Der Flansch wurde durch eine Kupferringdichtung abgedichtet, sodass von einem luftdichten Reaktor ausgegangen werden kann.

4.3.3 Literaturvergleich der Bildung von Benzoesäure bei einer PET-Pyrolyse

Anders als erwartet und in der Literatur beschrieben wurde bei den orientierenden Vorversuchen kein Pyrolyseöl erhalten, sondern ein kristalliner Feststoff.⁵⁴ In der Literatur werden Pyrolyseprodukte häufig als Pyrolyseöl mit ähnlicher Zusammensetzung wie Rohöl charakterisiert.^{52,54} Problematisch für eine Verwendung von Pyrolyseölen in petrochemischen Anwendungen sind hohe Anteile an Heteroatomen in dem Pyrolyseöl, welche je nach Zusammensetzung des Eduktes in dem Pyrolyseprodukt zu finden sind.⁵⁴

In einer vergleichenden Untersuchung zur Pyrolyse von Polyolefinen und PET identifizieren Cit et al. „Benzoesäure [...] als ein Hauptbestandteil in Ölderivaten der PET-Pyrolyse.“ Zudem wurden hier weitere aromatische Hauptbestandteile wie Biphenyl, Terphenyl und Anthracen gefunden.⁵⁴

Die Untersuchungen des Produktes der orientierenden Vorversuche an der GCxMS zeigen ebenfalls einen großen Produktanteil an Benzoesäure. Entgegen der bekannten Literatur lag die Benzoesäure hier jedoch mit hoher Reinheit sowie dementsprechend nahezu keinen Begleitprodukten vor. Weiterhin wurde, anders als von Cit et al. beschrieben, keine Ölfraktion erhalten, sondern ein rein kristalliner Feststoff.⁵⁴

Nach theoretischen Überlegungen wären bei einer Pyrolyse der oben genannten PET-Stoffgemische eine Mischung diverser Spaltprodukte zu erwarten. Aus der Betrachtung der Bindungsenergien einer C-O-Bindung von 79 kcal/mol und einer C-C-Bindung von 82 kcal/mol, kann vermutet werden, dass bevorzugte Bindungsbrüche an den instabileren C-O-Bindungen stattfinden.^{55,56} Die bevorzugte Spaltung der C-O-Bindung ist besonders begünstigt, wenn bei niedrigen Temperaturen pyrolysiert wird. Bei höheren Temperaturen wird die Differenz der Bindungsenergien vernachlässigbar, sodass eine statistische Verteilung der Bindungsbrüche vorliegt. Dies ist mit den Ergebnissen aus Kapitel 4.3.2 nachgewiesen und wird auch bei Heise et al. beschrieben.⁵⁵ Mögliche Spaltprodukte des PET-Moleküls sind in folgender Abbildung 30 schematisch dargestellt.

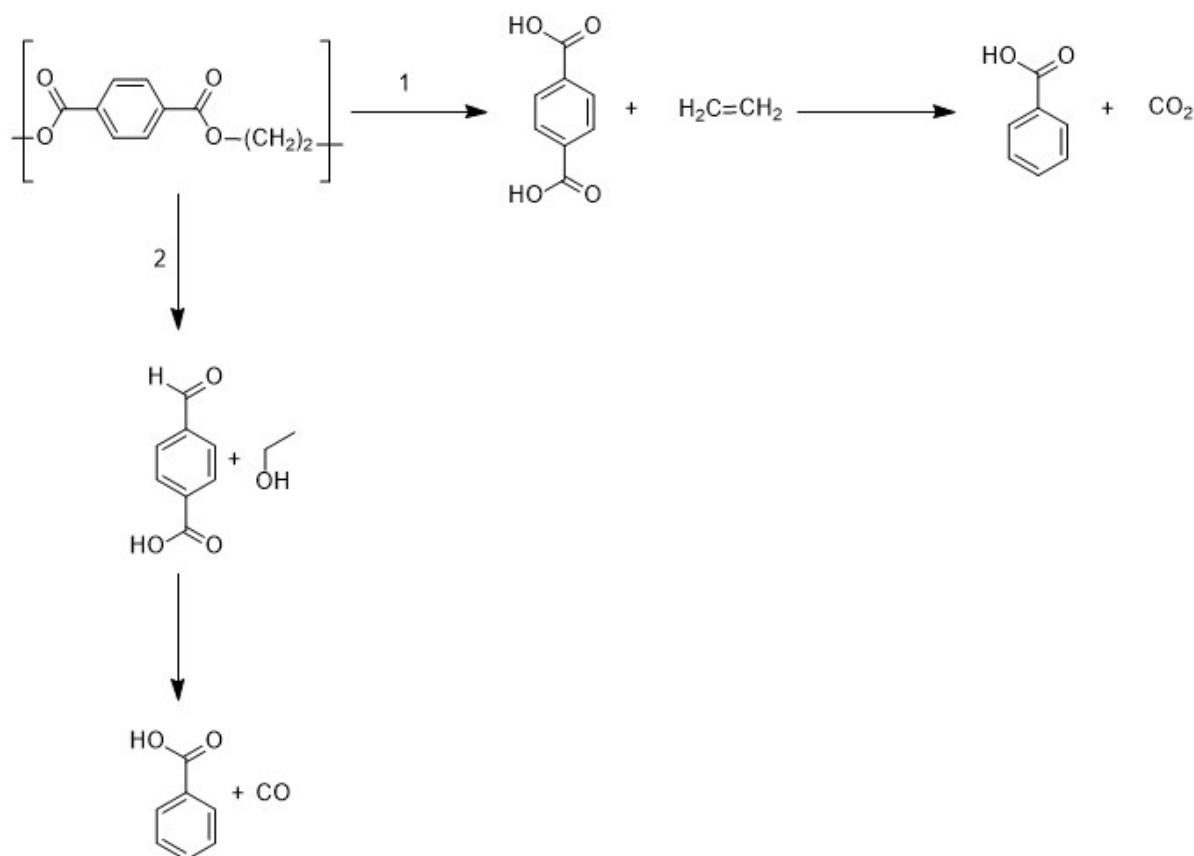


Abbildung 30: Schematische Darstellung der Spaltprodukte der PET-Pyrolyse.

Zu Beginn des Pyrolyseprozesses ist ein Zerfall der langen PET-Polymerketten in kurze Kettensegmente bis zu einzelnen PET-Oligomeren zu erwarten. Die Bindungsbrüche sollten, wie erklärt, an der C-O-Bindung begünstigt sein, sodass die einzelnen PET-Monomere erhalten werden. Wie in Abbildung 30 gezeigt, kann davon ausgegangen werden, dass nach dem Bindungsbruch an der C-O-Bindung die Terephthalsäure als Diradikal vorliegt und Ethen abgespalten wird. Im zweiten Schritt erfolgt dann eine Wasserstoffabstraktion, sodass die Terephthalsäure erhalten wird. Bei weiterem Energieeintrag auf die Terephthalsäure könnte sich CO_2 abspalten, sodass nach erneuter Wasserstoffabstraktion die Benzoesäure entsteht. Genauso ist ein Bindungsbruch wie im zweiten aufgezeigten Reaktionsweg möglich. So würde ein 4-Carboxybenzaldehyd entstehen, woraus nach der Abspaltung von CO ebenfalls die Benzoesäure erhalten werden würde.

Der hier verwendete Versuchsaufbau sowie die Pyrolysebedingungen zeigen zum Teil deutliche Unterschiede zur Literatur. Cit et al. nutzen beispielsweise eine Stickstoffatmosphäre mit einem Fluss von 30 ml/min während der Pyrolyse.⁵⁴ Eine aufwändige Inertgasumgebung entfällt bei dem hier genutzten Versuchsaufbau komplett. Auch die Probleme der Verstopfung der Anlage durch die kondensierende Benzoesäure, die Dixit et al. beschreiben, konnten in

diesem Versuchsaufbau nicht bestätigt werden.^{57,58} Bis zum Ende der Pyrolyse konnte ein Austrag von Produkt beobachtet werden.

4.3.4 Verwendung von Benzoesäure

Besonders im Vergleich zu einer typischen Pyrolyseöl-Mischung ist, dass hier mit der Benzoesäure eine Plattformchemikalie erhalten wird, die in der Industrie vielfältig Verwendung findet. Die Benzoesäure hat einen hohen wirtschaftlichen Wert, da sie als Feinchemikalie in Bereichen der Kosmetik-, Lebensmittel- und Tabakindustrie als Konservierungsmittel Verwendung findet.⁵⁹ Salze der Benzoesäure, wie beispielsweise Natriumbenzoat (E 211), Kaliumbenzoat (E 212) und Calciumbenzoat (E 213), sind aufgrund der besseren Löslichkeit weit verbreitet. Weiterhin ist Benzoesäure ein Ausgangsstoff für Duftstoffe, Weichmacher oder auch für Lokalanästhetika, in denen die Ester der Benzoesäure wie beispielsweise Benzoesäureethylester Einsatz finden.⁶⁰ Aus Benzoesäure können zudem Benzylester hergestellt werden, sodass sie als Biozide verwendet werden können. Traditionell wird Benzoesäure in großtechnischen Anlagen durch die Oxidation von Toluol gewonnen. Toluol als Ausgangsstoff wird dabei häufig durch die Destillation von Rohöl in Raffinerien gewonnen und basiert damit auf fossilen Rohstoffen.⁵⁹ Problematisch hierbei ist die Freisetzung von CO₂ bei der Gewinnung und Verwendung von Rohölzeugnissen. Um die Abhängigkeit der Benzoesäureproduktion von fossilen Rohstoffen zu entkoppeln, wird im Folgenden das Verfahren hinsichtlich der Extraktion der Benzoesäure optimiert, um eine alternative Quelle für diesen Rohstoff zu finden und die Abfallvermeidung voranzutreiben. Gerade mit Blick auf die stark an Bedeutung gewinnende Kreislaufwirtschaft kann diese Anforderung mit einem solchen Ansatz bedient werden. Insbesondere vorteilhaft ist, dass die Benzoesäure nicht nur für den PET-Kreislauf, sondern auch in andere Kreisläufe, wie oben beschrieben, eingeführt werden kann.

4.3.5 Pyrolyse von Terephthalsäure

Um die Theorie des Reaktionsmechanismus zu stärken, dass die Spaltung des PET-Monomers über das Zwischenprodukt der Terephthalsäure verläuft, wurde in diesem Versuch kommerziell erhältliche technische Terephthalsäure in einer Temperaturreihe pyrolysiert. Eine direkte Spaltung des PETs zur Benzoesäure ist nach den Erkenntnissen von Heise et al. nicht zu erwarten.⁵⁵

Dazu wurden 3 g Terephthalsäure eingewogen und bei Temperaturen von 400 °C bis 800 °C pyrolysiert. Auch hier war die Bildung eines Aerosols zu beobachten, welches in der Kühlfalle aufgefangen werden konnte. Die entstandenen Zwischenprodukte der Pyrolyse wurden mittels GCxMS charakterisiert.

In folgenden Abbildung 31 und Abbildung 32 sind MS Spektren der Pyrolyse von Terephthalsäure bei 450 °C und 800 °C beispielhaft dargestellt.

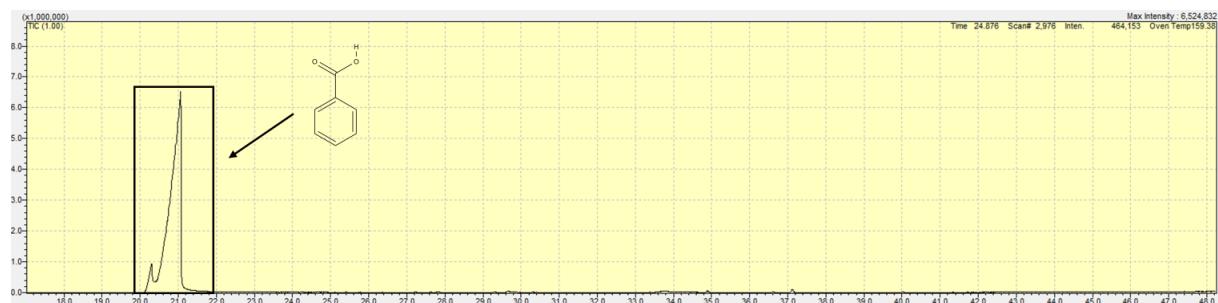


Abbildung 31: Auswertung des Terephthalsäure-Pyrolyseproduktes bei 450 °C

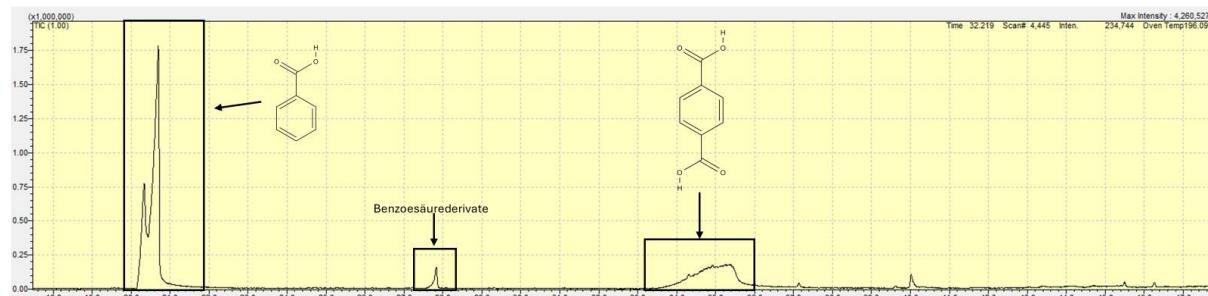


Abbildung 32: Auswertung des Terephthalsäure-Pyrolyseproduktes bei 800 °C

Die Analyse zeigt, dass bei der Pyrolyse von Terephthalsäure bei 450 °C nahezu reine Benzoësäure, ohne unerwartete Nebenprodukte, erhalten wurde. Bei den Versuchen wird deutlich, dass die Ausbeute der Benzoësäure jedoch abhängig ist von der eingestellten Temperatur. Bei höheren Temperaturen wurden größere Anteile von Biphenyl sowie Terephthalsäure gefunden, wie in Abbildung 32 zu sehen, welche durch Abdestillation des Ausgangsproduktes erhalten wurden.

