

*Abschlussbericht* | November 2022

# DiLinK

## Digitale Lösungen für Kunststoffkreisläufe

BMBF-Fördermaßnahme

„Ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft –  
Innovative Produktkreisläufe“

---

*Förderkennzeichen 033R235*

*Projektlaufzeit: 01.06.2019 - 31.05.2022*



Dieser Bericht ist Ergebnis des Projektes „Di-Link – Digitale Lösungen für Industrielle Kunststoffkreisläufe“.

Das diesem Bericht zugrunde liegende Forschungsvorhaben wurde im Auftrag des Bundesministerium für Bildung und Forschung durchgeführt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

**Bitte den Bericht folgendermaßen zitieren:**

Wuppertal Institut (2022). Di-Link – Digitale Lösungen für Industrielle Kunststoffkreisläufe.

**Projektlaufzeit:** Juni 2019 – Mai 2022

**Projektkoordination:**

Dr. Holger Berg  
Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH  
Döppersberg 19, 42103 Wuppertal  
holger.berg@wupperinst.org

**Projektpartner:**

SKZ – KFE gGmbH, Würzburg  
Forschungsinstitut für Rationalisierung (FIR) e.V. an der RWTH Aachen, Aachen  
Infosim GmbH & Co. KG, Würzburg  
Hoffmann + Voss Technische Kunststoffe GmbH, Viersen  
MKV GmbH Kunststoffgranulate, Kelkheim

---

**Impressum**

**Herausgeberin:**

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH  
Döppersberg 19  
42103 Wuppertal  
www.wupperinst.org

**Ansprechperson:**

Dr. Holger Berg





## Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>4</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>7</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>8</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>11</b>
<b>2 Arbeitspaket 1 – Bestimmung der Ist-Situation</b>	<b>13</b>
2.1 Hemmnisse und Herausforderungen	13
2.1.1 <i>Ergebnisse der Interviews</i>	13
2.1.2 <i>Recompoudeure</i>	14
2.1.3 <i>Kunststoffverarbeitende Unternehmen und                   Qualitätsmanagementauditoren</i>	14
2.1.4 <i>Umweltministerien und Abfallwirtschaftsbehörden:</i>	15
2.1.5 <i>Lasten- und Pflichtenheft</i>	16
2.2 Ermittlung eines Modells zur Darstellung der Wirk- und Austauschbeziehungen aller relevanten Akteure der industriellen Kunststoffindustrie	18
<b>3 Arbeitspaket 2.1 – Entwicklung innovativer Prozessmesstechnik</b>	<b>20</b>
3.1 Online-Schlagfähigkeitsmessung am Strang	20
3.1.1 <i>Grundlagen und Versuchsplanung</i>	20
3.1.2 <i>Durchführung erster Versuchsblock und Ergebnisse</i>	20
3.1.3 <i>Durchführung zweiter Versuchsblock und Ergebnisse</i>	25
3.2 Inline-Spektroskopiemessung	30
3.2.1 <i>Grundlagen und Versuchsplanung</i>	30
3.2.2 <i>Durchführung erster Versuchsblock und Ergebnisse</i>	33
3.2.3 <i>Durchführung zweiter Versuchsblock und Ergebnisse</i>	36
<b>4 Arbeitspaket 2.2 – F&amp;E zu einer digitalen Applikation</b>	<b>44</b>
4.1 Der Wissensbereich	44
4.1.1 <i>CO<sub>2</sub>-Kennwerttabelle</i>	47
4.1.2 <i>Anwendungsbeispiele</i>	48
4.2 Kennwerttabelle als Basis für den Produktpass	49
4.3 Erstellung einer digitalen Applikation	51
4.3.1 <i>Anforderungen und Spezifikationen</i>	51
4.3.2 <i>Demonstrator</i>	52
4.3.3 <i>Backend</i>	52
4.3.4 <i>Intelligente Datenverarbeitung</i>	54
4.3.5 <i>Schnittstelle</i>	54
4.3.6 <i>Frontend</i>	54
<b>5 Arbeitspaket 2.3 – Konzeption eines Wertschöpfungsnetzwerks</b>	<b>56</b>

---

<b>6</b>	<b>Arbeitspaket 3.1 – Erprobung und Optimierung</b>	<b>68</b>
6.1	Software zur Ausgabe der Messergebnisse an die DiLink Applikation	68
6.2	Praxistest bei Hoffmann + Voss GmbH	68
6.3	Praxistest bei MKV GmbH	72
6.4	Umfrage unter Industrieakteuren zur Kennwerttabelle	76
6.5	Veröffentlichungen	77
6.6	Weiterentwicklung der digitalen Applikation	77
<b>7</b>	<b>Arbeitspaket 3.2 – Nachhaltigkeitsbewertung</b>	<b>81</b>
7.1	Theorie, Methodik und Vorgehen	81
7.1.1	<i>Input, Output, Outcome, Impact</i>	81
7.1.2	<i>Wirkketten</i>	82
7.1.3	<i>Rebound Effekte</i>	83
7.2	Ergebnisse	83
7.2.1	<i>Instrumente</i>	83
7.2.2	<i>Nutzergruppen</i>	83
7.2.3	<i>Anwendungsfälle</i>	84
7.2.4	<i>Wirkketten</i>	86
7.2.5	<i>Rebound – Effekte</i>	94
7.2.6	<i>Mögliche Mitigationsmaßnahmen</i>	96
7.3	Diskussion	97
<b>8</b>	<b>Arbeitspaket 4 – Aktivierung und Dissemination der Ergebnisse</b>	<b>100</b>
8.1	Transfermaterialien	100
8.2	Trainingskonzepte	101
8.3	Transferworkshops für Unternehmen und Multiplikatoren	102
<b>9</b>	<b>Arbeitspaket 5 – Kommunikation</b>	<b>106</b>
9.1	Website	106
9.2	Flyer	106
9.3	Social Media	107
9.4	Berichterstattung und Veranstaltungen zu DiLink	108
9.5	Publikationen	109
9.6	Einfluss der Corona-Pandemie	109
9.7	Reziprok	109
<b>10</b>	<b>Arbeitspaket 6 – Projektmanagement</b>	<b>110</b>
<b>11</b>	<b>Anhang</b>	<b>112</b>
11.1	Interviewleitfaden Kunststoffverarbeiter / Compoundeure	112
11.2	Anhang zum Stauts-Quo Wertschöpfungssystem	117
11.3	Veröffentlichungen	124
11.3.1	<i>„Kein Kreislauf von Kunststoffen ohne Digitalisierung“</i>	124
11.3.2	<i>Di-Link Policy Brief I</i>	128
11.3.3	<i>Di-Link Policy Brief II</i>	132
11.3.4	<i>Flyer 1</i>	135



## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Hemmnisse und Herausforderungen der Kreislaufführung von Kunststoffen verschiedener Akteure der Kunststoffwertschöpfungskette -----	15
Tabelle 2	Gegenüberstellung der Lasten und Pflichten zur Entwicklung der digitalen Lösung -----	17
Tabelle 3:	Austauschbeziehungen im Status Quo der Kunststoffindustrie – Rs = Rohstof, Nk= Neukunststoff, Rz= Rezyklate, KA = Kunststoffabfall -----	19
Tabelle 4	PC-Compounds von Hoffmann + Voss -----	37
Tabelle 5	Kurzbeschreibung des Wissensbereichs für Kunststoffverarbeiter -----	45
Tabelle 6	Kurzbeschreibung des Wissensbereichs für Abfallgeber -----	46
Tabelle 7	Kurzbeschreibung des Wissensbereichs für Recycler -----	46
Tabelle 8	Kurzbeschreibung des Wissensbereichs für Best Practice -----	46
Tabelle 9	Kurzbeschreibung des Wissensbereichs für den Glossar -----	47
Tabelle 10	Auszug aus der CO <sub>2</sub> -Kennwerttabelle -----	48
Tabelle 11	Materialspezifische Kennwerte für PA in der Automobilanwendung (SKZ interne Berechnungen)-----	49
Tabelle 12	Materialspezifische Kennwerte für PA und PBT in E&E Anwendungen (SKZ interne Berechnungen)-----	49
Tabelle 13	Auszug der DiLinK Kennwerttabelle für mechanische Eigenschaften -----	50
Tabelle 14	Kombinationsmöglichkeiten von Instrumenten und Nutzergruppen -----	84
Tabelle 15	Anwendungsfälle zu den jeweiligen Instrument-Nutzergruppen-Kombinationen--	85
Tabelle 16	Relevanz der Rebound-Effekte für jeweiligen Anwendungsfall-----	96
Tabelle 17	Kurstermine für das Modul multivariate Datenanalyse (Inline-Spektroskopie)---	102

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Versuchsaufbau bestehend aus Extruder, Kühlstrecke und Messvorrichtung ----	21
Abbildung 2	Messaufbau bestehend aus Strangtemperatur- und -durchmessermessung sowie einem umgebauten Stranggranulator zur Online-Schlagzähigkeitsmessung -----	22
Abbildung 3	Messverlauf der Online-Schlagzähigkeitsmessung über die Versuchsdauer. Für die Auswertung werden die gemittelten Werte betrachtet. Lediglich bei der Zugabe von Neuware sowie der Zugabe von zusätzlichem Mahlgut zeigt sich eine nennenswerte Änderung.-----	23
Abbildung 4	Auftragung der aufgezeichneten Prozessparameter über die Versuchsdauer. Die Zugabe der zusätzlichen Materialien (Neuware und Mahlgut) zeigen sich deutlich im Strangdurchmesser/-temperatur und der Drehzahl des Granulators. -----	24
Abbildung 5	Auftragung der online gemessenen Werte über die Charpy-Schlagzähigkeitswerte laut Norm für alle Materialproben. Es lässt sich kein Zusammenhang zwischen beiden Messgrößen erkennen. Da jedoch innerhalb der Normprüfung keine Änderungen zu erkennen sind, kann davon ausgegangen werden, dass keine Schwankungen in den Materialeigenschaften vorliegen. Dies deckt sich mit den Ergebnissen aus Abbildung 3. -----	25
Abbildung 6	Versuchsaufbau mit Einschnecken-Extruder KME30 und Wasserbad. Anschließend befindet sich der Messaufbau. -----	27
Abbildung 7	Messaufbau zur Online-Charakterisierung des Strangs hinsichtlich Schlagzähigkeit, Strangtemperatur und Strangdurchmesser. -----	28
Abbildung 8	Über die Versuchsdauer gemessene Strangtemperatur (links) und Strangdurchmesser (rechts). Die sehr geringen Abweichungen (in °C und mm) zeigen auf, dass der Prozess bzw. die Prüfbedingungen relativ konstant gehalten werden konnten-----	29
Abbildung 9	Ergebnisse der Drehmomentmessungen am Granulator für die jeweiligen Materialsysteme (PC-ABS mit 5, 20 und 30 Gew.-% Faseranteil links sowie PA6 ohne und mit 15 Gew.-Faseranteil rechts). Die laut Herstellerangaben genannten Kerbschlagzähigkeiten (KS) und Schlagzähigkeiten (Schlag) sind jeweils über den Balken angegeben und dienen als Referenzwert. -----	30
Abbildung 10	Schematischer Aufbau der Intarema 906 TE. 1: Materialeinzug, 2: Preconditioning Unit, 3: Extruder, 4: Entgasung, 5: Schmelzefilter, 6: Granulierung (Quelle: EREMA)-----	32
Abbildung 11	Neue NIR-Prozess-Reflexionsmesssonde der Fa. ColVisTec-----	33
Abbildung 12	Einbau der NIR-Prozesssonde nach Schmelzefilter der Intarema 906 TE -----	34
Abbildung 13	Score-Plot (oben) und Loadings (unten) der Versuchsreihe mit NIR-Spektroskopie an der Intarema 906 TE.-----	36
Abbildung 14	Aufbau Inline-Spektroskopie mit NIR-Prozess-Reflexionsmesssonde von ColVisTec und AddiCheck-Spektrometer von Göttfert-----	37
Abbildung 15	Vergleich der gemessenen Dunkelströme bei unterschiedlichen Temperaturen -	38
Abbildung 16	Beispielspektren der Muster 1 und 4 bei verschiedenen Durchläufen (DL) durch den Extruder sowie Vergleichsspektren der verwendeten Additive -----	39
Abbildung 17	Scores- und Loadings-Plot der PCA von Muster 3 bei verschiedenen Durchläufen -----	40
Abbildung 18	Scores- und Loadings-Plot der PCA aller Muster beim ersten Durchlauf-----	41
Abbildung 19	Scores und Loadings-Plot der PCA aller Muster beim zweiten Durchlauf -----	41
Abbildung 20	OIT-Messung der Muster nach erstem Durchlauf im Extruder-----	42
Abbildung 21	OIT-Messung von Muster 1 und 4 nach zweitem Extruderdurchlauf, jeweils getrocknet und feucht -----	43
Abbildung 22	Abhängigkeiten und Beziehungen zwischen einzelnen Pässen und Bestandteile zusammengesetzter Pässe -----	53

Abbildung 23	Hemmnisse der aktuellen Kreislaufwirtschaft gegenübergestellt mit Lösungsansätzen als Input für das Ecosystem Design-----	56
Abbildung 24	Visualisierung des Business Ecosystem der Kunststoffindustrie im Status Quo und aktuelle Herausforderungen -----	57
Abbildung 25	Die aus vier Phasen bestehende Methode der Business Ecosystem Analysis----	58
Abbildung 26	Soll-Business Ecosystem des Kunststoffkreislaufs inkl. neuer Akteure und Austauschbeziehungen -----	59
Abbildung 27	Komplexes Business Ecosystem des Kunststoffkreislaufs. Darstellung über KuMu -----	60
Abbildung 28	Beschreibung der neuen Rolle: Digitale Material-Informationen-Plattform -----	61
Abbildung 29	Neugestaltetes Wertstromsystem unter Integration der Di-Link Lösung-----	62
Abbildung 30	Fragestellungen bei der Entwicklung von neuen Geschäftsmodellen -----	63
Abbildung 31	Agenda der Workshops am Beispiel des Workshops mit dem SKZ-----	63
Abbildung 32	Beispiel für die Analyse des Business Ecosystems Phase 2. des SKZ. Inkl. Ersetzbarkeitsbewertung, Kooperationsanalyse und Unternehmenszuordnung--	64
Abbildung 33	Beispiel für einen Vergleich der Kreisersetzbarkeitsanalyse, die für Infosim und Hoffmann & Voss durchgeführt wurde. -----	65
Abbildung 34	St.Galler Business Model Navigator (GASSMANN U. FRANKENBERGER 2013) -----	65
Abbildung 35	Beispiel für ein potenzielles Geschäftsmodell für die Qualitätsmesstechnik/SKZ anhand des St. Galler Business Modells-----	66
Abbildung 36	Versuchsaufbau des Praxistests bei Hoffmann + Voss. a) ZSK 50 mit offener Düse, b) Zoom auf offene Düse mit eingebauter NIR-Sonde, c) Seitenansicht der geschlossenen Düse im laufenden Betrieb mit NIR-Sonde, d) Kühlstrecke für Schmelzestränge mit Granulator am Ende -----	69
Abbildung 37	Mit Python-Software ermittelter zeitlicher Verlauf des Abstands zum Referenzsignal der Versuche mit PC natur bei Hoffmann + Voss -----	70
Abbildung 38	PCA-Scores aus den Spektren mit PC natur als Referenz (links) und zugehörige Loadings (rechts)-----	71
Abbildung 39	PCA-Scores aus den Spektren von PC/ABS mit PC natur als Referenz (links) und zugehörige Loadings (rechts) -----	71
Abbildung 40	PCA-Scores aus den Spektren mit PC weiß als Referenz (links) und zugehörige Loadings (rechts) für PC-1 und PC-4 -----	72
Abbildung 41	Versuchsaufbau mit NIR-Sonde für Praxistest bei MKV -----	73
Abbildung 42	Mit Python-Software ermittelter zeitlicher Abstand zum Referenzsignal der Versuche mit PA6 bei MKV -----	74
Abbildung 43	Beispielspektren von PA6 natur, schwarz und mit Schlagzähmodifikator (links) sowie Ableitung der Spektren (rechts) -----	75
Abbildung 44	PCA-Scores aus den Spektren von PA6 natur, schwarz und mit Schlagzähmodifikator (links) und zugehörige Loadings (rechts) -----	75
Abbildung 45	Eindruck eines Ausschnitts aus der Produktpass-Erstellung-----	78
Abbildung 46	Eindruck eines Ausschnitts aus der Übersicht zu Produktpässen -----	79
Abbildung 47	Gesetzliche Rahmenbedingungen für Kunststoffverarbeiter bei digitalen Produktpässen -----	80
Abbildung 48	Aufwand vs. Nutzen Diagramm der genannten Instrumente und Anwendungsfälle 98	
Abbildung 49	Titelbild der DiLink Projektbroschüre -----	100
Abbildung 50	Ausschnitt Wissensbereich aus der DiLink Applikation; Kategorie „Gesetzliche Rahmenbedingungen“ -----	101

Abbildung 51 O. Stübs im Austausch mit Tagungs-Teilnehmer/-innen -----	103
Abbildung 52 Impressionen des DiLinK Workshops und Rundgang durch die SKZ Technika während des Arbeitskreistreffen des KNF -----	104
Abbildung 53 Präsentation der DiLinK Projektergebnisse während der Abschlussveranstaltung 105	
Abbildung 54 Screenshot der Di-Link Website-----	106
Abbildung 55 Screenshot eines Social-Media Posts zu den Filmaufnahmen am SKZ.-----	107
Abbildung 56 Screenshot eines Social Media Posts zum Abschlussworkshop von DiLinK ----	108



## 1 Einleitung

Im Folgenden findet sich der Abschlussbericht zu dem Projekt DiLink – Digitale Lösungen für industrielle Kunststoffkreisläufe“ mit dem Förderkennzeichen 033R235A. Das Projekt wurde durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördert, die Arbeiten zum Projekt fanden im Zeitraum zwischen dem 01.06.2019 und dem 31.05.2022 statt. Das Projektkonsortium bestand aus den folgenden Projektpartnern

- Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH
- SKZ – KFE gGmbH
- Forschungsinstitut für Rationalisierung (FIR) e.V. an der RWTH Aachen
- Infosim GmbH & Co. KG
- MKV GmbH Kunststoffgranulate
- HOFFMANN + VOSS Technische Kunststoffe GmbH

Ziel des Projektes war es eine ressourceneffiziente Kreislauschließung in der Kunststoffwirtschaft durch verschiedene digitale Software und Sensorlösungen zu ermöglichen.

Das Projekt war in folgende Arbeitspakete gegliedert:

- Arbeitspaket 1 - Bestimmung der Ist-Situation
  - Genaue Charakterisierung der Probleme und Bedarfe der Kunststoffbranche im Hinblick auf Recycling, dies diente als Grundlage für die weitere Projektarbeit.
- Arbeitspaket 2.1 - Entwicklung innovativer Prozessmesstechnik
  - Entwicklung von Messtechnik, die schon während des Herstellungsprozesses die Qualität der Recyclingkunststoffes überwacht und sicherstellt
- Arbeitspaket 2.2 - F&E zu einer digitalen Applikation
  - Entwicklung einer Softwareapplikation zum Austausch von Qualitäts- und anderen kunststoffbezogenen Daten zwischen den Akteuren der Wertschöpfungskette.
- Arbeitspaket 2.3 - Konzeption eines Wertschöpfungsnetzwerkes
  - Entwerfen eines Wertschöpfungsnetzwerkes der Kunststoffindustrie, das digitale Technologien berücksichtigt.
- Arbeitspaket 3.1 – Erprobung und Optimierung
  - Erprobung der in den Arbeitspaketen 2.1 bis 2.3 entwickelten Technologien und Lösungen im realen Betrieb und darauffolgende Optimierung.
- Arbeitspaket 3.1 – Nachhaltigkeitsbewertung
  - Bewertung des Beitrags der entwickelten Technologien zur Nachhaltigkeit in der Kunststoffindustrie
- Arbeitspaket 4 – Aktivierung und Dissemination der Ergebnisse
  - Transfer der Erkenntnisse und Lösungen in die Kunststoffindustrie.

- Arbeitspaket 5 – Kommunikation
  - Kommunikation zu Projekthinhalten an die interessierte Öffentlichkeit.
- Arbeitspaket 6 – Projektmanagement
  - Internes Projektmanagement.

Die Projekt-Ergebnisse werden im Folgenden, gegliedert in diese Arbeitspakete, vorgestellt.

## 2 Arbeitspaket 1 – Bestimmung der Ist-Situation

Arbeitspaket 1 „Bestimmung der Ist-Situation“ diente dazu, die Probleme und Hürden in der Kunststoffwertschöpfungskette genauer zu charakterisieren. Die Ausgangslage der verschiedenen Akteure wurde hierzu in Interviews und Vor-Ort Begehungen evaluiert und ihre Bedarfe ermittelt. Die in den Interviews gewonnenen Informationen wurden durch eine begleitende Recherche vervollständigt und im Hinblick auf zwei Hauptfragestellungen aufgearbeitet:

- 1) Was sind die Hemmnisse und Herausforderungen für das Kunststoffrecycling aus Sicht der beteiligten Marktakteure. Wo sehen sie Handlungsbedarf und Handlungsmöglichkeiten und welche Aktionen, Informationen und Rahmenbedingungen sind dafür notwendig.
- 2) Wie sehen die Wirk- und Austauschbeziehungen der beteiligten Akteure aus.

