

FORSCHUNGSBERICHT

Schweißen von Polyethylen-Folien mit hohem Rezyklatanteil

CircularWeld

Christian Laugwitz, Marc Eckes, Tobias Eckhardt, Christian Balzer, Sophia Botsch, Benjamin Baudrit, Eduard Kraus und Gernot Hochleitner

SKZ – Das Kunststoff-Zentrum

Danksagung

Das Vorhaben 21737 N der Forschungsvereinigung Fördergemeinschaft für das Süddeutsche Kunststoff-Zentrum e.V. (FSKZ) wurde über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ (AiF) im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Die Forschungseinrichtung SKZ-KFE gGmbH danken dem BMWK und der AiF für die Förderung sowie der Forschungsvereinigung für die Unterstützung bei der Durchführung des Vorhabens. Darüber hinaus dankt die Forschungseinrichtung den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses für ihre Unterstützung bei der Bearbeitung des Projektes und für konstruktive Diskussionen zu diversen Fragestellungen.

Kurzfassung

Im Rahmen des Forschungsvorhabens *CircularWeld* wurden verschiedene Polyethylen-(PE)-Typen aus den Kategorien Neuware und Post-Consumer-Rezyklat zu 0,5 mm starkem Folienmaterial extrudiert, charakterisiert und mittels Ultraschallschweißen und Wärmekontaktsiegeln gefügt. Anhand der Materialanalytik konnte gezeigt werden, dass es sich bei den PE-Neuwaren um reines PE-LD handelte, während die Rezyklate Blends aus PE-LD und PE-HD mit teilweise geringen Anteilen Polypropylen verunreinigt vorlagen. Die mechanische Analyse der geschweißten Folien belegte, dass sowohl für PE-Neuware als auch für PE-Rezyklate das mechanische Niveau des ungeschweißten Grundmaterials erreicht werden kann. Dies konnte sowohl für Ultraschallschweiß- als auch für Wärmekontaktsiegelnähte bestätigt werden. Im Zuge der statistischen Auswertung der Versuchsreihen konnten materialspezifische Abhängigkeiten der Schweißnahtbelastbarkeit von den jeweiligen Prozessparametern ermittelt werden. Schweißversuche an Blends aus Neuware und Rezyklaten zeigten nur in einem Teil der betrachteten Fälle die erwartete monotone Abhängigkeit der Schweißnahtbelastbarkeit vom Mischungsverhältnis des Blends. Die begleitende Ökobilanzierung bestätigte zusätzlich, dass der Einsatz von PE-Rezyklat zur Herstellung von Folien eine erhebliche Verringerung der Umweltauswirkungen in allen Wirkungskategorien mit sich bringt, insbesondere aber hinsichtlich des Global Warming Potentials.

Abstract

Within the framework of the CircularWeld research project, various polyethylene (PE) types from the virgin material and post-consumer recycle categories were extruded into 0.5 mm thick film material, characterized, and joined applying ultrasonic welding and heat contact sealing. The analysis of the materials revealed that the PE virgin material was pure PE-LD, while the recyclates were blends of PE-LD and PE-HD, in some cases contaminated with small amounts of polypropylene. The mechanical analysis of the welded films showed that the mechanical level of the non-welded base material can be achieved for both virgin PE and PE recyclates. This was confirmed for both ultrasonic welding and heat contact sealing seams. From the statistical evaluation of the test series, material-specific dependencies of the weld seam strength on the respective process parameters could be determined. Welding tests on blends of virgin material and recyclates only exhibited the expected monotonic dependence of weld seam strength on the blend ratio of the blend in some of the cases considered. The accompanying life cycle assessment also confirmed that the use of PE recycle to produce films results in a considerable reduction in the environmental impact in all impact categories, but particularly regarding the global warming potential.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abkürzungsverzeichnis	III
Projektsteckbrief.....	V
1 Einleitung.....	1
1.1 Anlass für Forschungsvorhaben.....	1
1.2 Problemstellung	2
1.3 Zielsetzung.....	3
2 Stand der Technik.....	5
2.1 Recycling von Kunststoffabfällen	5
2.2 Folienextrusion	7
2.3 Folienschweißen	9
2.3.1 Wärmekontaktschweißen	9
2.3.2 Wärmeimpulsschweißen.....	11
2.3.3 Ultraschallschweißen.....	11
3 Lösungsweg zur Erreichung des Forschungsziels	13
4 Durchgeführte Arbeiten	15
4.1 Materialauswahl.....	15
4.2 Folienextrusion	16
4.3 Charakterisierung der Materialien	22
4.3.1 Dynamische Differenzkalorimetrie (DSC).....	22
4.3.2 Rheologische Analyse	22
4.3.3 Dickenmessung der extrudierten Folien.....	23
4.4 Folienschweißen	24
4.4.1 Wärmekontaktschweißen	25
4.4.2 Wärmeimpulsschweißen.....	26
4.4.3 Ultraschallschweißen.....	27
4.5 Mechanische Analyse	28
4.6 Mikroskopische Analyse.....	30

4.7	Bewertung der ökologischen Eigenschaften und der Einsatzpotentiale von Rezyklaten.....	30
4.7.1	Vergleich von unterschiedlichen Rezyklatanteilen.....	34
4.7.2	Vergleich End-of-Life Szenarien.....	36
5	Diskussion der Ergebnisse.....	40
5.1	Folieneigenschaften.....	40
5.2	Schweißungen.....	46
5.3	Ökobilanz.....	56
6	Zusammenfassung.....	58
6.1	Herstellung von PE-Folien aus Post-Consumer-Rezyklaten.....	58
6.2	Schweißen von PE-Folien aus Post-Consumer-Rezyklaten.....	58
6.3	Ökobilanzierung.....	59
Anhang	61
A.1	Technisches Datenblatt Rezyklat 1 - Mersalen® LDPE RCY 05.....	61
A.2	Technisches Datenblatt Rezyklat 2 - Mersalen® LDPE NCY PCR 02.....	62
A.3	Technisches Datenblatt Rezyklat 3 - Recycl-IN rLL9110.....	63
A.4	Technisches Datenblatt Rezyklat 4 - PE-LD 490-S.....	66
A.5	Technisches Datenblatt Neuware 1 - Lupolen 2420F.....	67
A.6	Technisches Datenblatt Neuware 2 - FT6230.....	70
A.7	Protokoll zur Folienextrusion für die Kombination N1 - R1.....	72
A.8	Protokoll zur Folienextrusion für die Kombination N1 - R2.....	73
A.9	Protokoll zur Folienextrusion für die Kombination N1 - R3.....	74
A.10	Protokoll zur Folienextrusion für die Kombination N1 - R4.....	75
A.11	Protokoll zur Folienextrusion für die Kombination N2 - R1.....	77
A.12	Protokoll zur Folienextrusion für die Kombination N2 - R2.....	78
A.13	Protokoll zur Folienextrusion für die Kombination N2 - R3.....	79
A.14	Protokoll zur Folienextrusion für die Kombination N2 - R4.....	80
Literaturverzeichnis.....	82

Abkürzungsverzeichnis

ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol
ADPf	Abiotic Depletion Potential fossil
AP	Acidification Potential
CaCO ₃	Calciumkarbonat
DSC	Differenzkalorimetrie
DVS	Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e. V.
EOR	Ethylene-Octene Rubber
EP	Eutrophication Potential
GWP100	Global Warming Potential über 100 Jahre
HI	Wärmeimpulsschweißen
HDPE	High Density Polyethylen
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
LDPE	Low Density Polyethylen
MFR	Melt-Flow-Rate
N	Neuware
ODP	Ozone Depletion Potential
PA	Projektbegleitender Ausschuss
PC	Polycarbonat
PE	Polyethylen
PET	Polyethylenterephthalat
POCP	Photochemical Ozone Creation Potential
PP	Polypropylen
PS	Polystyrol
PVC	Polyvinylchlorid
R	Rezyklat

TK	Thermokontaktschweißen
US	Ultraschallschweißen
WKS	Wärmekontaktschweißen

Projektsteckbrief

AiF/IGF-Projekt 21737 N:

„Schweißen von Polyethylen-Folien mit hohem Rezyklatanteil (*CircularWeld*)“

Dauer: 01.04.2021 – 30.09.2023

Im Rahmen des Forschungsvorhabens *CircularWeld* wurden verschiedene Polyethylen-(PE)-Typen aus den Kategorien Neuware und Post-Consumer-Rezyklat zu 0,5 mm starkem Folienmaterial extrudiert, charakterisiert und mittels Ultraschallschweißen und Wärmekontaktsiegeln gefügt. Anhand der Materialanalytik konnte gezeigt werden, dass es sich bei den PE-Neuwaren um reines PE-LD handelte, während die Rezyklate Blends aus PE-LD und PE-HD mit teilweise geringen Anteilen Polypropylen verunreinigt vorlagen. Die mechanische Analyse der geschweißten Folien belegte, dass sowohl für PE-Neuware als auch für PE-Rezyklate das mechanische Niveau des ungeschweißten Grundmaterials erreicht werden kann. Dies konnte sowohl für Ultraschallschweiß- als auch für Wärmekontaktsiegelnähte bestätigt werden. Im Zuge der statistischen Auswertung der Versuchsreihen konnten materialspezifische Abhängigkeiten der Schweißnahtbelastbarkeit von den jeweiligen Prozessparametern ermittelt werden. Schweißversuche an Blends aus Neuware und Rezyklaten zeigten nur in einem Teil der betrachteten Fälle die erwartete monotone Abhängigkeit der Schweißnahtbelastbarkeit vom Mischungsverhältnis des Blends. Die begleitende Ökobilanzierung bestätigte zusätzlich, dass der Einsatz von PE-Rezyklat zur Herstellung von Folien eine erhebliche Verringerung der Umweltauswirkungen in allen Wirkungskategorien mit sich bringt, insbesondere aber hinsichtlich des Global Warming Potentials.

Unterstützt durch den projektbegleitenden Ausschuss:

ALBIS PLASTIC GmbH

Aliaxis Deutschland GmbH

ALLOD Werkstoff GmbH & Co. KG

Borealis Polyolefine GmbH

Branson Ultraschall

Brugger Feinmechanik GmbH

DUO PLAST AG

Gebrüder Dürrbeck Kunststoffe GmbH

GRAF Holding GmbH

Granula Polymer GmbH

Herrmann Ultraschalltechnik GmbH & Co. KG	MS Ultraschall Technologie GmbH
Omya AG	POLIFILM GmbH
Poly-Pack Verpackungs-GmbH & Co. KG	Rebel-Kunststoffe GmbH
RSH POLYMERE GmbH	Rudolf Klojer GmbH
SAXA Packaging GmbH	SIMONA AG
Südpack Verpackungen GmbH & Co. KG	tascon GmbH
W. Gröning GmbH & Co. KG	Zeisberger Süd-Folie GmbH

1 Einleitung

1.1 Anlass für Forschungsvorhaben

In der Europäischen Union entstehen jedes Jahr ca. 25,8 Mio. t Kunststoffabfälle. Davon werden aktuell 30 % recycelt, 39 % thermisch verwertet und 31 % auf Mülldeponien gelagert (vgl. Abbildung 1) [1].

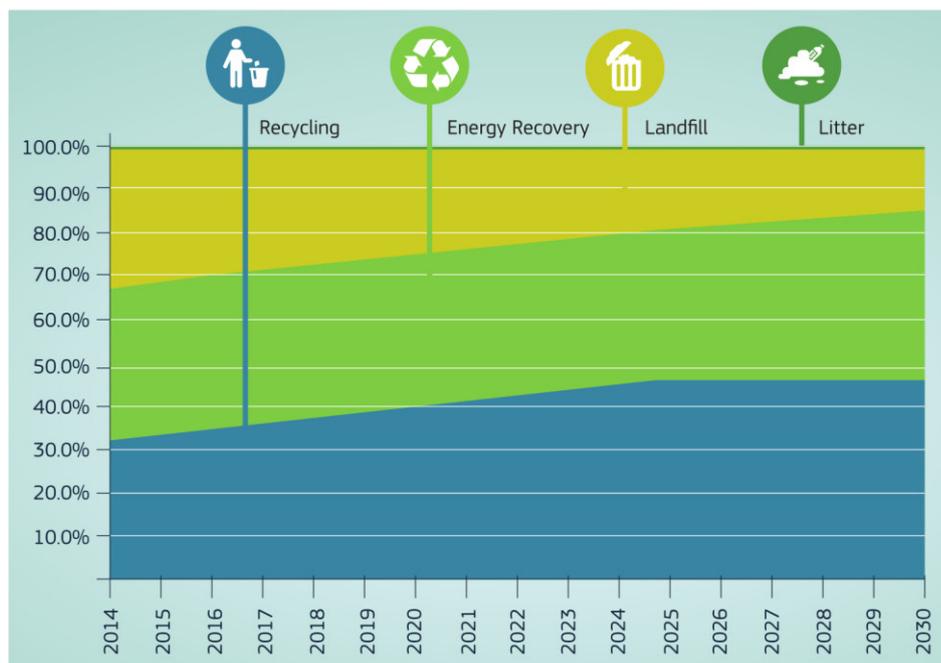


Abbildung 1: Nutzung von Kunststoffprodukten am Ende ihres Lebenszyklus in Europa [2].

Nach Einschätzung der Europäischen Kommission schadet die gegenwärtige Nutzung und Entsorgung von Kunststoffen der Umwelt und lässt gesamtwirtschaftliche Vorteile einer kreislauforientierten Wirtschaft ungenutzt [2].

Um diesem Missstand entgegenzuwirken hat sich die Europäische Kommission mit dem Circular Economy Package (CEP) unter anderem folgende Ziele gesetzt [2]:

- Steigerung der Recyclingraten aller Kunststoffe auf 50 % bis 2030
- Eine Vervielfachung der Recyclingkapazitäten bis 2030 gegenüber 2015
- Etablierung einer Kreislaufwirtschaft für Kunststoffprodukte
- Industrielle Anwendung von 10 Mio. t Rezyklate bis zum Jahr 2025

Besonders im Bereich der Kunststoffverpackungen besteht ein großes Potential für den Einsatz von Rezyklaten. Im Verpackungssektor entstehen, bedingt durch die Kurzlebig-

keit der Produkte, etwa 60 % aller Kunststoffabfälle, jedoch nur 40 % der Kunststoffverpackungen werden recycelt [1]. Verantwortlich für die große Menge an Kunststoffabfällen sind überwiegend geschweißte Kunststofffolien. Der Packstoff Polyethylen (PE) besitzt hierbei mit 36 % den größten Anteil im Bereich der flexiblen Packmittel [3]. Insgesamt zeichnet sich, unter anderem durch die aktuellen politischen Bestrebungen des Verpackungsgesetzes (VerpackG), ein Trend für die vermehrte Nutzung von Rezyklaten ab [4].

Durch die Verwendung von rezyklierten Kunststoffen lassen sich einerseits Kosten sparen und andererseits alternative Rohstoffquellen erschließen. Für eine erfolgreiche Anwendung von Rezyklaten in der kunststoffverarbeitenden Industrie ist allerdings sowohl eine Anpassung der Produkte, möglicher Verarbeitungsverfahren, als auch nachgeschalteter Prozesse (beispielsweise das Schweißen) notwendig.

1.2 Problemstellung

Bedingt durch den Recyclingprozess und die Vorgeschichte eines Produktes sind wiederaufbereitete Kunststoffe nicht identisch zur Neuware. Auf molekularer Ebene unterscheiden sich die Kettenlängen und die Anzahl der Verzweigungen [5]. Zusätzlich verlieren Kunststoffe im Laufe ihres Lebenszyklus wichtige Stabilisatoren und andere funktionelle Additive [6]. Des Weiteren kann auch bei einer gründlichen Sortierung eine Kontamination mit Fremdmaterial nicht ausgeschlossen werden. Anorganische Verunreinigungen können beispielsweise über Füllstoffe in das spätere Rezyklat gelangen oder es werden während der Regranulierung nicht alle Fremdstoffe über den Schmelzefilter abgeschieden [7]. Somit können auch Lacke, Silikone, Metalle oder Papier in den Recycling-Kreislauf gelangen.

Die Änderung des Eigenschaftsprofils von Rezyklaten im Vergleich zur Neuware wurde bereits in zahlreichen Forschungsvorhaben beschrieben [8–10]. Jedoch beschränken sich diese Arbeiten im Wesentlichen auf die Verarbeitung und die Änderungen des Eigenschaftsprofils durch den Recyclingprozess.

Für viele Kunststoffe sind bis zum fertigen Produkt weiterführende Verarbeitungsschritte notwendig. Im Bereich der flexiblen Packmittel bedeutet dies beispielsweise in den meisten Fällen das Schweißen der Kunststoffolie. Die Schweißbarkeit ist eine Grundvoraussetzung und wurde bisher im Zusammenhang mit Rezyklaten unzureichend berücksichtigt. Für einen flächendeckenden Einsatz von Sekundärkunststoffen in allen

Bereichen der Kunststoffindustrie sind Kenntnisse über die Schweißbarkeit und -parameter von Rezyklaten von großer Wichtigkeit, da Füge-technologien oft eine Schlüsselrolle, z. B. bei der Weiterverarbeitung von Folien oder Halbzeugen, einnehmen. Im Falle einer fehlerhaften Schweißung sind deshalb nicht nur die Ressourcen für den Schweißprozess selbst, sondern auch für alle vorangegangenen Bearbeitungsschritte des Bauteils wirkungslos bzw. verschwendet.

1.3 Zielsetzung

Aktuell werden in vielen Bereichen Verbundfolien eingesetzt, um technische Anforderungen zu erfüllen. In der Lebensmittel- und Kosmetikbranche können beispielsweise die notwendigen Barriereigenschaften nicht mit Monomaterialien erreicht werden [11, 12]. Da diese Folienverbunde jedoch nur bedingt recyclingfähig sind, legt das Forschungsvorhaben den Fokus auf Monomaterial-Packmittel und Packhilfsmittel aus PE. Beispiele für solche Pack(hilfs)mittel sind Luftpolsterfolien, Luftpolsterkissen oder Schrumpffolien. Zudem wird der Einsatz von Monomaterial-Folien zukünftig weiter steigen, da die mangelnde Recyclingfähigkeit die Multimaterial-Folien in absehbarer Zeit unattraktiv macht. Hier spielen mehrere Faktoren, wie schlechtes Image, erhöhte Lizenzentgelte oder ein defacto Verbot durch Mindeststandards für Recyclingfähigkeit, eine wesentliche Rolle [13, 14].

Der Einsatz von Sekundärrohstoffen im Bereich der flexiblen Packmittel bietet somit ein großes Potenzial für die Kreislaufwirtschaft. Jedoch gibt es aktuell keine wissenschaftlichen Kenntnisse über den Einfluss von Störstoffen, aus dem Recyclingprozess, auf die Schweißbarkeit von Polymeren. Zur Etablierung einer umfassenden Kreislaufwirtschaft sind, neben den Kenntnissen über die Schweißbarkeit von Recyclingkunststoffen, auch Kenntnisse über die Eignung verschiedener Schweißverfahren zur Verarbeitung von Rezyklaten dringend notwendig.

Das Hauptziel des Forschungsvorhabens ist daher die Evaluation von etablierten Fügeverfahren im Hinblick auf die Schweißbarkeit von PE-Folien mit hohem Anteil an Rezyklat aus verschiedenen Quellen bzw. verschiedenen Aufbereitungsqualitäten.

Das CircularWeld-Projekt verfolgt dabei mehrere aufeinander aufbauende Ziele:

1. Die Extrusion von PE-Folien aus verschiedenen Neuwaren und Post-Consumer-Rezyklaten sowie die Charakterisierung der resultierenden Materialien.

2. Umfassende Schweißversuche mit für Folien typischen Prozessen und eine mechanische Bewertung der hergestellten Verbindungen.
3. Analysen der Korrelationen zwischen Schweißnahtqualität und Material- bzw. Prozesskennwerten, um potenzielle Hemmnisse beim Schweißen von Rezyklaten bzw. optimale Prozessparameter zu identifizieren.
4. Eine ökologische Bewertung zum potenziellen Einsparpotenzial durch den Einsatz von Rezyklatfolien.

Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens sollen in Handlungsempfehlungen für die Industrie zusammengefasst werden und Anhaltspunkte geben, mit welchen Schweißverfahren und in welchem Umfang Rezyklate aus PE umgesetzt werden können.

2 Stand der Technik

2.1 Recycling von Kunststoffabfällen

Für die Wiederaufbereitung von Kunststoffabfällen existieren zwei Verfahren: das werkstoffliche und das rohstoffliche Recycling [15, 16]. Im weiteren Sinne wird das Verbrennen von Kunststoffabfällen auch oft als eine Form des energetischen Recyclings betrachtet, jedoch zeichnet sich in der aktuellen Gesetzgebung ein Trend gegen eine thermische Verwertung ab. Beim rohstofflichen bzw. chemischen Recycling werden die Makromoleküle der Kunststoffe wieder in ihre niedermolekularen Bausteine gespalten. Nach einer Reinigung und Aufbereitung können diese erneut für die Herstellung von Kunststoffen verwendet werden. Aktuell ist die Methode des rohstofflichen Recyclings weniger verbreitet, da sie sich nur für stark heterogene Abfälle eignet. Im Folgenden wird daher das werkstoffliche Recycling näher betrachtet.

Bei den gegenwärtigen Abfallströmen wird prinzipiell je nach Herkunft zwischen zwei Arten von Materialströmen unterschieden. Dazu gehören die sog. Post-Industrial-Abfälle, unter denen man in der Regel Produktionsausschüsse, z. B. Verteiler, Anschnitt, Anguss und Grate, versteht. Diese können sortenrein oder vermischt vorliegen, sind meist frei von Verunreinigungen und werden oft innerbetrieblich wiederverwertet [17]. In Deutschland betrug die Menge dieser Abfälle im Jahr 2017 ca. 0,9 Mio. t bzw. ca. 7 % der eingesetzten Kunststoffmenge [18]. Der zweite Abfallstrom sind die sog. Post-Consumer-Abfälle, d. h. Produktabfälle, die nach der Nutzung beim Endverbraucher entstehen und insbesondere Verpackungsabfälle umfassen. Diese können sortenrein oder vermischt sein und weisen sehr häufig Verunreinigungen aus der Nutzung auf [17]. In Deutschland fielen im Jahr 2017 ca. 5 Mio. t dieser Abfallkategorie an [18].

Das werkstoffliche Recycling beinhaltet je nach Sortenreinheit der Kunststoffabfälle zwei unterschiedliche Szenarien, die sog. Closed-Loop- und die sog. Open-Loop-Anwendungen. In einer Closed-Loop-Anwendung befinden sich nur besonders sortenreine Kunststoffabfälle aus klar definierten Quellen bzw. Anwendungen [15]. Beispiele hierfür sind Polyethylenterephthalat-(PET)-Flaschen, Mülltonnen, Flaschenkisten sowie Automobilteile und viele Post-Industrial-Abfälle. Innerhalb des Closed-Loop kommt es zu keinem Down-Cycling, d. h. die aufbereiteten Kunststoffabfälle werden wieder zu einem identischen Produkt verarbeitet [19]. Im Gegensatz dazu befindet sich in einem Open-Loop ein gemischter Abfallstrom. Ein Beispiel hierfür sind Kunststoffabfälle aus dem Haushalt,

die eine Vielzahl von Kunststoffen wie Polyolefine, Polyvinylchlorid (PVC), Polystyrol (PS) oder Polykondensate umfassen. Unabhängig von der Reinheit der Kunststoffabfälle müssen diese für die jeweilige Anwendung aufbereitet werden. Beispielsweise verlieren Kunststoffprodukte während der Verarbeitung und ihrer Lebensdauer Stabilisatoren und andere funktionelle Additive. Durch Hydrolyse und photo-oxidative Abbaumechanismen reduziert sich die Molekülkettenlänge oder es können Verzweigungen entstehen [20]. Diesen Abbaumechanismus und dem Verlust von Additiven muss im Recycling entgegengewirkt werden, um das Regranulat technisch nutzbar zu gestalten. Durch eine geeignete Materialaufbereitung, z. B. eine Prozessführung mit Entgasung und Schmelzefiltration sowie Additivierung oder Verschnitt mit Neuware, lassen sich die gewünschten Materialeigenschaften einstellen. Auf diesem Weg werden von spezialisierten Recycling-Unternehmen bereits heute sowohl Post-Industrial-Abfälle wie auch Post-Consumer-Abfälle in großem Umfang zu Produkten (Rezyklaten) mit definierten Spezifikationen für verschiedene Zielanwendungen aufbereitet, vgl. Tabelle 1.

Tabelle 1: Auswahl marktgängiger Rezyklate mit Herkunft der Abfälle sowie Zielanwendungen.

Hersteller	Typen-bezeichnung	Herkunft	Zielanwendung
LyondellBasell Industries N.V.	CirculenRecover HD5603 Ivory	> 98 % Post-Consumer	Extrusions- und Blasformanwendungen
Interseroh+ GmbH	Recythen, Pro-cyclen	100 % Post-Consumer [21]	Extrusions- und Spritzgussanwendungen
mtm plastics GmbH	Purpolen TM (HDPE, PP)	100 % Post-Consumer [22]	Extrusions- und Spritzgussanwendungen
Vogt-Plastic GmbH	PE	100 % Post-Consumer [23]	Extrusions- und Blasformanwendungen
RSH POLY-MERE GmbH	LDPE 2010 F	100 % Post-Industrial [24]	Folienextrusion: Produkt- und Transportverpackungen
RSH POLY-MERE GmbH	LDPE 2012 WW	100 % Post-Consumer [24]	Folienextrusion: Produkt- und Transportverpackungen

Die Änderungen des Eigenschaftsprofils von Rezyklaten im Vergleich zur Neuware wurde bereits in zahlreichen Forschungsvorhaben beschrieben [8–10]. Luzuriaga et al.,

Jansson et al. und Vilaplana et al. simulierten das Recycling und den dazugehörigen Alterungsprozess von LDPE/High Density Polyethylen (HDPE) [8], Polypropylen (PP) [9] und PS [10]. Es zeigte sich dabei ein Einfluss des Recyclingprozesse auf verschiedene Materialkennwerte wie Elastizitätsmodul (E-Modul), Melt-Flow-Rate (MFR), Schlagzähigkeit und Bruchdehnung. Balart et al. untersuchten die Eigenschaften von recycelten Polycarbonat/Acrylnitril-Butadien-Styrol (PC/ABS) Blends [25]. Einen besonders starken Einfluss auf die mechanischen Kennwerte hat die Elastomerkomponente des Blends. Sie ist besonders empfindlich gegenüber thermo-oxidativem Abbau und entscheidend für die Mischbarkeit sowie Haftungseigenschaften zur Polymermatrix. Meran et al. untersuchten den Einfluss des Rezyklatanteils (Post-Consumer) auf die Zugfestigkeit von LDPE, HDPE und PP [26]. Für alle drei Kunststoffe sinkt die Zugfestigkeit mit steigendem Anteil. Bei einem Rezyklatanteil von 100 % wurden nur noch 66 % (PP), 65 % (LDPE) und 61 % (HDPE) der Zugfestigkeit von Neuware erreicht. Brachet et al. zeigten, dass für Post-Consumer PP andere Wechselwirkungen mit Additiven auftreten können [27]. Anders als bei der Neuware ist es nicht möglich, die mechanischen Kennwerte Zugfestigkeit und Schlagzähigkeit über die Zugabe von Ethylene-Octene Rubber (EOR) und Calciumcarbonat (CaCO_3) zu verbessern. Strapasson et al. untersuchten die mechanischen Eigenschaften von PP/LDPE Blends, wie sie häufig aus dem Recycling von stark heterogenen Siedlungsabfällen gewonnen werden [28]. Dabei zeigte sich, dass ein Anteil von 25 % LDPE die mechanischen Kennwerte von PP ähnlich stark reduziert, wie eine um 10 °C erhöhte Verarbeitungstemperatur.