Dies bestätigt die postulierte These aus Kapitel 4.3.2 und die Ergebnisse von Heise et al., dass der Zerfallsmechanismus des PET-Monomers stufenweise über die Terephthalsäure als Zwischenprodukt abläuft und diese bei niedrigen Temperaturen nahezu quantitativ in

Benzoesäure umgewandelt wird, wie in Abbildung 31 zu sehen.⁵⁵ Bei Temperaturen bis ungefähr 550 °C waren keine Nebenprodukte durch andere Spaltungsreaktionen zu beobachten. Die Entstehung von Biphenyl ist mit den hohen Temperaturen zu erklären, da dort weitere Spaltungen begünstigt werden. Hier wird die Carboxylgruppe der Benzoesäure abgespalten, sodass ein Benzolradikal entsteht. Dieses bildet mit einem weiteren Benzolradikal das Biphenyl. Weiterhin kann aufgrund der hohen Temperatur Terephthalsäure gasförmig entweichen, ohne einer Spaltung zu unterliegen, da die Terephthalsäure im Reaktor nicht resublimieren kann.

4.3.6 Einfluss des Temperaturgradienten im Reaktor auf die Pyrolyse

Der Nachweis aus Kapitel 4.3.5, dass bei einer Pyrolyse von Terephthalsäure reine Benzoesäure entsteht, bestätigt die postulierte Reaktionstheorie. Weiterhin stellt sich jedoch die Frage, wieso nur ein geringer Anteil an Terephthalsäure im Produkt zu finden ist und wieso die Benzoesäure entweichen kann und nicht weiter gespalten wird. In Kapitel 4.3.5 wurde beschrieben, dass der Dampfdruck der Terephthalsäure nicht ausreicht, um bei den Pyrolysetemperaturen aus dem Reaktor zu entweichen. Hingegen scheint der Dampfdruck der Benzoesäure ausreichend, um aus dem Reaktor ausgetrieben zu werden, ohne weitere Spaltungsreaktionen zu durchlaufen.

Besonders mit dem Umbau auf die letzte Reaktorkonfiguration, wie in Kapitel 4.3.1.1 beschrieben, wurde bisher davon ausgegangen, dass der gesamte Reaktor eine annähernd gleiche Temperatur vorweist, da er bis zum Deckel vom Pyrolyseofen umschlossen ist. Nach Ende der orientierenden Vorversuche wurden am oberen Rand des Reaktors weiße kristalline Rückstände gefunden.

Daher wird durch die bisherigen Ergebnisse postuliert, dass neben den Pyrolysevorgängen eine Art fraktionierte Destillation im inneren des Reaktors stattfindet. Dadurch ist die hohe Ausbeute an Benzoesäure besonders bei niedrigen Pyrolysetemperaturen zu begründen. Im Reaktor resublimiert die Terephthalsäure und die Benzoesäure kondensiert. In dem Übergang zwischen den beiden theoretischen Böden fließt eine Mischung aus flüssiger Benzoesäure und Terephthalsäure herab und wäscht die kristallisierte Terephthalsäure zurück in die Pyrolysezone, sodass sie erneuten Spaltungen unterliegt. Eine Erklärung für die Kristallisation an der Reaktorwand wäre, dass die Temperatur im Reaktor nicht gleichmäßig verteilt ist und somit Kaltstellen im Reaktor vorliegen.

Um eine ungleichmäßige Temperaturverteilung innerhalb des Reaktors nachzuweisen, wurde der Temperaturgradient innerhalb des Reaktors gemessen. Hierzu wurde ein Typ K Thermo-element verwendet, welches über einen Swatchlock-Verschluss in den Flanschdeckel des Reaktors eingebaut wurde. Das Thermometer wurde zu Beginn mit der Messspitze 5 mm über den Boden gehangen und nach drei Minuten jeweils um 1 cm erhöht. Es wurden zwei Versuche durchgeführt, bei denen die Temperatur des Ofens einmal auf 450 °C und auf 650 °C konstant eingestellt wurde und die Temperaturen an den unterschiedlichen Stellen gemessen wurde.

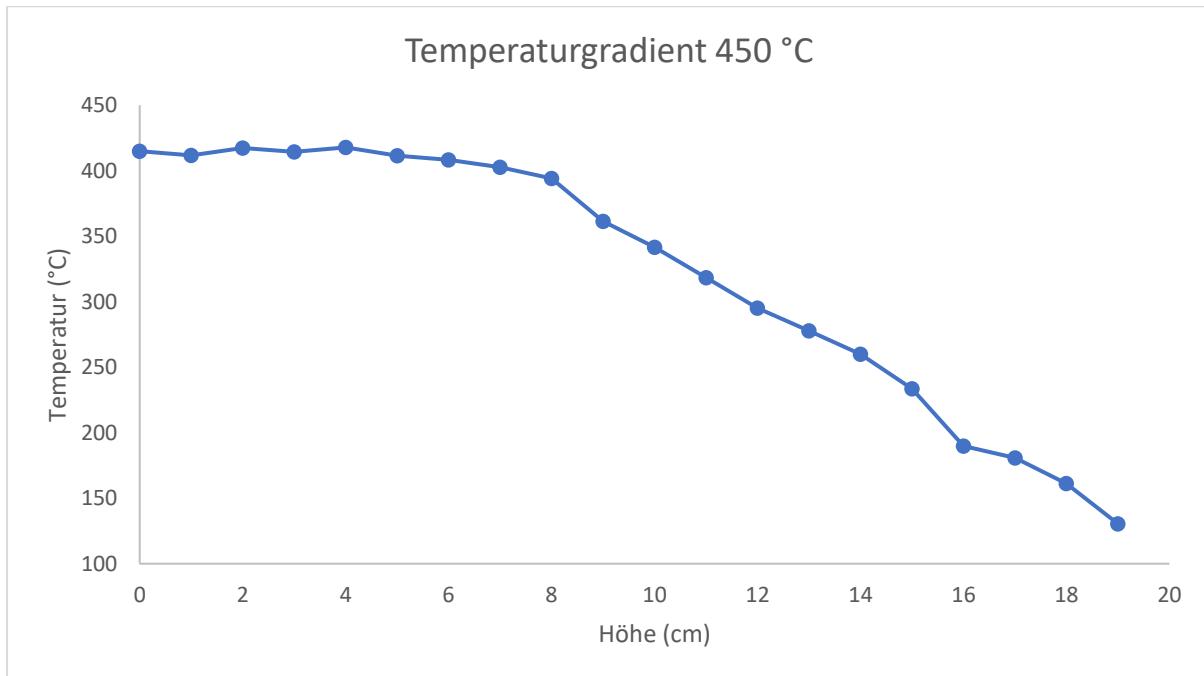


Abbildung 33: Temperaturgradient im Reaktor bei 450 °C.

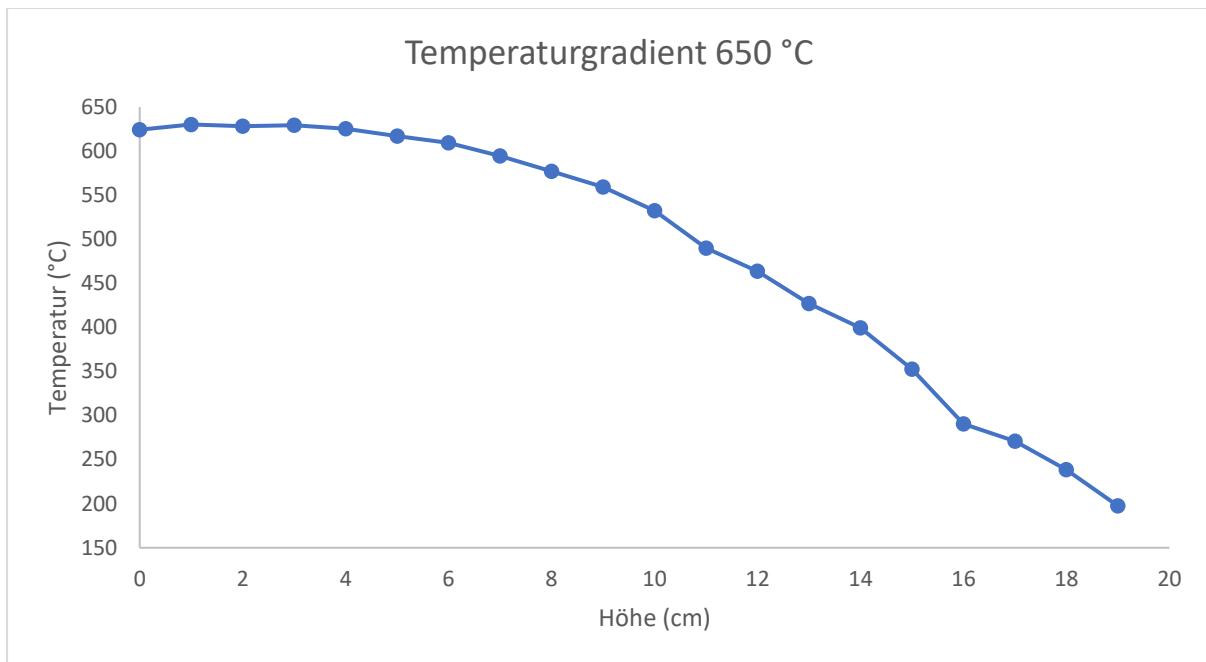


Abbildung 34: Temperaturgradient im Reaktor bei 650 °C.

Wie postuliert ist in Abbildung 33 und Abbildung 34 zu erkennen, dass ein starker Temperaturabfall innerhalb des Reaktors vorliegt. Zur besseren Veranschaulichung ist in folgender Abbildung 35 der Pyrolysereaktor schematisch dargestellt. Darin ist der Temperaturgradient aus Abbildung 34 eingezeichnet. Exemplarisch gilt diese Abbildung auch für die restlichen Temperaturversuche.

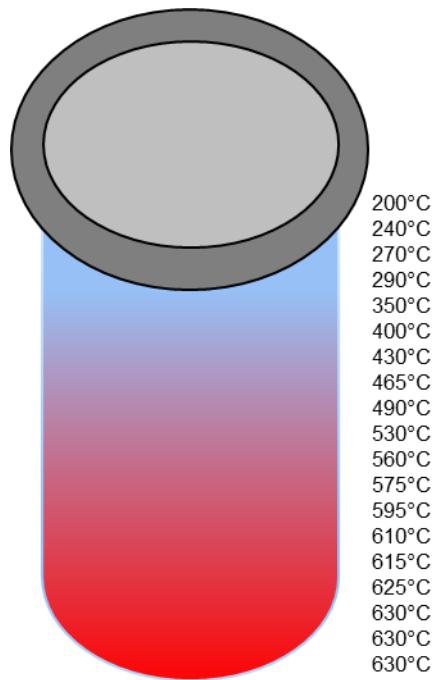


Abbildung 35: Schematische Darstellung des Temperaturverlaufs innerhalb des Reaktors.

Demnach kann davon ausgegangen werden, dass unterschiedliche Temperaturzonen im Reaktor vorliegen. Um diese Temperaturzonen genauer definieren zu können, müssen mehrere Temperaturmessungen gleichzeitig an unterschiedlichen Höhen im Reaktor durchgeführt werden. Dazu wurden vier der gleichen Thermoelemente genutzt, welche mit einem Mikrocontroller verbunden wurden. Dieser schreibt die Messwerte der vier Thermoelemente simultan mit und gibt die entsprechenden Messwerte der Temperatur, aufgetragen gegen die Zeit, an einen angeschlossenen Computer aus.

Beispielhaft wird in Abbildung 36 ein Diagramm des Temperaturverlaufs bei 450 °C von einem leeren Reaktor gezeigt. Der Reaktor hat eine Gesamtinnenhöhe von 15,5 cm. Der erste Temperaturfühler wurde 1 cm über dem Reaktorboden befestigt, der zweite Fühler 4,5 cm, der dritte 9 cm und der vierte 14 cm über dem Reaktorboden. Zur besseren Veranschaulichung der Fühlerposition kann Abbildung 35 herangezogen werden.