Auf Grundlage der so gewonnen Ergebnisse wurden ein Lasten-/Pflichtenheft erstellt, dass als Basis für die weiteren Arbeiten in den folgenden Arbeitspaketen diene.

Die Ergebnisse werden in den folgenden Sektionen vorgestellt:

### 2.1 Hemmnisse und Herausforderungen

#### 2.1.1 Ergebnisse der Interviews

Die Interviews legten dabei folgende thematische Schwerpunkte:

- Wie wird mit Kunststoffabfällen umgegangen?
- Wie verbreitet ist der Einsatz von Rezyklaten in den Unternehmen (im Vergleich zu Primärmaterial)?
- Wo sind / werden die größten Probleme / Hindernisse bzgl. Mehr Rezyklatverwertung gesehen?
- Besteht die Bereitschaft, herkömmliche Handlungsweisen zu verändern (z.B. Daten auszutauschen)?

Es wurden verschiedene Akteursgruppen interviewt:

- Kunststoffverarbeiter
- Kunststoffrecycler
- Auditoren
- Behörden
- Unternehmen mit Kunststoffabfällen

Die Interviews wurden semistrukturiert anhand eines Interviewleitfadens durchgeführt. Ein beispielhafter Interviewleitfaden kann im Anhang gefunden werden.

Zusammenfassend haben sich folgende Ergebnisse herauskristallisiert, vergleiche auch Tabelle 1.

### 2.1.2 Recompoundeure

Aus Sicht der Recompoundeure sind die größten Hindernisse beim Bezug ihrer Rohstoffe: Sortenreinheit, Störfaktoren in den Fraktionen wie Softlacke und Lackierungen, mangelndes Kunststoff-Know-how bei Mahlbetrieben und Händlern sowie unsteilige Verfügbarkeiten von Mengen und Kunststofftypen. Als Haupthindernis beim Verkauf ihrer Produkte hingegen nannten die Recompoundeure, dass immer noch große Vorbehalte gegenüber ihren Produkten bestehen. Dies bezieht sich vor allem auf den Geruch und die Verarbeitung. Ein weiteres Hindernis beim Verkauf ihrer Produkte sehen die Recompoundeure im Bereich der Kundenanforderungen. Diese seien vor allem im Automobilbereich überzogen, was den Einsatz von Sekundärkunststoffen verhindert.

Stimme eines Recompoundeurs:

Was sind die größten Hindernisse beim Bezug von nutzbaren Abfällen?

*„Weiterhin bestehen Probleme in der Sortiergenauigkeit. Wenn da Unternehmen dauerhaft schlecht sind, werden Geschäftsbeziehungen abgebrochen, je größer der Laden desto schlimmer...mittelständische Unternehmen haben mehr Bewusstsein“*

### 2.1.3 Kunststoffverarbeitende Unternehmen und Qualitätsmanagementauditoren

Laut Kunststoffverarbeitern und Qualitätsmanagementauditoren sind mangelndes Vertrauen in Recompoundeure, zu strenge Kundenanforderungen, die geringe Preisdifferenz von Rezyklat zu Neuware sowie das schlechte Image von Rezyklaten die Haupthindernisse für deren Wiedereinsatz. Jedoch beziehen Kunststoffverarbeiter nicht nur Rohstoffe, sondern sie fungieren auch als Rohstofflieferanten für Wiederaufbereiter, an die sie ihre Kunststoffabfälle häufig verkaufen. Die größten Herausforderungen sind hier bei innerbetrieblichen Prozessen des Abfallmanagements zu finden. Oft mangle es an dem nötigen Bewusstsein der Mitarbeiter/-innen, Kunststoffabfälle ordentlich zu trennen. Aber auch Zeitdruck in der Produktion, zu wenig Abfallbehälter oder deren unzureichende Beschriftung erweisen sich als Hindernisse einer sortenreinen Trennung von Kunststoffabfällen. Zudem wurde die zu geringe Vergütung sortenreiner Abfälle genannt, welche oft nicht einmal die Kosten deckt.

Stimme aus einem Verarbeitenden Unternehmen:

*„Abfalltrennung geht ins eine Ohr rein und beim Anderen wieder heraus. Die Sensibilisierung der Mitarbeiter bzgl. Des Abfallmanagements ist extrem wichtig. Da ist noch viel Luft nach oben“*

Stimme eines Auditors:

Spüren sie steigende Anforderungen der Unternehmenskunden hinsichtlich der Digitalisierung, werden z.B. mehr Datentransparenz oder eine schnellere Abwicklung gefordert?

*„Ja auf jeden Fall (v.a. Datentransparenz und Datendichte); Kunde gibt das an den Lieferanten weiter; Unternehmen müssen darauf reagieren, sonst verlieren sie den Anschluss an ihre Mitbewerber.“*

### 2.1.4 Umweltministerien und Abfallwirtschaftsbehörden:

Die befragten Vertreter/-innen von Umweltministerien und Abfallwirtschaftsbehörden kritisieren vor allem die enorme Vielfalt an Kunststoffen, Zusatzstoffen und Verbänden, die eine sortenreine Sortierung schwierig mache. Darüber hinaus würde dem „Design for Recycling“ in der Praxis viel zu wenig Beachtung geschenkt. Nicht vorhandene Qualitätsanforderungen an Rezyklate, unzureichende Unterstützung von Seiten des Staates sowie fehlende Maßnahmen für die Stabilisierung des Sekundärkunststoffmarkts seien Gründe, warum der Kunststoffkreislauf noch nicht geschlossen ist. Eine Abfallwirtschaftsbehörde verwies auch auf die aktuelle gesetzliche Lage. So seien gesetzliche Auflagen entweder häufig viel zu milde oder zu realitätsfern.

Stimme aus den Ministerien und Behörden zur Digitalisierung:  
*„Wichtige Frage ist immer: Nur theoretisch sinnvoll oder auch praktisch umsetzbar.“*

Aus den Erkenntnissen der Interviews konnte die Ausgangssituation in der Kunststoffwertschöpfungskette abgeleitet sowie Hemmnisse und Herausforderungen identifiziert werden, die zirkuläres Wirtschaften erschweren. Nachfolgend sind die Ergebnisse der Interviews in Tabelle 1 zusammengefasst:

**Tabelle 1 Hemmnisse und Herausforderungen der Kreislaufführung von Kunststoffen verschiedener Akteure der Kunststoffwertschöpfungskette**

Hemmnisse und Herausforderungen der Kreislaufführung von Kunststoffen aus Sicht der Recompoundeure	
Beim Bezug ihrer Rohstoffe	
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Mangelnde Sortenreinheit / Ungewissheit bezüglich Sortenreinheit</li> <li>■ Störfaktoren in den Fraktionen wie Softlacke und Lackierungen</li> <li>■ Mangelndes Kunststoff-Know-how bei Mahlbetrieben und Händlern („Schrotthändler“)</li> <li>■ Unstetige Verfügbarkeit von Mengen und Kunststofftypen</li> </ul>	
Beim Verkauf ihrer Produkte	
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Große Vorbehalte gegenüber Recompounds von Seiten der Kunststoffverarbeiter („konservative Spritzgießer“)</li> <li>■ Oft überzogene Kundenanforderungen v.a. im Automobilbereich und bei Nichtsicht-Teilen</li> </ul>	
Hemmnisse und Herausforderungen der Kreislaufführung von Kunststoffen aus Sicht der Kunststoffverarbeiter und Qualitätsmanagementauditoren	
Beim (potenziellen) Einsatz von Sekundärkunststoff	
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Mangelndes Vertrauen in Recompoundeure</li> <li>■ Zu strenge Kundenanforderungen</li> <li>■ Geringe Preisdifferenz zwischen Rezyklat und Neuware</li> <li>■ Schlechtes Image von Rezyklaten</li> </ul>	

#### Beim Verkauf ihrer Kunststoffabfälle (v.a. Anfahr- und Fehlteile)

- Große Vorbehalte gegenüber Recompounds von Seiten der Kunststoffverarbeiter („konservative Spritzgießer“)
- Oft überzogene Kundenanforderungen v.a. im Automobilbereich und bei Nichtsicht-Teilen

#### Hemmnisse und Herausforderungen der Kreislaufführung von Kunststoffen aus Sicht von den befragten Umweltministerien und Abfallwirtschaftsbehörden

- Enorme Vielfalt an Kunststoffen, Zusatzstoffen und Verbunden (Sortierung schwierig)
- „Design for Recycling“ findet in der Praxis zu wenig Beachtung und Anwendung
- Nicht vorhandene Qualitätsanforderungen an Rezyklate
- Unzureichende Unterstützung des Staates (z.B. durch Gesetze)
- Fehlende Maßnahmen für die Stabilisierung des Sekundärkunststoffmarktes

Die hier dargestellten Ergebnisse wurden auch in zwei Veröffentlichungen an die Öffentlichkeit kommuniziert. Zum einen an die Unternehmen in dem Artikel „Kein Kreislauf von Kunststoffen ohne Digitalisierung“ in der K-Zeitung. Zum anderen für interessierte aus der Politik in dem Policy Brief „Stärkung des Kunststoffrecyclings – Lessons learned aus Recherche und Unternehmensbefragung“. Beide Veröffentlichungen finden sich im Anhang.

#### 2.1.5 Lasten- und Pflichtenheft

Aufbauend auf den Ergebnissen der Interviews wurden Lasten- und Pflichten abgeleitet und konkrete Anforderungen zur Entwicklung der digitalen Lösung erarbeitet. Dabei wurden im Einzelnen zunächst folgende Lasten und Pflichten identifiziert, die übersichtlich in Tabelle 2 dargestellt sind:

**Tabelle 2 Gegenüberstellung der Lasten und Pflichten zur Entwicklung der digitalen Lösung**

Lasten	Pflichten
<p>Unternehmen hinsichtlich ihres innerbetrieblichen Abfallmanagements unterstützen:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Informationen bereitstellen</li> <li>▪ Bewusstsein für sortenreines Trennen schaffen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Erstellung von Video-Tutorials, die Informationen leicht verständlich aufbereiten und Mitarbeiter/innen an den Anlagen bzgl. Sortenreiner Trennung sensibilisieren</li> <li>▪ Verschiedene Optionen an Behälter- und Sortiersystemen aufzeigen</li> <li>▪ „Best-Practice-Richtlinie“ für die Sammlung und Sortierung von Kunststoffabfällen (kurz und übersichtlich). Worauf kommt es an? Was ist wichtig? Was darf auf keinen Fall passieren?</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Sortenreinheit der Kunststoffabfälle bestätigen / garantieren</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Maximale Verunreinigung und Vermischungen angeben in %</li> <li>▪ Zertifizierte Sortenreinheit / Garantierte Sortenreinheit durch unabhängige Dritte (Out of Scope)</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Kunststoffverarbeiter „motivieren“ mehr Rezyklat einzusetzen und Aufklärung der (potenziellen!) Sekundärkunststoffverarbeiter</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Fundierte Studien einpflegen, die thermische und mechanische Eigenschaften von Sekundärkunststoffen quantifizieren (z.B. MFR, Schlagzähigkeit, etc.) und in Relation zu Neeware setzen („Wie gut oder schlecht sind recycelte Kunststoffe wirklich?“)</li> <li>▪ Erfahrungsberichte von Verarbeitern, die bereits erfolgreich Sekundärkunststoffe einsetzen („Vorbilder“)</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Vorgeschaltete Qualitätskontrolle / Qualitätsstandards von Rezyklaten festsetzen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Nachweis bzgl. Sortenreinheit und Vermischungen</li> <li>▪ Ausgewählte Laborprüfungen / „Qualitätsparameter“, die mindestens vorliegen müssen, um Produkt zu handeln</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Carbon Footprints der gehandelten Materialien</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ LCA-Datensätze hinterlegen (z.B. PlasticsEurope, ELCD-Datenbank)</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Informationsdefizite und -brüche in der Kunststoffwertschöpfungskette beseitigen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Digitale Materialakte, die entlang der Wertschöpfungskette weitergegeben wird</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Kundenpflege und Beratung bzgl. Materialauswahl und Verarbeitungsbedingungen</li> </ul>	<p>Beratungstool (Out of Scope)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Anwendungskategorie</li> <li>▪ Verarbeitung: Range / Wertebereich angeben</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Bestimmung der Qualität des Recompounds während des Produktionsprozesses</li> </ul>	<p>Innovative Prozessmesstechnik:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Online-Schlagzähigkeitsmessung</li> <li>▪ Inline-Spektroskopie Verfahren</li> </ul>

Die Umsetzung des vorherig beschriebenen Pflichtenhefts erfolgte größtenteils in drei Teilbereichen:

- Die DiLinK Applikation mit dem digitalen Produktpass, der relevante Material- und Qualitätskennwerte übermittelt,

- der Wissensbereich als Teil der DiLinK Applikation, der Know-how über die Rezyklataufbereitung und -verarbeitung bereitstellt und
- praktische Versuche zu Online-Schlagzähigkeit und Inline-Spektroskopie während des Recompounding.

## 2.2 Ermittlung eines Modells zur Darstellung der Wirk- und Austauschbeziehungen aller relevanten Akteure der industriellen Kunststoffindustrie

Das entwickelte Modell der Wirk- und Austauschbeziehungen basierte auf den Arbeitsergebnissen der semistrukturierte Experteninterviews.

Die Interviews wurden analysiert und aktuelle Wirk- und Austauschbeziehungen, sowie Herausforderungen im Status Quo identifiziert. Basierend auf einer umfassenden ergänzenden Recherche und auf der Analyse der durchgeführten Interviews wurden die Wirk- und Austauschbeziehungen systematisch und akteurspezifisch dokumentiert (vgl. Tabelle 3). Als relevante und aktive Akteure in dem Wertschöpfungsnetzwerk konnten *Rohstofflieferant, Rohstoffverarbeiter, Kunststoffhersteller, (Granulat-) Zwischenhändler, Kunststoffverarbeiter (1. Grades (Großunternehmen), 2. Grades (Großunternehmen), 1. Grades (KMU), 2. Grades (KMU)), Kunststoffplattformen, Recycler / Re-Compouneur, Abfallvorbereiter / Mahlbetrieb, Monteure, Endkunden, Abfalldeponien, Abfallexporteure und Verbrennungsanlagen* identifiziert werden. Des Weiteren existieren die Akteure *Standardisierung, Auditor* und *Recht*, welche überwiegend regulierend in den Markt eingreifen und nicht in materiellen Austauschbeziehungen zu den übrigen Akteuren stehen. In Tabelle 3 sind die materiellen Austauschbeziehungen in Form einer Matrix dargestellt. Es sei anhand des Beispiels des *Kunststoffherstellers* erörtert, wie die Matrix zu lesen ist. Der Akteur *Kunststoffhersteller* ist in Zeile und Spalte drei einsortiert. In Zeile drei sind alle Flüsse von dem *Kunststoffhersteller* hin zu anderen Akteuren eingetragen und in der dritten Spalte alle Flüsse von den anderen Akteuren hin zum *Kunststoffhersteller* dargestellt. So erhält der *Kunststoffhersteller* vom *Rohstoffverarbeiter* die verarbeiteten Rohstoffe (Interpretation der dritten Spalte). Der *Kunststoffhersteller* beliefert *Zwischenhändler, Kunststoffverarbeitende Großunternehmen des 1. und 2. Grades* sowie *Kunststoffplattformen* mit Neukunststoffen (Interpretation der dritten Zeile). Analog können die anderen Matrixeinträge interpretiert werden.

Die Forschungsergebnisse wurden so in einer übersichtlichen Darstellung zusammengefasst.



Tabelle 3: Austauschbeziehungen im Status Quo der Kunststoffindustrie – Rs = Rohstoff, Nk= Neukunststoff, Rz= Rezyklate, KA = Kunststoffabfall

Status Quo der Kunststoffindustrie		Rohstofflieferant	Rohstoffverarbeiter	Kunststoffhersteller	(Granulat-) Zwischenhändler	Kunststoffverarbeiter				Kunststoffplattformen	Recycler & -compoundeur	Abfallvorbereiter / Mahlbetrieb	Monteure	Endkunden	Abfalldoponien	Abfallexporture	Verbrennungsanlagen
						1. Grades	2. Grades	Kunststoffoffverarbeiter									
								1. Grades (KMU)	2. Grades (KMU)								
Rohstofflieferant		x	Rs	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Rohstoffverarbeiter		x	x	Rs	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Kunststoffhersteller		x	x	x	Nk	Nk	Nk	x	x	Nk	x	x	x	x	x	x	x
(Granulat-) Zwischenhändler		x	x	x	x	Nk	Nk	Nk	Nk	x	x	x	x	x	x	x	x
Kunststoffverarbeiter	1. Grades (Großunternehmen)	x	x	x	x	Rz	Nk, Rz	x	Nk, Rz	Nk, Rz	KA	KA	x	x	KA	x	x
	2. Grades (Großunternehmen)	x	x	x	x	x	Rz	x	x	Nk, Rz	KA	KA	Nk	x	KA	x	x
	1. Grades (KMU)	x	x	x	x	x	Nk, Rz	Rz	Nk, Rz	Nk, Rz	KA	KA	x	x	KA	x	x
	2. Grades (KMU)	x	x	x	x	x	x	x	Rz	Nk, Rz	KA	KA	Nk	x	KA	x	x
Kunststoffplattformen		x	x	x	x	Nk, Rz	Nk, Rz	Nk, Rz	Nk, Rz	x	Rz	Rz	Nk, Rz	x	x	x	x
Recycler / Re-Compoundeur		x	x	x	x	Rz	Rz	Rz	Rz	Rz	x	x	x	x	x	x	x
Abfallvorbereiter / Mahlbetrieb		x	x	x	x	Rz	Rz	Rz	Rz	Rz	Rz	x	x	x	x	x	x

### **3      Arbeitspaket      2.1      –      Entwicklung      innovativer Prozessmesstechnik**

Im Zuge dieses Teilarbeitspaketes sollten Messansätze, die bereits am SKZ entwickelt wurden, erstmalig im Recyclingprozess genutzt werden. Zwei prototypische Neuentwicklungen wurden für die Mahlgutaufbereitung adaptiert und zunächst im Technikum des SKZ weiterentwickelt, zum einen die Online-Schlagzähigkeit und zum anderen die Inline-Spektroskopie.

#### **3.1      Online-Schlagzähigkeitsmessung am Strang**

##### **3.1.1      Grundlagen und Versuchsplanung**

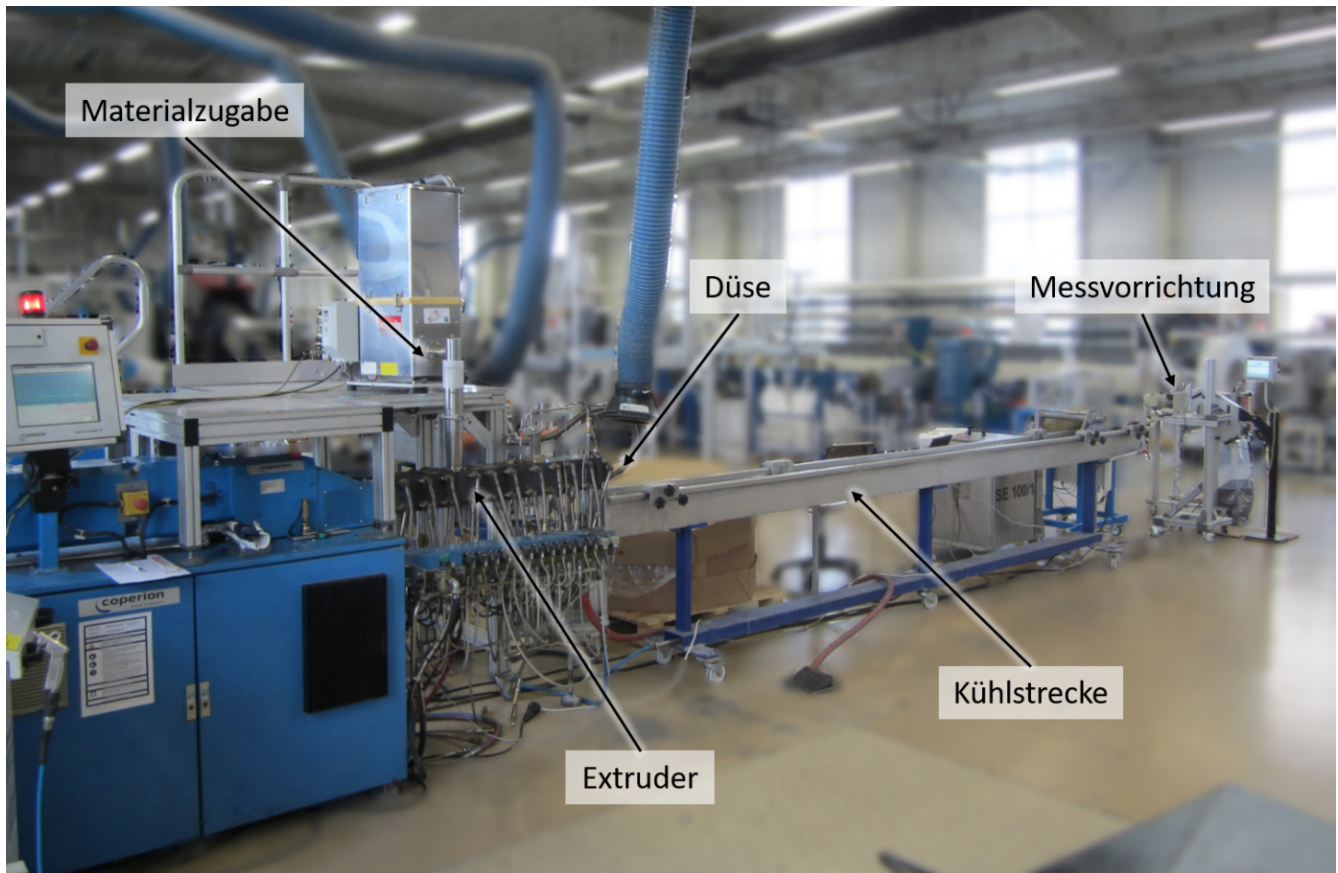
Die Schlagzähigkeit z. B. nach DIN EN ISO 179 gibt Auskunft über das Materialverhalten bei schlag- oder stoßartigen Belastungen und stellt eine wichtige Materialqualitätsgröße dar. Eine Messung der Schlagzähigkeit kann bei der Herstellung von Regranulat und Re-Compounds derzeit nur stichprobenartig und offline, das heißt nicht im laufenden Prozess, erfolgen. Der neue SKZ-Online-Messansatz beruht auf einer Drehmomentmessung an der Antriebswelle beim Strangabschlag eines Granulators. Ein schlagzähes Material führt beim Abschlagvorgang zu einem höheren Widerstand gegen die Drehrichtung des Antriebs, womit das gemessene Drehmoment steigt.