2.2 Folienextrusion

Kunststofffolien werden neben den Verarbeitungsverfahren Gießen, Kalandrieren oder Blasformen meist durch einen kontinuierlichen Extrusionsprozess bzw. der Cast-Folien-Extrusion hergestellt [29].

Zentrales Element bei den Extrusionsprozessen bildet der Extruder zur Plastifizierung der Thermoplaste, vgl. Abbildung 2. Im Inneren eines Zylinders, welcher sowohl beheizt als auch gekühlt werden kann, befindet sich eine Schnecke. Ein Elektromotor treibt die Schnecke an. Über einen Trichter wird das Kunststoffgranulat in den Innenraum des Extruders eingezogen, wo es aufgeschmolzen, homogenisiert und zur Austragszone transportiert wird [30].

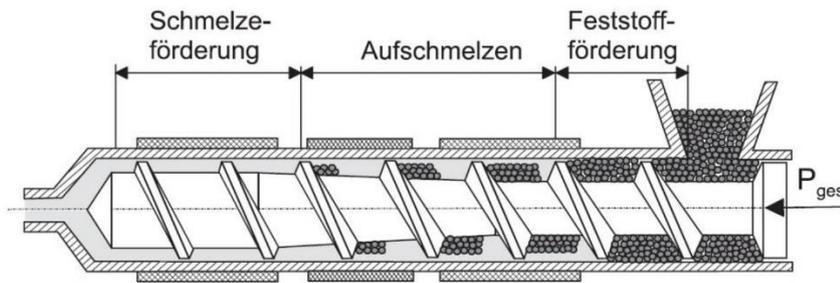


Abbildung 2: Extruder mit Funktionszonen und Schnecken Aufbau [29].

Zur Förderung der Schmelze können bei einem Einschneckenextruder, je nach Art des Kunststoffes, verschiedene Schnecken verwendet werden. Die universal einsetzbare Schnecke ist die 3-Zonen-Schnecke. In der Einzugszone (Bereich der Feststoffförderung) ist der Schneckendurchmesser am geringsten, über die Kompressionszone (Bereich zum Aufschmelzen) nimmt er kontinuierlich zu, bis er in der Austragszone (Bereich der Schmelzeförderung) sein Maximum erreicht.

Die zum Aufschmelzen des Materials notwendige Wärme wird zum einen über die am Zylinder außen angebrachten Heizungen, zum anderen durch die Rotation der Schnecke eingebracht (Scherenergieeintrag). Neben der Überführung des Kunststoffes in den fließfähigen Zustand, wird in der Kompressionszone der Kunststoff verdichtet, entlüftet und der Druckaufbau zur Überwindung des nachfolgenden Formwerkzeugs erzeugt [29].

Neben den Einschneckenextrudern gibt es auch Doppelschneckenextruder, die mit zwei nebeneinander liegenden Schnecken arbeiten und in einem Zylinder mit achtförmiger Bohrung rotieren. Unterschieden werden dabei gleich- und gegenläufige Doppelschneckenextruder. Beim hier verwendeten gleichläufigem Doppelschneckenextruder rotieren zwei achsparallele Schnecken mit gleicher Drehrichtung und -geschwindigkeit. Diese Bauform wird vor allem bei der Herstellung, Aufbereitung und Verarbeitung von Kunststoffen eingesetzt und ist bzgl. des Förderprinzips (Schleppförderung) vergleichbar mit dem Einschneckenextruder [29]. Ein wesentlicher Vorteil zu Letzterem besteht allerdings in einer besseren Homogenisierung von Mischungen [30]. Zudem sind diese, insb. in der Forschung, modular ausgeführt und lassen sich an die benötigten Parameter und Scherenergieeinträge anpassen [31].

Am Ende des Extruders tritt die Kunststoffschmelze aus einem Werkzeug bzw. einer Düse aus, die sich in ihrer Bauart und Geometrie nach den Verarbeitungsverfahren und herzustellenden Produkten unterscheidet. Über die Düse wird der Schmelzestrom in die passende Profilform umgeformt [29]. Direkt nach dem Austritt aus dem Werkzeug hat

das Profil seine finale Form noch nicht. Abzugskraft, Strangaufweitung, Relaxationsvorgänge und Abkühlgeschwindigkeit beeinflusst die Form des extrudierten Profils. Bei der hier betrachteten Cast-Folien-Extrusion tritt die Schmelze aus einer Breitschlitzdüse aus und wird durch nachgelagerte Aggregate weiterverarbeitet. Bei der Folienextrusion wird die extrudierte Folie beispielsweise über ein Glättwerk mit Walzen abgezogen, verstreckt, gekühlt, geglättet und kalibriert. Abschließend wird die Folie aufgewickelt und steht als fertiges Halbzeug auf Rollen zur Verfügung.

2.3 Folienschweißen

Im Verpackungsbereich werden Kunststoffe überwiegend als Folien (flächige Halbzeuge mit einer Dicke zwischen 2 und 500 μm) eingesetzt. Eines der wichtigsten Weiterverarbeitungsverfahren von extrudierten Folien ist das Schweißen, welches laut DIN 1910-3 als das Verbinden von gleichartigen Thermoplasten unter Anwendung von Wärme und Druck mit oder ohne Verwendung von Schweißzusätzen definiert ist [32]. Kunststofffolien können generell mit unterschiedlichen Schweißverfahren miteinander verbunden werden, wie z. B. durch Wärmekontaktschweißen, Wärmeimpulsschweißen, Ultraschallschweißen oder Hochfrequenzschweißen. Diese Verfahren haben jeweils material- und anwendungsspezifisch Vor- und Nachteile. In den meisten Fällen wird das Schweißverfahren durch die zu schweißenden Materialien und die entstehenden Kosten vorgegeben. Da sich das Verfahren des Hochfrequenzschweißens nur für polare Kunststoffe eignet, wird es im Folgenden nicht berücksichtigt.

2.3.1 Wärmekontaktschweißen

Das Wärmekontaktschweißen (WKS), vgl. DIN 1910-3 [32], wird häufig zum Verbinden von thermoplastischen Folien und vorwiegend bei Polyolefinen eingesetzt. In den Richtlinien des Deutschen Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e. V. (DVS) wird dieses Verfahren auch als Thermokontaktschweißen (TK) bezeichnet und ist in der DVS-Richtlinie 2219-2 beschrieben [33].

Die zu schweißenden Folien werden bei diesem Verfahren mit Hilfe von dauerhaft beheizten Werkzeugen (Stege, Backen, Heizelemente) bis in den Schmelzbereich erwärmt und unter gleichzeitiger Druckaufbringung geschweißt, vgl. Abbildung 3. Die Wärme wird hierbei von den Schweißbacken, welche von außen auf die zu schweißenden Folien gepresst werden, an die Folien abgegeben und gelangt durch Wärmeleitung an ihre Innenflächen. Die Temperatur der beiden Schweißbacken kann dabei auch unterschiedlich

eingestellt sein. Nach dem Verbinden wird die Schweißnaht im warmen Zustand aus dem Bereich der Schweißbacken entfernt.

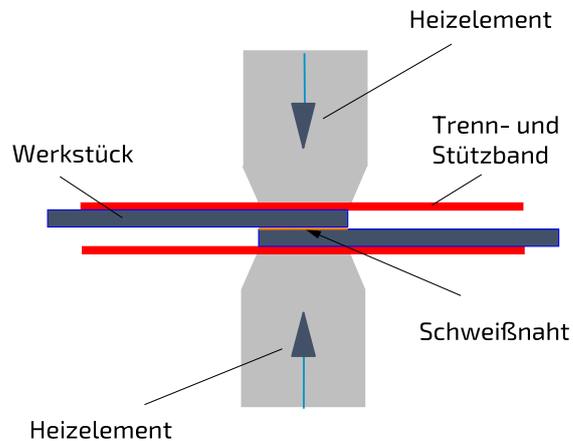


Abbildung 3: Schematische Darstellung des Wärmekontaktschweißens in Anlehnung an DIN 1910-3 [32].

Die wichtigsten Schweißparameter beim Wärmekontaktschweißen sind:

- Backentemperatur
- Schweißzeit
- Schweißdruck

Da die Wärme von außen durch die zu schweißenden Folien hindurch geleitet wird, besteht ein direkter Zusammenhang zwischen Backentemperatur, Schweißzeit und resultierender Nahtqualität. Je kürzer die Schweißzeit ist, desto höher muss die Werkzeugtemperatur eingestellt werden, um eine hohe Schweißnahtqualität zu erzielen. Bei einer zu niedrigen Backentemperatur wird beispielsweise in der zu Verfügung stehenden Schweißzeit nicht die notwendige Temperatur bzw. Energie in der Schweißzone erreicht. Somit kommt keine oder zumindest keine optimale Schweißnaht zustande. Andererseits besteht bei zu hohen Backentemperaturen oder zu langen Schweißzeiten die Gefahr, dass die Folienoberflächen beschädigt oder zerstört werden. Darüber hinaus kann bei zu geringem Schweißdruck ein ungenügender Kontakt zwischen den beiden zu schweißenden Folien entstehen. Die Folge kann eine unregelmäßige bzw. mangelhafte Schweißnaht bezüglich Dichtheit oder Nahtfestigkeit sein. Ein zu hoher Schweißdruck kann zum Herausquetschen des aufgeschmolzenen Material aus dem Schweißnahtbereich führen, wodurch zu wenig Schmelze bzw. Restmaterial für eine geeignete Nahtausbildung zur Verfügung stehen kann [34].

2.3.2 Wärmeimpulsschweißen

Beim Wärmeimpulsschweißen (HI) werden meist linienförmige Heizelemente auf die übereinander gelegten Folien gepresst. Die Erwärmung der Heizelemente (einseitig oder beidseitig) erfolgt impulsartig mit Niederspannungs-Heizbändern, die durch einen kurzen Stromimpuls aufgeheizt werden. Auf diese Weise werden die Folien während einer einstellbaren Zeit (von ca. 0,5 bis 5,0 s) auf die Schweißtemperatur erwärmt und unter Druck verschweißt. Im Gegensatz zum Wärmekontaktschweißen kann die Naht unter Druck abkühlen, vgl. Abbildung 4 [32].

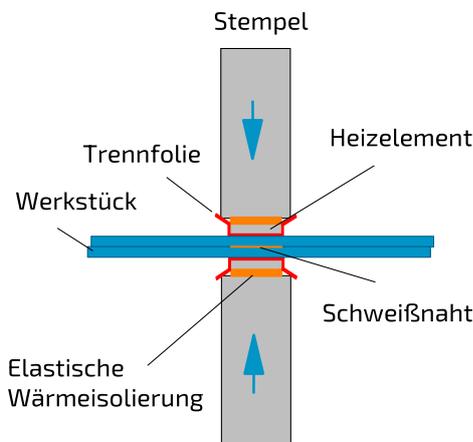


Abbildung 4: Schematische Darstellung des Wärmeimpulsschweißens in Anlehnung an DIN 1910-3 [32].

2.3.3 Ultraschallschweißen

Beim Ultraschallschweißen (US), im Folienbereich auch Ultraschallsiegeln genannt, werden hochfrequente mechanische Schwingungen verwendet, um den Kunststoff im Fügebereich durch Absorption der mechanischen Schwingungen, Reflexion in der Fügezone und durch die Grenzflächenreibung der Fügeflächen aufzuschmelzen und unter Aufbringung eines Fügedrucks zu verbinden. Über eine abschließende Haltephase setzt die Abkühlung des Schmelzefilms ein. Dieses Fügeverfahren ist in der DVS-Richtlinie 2216-1 beschrieben, [35].

Eine Ultraschallschweißmaschine besteht u. a. aus folgenden, wesentlichen Komponenten: Ultraschallgenerator, Ultraschallwandler (Schallkopf, Konverter), Transformationsstück (Booster), Schweißwerkzeug (Sonotrode), Aufnahmewerkzeug (Amboss) sowie einer Schweißpresse zur Erzeugung der statischen Schweißkraft, vgl. Abbildung 5 [35].

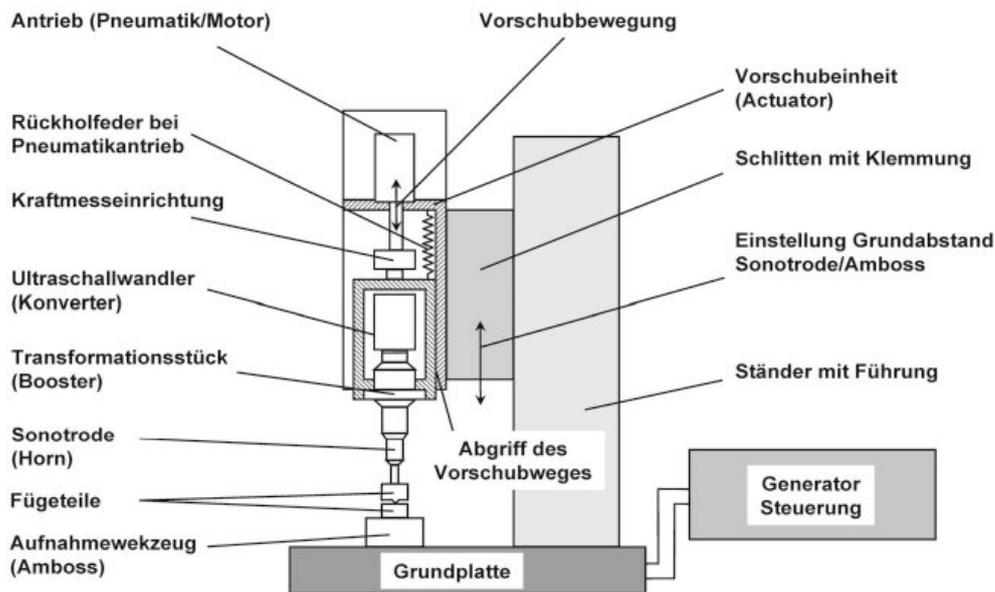


Abbildung 5: Schematischer Aufbau einer Ultraschallschweißmaschine [35].

Der Ultraschallgenerator formt die niederfrequente elektrische Energie des Wechselstromnetzes (50 Hz) in eine hochfrequente elektrische Energie des Ultraschallbereichs um. Die verwendeten Betriebsfrequenzen liegen zwischen 20 und 70 kHz. Danach setzt der Schallwandler (Konverter) die hochfrequente elektrische Wechselspannung über ein piezoelektrisches Bauelement in mechanische Schwingungen der gleichen Frequenz um. Handelsübliche piezoelektrische Ultraschallwandler schwingen fast stets longitudinal. Folglich schwingt die schallabstrahlende Fläche des Schwingers um die Ruhelage der Fläche. Mit Hilfe des Transformationsstücks (Booster) kann der Amplitudenbereich der Schwingung auf die jeweilige Aufgabenstellung angepasst werden. Die Sonotrode hat die Aufgabe die Ultraschallschwingung auf die beiden Fügepartner zu übertragen. Dabei treten Schwingungen mit Amplituden im Bereich von 10 bis 80 μm auf. Darüber hinaus überträgt die Sonotrode die Schweißkraft auf die Fügepartner. Der Amboss übernimmt als Gegenlager zur Sonotrode die Aufgabe des schallharten Anschlusses und ist somit für die Reflexion der Schallwellen verantwortlich. Im Gegensatz zum Wärmekontaktschweißen sind beim Ultraschallschweißen die Werkzeuge nicht beheizt und ermöglichen neben der Verarbeitung von thermisch empfindlichen Materialien auch extrem kurze Prozesszeiten von 0,1 bis 1,0 s [35, 36].

3 Lösungsweg zur Erreichung des Forschungsziels

Zur Erreichung des Forschungsziels wurden mehrere aufeinander aufbauende Arbeitsschritte definiert, vgl. Abbildung 6:

1. Zu Beginn des Vorhabens wurde das anwendungsspezifische Materialscreening aktualisiert und, in Absprache mit den Firmen des Projektbegleitenden Ausschusses (PA), geeignete Rezyklate ausgewählt. Dabei wurde die Verwendung von Rezyklaten aus verschiedenen Aufbereitungsqualitäten berücksichtigt.
2. Die beschafften Materialien wurden anschließend im Extrusionsprozess mit schrittweise sinkendem Anteil an Neuware bis zu einem Rezyklatanteil von 100 % gemischt und zu Folien extrudiert.
3. Die hergestellten Folien wurden mit thermischen, rheologischen und mechanischen Analysen charakterisiert.
4. Mit den für Folien etablierten Verfahren Wärmekontakt-, Wärmeimpuls- und Ultraschallschweißen wurden Schweißversuche unter Variation der Prozessparameter Temperatur bzw. Amplitude, Schweißzeit und Schweißkraft in einem statistischen Versuchsplan durchgeführt. Hierbei wurden Probekörper für die mechanischen und mikroskopischen Analysen hergestellt.
5. Für die Qualitätsprüfung wurden neben den geschweißten Proben auch die Grundmaterialien im Zugversuch geprüft. Neben den mechanischen Prüfungen wurden die hergestellten Schweißproben auch mikroskopischen Tests unterzogen, die Schweißnahtqualität ermittelt und eine Korrelation der Ergebnisse durchgeführt.
6. Um die tatsächlichen ökologischen Effekte des Rezyklateinsatzes in Folienanwendungen zu erfassen, wurden anwendungsbezogene Nachhaltigkeitsbewertungen durchgeführt und Einsatzpotentiale der untersuchten Rezyklate bewertet.

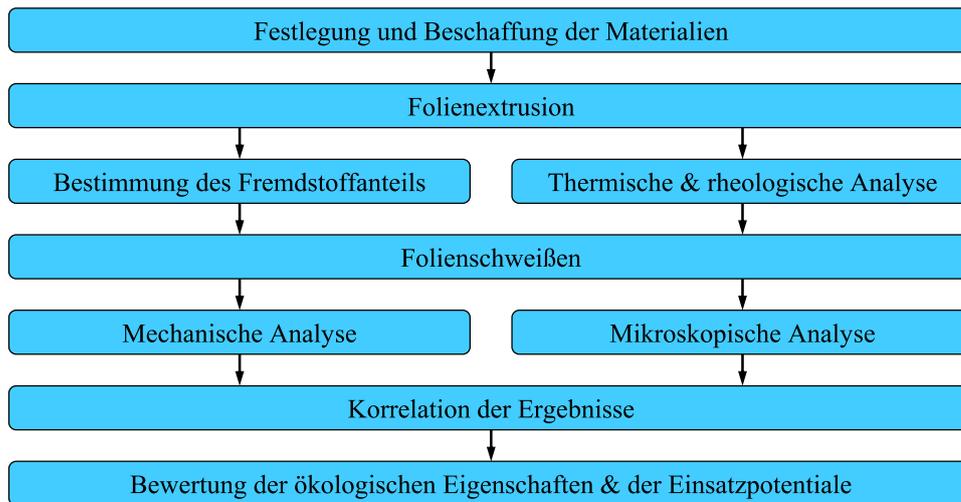


Abbildung 6: Schematische Darstellung des Arbeitsplans des CircularWeld-Projekts.

4 Durchgeführte Arbeiten

4.1 Materialauswahl

Nach Rücksprache mit dem PA wurden die in Tabelle 2 aufgelisteten Rezyklate gesucht. Die Auswahl beschränkte sich dabei auf Weich-Polyethylen bzw. Low Density Polyethylen (LDPE) für den Verpackungsbereich. Das Material wurde in Form von Granulat für die Folienextrusion beschafft und wird als Post-Consumer-Material seitens des PA als relevanteste Materialgruppe angesehen. Der Recyclinganteil der Rezyklate 1, 2 und 4 beträgt 100 %. Das Rezyklat 3 ist herstellerseitig mit Neuware gemischt und hat einen Anteil an Rezyklat von 60 %.

Für die Folienherstellung, vgl. nachfolgenden Abschnitt 4.2, mit unterschiedlichen Rezyklatanteilen wurden zudem Neuwaren ausgewählt und beschafft, s. Tabelle 3. Die technischen Datenblätter der vier Rezyklate sowie der beiden Neuwaren können dem Anhang entnommen werden, s. A.1-A.4 (Rezyklate) bzw. A.5-A.6 (Neuwaren). Der wesentliche Unterschied der beiden Neuwaren liegt laut Datenblatt im Wert der Melt-Flow-Rate (MFR). Dieser liegt für die Neuware 1 bei 0,75 und für die Neuware bei 2 g/10min (190°C, 2,16 kg).

Tabelle 2: Auswahl der verwendeten Rezyklate.

Rezyklat (R)	Hersteller	Bezeichnung
1	APK Aluminium und Kunststoffe AG	Mersalen® LDPE RCY 05
2	APK Aluminium und Kunststoffe AG	Mersalen® LDPE NCY PCR 02
3	Ineos Holdings Ltd.	Recycl-IN rLL9110 (60 %)
4	Voigt Plastik GmbH & Co. KG	PE-LD 490-S

Tabelle 3: Auswahl der verwendeten Neuwaren.

Neuware (N)	Hersteller	Bezeichnung
1	LyondellBasell Industries N.V.	Lupolen 2420F
2	Borealis AG	FT6230

4.2 Folienextrusion

Die Folien wurden mit einer Folien-, Platten- und Kaschieranlage hergestellt. Der Versuchsaufbau mit allen Anlagenkomponenten ist in Abbildung 7 dargestellt. Die Anlage besteht aus einem gleichläufigem Doppelschneckenextruder der Firma COLLIN Lab & Pilot Solutions GmbH vom Typ ZK 25 T und kann variabel als Compoundierlinie zur Herstellung von Kunststoffgranulat oder als Folienextrusionslinie eingesetzt werden, vgl. Abbildung 9 rechts. Der Compoundierextruder verwendet Schnecken mit einem Durchmesser von 25 mm und weist ein Verhältnis von Länge zu Durchmesser (L/D) von 24 auf. Der Doppelschneckenextruder kann im Durchsatzbereich von 0,2 bis 10 kg/h betrieben werden. Die granulatformigen Werkstofftypen wurden dem Extruder im jeweils vorgegebenen Verhältnis mittels separater gravimetrischer Dosiergeräte der Firma Kubota Brabender Technologie GmbH zugegeben. Die am Ende des Schneckenbereichs homogen vorliegende Schmelze wurde über eine Breitschlitzdüse mit Fischschwanzverteiler der Firma COLLIN Lab & Pilot Solutions GmbH ausgebracht, vgl. Abbildung 8. Die Düse ist verantwortlich für die Formgebung und weist eine Breite von 100 mm und einen Austrittspalt von 0,5 mm auf. In einem anschließenden 3-Walzenglättwerk der Firma COLLIN Lab & Pilot Solutions GmbH vom Typ 168 und einer Walzenbreite von 400 mm wurden die extrudierten Folien gekühlt und geglättet.



Abbildung 7: Versuchsaufbau zur Folienextrusion.



Abbildung 8: Am Extruder angeflanschte Breitschlitzdüse für die Folienextrusion.



Abbildung 9: 3-Walzlättwerk (links) und Extruder (rechts) für die Folienextrusion.

Fortlaufend zur Folienherstellung wurde die Foliendicke stichpunktartig gemessen, auf ihre Maßhaltigkeit hin überprüft und die Prozesskonstanz kontrolliert. Um den Einfluss von Rezyklaten auf das Schweißverhalten im Folgenden analysieren zu können, wurden bei der Folienextrusion die jeweiligen Rezyklate schrittweise in steigendem Anteil mit den beiden Neuwaren gemischt (0, 20, 40, 60, 80 und 100 % Rezyklatanteil) und anschließend über die beschriebene Anlage zu Folien verarbeitet. Der Versuchsplan für die Folienextrusion und der Probennummerierung für die weitere Zuordnung ist in Tabelle 4 für die Mischungen der Rezyklate mit der Neuware 1 bzw. Tabelle 5 für die Mischungen der Rezyklate mit der Neuware 2 aufgelistet. Da das Rezyklat 3 bereits herstellerseitig mit einer Neuware gemischt vorliegt und einen Rezyklatanteil von 60 % aufweist, konnten Folien mit höheren Rezyklatanteilen (80 und 100 %) nicht hergestellt werden. Die Versuche für die Herstellung der reinen Folien mit 100 % Neuware sind in den aufgelisteten Versuchsreihen nur einmal enthalten, vgl. Tabelle 4 (Probe Nr. 1.1.1. für die Folie mit 100 % der Neuware 1) bzw. Tabelle 5 (Probe Nr. 2.1.1. für die Folie mit 100 % der Neuware 2). Die Versuche für die Herstellung der reinen Folie mit 60 bzw. 100 % Rezyklat sind ausschließlich in Tabelle 4 enthalten (Probe Nr. 1.1.6. für die Folie mit 100 % des Rezyklats 1, Probe Nr. 1.2.6. für die Folie mit 100 % des Rezyklats 2, Probe 1.3.4. für die Folie mit 60 % des Rezyklats 3 und Probe Nr. 1.4.6. für die Folie mit 100 % des Rezyklats 4). Die Protokolle zur Folienextrusion können dem Anhang entnommen werden, s. A.7-A.14 .

Eine beispielhafte Übersicht der extrudierten Folien für die weiteren Untersuchungen zeigt Abbildung 10 für die Neuware 1 bzw. Abbildung 11 für die Neuware 2 und die mit den Rezyklaten 1-4 jeweils hergestellten Mischungen.

Tabelle 4: Versuchsplan für die Folienextrusion mit Probennummerierung für die Mischungen der Rezyklate mit Neuware 1.

Probe Nr.	Neuware (N)		Rezyklat (R)		Rezyklatanteil in %
	Material	Anteil	Material	Anteil	
1.1.1.	1	1,00	1	0,00	0
1.1.2.	1	0,80	1	0,20	20
1.1.3.	1	0,60	1	0,40	40
1.1.4.	1	0,40	1	0,60	60
1.1.5.	1	0,20	1	0,80	80
1.1.6.	1	0,00	1	1,00	100
1.2.2.	1	0,80	2	0,20	20
1.2.3.	1	0,60	2	0,40	40
1.2.4.	1	0,40	2	0,60	60
1.2.5.	1	0,20	2	0,80	80
1.2.6.	1	0,00	2	1,00	100
1.3.2.	1	0,67	3	0,33	20
1.3.3.	1	0,33	3	0,67	40
1.3.4.	1	0,00	3	1,00	60
1.4.2.	1	0,80	4	0,20	20
1.4.3.	1	0,60	4	0,40	40
1.4.4.	1	0,40	4	0,60	60
1.4.5.	1	0,20	4	0,80	80
1.4.6.	1	0,00	4	1,00	100

Tabelle 5: Versuchsplan für die Folienextrusion mit Probennummerierung für die Mischungen der Rezyklate mit Neuware 2.