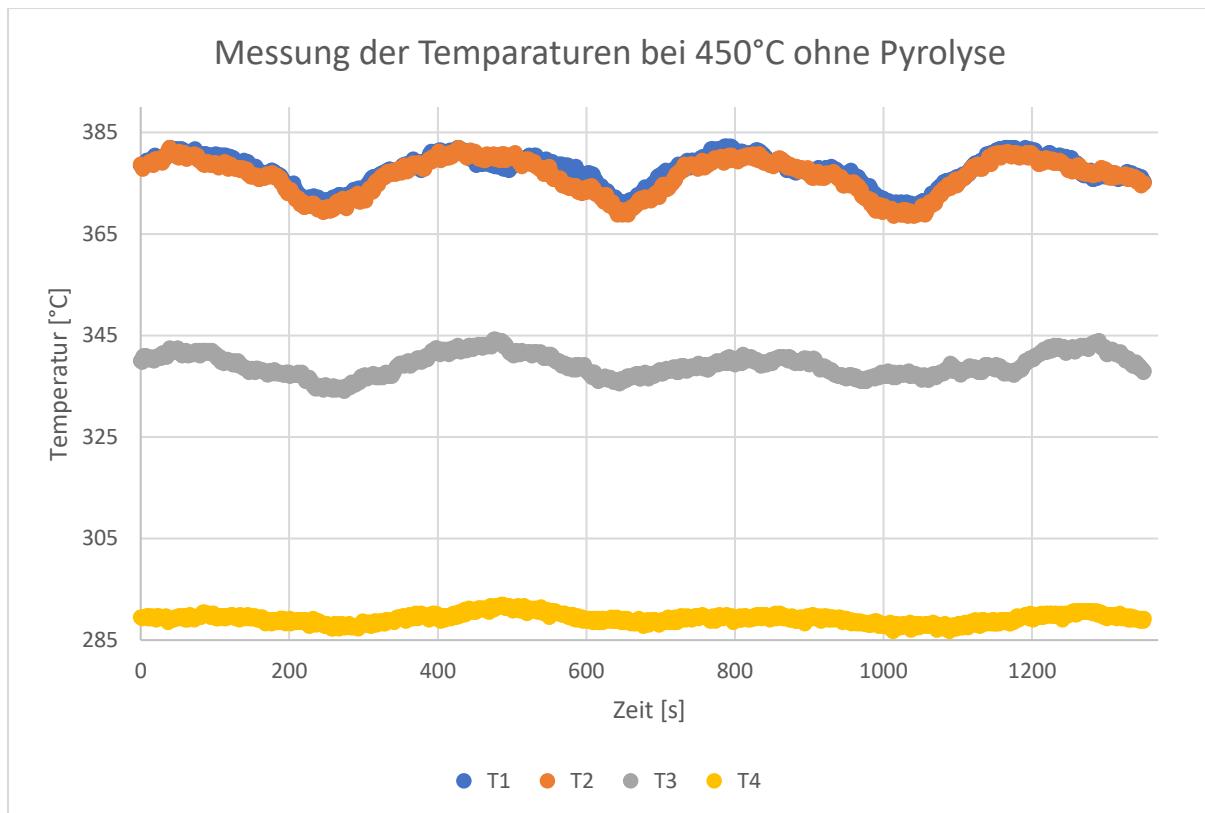


Abbildung 36: Temperaturmessung im Reaktor ohne Pyrolyse bei 450 °C.

Im Vergleich zu der Temperaturmessung bei 450 °C wurde eine Messung mit demselben Versuchsaufbau bei 750 °C durchgeführt.

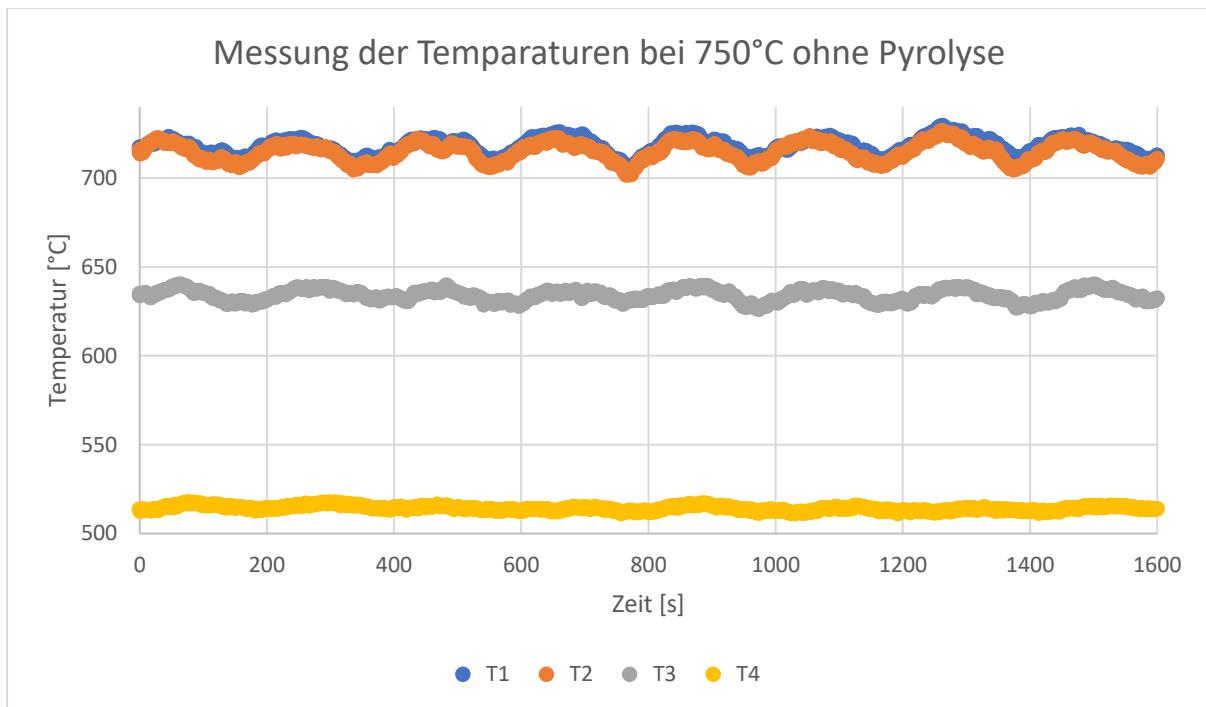


Abbildung 37: Temperaturmessung im Reaktor ohne Pyrolyse bei 750 °C.

Im Vergleich der beiden Auftragungen in Abbildung 36 und Abbildung 37 ist grundlegend der gleiche Temperaturverlauf zu erkennen, wobei die gemessenen Temperaturen bei dem 750 °C-Versuch logischerweise generell höher liegen als bei dem 450 °C-Versuch. In beiden Diagrammen überlagern die gemessenen Temperaturen des ersten und zweiten Fühlers. Bei den ersten drei Temperaturfühlern ist deutlich der Regelungsverlauf der Temperaturregelung des Ofens zu erkennen. Der dritte Fühler zeigt eine geringere Temperatur von 40 °C im Vergleich zu den Fühlern 1 und 2. Daraus ist zu schließen, dass der Ofen nur den unteren Teil beheizt. Der vierte Fühler ist deutlich kälter, mit einer Differenz von ungefähr 90 °C zum Fühler 1 und zeigt keinen Einfluss der Temperaturregelung mehr. Der Temperaturunterschied zwischen dem ersten und vierten Fühler bedeutet eine Temperaturdifferenz von fast 24 % über die gesamte Höhe des Reaktors.

Die gleichen Beobachtungen sind in Abbildung 37 bei 750 °C zu machen. Auch hier überlagern die Temperaturen von Fühler 1 und 2. Dass es sich bei dem Kurvenverlauf um den Einfluss der Regelung handelt, wird hier nochmal bewiesen. Bei 700 °C muss der Ofen häufiger regeln, um die Temperatur möglichst konstant zu halten, welches in einer höheren Frequenz des Regelungsverlaufes resultiert, die in der Abbildung 37 am Temperaturverlauf der Fühler 1 und 2 zu erkennen ist. Der dritte Fühler zeigt eine geringere Temperaturdifferenz von ungefähr 80 °C im Vergleich der Fühler 1 und 2. Beim vierten Fühler wurde eine Differenz von

ungefähr 200 °C zum Fühler 1 gemessen und lässt ebenfalls keinen Einfluss der Temperaturregelung erkennen.

Im Vergleich der Messfühler unabhängig der eingestellten Ofentemperatur ist wie beschrieben ein starkes Temperaturgefälle im Reaktor ersichtlich. Demnach kann die Theorie bestätigt werden, dass im Reaktor Temperaturzonen mit stark unterschiedlicher Temperatur vorliegen. Neben der örtlichen Konstanz der Temperaturen innerhalb des Reaktors ist ebenfalls eine zeitliche Gleichmäßigkeit der Temperaturen zu erkennen. Der Reaktor kann nach diesen Versuchen in drei Temperaturzonen eingeteilt werden. In der ersten Temperaturzone, die vom Reaktorboden bis zu einer Höhe von 6 cm definiert wurde, wurde ein nahezu konstanter Temperaturbereich, unabhängig von der eingestellten Temperatur, gemessen, wie in Abbildung 36 und Abbildung 37 zu erkennen. Die zweite, darüber befindende Zone liegt auf einer Höhe von ungefähr 6 cm bis 11 cm. Hier ist bereits ein Temperaturabfall von 40 °C bis 80 °C, abhängig von der eingestellten Temperatur, zu beobachten. Darüber befindet sich die dritte und letzte Zone, welche den kältesten Bereich des Reaktors darstellt. Diese Zone liegt auf einer Höhe von 11 cm bis zum oberen Ende des Reaktors. Hier ist eine Temperaturdifferenz von 90 °C bis 200 °C festzustellen. Dies zeigt, dass der Temperaturgradient bei steigenden Temperaturen weiterhin linear verläuft, die gesamte Kurve jedoch verschoben ist, wie in Abbildung 35 zu erkennen ist.

Um den Einfluss der drei identifizierten Temperaturzonen im Reaktor auf die Pyrolyse zu untersuchen, wurden erneut Versuche bei diversen Pyrolysetemperaturen aufgenommen. Hierbei wurden die vier Temperaturfühler an unterschiedlichen Höhen im Reaktor befestigt und 5 g PET-Granulat pyrolysiert. In Abbildung 38 ist der Temperaturverlauf der Pyrolyse bei 500 °C dargestellt.

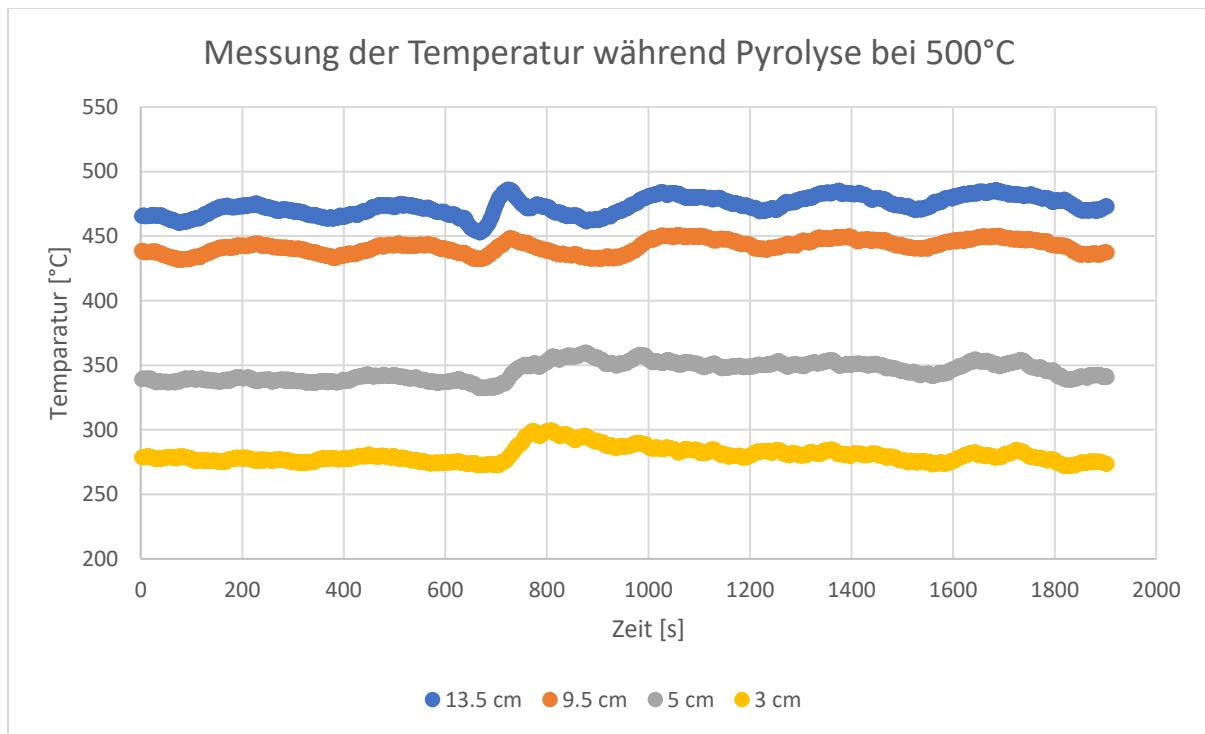


Abbildung 38: Temperaturmessung während Pyrolyse bei 500 °C mit Pyrolysebeginn bei 600 s.