In den ersten Arbeiten sollte der Einsatz des bereits am SKZ vorhandenen Messaufbaus an Recyclingmaterialien evaluiert werden. Hierzu wurde Recyclingmahlgut plastifiziert und als Strang extrudiert, sodass eine Materialcharakterisierung mittels des Online-Schlagzähigkeitsmesssystems erfolgen konnte. Dabei wurde in festen Zeitabständen Probenmaterial am Granulator entnommen, an denen Referenzmessungen mittels Charpy-Schlagzähigkeit (DIN EN ISO 179-1/1eU) erfolgten, um mittels der Online-Schlagzähigkeit gemessene Materialschwankungen zu prüfen. Um gezielt Schwankungen der Materialeigenschaften im Prozess zu provozieren, erfolgte die Materialentnahme für die Dosierwaage an unterschiedlichen Stellen aus dem zuliefernden Materialbehälter. Sofern bei Versuchsdurchführung keine nennenswerten Materialschwankungen am Online-Messstand zu erkennen sind, kann alternativ die Zugabe von Neuware des gleichen Materialtyps erfolgen, um mögliche Materialschwankungen nachzustellen.

##### **3.1.2      Durchführung erster Versuchsblock und Ergebnisse**

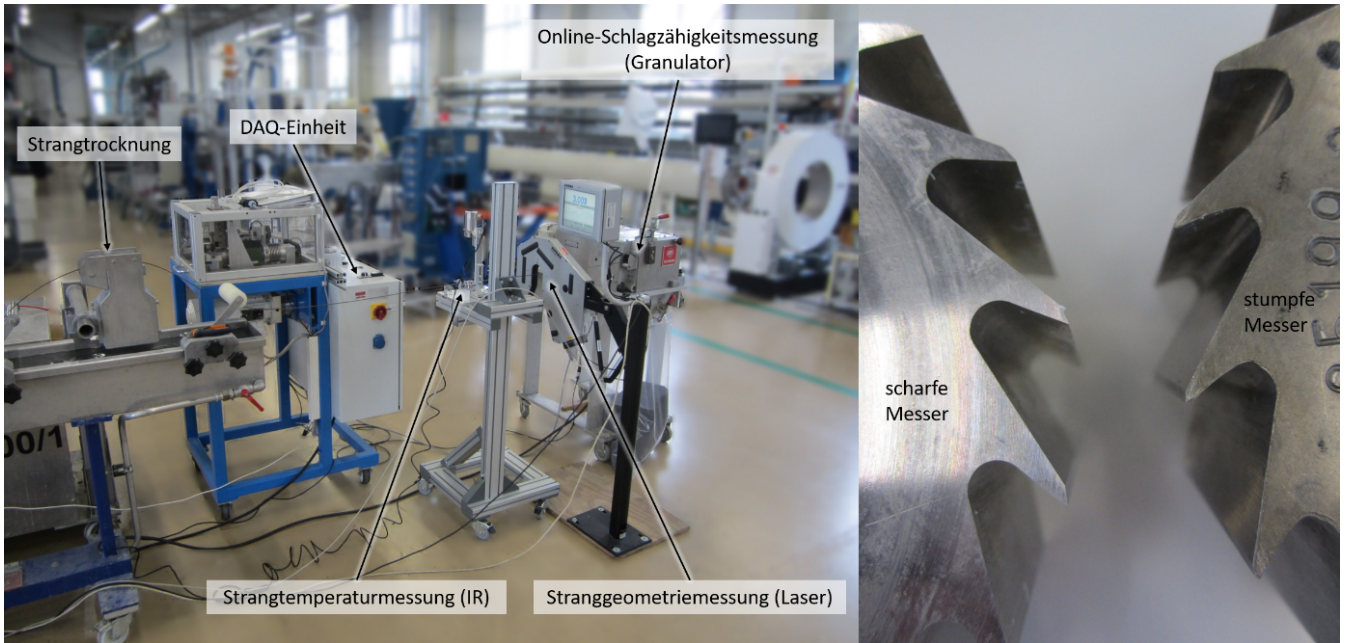
In Abstimmung mit dem Projektpartner der Fa. MKV GmbH Kunststoffgranulate wurde unverstärktes Polyamid 6-Recyclingmahlgut in Flakeform auf dem Doppelschneckenextruder ZSK 26 MCC der Fa. Coperion GmbH, Stuttgart, verarbeitet. Das aufgeschmolzene Recyclingmaterial wurde über eine 1-Loch-Düse als Strang ausgetragen, welcher anschließend im Wasserbad abgekühlt, getrocknet und dem Messaufbau zugeführt wurde, (siehe Abbildung 1). Die Zugabe des Recyclingmaterials erfolgte im mittleren Extruderteil, um eine Homogenisierung des Materials aufgrund der kürzeren Verweilzeit des Materials im Extruder zu verhindern und dadurch Schwankungen der Materialeigenschaften im Prozess aufrecht zu erhalten. Hierfür wurde eine Schneckenkonfiguration mit geringem Schereintrag und somit geringer Mischwirkung gewählt. Ziel der Versuchsreihe war es, Materialschwankungen hinsichtlich der Schlagzähigkeit innerhalb der gelieferten Materialmenge online bei der Verarbeitung zu

detektieren und somit die Eignung der Methode für die Qualitätsprüfung bei der Wiederaufbereitung von Recyclingmahlgut zu überprüfen.



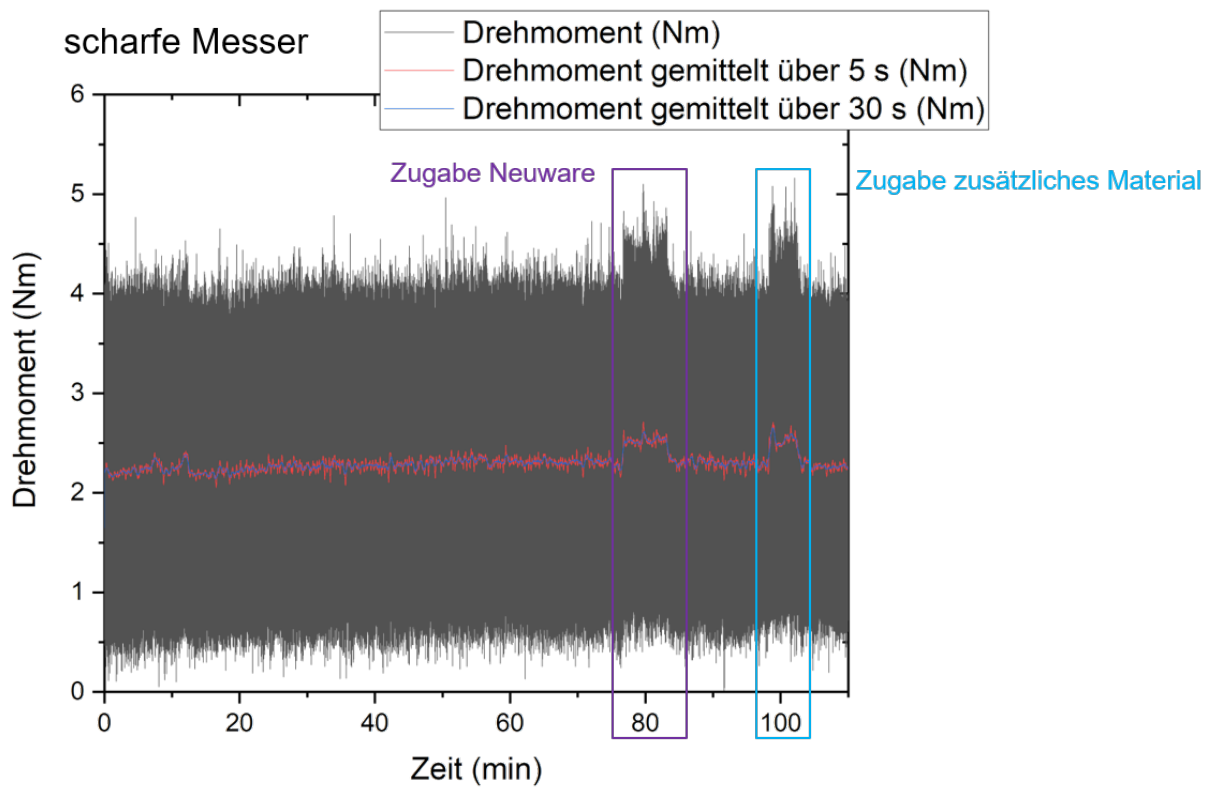
**Abbildung 1** Versuchsaufbau bestehend aus Extruder, Kühlstrecke und Messvorrichtung (eigene Abbildung SKZ).

Im Messaufbau fand zusätzlich die Bestimmung der Strangtemperatur mittels Infrarot-Messsonde optris CT der Fa. Optris GmbH, Berlin, und des Strangdurchmessers mittels 3-Achs-Lasermessgerät LASER 2050 T der Fa. SIKORA GmbH, Bremen sowie die Drehmomentaufzeichnung am SKZ-Online-Schlagfähigkeitsmesstand statt (vgl. Abbildung 2). Die Datenaufzeichnung erfolgte mittels einer DAQ-Einheit (NI 9211 als Gehäusemodul mit den Einsteckmodulen NI 9205 und NI 9237) von der Fa. National Instruments Germany GmbH, München, und einer bereits am SKZ entwickelten LabView-Software. Weiterhin wurden alle Prozessparameter mitprotokolliert. Um bei der Versuchsdurchführung einen Strangabschnitt und -abschlag zu erzeugen, wurde sowohl ein scharfes als auch stumpfes Rotormesser am Granulator genutzt (siehe Abbildung 2).



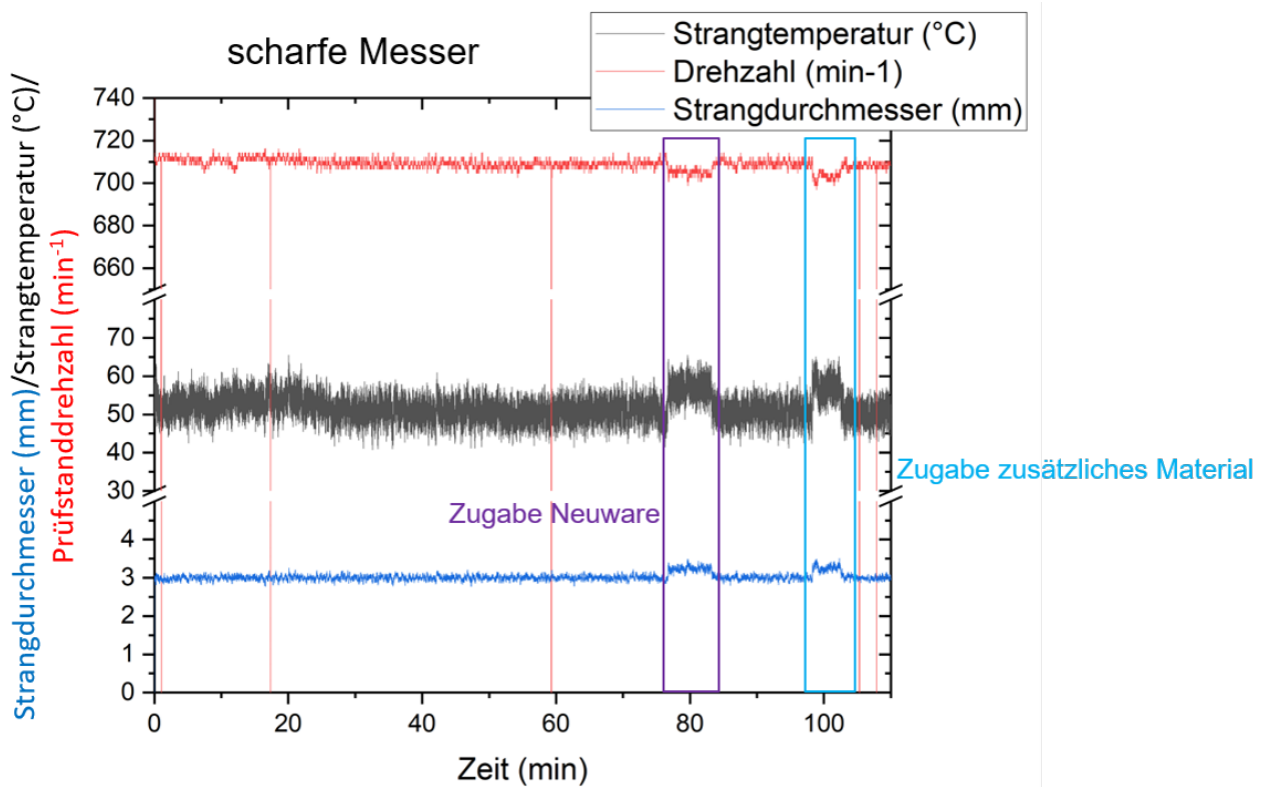
**Abbildung 2** Messaufbau bestehend aus Strangtemperatur- und -durchmessermessung sowie einem umgebauten Stranggranulator zur Online-Schlagzähigkeitsmessung (eigene Abbildung SKZ).

Neben der Verarbeitung des unverstärkten Polyamid 6-Recyclingmahlguts fand weiterhin die Zugabe von PA6-Neuware (B3S, Fa. BASF SE, Ludwigshafen) statt, um definitiv messbare Unterschiede in den Materialeigenschaften zu erzeugen. Da sich der Strangdurchmesser auf die Online-Schlagzähigkeitsmessung auswirkt, fand weiterhin auch die Zugabe von zusätzlichem Mahlgut (entsprechend der Zugabemenge der Neuware) statt. Für Referenzzwecke wurde Probenmaterial entnommen und zu Platten gepresst. Anschließend wurden mittels Wasserstrahlschneiden Probekörper herausgeschnitten, an denen nach der entsprechenden Konditionierung die Charpy-Schlagzähigkeitsmessung in Anlehnung an die Norm DIN EN ISO 179 eU erfolgte. Im Anschluss konnten die Messdaten aus der Versuchsdurchführung und der Referenzmessungen ausgewertet werden. In Abbildung 3 ist der Messverlauf der Online-Schlagzähigkeitsmessung über die Versuchsdauer bei einem scharfen Rotormesser aufgetragen. Wie zu erkennen ist, sind keine nennenswerten Änderungen des gemessenen Drehmoments über die Versuchsdauer zu verzeichnen. Lediglich die Änderung infolge der Zugabe von PA6-Neuware ist deutlich sichtbar. Da sich die Änderungen im Messverlauf sowohl bei der Zugabe von Neuware als auch beim zusätzlichen Mahlgut zeigte, sind diese Einflüsse eher auf die Zunahme des Strangdurchmessers (vgl. Abbildung 4) als auf die eigentlichen Materialeigenschaften zurückzuführen.



**Abbildung 3** Messverlauf der Online-Schlagzähigkeitsmessung über die Versuchsdauer. Für die Auswertung werden die gemittelten Werte betrachtet. Lediglich bei der Zugabe von Neuware sowie der Zugabe von zusätzlichem Mahlgut zeigt sich eine nennenswerte Änderung (eigene Abbildung SKZ).





**Abbildung 4** Auftragung der aufgezeichneten Prozessparameter über die Versuchsdauer. Die Zugabe der zusätzlichen Materialien (Neuware und Mahlgut) zeigen sich deutlich im Strangdurchmesser/-temperatur und der Drehzahl des Granulators (eigene Abbildung SKZ).

In Abbildung 5 sind die Referenzwerte der Normprüfung über die jeweiligen Online-Messwerte für die einzelnen Probemengen aufgetragen. Der deutliche Unterschied zwischen stumpfen und scharfen Rotormesser ist aufgrund des Trennmechanismus am Strang (Abschlag statt Abschnitt) zu erklären. Innerhalb der jeweiligen Cluster ist jedoch kein Trend zu erkennen. Hier liegen die Ergebnisse der Normprüfungen ebenfalls sehr eng zusammen, sodass wie die Online-Messergebnisse (vgl. Abbildung 3) zeigten, keine nennenswerten Schwankungen der Materialeigenschaften vorlagen.

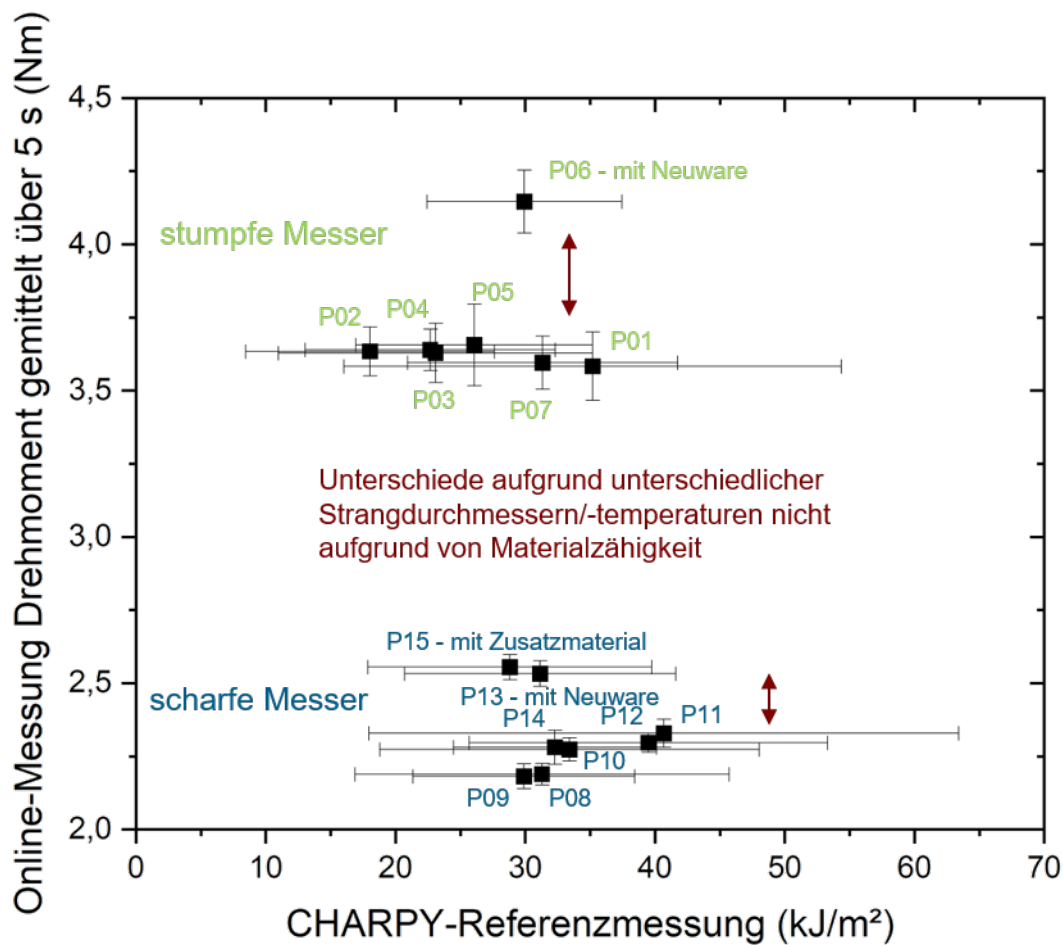


Abbildung 5 Auftragung der online gemessenen Werte über die Charpy-Schlagzähigkeitswerte laut Norm für alle Materialproben. Es lässt sich kein Zusammenhang zwischen beiden Messgrößen erkennen. Da jedoch innerhalb der Normprüfung keine Änderungen zu erkennen sind, kann davon ausgegangen werden, dass keine Schwankungen in den Materialeigenschaften vorliegen. Dies deckt sich mit den Ergebnissen aus Abbildung 3 (eigene Abbildung SKZ).