Probe Nr.	Neuware (N)		Rezyklat (R)		Rezyklatanteil in %
	Material	Anteil	Material	Anteil	
2.1.1.	2	1,00	1	0,00	0
2.1.2.	2	0,80	1	0,20	20
2.1.3.	2	0,60	1	0,40	40
2.1.4.	2	0,40	1	0,60	60
2.1.5.	2	0,20	1	0,80	80
2.2.2.	2	0,80	2	0,20	20
2.2.3.	2	0,60	2	0,40	40
2.2.4.	2	0,40	2	0,60	60
2.2.5.	2	0,20	2	0,80	80
2.3.2.	2	0,67	3	0,33	20
2.3.3.	2	0,33	3	0,67	40
2.4.2.	2	0,80	4	0,20	20
2.4.3.	2	0,60	4	0,40	40
2.4.4.	2	0,40	4	0,60	60
2.4.5.	2	0,20	4	0,80	80



Abbildung 10: Hergestellte Folien mit der Neuware 1 und der jeweiligen Kombination mit den Rezyklaten 1-4, vgl. Tabelle 4. Von links nach rechts: Mischungen mit Rezyklat 1, 2, 3 und 4. Von oben nach unten: Neuware bzw. geringster Rezyklatanteil (20 %) bis höchster Rezyklatanteil (60 bzw. 100 %).



Abbildung 11: Hergestellte Folien mit der Neuware 2 und die jeweiligen Kombinationen mit den Rezyklaten 1-4, vgl. Tabelle 5.

4.3 Charakterisierung der Materialien

4.3.1 Dynamische Differenzkalorimetrie (DSC)

Die dynamische Differenzkalorimetrie (englisch: differential scanning calorimetry, DSC) wurde mit einem Gerät der Firma LINSEIS Messgeräte GmbH vom Typ Chip DSC 100 an den extrudierten Folien unter Stickstoffatmosphäre durchgeführt, vgl. Abbildung 12.



Abbildung 12: DSC zur Bestimmung der thermischen Eigenschaften der extrudierten Folien. Für die Materialien N1 und N2 sowie R1 bis R4 wurde jeweils eine Probenmenge von ca. 10 mg aus den Folien entnommen, in einen Aluminiumtiegel mit gelochtem Deckel überführt und mit einer Presse verkapselt. Die Messungen erfolgten im Temperaturbereich von 35 bis 250 °C mit einer Aufheiz- und Abkühlrate von 20 K/min. Dabei wurden immer zwei Aufheiz- und eine Abkühlkurve gemessen.

Die ermittelten thermischen Eigenschaften liefern wichtige Größen für die Weiterverarbeitung (Schweißen) und ermöglichen zudem über eine Auswertung der Schmelzpeaks eine Bestimmung von Fremdstoffen in den Recyclingmaterialien.

4.3.2 Rheologische Analyse

Die Kenntnis der Fließeigenschaften der thermoplastischen Kunststoffe ist von besonderer Bedeutung, da der Werkstoff in nahezu allen Verarbeitungsverfahren im schmelzflüssigen Zustand vorliegt [31]. Insbesondere ist das Verhalten der Kunststoffschmelze während des Schweißvorgangs für die Ausbildung der Schweißnaht und deren Festigkeit von besonderem Interesse. Das Fließverhalten der Kunststoffschmelze wird durch die Viskosität beschrieben.

Zur Ermittlung der Viskosität wurde ein Rheometer der Firma Anton Paar Germany GmbH vom Typ MCR 302e verwendet, vgl. Abbildung 13. Als Messgeometrie wurde die Platte-Platte Variante mit einem Durchmesser von 20 mm und einem konstanten Spaltmaß von 1,0 mm gewählt. Der relevante Temperaturbereich für die Ermittlung der komplexen Viskosität wurde für diesen Fall von 150 °C bis 250 °C festgelegt. Die Messungen wurden im Oszillationsmodus bei einer Scherdeformation von 0,1 %, einer Kreisfrequenz von 10 rad/s und mit einer Aufheizrate von 5 K/min durchgeführt.



Abbildung 13: Rheometer zur Bestimmung der Fließeigenschaften der verwendeten Materialien.

4.3.3 Dickenmessung der extrudierten Folien

Im Anschluss an die Folienextrusion wurden alle Folien mit einem Dickenmessgerät auf ihre Maßhaltigkeit hin überprüft. Die Kontrolle erfolgte an jeweils 10 Messpunkten und wurde statistisch ausgewertet. Den Messaufbau zeigt Abbildung 14.



Abbildung 14: Messaufbau zur Dickenmessung der extrudierten Folien.

4.4 Folienschweißen

Aus den extrudierten Folien wurden zunächst rechteckige Folienstücke mit einer Breite von 80 mm und einer Länge von 70 mm ausgeschnitten. Die Längsrichtung der Zuschnitte entsprach dabei der Extrusionsrichtung der hergestellten Folien. Anschließend wurden die Folienzuschnitte mittels Wärmekontakt-, Wärmeimpuls- und Ultraschallschweißen gefügt. Bei den Versuchen wurden jeweils zwei Folien mit der gleichen Materialzusammensetzung miteinander verbunden. Für die verschiedenen Materialien bzw. Rezepturen wurden in Vorversuchen geeignete Schweißparameter ermittelt und die Grenzen des Prozessfensters festgelegt, vgl. Abbildung 15 und Tabelle 6.

Dabei wurden die Schweißnähte optisch auf Fehlstellen (Risse, Löcher) überprüft und auf eine vollständige Schweißung geachtet. Als minimalen Wert eines Prozessparameters (z. B. Werkzeugtemperatur, T_{\min}) wurde derjenige Wert ausgewählt, der in der Kombination mit den weiteren minimal ermittelten Prozessparametern (z. B. Schweißkraft, F_{\min} und Schweißzeit, t_{\min}) zu einer stoffschlüssigen Verbindung führte. Als maximaler Wert eines Prozessparameters (z. B. Werkzeugtemperatur, T_{\max}) wurde derjenige Wert ausgewählt, der in der Kombination mit den weiteren maximal ermittelten Prozessparametern (z. B. Schweißkraft, F_{\max} und Schweißzeit, t_{\max}) eine stoffschlüssige Verbindung zur Folge hatte. Schweißversuche mit Schweißparametern unterhalb der unteren Grenze des Prozessfensters resultierten in keiner stoffschlüssigen Verbindung. Wurden die Schweißparameter oberhalb der oberen Grenze des Prozessfensters eingestellt und damit Schweißversuche durchgeführt, verursachte dies eine optische Schädigung der Folie bzw. der Schweißnaht.

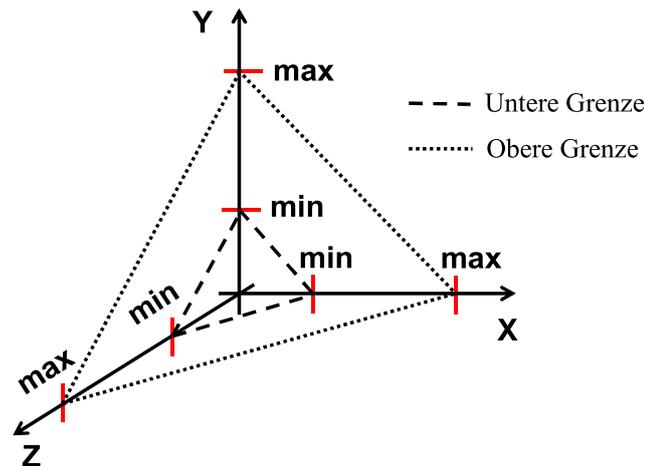


Abbildung 15: Schematische Darstellung der Grenzen des Prozessfensters.

Tabelle 6: Übersicht der Parameterkombinationen bei den Schweißversuchen.

	X_{\min}			X_{mitte}			X_{\max}		
	Y_{\min}	Y_{mitte}	Y_{\max}	Y_{\min}	Y_{mitte}	Y_{\max}	Y_{\min}	Y_{mitte}	Y_{\max}
Z_{\min}	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Z_{mitte}	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Z_{\max}	x	x	x	x	x	x	x	x	x

X: Werkzeugtemperatur beim WKS/HI bzw. Amplitude beim US

Y: Schweißkraft beim WKS/HI/US

Z: Schweißzeit beim WKS/HI/US

4.4.1 Wärmekontaktschweißen

Zur Herstellung der Schweißverbindungen beim Wärmekontaktschweißen wurde ein Laborschweißgerät der Firma Brugger Feinmechanik GmbH vom Typ HSG/ETK verwendet, vgl. Abbildung 16. Hierbei wurden Schweißbacken mit einer Länge von 150 mm und einer Breite von 2,0 mm jeweils für das Ober- und Unterwerkzeug eingesetzt.

Zur Bewertung des Einflusses der Schweißparameter auf die Schweißnahtqualität wurden die Schweißparameter je nach Folientyp (Materialzusammensetzung) innerhalb der in Tabelle 7 aufgeführten Grenzen variiert. Beide Schweißbacken wurden bei den durchgeführten Schweißversuchen jeweils auf die gleiche Temperatur erwärmt.

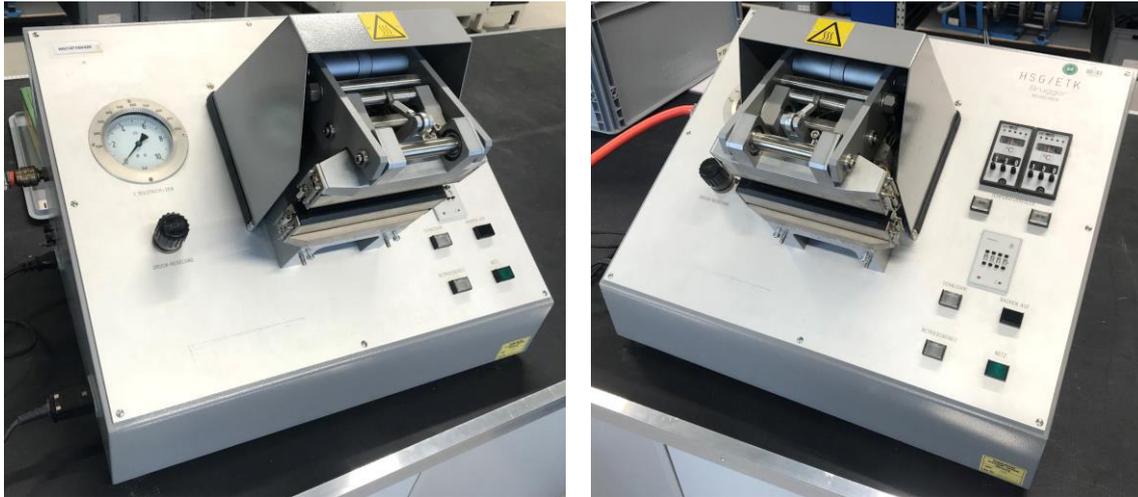


Abbildung 16: Verwendete Anlage zum Wärmekontaktschweißen.

Tabelle 7: Schweißparameter für das Wärmekontaktschweißen (WKS) bei der Probekörperherstellung und ihre Variationsgrenzen.

Schweißparameter	Variationsgrenzen
Backentemperatur in °C	124 ... 134
Schweißzeit in s	6,5 ... 10,5
Schweißkraft in N	40 ... 70

4.4.2 Wärmeimpulsschweißen

Zur Herstellung der Schweißverbindungen beim Wärmeimpulsschweißen wurde eine Impulsschweißzange der Firma hawo GmbH vom Typ hpl ISZ 630 verwendet, vgl. Abbildung 17. Der Impulsgeber hat eine Leistung von 320 W und eine Schweißspannung von 20 V. Die Zange hat eine Balkenbreite von 630 mm und erzeugt darüber eine Schweißnahtbreite von 3 mm.

Die Schweißzeit beginnt beim Schließen der Zange und endet nach Erreichen der Schweißzeit. Die Länge des Schweißimpulses bzw. der Schweißzeit kann am Gerät eingestellt werden. Der Zangenanpressdruck wird manuell aufgebracht. Dadurch bietet das Gerät nicht die Möglichkeit die Fügekraft konstant zu halten und für eine Parameterstudie zu variieren. Letzteres gilt auch für die Schweißtemperatur als weiterer wesentlicher Parameter für die Erzeugung von qualitativ hochwertigen Schweißnähten. Aus den genannten Gründen konnten mit diesem Versuchsaufbau keine reproduzierbaren und verwertbaren Ergebnisse erzielt werden.



Abbildung 17: Verwendete Schweißzange zum Wärmeimpulsschweißen.

Eine für dieses Vorhaben geeignete Wärmeimpuls-Schweißeinrichtung der Firma Toss GmbH & Co. KG vom Typ 760 befindet sich seitens der Forschungseinrichtung in der Beschaffung. Untersuchungen mit dieser Anlage zum Wärmeimpulsschweißverfahren konnten innerhalb des bewilligten Zeitraums nicht durchgeführt werden.

4.4.3 Ultraschallschweißen

Zur Herstellung der Schweißverbindungen beim Ultraschallschweißen wurde eine Ultraschallschweißmaschine der Firma Herrmann Ultraschalltechnik GmbH & Co. KG vom Typ HiQ DIALOG 4800 verwendet, vgl. Abbildung 18 links. Dazu wurde ein Amboss in Form eines Halbzylinders mit einer Länge von 260 mm und einem Radius von 1,5 mm (B 3 mm) eingesetzt. Die verwendete Stegsonotrode lag rechteckig ausgeführt vor und wies eine Länge von 270 mm und einer Breite von 21 mm auf, vgl. Abbildung 18 rechts. Die Arbeitsfrequenz des Systems betrug 20 kHz. Die Haltezeit wurde auf 1,0 s festgelegt, um eine vollständige Abkühlung der Schweißnähte sicherzustellen. Die Haltekraft entsprach der Schweißkraft. Aufgrund der Ambossgeometrie (Radius des Energierichtungsgebers) hängt die Kontaktfläche von Amboss und Folie von Material- und Schweißparametern ab. Um den Einfluss von Schweißparameteränderungen auf die resultierende Nahtfestigkeit herauszufinden, wurden jeweils die Amplitude, die Schweißzeit und die Schweißkraft variiert. Die verwendeten Schweißparameter und ihre Variationen zeigt Tabelle 8.



Abbildung 18: Verwendete Anlage zum Ultraschallschweißen (links) und Detaildarstellung von Sonotrode und Amboss (rechts).

Tabelle 8: Schweißparameter für das Ultraschallschweißen (US) bei der Probekörperherstellung und ihre Variationsgrenzen.

Schweißparameter	Variationsgrenzen
Amplitude in μm	18 ... 30
Schweißzeit in s	0,3 ... 0,6
Schweißkraft in N	350 ... 400

4.5 Mechanische Analyse

Die mechanische Analyse der Folien umfasst in erster Linie die Bestimmung der Zugfestigkeit der Grundmaterialien und die Nahtfestigkeit der geschweißten Folien. Die Zugversuche wurden auf einer Universal-Prüfmaschine der Firma ZwickRoell GmbH & Co. KG vom Typ Z010 entsprechend der gültigen Norm DIN EN ISO 527-3 [37] durchgeführt, vgl. Abbildung 19 links. Für die Bestimmung der Zugeigenschaften von Folien wurden Pneumatik-Probenhalter mit Backeneinsätze vom Typ 8287 des gleichen Herstellers verwendet, vgl. Abbildung 19 rechts. Es wurde im Normklima bei $23 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ und einer relativen Feuchte von $50 \pm 5 \text{ } \%$ geprüft. Je Prüfserie wurden fünf gleichartige Probekörper untersucht, welche zuvor mindestens 16 h unter Normklimabedingungen konditioniert wurden. Die Form der Probekörper vom Typ 2 war rechteckig mit einer Breite von 15 mm. Die freie Einspannlänge betrug 100 mm und die Prüfgeschwindigkeit

50 mm/min. Für die Charakterisierung der Schweißnaht wurde die Nahtfestigkeit der geschweißten Folien nach DIN 55529 [38] im Schälversuch geprüft, vgl. Abbildung 20.

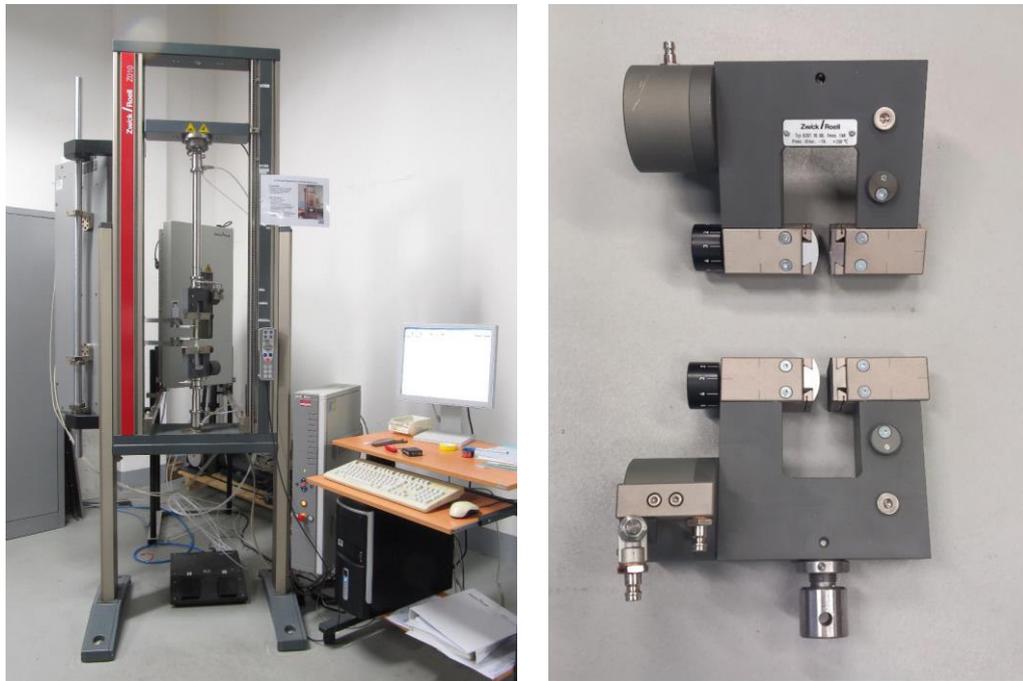


Abbildung 19: Universal-Prüfmaschine für die mechanische Analyse (links) und verwendete Spanbacken für Folien (rechts).

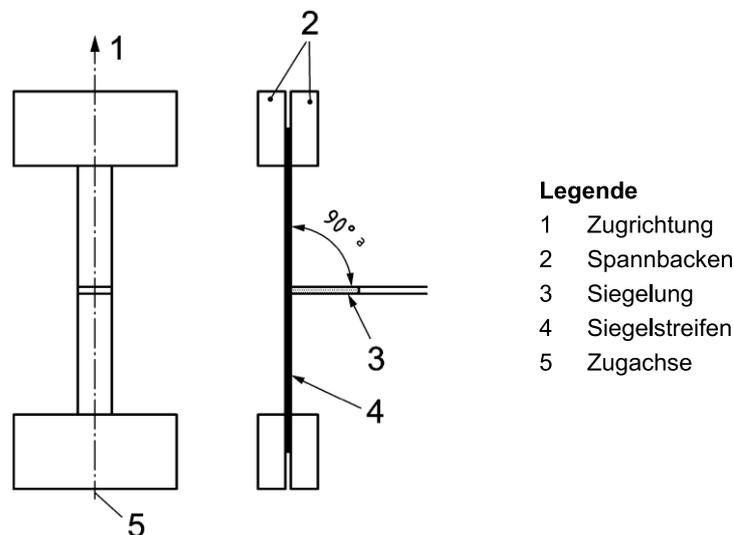


Abbildung 20: Schematische Darstellung der Prüfanordnung nach DIN 55529 [38].

Für die Prüfung der Nahtfestigkeiten wurden die gleichen Bedingungen (Prüfmaschine, Normklima, relative Luftfeuchte, Konditionierung sowie Anzahl und Form der Probekörper) wie bei den Zugversuchen der ungeschweißten Folien verwendet. Die freie Spannlänge bei den Versuchen betrug gemäß DIN 55529 50 mm und die Prüfgeschwindigkeit 100 mm/min. Die Dimension der Festigkeit ist Kraft pro Fläche und wird häufig

in den Maßeinheiten N/mm² bzw. MPa angegeben. Die Siegelnahtfestigkeit wird üblicherweise aber auch als Kraft pro Breite berechnet, woraus sich die Maßeinheit N/mm ergibt [38]. In der vorliegenden Arbeit wird diese Einheit (N/mm) verwendet.

4.6 Mikroskopische Analyse

Im Anschluss an die in Abschnitt 4.4 beschriebenen Schweißversuche wurden die Füge-nahte optisch bewertet. Hierfür wurden zunächst alle Schweißungen ohne optische Hilfsmittel begutachtet und basierend auf den Befunden ausgewählte Prüfkörper mit einem Auflichtmikroskop (VHX-600, Fa. Keyence) weitergehend analysiert. Der Fokus der Mikroskopie lag hierbei auf festigkeitsrelevanten Eigenschaften wie Nahtbreite und Gleichmäßigkeit der Naht sowie Ansätzen für Rissinitiierung.

4.7 Bewertung der ökologischen Eigenschaften und der Einsatzpotentiale von Rezyklaten

Neben der technischen Eignung der Rezyklatfolien in Schweißanwendungen wurde ein ökologischer Vergleich im Hinblick auf die eingesetzten Monomaterialfolien durchgeführt. Hier wurde in einer ersten Betrachtung erörtert, wie sich die verschiedenen Anteile an Rezyklatmaterial in der Folie ökologisch auswirkt. In einer weiteren Betrachtung wurde der Fokus auf das Lebenswegende der Folie gesetzt. Folien aus Monomaterial weisen eine höhere Recyclingfähigkeit als Mehrschichtfolien auf und können so einem Recyclingprozess zugeführt werden, statt verbrannt zu werden. Das Recycling von Mehrschichtfolien führt in jedem Fall zu einem Downcycling. In der zweiten Betrachtung wurde demnach der Einfluss der beiden Verwertungswege miteinander verglichen.

Der Energieeinsatz der Schweißverfahren kann, wenn in großtechnischen Anlagen durchgeführt, nicht abgeschätzt werden, weshalb dieser Verfahrensschritt aus der Betrachtung ausgeklammert wird. Es kann außerdem angenommen werden, dass der Energieaufwand des Schweißvorgangs materialunabhängig und damit für alle betrachteten Szenarien gleich groß ist und keinen Einfluss auf die erhaltenen Unterschiede hat.

Aus ökologischer Perspektive wurden die in Tabelle 9 gezeigten Auswirkungen mittels einer Ökobilanz untersucht. Indikatoren zur Öko- oder Humantoxizität wurden nicht berücksichtigt.

Tabelle 9: Für die Studie ausgewählte ökologische Aspekte und Indikatoren [39].

Aspekt	Kürzel	Indikator
Verbrauch fossiler Ressourcen	ADPf	Abiotic Depletion Potential (ADPf), in MJ
Klimawandel	GWP100	Global Warming Potential über 100 Jahre (GWP 100), inkl. Biogener Treibhausgase, in kg CO ₂ -äq.
Eutrophierung	EP	Eutrophierungspotential (EP), in kg PO ₄ ³⁻ -äq.
Versauerung	AP	Versauerungspotential (AP), in kg SO ₂ -äq.
Ozonabbau	ODP	Ozonabbaupotential (ODP), in kg R11-äq.
Photochemische Ozonbildung	POCP	Photochemisches Ozonbildungspotential (POCP), in kg Ethen-äq.

Das Vorgehen der ökologischen Untersuchung orientieren sich an den Ökobilanz-Normen DIN EN ISO 14040 und 14044. Dementsprechend gliedert sich die Arbeit in die folgenden Schritte:

- Festlegung des Untersuchungsrahmens
- Erstellung der Sachbilanz
- Wirkungsabschätzung
- Interpretation

Für den Untersuchungsrahmen wurde die deklarierte Einheit nicht wie bei den parallel durchgeführten Schweißversuchen auf die Bereitstellung und Entsorgung von 80 x 140 mm als Folie der Stärke 0,5 mm aus Monomaterial PE gesetzt (einer Folie mit $5,32 \cdot 10^{-6}$ kg), sondern auf die **Bereitstellung und Entsorgung von 1 kg Folie aus Monomaterial PE**. Der Untersuchungsrahmen ist in Abbildung 21 gezeigt. Die für die Sachbilanz notwendigen Daten wurden aus Literaturquellen entnommen, sowie aus Experteneinschätzungen abgeleitet. Die Sachbilanz, sowie die für die Modellierung verwendeten Datensätze der drei Prozesse Rezyklatherstellung, Folienextrusion und End-of-Life sind in Tabelle 10 bis Tabelle 12 zu sehen.

Daraus wurde anschließend in der Software LCA for Experts (Version 10.7.28) und der Datenbank „Sphera Database Content Version 2023.3“ ein Prozessmodell erstellt und

dieses gemäß CML-Methode hinsichtlich seiner Umweltauswirkungen bewertet. Die Ergebnisse wurden gemäß den Kategorien Material, Verarbeitung und End-of-Life gruppiert. Die Beiträge zu den jeweiligen Kategorien sind in Abbildung 21 zu sehen. Die Ergebnisse für den Referenzfall (100 % Neuware und Verbrennung am End-of-Life) sind in Tabelle 13 gezeigt.

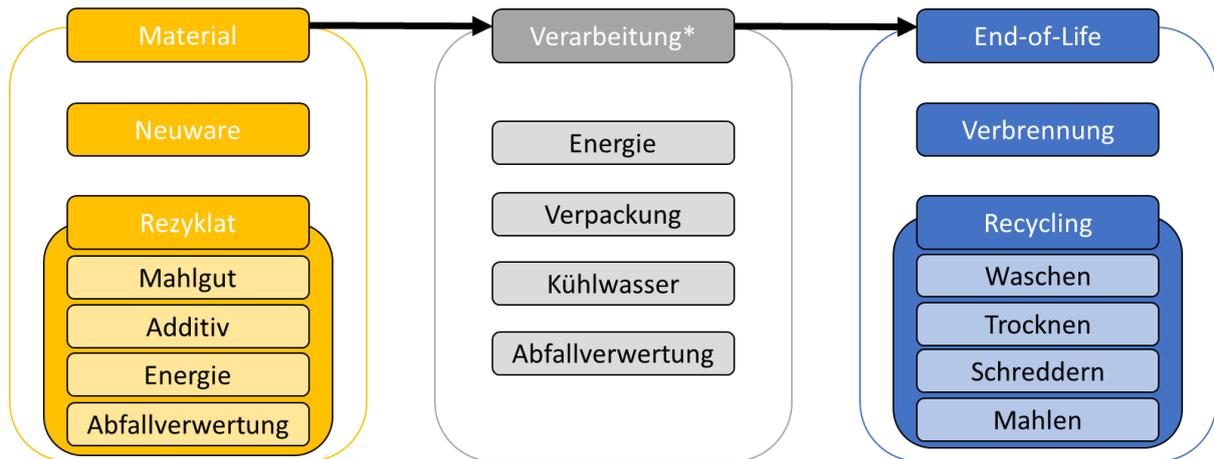


Abbildung 21: Untersuchungsrahmen für die Folie für die betrachteten Szenarien. *Die Verarbeitung beinhaltet lediglich die Folienextrusion, nicht eine weitere Bearbeitung der Folie wie z.B. den Schweißvorgang.