Um den Start der Reaktion genau nachvollziehen zu können, wurde das PET-Granulat zugegeben, nachdem der Reaktor im thermischen Gleichgewicht war. Wie zu erwarten, fiel die gemessene Temperatur an Fühler 1 und 2 kurz nach Zugabe des PET-Granulats bei 670 Sekunden kurzzeitig. Nachdem das Granulat aufgeschmolzen wurde, stabilisierte sich die Temperatur in Zone 1 wieder. An Fühler 3 war danach ein kleiner Temperaturpeak bei 780 Sekunden zu erkennen, welcher auf die freiwerdenden Gase bei der Aufspaltung des PET zurückzuführen ist. Die entstehenden Gase wie CO₂ steigen aufgrund ihrer Flüchtigkeit schnell auf und tragen die enthaltene Energie der Zone 1 mit in Zone 2. In Zone 3 sind diese Gase so weit abgekühlt, dass sie keine signifikante Temperaturerhöhung mehr bedingen.

Im Vergleich zu Versuchen mit höheren Temperaturen ist, wie bereits bei den Temperaturversuchen ohne Pyrolyse, der gleiche Kurvenverlauf zu erkennen.

Die Versuche wurden bei jeweils drei unterschiedlichen Thermometeranordnungen durchgeführt, um einen möglichst lückenlosen Überblick über die Reaktortemperatur während der Pyrolyse zu erhalten. In folgender Abbildung 39 ist der Temperaturverlauf gegen unterschiedliche Höhen im Reaktor aufgetragen. Die jeweiligen übereinandergelegten Kurven beschreiben jeweils einen Zeitpunkt während des Versuchsablaufes.

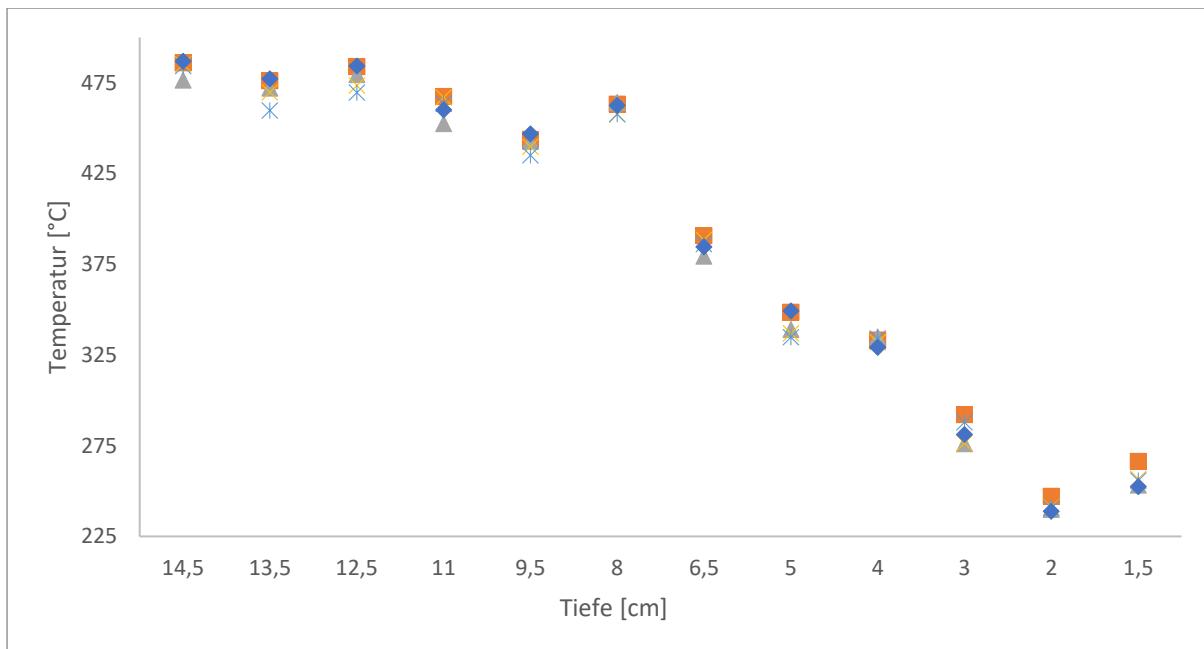


Abbildung 39: Temperaturmessungen bei unterschiedlichen Höhen und Zeitpunkten der Pyrolyse.

In Abbildung 39 ist der postulierte Temperaturverlauf nochmal dargestellt und zeigt deutlich den Temperaturabfall über die Höhe des Reaktors. In diesem Beispiel bei 500 °C ist die Zugeabe des Probematerials in Form eines Peaks zu erkennen. Zudem ist die beschriebene Gasentstehung bei einer Höhe von 5 cm zu sehen.

Auffällig ist, dass die Temperatur innerhalb der postulierten Zonen relativ konstant bleibt, unabhängig von den ablaufenden Spaltungsvorgängen der Terephthalsäure zur Benzoesäure. Diese Beobachtung wird dadurch begründet, dass der Reaktor eine hohe thermische Masse aufweist und der Ofen eine Heizleistung von 2,2 kW liefert. Die Reaktionsenthalpie einer Decarboxylierung von aromatischen Dicarbonsäuren wie der Terephthalsäure liegt bei etwa 170 kJ/mol.⁶¹ Bei einer Menge von 3 g (18,06 mmol) Terephthalsäure, die eine Decarboxylierung durchläuft, würde dafür 3,07 kJ Energie benötigt. Daher ist die Reaktion in dem Temperaturverlauf nicht erkennbar.

Im Zusammenhang mit den Ergebnissen der Temperaturversuche ohne Pyrolyse kann die postulierte Annahme bestätigt werden, dass die Benzoesäure aufgrund ihres Dampfdrucks aus der heißen und damit energiereichen Zone 1 entweichen kann und somit in der zweiten und dritten Reaktorzone keine weiteren Spaltungsreaktionen ablaufen. In der ersten Reaktorzzone laufen die Pyrolysevorgänge wie zum Beispiel Spaltungsreaktionen ab. In der Grenzphase zwischen Zone 1 und 2 steigen die gasförmigen Produkte auf und kühlen in Zone 2

bereits deutlich ab. Aufgrund von Thermik und Flüchtigkeit werden die Stoffe in Zone 3 überführt. Schwerflüchtige Stoffe mit hohen Siede- oder Schmelzpunkten, wie die Terephthalsäure, können aus Zone 3 aufgrund der geringen Temperatur und des hohen Siedepunktes, nicht entweichen und fallen daher wieder in die Schmelze zurück. Dort wird sie weiter decarboxyliert, sodass die Benzoësäure entsteht. Die Temperatur in Zone 3 ist ausreichend hoch, sodass die Benzoësäure dort nicht aggregieren kann. Aufgrund des thermischen Grundsatzes, dass warme Gase aufsteigen und zusätzlich durch die gebildeten Gase ein aufsteigender Gasstrom im Reaktor entsteht, wird die Benzoësäure aus dem Reaktor ausgetragen. Bei $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ liegen bis zu einer Höhe von ungefähr 7 cm Temperaturen von über $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ im Reaktor vor. Danach findet sich in dem Reaktor eine Mindesttemperatur von $240\text{ }^{\circ}\text{C}$. Dies zeigt deutlich, dass die Terephthalsäure bereits in Zone 2 resublimiert und in die heiße Zone 1 zurückfällt. Die Benzoësäure hingegen kann im Reaktor nicht aggregieren und kann daher aus dem Reaktor ausgetragen werden. Diese Beobachtungen sind in folgender Abbildung 40 schematisch dargestellt.

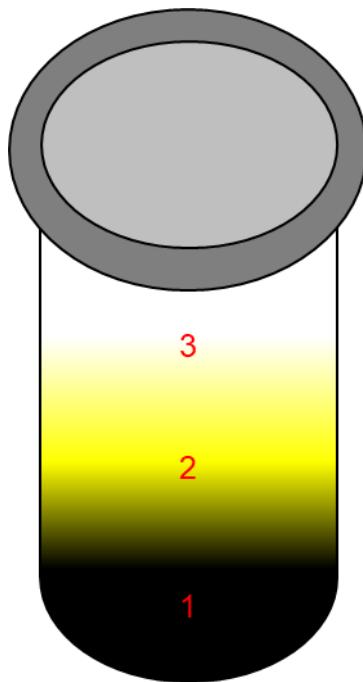


Abbildung 40: Skizze des Reaktors mit den eingezeichneten Phasenübergängen. 1 Schmelze; 2 Terephthalsäure-Zone; 3 Benzoësäure-Zone.

Diese Beobachtung wird zusätzlich durch die Ergebnisse aus Kapitel 4.3.5 gestützt, da bei höheren Pyrolysetemperaturen mehr Terephthalsäure erhalten wird. Im Vergleich der beiden Abbildung 36 und Abbildung 37 wird deutlich, dass aus der höheren eingestellten Temperatur ebenfalls eine höhere Temperatur in Zone 2 und 3 resultiert. Durch diese Verschiebung der

absoluten Temperaturen resublimiert die Terephthalsäure nicht in Zone 2 oder 3 und kann daher ausgetragen werden.

Die gezeigten Versuche bestätigen die postulierte Theorie, dass neben den Pyrolysevorgängen auch eine fraktionierte Destillation abläuft. Aufgrund des Temperaturgradienten innerhalb des Reaktors werden theoretische Trennböden ausgebildet, die eine Rückführung der Terephthalsäure in die Pyrolysezone ermöglichen. Aufgrund des destillationsähnlichen Aufbaus und der hohen Sublimationstemperatur kann die Terephthalsäure nicht aus dem Reaktor entweichen und wird von flüssiger Benzoesäure heruntergewaschen. Daher wird besonders im Temperaturbereich von 450 bis 550 °C eine hohe Reinheit der Benzoesäure erhalten.

4.3.7 Bestimmung der Ausbeute

Um mit dem vorhandenen Reaktor die Reaktionsausbeute zu bestimmen, musste dieser angepasst werden, sodass Druck entweichen, das Produkt jedoch aufgefangen werden kann. Hierzu wurde als eine Möglichkeit, das Produkt aufzufangen, ein großer Luftkühler angedacht. Hierzu wurde ein Dephlegmator als Vorbild genommen, da die entstehenden Aerosole abgekühlt werden müssen, sodass sie aggregieren können. Somit wurde ein 40 cm langes Edelstahlrohr mit dem gleichen Innendurchmesser wie der Reaktor konstruiert. So konnte sichergestellt werden, dass keine Engstellen an den Übergängen zwischen Reaktor und Kühler entstehen, an denen das Produkt an ungewollter Stelle aggregieren kann. Das Kühlrohr wurde an beiden Enden mit dem gleichen Flanschbild des Reaktors ausgestattet, sodass der Kühler auch in Kombination mit dem Flanschdeckel verwendet werden kann.

Nach ersten Vorversuchen zur Optimierung des Designs war zu erkennen, dass die Kühlwirkung des Kühlers ausreichend war, da kein Aerosol aus dem Kühler austrat. Aufgrund der glatten Wände gab es gleichzeitig jedoch keine Möglichkeit für das Aerosol zu aggregieren, sodass kein Produkt erhalten werden konnte.

Daraufhin wurde, angelehnt an einen Demister, das Kühlrohr mit Edelstahlwolle gefüllt, so dass Gase zwar entweichen, gleichzeitig jedoch viel Oberfläche für Aggregation des Aerosols zur Verfügung stand. Mittels optischer Kontrolle wurde vor jeder Verwendung geprüft, dass keine Lichtdurchlässigkeit im Kühlnetz vorlag. So konnte gewährleistet werden, dass die Aerosole ausschließlich nach Kontakt mit der integrierten Edelstahlwolle als Füllung den Kühler passieren konnten.

Bei den Versuchen konnte die Effektivität des selbstgebauten Demisters bestätigt werden, da kein Aerosol aus dem Kühler entweichen konnte und nach Ende der Reaktion große Mengen weißer Kristalle in der Edelstahlwolle zu sehen waren.

Für die Bestimmung der Ausbeute wurde das Kühlrohr mit Edelstahlwolle vor Versuchsbeginn tariert. Es wurden drei Versuche mit PET-Granulat bei 500 °C durchgeführt. Die Ergebnisse sind in folgender Tabelle 19 dargestellt.

Probenmenge (g)	Produktmenge (g)	Ausbeute	Theoretische Ausbeute
20,0	8,6	43,0 %	67,7 %
20,0	8,1	40,5 %	63,7 %
35,0	14,1	40,3 %	63,4 %

Tabelle 19: Bestimmung der Ausbeute einer PET-Pyrolyse bei 500 °C.

Diese drei Versuche mit unterschiedlichen Einsatzmengen zeigen, dass der Prozess konstant über 40 % Ausbeute von Benzoesäure bezogen auf die Einsatzmenge liefert. Bezogen auf die theoretische Ausbeute an Benzoesäure wurde sogar über 63 % Ausbeute erreicht. Die restlichen Bestandteile mit einem Anteil von 37 % sind entweichende Gase.