Aufgrund dessen entschlossen sich die Projektpartner weitere Versuchsreihen im Technikum des SKZ durchzuführen. Hierbei werden von den Partnern Fa. Hoffmann & Voss sowie Fa. MKV verschiedene Rezyklatmaterialien aus Blends von Acrylnitril-Butadien-Styrol mit Polycarbonat bereitgestellt, welche einen unterschiedlichen Glasfaseranteil und somit differierende Schlagzähigkeiten aufweisen. Hierbei sollen die Versuche auf einem Einschnecken-Extruder bei möglichst konstantem Strangdurchmesser und -temperatur erfolgen.

### 3.1.3 Durchführung zweiter Versuchsblock und Ergebnisse

Wie bereits erläutert, zeigte der erste Versuchsblock im SKZ-Technikum keine eindeutige Änderung der mechanischen Eigenschaften der Rezyklatmaterialien. Hierbei konnte nicht identifiziert werden, ob dies an der zu groben Messgenauigkeit des Online-Messsystems lag oder tatsächlich keine signifikanten mechanischen Eigenschaftsunterschiede innerhalb der verwendeten Materialcharge vorlagen. Zur

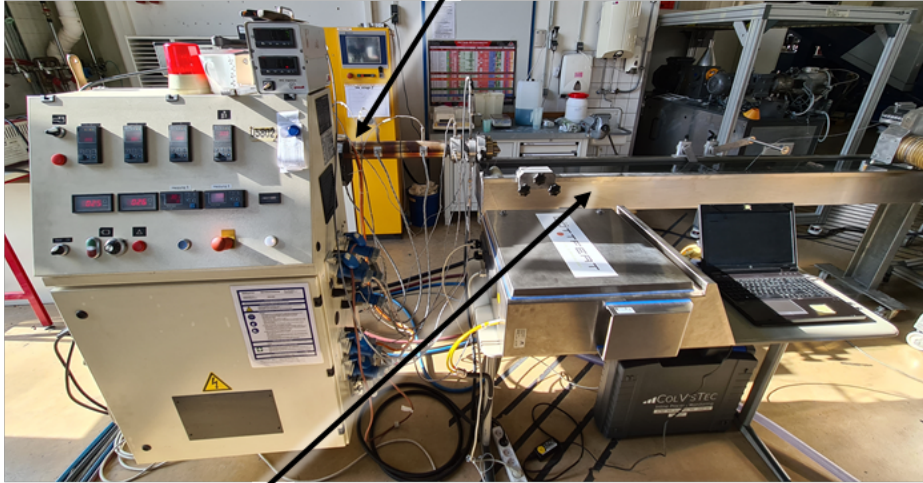
Ergebnisüberprüfung erfolgte ein zweiter Versuchsblock am SKZ. Hierbei kam ein Einschnucken-Extruder KME30 der Fa. KraussMaffei Extrusion GmbH zum Einsatz, um eine möglichst geringe Mischwirkung und einen möglichst konstanten Prozesszustand hinsichtlich Strangdurchmesser und -temperatur während der experimentellen Untersuchungen zu erzielen. Als Materialsysteme kamen dabei von den Partnern Fa. Hoffmann & Voss sowie Fa. MKV verschiedene Rezyklatmaterialien aus Blends von Polycarbonat (PC) mit Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS) sowie Polyamid 6 (PA6) in unverstärkter Form als auch mit unterschiedlichen Glasfaseranteilen zum Einsatz. Bei den drei verschiedenen PC-ABS-Blends waren die Schlagzähigkeiten bereits vorab durch den Hersteller bekannt. Bei den PA6-Materialien waren keine exakten Schlagzähigkeitswerte bekannt, jedoch sollte das GF-verstärkte Material erwartungsgemäß ein eher sprödes Verhalten als das unverstärkte Material aufweisen.

Der Messaufbau zur Online-Schlagzähigkeitsmessung entsprach dem des ersten Versuchsblocks. Dabei wurde neben dem Drehmoment (zur Online-Schlagzähigkeitsbestimmung) und der Drehzahl am Granulator zudem die Strangtemperatur und der Strangdurchmesser aufgezeichnet. In Abbildung 6 ist der Anlagenaufbau und in Abbildung 7 der Messaufbau mit den entsprechenden Komponenten abgebildet.



### **KME30 mit Kurzkompressionsschnecke und 1-Loch-Düse**

Einschneckenextruder zum reinen Plastifizieren und Strangaustrag  
(möglichst geringe Schwankungen im Schmelzeaustrag)



### **Wasserbad mit Strangabsaugung**

Konstante Kühlwassertemperatur

Länge der Kühlstrecke (unter Wasser) wurde entsprechend  
der Strangtemperatur angepasst

---

**Abbildung 6** Versuchsaufbau mit Einschnecken-Extruder KME30 und Wasserbad. Anschließend befindet sich der Messaufbau (eigene Abbildung SKZ).

### **Stranggranulator mit Drehmomentmessung**

Erfassung der Messdaten zur Online-Schlagzähigkeitsmessung  
Einzugsstrangeschwindigkeit wurde entsprechend dem  
Strangdurchmesser angepasst



#### **Messung Strangdurchmesser**

Beeinflusst mechanische  
Eigenschaften des Strangs

#### **Strangtemperaturmessung**

Beeinflusst mechanische  
Eigenschaften des Strangs

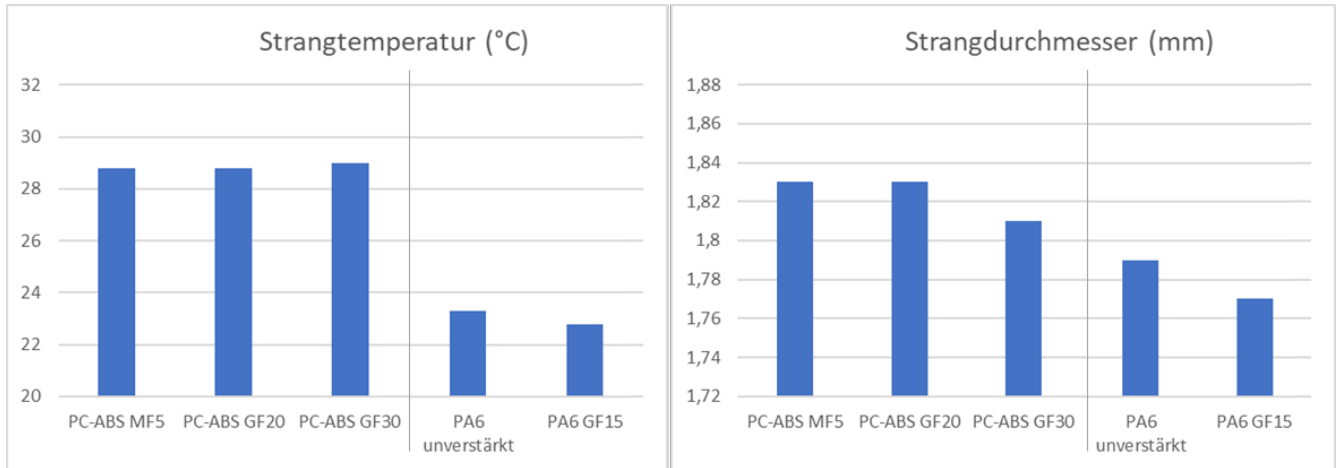
---

**Abbildung 7** Messaufbau zur Online-Charakterisierung des Strangs hinsichtlich Schlagzähigkeit, Strangtemperatur und Strangdurchmesser (eigene Abbildung SKZ).

Die Materialien wurden dabei jeweils einzeln verarbeitet. Die Schneckendrehzahl des Extruders, die Länge der Kühlstrecke im Wasserbad und die Abzugsgeschwindigkeit am Granulator wurden so gewählt, dass möglichst gleichbleibende Strangtemperatur und -durchmesser gewährleistet waren.

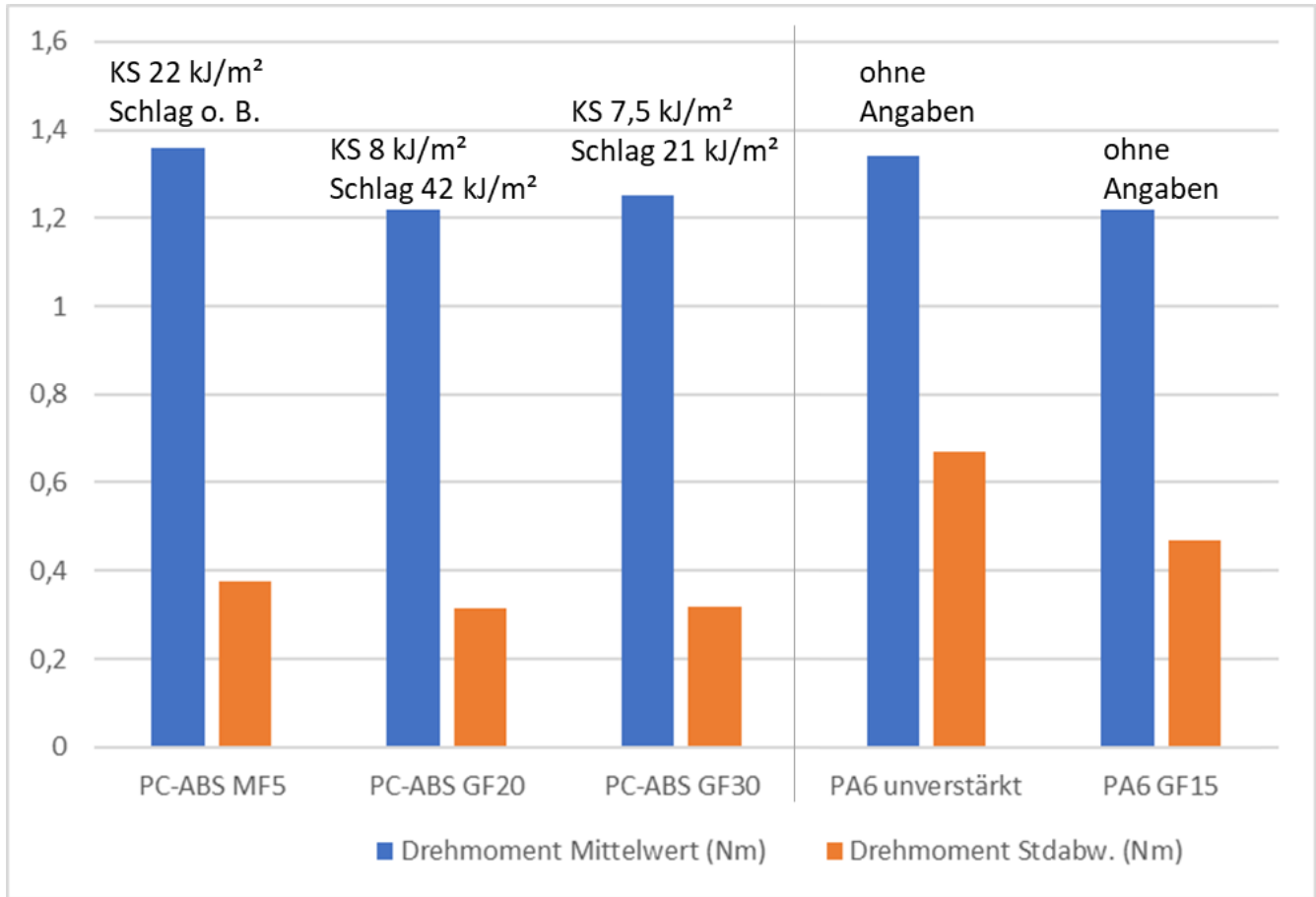
Es erfolgten Messungen jeweils bei konstanter Materialzugabe als auch bei den Spülvorgängen zwischen den Materialwechslern. Die Materialien wurden dabei entsprechend der Herstellerangaben vorgetrocknet.

In Abbildung 8 sind die gemittelten Werte (über die Versuchsdauer) der gemessenen Strangtemperatur und -durchmesserwerte aufgetragen. Diese konnten relativ ähnlich gehalten werden, sodass ein Vergleich innerhalb der jeweiligen Materialgruppe PC-ABS bzw. PA6 möglich war.



**Abbildung 8** Über die Versuchsdauer gemessene Strangtemperatur (links) und Strangdurchmesser (rechts). Die sehr geringen Abweichungen (in °C und mm) zeigen auf, dass der Prozess bzw. die Prüfbedingungen relativ konstant gehalten werden konnten (eigene Abbildung SKZ).

Für die Auswertung der Online-Schlagzähigkeit wurden das absolute Drehmoment sowie die Standardabweichung des Drehmoments über die Versuchsdauer ausgewertet (siehe Abbildung 9). Bei dem PA6-Materialsystem zeigte sich, dass wie zu erwarten durch den Glasfaseranteil die Schlagzähigkeit des Materials sinkt und somit das erforderliche Drehmoment für den Abschlag abnimmt. Dieser Effekt ist ebenfalls in den Ergebnissen zu sehen. Bei den PC-ABS-Blends sind die unterschiedlichen Zähigkeiten der Materialien nur bedingt in den Werten der Online-Messung zu erkennen. Hier zeigt die Standardabweichung des Drehmoments beim Kerbschlag die größte Übereinstimmung. Dies gibt jedoch nicht die Erwartungshaltung wieder, da der extrudierte Strang keine Vorkerbung aufweist.



**Abbildung 9** Ergebnisse der Drehmomentmessungen am Granulator für die jeweiligen Materialsysteme (PC-ABS mit 5, 20 und 30 Gew.-% Faseranteil links sowie PA6 ohne und mit 15 Gew.-%Faseranteil rechts). Die laut Herstellerangaben genannten Kerbschlagzähigkeiten (KS) und Schlagzähigkeiten (Schlag) sind jeweils über den Balken angegeben und dienen als Referenzwert (eigene Abbildung SKZ).

Auf Basis der Ergebnisse wurde mit den Projektpartnern beschlossen, dass die Online-Schlagzähigkeitsmessung keine belastbaren Ergebnisse liefert. Insbesondere die Messgenauigkeit (Unterscheidungsmöglichkeit zwischen den jeweiligen Materialien) sowie die Messrobustheit (Unabhängigkeit gegenüber den Prozesseinflussgrößen) sind nicht ausreichend für einen industrienahen Einsatz, weshalb weitere Versuche direkt bei den Projektpartnern vor Ort keine sinnvollen Ergebnisse erwarten lassen. Auf die in AP 3.1 geplanten Vor-Ort Versuche wurde also für dieses Messverfahren verzichtet.

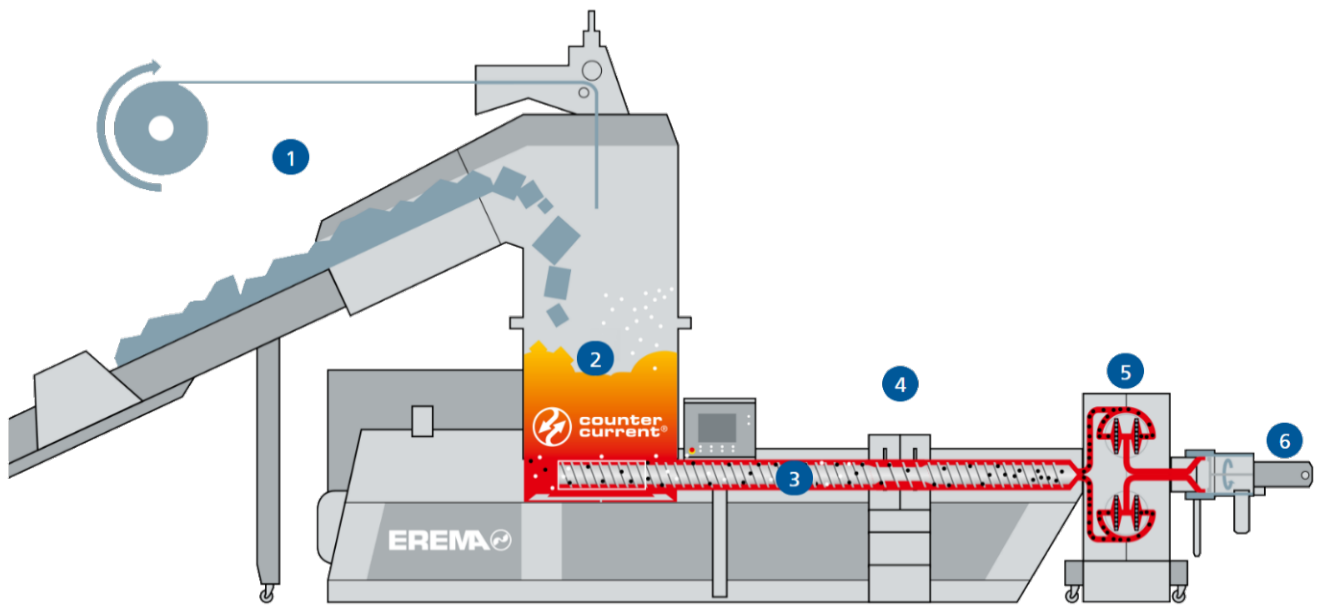
## 3.2 Inline-Spektroskopiemessung

### 3.2.1 Grundlagen und Versuchsplanung

Optische Spektroskopie im nahen Infrarot (NIR) wird als zerstörungsfreie Messmethode mittlerweile in vielen Einsatzbereichen eingesetzt, wie z. B. der Lebensmittel-, Pharma- und chemischen Industrie. Auch in der Kunststoffherzeugung und -verarbeitung kommt das Verfahren immer häufiger zum Einsatz. Wenn Material mit Licht aus dem NIR-Wellenlängenbereich (750 – 2.500 nm) bestrahlt wird, wird das ankommende Licht gestreut und absorbiert. Der absorbierte Anteil des ankommenden Lichts regt dabei Molekülschwingungen im Material an. In Polymeren relevante

Molekülgruppen, wie z. B. -CH, -CH<sub>3</sub>, -OH und -NH besitzen charakteristische Frequenzen, bei denen sie Licht absorbieren. Der absorbierte Anteil des eingestrahnten Spektrums fehlt entsprechend im Licht, welches am Detektor gemessen wird. Hierdurch ist die Lage der Absorptionsbanden in den Spektren definiert. Da diese Frequenzen bzw. Spektralbanden bekannt sind, können sie für die Materialcharakterisierung herangezogen werden. So lassen sich sowohl Polymertyp als auch Art und Menge von Füllstoffen und Additiven bestimmen. Insbesondere bei der Aufbereitung von Recyclingmaterial mit oftmals unbekanntem Inhalt von Zusatzstoffen kommt dieser Messtechnik eine besondere Bedeutung zu. Die in der Praxis überwiegende und sehr arbeits- und zeitaufwändige Offline-Laboranalyse mittels Fourier-Transformations-Infrarot-Spektrometer ermöglicht keine lückenlose 100 %-Prozesskontrolle. Daher ist eine Inline-Adaptierung von Sensoren direkt in den Compoundier- bzw. Rezyklataufbereitungsprozess notwendig.

In diesem AP wurde der gemeinsam mit den Firmen Göttfert Werkstoff-Prüfmaschinen GmbH, Buchen, und inno-spec GmbH, Nürnberg, entwickelte Inline-NIR-Rezeptursensor AddiCheck erstmals an Kunststoffschmelzen in einem Recyclingprozess eingesetzt. Das verwendete Spektrometer besteht aus einer Halogenlampe und einem InGaAs-Transmissionsgitter mit dem Wellenlängenbereich 900 – 1.700 nm. Ziel der Untersuchungen war es, die Sensitivität der Spektroskopie auf Schwankungen in der Materialhomogenität des Recyclingmaterials zu testen. Zudem kann durch den Einsatz eines geeigneten Tracers auch die Verweilzeit von Material im Recycling-Prozess detailliert untersucht werden. Die Versuche wurden auf der im SKZ vorhandenen Recyclingmaschine Intarema 906 TE der Fa. EREMA Engineering Recycling Maschinen und Anlagen GmbH, Ansfelden (Österreich), durchgeführt. Die Anlage besteht aus einem Förderband zur Materialzuführung, einer sog. Preconditioning Unit zur Materialhomogenisierung und -vorerwärmung, einem Extruder, einem Schmelzefilter zum Entfernen unerwünschter Partikel und einer anschließenden Granulierung (vgl. Abbildung 10).