Tabelle 10: Sachbilanz für die Rezyklat Herstellung, bezogen auf 1 kg Rezyklat.

Input Fluss	Wert	Einheit	Datensatz, falls relevant
PE Mahlgut	0,97	kg	lastenfrei
Additive	0,05	kg	E: Phenol, by-product acetone, methyl styrene (from cumene) Sphera
Strom	0,05	kWh	RER: Electricity grid mix 1kV-60kV Sphera
Output Fluss	Wert	Einheit	Datensatz, falls relevant
PE Rezyklatgranulat	1	kg	
PE Abfall, zur Verbrennung	0,02	kg	RER: Polyethylene (PE) in waste incineration plant Sphera <t-agg>

Tabelle 11: Sachbilanz für die Folienextrusion, bezogen auf 1 kg Folie mit 40 % Rezyklatanteil.

Input Fluss	Wert	Einheit	Datensatz, falls relevant
PE Rezyklatgranulat	0,42	kg	
PE Neuware	0,63	kg	RER: Polyethylene linear low density granulate (LLDPE/PE-LLD) Sphera
Kartonverpackung	0,0105	kg	RER: Corrugated board 2018; average composition; cut-off EoL; [p-agg] Sphera/FEFCO <Mfg>
Folienverpackung	0,0021	kg	RER: Polyethylene film (PE-LD) PlasticsEurope
Prozesswasser	1	kg	RER: Process water from surface water Sphera
Strom	0.083	kWh	RER: Electricity grid mix 1kV-60kV Sphera
Output Fluss	Wert	Einheit	Datensatz, falls relevant
PE Folie	1	kg	
Verpackung für PE Folie	0,01		
PE Abfall, zur Verbrennung	0.05	kg	RER: Polyethylene (PE) in waste incineration plant Sphera <t-agg>
Verpackungsabfall, zur Verbrennung	0,0063	kg	RER: Plastic packaging in municipal waste incineration plant Sphera <t-agg>

Tabelle 12: Sachbilanz für die End-of-Life Betrachtung, bezogen auf 1 kg Folie und 80 % Verbrennung

Input Fluss	Wert	Einheit	Datensatz, falls relevant
PE Folie, verpackt	1,06	kg	
Output Fluss	Wert	Einheit	Datensatz, falls relevant
PE, zur Verbrennung	0,845	kg	RER: Polyethylene (PE) in waste incineration plant Sphera <t-agg>
PE, zum Recycling	0,211	kg	

Tabelle 13: Umweltauswirkungen im Referenzfall“ 100 % Neuware und Verbrennung am End-of-Life“.

Indikator	Einheit	Gesamt	Material	Verarbeitung	End-of-Life
ADPf	MJ	7,8E+01	7,7E+01	1,3E+00	3,3E-01
GWP100	kg CO ₂ -äq.	5,4E+00	1,9E+00	2,6E-01	3,3E+00
EP	kg PO ₄ ³⁻ -äq.	5,0E-04	4,2E-04	3,3E-05	4,4E-05
AP	kg SO ₂ -äq.	3,5E-03	3,0E-03	2,4E-04	2,0E-04
ODP	kg R11-äq.	5,3E-12	3,2E-12	1,9E-12	1,8E-13
POCP	kg Ethen-äq.	7,5E-04	7,1E-04	1,8E-05	2,1E-05

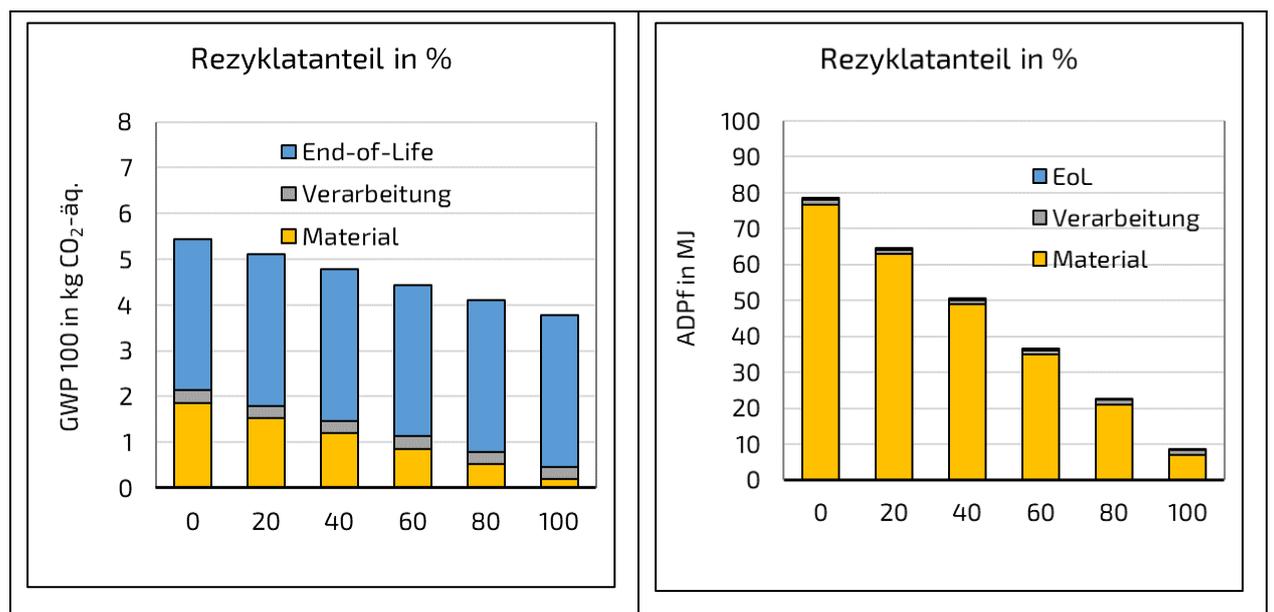
4.7.1 Vergleich von unterschiedlichen Rezyklatanteilen

Hier wurde zur vereinfachten Betrachtung immer das End-of-Life Szenario Verbrennung angenommen. Die Einflüsse der Verarbeitung, sowie der Behandlung am End-of-Life verändern sich somit nicht und der Einfluss stammt lediglich aus den eingesetzten Materialien. Die Rezyklatanteile wurden von 0 – 100 % in 20 % Schritten variiert. Das Mahlgut geht dabei lastenfrei in das System ein, durch einen Aufarbeitungsschritt vor der Nutzung entstehen die mit dem Rezyklatmaterial assoziierten Umweltauswirkungen. Tabelle 14 zeigt die Ergebnisse der Umweltauswirkungen. Abbildung 22 zeigt die Umweltindikatoren für die in Tabelle 14 aufgeführten Rezyklatanteile.

Der Einfluss des Materials auf die Umweltauswirkungen sinkt mit steigendem Rezyklatanteil für alle betrachteten Umweltindikatoren. Bei den Umweltindikatoren ADPf, EP, AP und POCP hat das Material den größten Einfluss, wodurch hier durch einen konsequenten Rezyklateinsatz die größte Verringerung der Umweltauswirkung erzielt werden kann. Das End-of-Life hat einen Einfluss auf das GWP100, weshalb im Fall der Verbrennung durch einen 100 %-igen Rezyklateinsatz die Umweltauswirkung lediglich um 20 % verringert werden kann. Ebenso wirkt sich die Verarbeitung auf das ODP aus, wodurch hier ebenso ein 100 %-iger Rezyklateinsatz nur zu einer Verringerung der Umweltauswirkung von 40 % führt.

Tabelle 14: Umweltauswirkung bei unterschiedlichem Rezyklatanteil des Materials und Verbrennung am End-of-Life.

Indikator	Einheit	0 %	20 %	40 %	60 %	80 %	100 %
ADPf	MJ	7,8E+01	6,4E+01	5,0E+01	3,7E+01	2,3E+01	8,6E+00
GWP100	kg CO ₂ - äq.	5,4E+00	5,1E+00	4,8E+00	4,5E+00	4,1E+00	3,8E+00
EP	kg PO ₄ ³⁻ äq.	5,0E-04	4,2E-04	3,5E-04	2,7E-04	1,9E-04	1,2E-04
AP	kg SO ₂ - äq.	3,5E-03	2,9E-03	2,4E-03	1,8E-03	1,3E-03	7,2E-04
ODP	kg R11- äq.	5,3E-12	4,8E-12	4,3E-12	3,8E-12	3,3E-12	2,8E-12
POCP	kg Ethen- äq.	7,5E-04	6,2E-04	4,9E-04	3,6E-04	2,3E-04	9,7E-05



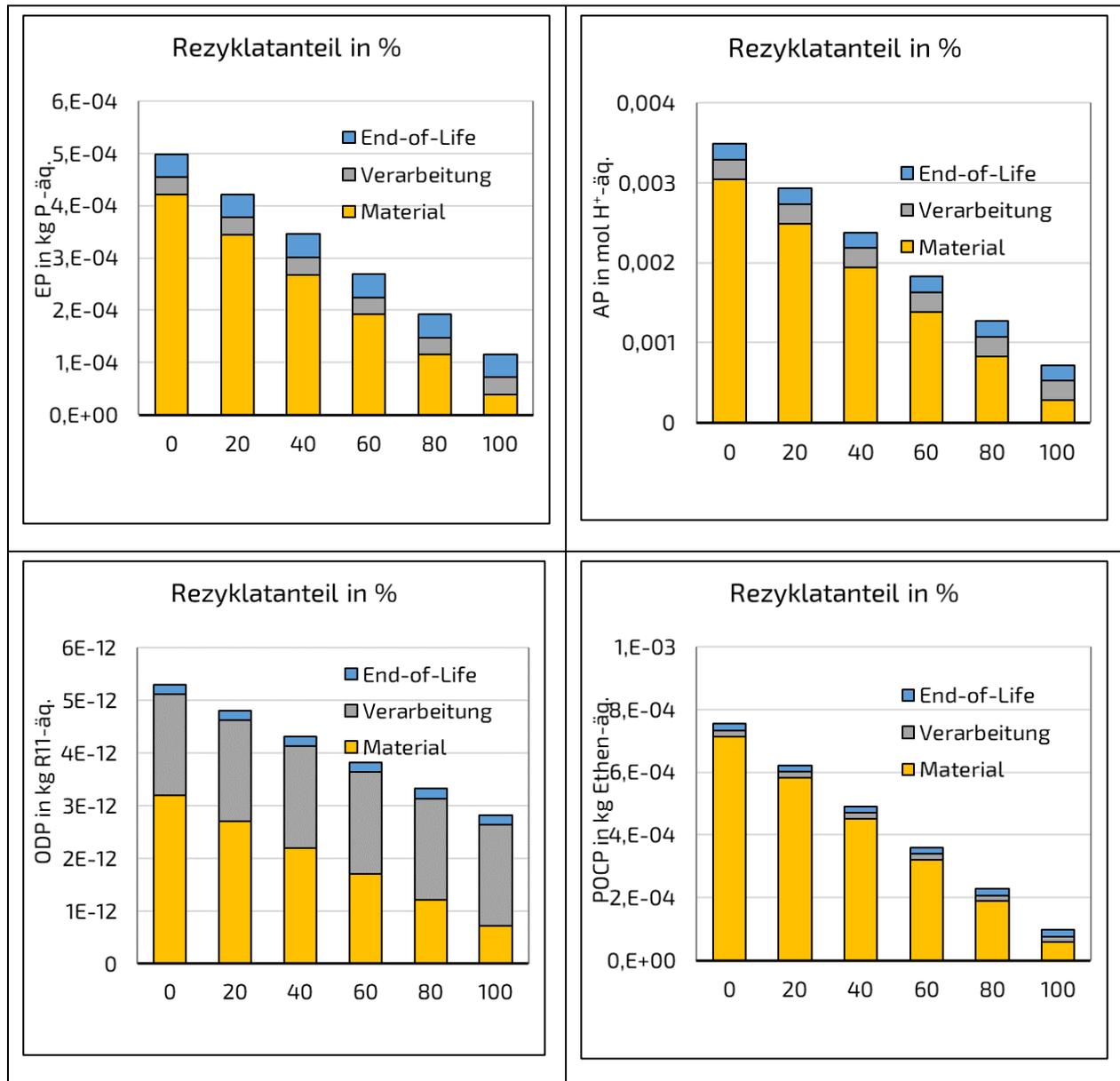


Abbildung 22: Umweltauswirkungen für einen Rezyklatanteil von 0 – 100 %.

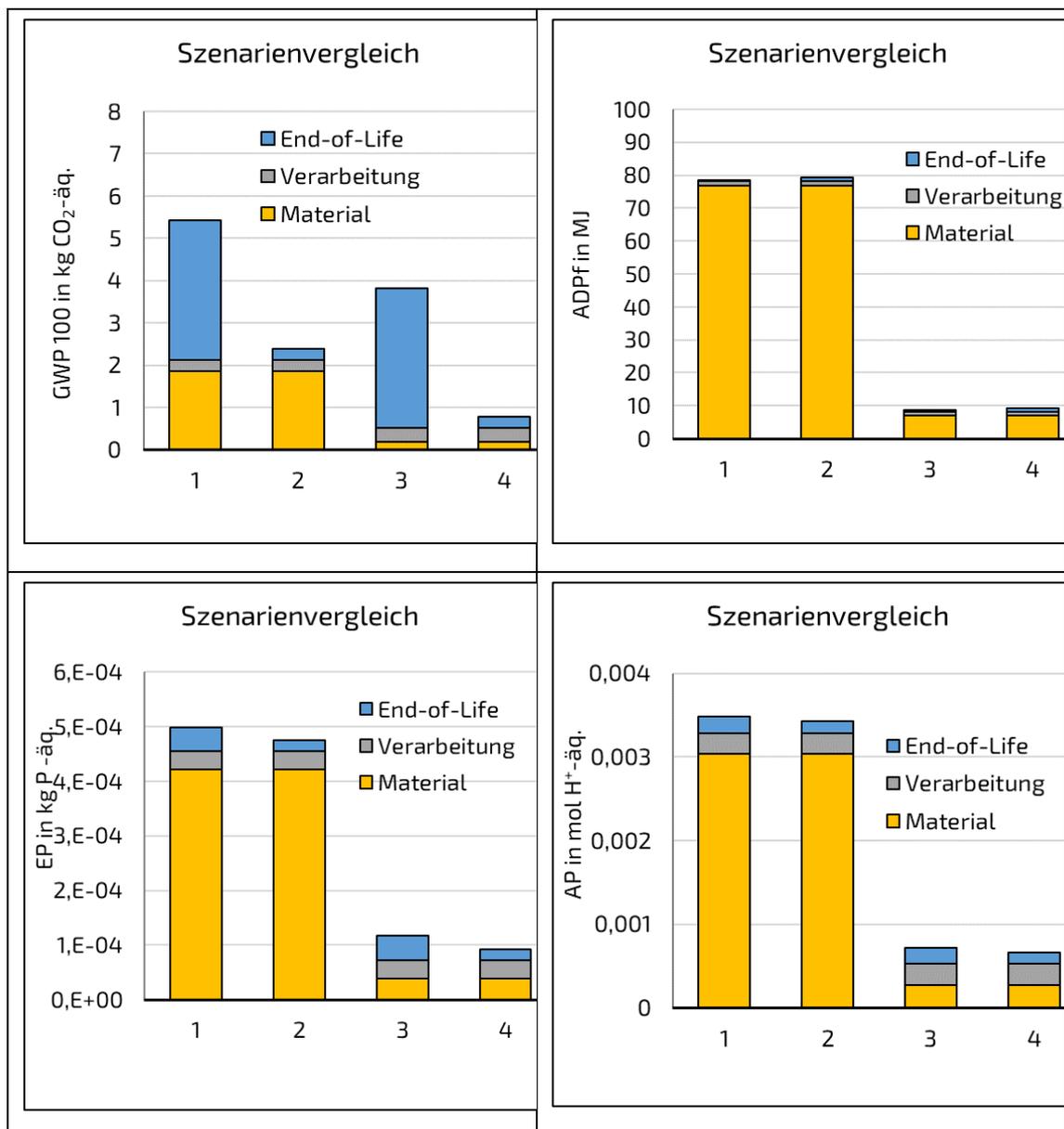
4.7.2 Vergleich End-of-Life Szenarien

Durch den Einsatz von Monomaterialien wird ein Recyclingprozess am End-of-Life ermöglicht. Der die Verbrennung ersetzende Recyclingprozess ist nicht umweltauswirkungsfrei und muss ebenso bilanziert werden. Der Recyclingprozess beinhaltet die Vorgänge des Waschens, Schredderns, Mahlen und Trocknen mit einer Ausschussquote von 5 %. Tabelle 15 zeigt die Kombinationsmöglichkeiten der in dieser Arbeit betrachteten Szenarien. Die betrachteten Szenarien stellen lediglich Grenzfälle dar, die jeweils 100 %

Rezyklat oder 100 % Neuware, sowie 100 % Verbrennung, sowie 100 % Recycling annehmen. Abbildung 23 zeigt die Umweltauswirkungen unter Einbeziehung der unterschiedlichen Szenarien für den Materialeinsatz und das End-of-Life.

Tabelle 15: Betrachtete Kombinationen des Materialeinsatzes und der Behandlung am End-of-Life

Szenario	1	2	3	4
Material	Neuware	Neuware	Rezyklat	Rezyklat
End-of-Life	Verbrennung	Recycling	Verbrennung	Recycling



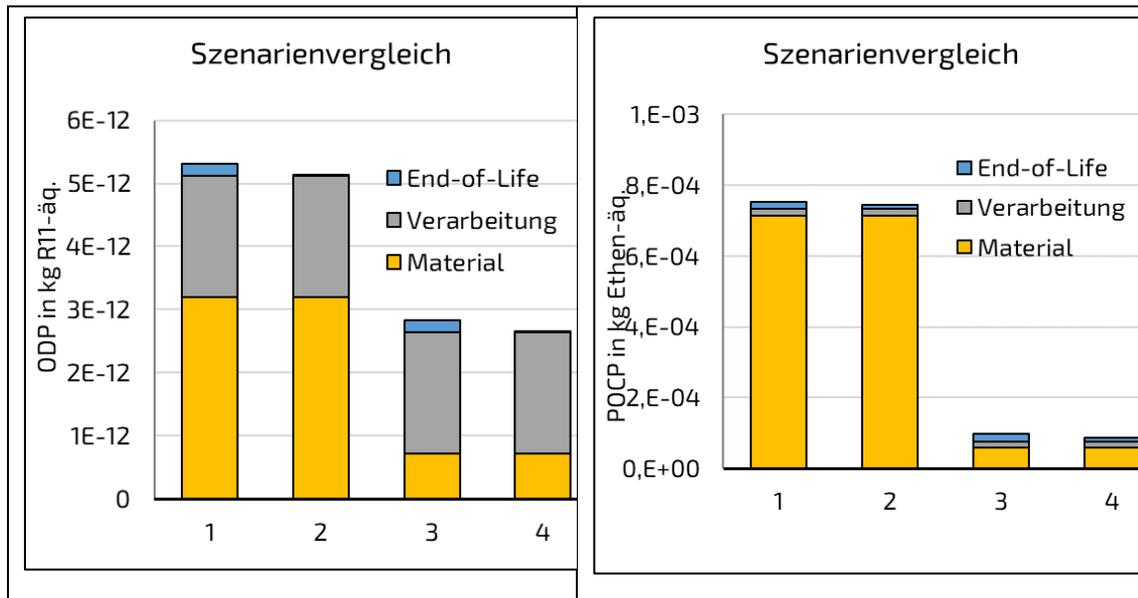


Abbildung 23: Umweltauswirkungen für die Szenarien (1) Neuware und Verbrennung, (2) Neuware und Recycling, (3) Rezyklat und Verbrennung und (4) Rezyklat und Recycling.

Der größte Einfluss auf das GWP stammt aus dem Verbrennungsprozess, bei dem der im Kunststoff gebundene Kohlenstoff freigesetzt wird. Durch ein Recycling wird dieser Einfluss deutlich verringert, da lediglich geringe nicht-recyclebare Mengen Kunststoff verbrannt werden müssen, sowie Energie für die Aufbereitungsschritte benötigt wird. Ein Recycling der Kunststoffe setzt deren Recyclingfähigkeit voraus, welche bei Monomaterialfolien im Vergleich zu Mehrschichtfolien deutlich höher liegt. Der zweitgrößte Einfluss auf das GWP stammt aus der Bereitstellung des Materials. Wie im vorherigen Kapitel aufgezeigt verringert sich das GWP durch die Nutzung von Rezyklaten im Vergleich zur Neuware. Durch eine Kombination aus Rezyklat-Einsatz und anschließendem Recycling am End-of-Life kann das GWP um bis zu 90 % gesenkt werden. Die Verarbeitung der Folie stellt in diesem Fall einen geringen Einfluss auf das GWP dar und bietet in diesem Fall keinen großen Hebel zur Verringerung des GWP. Allerdings wurden weitere Verfahrensschritte, wie z.B. der Schweißprozess nicht berücksichtigt. Die Umweltauswirkungen weiterer Verarbeitungsschritte können demnach einen Einfluss auf das GWP haben.

Die Einflüsse des Materialeinsatzes und des End-of-Life auf das ADPf, das EP, das AP und das POCP folgen dem gleichen Schema. Der größte Einfluss stammt hier jeweils vom Materialeinsatz und kann durch den Einsatz von Rezyklaten signifikant verringert werden. Die Verarbeitung und das End-of-Life tragen nur geringfügig zu den jeweiligen Umweltauswirkungen bei und bieten in diesem Fall keinen großen Hebel diese zu verbessern.

Weitere, nicht bilanzierte Verarbeitungsschritte, können aber durchaus einen Einfluss auf die genannten Umweltindikatoren haben.

Der Einfluss des Materials ist auch beim ODP im Vergleich zu den restlichen Einflussfaktoren am größten und kann durch einen Rezyklateinsatz verringert werden. Die Verarbeitung hat in jedem der vier Szenarien auf das ODP einen nicht zu vernachlässigenden Beitrag von über 30 %, der sich auf den Energieverbrauch zurückführen lässt, während das End-of-Life auch beim ODP keine große Rolle spielt.

5 Diskussion der Ergebnisse

5.1 Folieneigenschaften

Die Ergebnisse der DSC-Messungen (vgl. Abschnitt 4.3.1) der Materialien N1 und N2 sowie R1 bis R4 sind graphisch in Abbildung 24 und die daraus bestimmten Peak-Temperaturen bzw. -flächen in Tabelle 16 zusammengefasst. Für die Materialien N1 und N2 zeigen die DSC-Messungen einen einzelnen Peak bei ca. 113 °C, welcher mit der vom Hersteller angegebenen Schmelztemperatur von 111 °C (vgl. Anhang A.5 und A.6) sowie Literaturwerten für PE-LD [40] korreliert. Im Gegensatz dazu liegen für Materialien R1 bis R4 Doppelpeaks mit den Maxima-Temperaturen von ca. 113 und 125 °C vor. Bei den Rezyklaten deutet dies stark auf eine Materialmischung von PE-LD und PE-HD hin, da für letzteres ein DSC-Peak in diesem Temperaturbereich in mehreren Quellen gefunden werden kann (vgl. z. B. [41]). Beachtenswerter Weise variieren die Höhen der Doppelpeak-Maxima relativ zueinander für die verschiedenen Rezyklate. So dominiert für die Materialien R1, R3 und R4 das mit PE-HD assoziierte Maximum bei 125 °C deutlich gegenüber dem mit PE-LD assoziierte Maximum bei 113 °C. Dies legt nahe, dass PE-HD in diesen Rezyklaten auch den größeren Massenanteil innehat. Für das Material R2 erreichen die Peak-Höhen bei 113 und 125 °C eine ähnliche Höhe, was für eine gleichmäßigere Massenverteilung von PE-LD und PE-HD spricht. Des Weiteren weisen die DSC-Kurven der Materialien R1 und R4 einen schwachen Peak bei ca. 163 °C auf, der auf einen geringen Massenanteil PP in diesen Rezyklaten hindeutet [41].

Die Flächen der PE-Hauptpeaks können in einem weiteren Schritt mittels Literaturwert [42] in die PE-Kristallinitäten der jeweiligen Materialien umgerechnet werden. Die entsprechenden Zahlenwerte finden sich ebenfalls in Tabelle 16. Hierbei lässt sich erkennen, dass insbesondere die Neuware N1 aber auch das Rezyklat R2 signifikant höhere PE-Kristallinitäten aufweisen als die übrigen Materialien.

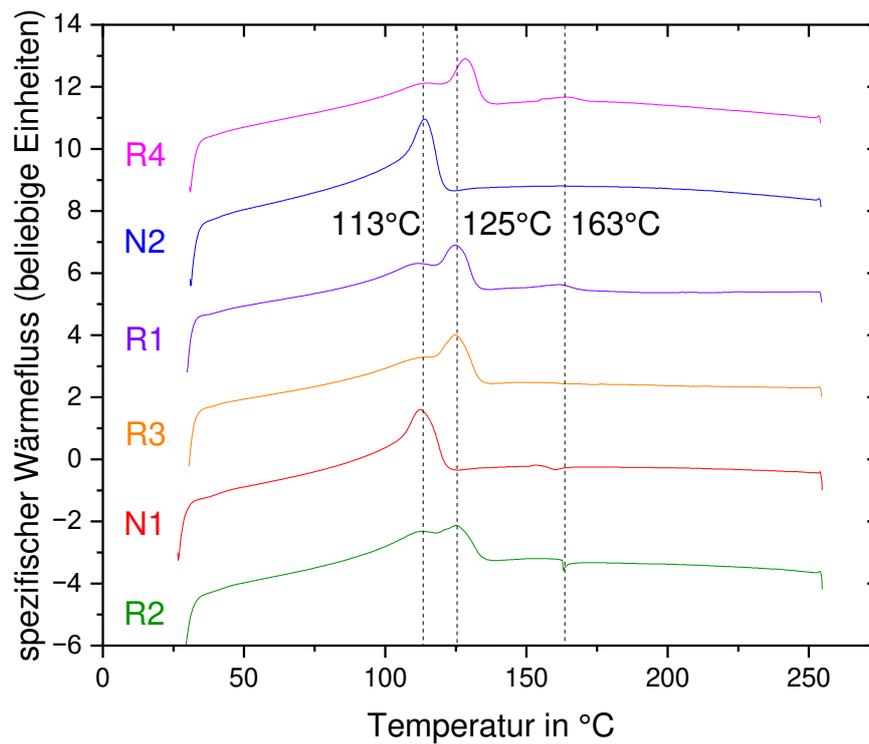


Abbildung 24: Ergebnisse der DSC-Messungen der Materialien N1 und N2 sowie R1 bis R4 als spezifischer Wärmefluss. Die Graphen sind zur besseren Übersicht vertikal gegeneinander verschoben. Die gestrichelten Linien markieren für die Auswertung relevante Temperaturen.