4.3.8 Verwendung von Stützgas bei der Pyrolyse

Das Prinzip aus Kapitel 4.3.6, dass durch eine Variation der Temperaturen die Produktzusammensetzung gesteuert werden kann, initiierte die Idee, die Extraktion der Terephthalsäure durch einen Stützgasstrom zu unterstützen. Hier wird postuliert, dass die geringe Flüchtigkeit der Terephthalsäure durch einen zugesetzten Stützgasstrom ausgeglichen werden kann. Die erfolgten Messungen der Temperaturzonen innerhalb des Reaktors haben gezeigt, dass die Terephthalsäure in Zone 2 und 3 resublimiert. Weiterhin wurde die Theorie der parallel ablaufenden fraktionierten Destillation bestätigt, welche der Grund ist, für die hohe Reinheit und Ausbeute der Benzoesäure.

Nachdem das Verfahren auf die Gewinnung von Benzoesäure optimiert wurde, sollte das Verfahren hinsichtlich der Gewinnung des zweitgrößten Anteils im Produkt, der Terephthalsäure, optimiert werden. Da, wie vorher postuliert der Reaktionsmechanismus des PET-Monomers

über die Terephthalsäure als Zwischenprodukt läuft, muss die Reaktion an dieser Stelle unterbrochen werden.

In Kapitel 4.3.6 wurde postuliert, dass die Terephthalsäure aufgrund ihres geringen Dampfdrucks nicht aus der Pyrolysezone entweichen kann und zudem die Ausbildung der theoretischen Böden eine Rückführung der Terephthalsäure in die Pyrolysezone ermöglicht. Nach theoretischen Überlegungen wurde ein Inertgasstrom als Möglichkeit zum Austreiben der Terephthalsäure aus der Zone 2 angedacht, sodass die fraktionierte Destillation ausbleibt. In dem folgenden Versuch soll dies durch die Verwendung eines Stickstoffstroms untersucht werden.

Dazu wurde ein Flanschaufsatz für den Reaktor konstruiert, welcher zwischen den Reaktor und den Deckel gesetzt werden kann und ebenfalls mit Kupferringdichtungen abgedichtet wurde. Der Flansch ist mit einem 3 mm Edelstahlrohr ausgestattet, durch das Gas auf den Boden des Reaktors geleitet werden kann. Nach Außen besitzt der Flansch einen Schlauchanschluss, sodass ein Stützgasstrom angeschlossen werden kann. Mit diesem Flanschaufsatz ist es möglich den Inertgasstrom vom Reaktorboden durch die gesamte Schmelze zu leiten und damit den Austrag der Terephthalsäure aus der Schmelze zu unterstützen.

Der Stickstoff wurde an einem Wandanschluss abgenommen, an dem der Druck anhand eines Manometers eingestellt werden konnte. Um die Durchflussmenge zu bestimmen, wurde vor den Flansch eine Gasuhr angeschlossen und bei unterschiedlichen Druckeinstellungen der Volumenstrom pro Minute gemessen. Die Ergebnisse sind in folgender Tabelle 20 dargestellt.

Druck (bar)	Durchfluss (l/min)
0,2	10,25
0,1	7,50
0,05	5,75

Tabelle 20: Volumenströme des Stützgases.

Die Pyrolyseversuche wurden bei eingestellten Drücken von 0,05 bar, 0,1 bar und 0,2 bar durchgeführt. Hierzu wurde jeweils 30 g reines PET-Granulat verwendet. Während der Versuche konnte ein konstanter und starker Aerosolaustrag im Vergleich zu den bisherigen Pyrolysen festgestellt werden, welcher auf den Volumenstrom des Inertgases zurückzuführen ist. Bei allen Versuchen wurde ein weißlich-gelber Feststoff erhalten, der optisch bei allen

Produkten nicht zu unterscheiden war. Auffällig war zudem, dass nach Ende der Pyrolyse eine große Menge an gelblichem Feststoff auf dem 90°-Bogen des Gasrohrs ablagerte. Eine Erklärung dafür ist, dass das Gasrohr durch den konstanten Stickstofffluss gekühlt wurde. Dabei entstand eine Temperatursenke, sodass das Produkt dort kondensieren und aggregieren konnte.

Für die Analysen wurden Proben im Reaktor und Kühler genommen. Unabhängig von dem gewählten Gasdruck wurden im Kühler weiße Kristalle erhalten.

Die Ergebnisse der GCxMS zeigen, dass in der Probe, die vom Gasrohr gesammelt wurde, nahezu reine Terephthalsäure erhalten wurde, welches erneut den postulierten Reaktionsmechanismus bestätigt. Durch den Stützgasstrom können zwei Effekte, die die Entnahme der Terephthalsäure aus dem Pyrolysevorgang begünstigen, erklärt werden. Wie in den theoretischen Überlegungen angedacht, kann durch das Stützgas der niedrige Dampfdruck der Terephthalsäure ausgeglichen werden, sodass diese aus der Pyrolysezone ausgetragen werden kann und keinen weiteren Spaltungen unterliegt. Weiterhin kühlte der kontinuierliche Stützgasstrom die Pyrolysezone und damit auch die entstehende Terephthalsäure. Dadurch wird die erforderliche Energiemenge für eine Decarboxylierung zur Benzoësäure nicht mehr erreicht.

Im Vergleich der unterschiedlichen eingestellten Drücke, wurde bei 0,2 bar vergleichsweise viel Terephthalsäure im Kühler aufgefangen, jedoch nur eine geringe Menge auf dem Gasrohr. Bei 0,1 bar wurde weniger Terephthalsäure und Benzoësäure im Kühler erhalten. Auf dem Gasrohr wurde hingegen am meisten Terephthalsäure bei 0,1 bar erhalten. Bei 0,05 bar wurde die größte Menge an Terephthalsäure im Kühler und auf dem Gasrohr erhalten.

Somit ist ein leichter Gasstrom optimal für das Austragen von Terephthalsäure. Durch den Einsatz des Stützgases ist es daher möglich, die Produktzusammensetzung des Pyrolyseverfahrens nach Belieben zu steuern, ohne starke Ausbeute- oder Reinheitsverluste hinzunehmen. Die Pyrolyse ohne Stützgas ermöglicht die Benzoësäuregewinnung, wird der Stützgasstrom zugeschaltet, wird mehr Terephthalsäure erhalten. Diese Modifikationsmöglichkeit ermöglicht eine variable Produktsteuerung, die eine Anpassung auf ändernde Marktbedingungen oder Rohstoffbedarf möglich macht, ohne die Produktionsanlage oder das Verfahren grundlegend aufwändig anzupassen.

Beispielhaft ist hier in Abbildung 41 ein MS-Spektrum des Produktes aus dem 0,2 bar Versuch dargestellt. Die Verschiebung der Peaks der Benzoësäure auf eine Retentionszeit von 16,005 und der Terephthalsäure auf 28,245 im Vergleich zu den vorangegangenen Versuchen ist darin begründet, dass eine zweite Säule aus der GC entfernt wurde.

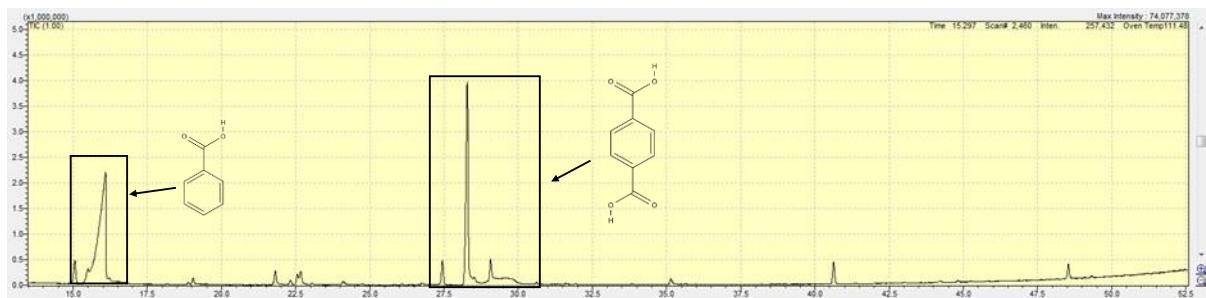


Abbildung 41: Chromatogramm des Pyrolyseproduktes des PET-Granulates bei 0,2 bar Stützgas.

4.3.9 Übertragung der PET-Pyrolyse auf eine Realprobe

Nachdem die Machbarkeit der Benzoesäuregewinnung anhand von reinem PET-Granulat bewiesen wurde, soll das Verfahren auf reale Produktionsausschüsse angewendet werden. Zunächst sollten die Ergebnisse auf das technische Material übertragen werden. Dazu wurde in der nächsten Versuchsreihe ein PET-Gewebe pyrolysiert. Im Vergleich eines PET-Gewebes zu einem PET-Granulat sind diverse Hilfsstoffe für die Verarbeitung sowie Farbstoff zusätzlich in dem Edukt vorhanden. Hierbei sind weitere Spaltprodukte sowie Nebenreaktionen im Vergleich zum PET-Granulat zu erwarten. Beispielhaft werden in den folgenden Abbildung 42, Abbildung 43 und Abbildung 44 die GCxMS-Chromatogramme der 450 °C, 600 °C und 900 °C-Versuche dargestellt.



Abbildung 42: Chromatogramm des Pyrolyseproduktes des PET-Gewebes bei 450 °C.

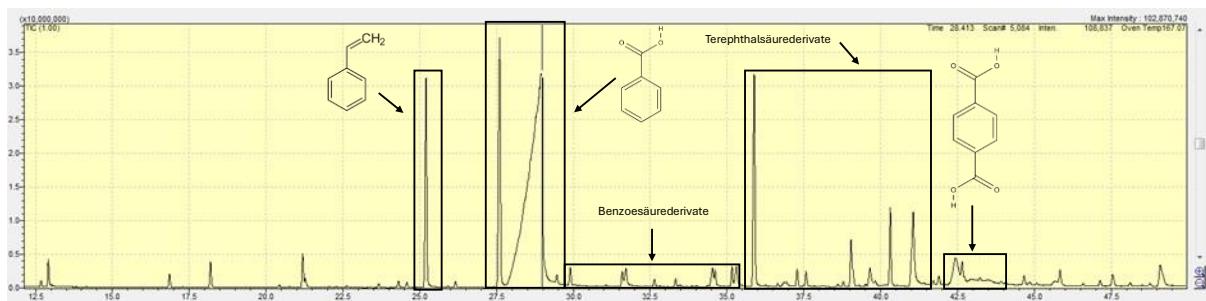


Abbildung 43: Chromatogramm des Pyrolyseproduktes des PET-Gewebes bei 650 °C.

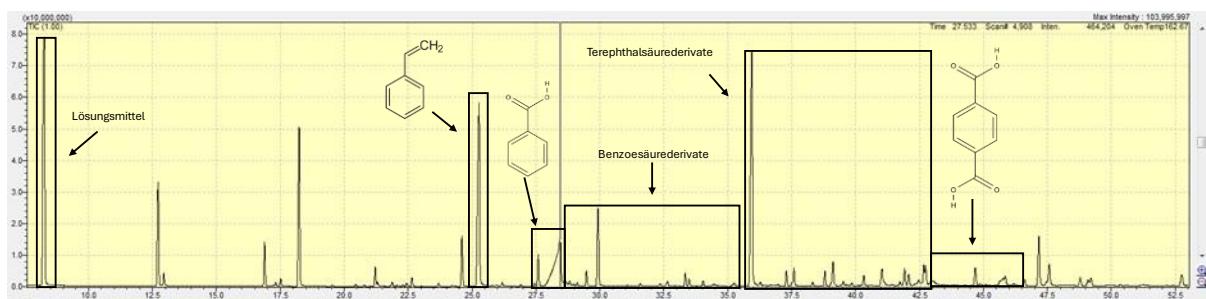


Abbildung 44: Chromatogramm des Pyrolyseproduktes des PET-Gewebes bei 800 °C.

Wie bereits in Kapitel 4.3.2 erklärt, wurde die Analysenmethode der GCxMS auf einen GCxFID übertragen, um die Konzentration der einzelnen Substanzen abzuschätzen. Die Ergebnisse der jeweiligen Inhaltsstoffe sowie deren Mengenanteile sind in folgender Tabelle 21 dargestellt.

Temperatur	Bestandteile
450 °C	Benzoesäure (87%); Terephthalsäure (9%)
500 °C	Benzoesäure (89%); Terephthalsäure (7%)
550 °C	Benzoesäure (68%); Terephthalsäure (9%); Biphenyl (5%); Phenylglyoxal (5%); Acetophenon (2%)
600 °C	Benzoesäure (77%); Terephthalsäure (9%); Biphenyl (7%); Vinylbenzoat (2%); Acetophenon (2%)
650 °C	Benzoesäure (58%); Vinylbenzoat (12%); Acetophenon (7,5%) Biphenyl (7%); Terephthalsäure (3%)
700 °C	Benzoesäure (68%); Biphenyl (11%); Acetophenon (8%) Vinylbenzoat (3,5%); Terephthalsäure (3%)
800 °C	Benzoesäure (31%); Acetophenon (29%); Biphenyl (20%) Terephthalsäure (1,7%)
900 °C	Hexadiin (39%); Biphenyl (15%); Acetophenon (12%) Cyclooctatetraen (6%); Benzoesäure (5%); Naphthalen (3%)
1000 °C	Biphenyl (36%); Acetophenon (14%); Naphthalen (10%); Styrol (9%) Anthrazen (7%); Benzoesäure (5%); Inden (3%); Vinylbenzoat (1,5%)

Tabelle 21: Produktzusammensetzung der PET-Gewebe-Pyrolyse.