**Abbildung 10** Schematischer Aufbau der Intarema 906 TE. 1: Materialeinzug, 2: Preconditioning Unit, 3: Extruder, 4: Entgasung, 5: Schmelzefilter, 6: Granulierung (Quelle: EREMA)

Als Versuchsmaterial hat die Fa. Hoffmann & Voss GmbH, Viersen, ein blaugraues Mahlgut aus PP-Recyclingmaterial bereitgestellt.

Um den anspruchsvollen Verarbeitungsbedingungen bei der Kunststoffaufbereitung mit Temperaturen bis 350 °C und Drücken von bis zu 300 bar standzuhalten, ist eine faseroptische Sonde mit robustem Saphirfenster notwendig. Weiterhin muss diese so konzipiert sein, dass sie in im Extruderbereich vorwiegend genutzten 1/2“-20UNF-Bohrungen eingeschraubt werden kann. Daher wurde die im Zuge des AP bestellte Prozess-NIR-Sonde der Fa. ColVisTec AG, Berlin (siehe Abbildung 11) eingesetzt. Diese ermöglicht eine Messung in Reflexion, womit nur ein Sondenzugang notwendig ist.



---

Abbildung 11 Neue NIR-Prozess-Reflexionsmesssonde der Fa. ColVisTec (Quelle ColVisTec).

### 3.2.2 Durchführung erster Versuchsblock und Ergebnisse

Auf Basis der in Rücksprache mit EREMA erarbeiteten Prozessparameter zur Verarbeitung des bereitgestellten Materials sowie des daraus abgeleiteten Versuchsplans wurden die Materialhomogenität und Verweilzeit im Recyclingprozess betrachtet. Der Materialdurchsatz lag je nach eingestellten Parametern bei 150 – 226 kg/h. Die faser-optische Sonde wurde mittels Adapter nach dem Schmelzefilter (nach Pos. 5 in Abbildung 10) und vor der Extruderdüse eingesetzt (siehe Abbildung 12), um die beste Vergleichbarkeit mit dem hergestellten Granulat zu ermöglichen. Zur Untersuchung der Verweilzeit erfolgte die Beigabe eines hochdosierten Additiv-Masterbatch (10 % Irganox B 225 von der BASF SE, Ludwigshafen mit einem im SKZ-Bestand vorhandenen Standard-PP). Zur Spektrenaufnahme wurde die Software TIDAS von J&M Analytik AG, Essingen, verwendet. Diese kann aus einem Dunkelstrom-Spektrum (Elektronikrauschen) sowie einem Referenzspektrum ein Absorptionsspektrum der Kunststoffschmelze ausgeben. Die Kalibrierung (Referenzmessung) der NIR-Prozesssonde erfolgte mit einem Weißstandard und in einem Kalibrierwerkzeug der Fa. ColVisTec direkt an der Faser und ohne Sondenhülse. Während der Versuchsdurchführung wurden alle relevanten Prozess- und Messgeräteparameter protokolliert.





**Abbildung 12** Einbau der NIR-Prozesssonde nach Schmelzefilter der Intarema 906 TE (eigene Abbildung SKZ).

Um ein möglichst gutes Signal-Rausch-Verhältnis zu ermöglichen, wurden Integrationszeiten von 3.500 bzw. 4.000 ms verwendet. Dies wurde jeweils zu Beginn der Messkampagne eingestellt.

Zur Auswertung der zahlreichen Spektren war eine Vorverarbeitung der Signale notwendig. Hierzu wurden die folgenden gängigen Verfahren bzw. eine Kombination daraus verwendet:

- Normierung der Spektren auf den Wert 1 bei der Wellenlänge 1.700 nm (höchste Absorption des Materials). Hierdurch konnte die Einflüsse der unterschiedlichen Integrationszeiten sowie des Lampendriffs (Erwärmung der Lampe über die Messkampagne) ausgeglichen werden.
- Beschränkung der Auswertung auf die relevanten Wellenlängen 1.100 – 1.500 nm (Bereich der Absorptionsbanden von PP)
- Basislinienkorrektur der beiden relevanten Peaks (Entfernung des Offsets und lineare Basislinienkorrektur) zur Bereinigung des diagonalen Offsets der Messdaten
- Ableitung nach Savitzky-Golay (1. Ordnung, 9 Punkte) im Bereich 1.100 – 1.540 nm zur Verstärkung der Unterschiede innerhalb der Peaks und zusätzliche Korrektur des Offsets

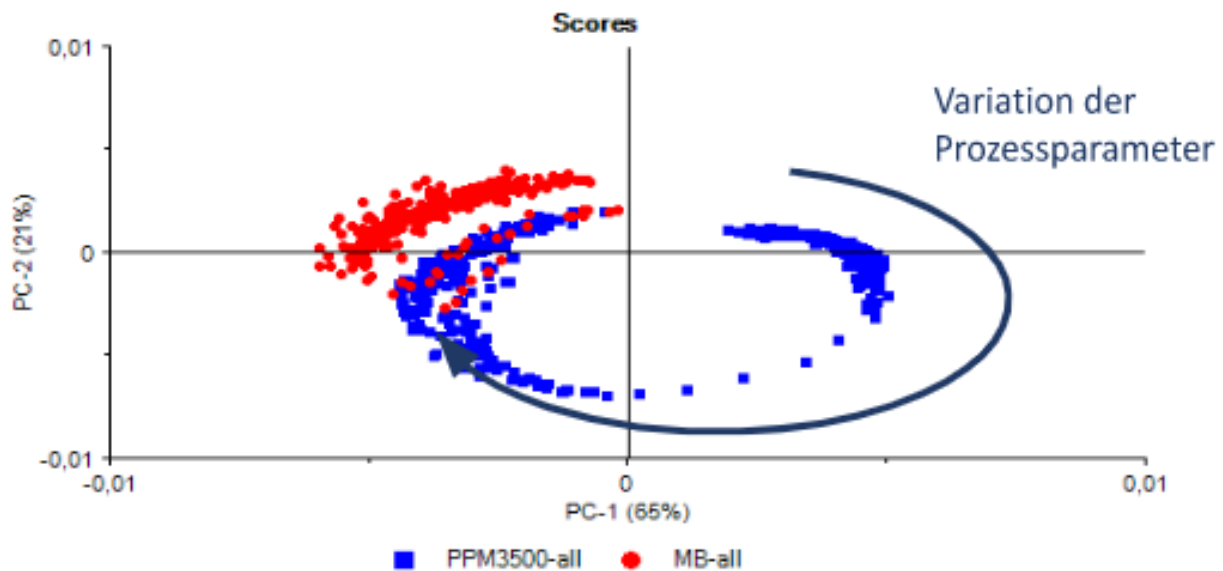
Nach erfolgter Vorverarbeitung der Spektren wurden diese mittels multivariater Analyse betrachtet. In diesem Zug erfolgte eine Hauptkomponentenanalyse (engl. Principal Component Analysis, PCA), um die Information der betrachteten Wellenlängen auf wenige relevante Hauptkomponenten (PC) zu reduzieren, welche die Varianz der einzelnen Spektren am besten beschreiben können. Bei der PCA zeigte sich, dass das bereitgestellte PP im Zuge der NIR-Messungen insgesamt sehr homogen war. Hinzu kommt die homogenisierende Wirkung der Recycling-Anlage von EREMA. Somit entsprechen die Messergebnisse den Erwartungen. Bei genauerer Betrachtung ist jedoch auffällig, dass sich die jeweiligen verwendeten Parametersätze im sogenannten Score-Plot teilweise unterscheiden lassen. Hierzu sind bereits die ersten beiden PCs ausreichend.

Ebenso kann mittels NIR-Spektroskopie eindeutig unterschieden werden, ob das genannte Masterbatch beigegeben wurde oder nicht. Darüber hinaus kann mit Hilfe der PCA auch die Verweilzeit des Materials in der Recycling-Anlage (PCU und Extruder) bestimmt werden. Hierzu kann der erste Prozesspunkt, welcher sich nicht mehr in der Punktwolke des PP-Mahlguts befindet, genutzt werden. Dies ist in Abbildung 13 (oben) verdeutlicht. Die noch in der blauen Punktwolke befindlichen roten Punkte



stellen entsprechend PP-Material ohne Masterbatchanteil dar, dass nach Beginn der Zugabe des Masterbatches in die PCU durch den Extruder gefördert und von der NIR-Sonde erfasst wurde. Der erste Punkt, an dem das Masterbatch mittels NIR erfasst wurde, entspricht einer Zeitdauer von ca. 36 Minuten. Basierend auf bisherigen Erfahrungswerten stellt dieser Zeitpunkt bei den verwendeten Prozessparametern eine realistische Verweilzeit in der Intarema 906 TE dar. Die Verweilzeit ist zudem abhängig von den jeweils verwendeten Drehzahlen und kann auch je nach Material schwanken.

Der Loadings-Plot (siehe Abbildung 13 unten) zeigt zahlreiche relevante Veränderungen in beiden PC, teilweise bei den charakteristischen Absorptionsbanden von PP bzw. deren Ableitung, aber auch in anderen Bereichen, sodass der Zusammenhang mit den Prozessparametern nicht unmittelbar bestimmt werden kann. Für eine tiefergehende Untersuchung sind weitere Betrachtungen notwendig, die im weiteren Projektverlauf durchgeführt wurden.



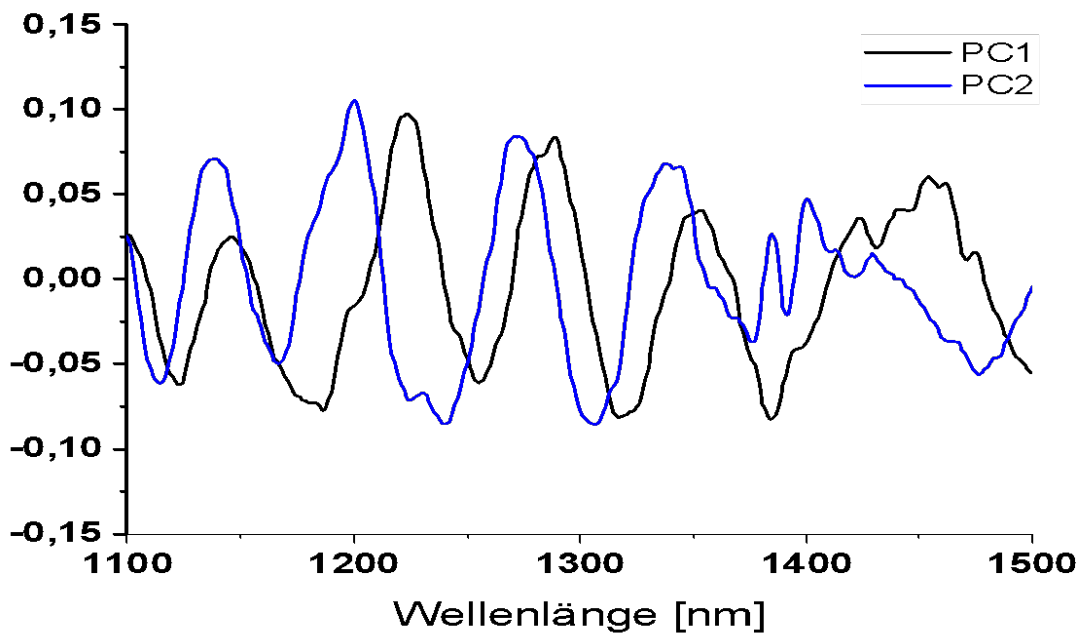


Abbildung 13 Score-Plot (oben) und Loadings (unten) der Versuchsreihe mit NIR-Spektroskopie an der Intarema 906 TE (eigene Abbildung SKZ).

### 3.2.3 Durchführung zweiter Versuchsblock und Ergebnisse

Wie bereits anhand der ersten Versuchsreihe auf der EREMA-Recyclinganlage gezeigt, ist die NIR-Spektroskopie sehr sensitiv auf feinste Materialveränderungen, wie sie z. B. durch die Variation von Prozessparametern verursacht werden. Bei den Versuchen konnten jedoch durch die gute Homogenisierung des Materials in der Recyclinganlage keine Schwankungen im Rezyklat aufgelöst werden. Darüber hinaus wurde die Verweilzeit der Recyclinganlage mit Hilfe eines Additiv-Masterbatches bestimmt. Auf Grund dessen wurde auch für die Spektroskopie ein weiterer Versuchsblock im Labor eingeplant. Ziel war es dabei Materialveränderungen zu erzwingen und diese spektroskopisch zu erfassen. Hierzu kamen erneut der Inline-NIR-Rezeptursensor AddiCheck (Göttfert Werkstoff-Prüfmaschinen GmbH, Wellenlängenbereich 900 – 1700 nm) und die faseroptische Reflexionssonde der ColVisTec GmbH (für 1/2“-20UNF-Bohrungen, Saphirfenster, stabil bis 350 °C und 300 bar) zum Einsatz. Spektrometer und Sonde sind in Abbildung 11 gezeigt. Für die optische Spektroskopie kam zudem ein neues Kalibrierwerkzeug zum Einsatz. Mit diesem wird die Sondenöhse bei der Aufnahme des Weißstandards (Spectralon) mitkalibriert, sodass insgesamt eine bessere Referenzmessung möglich ist.

**NIR-Sonde**



**AddiCheck-Spektrometer**

**Abbildung 14** Aufbau Inline-Spektroskopie mit NIR-Prozess-Reflexionsmesssonde von ColVisTec und AddiCheck-Spektrometer von Göttfert (eigene Abbildung SKZ).

Für die Versuche wurden von Hoffmann + Voss PC-Compounds mit unterschiedlichen Anteilen der thermischen Stabilisatoren Euronox 26 (Bis(2,4-di-tert-butylphenyl) pentaerythritol-diphosphit) bzw. Penta-Erythritol-Tetrastearat (PETS) bereitgestellt. Eine Übersicht über die Materialien ist in Tabelle 1 enthalten.

**Tabelle 4** PC-Compounds von Hoffmann + Voss

Probenname	Materialebestandteile
Muster 1	PC-Mahlgut natur + 0,1 Gew.-% Euronox 26
Muster 2	PC-Mahlgut natur + 0,3 Gew.-% Euronox 26
Muster 3	PC-Mahlgut natur + 0,5 Gew.-% Euronox 26
Muster 4	PC-Mahlgut natur + 0,1 Gew.-% Euronox 26 + 0,5 Gew.-% PETS

Bei den Versuchen wurden die Materialmuster bei einer Verarbeitungstemperatur von 300 °C (obere Grenze des empfohlenen Verarbeitungsbereichs und maximale Temperatur der Extruderheizung) und mehrfachen Durchläufen desselben Materials durch den Extruder untersucht. Dabei sollte der Stabilisator- bzw. Polymerabbau untersucht werden. Zudem erfolgte ein zusätzlicher Durchlauf ohne vorherige Trocknung des Materials, um einen hydrolytischen Materialabbau zu forcieren. Während der

Versuchsdurchführung wurden alle relevanten Prozess- und Messgeräteparameter protokolliert.

Um ein möglichst gutes Signal-Rausch-Verhältnis der spektroskopischen Messungen zu ermöglichen wurden Dunkelstrom (Rauschen bei geschlossenem Shutter vor der Halogenlampe) und Messspektrum mit einer Integrationszeit von 3500 ms und mit einer Mittelung über 10 Spektren pro Messung aufgenommen. Zudem wurde für die Berechnung der Absorbanz eines der vorher ermittelten Referenzspektren mit gleicher Integrationszeit verwendet.

Hierbei zeigte sich im Dunkelstrom ein Phänomen, welches bei den vorherigen Versuchen nicht aufgetreten ist. Normalerweise liegen die Counts über alle Wellenlängen hinweg gleichförmig bei etwa 1.000 bis 2.000. Bei den Messungen am transparenten PC bei 300 °C war aber ein deutlich stärkeres Signal messbar. Der Vergleich des Dunkelstroms bei unterschiedlichen Temperaturen ist in Abbildung 15 dargestellt. Eine Erklärung hierfür liefert das Plancksche Strahlungsgesetz, da die Wärmestrahlung bei dieser Temperatur nicht mehr vernachlässigbar ist. Um diesen Einfluss zu korrigieren, wird der Dunkelstrom vor der Berechnung der Absorbanz abgezogen.

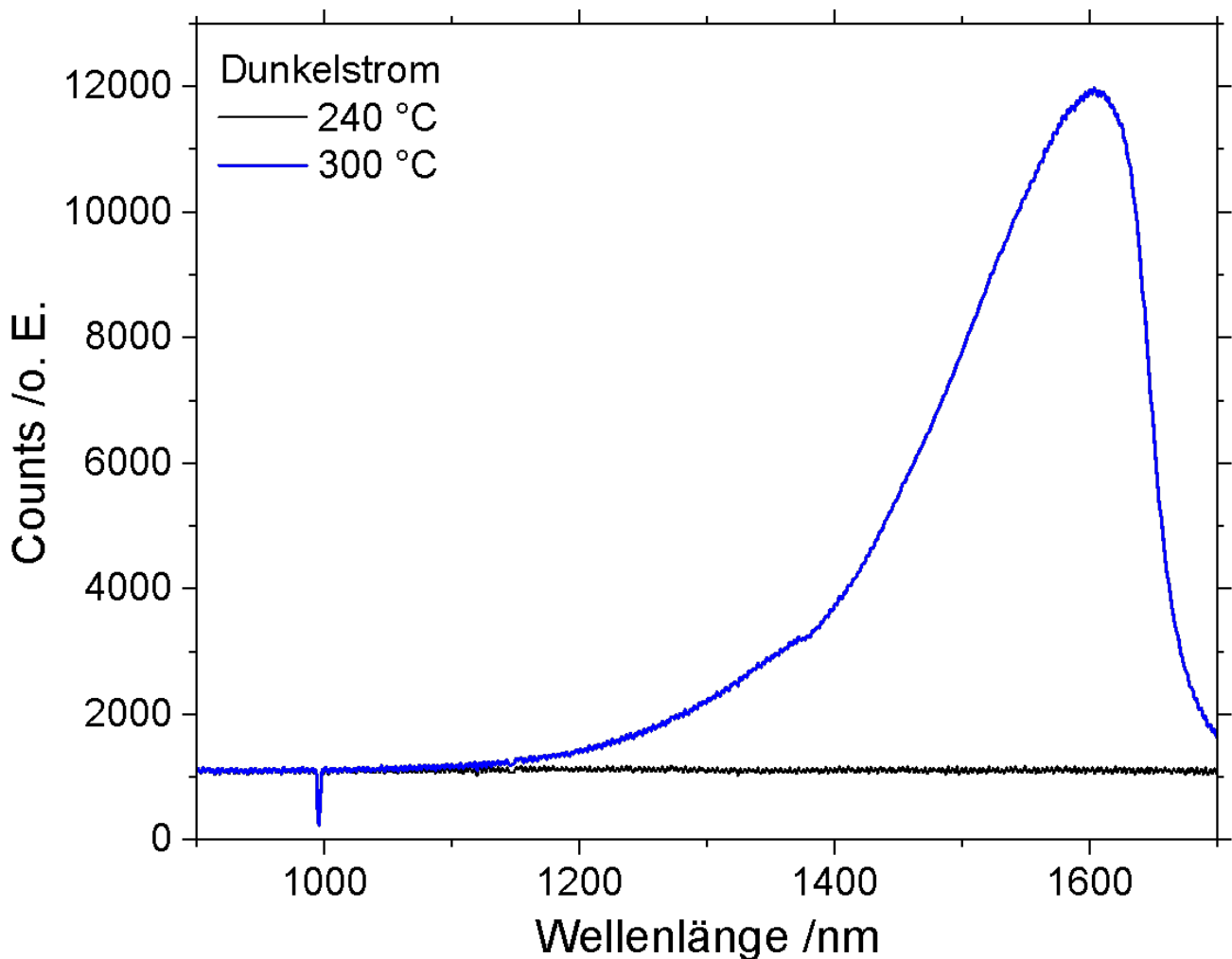


Abbildung 15 Vergleich der gemessenen Dunkelströme bei unterschiedlichen Temperaturen (eigene Abbildung SKZ).

Zur Auswertung der aufgenommenen NIR-Spektren war eine Vorverarbeitung notwendig. Hierzu wurden die folgenden gängigen Verfahren bzw. eine Kombination daraus verwendet:

- Normierung der Spektren auf den Wert 1 bei der Wellenlänge 1700 nm (höchste Absorption des Materials). Hierdurch konnten die Einflüsse der unterschiedlichen Integrationszeiten sowie des Lampendriffs (Erwärmung der Lampe über die Messkampagne) ausgeglichen werden.
- Beschränkung der Auswertung auf die relevanten Wellenlängen 1100 – 1500 nm (Bereich der Absorptionsbanden von PC)
- Basislinienkorrektur der beiden relevanten Peaks (Entfernung des Offsets und lineare Basislinienkorrektur) zur Bereinigung des diagonalen Offsets der Messdaten
- Ableitung nach Savitzky-Golay (1. Ordnung, 9 Punkte) im Bereich 1100 – 1540 nm zur Verstärkung der Unterschiede innerhalb der Peaks und zusätzliche Korrektur des Offsets

In Abbildung 16 sind beispielhaft einige Standard-Normal-Variate (SNV)-normierte Spektren verschiedener Muster sowie der Additive (aufgenommen mit dem NIR-S-G1-Handspektrometer von LuxFlux) gezeigt.