Tabelle 16: Auswertung der DSC-Ergebnisse hinsichtlich Temperaturen der Peak-Maxima, der Peakflächen und den entsprechenden Kristallinitäten sowie die gemessenen Foliendicken.

Material	Peak-Maximum in °C	Peakfläche in J/g	PE-Kristallinität in %	Foliendicke in mm
N1	113	110	38	$0,564 \pm 0,009$
N2	114	96	33	$0,476 \pm 0,029$
R1	112 und 125	91	31	$0,506 \pm 0,015$
	162	4	-	
R2	113 und 125	105	36	$0,548 \pm 0,013$
R3	115 und 125	91	31	$0,517 \pm 0,015$
R4	115 und 128	84	29	$0,475 \pm 0,014$
	164	4	-	

Die Ergebnisse der rheologischen Untersuchungen (vgl. Abschnitt 4.3.2) der Materialien N1 und N2 sowie R1 bis R4 sind in Form der komplexen Viskosität als Funktion der Temperatur graphisch in Abbildung 25 dargestellt. Auffällig sind hierbei die Stufen in den Viskositäten der Materialien R1 und R4 im Temperaturbereich von ca. 150 bis 170 °C. Mit Hinblick auf die bereits diskutierten DSC-Ergebnisse, resultieren diese vermutlich aus dem Aufschmelzprozess des geringen PP-Anteils dieser Rezyklate. Darüber hinaus liegen die Viskositäten der Materialien N1, R1, R2, R3 und R4 im Rahmen der Messgenauigkeit vergleichsweise nahe beieinander. Lediglich die Neuware N2 weist eine signifikant niedrigere Viskosität auf. Dieses Ergebnis ist konsistent mit dem Befund, dass es sich bei der Neuware N2 mit hoher Wahrscheinlichkeit um ein reines PE-LD-Material handelt und PE-LD wiederum im Allgemeinen eine niedrigere Viskosität als PE-HD besitzt [43]. Entsprechend stimmig sind die höheren Viskositäten der Rezyklate. Unklar ist lediglich, warum die Neuware N1 hinsichtlich ihrer Viskosität eher den Rezyklaten als der Neuware N2 entspricht. Ein Grund für dieses Verhalten könnte in den jeweiligen Molmassenverteilungen der Polymere liegen. Weiterführende Untersuchungen hierzu wurden im Projekt allerdings nicht durchgeführt.

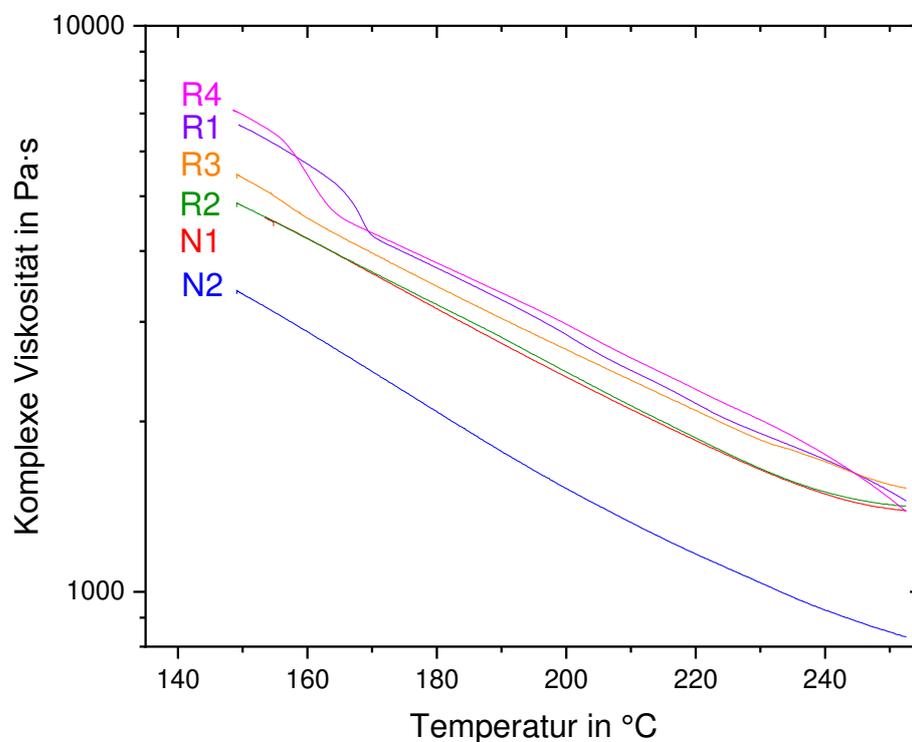


Abbildung 25: Komplexe Viskositäten der Materialien N1 und N2 sowie R1 bis R4 in halblogarithmischer Auftragung als Funktion der Temperatur.

Die Ergebnisse der Foliendickenmessung (vgl. Abschnitt 4.3.3) sind für die Materialien N1 und N2 sowie R1 bis R4 in Tabelle 16 zusammengefasst. Der Vergleich mit der im Rahmen der Extrusion angestrebten Foliendicke von 0,5 mm zeigt, dass insbesondere die Materialien N1 und R2 signifikant höhere Foliendicken aufweisen. Da die Kristallitbildung einen wesentlichen Einfluss auf die Veränderungen der Foliendimensionen während des Abkühlprozesses hat, ist in Abbildung 26 der Zusammenhang zwischen der gemessenen Foliendicke und der PE-Kristallinität aus Tabelle 16 dargestellt. Aus der Auftragung ist zu erkennen, dass eine höhere Kristallinität des Folienmaterials näherungsweise mit einer höheren Dicke einhergeht. Lediglich die Neuware N2 stellt hierbei eine Ausnahme dar.

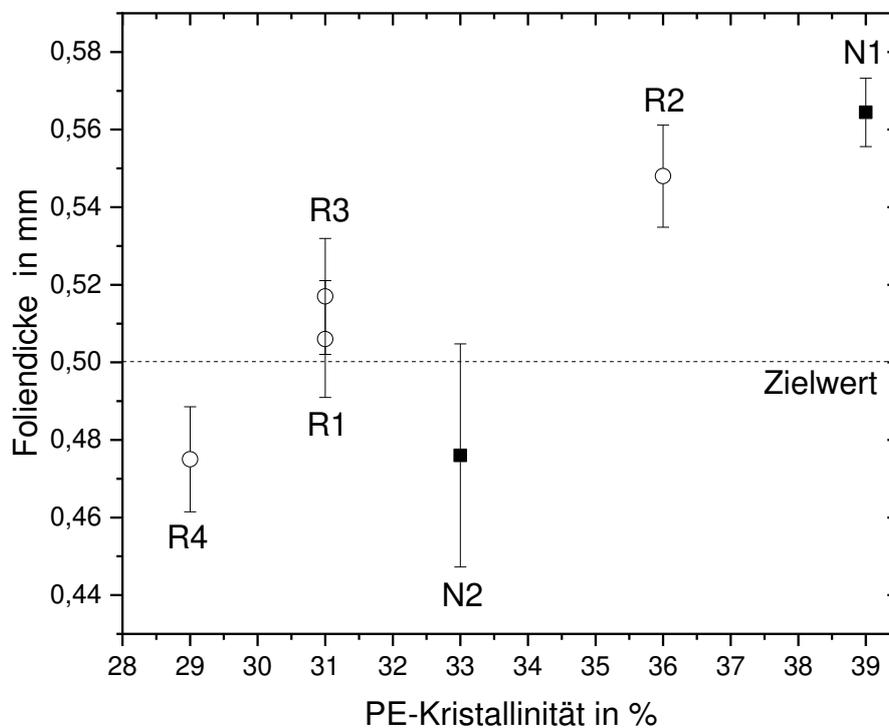


Abbildung 26: Dicke der extrudierten Folien der Materialien N1 und N2 sowie R1 bis R4 ($n=10$) als Funktion der Kristallinität der PE-Phase des jeweiligen Materials. Die gestrichelte Linie markiert den Zielwert für alle Materialien von 0,5 mm.

In einem zweiten Schritt wurden die Foliendicken der Blends aus Neuware und Rezyklat, d. h. die Materialkombinationen N1-R1 bis N1-R4 sowie N2-R1 bis N2-R4, als Funktion des jeweiligen Rezyklatanteils betrachtet (Abbildung 27). Für die Blends der Neuware N1 stellt sich dabei näherungsweise das intuitiv erwartete Ergebnis ein (vgl. Abbildung 27 links): das Material N1 in Reinform (Rezyklatanteil = 0 %) weist die höchste Foliendicke auf und alle Blends tendieren zu einer monotonen Abnahme der Foliendicke mit

steigendem Rezyklatanteil. Für die Blends der Neuware N2 ergibt sich insgesamt ein weniger konsistentes Bild (vgl. Abbildung 27 rechts): hier weisen die Blends N2-R1, N2-R2 und N2-R3 keine eindeutige monotone Zunahme der Foliendicke mit dem Rezyklatanteil auf. Das Blend N2-R4 zeigt sogar eine signifikant nicht-monotone Korrelation von Foliendicke und Rezyklatanteil mit einem Maximum bei 60 % Rezyklatanteil. Die Ursache für diesen Befund konnte im Rahmen des Forschungsvorhabens nicht abschließend geklärt werden. Möglicherweise liegt er in der hohen Standardabweichung der Foliendicke der Neuware N2 begründet.

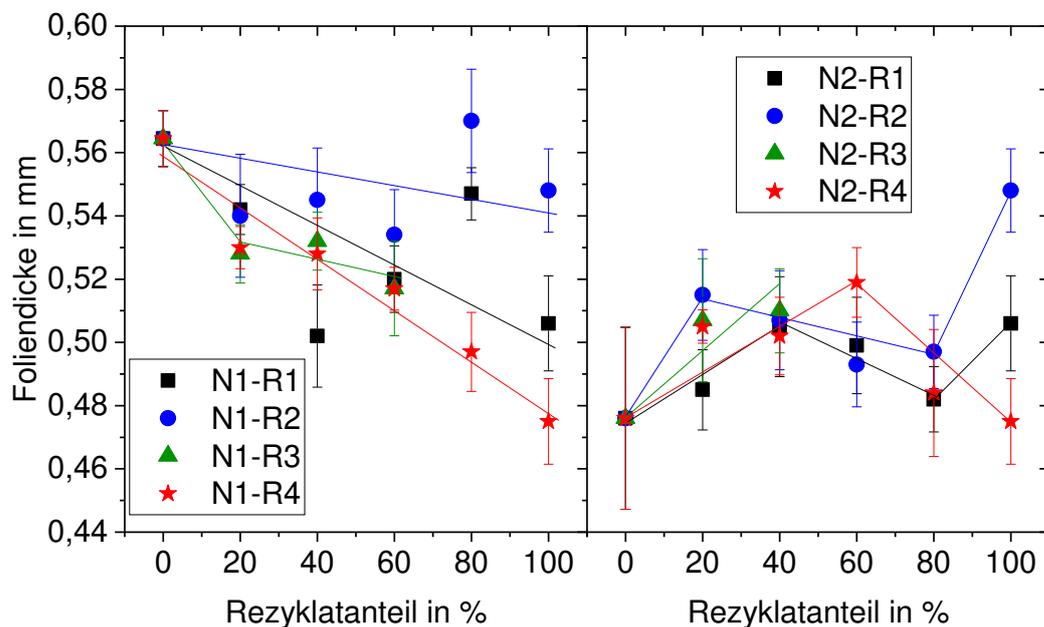


Abbildung 27: Dicke der Folien mit Materialmischungen N1-R1 bis N1-R4 (links) sowie N2-R1 bis N2-R4 (rechts) als Mittelwert mit Standardabweichung ($n=10$) und Funktion des Rezyklatanteils.

Die Ergebnisse der Zugversuche (vgl. Abschnitt 4.5) an den Materialien N1 und N2 sowie R1 bis R4 sind in Form der gemessenen Spannungs-Dehnungs-Diagramme in Abbildung 28 dargestellt. Alle Prüfkörper zeigen für kleine Dehnungen den erwarteten monotonen Anstieg, bevor bei ca. 10 % Dehnung die Verstreckung der Materialien einsetzt und die Spannungs-Dehnungs-Diagramme abflachen. Bei den Materialien N2, R1 und R4 kommt es im Zuge der Verstreckung zu lokalen Einschnürungen der Probekörper. Dies bedingt, dass die Spannungs-Dehnungs-Diagramme der Materialien N2, R1 und R4 mit steigender Dehnung stärker abflachen als die der Materialien N1, R2 und R3 und erkennbare Streckgrenzen aufweisen. Der Vergleich des mechanischen Verhaltens bei Zugbelastung mit der Foliendicke (Abbildung 26) zeigt, dass die einschnürenden Materialien N2, R1 und

R4 niedrigere Dicken aufweisen als die Materialien N1, R2 und R3. Die Ursache für diesen Zusammenhang konnte im Rahmen des Forschungsvorhabens nicht abschließend geklärt werden.

Die finalen Bruchdehnungen und -spannungen der einzelnen Materialien unterscheiden sich mitunter erheblich, lassen sich aber ohne Kenntnis der wahren Dehnung im Bereich der Einschnürung nur bedingt miteinander vergleichen. Mit Hinblick auf die folgenden Schweißungen konnte deshalb aus den Spannungs-Dehnungs-Diagrammen kein einheitlicher Parameter bestimmt werden, der als Festigkeitsreferenz zur Bestimmung von Schweißfaktoren nutzbar war. Stattdessen wurde zur Bewertung der Schweißungen ein direkter Vergleich der Spannungs-Dehnungs-Diagramme von Grundmaterialien und Schweißverbindungen verwendet.

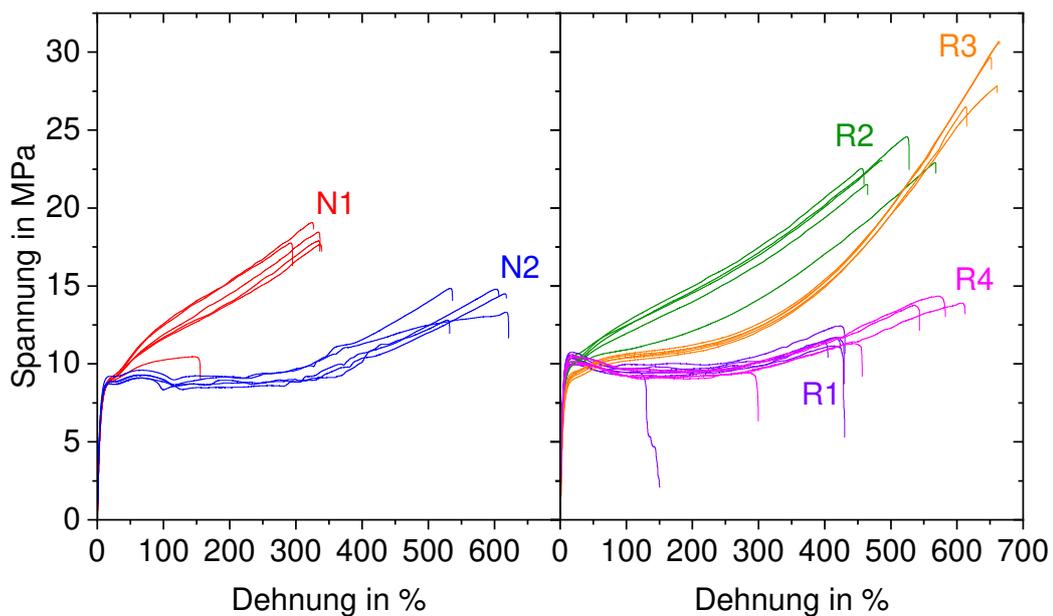


Abbildung 28: Spannungs-Dehnungs-Diagramme der Zugversuche an den Materialien N1 und N2 sowie R1 bis R4 (n=5).

5.2 Schweißungen

Für die Materialien N1, N2, R1, R2 und R4 wurden, wie in Abschnitt 4.4 beschrieben, die Grenzparameter für US- und WKS-Versuchspläne bestimmt. Die finalen Stufen der resultierenden 3x3x3-Versuchspläne sind in Tabelle 17 und Tabelle 18 zusammengefasst. Für alle Punkte der Versuchspläne konnten reproduzierbar handfeste Schweißungen ohne offensichtliche optische Schäden gefertigt werden. Exemplarische Aufnahmen der resultierenden Verbindungen mittels Auflichtmikroskopie sind Abbildung 29 zusammengestellt.

Tabelle 17: Stufen der Prozessparameter im Rahmen der US-Versuchspläne.

Material	Amplitude in μm	Kraft in N	Zeit in s
N1	22, 24, 26	360, 380, 400	0,4; 0,5; 0,6
N2	18, 22, 26	360, 380, 400	0,4; 0,5; 0,6
R1	26, 28, 30	360, 380, 400	0,4; 0,5; 0,6
R2	22, 25, 28	360, 380, 400	0,4; 0,5; 0,6
R4	20, 22, 24	350, 370, 390	0,3; 0,4; 0,5

Tabelle 18: Stufen der Prozessparameter im Rahmen der WKS-Versuchspläne.

Material	Temperatur in $^{\circ}\text{C}$	Kraft in N	Zeit in s
N1	128, 130, 132	40, 50, 60	7,5; 8,0; 8,5
N2	124, 126, 128	40, 50, 60	6,5; 7,0; 7,5
R1	130, 132, 134	50, 60, 70	9,0; 9,5; 10,0
R2	130, 132, 134	50, 60, 70	9,5; 10,0; 10,5
R4	130, 132, 134	50, 60, 70	8,0; 8,5; 9,0

Die mechanische Qualität aller hergestellten Schweißverbindungen wurde mittels Zugversuchs gemäß DIN 55529 bewertet (vgl. Abschnitt 4.5). Exemplarische Kraft-Dehnungsdiagramme dieser Prüfungen sind für die Materialien N1, N2, R1, R2 und R4 zusammen mit den Ergebnissen der jeweiligen ungeschweißten Folien in Abbildung 30 bis Abbildung 34 dargestellt. Hierbei wurden die US- bzw. WKS-Verbindungen ausgewählt,

deren Schweißparameter statistisch zu den höchsten Bruchkräften führten. Zudem wurden die Spannungs-Dehnungs-Diagramme der ungeschweißten Folien aus Abbildung 28 für Vergleichszwecke in Kraft-Dehnungs-Diagramme umgerechnet.

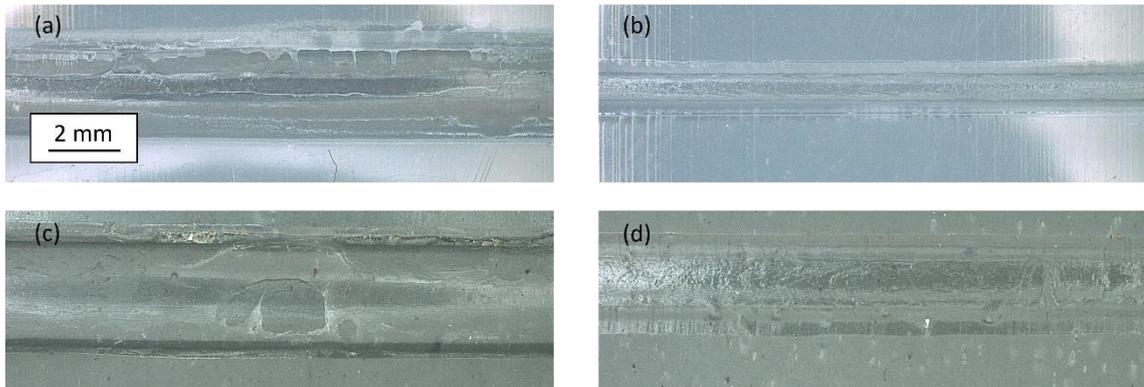


Abbildung 29: Exemplarische Aufnahmen der gefügten Schweißverbindungen mittels Auflichtmikroskopie. (a) Material N2 US, (b) Material N2 WKS, (c) Material R1 US und (d) Material R1 WKS.

Der optische Vergleich der Kraft-Dehnungs-Diagramme von ungeschweißten Folien und Schweißverbindungen zeigt für alle Schweißverbindungen eine Verschiebung des Kraftanstiegs zu höheren Dehnungen. Diese Verschiebung liegt in nahezu allen Fällen bei ca. 10 % Dehnung. Ausnahmen bilden die WKS-Verbindungen der Rezyklate R1 und R4; hier liegt die Verschiebung bei ca. 3 % Dehnung. Es ist davon auszugehen, dass die Verschiebung der Kraft-Dehnungs-Diagramme von ungeschweißten Folien und Schweißverbindungen hinsichtlich der Dehnung auf die unterschiedlichen Geometrien der verwendeten Prüfkörper zurückzuführen ist. Während die Vorkraft der Prüfung die parallelen Streifen der ungeschweißten Folien vollständig auszurichten vermag, ist dies für die verwendete Siegelstreifen-Geometrie (vgl. Abbildung 20) vermutlich nicht der Fall. Stattdessen wird hier zunächst der Übergang zwischen den eingespannten Folienstreifen und dem um 90° verdrehten Siegelbereich aufgeweitet. Deshalb spiegelt die gemessene Dehnung bei Prüfbeginn die Geometrieänderung des Prüfkörpers und nicht das Material- bzw. Schweißnahtverhalten wider. Erst wenn die Aufweitung die tatsächliche Schweißnaht erreicht, bleibt die Geometrie des Prüfkörpers konstant. Entsprechend wurde die initiale Dehnung des Prüfkörpers bei der folgenden Auswertung nicht weiter berücksichtigt.

Nach der anfänglichen Ausrichtung des geschweißten Prüfkörpers kommt es mit steigender Dehnung bei allen Schweißungen zu einem signifikanten Kraftanstieg. Die Steigung dieses Anstiegs entspricht für fast alle Kraft-Dehnungs-Diagramme näherungsweise dem ungeschweißten Folienmaterial. Für die Mehrheit der untersuchten Prüfkörper versagt die

Schweißverbindung während des Kraftanstiegs, bevor es mit weiter steigender Dehnung zur Verstreckung und damit zum Abflachen des Kraft-Dehnungs-Diagrammes kommt. Qualitativ höherwertige Schweißungen erreichen hierbei höhere Bruchdehnungen bzw. -kräfte. Für mehrere Kombinationen von Materialien und Schweißverfahren erreichen die geschweißten Prüfkörper – vereinzelt oder statistisch zuverlässig – den Bereich der Verstreckung (vgl. z. B. Abbildung 33). Für diese Schweißverbindung können die mechanischen Eigenschaften des ungeschweißten Materials als begrenzend angesehen werden.

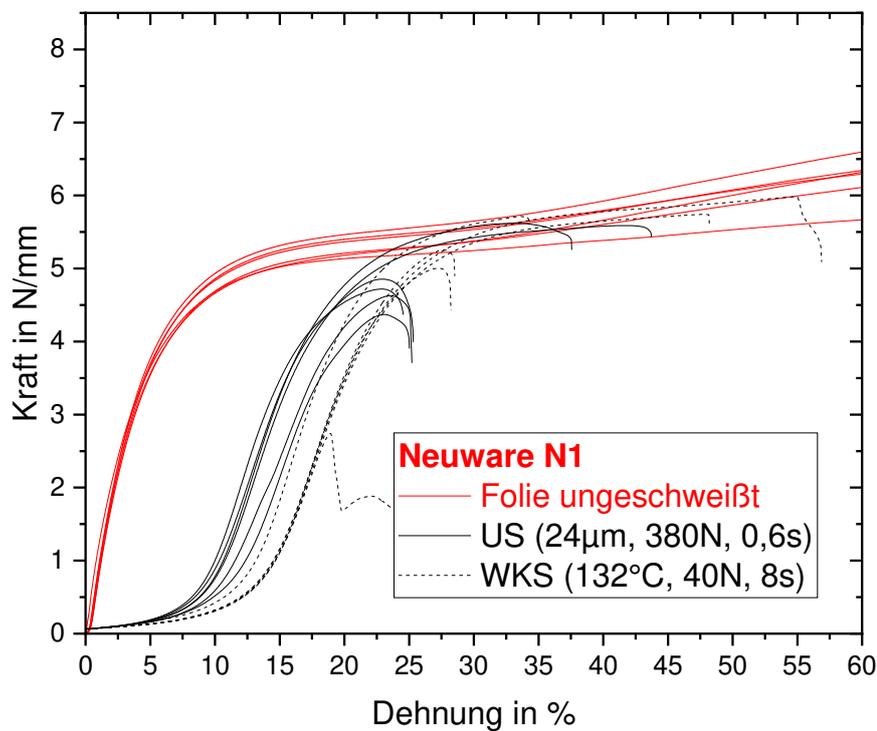


Abbildung 30: Kraft-Dehnungs-Diagramme der Neuware 1 als ungeschweißte Folie, US-Verbindung und WKS-Verbindung. Die jeweiligen Schweißparameter sind in der Legende angegeben.

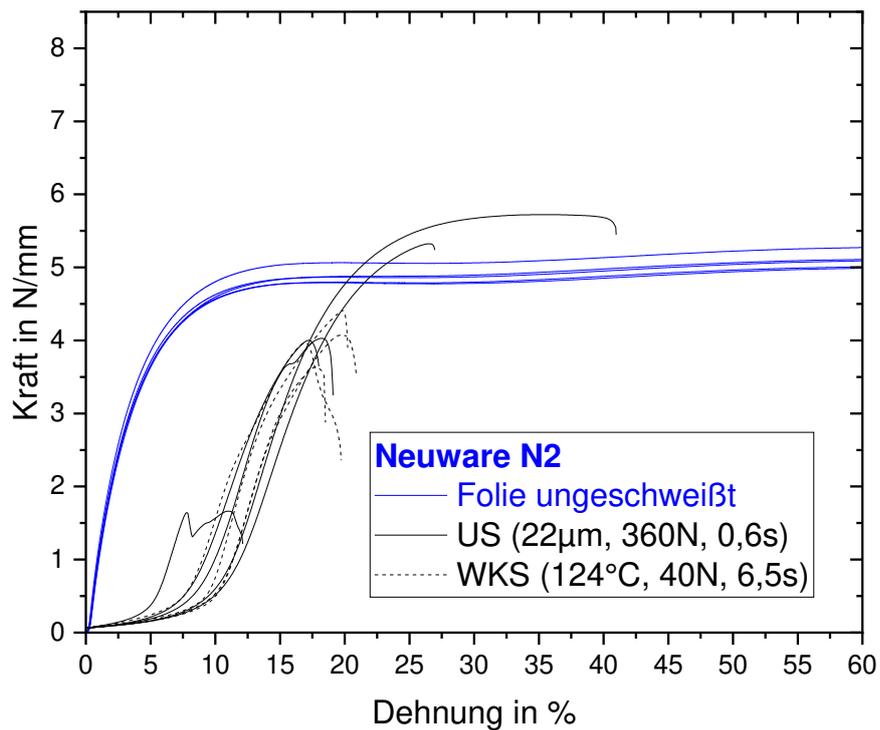


Abbildung 31: Kraft-Dehnungs-Diagramme der Neuware 2 als ungeschweißte Folie, US-Verbindung und WKS-Verbindung. Die jeweiligen Schweißparameter sind in der Legende angegeben.