Die Ergebnisse der Pyrolyse des PET-Gewebes bestätigen die Ergebnisse der Pyrolyse des Granulats. Wie erwartet waren neben dem Hauptbestandteil Benzoesäure weitere Bestandteile von Nebenprodukten zu sehen. Diese sind im Vergleich zu den Anteilen der Benzoesäure und Terephthalsäure jedoch zu vernachlässigen. Weiterhin wurde, wie zu erwarten, bei den Versuchen mit dem PET-Gewebe etwas geringere Ausbeuten an Benzoesäure gefunden. Trotzdem bestätigen die Versuche den gleichen Trend. Die Ergebnisse sind sowohl bei dem PET-Granulat als auch beim PET-Gewebe sehr ähnlich. Die geringe Menge an Nebensubstanzen im Chromatogramm haben nahezu keinen Einfluss auf die Produktzusammensetzung. Daher kann aus diesen Versuchen geschlossen werden, dass PET unabhängig von

seiner Veredelungsstufe für die Pyrolyse zur Gewinnung aromatischer Carbonsäuren verwendet werden kann.

Im Folgenden soll das Verfahren auf den realen Abfallstrom des betrachteten Unternehmens angewendet werden. Dazu wurden Produktionsabfälle und Klebebandreste des Kabelwickelbandes 837X mit einem PET-Gewebeträger inklusive des Klebstoffes UV-Acrylat und des Papierkerns herangezogen.

Die Klebebandabfälle wurden zerkleinert und pyrolysiert. Hier wurde wieder eine Versuchsreihe über einen Temperaturbereich von 450 °C bis 1000 °C gestartet und dort jeweils 5 g der Klebebandreste pyrolysiert. Die Ergebnisse der GCxMS Chromatogramme in Kombination mit einer GCxFID Auswertung werden in folgender Tabelle aufgelistet.

Temperatur	Bestandteile
450 °C	Benzoesäure (87%); Terephthalsäure (9%)
500 °C	Benzoesäure (89%); Terephthalsäure (7%)
550 °C	Benzoesäure (68%); Terephthalsäure (9%); Biphenyl (5%) Phenylglyoxal (5%); Acetophenon (2%)
600 °C	Benzoesäure (77%); Terephthalsäure (9%); Biphenyl (7%) Vinylbenzoat (2%); Acetophenon (2%)
650 °C	Benzoesäure (58%); Vinylbenzoat (12%); Acetophenon (7,5%) Biphenyl (7%); Terephthalsäure (3%)
700 °C	Benzoesäure (68%); Biphenyl (11%); Acetophenon (8%) Vinylbenzoat (3,5%); Terephthalsäure (3%)
800 °C	Benzoesäure (31%); Acetophenon (29%); Biphenyl (20%) Terephthalsäure (1,7%)
900 °C	Hexadiin (39%); Biphenyl (15%); Acetophenon (12%); Cyclooctatetraen (6%); Benzoesäure (5%); Naphthalen (3%)
1000 °C	Biphenyl (36%); Acetophenon (14%); Naphthalen (10%); Styrol (9%) Anthrazen (7%); Benzoesäure (5%); Inden (3%); Vinylbenzoat (1,5%)

Tabelle 22: Produktzusammensetzung der PET-Klebeband-Pyrolyse.

Anhand der GCxMS Analyse konnte besonders im Temperaturbereich bei 400 °C bis 500 °C eine hohe Konzentration an Benzoesäure bestimmt werden.

Beispielhaft ist in Abbildung 45 das MS-Spektrum des 450 °C Pyrolyseversuchs dargestellt. Darin ist erneut deutlich der Peak der Benzoesäure bei 20,6 Minuten zu erkennen. Weiterhin sind die Terephthalsäure und deren Derivate bei 34,3 Minuten zu sehen. Im Vergleich zu den Versuchen mit PET-Granulat wurde ein gelbliches Öl erhalten anstelle der kristallinen Rückstände.

Zudem wurde Butanol aus Spaltprodukten des UV-Acrylatklebstoffes gefunden. Die Anwesenheit des UV-Acrylats hat keinen Einfluss auf die Benzoesäurebildung sowie anderer ungewollter Spaltprodukte.

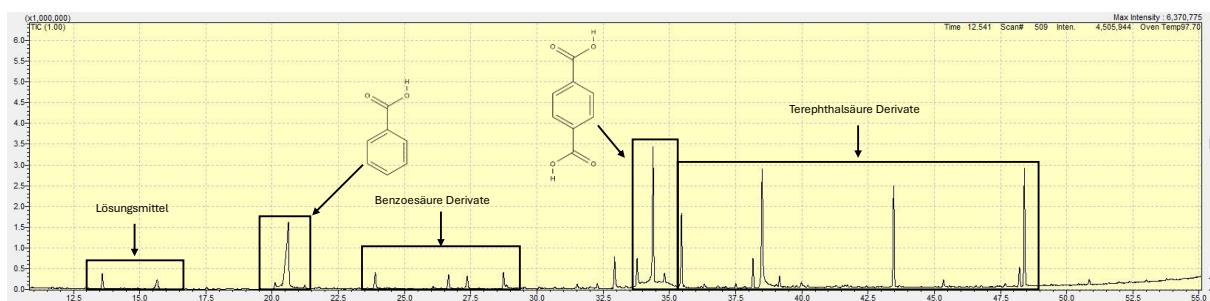


Abbildung 45: Chromatogramm des Pyrolyseproduktes des Kabelwickelbandes bei 450 °C.

Die Ergebnisse zeigen, dass bei einer Pyrolyse eines Verbundsystems, wie in diesem Fall eines Klebebands, keine neuen, unerwarteten Verbindungen gebildet werden. Durch die weiteren Bestandteile der Rohstoffe sind neue Verbindungen im Pyrolyseprodukt zu finden, was jedoch zu erwarten war. Es fanden zwischen den unterschiedlichen Bestandteilen keine ungewollten Reaktionen statt. Daraus ist positiv hervorzuheben, dass durch das Verbundsystem grundlegend keine komplexere Produktzusammensetzung oder eine Einschränkung der Benzoesäurebildung zu erkennen ist. Deutlich wird durch diese Ergebnisse, dass, sobald ein Gemisch pyrolysiert wird, eine entsprechende Zusammensetzung des Pyrolyseproduktes erhalten wird, wie es von einer Pyrolyse der Einzelkomponenten erwartet werden würde. Diese Erkenntnis wurde bereits von Heise et al. bestätigt. Dort wurde erkannt, dass bei einer Pyrolyse reproduzierbare Fragmentierungen vorliegen und „sich dabei die Zusammensetzung der Pyrolyseprodukte nicht ändert.“⁵⁵

4.3.10 Upscaling des Prozesses in einer Technikumsanlage

Nachdem die Machbarkeit im Labormaßstab bewiesen und die Methode für ein Klebebandsystem optimiert werden konnte, soll im folgenden Kapitel die Übertragung auf eine Technikumsanlage dargestellt werden. Einzelheiten zu Versuchsbeschreibung, Beobachtungen während und nach dem Versuch sowie die Analyseergebnisse der Produkte und Gase wurden zum Teil dem Versuchsprotokoll der ausführenden Firma entnommen.

Im Vergleich zum Labormaßstab gab es einige Abweichungen im Design des Reaktors und der Versuchsdurchführung. Zu Beginn wurden die Produktionsausschüsse in einer Schredder-Anlage auf eine Größe von ungefähr 1-3 cm zerkleinert. Diese zerkleinerten Klebebandreste wurden in die Technikumsanlage eingefüllt, die in folgender Abbildung 46 schematisch dargestellt wurde. Abweichend von dem Laborreaktor wurde hier ein Extruder als Reaktor verwendet.

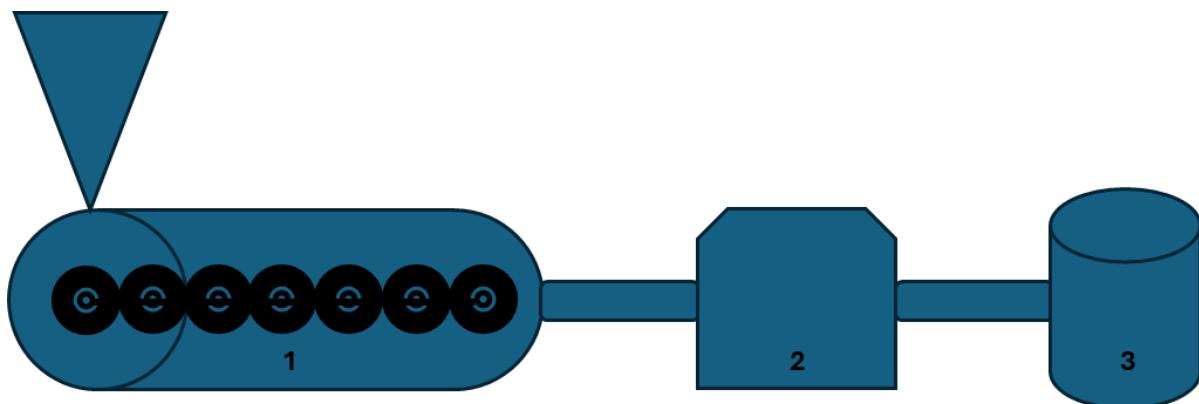


Abbildung 46: Schematische Darstellung des Pyrolysereaktors im Technikumsmaßstab.

Der Rohstoff wird über einen Trichter in die Anlage gegeben. Die eigentliche Pyrolyseanlage besteht aus einem Schneckenförderersystem, welches gleichzeitig als Reaktor dient. Bereits in dem Schneckenförderersystem wurden die Klebebandreste erhitzt und aufgeschmolzen. Diese Schmelze ermöglicht eine Selbstabdichtung der Anlage, sodass ein Sauerstoffausschluss ermöglicht wurde. Der eigentliche Pyrolyseprozess fand somit bereits in der Förderanlage statt, wie in Abbildung 46 mit Nummer 1 gekennzeichnet. Dahinter war ein Cracker (2) geschaltet, der die entstehenden Produkte weiter spaltete, sodass diese in einem Auffangbehälter (3) entnommen werden konnten. Zwischen Reaktor und Cracker befand sich ein auf 350 °C erhitzzter Ascheauslass. Dies ist ein Indiz dafür, dass im Extruder die eigentliche Pyrolyse stattfindet und der Cracker nur zur weiteren Spaltung der Verbindungen hinzugeschaltet wurde.

Der Reaktor wurde mit 3,5 kg/h befüllt, sodass insgesamt während des Versuches 25,6 kg Material zugegeben wurde. Im Ascheauslass wurden 600 g einer Mischung aus Asche, „Wachs“ und unzureichend pyrolysiertes Material gesammelt. Insgesamt konnten ungefähr 5 kg Öl erhalten werden. Im Reaktor blieben ungefähr 10 kg Material zurück, welches aufgrund des Totvolumens nicht pyrolysiert wurde.

Der Großteil des Versuchsmaterials wurde zu Gasen, Ölen und „Wachsen“ umgesetzt. In der Ölfraktion war eine Phasentrennung zu erkennen, die auf einen erhöhten Wasseranteil schließen lässt. Außerdem wurde eine erhöhte Menge „Wachs“ erzeugt, hingegen nur eine geringe Menge an Asche.

Die Probe aus dem Ölabscheider, welche aus zwei flüssigen Phasen und einem Anteil Wachs bestand, wurde zur Analyse homogenisiert. Bei der Analyse wurde ein hoher Wasseranteil von 9,39 Gew% und damit einhergehend auch ein hoher Sauerstoffanteil von 11,7 Gew% festgestellt. Der daraus berechnete im Öl gebundene Sauerstoff beträgt somit ca. 3,3 Gew%.

Die Analyse des Siedepunktverlaufs der Ölfraktion zeigt einen Sprung beginnend bei 245 °C, was auf einen hohen Anteil dieser Siedefraktion hinweist. Diese Fraktion ist der Benzoesäure zuzuordnen, welche einen Siedepunkt von 249 °C hat und wovon nadelförmige Kristalle am Aschauslass sichtbar waren.

Während des Versuchs wurden zwei Gasproben in zwei 5 L Tedlarbeuteln und einem 1 L Aluminiumbeutel entnommen und in einem Untersuchungslabor analysiert. Die erhöhte Menge an Stickstoff und Sauerstoff ist auf das Totvolumen in dem Gasauslass zurückzuführen, da diese Zusammensetzung der Luft entspricht. In der Gasprobe war ein Anteil an CO₂ von 34,3 %, sowie 18,5 % CO zu finden. Die hohe Gasmenge kann auf die Bildung von Kohlenstoffmonoxid und -dioxid bei der Spaltung der Estergruppe des PET und des Acrylatklebstoffes zurückgeführt werden.