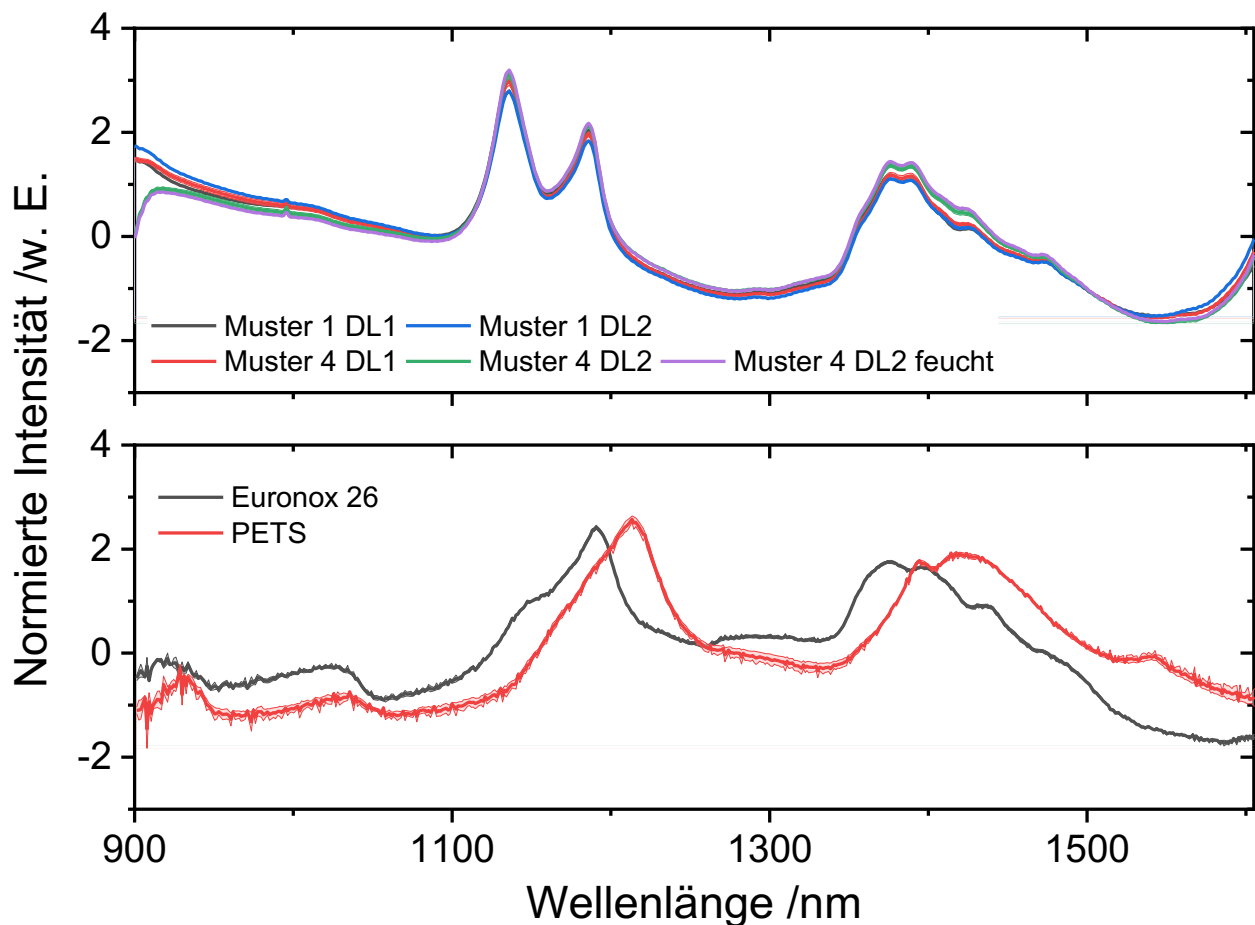


Abbildung 16 Beispielspektren der Muster 1 und 4 bei verschiedenen Durchläufen (DL) durch den Extruder sowie Vergleichsspektren der verwendeten Additive (eigene Abbildung SKZ).

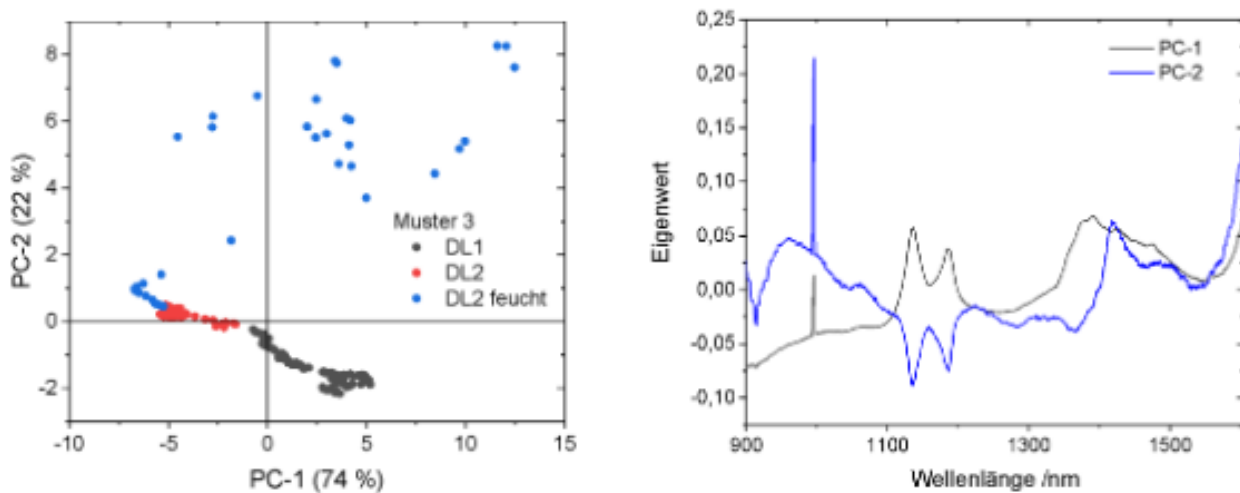
Da in den Spektren zwar Unterschiede zu erkennen sind, diese aber nicht direkt anhand der Spektren quantifizierbar sind, erfolgte zusätzlich eine Multivariate

Datenanalyse. Hierzu wurde die Software The Unscrambler X von Camo Analytics eingesetzt.

Nach erfolgter Vorverarbeitung der Spektren wurden diese mittels multivariater Analyse betrachtet. In diesem Zug erfolgte eine Hauptkomponentenanalyse (engl. Principal Component Analysis, PCA), um die Information der betrachteten Wellenlängen auf wenige relevante Hauptkomponenten (PC-1, PC-2 usw.) zu reduzieren, welche die Varianz der einzelnen Spektren am besten beschreiben können.

Bei der PCA zeigte sich, dass die jeweiligen Muster im ersten und zweiten Durchlauf durch den Extruder klar getrennt werden konnten. Ebenso war auch der Unterschied zwischen getrocknetem und feuchtem Material im zweiten Durchlauf sichtbar. Hierzu sind bereits die ersten beiden PC ausreichend.

Abbildung 17 links zeigt exemplarisch die Hauptkomponenten für Muster 3. Dabei ist der Übergang der verschiedenen Durchläufe wie bereits bei den Versuchen auf der EREMA-Recyclinganlage gut sichtbar. Zudem zeigt das feuchte Material eine deutliche Streuung, was auf abbaubedingte Inhomogenitäten zurückzuführen sein kann. Die Ergebnisse für die anderen Muster waren vergleichbar. Die Streuung des feuchten Materials war jedoch bei Muster 3 am stärksten ausgeprägt.



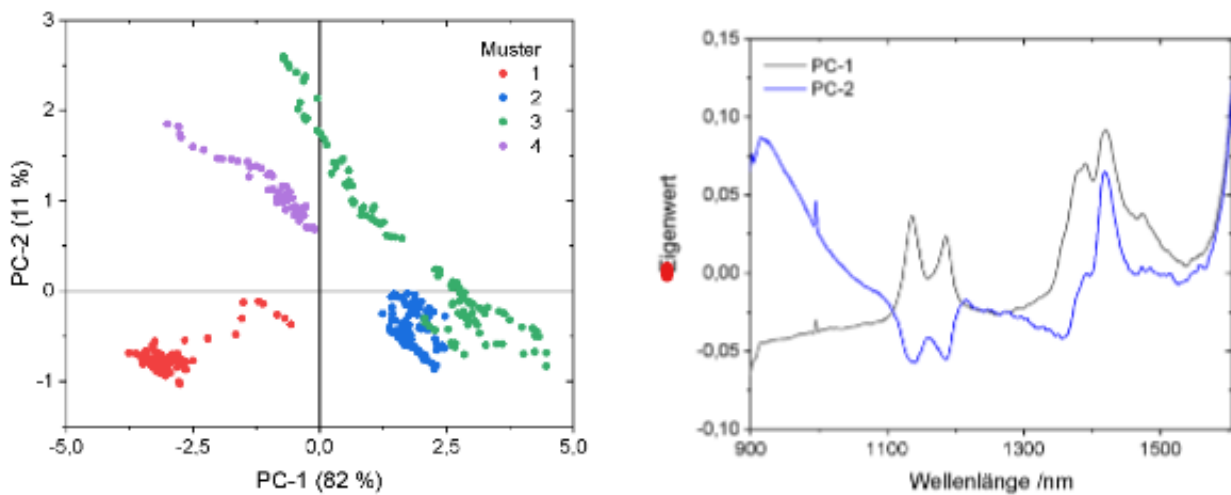
**Abbildung 17** Scores- und Loadings-Plot der PCA von Muster 3 bei verschiedenen Durchläufen (eigene Abbildung SKZ).

Der Loadings-Plot (siehe Abbildung 17 rechts) zeigt zahlreiche relevante Veränderungen in beiden HK, teilweise bei den charakteristischen Absorptionsbanden von PC bzw. deren Ableitung, aber auch in anderen Bereichen. Dies könnte entsprechend auf Polymerabbau hindeuten. Für eine tiefergehende Untersuchung sind weitere Betrachtungen notwendig.

Des Weiteren zeigte sich, dass die unterschiedlichen Ausgangsmaterialien (1. Durchlauf vgl. Abbildung 18) über 2 Hauptkomponenten gut trennbar sind. Dies ist in Abbildung 18 gezeigt. Muster 1 und Muster 4 liegen auf PC-1 nahe beieinander, können jedoch durch PC-2 separiert werden. Daher erscheint es naheliegend, dass PC-1 nach dem Euronox 26-Anteil der Muster trennt. Muster 3 zeigt auch hier eine starke Streuung, welche ggf. auf Inhomogenitäten im Material oder die Unschärfe zwischen den Versuchspunkten zurückzuführen ist. Letztere führt dazu, dass einige Punkte

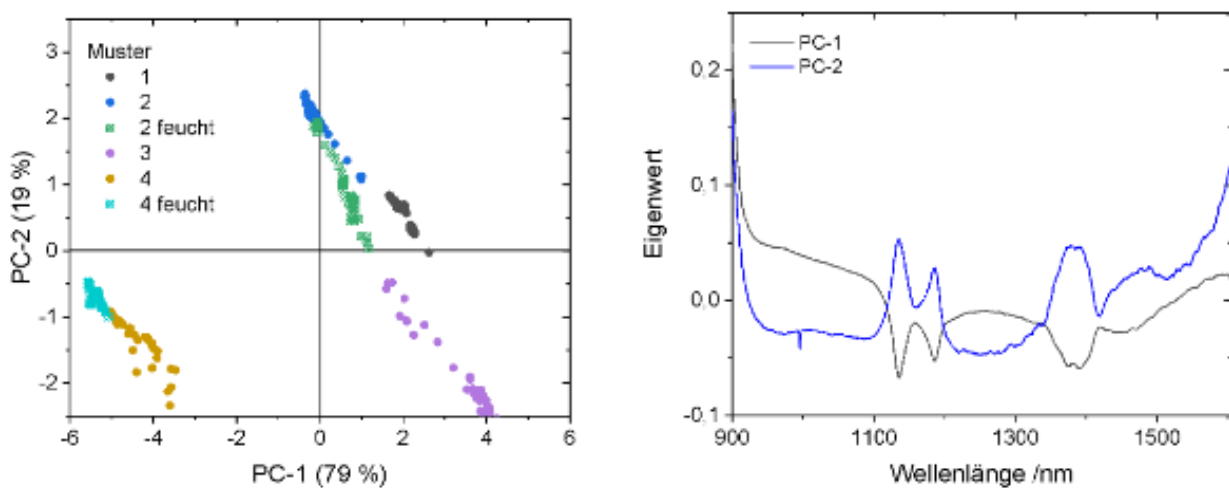


innerhalb anderer Gruppen liegen, da der eigentliche Versuchspunkt wahrscheinlich noch nicht vollständig eingestellt war.



**Abbildung 18** Scores- und Loadings-Plot der PCA aller Muster beim ersten Durchlauf (eigene Abbildung SKZ).

Auch im zweiten Durchlauf (vgl. Abbildung 19) lassen sich die einzelnen Muster noch teilweise trennen, allerdings schlechter als im ersten. Grund hierfür könnte sein, dass die Stabilisatoren bereits verbraucht sind und somit nur noch degradiertes PC verbleibt.



**Abbildung 19** Scores und Loadings-Plot der PCA aller Muster beim zweiten Durchlauf (eigene Abbildung SKZ).

Mit den drei unterschiedlichen Konzentrationen von Euronox 26 in Muster 1 – 3 kann zwar ein Regressionsmodell erstellt werden, allerdings ist dieses aufgrund der geringen Anzahl von Konzentrationen sehr ungenau. Für eine Kalibrierung des Additivgehalts sind mindestens fünf verschiedene Konzentrationen, die den Bereich des industriellen Einsatzes abdecken, empfehlenswert.

Von den Materialien wurde anschließend anhand einer Oxidations-Induktionszeit (OIT)-Messung bei 320 °C in Anlehnung an die Norm DIN-EN-ISO 11357-6, welche eigentlich für Polyolefine ausgelegt ist, der reale Stabilisator-Restgehalt bestimmt. Der Vergleich der Muster nach dem ersten Durchlauf ist in Abbildung 20 dargestellt.

Die aufgenommenen DSC-Kurven zeigen einen starken Einbruch des Signals, sobald der Stabilisator aufgebraucht ist. Im ersten Durchlauf passen die Zeitpunkte des Signaleinbruchs gut mit dem unterschiedlichen Stabilisatorgehalt der Muster zusammen. Während Muster 2 nur knapp nach Muster 1 „versagt“, halten Muster 3 und Muster 4 entsprechend länger der Temperaturbelastung stand.

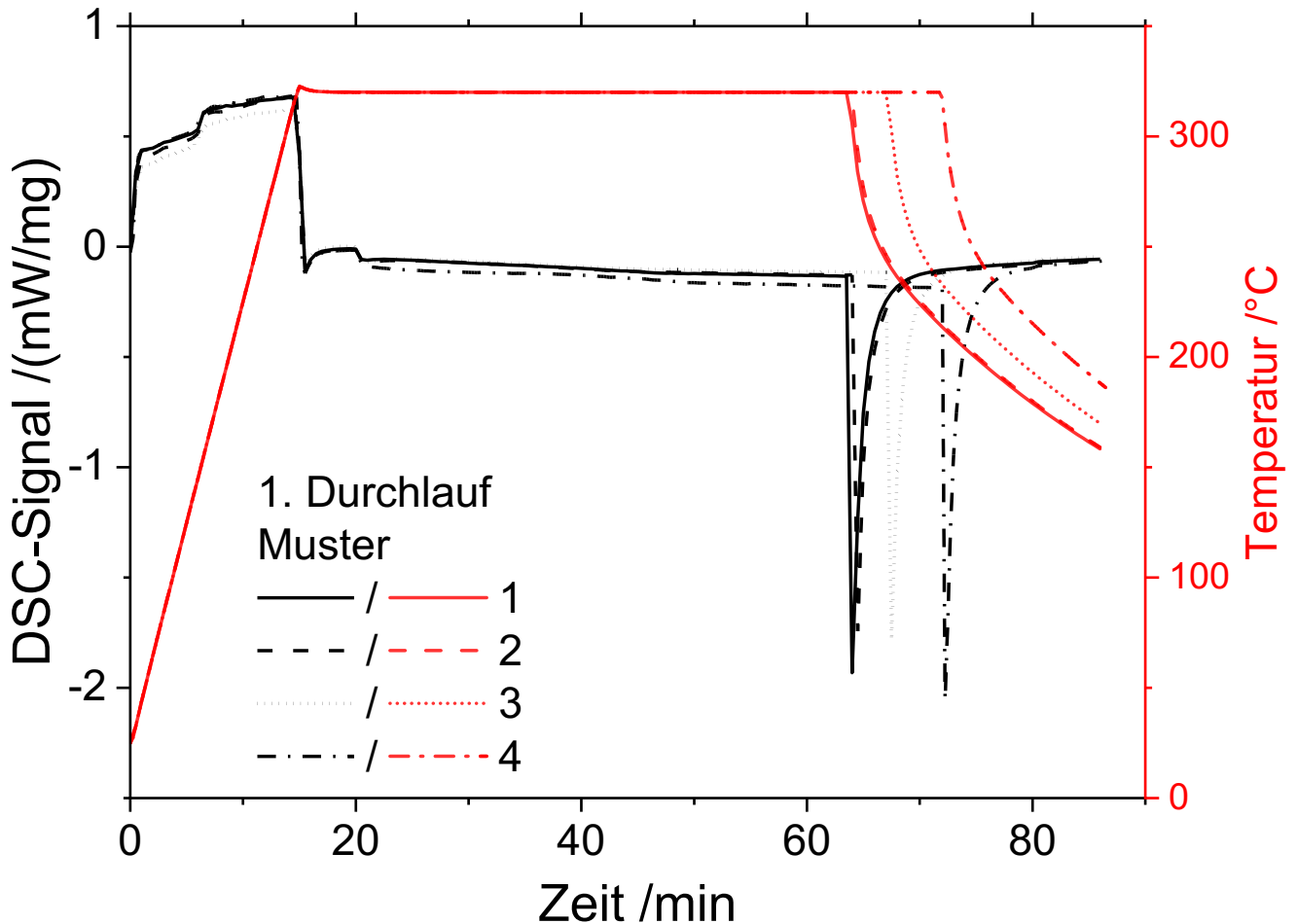


Abbildung 20 OIT-Messung der Muster nach erstem Durchlauf im Extruder (eigene Abbildung SKZ).

Abbildung 21 zeigt exemplarisch Muster 1 und Muster 4 nach dem zweiten Durchlauf jeweils getrocknet und feucht. Im zweiten Durchlauf zeigen die Materialien in der OIT-Messung ein etwas widersprüchliches Verhalten. So ist die feucht verarbeitete Probe von Muster 1 deutlich länger stabil als diejenige, bei der das Material vorgetrocknet wurde. Bei Muster 4 scheint die Feuchte keine Rolle gespielt zu haben, da sich beide Kurven überlagern. Auch die Zeitpunkte des Signaleinbruchs sind ähnlich zu denen des Materials aus dem ersten Durchlauf.