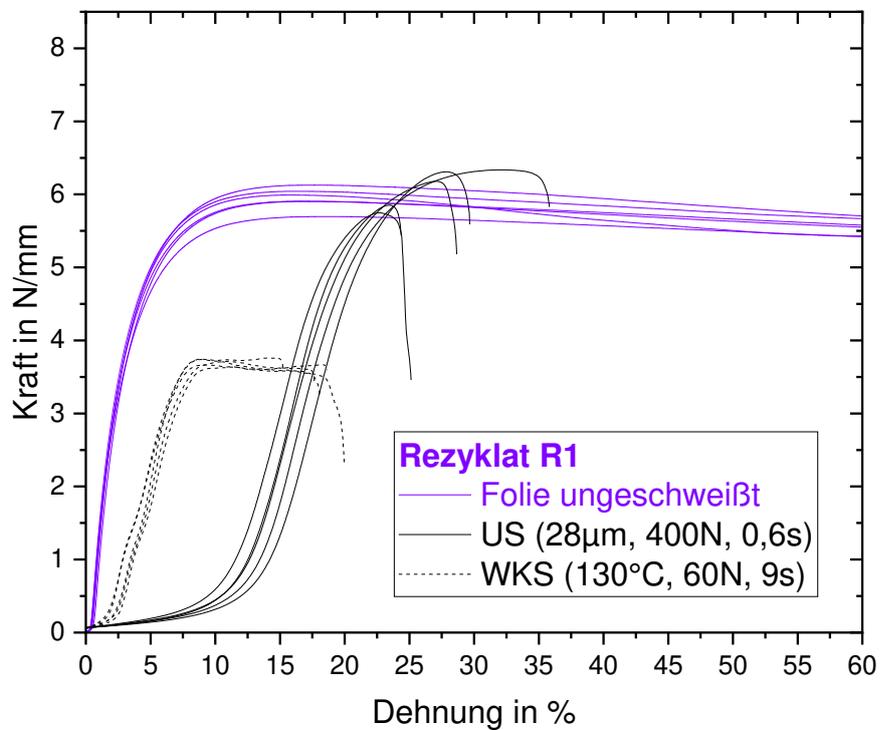


Abbildung 32: Kraft-Dehnungs-Diagramme des Rezyklats 1 als ungeschweißte Folie, US-Verbindung und WKS-Verbindung. Die jeweiligen Schweißparameter sind in der Legende angegeben.

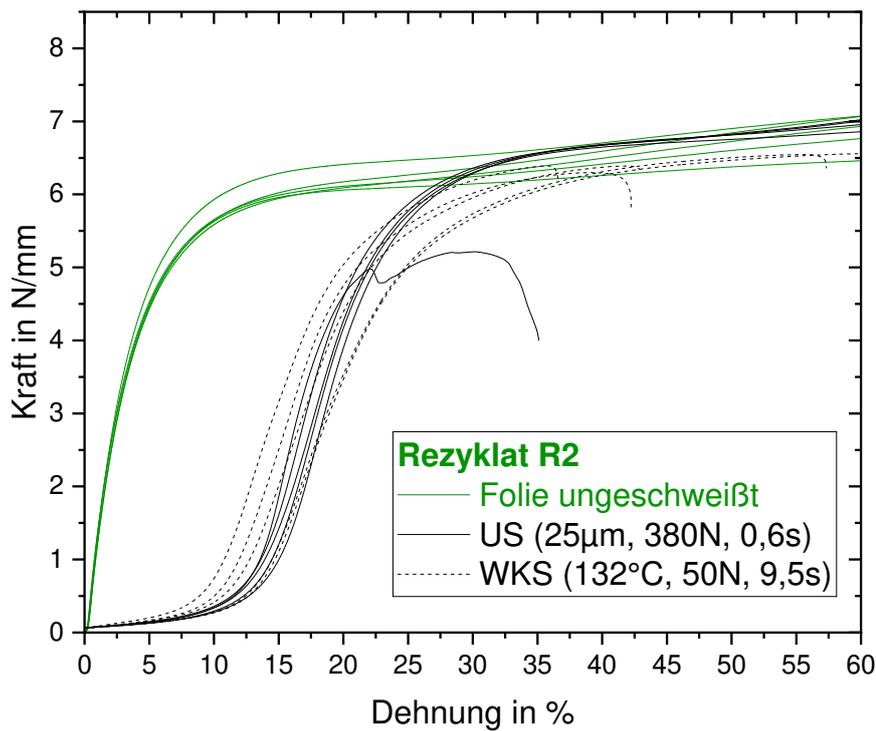


Abbildung 33: Kraft-Dehnungs-Diagramme des Rezyklats 2 als ungeschweißte Folie, US-Verbindung und WKS-Verbindung. Die jeweiligen Schweißparameter sind in der Legende angegeben.

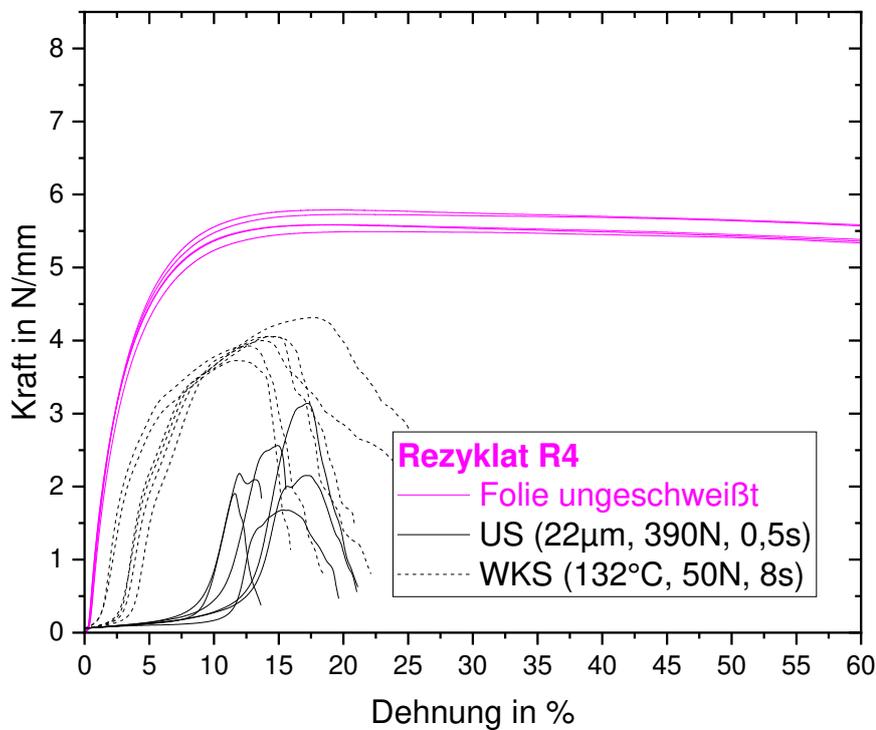


Abbildung 34: Kraft-Dehnungs-Diagramme des Rezyklats 4 als ungeschweißte Folie, US-Verbindung und WKS-Verbindung. Die jeweiligen Schweißparameter sind in der Legende angegeben.

Aus den Kraft-Dehnungs-Diagrammen aller Schweißungen wurde die sogenannte Höchstkraft ermittelt, die die maximale Belastbarkeit der Naht beschreibt. Diese wurde gruppiert nach Material und Schweißverfahren für alle Prüfkörper gemittelt und die entsprechenden Standardabweichungen berechnet (Abbildung 35). Hierbei zeigt sich, dass die Materialien N1, N2 und R2 im Mittel der betrachteten Schweißparameterräume ähnliche Kraft-Niveaus für beide Schweißverfahren erreichen. Das Material R1 erreicht mittels Ultraschallschweißen tendenziell mechanisch stärker belastbare Nähte als mittels Wärmekontaktsiegeln, während es für das Material R4 umgekehrt ist. Insgesamt weisen die Höchstkräfte beim Ultraschallschweißen eine stärkere Abhängigkeit von Prozessparametern und Material auf als beim Wärmekontaktsiegeln, was sich in den entsprechend höheren Standardabweichungen ausdrückt. Vergleicht man die Höchstkräfte der Materialien untereinander ergeben sich für das Material R2 unabhängig vom Schweißverfahren die höchsten Werte. Die Materialien N1 und R1 bilden in dieser Betrachtung für beiden Schweißverfahren das Mittelfeld, während die Schweißverbindungen der Materialien N2 und R4 die geringsten Höchstkräfte erreichen.

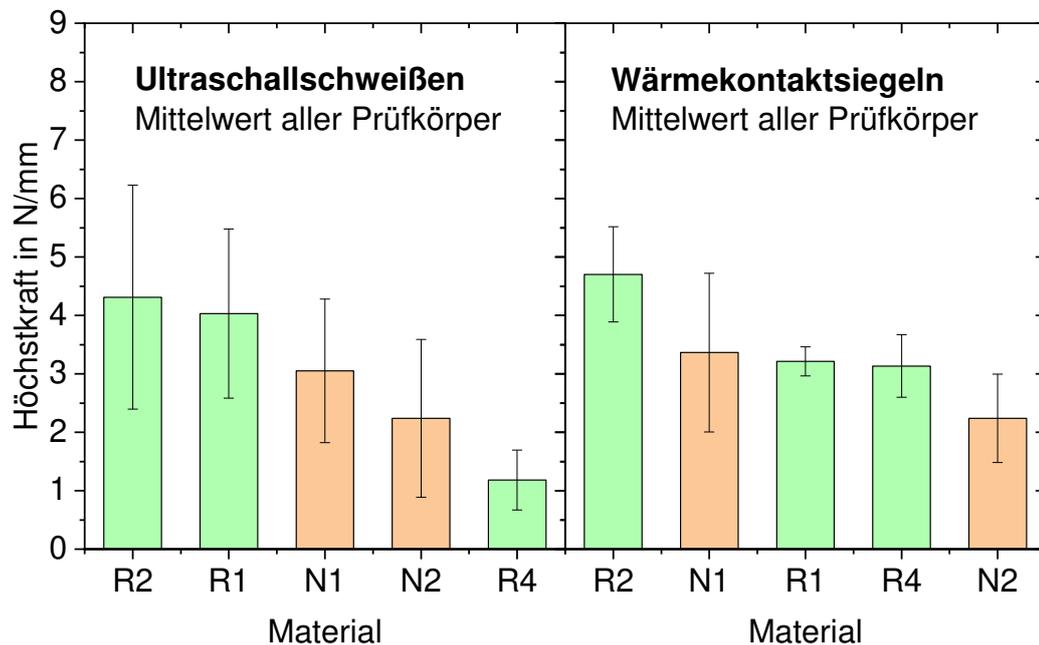


Abbildung 35: Mittlere Höchstkraft aller geprüften Schweißverbindungen gruppiert nach Material und Schweißverfahren.

Alternativ zur gemittelten Höchstkraft aller geprüften Schweißverbindungen werden in Abbildung 35 die Höchstkräfte der mechanisch belastbarsten Schweißnähte für jede Kombination aus Material und Schweißverfahren dargestellt. Diese korrelieren zu den Kraft-Dehnungs-Diagrammen in Abbildung 30 bis Abbildung 34. Zusätzlich wurden in

Abbildung 35 die Kombinationen mit dem Buchstaben „G“ markiert, die basierend auf ihren Kraft-Dehnungs-Diagrammen zumindest mehrheitlich das mechanische Niveau ihres ungeschweißten Grundmaterials erreicht haben. Für diese ist keine bzw. nur eine Verbesserung der mechanischen Eigenschaften durch weitere Optimierungen der Schweißparameter zu erwarten.

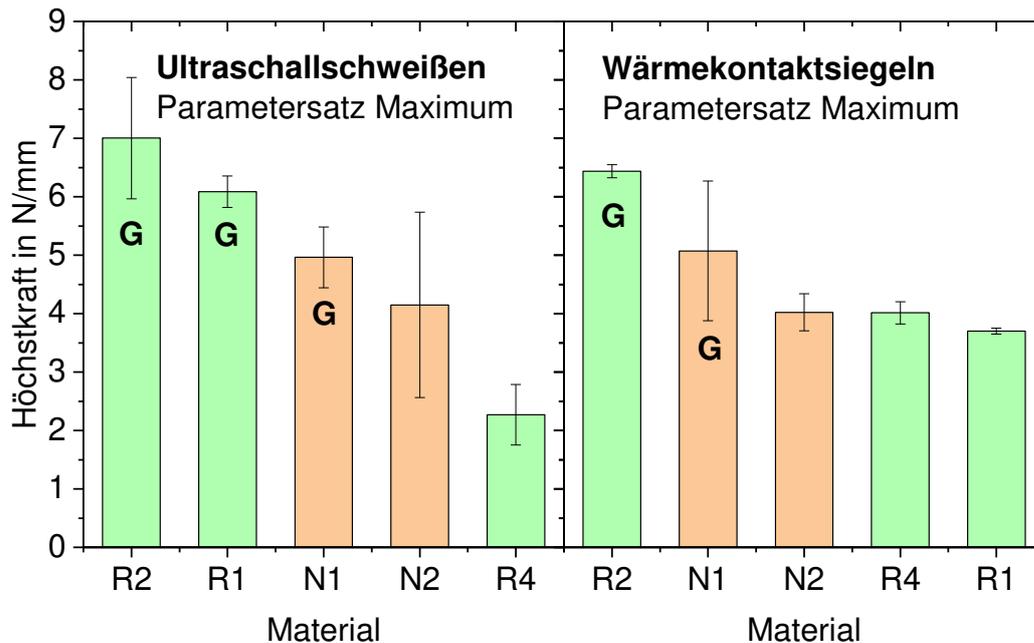


Abbildung 36: Höchstkraft der mechanisch belastbarsten Schweißverbindungen gruppiert nach Material und Schweißverfahren. Für die „G“ markierte Balken wurde näherungsweise das mechanische Niveau des ungeschweißten Grundmaterials erreicht.

Als weiterer Schritt wurden die Korrelationen zwischen den erreichten Höchstkräften und den eingestellten Schweißparametern betrachtet, d. h. Schwingungsamplitude, Schweißkraft und Schweißzeit für den US-Prozess bzw. Temperatur, Schweißkraft und Schweißzeit für den WKS-Prozess. Hierfür wurden die Höchstkräfte gruppiert nach Material, Schweißverfahren und Stufen der einzelnen Prozessparameter gemittelt (Abbildung 37 für US und Abbildung 38 für WKS). Bei den mittels US gefügten Verbindungen führt dabei für alle Materialien eine höhere Schweißzeit zu größeren Höchstkräften. Für die Materialien N1, R1 und R2 bedingen zusätzlich steigende Amplitude und Schweißkraft größere Höchstkräfte. Dies sind dieselben Materialien, für die im Rahmen der US-Versuchspläne Schweißverbindungen auf dem mechanischen Niveau der ungeschweißten Folien erreicht werden konnte. Für die Materialien N2 und R4 zeigen weder Schwingungsamplitude noch Schweißkraft keinen eindeutigen Zusammenhang mit Höchstkraft.

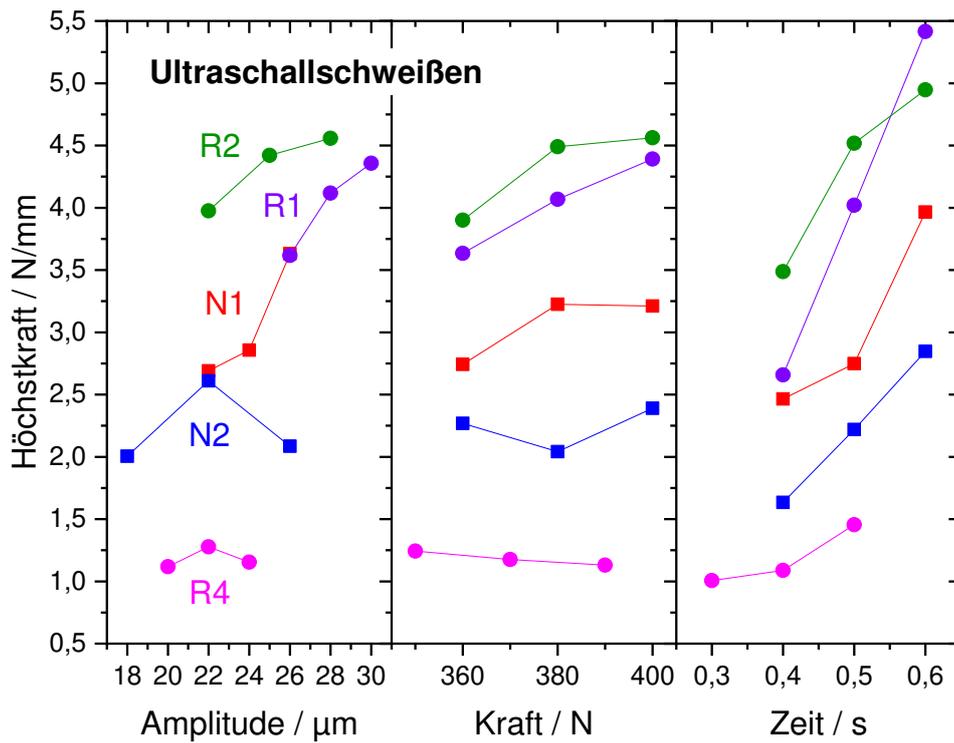


Abbildung 37: Statistische Auswertung der US-Versuchspläne hinsichtlich der im Zugversuch erreichten Höchstkraft für die Materialien N1, N2, R1, R2 und R4.

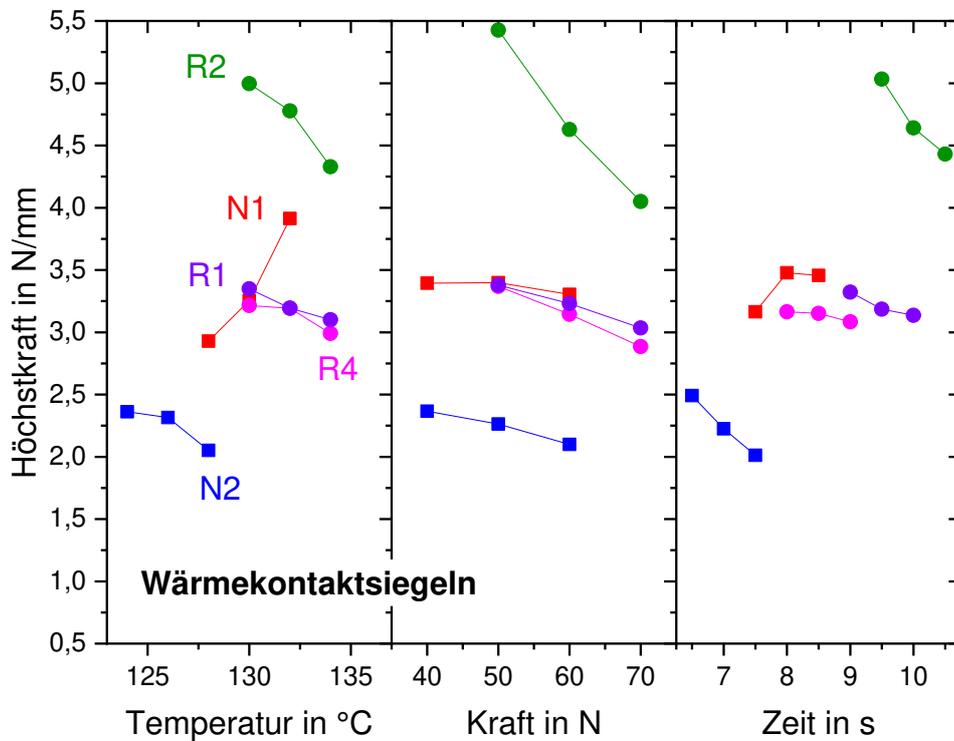


Abbildung 38: Statistische Auswertung der WKS-Versuchspläne hinsichtlich der im Zugversuch erreichten Höchstkraft für die Materialien N1, N2, R1, R2 und R4.

Für den WKS-Prozess zeigt die Korrelationsanalyse zwischen den erreichten Höchstkräften und den eingestellten Schweißparametern, dass sinkende Schweißtemperatur, sinkende Schweißkraft und sinkende Schweißzeit für fast alle Materialien zu größeren Höchstkräften führen. Eine Ausnahme hierzu stellt das Material N1 dar. Hier führen steigende Schweißtemperaturen und steigende Schweißzeiten zu mehr mechanischer Belastbarkeit.

Abschließend wurden die Höchstkräfte von Materialblends betrachtet. Speziell sollte der Frage nachgegangen werden, welcher Rezyklatanteil einen signifikanten Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften von Schweißungen hat. Hierfür wurden die Blends N1-R1, N1-R2 und N1-R4 jeweils mit den Rezyklatanteilen 0, 20, 40, 60, 80 und 100 % mittels US und WKS gefügt. Basierend auf den Ergebnissen der Versuchsreihen für die reinen Folienmaterialien wurde für jedes Blend und Schweißverfahren ein einzelner Satz Prozessparameter gewählt (Tabelle 19 für US und Tabelle 20 für WKS). Mit diesem wurden analog zu den reinen Folienmaterialien Schweißversuche mit anschließenden mechanischen Prüfungen durchgeführt. Die resultierenden Höchstkräfte sind als Funktion des Rezyklatanteils in Abbildung 39 und Abbildung 40 dargestellt. Intuitiv wäre hier ein monotoner Zusammenhang von Höchstkraft und Rezyklatanteil zu erwarten, was sich allerdings anhand der Daten bzw. deren Streuungen nur bedingt bestätigen lässt. Für die US-Verbindungen des Blends N1-R2 und die WKS-Verbindungen der Blends N1-R2 und N1-R4 folgt ein Großteil der Datenpunkte dem erwarteten monotonen Zusammenhang. Allerdings treten in allen Fällen punktuelle Ausreißer bei 20, 80 bzw. 40 % Rezyklatanteil auf. Im Vergleich dazu zeigen die Daten der US-Verbindungen der Blends N1-R1 und N1-R4 sowie der WKS-Verbindungen des Blends N1-R1 teils signifikant nicht-monotone Zusammenhänge zwischen Höchstkraft und Rezyklatanteil. Dies deutet auf grundlegende Schwierigkeiten bei der Vermischung der Blendbestandteile beim Compoundieren, Extrudieren oder Schweißen hin. Eine abschließende Erklärung für dieses Verhalten konnte im Rahmen des Forschungsvorhabens nicht gefunden werden.

Tabelle 19: Prozessparameter der US-Versuche mit Blends aus der Neuware N1 und den Rezyklaten R1, R2 und R4.

Material	Amplitude in μm	Kraft in N	Zeit in s
N1-R1	26	380	0,6
N1-R2	26	380	0,6
N1-R4	22	380	0,5

Tabelle 20: Prozessparameter der WKS-Versuche mit Blends aus der Neuware N1 und den Rezyklaten R1, R2 und R4.

Material	Temperatur in $^{\circ}\text{C}$	Kraft in N	Zeit in s
N1-R1	132	50	9,0
N1-R2	132	50	9,0
N1-R4	132	50	8,0

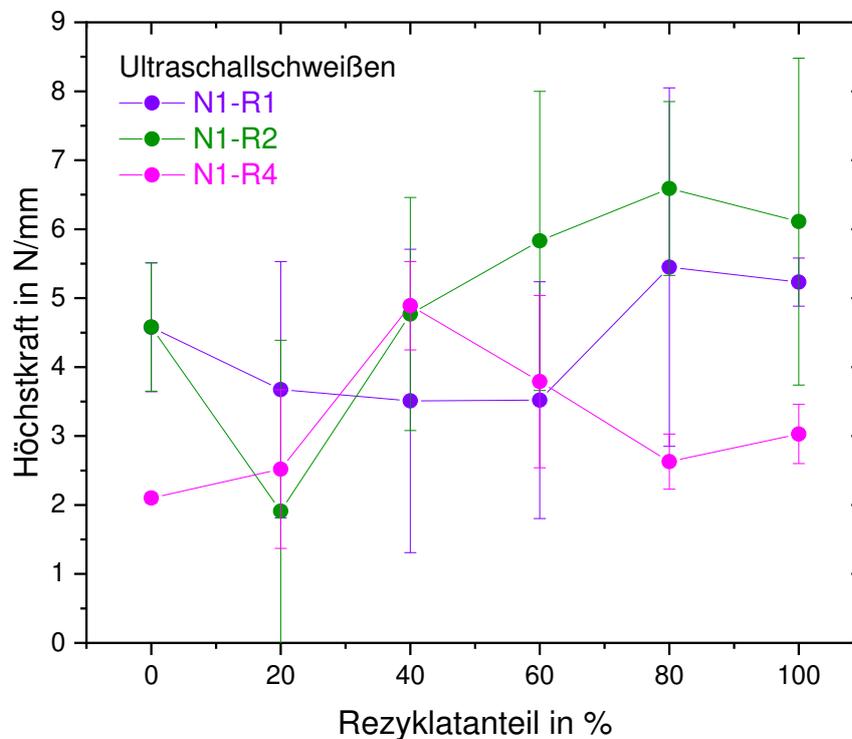


Abbildung 39: Höchstkraften der mittels Ultraschallschweißen gefügten Verbindungen der Blends N1-R1, N1-R2 und N1-R4 als Funktion des Rezyklatanteils im Blend.

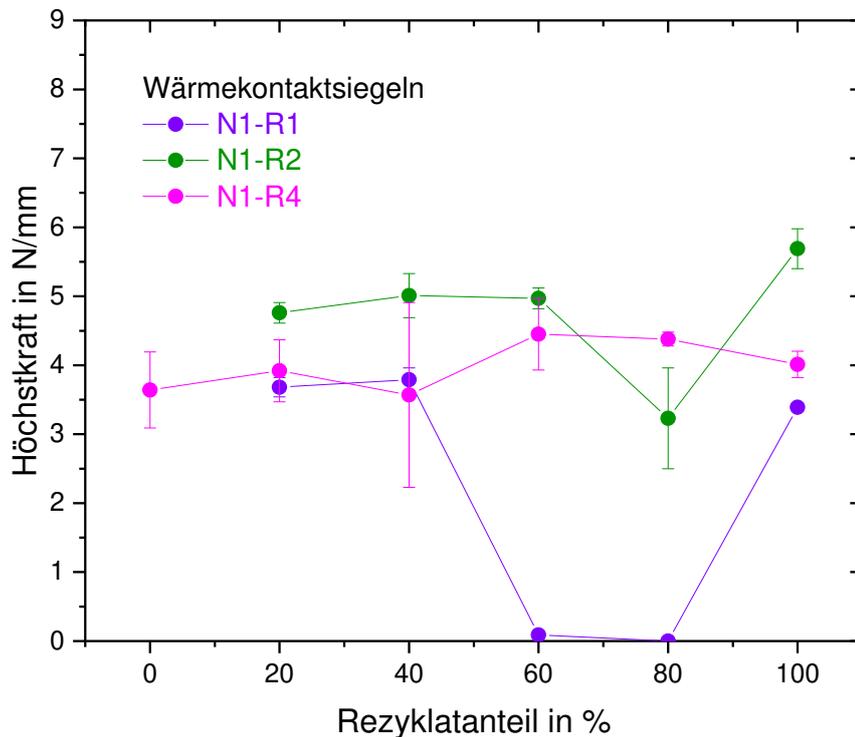


Abbildung 40: Höchstkräfte der mittels Wärmekontaktsiegeln gefügten Verbindungen der Blends N1-R1, N1-R2 und N1-R4 als Funktion des Rezyklatanteils im Blend.