Eine weitere Besonderheit ist der hohe iso-Butan-Anteil (15,4 Vol%) im Vergleich zu den anderen Alkanen. Der Brennwert ist mit 23,9 MJ/kg geringer als bei herkömmlichem Erdgas, welcher bei 36 - 50 MJ/kg liegt, was auf den hohen CO₂- und CO-Anteil zurückzuführen ist.

Insgesamt waren sowohl die vorbereitenden Maßnahmen wie das Zerkleinern, als auch die Zuführung des Versuchsmaterials in den Reaktor problemlos möglich. Das entstehende Gas sollte einem BHKW zugeführt werden können, um Prozesswärme und Strom zur Prozessführung zurückzugewinnen. In dem erhaltenen Öl war ein großer Anteil hochsiedender Bestandteile (>250 °C) zu finden, welche vermutlich aus aromatischen Verbindungen bestehen. Dies bestätigt die Laborversuche, bei denen Benzoesäure als Hauptprodukt erhalten wurde.

4.3.11 Vergleich der Laborversuche zu einem Technikumsversuch

Im Gegensatz zu den Laborversuchen wurde im Technikumsversuch eine Ölprobe erhalten. Dies ist aufgrund der unterschiedlichen Reaktorausführungen zu begründen. Da die Laborversuche in einem Reaktor durchgeführt wurden, der oberhalb der Schmelze leeren Raum vorweist, konnten flüchtige Substanzen entweichen. In der Technikumsanlage wurde mit einem Extruder gearbeitet, der vollständig mit Material und Pyrolyseprodukten gefüllt war. Problematisch hierbei war, dass die eingestellte Temperatur nur am Mantel des Extruders vorlag. So kann davon ausgegangen werden, dass das Material im Extruder keine homogene Temperaturverteilung vorfand. Zudem herrschten in einem Extruder sehr hohe Drücke, sodass möglich ist, dass unter diesem Druck weitere Rekombinationen stattfinden. Flüchtige Substanzen konnten zudem nicht entweichen und wurden weiter pyrolysiert oder unterlagen Rekombinationen.

Die erhaltenen Ölproben aus dem Technikumsversuchs wurden an der GCxMS und GCxFID analysiert. Die Analysen zeigen, dass ungefähr 35 % Benzoesäure enthalten ist. Im Vergleich zu den Laborversuchen, ist somit die Reinheit deutlich geringer. In Abbildung 47 ist das Chromatogramm des Produktes dargestellt.

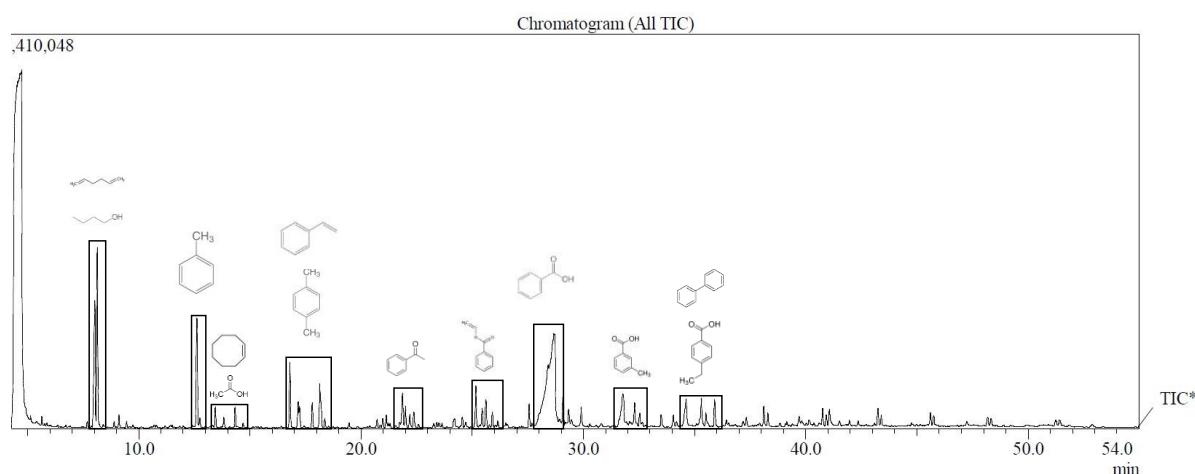


Abbildung 47: Chromatogramm des Pyrolyseproduktes des Technikumsversuches.

Die Ölprobe zeigt eine Vielzahl an Verbindungen wie Alkane und weitere zyklische Verbindungen. Insgesamt passt die Mischung zu einem Pyrolyseöl, wie in der Literatur beschrieben. Der hohe Anteil an Benzoesäure hingegen beweist, dass trotz der nicht idealen Reaktorkonfiguration sowie Reaktionsführung das Verfahren im Prinzip möglich ist.

Ein Schneckenförderer weist ein vollständig geschlossenes System auf, sodass die Benzoesäure nicht entweichen konnte und weiter gespalten wurde. Durch eine passende Reaktorausführung als auch durch Optimierungen der Prozessführung kann erwartet werden, dass die Laborergebnisse auch in großtechnischen Anlagen reproduzierbar sind. Hierfür ist ein speziell für diesen Prozess ausgelegter Reaktor notwendig, welcher bei theoretischer Wirtschaftlichkeit des Verfahrens gebaut werden muss.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Ausgehend von der Anforderung Nachhaltigkeit im Produktumfeld messbar und industrieübergreifend vergleichbar zu machen, wurde der Product Carbon Footprint vorgestellt. Dieser wurde auf Basis der DIN EN ISO 15067 und der TfS-Norm dargestellt und eine beispielhafte Berechnung anhand eines Kabelwickelklebebandes vorgestellt. Hierbei wurden die einzelnen Einflussfaktoren herausgearbeitet und im Verhältnis zueinander verglichen. Gleichzeitig wurden Handlungsempfehlungen und Einsparpotenziale aufgezeigt. Insgesamt kann hieraus geschlossen werden, dass der PCF eine geeignete Kennzahl ist, um Produkte auf Basis ihrer Nachhaltigkeit zu vergleichen und ein weiteres Bewertungskriterium neben Kosten und technischen Produkteigenschaften zu bieten.

Da bei der PCF-Berechnung die Rohstoffe als entscheidender Einflussfaktor und als größtes Einsparpotenzial identifiziert wurden, wurde ein Vergleich der aktuell gängigen Klebstoffsysteme durchgeführt. Dazu sollte ein Verfahren vorgestellt werden, welches es ermöglicht, in einem frühen Stadium der Entwicklung das Design eines Klebebandes in Sicht auf Nachhaltigkeit zu lenken. Als geeignete Betrachtungsgrundlage wurde eine Evaluation der notwendigen Energiemengen während des Beschichtungsprozesses der Klebstoffsysteme als Vergleichsbasis herangezogen. Zuerst wurde eine theoretische Berechnung auf Basis von Literaturdaten durchgeführt, um einen Referenzwert zu erhalten. Als zweites wurden analytische Messungen der Gesamtenthalpie sowie Wärmekapazitätsmessungen der jeweiligen Klebstoffsysteme durchgeführt. Im Vergleich dazu wurden reale Produktionsläufe in Hinsicht auf ihren Energieverbrauch dargestellt. Insgesamt war zu erkennen, dass die theoretischen Berechnungen aufgrund fehlender Literaturwerte keine gute Vergleichbarkeit liefern. Die aufgezeigten Tendenzen der DSC-Messungen korrelierten jedoch eindeutig mit den Ergebnissen der realen Produktionsläufe. Insgesamt konnte mit der Enthalpie- und Wärmekapazitätsmessung mittels DSC eine schnelle und einfache Methode entwickelt werden, um über diese thermische Verfahrenstechnik bereits im Labormaßstab und zu einem frühen Entwicklungszeitpunkt valide Abschätzungen über die Energieeffizienz bereits bestehender sowie neuer Klebstoffsysteme geben zu können. Damit sind bereits während der frühen Entwicklungsphase indirekte Einflüsse auf den PCF erkennbar und damit steuerbar. Auch Einflüsse einzelner Rohstoffsubstitutionen in einer Rezepturänderung können durch eine DSC-Messung effektiv dargestellt werden und machen Rezepturvergleiche einfach und schnell möglich.

Der Synthesekautschuk-Hotmelt ist in Summe der effizienteste Klebstoff, gefolgt von dem UV-Acrylat-Klebstoff, der aufgrund seiner UV-Vernetzung deutlich mehr Energie in der Produktion

benötigt. Ähnlichen Energieaufwand wie beide 100 %-Systeme benötigen die Lösungsmittelklebstoffe, die jedoch aufwändigeren Produktionsvorgaben mit sich bringen und zudem aufgrund der nachteiligen Umwelteinflüsse heutzutage nur noch bei Spezialanwendungen eingesetzt werden. Die Dispersionsklebstoffe sind deutlich weniger energieeffizient als die restlichen Systeme, finden jedoch aufgrund ihrer geringen Produktions- und Produktkosten vielfältige Verwendungen.

Als Erweiterung der Nachhaltigkeitsbestrebungen, sowie einer möglichen Verbesserung des PCFs wurde eine Recyclingmethode für PET-haltige Klebeband-Abfälle gesucht. Da Klebebänder nur als Verbund zu verwerten sind, wurde die Pyrolyse als eine Möglichkeit untersucht.

Bei ersten Vorversuchen konnte überraschenderweise eine große Menge Benzoesäure bei der Pyrolyse von reinem PET gewonnen werden. Nach erfolgreicher Evaluation des Versuchsaufbaus konnte der theoretische Hintergrund der Pyrolysemechanismen aufgeklärt werden. Weiterhin konnte dieses neuartige Verfahren zur Gewinnung von Benzoesäure und Terephthalsäure aus PET-Abfällen optimiert werden und schlussendlich erfolgreich auf PET-haltige Klebebänder angewendet werden.

Mit diesem Verfahren wurde eine Möglichkeit geschaffen, PET-haltige Abfälle im Rahmen einer zirkulären Wirtschaft einer neuen Verwendung zuzuführen und die Abfälle kommerziell zu vertreiben, sodass sowohl ein ökologischer als auch ökonomischer Gewinn entsteht.

Der PCF wird sich zukünftig als Kennzahl für die Nachhaltigkeit in der Industrie fest etablieren. Verbände arbeiten bereits an Wegen, die Berechnung zu harmonisieren. Um eine konsistente Berechnung zu ermöglichen, muss die Datenqualität der Primärdaten verbessert werden, indem auch kleinere Firmen Zugang zu diesem Thema bekommen. Da die Berechnung eines PCFs sehr aufwändig ist, mangelt es häufig an Ressourcen dafür.

Auch die Betrachtung der Energieeffizienz von Klebstoffsystmen wird bei zukünftig steigenden Energiekosten mehr an Bedeutung gewinnen. Für die DSC-Messung müsste daher eine genormte Methode speziell für Klebstoffsystme im Rahmen eines Verbandprojektes erarbeitet werden, sodass eine Vergleichbarkeit gegeben ist. Zudem können theoretische Berechnungen an Relevanz gewinnen, wenn die Rohstofflieferanten spezifische Wärmekapazitäten für den jeweiligen Rohstoff bestimmen und als Spezifikation angeben würden.

Aus den Ergebnissen der Klebstoffvergleiche kann abgeleitet werden, dass zukünftig das Hauptaugenmerk bei der Klebstoffentwicklung auf Hotmelt-Systeme gelegt werden sollte. Hierbei können Klebstoffe mit niedrigerem Schmelzpunkt entwickelt werden, da dies in einer niedrigeren Applikationstemperatur und somit in geringerem Energieverbrauch resultieren

würde. Gleichzeitig dürfen die entsprechenden kohäsiven und adhäsiven Eigenschaften der Klebstoffe nicht verloren gehen.

Das zukünftig wichtigste Thema ist Recycling und Circular Economy, da es industrieübergreifende Probleme der Abfallentsorgung lösen kann, die im Zusammenhang mit Verbundsystemen wie Klebebändern auftreten. In diesem Fall bietet die chemische Pyrolyse ein neuartiges Verfahren für die Pyrolyse von PET-haltigen Abfällen, bei dem anstelle von einem klassischen Pyrolyseöl ein nahezu reines kristallines Produkt erhalten wird. Dieser Ansatz, aus Abfall wieder neuen Wertstoff zu generieren, sollte in Zukunft weiterverfolgt werden und auf andere Abfallströme angewendet werden. Beispielsweise sollte sich Polyamid für die chemische Pyrolyse gut eignen, da aus dem Polyamid Caprolactam gewonnen werden kann. Einen weiteren großen Abfallbereich stellen die Silikone dar. Hier wäre ebenfalls interessant, ob dort bei richtiger Versuchsführung andere Stoffe entstehen als einfaches Silikonöl.

Das Verfahren der chemischen Pyrolyse ist besonders relevant im Zusammenhang des Recyclings von Produkten, die nicht mechanisch getrennt werden können. Zudem wurde hiermit auch eine Lösung geschaffen, Produkte nach ihrer Nutzung wieder zurückzunehmen und zu verwerten, anstatt sie der thermischen Verwertung zuzuführen.