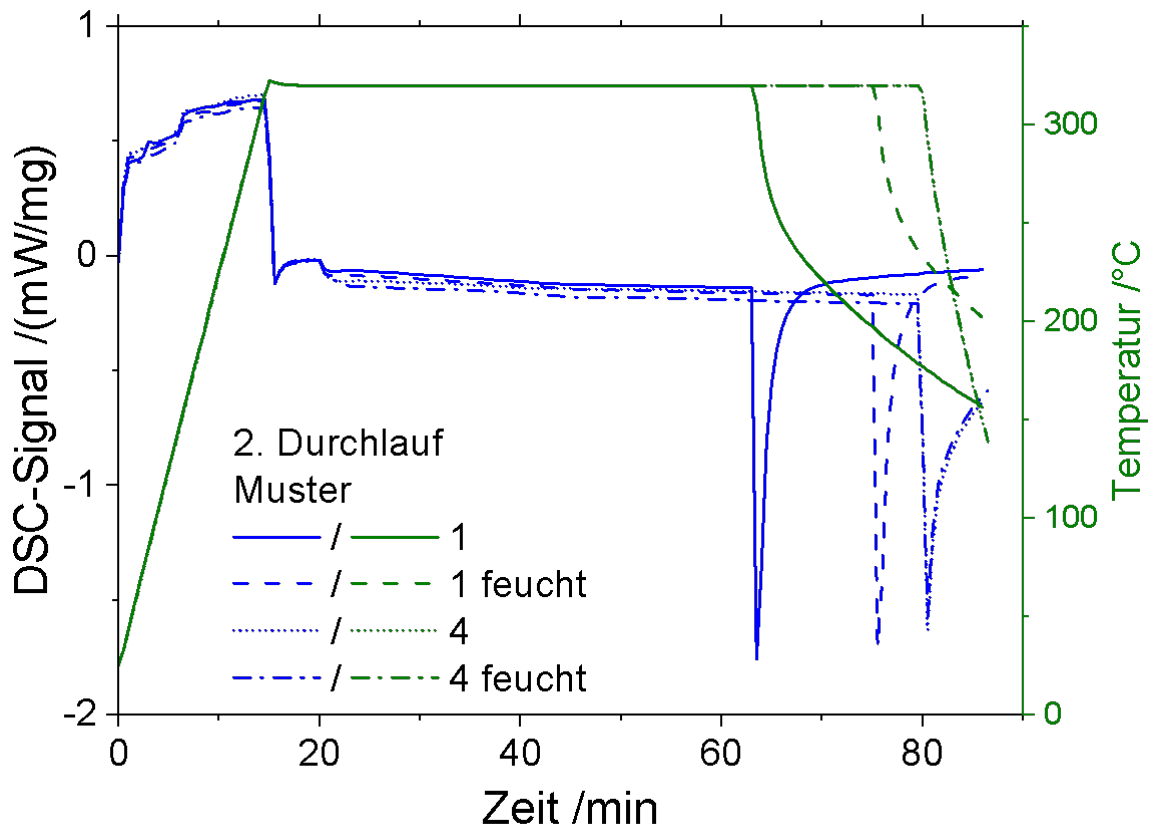


Abbildung 21 OIT-Messung von Muster 1 und 4 nach zweitem Extruderdurchlauf, jeweils getrocknet und feucht (eigene Abbildung SKZ).

Die OIT-Messungen konnten somit den Materialabbau nicht wie erhofft eindeutig nachweisen, während den Granulaten die Degradation (Vergilbung) deutlich anzusehen war.

Die Inline-Spektroskopie lieferte hier deutlich vielversprechendere Ergebnisse, sodass sie für die Vor-Ort-Versuche bei Hoffmann + Voss und MKV eingesetzt wurde.

## 4 Arbeitspaket 2.2 – F&E zu einer digitalen Applikation

Das Arbeitspaket 2.2 beschäftigte sich mit der Konzeption und Umsetzung einer digitalen Applikation. Diese ermöglicht es den beteiligten Unternehmen, Informationen zu Ihren Kunststoffprodukten digital abzulegen und an Ihre Kunden weiterzugeben – eine Art erweitertes, digitales Produktdatenblatt. Zudem wurde ein Wissensbereich integriert, der den Mitarbeitenden der Unternehmen wichtige Informationen zum Recycling, zur Arbeit mit Recycelten Materialien und zum Abfallmanagement zu Verfügung stellt. So wird den Nutzern das Wissen für einen Sinnvollen Umgang mit Rezyklaten und Abfällen zur Verfügung gestellt.

### 4.1 Der Wissensbereich

Der Einsatz von Kunststoffrezyklaten zeigt weiter großes Potential als alternative Rohstoffquelle und für das Schließen von Wertstoffkreisläufen. Doch für die Kunststoffverarbeiter einerseits ist nicht nur die Beschaffung eine Herausforderung, sondern auch deren Verarbeitung. Rezyklathersteller andererseits kämpfen beispielsweise mit heterogenen Abfallstoffströmen, die trotz Sortieranlagen nicht aufgetrennt werden können, oder auch mit Verunreinigungen, welche die Qualität der hergestellten Rezyklate mindern.

Die DiLinK Applikation bietet nicht nur die nötige Infrastruktur und Informationstransparenz über aufkommende Kunststoffabfälle und Rezyklate, sondern gleichzeitig zeigt sie hier auch nützliches Know-how zum Einsatz von Rezyklaten. Durch die Charakterisierung der Rezyklate und das Wissen um deren Verhalten nach der Wiederaufbereitung kann in Zukunft Kunststoffneeware durch Rezyklat ersetzt werden. Damit dies gelingt, sollten Kunststoffverarbeiter, Abfallgeber und Recycler grundlegende Tipps & Tricks aus dem Bereich „Wissen“ der Applikation beachten.

Die Strukturierung des Wissensbereichs hat sich vor allem an den Anforderungen aus dem bereits erstellten Pflichtenheft orientiert:

- Unternehmen hinsichtlich ihres innerbetrieblichen Abfallmanagements unterstützen:
- Informationen bereitstellen und Bewusstsein für sortenreines Trennen schaffen
- Kunststoffverarbeiter „motivieren“ mehr Rezyklat einzusetzen und Aufklärung der (potenziellen) Sekundärkunststoffverarbeiter
- Vorgeschaltete Qualitätskontrolle / Qualitätsstandards von Rezyklaten festsetzen
- Kundenpflege und Beratung bzgl. Materialauswahl und Verarbeitungsbedingungen

Inhaltlich wurde der Wissensbereich aufgebaut durch eine Sammlung von Best Practice Wissen aus Internetrecherche, Interviews mit Projektpartnern aus der Industrie, Erstellung eines Fragebogens für die Sammlung von Erfahrungsberichten unter Kunststoffverarbeitern und Kontaktaufnahme mit diversen Firmen. Das Fachwissen gliedert sich in fünf Hauptkategorien für Kunststoffverarbeiter, Abfallgeber, Recycler wird ergänzt durch Best Practice Informationen und abgerundet durch ein Glossar zur besseren inhaltlichen Verständlichkeit. Die folgenden Tabellen (Tabelle 5 bis Tabelle 9) beschreiben kurz den textlichen Inhalt jeder Kategorie.

**Tabelle 5 Kurzbeschreibung des Wissensbereichs für Kunststoffverarbeiter**

Kategorien für Kunststoffverarbeiter	Kurzbeschreibung der Kategorie
Gesetzliche Rahmenbedingungen	Die deutsche und europäische Politik betont mit der EU-Kunststoffstrategie die Transformation der Linear- in eine echte zirkuläre Kunststoffwirtschaft, womit Kunststoffemissionen konsequent vermieden und der Bedarf fossiler Rohstoffe drastisch reduziert wird. Dabei steigt die Notwendigkeit vermehrt Rezyklate einzusetzen. In diesem Abschnitt sind die relevanten Aktivitäten für Europa und Deutschland zusammengefasst.
Standards für Rezyklate	Über die Normung soll eine Charakterisierung von Rezyklaten und deren Rahmenbedingungen sichergestellt werden, dabei wird unterschieden in materialspezifische und allgemeingültige Standards.
Anwendungsbeispiele für Rezyklate	<p>Rezyklate können bei entsprechendem Eigenschaftsprofil Neuware zum Teil oder gänzlich ersetzen. Bereits heute finden sich eine Vielzahl an Anwendungsfeldern für Sekundärrohstoffe. Hier werden typische Produktbeispiele für den Einsatz von Kunststoffrezyklaten erwähnt.</p> <p>Genauer aufgeschlüsselt wurden die Anwendungsbeispiele exemplarisch für Polyamide aus den Bereichen Automobil und Elektro- und Elektronikanwendungen für die Spritzgießanwendungen. Hier sind genaue Wertebereiche für die einzelnen Kennwerte angegeben, wodurch ein Abgleich zwischen Materialeigenschaften und Anwendungsanforderungen ermöglicht wird.</p>
Verarbeitungstechnische Unterschiede zur Neuware	Welche Schwierigkeiten (z.B. Thermische Instabilität während der Verarbeitung, Startreaktionen, Bauteilgeometrien, Verunreinigungen etc.) können bei der Nutzung von Rezyklaten auftreten und wie lässt sich die Qualität in der Verarbeitung verbessern.
Qualitätssicherung	Eine geeignete und kontinuierliche Qualitätskontrolle soll chargenabhängige Unterschiede zu Datenblättern und Prüfzeugnissen aufzeigen, um Ausfälle während der Fertigung zu vermeiden. Eine Auswahl unterschiedlicher analytischer Methoden zur Qualitätskontrolle und zur Erfassung der Materialeigenschaften von Rezyklaten wurde aufgelistet.
Treibhausgasemissionen senken durch Rezyklateinsatz / CO <sub>2</sub> -Kennwerttabellen für Neuware und Rezyklate	Kunststoff-Rezyklate sind in vielen Anwendungen zu einer vielversprechenden Alternative zu Primärkunststoff (Neuware) geworden. Eine wichtige Rolle spielen dabei auch potenzielle Einsparungen von Treibhausgasemissionen durch den Rezyklateinsatz. Um die Vergleichbarkeit zwischen Neuwarenkunststoff und Rezyklat im Bereich der Umweltauswirkungen herzustellen, aber auch die Attraktivität von recyceltem Kunststoff transparent aufzuzeigen, sind in folgenden beiden Tabellen eine umfangreiche Sammlung von CO <sub>2</sub> -Kennwerten für unterschiedliche Kunststofftypen und Compounds dargestellt. Es wurden CO <sub>2</sub> -Werte für beispielsweise ABS, EPS, HDPE, LDPE, PA-Varianten, PB, PBT, PC, PE, PET, PP, PLA, PVC und PS herangezogen und tabellarisch dokumentiert. Mit den erarbeiteten CO <sub>2</sub> -Kennwerten (gemessen in kg CO <sub>2</sub> – äquivalente) wird aufgezeigt in welcher Höhe Treibhausgasemissionen durch die Herstellung des Kunststoffs ausgestoßen werden.

**Tabelle 6 Kurzbeschreibung des Wissensbereichs für Abfallgeber**

Kategorien für Abfallgeber	Kurzbeschreibung jeder Kategorie
Hemmnisse im Abfallmanagement	Obwohl aus rein technischer Sicht nichts gegen die Aufbereitung von Kunststoffabfällen spricht, wird dies in der Praxis nach wie vor durch diverse Hemmnisse erschwert und an dieser Stelle aufgelistet.
Verbessern Sie Ihr Abfallmanagement	Für das Sicherstellen der Sortenreinheit und die Wiederverwertung ist ein Abfallmanagement notwendig, welches die Stoffströme erfasst, trennt und sinnvoll lenkt. Damit das Abfallmanagement erfolgreich ist, wurden praktische Tipps zusammengestellt.
Entsorgungskosten und CO <sub>2</sub> -Emissionen senken	Durch die gezielte Erfassung der Abfallströme und der Ausschöpfung vorhandener Lagerflächen zur Sortierung lassen sich zumindest Teilmengen des Abfalls unter Senkung der monetären Ausgaben und der THG-Emissionen entsorgen. Rechenbeispiel – Einsparpotential an Entsorgungskosten und CO <sub>2</sub> -Emissionen durch das Recyclen von Kunststoffabfällen.

**Tabelle 7 Kurzbeschreibung des Wissensbereichs für Recycler**

Kategorien für Recycler	Kurzbeschreibung jeder Kategorie
Verbesserung der Rezyklatqualität während der Aufbereitung	Hauptprobleme verbunden mit mechanischem Recycling sind Degradation und Instabilität. Es sollen die Gegenmaßnahmen bzw. Ansätze zur Verbesserung der Rezyklateigenschaften beispielhaft aufgezeigt werden. Diese Tipps richten sich an Rezyklathersteller bzw. an Anbieter von Sekundärkunststoffen.

**Tabelle 8 Kurzbeschreibung des Wissensbereichs für Best Practice**

Kategorien für Best Practice	Kurzbeschreibung jeder Kategorie
Nachhaltigkeit nachweisen (SKZ, SCO2R tool)	Die Themen „Nachhaltigkeit“, „Klimaschutz“ und „Ressourcenschonung“ sind in der Kunststoffindustrie angekommen, ob aus eigenem Antrieb oder aufgrund gesetzlicher Vorschriften. Unternehmen setzen sich zunehmend mit ihrer ökologischen Performance auseinander und wollen diese quantifizieren und verbessern. Das SKZ bietet hierfür die Nachhaltigkeitsbewertung an und unterstützt somit diese Unternehmen. Das SCO2RE online Tool ermittelt eine orientierende CO <sub>2</sub> -Bilanz für technische Rezyklate und identifiziert klimarelevante Hot-Spots auf Produktebene.
Die besten Quellen sichern (H+V und MKV)	Eine große Herausforderung ist beim Umstieg von Neuware auf Sekundärkunststoffe, wenn hierbei die Qualität der Produkte und die Liefersicherheit der Rohstoffe gewährleistet bleiben soll. Es ist daher ratsam, mit einem Rezyklat-Hersteller zusammenzuarbeiten, der mit Erfahrung und Know-how beratend zur Seite steht. Stellvertretend für die Branche werden zwei sehr erfahrene Unternehmen, Hoffmann + Voss aus Viersen und MKV Beselich-Obertiefenbach, vorgestellt.
Digitale Plattformen für Rezyklate	Zwei professionelle Plattformen für den Handel von Kunststoffabfällen und Rezyklaten sind cirplus und plastship. Sie ermöglichen den digitalen

(cirplus und plastship)	Beschaffungsprozess und vernetzten über die Grenzen von Deutschland hinaus Entsorger, Recycler und Verarbeiter miteinander.
Praxisbeispiele von Kunststoffverarbeitern (Pöppelmann)	Unternehmen, die bereits erfolgreich Rezyklate für technische Anwendungen einsetzen und verarbeiten, werden hier als positiv Beispiele hervorgehoben. Ihre Erfahrungen können dabei helfen weiteren Unternehmen den Einstieg in einen nachhaltigeren Produktionskreislauf durch Einsatz von Rezyklat zu erleichtern und bestehende Bedenken zu minimieren. Damit Erfahrungsberichte auf der DiLinK Seite platziert werden können, wurden mit diversen Verarbeitern Interviews geführt oder ein Fragebogen zugesendet. Unglücklicherweise war kaum ein Unternehmen bereit öffentlich mit dem Firmennamen Information weiterzugeben.

**Tabelle 9 Kurzbeschreibung des Wissensbereichs für den Glossar**

Kategorie für Glossar	Kurzbeschreibung jeder Kategorie
Glossar	Eine alphabetische Auflistung von Fachbegriffen oder Fremdwörter, die durch die nähere Beschreibung im Glossar besser verständlich werden.

Die ausführlichen Inhalte zu jeder Kategorie können auf der DiLinK Applikation eingesehen werden. Aufgrund der Komplexität soll an dieser Stelle nur auf zwei Bereiche tiefer eingegangen werden; auf die Erstellung der CO<sub>2</sub>-Kennwerttabelle und die Ermittlung der Anwendungsbeispiele:

#### 4.1.1 CO<sub>2</sub>-Kennwerttabelle

Stetig an Bedeutung zunehmende Faktoren in der Industrie und Wirtschaft sind vor allem Aspekte der Nachhaltigkeit und Umweltschonung. Durch neu aufkommende EU-weit wirkende politische Maßnahmen, aber auch durch das steigende Umweltbewusstsein der Konsumenten gewinnt der Einsatz von Rezyklat einen immer höher werdenden Stellenwert. Um die Vergleichbarkeit zwischen Neuwarenkunststoff und Rezyklat im Bereich der Umweltauswirkungen herzustellen, aber auch die Attraktivität von recyceltem Kunststoff transparent aufzuzeigen, befasste sich das Forschungsprojekt mit einer umfangreichen Sammlung und Gegenüberstellung von CO<sub>2</sub>-Kennwerten für unterschiedliche Kunststofftypen und Compounds. Ziel ist es, Akteuren der Kunststoffindustrie künftig zu ermöglichen diese Daten auf der DiLinK Applikation einzusehen. Folglich würde das Tool indirekt eine Unterstützung bei der Darstellung von Fußabdruckdaten bieten und so u.a. ebenfalls die Kaufentscheidung von potenziellen Kunden positiv beeinflussen. Mit den in der Studie erarbeiteten CO<sub>2</sub>-Kennwerten (gemessen in kg CO<sub>2</sub> – äquivalente) wird aufgezeigt, in welcher Höhe Treibhausgasemissionen durch die Herstellung des Kunststoffs ausgestoßen werden.

Für die umfangreiche Darstellung verschiedener Kunststofftypen wurden Internetrecherchen durchgeführt sowie Daten aus der frei zugänglichen Datenbank von PlasticsEurope und die SKZ interne Datenbank verwendet. Die Verwendung der SKZ internen Datenbank ermöglichte eine Gegenüberstellung von Neuwarenkunststoff und Rezyklat derselben Kunststoffzusammensetzung. Um die Quantität der Recherche zu erhöhen, wurden Systemgrenzen bei der Auswahl von Daten vernachlässigt. Dennoch wurden, aus Gründen der Regionalität, nur Werte aus Deutschland bzw. Europa für

die Studie herangezogen. Insgesamt wurden 204 CO<sub>2</sub>-Kennwerte erarbeitet, davon sind 76 SKZ-eigene Daten, die sich wiederum auf 44 Rezyklate beziehen. Der Fokus lag auf den in der Industrie gängigen Kunststofftypen. So wurden CO<sub>2</sub>-Werte für beispielsweise ABS, EPS, HDPE, LDPE, PA-Varianten, PB, PBT, PC, PE, PET, PP, PLA, PVC und PS herangezogen und tabellarisch dokumentiert, die Tabellen sind im Anhang zu finden. Tabelle 6 zeigt exemplarisch die dokumentierten Informationen, die bezüglich der CO<sub>2</sub>-Kennwertrecherche von Bedeutung waren.

**Tabelle 10 Auszug aus der CO<sub>2</sub>-Kennwerttabelle**

Abk.	Quelle	Kunststoff	CO <sub>2</sub> -äq./kg	Land	Jahr	Datenquelle	Information
PA 66	Neuware	Granulat	11,280	DE	2017	SKZ-Datenbank	SKZ-Server; Berücksichtigt: Herstellung, Transport, Entsorgung, Rohstoffgewinnung und -aufbereitung, Energie
PA66	Rezyklat	Regranulat	0,250	DE	2017	SKZ-Datenbank	eigene Industrieberechnungen

Das Berechnungsverfahren der Rezyklat-Werte basiert auf der vom SKZ durchgeführten Studie SCO<sub>2</sub>RE. Bei mehreren Kunststofftypen derselben Art, wurden Mittelwerte aus den recherchierten CO<sub>2</sub>-Werten gebildet, die in der DiLink Applikation als Orientierungswert gekennzeichnet werden. Abschließend wurden Zusatzinformationen definiert, die ebenfalls im Online-Tool ersichtlich und einsehbar sein sollen. Folgendes Zitat soll auf der Plattform integriert werden: „Der hier angegebene Orientierungswert wurde durch Mittelwertbildung aus Ökobilanzergebnissen verschiedener Studien und Datenbanken berechnet. Hierfür wurden Daten aus europäischen Studien bis 2021 berücksichtigt. Die Systemgrenzen der den Daten zugrundeliegenden Studien stimmen im Einzelfall nicht unbedingt überein. Welche Studien und Datenbank Verwendung fanden, ist dem Projektbericht zu entnehmen.“

#### 4.1.2 Anwendungsbeispiele

Die materialspezifischen Kennwerte von Kunststoffen werden heute in Datenbanken abgebildet, in welche die Hersteller Angaben in ihre Technischen Datenblätter (TDS) und weitere, eigene anwendungsspezifische Informationen (Verarbeitungsrichtlinien, Materialeigenschaften, Beständigkeit, Anwendungsgebiete etc.) eingeben. Durch die international unterschiedlichen Prüfbedingungen und auch durch die anwendungsspezifisch vorgeschriebenen Spezifikationen der Nutzer (Automobil, Elektrotechnik etc.) entstehen eine Fülle von Charakteristika, welche eine Gruppierung von Polymer- oder Anwendungsklassen schwierig machen. Hierzu kommt die praktisch unbegrenzte Vielfalt an Modifikationen durch Stabilisatoren sowie Füll- und Verstärkungsstoffe der technischen Compounds. Dennoch wurde hier beispielhaft versucht für die Anwendungen Automobil und E & E, siehe Tabelle 11 und Tabelle 12, materialspezifische Kennwerte für Polyamide auszuarbeiten (SKZ, 2022).