5.3 Ökobilanz

Die Szenarien zeigen deutlich, dass eine Materialsubstitution durch Rezyklate anstelle von Neuware zu Verbesserungen aller betrachteten Umweltauswirkungen führen. Im Hinblick auf das End-of-Life ist ebenfalls das Recycling der Verbrennung zu bevorzugen. Allerdings stellen die betrachteten Szenarien insbesondere im Hinblick auf die deklarierte Einheit (Monomaterialfolie aus PE) nur Grenzfälle dar und können nicht auf Folien jeglicher Art verallgemeinert werden. Außerdem bilanziert die vereinfachte Betrachtung des Recyclingprozesses ausdrücklich Monomaterialfolien. Mehrschichtfolien könnten nicht in dieser vereinfachten Betrachtung bilanziert werden, da sie zum einen zu deutlich höherem Ausschuss innerhalb des Recyclingprozesses führen würden und ein Recycling von Mehrschichtfolien ein Downcycling darstellt, die gewonnenen Rezyklate also nicht in gleichwertigen Anwendungen eingesetzt werden können. Die Betrachtung beinhaltet außerdem keine Gutschriften oder Lasten, die außerhalb der Systemgrenzen anfallen. Solche Gutschriften beinhalten unter anderem die bei der Verbrennung gewonnene thermische und elektrische Energie, sowie das beim Recyclingprozess entstehende Rezyklat.

Bezüglich des Materialeinsatzes wird angenommen, dass das Mahlgut lastenfrei in das System fließt, allerdings wird auch hier nicht berücksichtigt, dass dadurch Neuware ersetzt wird, was zu Gutschriften führen kann.

Auf Basis der technischen Eignung von Rezyklatmaterial in PE-Folienanwendungen im Schweißverhalten und der ökologischen Vorteile eines Rezyklateinsatzes werden im Folgenden die Einsatzpotentiale von Post-Consumer Rezyklaten diskutiert. Von dem 2019 in Deutschland verarbeiteten PE-Material werden 60 % (1.270 kt) [18] im Verpackungsbereich eingesetzt, davon der Großteil als Folien. Der am 18.03.2024 von dem europäischen Rat angenommene Vorschlag der EU-Kommission für eine Verpackungsverordnung schreibt eine verpflichtende Rezyklatquote von 10 % bei kontaktsensitiven Verpackungen und 35 % für alle restlichen Verpackungen im Jahr 2030 vor. Im Jahr 2040 sollen diese Quoten nochmals gehoben werden und eine Gesamtzyklatquote bei Verpackungen von über 50 % erzielt werden [44]. Auch wenn alle Bedingungen für den Schweißprozess bei Folien aus 100 % Rezyklaten gegeben sind, könnten optische Faktoren dennoch die Anwendung von Rezyklaten beschränken. Rezyklate werden daher vermehrt in Verpackungs- und Luftpolsterfolien, sowie Transport- und Versandfolien ohne direkten Kontakt zu sensitiven Inhalten eingesetzt. Weitere Einsatzpotentiale von Folien aus Rezyklatmaterial ergeben sich im Bausektor, sowie in Anwendungen der Garten- und Landwirtschaft.

6 Zusammenfassung

6.1 Herstellung von PE-Folien aus Post-Consumer-Rezyklaten

Insgesamt wurden sechs verschiedene PE-Folienmaterialien betrachtet. Zwei der verwendeten PE-Typen waren dabei Neuwaren, die als Referenzen dienten, während die übrigen vier PE-Typen aus der Rubrik der Post-Consumer-Rezyklate stammten. Aus allen PE-Typen wurden erfolgreich Folien mit einer Stärke von ca. 0,5 mm extrudiert, die anschließend thermisch, rheologisch und mechanisch charakterisiert wurden. Hierbei zeigte sich, dass es sich nur bei den Neuwaren um reine PE-LD-Materialien handelte. Alle PE-Rezyklate stellten hingegen Mischungen aus PE-LD und PE-HD dar, bei denen der Massenanteil des PE-HD überwog. Für zwei der betrachteten Rezyklate konnte zusätzlich ein geringer Massenanteil PP nachgewiesen werden. Hinsichtlich der komplexen Viskosität konnten keine signifikanten Materialunterschiede zwischen den Rezyklaten gefunden werden. Bei mechanischen Zugversuchen der Folien konnte für einen Teil der Neuwaren und Rezyklate bei der Verstreckung lokale Einschnürungen beobachtet werden. Die entsprechenden Materialien weisen auch in ihren Spannungs-Dehnungs-Diagrammen erkennbare Streckgrenzen auf.

6.2 Schweißen von PE-Folien aus Post-Consumer-Rezyklaten

Mit den hergestellten PE-Folien aus Neuware bzw. Rezyklat wurden umfassende Versuchsreihen mittels Ultraschallschweißen und Wärmekontaktsiegeln durchgeführt. Dabei wurden die Prozessparameter Schwingungsamplitude, Schweißdruck und Schweißzeit bzw. Heizbacktemperatur, Schweißdruck und Schweißzeit variiert. Alle hergestellten Schweißungen wurden mechanisch durch Zugversuche geprüft und hinsichtlich ihrer Qualität bewertet. Durch den Vergleich der Kraft-Dehnungs-Diagramme von Schweißungen und ungeschweißten Folien konnte gezeigt werden, dass für bestimmte Kombinationen von Materialien und Schweißverfahren das mechanische Niveau des Grundmaterials erreicht wurde. Die entsprechenden Kombinationen beschränken sich nicht auf bestimmte Materialtypen oder Schweißverfahren, sondern beinhalten Neuware und Rezyklate sowie Ultraschallschweißungen und Wärmekontaktsiegelnähte. Für die Schweißverbindungen dieser Kombinationen ist durch weitere Prozessoptimierung keine wesentliche Verbesserung der mechanischen Eigenschaften zu erwarten. Die Schweißverbindungen der übrigen Versuchsreihen konnten das mechanische Niveau der ungeschweißten Folien nicht

erreichen, die Ursache dafür konnte im Rahmen des Projekts nicht abschließen geklärt werden.

Bei der Korrelationsanalyse der mechanisch begrenzenden Höchstkräfte der Schweißverbindungen und den Prozessparametern konnten material- und verfahrensspezifische Abhängigkeiten identifiziert werden. Nur wenige dieser Korrelationen waren für alle betrachteten Materialien gültig. So führten beim Ultraschallschweißen nur längere Schweißzeiten und beim Wärmekontaktsiegeln nur geringere Schweißdrücke zu einer generellen Verbesserung der Höchstkräfte.

Als weiterer Schritt wurden auch Blends von Neuware und Rezyklat mit abgestuftem Rezyklatanteil geschweißt und mechanisch bewertet. Hierbei zeigte sich für die Materialien, deren Schweißungen zuvor bereits das mechanische Niveau des Grundmaterials erreicht hatten, näherungsweise der intuitiv erwartete monotone Zusammenhang zwischen Höchstkraft und Rezyklatanteil. Für die Schweißungen der übrigen Blends wurden meist nicht-monotone Zusammenhänge zwischen mechanischer Belastbarkeit und Rezyklatanteil gefunden. Diese deuten auf komplexere Abläufe bzw. Schwierigkeiten bei der Vermischung der Blendbestandteile beim Compoundieren, Extrudieren oder Schweißen hin. Weiterführende Untersuchungen zu diesem Thema konnten im Forschungsvorhaben nicht abgebildet werden.

6.3 Ökobilanzierung

Im Hinblick auf die ökologischen Auswirkungen wurden zwei Aspekte betrachtet. Zum einen wurde die Auswirkung eines steigenden Rezyklatanteils in der Folie und einschließlich der damit einhergehenden Recompoundierung anstelle des Einsatzes von Neuware betrachtet. Ein steigender Rezyklatgehalt verringert dabei die Umweltauswirkungen aller betrachteten Indikatoren, d. h. Verbrauch fossiler Ressourcen, Klimawandel, Eutrophierung, Versauerung, Ozonabbau und Photochemische Ozonbildung. Zum andern wurden die ökologischen Auswirkungen eines Recyclingprozesses im Vergleich zur Verbrennung am Ende der Nutzungsphase betrachtet. Ein Recyclingprozess verringert die Umweltauswirkungen aller Wirkungskategorien, allerdings resultiert die Verringerung nur beim GWP in einem in der Gesamtauswirkung relevanten Unterschied (in dem Fall von über 50 %). Die Aussagekraft der ökobilanziellen Betrachtung, die in dem vorliegenden Forschungsprojekt durchgeführt wurde, ist durch die Wahl der Systemgrenzen und der de-

klarierten Einheit eingeschränkt und kann prinzipiell nicht auf alle Foliensysteme verallgemeinernd übertragen werden. Die Untersuchungen bestätigen jedoch, dass die erwarteten Vorgaben zur Recyclingfähigkeit und ein dadurch ermöglichtes Recycling, sowie ein steigender Rezyklatgehalt ökologisch vorteilhaft sind.

Anhang

A.1 Technisches Datenblatt Rezyklat 1 - Mersalen® LDPE RCY 05



Datenblatt / Produktinformation

Mersalen® LDPE RCY 05

Type zur Verwendung in Extrusionsanwendungen





Gemäß ISO 14021:2016 (Typ II Umweltkennzeichnung) hat das von APK gelieferte Material die folgenden Umweltvorteile:
- Der Recyclinganteil beträgt 100%.
[Kap. 7.8.1.1, Abs. a), Kl. 1)]

Eigenschaften	Wert	Einheit	Methode
Physikalische Eigenschaften			
Dichte	0,94	[g/cm ³]	DIN EN ISO 1183-1
Rheologische Eigenschaften			
MFI (190°C 2,16kg)	0,6 ... 0,8	[g/10 min]	DIN EN ISO 1133-1
MFI (190°C 2,16kg)	6 ... 8	[g/10min]	DIN EN ISO 1133-1
Mechanische Eigenschaften			
E-modul	> 350	[MPa]	DIN EN ISO 527-1
Zugfestigkeit	> 12	[MPa]	DIN EN ISO 527-1
Dehnung bei Bruch	> 350	[%]	DIN EN ISO 527-1
Kerbschlagzähigkeit (23°C)	kein Bruch	[kJ/m ²]	DIN EN ISO 179/1eA
Zusammensetzung			
Restaschegehalt	< 3,5	[%]	DIN EN ISO 3451-1
Andere			
Farbe	grau, grün		visuell
Form	Linsen, Zylinder		visuell
Filtrationsfeinheit	180	[µm]	visuell

Gemessene Werte nach 24-stündiger Lagerung bei standardisiertem Klima

HAFTUNGSAUSSCHLUSS: Die von APK hergestellten Materialien unterliegen ständigen Qualitätskontrollen und werden mit äußerster Sorgfalt nach dem heutigen Stand unserer technischen Kenntnisse hergestellt. Da es sich bei den hergestellten Materialien um Recycling-Materialien handelt, können ihre Eigenschaften naturgemäß schwanken. Daher sind die Werte in diesem Datenblatt Durchschnittswerte. Es liegt in der Verantwortung des Anwenders unserer Materialien, durch eigene Tests und Versuche die für sein Endprodukt erforderlichen Eigenschaften sicherzustellen. Rechtlich verbindliche Garantien für die Einhaltung dieser geforderten Endprodukteigenschaften oder die Eignung für konkrete Anwendungen können aus den Angaben in diesem Datenblatt nicht abgeleitet werden. Einschlägige Schutzrechte und bestehende Gesetze und Vorschriften sind vom Empfänger / Verarbeiter unserer Materialien stets in eigener Verantwortung zu beachten und einzuhalten. Wir behalten uns das Recht vor, das Merkblatt zu ändern. Ergänzend gelten unsere Allgemeinen Verkaufsbedingungen.

Version 06 – Januar 2021

APK AG
Beunaer Straße 2
06217 Merseburg
Germany

T +49 3461 / 79457 – 0
E info@apk-ag.de
W www.apk-ag.de

A.2 Technisches Datenblatt Rezyklat 2 - Mersalen® LDPE NCY PCR 02



Data sheet / Product information

Mersalen® LDPE NCY PCR 02

Type to use in extrusion applications



50µm blown film



granules



Acc. to ISO 14021:2016 (Type II environmental labelling) material provided by APK has the following environmental advantage:
– Recycled Content is 100%
[chap. 7.8.1.1, para a), cl. 1)]



Acc. to VerpackG:
– A packaging, which is 100% made of Mersalen® LDPE NCY can be recycled in the established LDPE recycling processes [§6]

PROPERTIES	VALUE	UNIT	METHOD
Physical properties			
Density	0,92	[g/cm³]	DIN EN ISO 1183-1
Rheological properties			
MFR (190°C 2,16kg)	0,9 ... 1,4	[g/10 min]	DIN EN ISO 1133-1
Mechanical properties			
E-modules	> 200	[MPa]	DIN EN ISO 527-1
Tensile strength md/td	> 12 / >14	[MPa]	DIN EN ISO 527-1
Elongation at yield md/td	> 100 / >200	[%]	DIN EN ISO 527-1
Drop dart impact	> 90	[g]	DIN EN ISO 7765-1 Method A
Tear resistance	> 250	[N/mm]	DIN 53363
Composition			
Ash content	< 0,2	[%]	DIN EN ISO 3451-1
Other			
Colour	grey		Visual
Shape	lenses, cylinders		Visual

*Values measured at 50µm film

DISCLAIMER: Materials manufactured by APK are subject to continuous quality controls and are manufactured with utmost accuracy according to the present level of our technical knowledge. As the produced materials are recycling materials their properties can fluctuate by nature. Therefore the values in this data sheet are average values. It is the responsibility of the user of our materials to ensure by own tests and trials the properties required by his end product. Legally binding guarantees for archiving these required end product properties or the suitability for concrete applications cannot be deduced from the data provided by this sheet. Relevant proprietary rights and existing laws and regulations has always to be observed and adhered by the recipient / processor of our materials on his own responsibility. We reserve the right to modify the data sheet. In addition, apply our General Terms of Conditions of Sales.

Version 01–January 2022



APK AG

Beunaer Straße 2
06217 Merseburg
Germany

T +49 3461 / 79457 – 0
E info@apk-ag.de
W www.apk-ag.de

A.3 Technisches Datenblatt Rezyklat 3 - Recycl-IN rLL9110



The header of the technical data sheet features a dark blue background with a large, light blue circular arrow graphic on the left. The text 'INEOS Olefins & Polymers Europe' is positioned in the top right corner, and 'Recycl-IN rLL9110' is centered in the middle of the header.

INEOS Olefins & Polymers Europe

Recycl-IN rLL9110



The Recycl-IN logo consists of a green circular arrow icon followed by the text 'Recycl-IN' in a green, sans-serif font.

Product Technical Information

Recycl-IN rLL9110 is a natural hybrid polyethylene containing 60% of post-consumer recycle.

Benefits & Features

Recycl-IN rLL9110 is a ready-to-use hybrid polyethylene compound containing 60% of post-consumer recycle (PCR)-and supplied in a pellet form. The product is made from selected PCR materials and virgin resins. Recycl-IN rLL9110 contains a minimum of 85% of linear low density polyethylene.

Recycl-IN rLL9110 is characterised by an outstanding toughness and it offers the following properties when extruded in a film:

- / Excellent impact strength and puncture resistance
- / Good gloss and transparency
- / Low sealing initiation temperature and good hot tack strength
- / Superior bubble stability and extrudability
- / Excellent blending compatibility with other LLDPE and LDPE grades

Applications

Recycl-IN rLL9110 has been developed for use in non-food applications such as doypacks, liners, FFS bags, secondary packaging films.

Recycl-IN rLL9110 can be used pure or as a blending partner with other polyolefins. In addition, Recycl-IN rLL9110 offers easy extrudability.

We recommend that you consult your INEOS technical representative for further advice on the use of Recycl-IN rLL9110.

© INEOS Olefins & Polymers Europe, December 2021



The INEOS logo is displayed in a white, bold, sans-serif font on a dark grey background.

Properties	Conditions	Test Methods	Values	Units
Recycl-IN rLL9110				
Recycl-IN				
Rheological				
Melt Flow Rate	190°C/2.16Kg	ISO 1133-1	1.65	g/10min
Physical				
Density ISO 1872-1	23°C	ISO 1183-2	914	kg/m ³
Mechanical(*)				
Dart drop impact Method A		ASTM D 1709	1500	g
Tensile strength at Yield MD/TD		ISO 527-3	8 / 8	MPa
Tensile strength at break MD/TD		ISO 527-3	41 / 37	MPa
Tensile strain at break MD/TD		ISO 527-3	520 / 620	%
1% Secant modulus MD/TD		ISO 527-3	130 / 150	MPa
Elmendorf tear strength MD/TD		ASTM D 1922	210/ 450	g/25µm
Optical(*)				
Haze	25µm	ASTM D 1003	7	%
Gloss	45°C	ASTM D 2457	67	%
Data should not be used for specification work				
(*) 25 µm blown film, 2.5:1 blow-up ratio, 210°C melt temperature - MD = machine direction, TD = transverse direction				
© INEOS Olefins & Polymers Europe, December 2021				
INEOS				



INEOS Olefins & Polymers Europe

Recycl-IN rLL9110



Processing Guidelines

Recycl-IN rLL9110 in lean blends can be processed on most standard extrusion equipment. Optimisation of conditions may be necessary, depending on the exact blend used.

Recycl-IN rLL9110 rich film formulations are often processed on modified LDPE machinery, but for the best performance the use of purposely designed LLDPE machinery is recommended. Particular attention should be paid to maintaining a low melt temperature, and an efficient bubble cooling system should be employed. The recommended melt temperature range is 190 - 230°C.

Storage

The product should be stored in a dry and dust free environment at temperature below 50°C. Exposure to direct sunlight should be avoided as this may lead to product deterioration. It is advised to process the product within maximum one year after delivery.

REGULATORY INFORMATION
The product and uses described herein may be subject to specific requirements or limitations for use in certain applications like food contact, drinking water or medical devices. Further information may be obtained from the website www.ineos.com where a specific Regulatory Certificate is available for each grade under the heading "SDS & Regulatory Certificate".

Unless specifically indicated, the product mentioned herein is not suitable for applications in the medical or pharmaceutical sectors.

HEALTH AND SAFETY INFORMATION
The product described herein may require precautions in handling. The available product health and safety information for this material is contained in the Safety Data Sheet (SDS) that may be obtained from the website www.ineos.com. Before using any material, a customer is advised to consult the SDS for the product under consideration for use.

EXCLUSION OF LIABILITY
Although INEOS O&P Europe endeavours to ensure that all information and advice relating to our materials or other materials howsoever provided to you by INEOS O&P Europe is accurate and up to date, no representation or warranty, express or implied is made by INEOS O&P Europe as to its accuracy or completeness. All such information and advice is provided in good faith and INEOS O&P Europe is not, to the maximum extent permitted by law, liable for any action you may take as a result of relying on such information or advice or for any loss or damage, including any consequential loss, suffered by you as a result of taking such action.

In addition data and numerical results howsoever provided to you by INEOS O&P Europe are given in good faith and are general in nature. Data and numerical results are not and shall not be regarded as specifications and as such INEOS O&P Europe is not, to the maximum extent permitted by law, liable for any action that you take as a result of relying on such data and results or for any loss or damage, including any consequential loss, suffered by you as a result of taking such action.

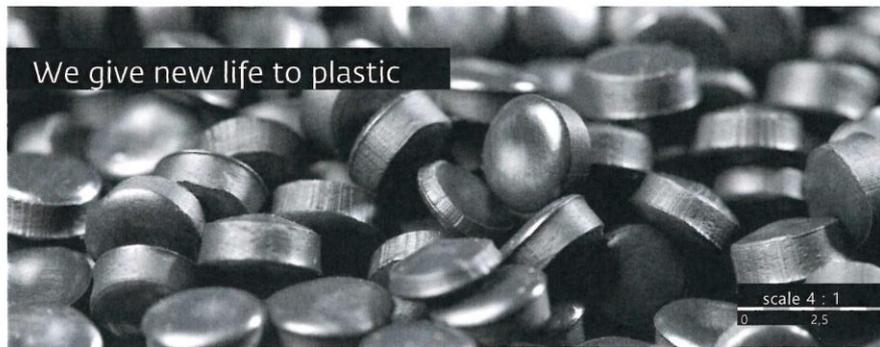
It remains at all times your responsibility to ensure that INEOS O&P Europe materials are suitable for the particular purpose intended and INEOS O&P Europe shall not be responsible for any loss or damage caused by misuse of INEOS O&P Europe products. To the maximum extent permitted by law, INEOS O&P Europe accepts no liability whatsoever arising out of the application, adaptation or processing of the products described herein, the use of other materials in lieu of INEOS O&P Europe materials or the use of INEOS O&P Europe materials in conjunction with such other materials.

© INEOS Olefins & Polymers Europe, December 2021



A.4 Technisches Datenblatt Rezyklat 4 - PE-LD 490-S

vogt
plastic



PE-LD Regranulat 490-S

Properties	Units	Values	Norm
Density	g/cm ³	0,95	EN ISO 55990
MFR 190 / 2,16	g/10 min	0,8	EN ISO 1133
Tensile Stress, Yield	MPa	12	EN ISO 527
Elongation, Yield	%	43	EN ISO 527
Tensile Stress, Break	MPa	14	EN ISO 527
Elongation, Break	%	370	EN ISO 527
Tensile Modulus	MPa	350	EN ISO 527
Charpy Impact Strength, notched at 23 °C	kJ/m ²	32	EN ISO 179
Charpy Impact Strength, notched at -20 °C	kJ/m ²	5,7	EN ISO 179

Various colors are available on request.

The above figures are nominal values only.

Tests relating to the application are always necessary.

V1.0/2023

Polyethylene

Vogt-Plastic GmbH

Bukheinstrasse 4, D-79618 Rheinfelden, Telefon +49 (0) 7623/79 776-0, info@vogt-plastic.de

www.vogt-plastic.de

A.5 Technisches Datenblatt Neuware 1 - Lupolen 2420F

Technical Data Sheet

Lupolen 2420F

Low Density Polyethylene



Product Description

Lupolen 2420 F is a non-additivated, low density polyethylene. It is characterized by a good melt strength leading to a good bubble stability during blown film extrusion. It is delivered in pellet form.

This product is not intended for use in medical and pharmaceutical applications.

Regulatory Status

For regulatory compliance information, see *Lupolen 2420F* [Product Stewardship Bulletin \(PSB\) and Safety Data Sheet \(SDS\)](#).

Status	Commercial: Active
Availability	Africa-Middle East; Asia-Pacific; Europe
Application	Agriculture Film; Bags & Pouches; Food Packaging Film; Hygiene Film; Liner Film; Shrink Film
Market	Flexible Packaging
Processing Method	Blown Film
Attribute	General Purpose; Good Heat Seal; Good Melt Strength; Good Optical Properties; Good Processability

Typical Properties	Nominal Value	Units	Test Method
Physical			
Melt Flow Rate, (190 °C/2.16 kg)	0.75	g/10 min	ISO 1133-1
Density	0.923	g/cm ³	ISO 1183-1
Mechanical			
Tensile Modulus	260	MPa	ISO 527-1, -2
Tensile Stress at Yield	11	MPa	ISO 527-1, -2
Film			
Dart Drop Impact Strength, F50	150	g	ASTM D1709
Tensile Strength			
MD	26	MPa	ISO 527-1, -3
TD	24	MPa	ISO 527-1, -3
Tensile Strain at Break			
MD	300	%	ISO 527-1, -3
TD	600	%	ISO 527-1, -3
Coefficient of Friction	>0.8		ISO 8295
Impact			
Failure Energy	5.5	J/mm	DIN 53373
Thermal			
Vicat Softening Temperature, (A/50)	96	°C	ISO 306
Peak Melting Point	111	°C	ISO 11357-3
Optical			
Haze, (50 µm)	<8	%	ASTM D1003

Gloss		
(20°)	>40	ASTM D2457
(60°)	>90	ASTM D2457
Additional Information		
Test Specimen	Film	
Film properties tested using 50 µm thickness blown film extruded at a melt temperature of 180°C and a blow-up ratio of 2.5:1.		
Processing Parameters		
Extrusion Temperature	170-220 °C	

Notes

These are typical property values not to be construed as specification limits.

Processing Techniques

Users should determine the conditions necessary to obtain optimum product properties and suitability of the product for the intended application.

In cases where higher temperatures are required, please contact your appropriate technical contact for support.

Further Information**Health and Safety:**

The resin is manufactured to the highest standards, but special requirements apply to certain applications such as food end-use contact and direct medical use. For specific information on regulatory compliance contact your local representative.

Workers should be protected from the possibility of skin or eye contact with molten polymer. Safety glasses are suggested as a minimal precaution to prevent mechanical or thermal injury to the eyes.

Molten polymer may be degraded if it is exposed to air during any of the processing and off-line operations. The products of degradation may have an unpleasant odor. In higher concentrations they may cause irritation of the mucus membranes. Fabrication areas should be ventilated to carry away fumes or vapours. Legislation on the control of emissions and pollution prevention should be observed.

The resin will burn when supplied with excess heat and oxygen. It should be handled and stored away from contact with direct flames and/or ignition sources. While burning, the resin contributes high heat and may generate a dense black smoke.

Recycled resins may have previously been used as packaging for, or may have otherwise been in contact with, hazardous goods. Converters are responsible for taking all necessary precautions to ensure that recycled resins are safe for continued use.

For further information about safety in handling and processing please refer to the Safety Data Sheet.

Conveying:

Conveying equipment should be designed to prevent production and accumulation of fines and dust particles that are contained in polymer resins. These particles can under certain conditions pose an explosion hazard. Conveying systems should be grounded, equipped with adequate filters and regularly inspected for leaks.

Storage:

The resin is packed in 25 kg bags, octabins or bulk containers protecting it from contamination. If it is stored under certain conditions, i. e. if there are large fluctuations in ambient temperature and the atmospheric humidity is high, moisture may condense inside the packaging. Under these circumstances, it is recommended to dry the resin before use. Unfavorable storage conditions may also intensify the resin's slight characteristic odor.

Resin should be protected from direct sunlight, temperatures above 40°C and high atmospheric humidity during storage. Higher storage temperatures may reduce the storage time.