6 Geräteparameter und Analysemethoden

Gerätetyp	Gerätehersteller	Gerätebezeichnung
GCxFID	Shimadzu	GC-2010 Plus
GCxGCxMS	Shimadzu	GC-MS-2010 Ultra

Tabelle 23: Verwendete Geräte.

	GC-MS-2010 Ultra
Säule	Phenomenex Zebron ZB-5MS 30m x 0m x 1,0µm
Software	GCMSSolution Version 4.44

Tabelle 24: Geräteparamter der GCxMS Messungen.

Rate [°C / min]	Temperatur [°C]	Hold Time [min]
-	50,0	5,00
5,00	250,0	variabel

Tabelle 25: GC-Temperaturprogramm.

GC-Einstellungen

Injection Temperature	250 °C
Injection Mode	Split
Column Flow	2,87 ml/min
Linear Velocity	30,0 cm/s
Purge Flow	3,0 ml/min

MS-Einstellungen

Ion Source Temperature	200 °C
------------------------	--------

Interface Temperature	250 °C
Solvent Cut Time	0 min
ACQ/Mode	Scan
Start Time – End Time	5 min – 50 min
Event Time	0,02 sec
Scan Speed	20000
Start m/z – End m/z	50,00 – 250,00

Tabelle 26: Messparameter GCxMS.

7 Quellen

- (1) Meadows, D.; Meadows, D.; Randers, J. *The limits to growth: A report for the club of rome's project on the predicament of mankind*, 2. ed.; A potomac associates book; Universe books: New York, 1974.
- (2) Reitemeier, A. *Nachhaltigkeit in der Geschichte - Argumente – Ressourcen – Zwänge*; Universitätsverlag Göttingen, 2019.
- (3) Hauff, V. *Unsere gemeinsame Zukunft: der Brundtland-Bericht der Weltkommission für Umwelt und Entwicklung*, 1. Auflage; Eggenkamp Verlag: Greven, 1987.
- (4) United Nations. Agenda 21 **1992**.
- (5) United Nations. Bericht des Weltgipfels für nachhaltige Entwicklung **2002**.
- (6) United Nations. The Future We Want **2012**.
- (7) United Nations. Millennium Development Goals (MDGs) **2000**.
- (8) United Nations. The 17 Goals: Sustainable Development Goals **2015**.
- (9) United Nations. The Sustainable Development Goals Report 2016 **2016**.
- (10) United Nations Sustainable Development. Communications materials - United Nations Sustainable Development **2023**.
- (11) Chemiehoch3. Kennzahlen | Chemie³: Schlüsselindustrie für nachhaltige Entwicklung. <https://www.chemiehoch3.de/branche/kennzahlen-chemische-industrie> (accessed March 4, 2025).
- (12) Verband der Chemischen Industrie e. V. Chemiewirtschaft in Zahlen - **2024 2024**.
- (13) Statista. Marktvolumen der weltweiten Automobilindustrie 2023. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1396239/umfrage/marktvolumen-der-automobilindustrie-weltweit/> (accessed February 28, 2025).
- (14) Statista. Automobilindustrie weltweit. *Statista* [Online], Nov 18, 2024. <https://de.statista.com/themen/2670/weltweite-automobilindustrie/> (accessed February 28, 2025).
- (15) Wallentowitz, H.; Freialdenhoven, A.; Olschewski, I. *Strategien in der Automobilindustrie*, 2009.
- (16) Wagner, S. M. *Strategisches Lieferantenmanagement in Industrieunternehmen: Eine empirische Untersuchung von Gestaltungskonzepten*. Zugl.: St. Gallen, Univ., Diss., 2000; Europäische Hochschulschriften. Reihe 5, Volks- und Betriebswirtschaft Bd. 2734; P. Lang: Frankfurt a.M., Bern etc., 2001.
- (17) Perrow, C. *Normale Katastrophen: Die unvermeidbaren Risiken der Großtechnik*, 2. Aufl.; Reihe Campus 1028; Campus-Verl.: Frankfurt/Main, 1992.
- (18) Niepraschk, M. Acht Kilometer Kabel im Auto - Magazin. <https://www.auto.de/magazin/acht-kilometer-kabel-im-auto/> (accessed February 28, 2025).

- (19) Maynard, P.; Gates, K.; Roux, C.; Lennard, C. Adhesive Tape Analysis: Establishing the Evidential Value of Specific Techniques. *Journal of Forensic Sciences* **2001**, *46*, 280–287.
- (20) Gierenz, G.; Karmann, W., Eds. *Adhesives and Adhesive Tapes*; Wiley: Weinheim, New York, 2001.
- (21) Tesa SE. Trägermaterialien: Alles andere als träge. <https://www.tesa.com/de-de/ueberuns/press-insights/stories/traegermaterialien-alles-andere-als-traege.html> (accessed March 4, 2025).
- (22) Satas, D., Ed. *Handbook of pressure sensitive adhesive technology*, 2nd edition; Springer Science+Business Media: New York, NY, 1989.
- (23) Habenicht, G., Ed. *Kleben*; Springer Berlin Heidelberg: Berlin, Heidelberg, 2002.
- (24) Fraunhofer Institute for Manufacturing Technology and Advanced Materials IFAM. *Kreislaufwirtschaft und Klebtechnik*, 2020.
- (25) DIN Deutsches Institut für Normung e.V. *DIN EN ISO 29862:2025-03, Klebebänder-Bestimmung der Klebkraft (ISO_29862:2024); Deutsche Fassung EN_ISO_29862:2024*; DIN Media GmbH: Berlin.
- (26) DIN Deutsches Institut für Normung e.V. *DIN EN ISO 29863:2021-12: Klebebänder-Messung des Scherwiderstandes unter statischer Belastung (ISO_29863:2018); Deutsche Fassung EN_ISO_29863:2019*; DIN Media GmbH: Berlin, 2019.
- (27) FINAT. FINAT Technical Handbook: Test Methods.
- (28) Grunwald, A.; Kopfmüller, J. *Nachhaltigkeit*, 3., aktualisierte und erweiterte Auflage; Campus Studium; Campus Verlag: Frankfurt, New York, 2022.
- (29) Tremmel, J. *Nachhaltigkeit als politische und analytische Kategorie: Der deutsche Diskurs um nachhaltige Entwicklung im Spiegel der Interessen der Akteure*. Teilw zugl.: Frankfurt/Main, Univ., Diplomarbeit, 2003; Hochschulschriften zur Nachhaltigkeit 4; Ökom-Verl.: München, 2003.
- (30) Brockhoff, K. *Geschichte der Betriebswirtschaftslehre: Kommentierte Meilensteine und Originaltexte*, 2., durchges. Aufl.; Lehrbuch Gabler; Gabler: Wiesbaden, 2002.
- (31) Europäische Union. *Richtlinie (EU) 2022/2464 des Europäischen Parlaments und des Rates: zur Änderung der Verordnung (EU) Nr. 537/2014 und der Richtlinien 2004/109/EG, 2006/43/EG und 2013/34/EU hinsichtlich der Nachhaltigkeitsberichterstattung von Unternehmen*, 2022.
- (32) Blazejczak, J.; Edler, D. Messung von Nachhaltigkeit. *VJH* **2004**, *73*, 10–30.
- (33) World Resources Institute; World Business Council for Sustainable Development. *The Greenhouse Gas Protocol: A Corporate Accounting and Reporting Standard*, 2004.

- (34) Hermanns, R.; Kraft, A.; Hartmann, P.; Meys, R. Comparative Life Cycle Assessment of Pyrolysis – Recycling Germany's Sorted Mixed Plastic Waste. *Chemie Ingenieur Technik* **2023**, *95*, 1259–1267.
- (35) ILCD. *International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook: General guide for life cycle assessment - detailed guidance*; Luxembourg, 2010.
- (36) DIN Deutsches Institut für Normung e.V. *DIN EN ISO 14067:2019-02: Treibhausgase-Carbon Footprint von Produkten- Anforderungen an und Leitlinien für Quantifizierung (ISO 14067:2018); Deutsche und Englische Fassung EN ISO 14067:2018*; DIN Media GmbH: Berlin, 2019.
- (37) DIN Deutsches Institut für Normung e.V. *DIN EN ISO 14044:2021-02: Umweltmanagement- Ökobilanz- Anforderungen und Anleitungen (ISO 14044:2006 + Amd 1:2017 + Amd 2:2020); Deutsche Fassung EN ISO 14044:2006 + A1:2018 + A2:2020*; DIN Media GmbH: Berlin, 2021.
- (38) Together for Sustainability. The Product Carbon Footprint Guideline for the Chemical Industry: Specification for Product Carbon Footprint and Corporate Scope 3.1 Emission Accounting and Reporting **2024**.
- (39) European Commission. *Product Environmental Footprint Category Rules Guidance*, 6.3rd ed., 2018.
- (40) Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change. United Nations **1997**.
- (41) U.S. Environmental Protection Agency. Supply Chain Greenhouse Gas Emission Factors v1.2 by NAICS-6. <https://catalog.data.gov/dataset/supply-chain-greenhouse-gas-emission-factors-v1-2-by-naics-6> (accessed January 31, 2025).
- (42) Catena-X Automotive Network. Catena-X Product Carbon Footprint Rulebook: CX-PCF Rules.
- (43) Dedduwakumara, H. T.; Barner-Kowollik, C.; Dubal, D.; Boase, N. R. B. The Macromolecular Design of Poly(styrene-isoprene-styrene) (SIS) Copolymers Defines their Performance in Flexible Electrothermal Composite Heaters. *ACS applied materials & interfaces* **2024**, *16*, 48810–48822.
- (44) CaCO₃ – Kalzit: Korth Kristalle. <https://www.korth.de/material/detail/Kalzit?> (accessed January 31, 2025).
- (45) Sekmen, K.; Rehbein, T.; Johlitz, M.; Lion, A.; Constantinescu, A. Thermal analysis and shrinkage characterization of the photopolymers for DLP additive manufacturing processes. *Continuum Mech. Thermodyn.* **2024**, *36*, 351–368.
- (46) Rumble, J. R.; Brunno, T. J.; Doa, M. J., Eds. *CRC handbook of chemistry and physics: A ready-reference book of chemical and physical data*, 104nd edition, 2023-2024; CRC

handbook of chemistry and physics / Chemical Rubber Company 104th edition (2023/2024); CRC Press: Boca Raton, London, New York, 2023.

- (47) Synthomer. *2-Ethylhexyl Acrylate: Technical Data Sheet*, 2024.
- (48) Scheffler, K.; Straub, J.; Grigull, U., Eds. *Wasserdampftafeln: Thermodynamische Eigenschaften von Wasser u. Wasserdampf bis 800 Grad C u. 800 bar*; Springer: Berlin, 1981.
- (49) Preston-Thomas, H. The International Temperature Scale of 1990 (ITS-90). *Metrologia* **1990**, *27*, 3–10.
- (50) WebElements. Indium. <https://www.webelements.com/indium/> (accessed February 11, 2025).
- (51) Littek, S.; Schneider, M.; Huber, K.; Schöppner, V. Messung zum Materialabbau von Polypropylen. *Zeitschrift Kunststofftechnik* **2011**.
- (52) Zeller, M.; Leibold, H.; Netsch, N.; Richter, F.; Stauf, D. Chemisches Recycling kunststoffhaltiger Abfälle: Das Potenzial der Pyrolyse, Karlsruher Institut für Technologie, 2020.
- (53) Oliveira, L. P. de; Verstraete, J. J.; Kolb, M. Molecule-based kinetic modeling by Monte Carlo methods for heavy petroleum conversion. *Sci. China Chem.* **2013**, *56*, 1608–1622.
- (54) Çit, İ.; Sınağ, A.; Yumak, T.; Uçar, S.; Mısırlıoğlu, Z.; Canel, M. Comparative pyrolysis of polyolefins (PP and LDPE) and PET. *Polym. Bull.* **2010**, *64*, 817–834.
- (55) Bianca Heise. Systematische Untersuchungen zur Flash-Pyrolyse. Dissertation, Bergische Universität Wuppertal, 2022.
- (56) Arisawa, H.; Brill, T. B. Flash pyrolysis of polyethyleneglycol Part I: Chemometric resolution of FTIR spectra of the volatile products at 370–550°C. *Combustion and Flame* **1997**, *109*, 87–104.
- (57) Dixit, S. An improved clog-free condensation system for pyrolysis vapour of PET containing polymer, Jun 12, 2020.
- (58) Dixit, S. Clog-free condensation process for PET like polymer pyrolysis vapour, Jul 28, 2020.
- (59) Maki, T.; Takeda, K. Benzoic Acid and Derivatives. In *Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry*, 6., completely revised ed.; Bohnet, M., Ullmann, F., Eds.; Wiley-VCH: Weinheim, 2003; p 133.
- (60) Wibbertmann, A.; Kielhorn, J.; Koennecker, G.; Mangelsdorf, I.; Melber, C. *Benzoic acid and sodium benzoate: IPCS, International Programm on Chemical Safety (IPCS)*; Concise international chemical assessment document 26; World Health Organization: Geneva, 2000.
- (61) Smith, M. B. *March's Advanced Organic Chemistry: Reactions, Mechanisms, and Structure*, eighth edition; Wiley: Newark, 2020.