The information submitted is based on our current knowledge and experience. In view of the many factors that may affect processing and application, these data do not relieve processors of the responsibility of carrying out their own tests and experiments; neither do they imply any legally binding assurance of certain properties or of suitability for a specific purpose. This information does not remove the obligation of the customer to inspect the material on arrival and notify us of any faults immediately. It is the responsibility of those to whom we supply our products to ensure that any proprietary rights and existing laws and legislation are observed.

Company Information

For further information regarding the LyondellBasell company, please visit <http://www.lyb.com/>.

© LyondellBasell Industries Holdings, B.V. 2018

Disclaimer

Information in this document is accurate to the best of our knowledge at the date of publication. The document is designed to provide users general information for safe handling, use, processing, storage, transportation, disposal and release and does not constitute any warranty or quality specification, either express or implied, including any warranty of merchantability or fitness for any particular purpose. Users shall determine whether the product is suitable for their use and can be used safely and legally.

In addition to any prohibitions of use specifically noted in this document, LyondellBasell may further prohibit or restrict the sale of its products into certain applications. For further information, please contact a LyondellBasell representative.

Trademarks

The Trademark referenced within the product name is owned or used by the LyondellBasell family of companies.

A.6 Technisches Datenblatt Neuware 2 - FT6230

PRODUCT DATA SHEET

16.12.2022 Ed.4

Polyethylene

FT6230

Low Density Polyethylene

Description

FT6230 is an unmodified low density polyethylene based on the tubular technology for film extrusion and foam.

This grade is developed for the production of packaging film with good optical properties for medium duty film applications.

Cas No. 9002-88-4

FT6230 contains:

No additives

Typical characteristics

FT6230 can be described with following typical characteristics:

Very good optical properties

Easy to extrude

Bubble stability

Applications

FT6230 is intended for following applications:

Food packaging

Shrink film

Pouches

Physical properties

Property	Typical value *	Unit	Test method
Density	923	kg/m ³	ISO 1183-1
Melt flow rate (190 °C/2.16 kg)	2.0	g/10 min	ISO 1133-1
Vicat softening temperature A50 (10 N)	95	°C	ISO 306
Melting temperature	111	°C	ISO 11357-3

* Data should not be used for specification work



Polyethylene

FT6230

Film properties

Property	Typical value *	Unit	Test method
Dart drop	100	g	ISO 7765-1
Tear resistance - Elmendorf ¹	2.3	N	ISO 6383-2
Tear resistance - Elmendorf ²	2.5	N	ISO 6383-2
Tensile strength ¹	22	MPa	ISO 527-3
Tensile strength ²	20	MPa	ISO 527-3
Tensile strain at break ¹	400	%	ISO 527-3
Tensile strain at break ²	600	%	ISO 527-3
Tensile modulus ¹	190	MPa	ASTM D882
Tensile modulus ²	210	MPa	ASTM D882
Gloss 45°	70	GU	ASTM D2457
Haze	8	%	ASTM D1003
Coefficient of friction (film/film)	0.2	-	ISO 8295

¹ Machine direction

² Transverse direction

* Data should not be used for specification work

Packaging and storage

FT6230 should be stored in dry conditions at temperatures below 50°C and protected from UV-light. Improper storage can initiate degradation, which can result in odour generation and colour changes and can have negative effects on the physical properties of this product.

Product compliance documents

Latest versions of product safety information sheets (PSIS), product safety data sheets (SDS) and other product liability documents are available in our website www.borealisgroup.com.

Sustainability aspects

Borealis is ever mindful of the impact of our products on the planet. We promote Design for Circularity (DfC) and Design for Recycling (DfR) to conserve natural resources and to reduce the environmental impact of products over their entire lifetime (including production, use phase and after phase). DfR helps ensure that material can be effectively recycled while maximizing the material performance efficiency.

Further information on sustainability and Design for Recycling (DfR) can be found from our websites www.borealisgroup.com and www.borealiseverminds.com.

For information on regional availability please contact Borealis Sales Representative.

Disclaimer

The product(s) mentioned herein are not intended to be used for medical, pharmaceutical or healthcare applications and we do not support their use for such applications.

To the best of our knowledge, the information contained herein is accurate and reliable as of the date of publication; however we do not assume any liability whatsoever for the accuracy and completeness of such information.

Borealis makes no warranties which extend beyond the description contained herein. Nothing herein shall constitute any warranty of merchantability or fitness for a particular purpose.

It is the customer's responsibility to inspect and test our products in order to satisfy itself as to the suitability of the products for the customer's particular purpose. The customer is responsible for the appropriate, safe and legal use, processing and handling of our products.

No liability can be accepted in respect of the use of any Borealis product in conjunction with any other products and/or materials. The information contained herein relates exclusively to our products when not used in conjunction with any other material unless as specifically provided for in the test methods stated above.

Borealis AG | Trabrennstrasse 6-8 | A-1020 Vienna | Austria
Telephone: +43 1 22 400 0 | Fax: +43 1 22 400 333
Website www.borealisgroup.com



A.7 Protokoll zur Folienextrusion für die Kombination N1 - R1

Probe Nr.			1.1.1.	1.1.2.	1.1.3.	1.1.4.	1.1.5.	1.1.6.	
Spaltbreite in mm			0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	
Schmelzetemperatur in °C			210	209	207	209	211	212	
Schmelzedruck in bar			78	92	94	100	102	104	
Schneckendrehzahl in 1/min			100	100	100	125	140	145	
Drehmoment in %									
Durchsatz in kg/h			5	5	5	5	5	5	
Zylinder- heizung	Einzug	soll	185	185	185	185	185	185	
	Tz 1 in °C	ist	185	185	185	185	185	185	
	Tz 2 in °C	soll	190	190	190	190	190	190	
		ist	190	187	190	190	190	190	
	Tz 3 in °C	soll	195	195	195	195	195	195	
		ist	194	195	196	195	195	195	
	Tz 4 in °C	soll	195	195	195	195	195	195	
		ist	196	195	195	195	195	195	
	Flansch	Tz 5 in °C	soll	195	195	195	195	195	195
			ist	195	196	195	196	195	195
Düse	Tz 6 in °C	soll	210	210	220	225	230	230	
		ist	209	211	219	225	229	231	
Glättwerk	Oben in °C	soll	50	50	50	50	50	50	
		ist	50	50	50	50	50	50	
	Mitte in °C	soll	80	80	80	80	80	80	
		ist	80	80	80	80	80	80	
	Unten in °C	soll	30	30	30	30	30	30	
		ist							

	ist	30	30	30	30	30	30
	Drehzahl in m/min	soll					
	ist	1,6	1,55	1,6	1,6	1,6	1,6
Abzug	Drehzahl in m/min	soll					
	ist	1,62	1,57	1,62	1,62	1,62	1,62
Foliendicke in mm		0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5

A.8 Protokoll zur Folienextrusion für die Kombination N1 - R2

Probe Nr.			1.2.2.	1.2.3.	1.2.4.	1.2.5.	1.2.6.
Spaltbreite in mm			0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Schmelzetemperatur in °C			208	208	208	208	208
Schmelzedruck in bar			90	95	100	105	110
Schneckendrehzahl in 1/min			100	100	100	100	100
Drehmoment in %							
Durchsatz in kg/h			5	5	5	5	5
Zylinder- heizung	Einzug	soll	185	185	185	185	185
	T _Z 1 in °C	ist	185	185	185	185	185
	T _Z 2 in °C	soll	190	190	190	190	190
		ist	188	192	189	192	190
	T _Z 3 in °C	soll	195	195	195	195	195
		ist	194	195	196	195	195
	T _Z 4 in °C	soll	195	195	195	195	195
		ist	195	195	195	195	195
Flansch	T _Z 5 in °C	soll	195	195	195	195	195
		ist	195	195	195	195	195
Düse	T _Z 6 in °C	soll	210	210	210	210	215

	ist	210	210	210	210	215
Glättwerk	Oben in °C	soll	50	50	50	50
		ist	50	50	50	50
	Mitte in °C	soll	80	80	80	80
		ist	80	80	80	80
	Unten in °C	soll	30	30	30	30
		ist	30	30	30	30
	Drehzahl in m/min	soll				
		ist	1,58	1,58	1,6	1,6
Abzug	Drehzahl in m/min	soll				
		ist	1,6	1,6	1,62	1,62
Foliendicke in mm			0,5	0,5	0,5	0,5

A.9 Protokoll zur Folienextrusion für die Kombination N1 - R3

Probe Nr.		1.3.2.	1.3.3.	1.3.4.	
	Spaltbreite in mm	0,5	0,5	0,5	
	Schmelzetemperatur in °C	210	215	225	
	Schmelzedruck in bar	103	120	124	
	Schneckendrehzahl in 1/min	100	100	120	
	Drehmoment in %				
	Durchsatz in kg/h	5	5	5	
Zylinder- heizung	Einzug	soll	185	185	185
		ist	185	185	185
	T _Z 1 in °C	soll	190	190	190
		ist	190	191	191
	T _Z 3 in °C	soll	195	195	195

		ist	195	195	196
	T _Z 4 in °C	soll	195	195	200
		ist	195	195	200
Flansch	T _Z 5 in °C	soll	195	220	210
		ist	195	201	210
Düse	T _Z 6 in °C	soll	215	220	225
		ist	215	220	225
Glättwerk	Oben in °C	soll	50	50	50
		ist	50	50	50
	Mitte in °C	soll	80	80	80
		ist	80	80	80
	Unten in °C	soll	30	30	30
		ist	30	30	30
Drehzahl in m/min	soll				
	ist	1,6	1,6	1,6	
Abzug	Drehzahl in m/min	soll			
		ist	1,62	1,62	1,62
Foliendicke in mm			0,5	0,5	0,5

A.10 Protokoll zur Folienextrusion für die Kombination N1 - R4

Probe Nr.	1.4.2.	1.4.3.	1.4.4.	1.4.5.	1.4.6.
Spaltbreite in mm	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Schmelzetemperatur in °C	209	208	208	206	208
Schmelzedruck in bar	87	94	100	107	109
Schneckendrehzahl in 1/min	100	100	100	100	105
Drehmoment in %					

Durchsatz in kg/h			5	5	5	5	5	
Zylinder- heizung	Einzug	soll	185	185	185	185	185	
	T _Z 1 in °C	ist	185	185	185	185	185	
	T _Z 2 in °C	soll	190	190	190	190	190	
		ist	190	191	191	192	191	
	T _Z 3 in °C	soll	195	195	195	195	195	
		ist	195	195	196	195	195	
	T _Z 4 in °C	soll	195	195	195	195	195	
		ist	195	195	195	196	195	
	Flansch	T _Z 5 in °C	soll	195	195	195	195	195
			ist	195	195	195	195	195
Düse	T _Z 6 in °C	soll	215	215	215	215	220	
		ist	215	215	215	215	220	
Glättwerk	Oben in °C	soll	50	50	50	50	50	
		ist	50	50	50	50	50	
	Mitte in °C	soll	80	80	80	80	80	
		ist	80	80	80	80	80	
	Unten in °C	soll	30	30	30	30	30	
		ist	30	30	30	30	30	
	Drehzahl in m/min	soll						
		ist	1,62	1,62	1,62	1,62	1,62	
	Abzug	Drehzahl in m/min	soll					
			ist	1,64	1,64	1,64	1,64	1,64
Foliendicke in mm			0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	

A.11 Protokoll zur Folienextrusion für die Kombination N2 - R1

Probe Nr.			2.1.1.	2.1.2.	2.1.3.	2.1.4.	2.1.5.	
Spaltbreite in mm			0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	
Schmelzetemperatur in °C			214	215	215	214	215	
Schmelzedruck in bar			63	75	83	94	104	
Schneckendrehzahl in 1/min			100	115	115	125	135	
Drehmoment in %								
Durchsatz in kg/h			5	5	5	5	5	
Zylinder- heizung	Einzug	soll	185	185	185	185	185	
	T _Z 1 in °C	ist	185	185	185	185	185	
	T _Z 2 in °C	soll	190	190	190	190	190	
		ist	190	190	190	190	190	
	T _Z 3 in °C	soll	195	195	195	195	195	
		ist	195	195	196	195	195	
	T _Z 4 in °C	soll	195	195	200	195	195	
		ist	195	195	200	195	195	
	Flansch	T _Z 5 in °C	soll	200	200	200	200	200
			ist	200	200	200	200	200
Düse	T _Z 6 in °C	soll	215	215	215	215	215	
		ist	215	215	215	215	215	
Glättwerk	Oben in °C	soll	50	50	50	50	50	
		ist	50	50	50	50	50	
	Mitte in °C	soll	80	80	80	80	80	
		ist	80	80	80	80	80	
	Unten in °C	soll	30	30	30	30	30	
		ist						

		ist	30	30	30	30	30
	Drehzahl in	soll					
	m/min	ist	1,76	1,76	1,76	1,76	1,76
Abzug	Drehzahl in	soll					
		m/min	ist	1,78	1,78	1,78	1,78
Foliendicke in mm			0,5	0,5	0,5	0,5	0,5

A.12 Protokoll zur Folienextrusion für die Kombination N2 - R2

Probe Nr.			2.2.2.	2.2.3.	2.2.4.	2.2.5.	
	Spaltbreite in mm		0,5	0,5	0,5	0,5	
	Schmelzetemperatur in °C		214	214	214	215	
	Schmelzedruck in bar		75	82	93	102	
	Schneckendrehzahl in 1/min		100	100	100	100	
	Drehmoment in %						
	Durchsatz in kg/h		5	5	5	5	
Zylinder- heizung	Einzug	soll	185	185	185	185	
		T _Z 1 in °C	ist	185	185	185	185
	T _Z 2 in °C	soll	190	190	190	190	
		ist	190	190	190	190	
	T _Z 3 in °C	soll	195	195	195	195	
		ist	195	195	195	195	
	T _Z 4 in °C	soll	195	195	195	195	
		ist	195	195	195	195	
	Flansch	T _Z 5 in °C	soll	200	200	200	200
		ist	200	200	200	200	
Düse	T _Z 6 in °C	soll	215	215	210	210	

	ist		215	215	210	210
Glättwerk	Oben in °C	soll	50	50	50	50
		ist	50	50	50	50
	Mitte in °C	soll	80	80	80	80
		ist	80	80	80	80
	Unten in °C	soll	30	30	30	30
		ist	30	30	30	30
	Drehzahl in m/min	soll				
		ist	1,64	1,66	1,66	1,66
Abzug	Drehzahl in m/min	soll				
		ist	1,66	1,68	1,68	1,68
Foliendicke in mm			0,5	0,5	0,5	0,5

A.13 Protokoll zur Folienextrusion für die Kombination N2 - R3

Probe Nr.		2.3.2.	2.3.4.	
	Spaltbreite in mm	0,50	0,50	
	Schmelztemperatur in °C	214	213	
	Schmelzedruck in bar	115	93	
	Schneckendrehzahl in 1/min	100	100	
	Drehmoment in %	5	5	
	Durchsatz in kg/h			
Zylinder- heizung	Einzug	soll	185	185
		T _Z 1 in °C	ist	185
	T _Z 2 in °C	soll	190	190
		ist	192	190
	T _Z 3 in °C	soll	195	195

		ist	195	195
	T _Z 4 in °C	soll	195	195
		ist	195	195
Flansch	T _Z 5 in °C	soll	200	200
		ist	200	200
Düse	T _Z 6 in °C	soll	215	210
		ist	215	210
Glättwerk	Oben in °C	soll	50	50
		ist	50	50
	Mitte in °C	soll	80	80
		ist	80	80
	Unten in °C	soll	30	30
		ist	30	30
Drehzahl in m/min	soll			
	ist	1,6	1,6	
Abzug	Drehzahl in m/min	soll		
		ist	1,62	1,62
Foliendicke in mm			0,5	0,5

A.14 Protokoll zur Folienextrusion für die Kombination N2 - R4

Probe Nr.	2.4.2.	2.4.3.	2.4.4.	2.4.5.
Spaltbreite in mm	0,5	0,5	0,5	0,5
Schmelzetemperatur in °C	214	215	215	215
Schmelzedruck in bar	78	82	93	102
Schneckendrehzahl in 1/min	100	100	110	110
Drehmoment in %				

Durchsatz in kg/h			5	5	5	5
Zylinder- heizung	Einzug	soll	185	185	185	185
	T _Z 1 in °C	ist	185	185	185	185
	T _Z 2 in °C	soll	190	190	190	190
		ist	190	191	190	190
	T _Z 3 in °C	soll	195	195	195	195
		ist	195	195	195	195
	T _Z 4 in °C	soll	195	195	195	195
		ist	195	195	195	195
Flansch	T _Z 5 in °C	soll	200	200	200	200
		ist	200	200	200	200
Düse	T _Z 6 in °C	soll	210	215	215	215
		ist	209	215	215	215
Glättwerk	Oben in °C	soll	50	50	50	50
		ist	50	50	50	50
	Mitte in °C	soll	80	80	80	80
		ist	80	80	80	80
	Unten in °C	soll	30	30	30	30
		ist	30	30	30	30
	Drehzahl in m/min	soll				
		ist	1,62	1,62	1,62	1,62
Abzug	Drehzahl in m/min	soll				
		ist	1,64	1,64	1,64	1,64
Foliendicke in mm			0,5	0,5	0,5	0,5

Literaturverzeichnis

- [1] European Commission. Directorate General for the Environment., *Ein anderer Umgang mit Kunststoffen*: Publications Office, 2018.
- [2] European Commission, *Factsheets on the European strategy for plastics in a circular economy*, 16.01.2018 von https://commission.europa.eu/publications/factsheets-european-strategy-plastics-circular-economy_en?2nd-language=fi&prefLang=de. Abgerufen: 04.03.2024.
- [3] M. Schmid, “Der Verpackungsmarkt - aktuelle Kennzahlen,” Innoform Seminar, Osnabrück, 2019.
- [4] Verpackungsgesetz, *Verpackungsgesetz - VerpackG auf dem neuesten Stand*, 12.04.2022 von <https://verpackungsgesetz-info.de/#neuequoten>. Abgerufen: 05.03.2024.
- [5] A. A. Basfar and K. M. Idriss Ali, “Natural weathering test for films of various formulations of low density polyethylene (LDPE) and linear low density polyethylene (LLDPE),” *Polymer Degradation and Stability*, vol. 91, no. 3, pp. 437–443, 2006.
- [6] S. M. Al-Salem, “Influence of natural and accelerated weathering on various formulations of linear low density polyethylene (LLDPE) films,” *Materials & Design*, vol. 30, no. 5, pp. 1729–1736, 2009.
- [7] T. Gabler, “Ettlinger: Schmelzefilter mit Mikroperforation für PET-Recycling | K-AKTUELL,” *K-AKTUELL.de*, 13.02.2019, 2019, <https://www.k-aktuell.de/technologie/ettlinger-schmelzefilter-mit-mikroperforation-fuer-pet-recycling-217111/>.
- [8] S. Luzuriaga, J. Kovářová, and I. Fortelný, “Degradation of pre-aged polymers exposed to simulated recycling: Properties and thermal stability,” *Polymer Degradation and Stability*, vol. 91, no. 6, pp. 1226–1232, 2006.
- [9] A. Jansson, K. Möller, and T. Gevert, “Degradation of post-consumer polypropylene materials exposed to simulated recycling—mechanical properties,” *Polymer Degradation and Stability*, vol. 82, no. 1, pp. 37–46, 2003.
- [10] F. Vilaplana, A. Ribes-Greus, and S. Karlsson, “Degradation of recycled high-impact polystyrene. Simulation by reprocessing and thermo-oxidation,” *Polymer Degradation and Stability*, vol. 91, no. 9, pp. 2163–2170, 2006.
- [11] G. Stehle, *Verpacken von Lebensmitteln*, 1st ed. Hamburg: Behr, 1997.
- [12] G. L. Robertson, *Food packaging: Principles and practice*, 3rd ed. Boca Raton, Fla.: CRC Press, 2013.
- [13] “Kommt jetzt die Full-PE-Verpackung?,” *K-PROFI*, no. Ausgabe 1-2, pp. 6–11, 2020.
- [14] O. Lange, “Neue Anlagenkonzepte für mehr Nachhaltigkeit,” *PLASTVERARBEITER*, 14.01.2020, 2020, <https://www.plastverarbeiter.de/verarbeitungsverfahren/neue-anlagenkonzepte-fuer-mehr-nachhaltigkeit.html>.
- [15] E. Baur, G. Harsch, and M. Moneke, *Werkstoff-Führer Kunststoffe: Eigenschaften - Prüfungen - Kennwerte*, 11th ed. München: Hanser, 2019.

- [16] J. Hopewell, R. Dvorak, and E. Kosior, “Plastics recycling: challenges and opportunities,” (eng), *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences*, vol. 364, no. 1526, pp. 2115–2126, 2009.
- [17] Kunststoffe: Nachrichten, Stellenmarkt, Produkte für die Kunststoffindustrie | Kunststoffe.de, *Werkstoffliches Recycling | Begriffsdefinition & Vorteile*, 12.03.2024 von <https://www.kunststoffe.de/a/grundlagenartikel/begriffsdefinitionen-fuer-das-werkstoffl-285262>. Abgerufen: 12.03.2024.
- [18] Conversio Market & Strategy GmbH, “Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2017,” 2018.
- [19] F. Gu, J. Guo, W. Zhang, P. A. Summers, and P. Hall, “From waste plastics to industrial raw materials: A life cycle assessment of mechanical plastic recycling practice based on a real-world case study,” (eng), *The Science of the total environment*, vol. 601-602, pp. 1192–1207, 2017.
- [20] R. Francis, *Recycling of Polymers: Methods, Characterization and Applications*. Weinheim, Germany: Wiley-VCH, 2016.
- [21] Interseroh+, *Recyclingkunststoffe*, 15.03.2024 von <https://www.interseroh.plus/recyclingkunststoffe/>. Abgerufen: 15.03.2024.
- [22] mtm plastics GmbH, *Produkte - mtm plastics GmbH*, 15.03.2024 von <https://www.mtm-plastics.eu/produkte/#purpolen>. Abgerufen: 15.03.2024.
- [23] Vogt Plastic, *Polyethylen (PE) Regranulate*, 15.03.2024 von <https://www.vogt-plastic.de/de/produktuebersicht/polyethylen-pe-regranulate.html>. Abgerufen: 15.03.2024.
- [24] RSH POLYMERE, *Rezyklate nach Verarbeitungsverfahren | RSH POLYMERE*, 15.03.2024 von <https://www.rsh-polymere.de/kopie-von-folienextrusion>. Abgerufen: 15.03.2024.
- [25] R. Balart, J. López, D. García, and M. Dolores Salvador, “Recycling of ABS and PC from electrical and electronic waste. Effect of miscibility and previous degradation on final performance of industrial blends,” *European Polymer Journal*, vol. 41, no. 9, pp. 2150–2160, 2005.
- [26] C. Meran, O. Ozturk, and M. Yuksel, “Examination of the possibility of recycling and utilizing recycled polyethylene and polypropylene,” *Materials & Design*, vol. 29, no. 3, pp. 701–705, 2008.
- [27] P. Brachet, L. T. Høydal, E. L. Hinrichsen, and F. Melum, “Modification of mechanical properties of recycled polypropylene from post-consumer containers,” (eng), *Waste Management*, vol. 28, no. 12, pp. 2456–2464, 2008.
- [28] R. Strapasson, S. C. Amico, M. Pereira, and T. Sydenstricker, “Tensile and impact behavior of polypropylene/low density polyethylene blends,” *Polymer Testing*, vol. 24, no. 4, pp. 468–473, 2005.
- [29] A. Limper, Hrsg., *Verfahrenstechnik der Thermoplastextrusion*. München: Hanser, 2013.

- [30] W. Kaiser, *Kunststoffchemie für Ingenieure: Von der Synthese bis zur Anwendung*, 5th ed. München: Hanser, 2021.
- [31] R. Dahlmann, E. Haberstroh, and G. Menges, *Menges Werkstoffkunde Kunststoffe: Rainer Dahlmann, Edmund Haberstroh, Georg Menges*, 7th ed. München: Hanser, 2019.
- [32] *DIN 1910-3:1977-09, Schweißen; Schweißen von Kunststoffen, Verfahren*.
- [33] DVS, Ausschuss für Technik, Arbeitsgruppe "Fügen von Kunststoffen", "Richtlinie DVS 2219-2: Thermokontaktschweißen von thermoplastischen Folien (Polyolefine)," in *Fachbuchreihe Schweißtechnik, Taschenbuch DVS-Merkblätter und -Richtlinien: Fügen von Kunststoffen*, DVS Media GmbH, Ed., 20th ed., Düsseldorf: DVS Media GmbH, 2024, pp. 1087–1092.
- [34] G. W. Ehrenstein and G. Ahlers-Hestermann, Hrsg., *Handbuch Kunststoff-Verbindungstechnik*. München: Hanser, 2004.
- [35] DVS, Ausschuss für Technik, Arbeitsgruppe "Fügen von Kunststoffen", "Richtlinie DVS 2216-1: Ultraschallfügen von Formteilen und Halbzeugen aus thermoplastischen Kunststoffen in der Serienfertigung - Prozessbeschreibung, Maschinen und Geräte, Einflussgrößen, Konstruktion, Qualitätssicherung," in *Fachbuchreihe Schweißtechnik, Taschenbuch DVS-Merkblätter und -Richtlinien: Fügen von Kunststoffen*, DVS Media GmbH, Ed., 20th ed., Düsseldorf: DVS Media GmbH, 2024, pp. 894–935.
- [36] U. Dilthey and A. Brandenburg, Hrsg., *Montage hybrider Mikrosysteme: Handhabungs- und Fügetechniken für die Klein- und Mittelserienfertigung*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2005.
- [37] *DIN EN ISO 527-3:2019-02, Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften - Teil_3: Prüfbedingungen für Folien und Tafeln (ISO_527-3:2018); Deutsche Fassung EN_ISO_527-3:2018*.
- [38] *DIN 55529:2012-09, Verpackung - Bestimmung der Siegelnahtfestigkeit von Siegelungen aus flexiblen Packstoffen*.
- [39] J. B. Guinée, G. Huppes, and R. Heijungs, "Developing an LCA guide for decision support," *Environmental Management and Health*, vol. 12, pp. 301–311, 2001.
- [40] H. Domininghaus, *Die Kunststoffe und ihre Eigenschaften*, 2nd ed. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1986.
- [41] H. Potente, *Fügen von Kunststoffen: Grundlagen, Verfahren, Anwendung*. München: Hanser, 2004.
- [42] G. Kaiser, S. Schmölzer, C. Straßer, S. Pohland, and T. Seher, *Handbook DSC*. Selb: Netusch-Gerätebau GmbH, 2015.
- [43] D. Nagy and K. Belina, "Measuring viscosity of polyethylene blends using a rotational rheometer," *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 1045, p. 12030, 2018.
- [44] *PPWR - Proposal for a REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL on packaging and packaging waste, amending Regulation*

*(EU) 2019/1020 and Directive (EU) 2019/904, and repealing Directive 94/62/EC:
PPWR, 2022.*