**Tabelle 11 Materialspezifische Kennwerte für PA in der Automobilanwendung (SKZ interne Berechnungen)**

Anwendung		Automobilanwendung				
Material		PA 12; 6; 66; 6/66; 6/6T				
Verarbeitungsart		Spritzgießverarbeitung				
Spezifische Anwendung		Hochfeste, spröde Strukturwerkstoffe mit hoher Glas- und / oder Kohlefaserverstärkung	Hochfeste, spröde Strukturwerkstoffe mit hoher Glas- und / oder Kohlefaserverstärkung und Schlagzähmodifikation	Standardmaterialien für (tragende) Strukturteile Außen, Innen und "under-the-hood", mittlere Fasergehalte	Hoch schlagzähe Materialien für Außenanwendungen (Exterieur)	Niedrig gefüllte, mittelfeste und schlagzähe Materialien für Anbauteile, Innenraum, Verbundstrukturen
Kennwert	Einheit					
Bruchspannung	[MPa]	225 - 290	/	110 - 250	15 - 80	75 - 120
Zug-Modul	[MPa]	17.500 - 25.000	/	5.500 - 18.000	1.000 - 5.000	4.000 - 8.500
Charpy-Kerbschlagzähigkeit, +23°C, 3mm	[kJ/m²]	6 - 18	18 - 26	5 - 20	12 - 18	2 - 10
Bruchdehnung	[%]	2 - 5	5 - 8	2 - 7	30 - 50	2 - 25
Zugfestigkeit, trocken	[MPa]	210 - 300	200 - 260	110 - 215	50 - 110	50 - 150
Zugfestigkeit, konditioniert	[MPa]	125 - 275	140 - 220	80 - 120	50 - 85	40 - 95
Fasergehalt in Gew.-%	Glasfaser	60	50	20 - 30	0 - 10	0 - 10
	Kohlefaser	40	30	10 - 20	0 - 10	0 - 10

**Tabelle 12 Materialspezifische Kennwerte für PA und PBT in E&E Anwendungen (SKZ interne Berechnungen)**

Anwendung		Elektro- und Elektronikanwendungen				
Material		PA 12; 6; 66; 6/66; 6/6T; PBT				
Verarbeitungsart		Spritzgießverarbeitung				
Spezifische Anwendung		Hochfeste, spröde Strukturwerkstoffe mit hoher Glas- und / oder Kohlefaserverstärkung	Hochfeste, spröde Strukturwerkstoffe mit hoher Glas- und / oder Kohlefaserverstärkung und Schlagzähmodifikation	Verstärkte Materialien für tragende Strukturen, Deckel und Gehäuse	Konstruktionswerkstoffe für vielseitige Anwendungen	Hoch schlagzähe Materialien für Außengehäuse und evtl. Steckerumspritzungen
Kennwert	Einheit					
Bruchspannung	[MPa]	225 - 290	/	110 - 250	15 - 80	75 - 120
Zug-Modul	[MPa]	15000 - 20000	10.000 - 15000	10000	2000 - 5000	1000 - 2000
Charpy-Kerbschlagzähigkeit, +23°C, 3mm	[kJ/m²]	6 - 18	18 - 26	5 - 20	12 - 18	2 - 10
Bruchdehnung	[%]	<1	1 - 2	2 - 7	30 - 50	>30
Vicat-Erweichungstemperatur	°C	250 - 260	250 - 260	230 - 250	210 - 220	210 - 220
Vergleichszahl der Kriechwegbildung	V	200 - 600	200 - 600	200 - 600	200 - 600	200 - 600
Elektrische Durchschlagfestigkeit	kV/mm	10 - 60	10 - 60	10 - 60	10 - 60	10 - 60
Dielektrizitätszahl, 100Hz	-	4,5	4 - 4,5	4	3 - 3,5	3
Fasergehalt in Gew.-%	Glasfaser	60	50	20 - 30	0 - 10	0 - 10
	Kohlefaser	40	30	10 - 20	0 - 10	0 - 10

#### 4.2 Kennwerttabelle als Basis für den Produktpass

In einem Digitalen Produktpass werden Produktinformationen digital zur Verfügung gestellt. In Falle eines Kunststoffes können so zum Beispiel Daten zur Verarbeitung, Materialdaten, Daten zu Inhaltsstoffen, zum Hersteller oder zur Entsorgung digital abgelegt werden. Diese Daten sind dann für Kunden und Nutzer einsehbar oder können von verarbeitenden Maschinen ausgelesen und genutzt werden.

Die bereits im vorherigen Abschnitt erwähnte anwendungsspezifische Material- und Spezifikationsvielfalt erfordert für Abbildung eines Produktpasses allerdings einen überschaubaren Umfang, der technisch für ein Produkt relevanten Eigenschaften. Diese wurden auf rund 140 Merkmale eingegrenzt und kennzeichnet die in diesen Zusammenhang erarbeitete „Kennwerttabelle“. Für die Ausarbeitung der Kennwerte wurde als Basis eine langjährig etablierte Datenbank (materialdatacenter.com (AL-TAIR)) für Virgin-Material verwendet. Das Ergebnis war eine Sammlung von 140 Kennwerten und 95 Attributen, die in 10 Kategorien (*Mechanische Eigenschaften, Physikalische Eigenschaften, Thermische Eigenschaften, Elektrische Eigenschaften, Verarbeitungseigenschaften, Optische Eigenschaften, Folieneigenschaften, besondere Eigenschaften / Beständigkeit, Weitere Eigenschaften und Angaben zum Recycling*) eingeteilt wurden. Als weiterer Abgleich, wurden die Kennwerte dem

Entwurfsvorschlag der DIN SPEC 91446 gegenübergestellt. Die Kennwerte werden näher beschrieben durch die Angabe der relevanten Prüfnorm und deren Messeinheit sowie durch eine Synonymbeschreibung. In Tabelle 9 ist ein Auszug dieser Tabelle für die Kategorie *Mechanische Eigenschaften* abgebildet.

**Tabelle 13 Auszug der DiLinK Kennwerttabelle für mechanische Eigenschaften**

Mechanische Eigenschaften	Kategorie	Kernkennwert (SKZ)	Kennwert DIN SPEC 91446	Prüfnorm	Einheit	Synonym
Zug-Modul	Mechanisch	1	1	ISO 527	MPa	Zugmodul
Zugfestigkeit	Mechanisch	1	1	ISO 527	MPa	Reißfestigkeit
Streckspannung	Mechanisch	1	0	ISO 527	MPa	Streckgrenze
Streckdehnung	Mechanisch	0	0	ISO 527	%	
Nominelle Bruchdehnung	Mechanisch	0	0	ISO 527	%	Bruchdehnung
Spannung bei 50% Dehnung	Mechanisch	0	0	ISO 527	MPa	
Bruchspannung	Mechanisch	1	0	ISO 527	MPa	Spannung bei Bruch
Bruchdehnung	Mechanisch	1	0	ISO 527	%	Dehnung bei Bruch
Biegemodul, 23°C	Mechanisch	1	1	ISO 178	MPa	E-Modul (biegung), 23°C
Biegemodul	Mechanisch	1	1	ISO 178	MPa	E-Modul (biegung)
Biegefestigkeit	Mechanisch	0	1	ISO 178	MPa	Biegezugfestigkeit
Zug-Kriechmodul, 1h	Mechanisch	0	1	ISO 899-1	MPa	Kriechmodul
Zug-Kriechmodul, 1000h	Mechanisch	0	1	ISO 899-1	MPa	Kriechmodul
Charpy-Schlagzähigkeit, +23°C	Mechanisch	0	1	ISO 179-1eU	kJ/m <sup>2</sup>	Schlagzähigkeit nach Charpy (23°C)
Charpy-Schlagzähigkeit, -30°C	Mechanisch	0	1	ISO 179-1eU	kJ/m <sup>2</sup>	Schlagzähigkeit nach Charpy (-30°C)
Charpy-Schlagzähigkeit, +23°C, 3mm	Mechanisch	1	0	ISO 179-1eU	kJ/m <sup>2</sup>	Schlagzähigkeit nach Charpy (23°C), 3mm
Charpy-Schlagzähigkeit, -30°C, 3mm	Mechanisch	0	1	ISO 179-1eU	kJ/m <sup>2</sup>	Schlagzähigkeit nach Charpy (-30°C), 3mm

Im Vergleich dazu und zur weiteren Eingrenzung wurden von den Projektpartnern „MKV GmbH Kunststoffgranulate“ und „Hoffmann + Voss, Technische Kunststoffe GmbH“ Datenblätter ihrer auf dem Markt erhältlichen Rezyklate angefordert und die



enthaltenden Kennwerte zusammengefasst. Daraus ergaben sich 24 verschiedene sogenannte „Kernkennwerte“ mit 32 Attributen (besondere Eigenschaften).

### **4.3 Erstellung einer digitalen Applikation**

#### **4.3.1 Anforderungen und Spezifikationen**

Aus den Einblicken in die Problemlagen der Kunststoffwertschöpfungskette durch die Interviews in AP 1 konnten die Herausforderungen der Praxis identifiziert werden. Darauf aufbauend wurden die für den Einsatz der Software relevanten Rahmenbedingungen bzgl. Nutzern, IT-Infrastruktur, Anwendungsbereichen und funktionalen Anforderungen abgeleitet.

Zudem wurde eine Zielgruppe der Softwareanwender definiert, bestehend aus: Kunststoffverarbeitern, Kunststoffabfall-Zwischenhändlern, Entsorgungs- sowie Recycling-Unternehmen (Mahlbetriebe und Aufbereiter).

Die Software sollte demnach:

- Die Unternehmen in die Lage versetzen:
  - relevante, bisher noch nicht verfügbare Informationen zu Materialien zu erhalten und diese entlang der Wertschöpfungskette auszutauschen
  - bislang nicht oder minderwertig eingesetzte Sekundärkunststoffe in größeren Mengen zu sammeln, aufzubereiten und in hochwertige Kreisläufe zurückzuführen
  - die damit im Zusammenhang stehenden Mengen-, Qualitäts-, Informations- und Datensicherheitsprobleme zu überwinden
- Rückverfolgbarkeit von Materialien und zugehörigen Informationen entlang der Wertschöpfungskette liefern und damit Transparenz sowie Vertrauen zwischen den Akteuren schaffen, um Vorbehalte gegen Recompounds zu beseitigen
- Beratungsfunktionen für Kunststoffverarbeiter beinhalten, die fundierte Informationen zur Materialauswahl und anschließenden Verarbeitung bereitstellt.
- durch eine vorgeschaltete Qualitätskontrolle Recompoundeure bei Auswahl und Kauf ihrer Rohstoffe unterstützen
- mit der neu entwickelten Sensortechnologie zur Onlineschlagzähigkeitsmessung, welche Prozessdaten kontinuierlich erfasst, verbunden sein
- In Workshops wurden in Zusammenarbeit mit den Branchenexperten des SKZ aus den Anforderungen eine Software-Spezifikation entwickelt, die als lebendes Dokument den aktuellen Stand der Entwicklung der Applikation bzw. des Zielrahmens abbilden sollte und zudem als zentrales Kommunikationsinstrument für alle Partner das gemeinsame Verständnis der Applikation dokumentierte. Darin hat sich eine betriebssystemunabhängige Webanwendung als am besten geeignete Option herausgestellt, die gleichzeitige mobile und stationäre Nutzung ermöglicht.

In Vorbereitung der Implementierung der anwenderorientierten Applikation wurden eine Softwarearchitektur skizziert und funktionale Komponenten definiert. Um die Benutzeroberfläche möglichst verständlich und zielgruppengerecht zu gestalten, wurden Workshops und Interviews mit Partnern durchgeführt. Es wurden so genannte User Stories erarbeitet, eine agile Methode, die gewünschte Funktionalitäten eines Systems aus Sicht der verschiedenen Anwender beschreibt. Die entsprechenden

Anwendungsszenarien wurden den Praxispartnern präsentiert und in einem virtuellen Feedback-Workshop getestet und verbessert. Weiterhin wurden mit verschiedenen Akteuren aus der Praxis virtuelle Workshops und Feedbackgespräche durchgeführt: um Nutzeranforderungen und -vorschläge zu den o.g. Anwendungsszenarien, User Stories sowie zur Bedienerführung einzuholen, zur Klärung der Anforderungen an Datenzugriffsmöglichkeiten und -sicherheit und zur Konzeption des Umgangs mit Materialdaten.

#### **4.3.2 Demonstrator**

Für die iterative Entwicklung im Laufe des Projektes wurde ein Demonstrator der Applikation erstellt. So konnten Funktionen von den Projektpartnern getestet werden und das darauf basierende Feedback in die weitere Entwicklung einfließen. Der Realisierung des Demonstrators als Webapplikation liegt eine bewährte zweischichtige Softwarearchitektur aus Backend und Frontend zugrunde. Mit Backend („Rückseite“) wird dabei vereinfacht die Komponente beschrieben, welche die Datenspeicherung und die Geschäftslogik übernehmen und sich in der Regel auf dem Server, entfernt vom Benutzer befindet, während das Frontend eine Komponente bereitstellt, die direkt vom Benutzer bedient wird, z. B über einen Webbrowser.

#### **4.3.3 Backend**

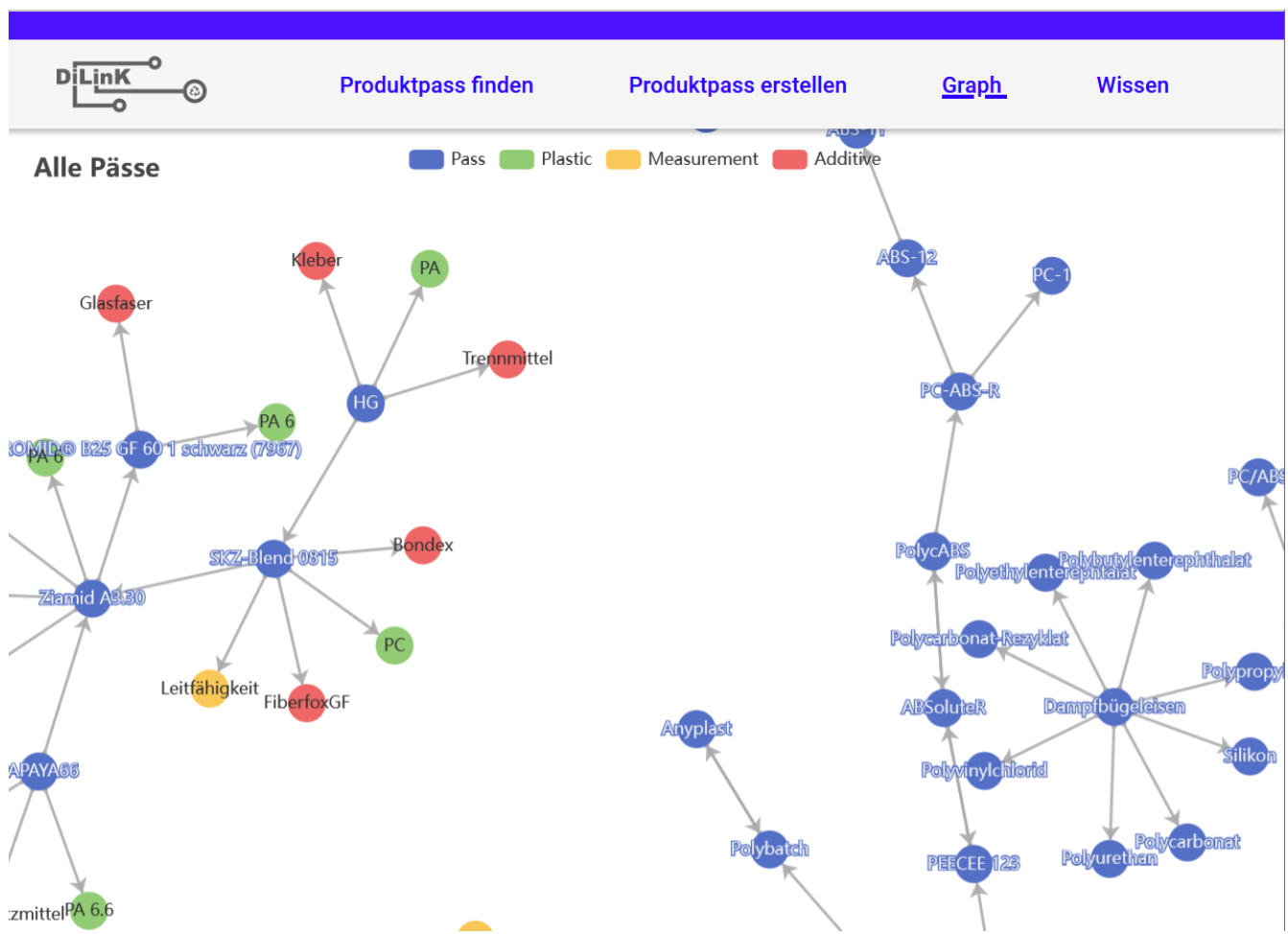
Die Serverseitigen Funktionen und die Nutzerverwaltung der Applikation werden im im Back-End implementiert. Bei der Umsetzung des Backends wurden in der initialen Designphase zunächst verschiedene Ansätze und Technologien hinsichtlich Ihrer Eignung in Anbetracht der Anforderungen und bestehenden Kompetenzen seitens Infosim evaluiert. Als Architektur des Backend-Servers wurde das Microservice Framework Quarkus gewählt. Bei dieser Architektur werden einzelne Komponenten in separaten Services implementiert, die untereinander sowie mit dem Frontend kommunizieren. Bei hoher Last oder fehlerbasierten Abstürzen bestimmter Komponenten können dynamisch weitere Services mit der gleichen Funktionalität gestartet werden und so eine hohe Skalierbarkeit und Fehlertoleranz gewährleisten. Als relevante Microservices wurden hier bspw. identifiziert: ein API-Gateway, der sämtliche Schnittstellen zur Kommunikation mit dem Frontend bereitstellt und als einziger Zugriffspunkt des Backends eingehende Anfragen auf Fehler überprüft und böswillige Angriffe verhindert; ein Service zur Kommunikation mit der Datenbank für Materialdaten, der Schnittstellen zum Abfragen und Bearbeiten der Daten bereitstellt sowie ein eigens zu entwickelnder Service zur Datenanalyse

Es wurde ein umfassendes domänenspezifisches Datenmodell erstellt, das die notwendigen Klassen zur Repräsentation von Kunststoffzyklaten und -abfällen beinhaltet und es ermöglicht, die Wertschöpfungsnetze in der Applikation abzubilden.

In Bezug auf das Konzept der DiLinK-Webapplikation, die verfügbaren Informationen zu Kunststoffabfällen und -rezyklaten, wie z. B. Zusammensetzung, technische Eigenschaften und Anwendungsinformationen, digital abzubilden und entlang der Wertschöpfungskette, das physische Produkt begleitend bereitzustellen, hat sich gezeigt, dass der zugrundeliegende Ansatz große Überschneidungen mit dem von der EU während der Projektlaufzeit initiierten Digitalen Produktpass aufweist. Da sich damit große Chancen für die zukünftige Anwendung von DiLinK bieten, wurde entschieden,

das Konzept konsequent auf den Digitalen Produktpass auszurichten und damit ein erstes Proof-of-Concept für Kunststoffe zu schaffen, in dem jeweils ein als Produkt abgrenzbares Kunststoffmaterial durch einen Digitalen Produktpass repräsentiert wird.

In Zusammenhang dieser Arbeiten hat sich herauskristallisiert, dass insbesondere bestehende Abhängigkeiten und Beziehungen, und zwar nicht nur zwischen einzelnen Pässen, die jeweils ein Material abbilden, sondern auch der Bestandteile zusammengesetzter Pässe (wie z.B. Additive, Kunststoffkomponenten) in der Praxis höchst relevant sind und in den Demonstrator integriert werden sollten. Entsprechend wurde das ursprüngliche Konzept der Software im Projektverlauf angepasst und die Entscheidung für eine graphbasierte Lösung getroffen. Die zuvor modellierten Datenstrukturen wurden in eine Graphdatenbank überführt. Hier konnte auf die Open-Source-Datenbank Neo4j zurückgegriffen werden (siehe Abbildung 22).



**Abbildung 22** Abhängigkeiten und Beziehungen zwischen einzelnen Pässen und Bestandteile zusammengesetzter Pässe (eigene Abbildung Infosim)

Der graphbasierte Ansatz ermöglicht bestehende und auch zukünftig potenzielle Verbindungen darzustellen und datenbasiert zu identifizieren. Damit können insbesondere mögliche Kreisläufe aufgezeigt werden, z.B., um durch anschließende gezielte Materialsubstitutionen Neuware durch Rezyklate zu ersetzen.

#### 4.3.4 Intelligente Datenverarbeitung

Begleitend zur technischen Implementierung fand die Entwicklung von Methoden zur intelligenten Datenverarbeitung statt. Dies umfasst zum einen die Implementierung einer Methode zur effizienten Datenextraktion aus vorhandenen Datenquellen. Der „Daten-Extraktor“ ermöglicht die automatisierte Extraktion von materialspezifischen Daten aus (teil)strukturierten Quellen, wie z. B. Webseiten, Materialdatenblättern, und soll die Nutzung der Software vereinfachen sowie die Nutzerakzeptanz erhöhen, indem die extrahierten Daten direkt in Produktpässe übernommen werden können.

Zum anderen wurde eine Ähnlichkeitsbewertung von Kunststoffen entwickelt, die als Basis eines Matchmakings von Kunststoffeigenschaften und Anforderungen aus Anwendungen dienen soll und u.a. potenzielle Materialsubstitutionen datenbasiert unterstützen zu können. Nach umfangreicher Recherche nach geeigneter wissenschaftlicher Literatur in diesem dynamischen Forschungsgebiet wurden verschiedene Lösungsansätze verfolgt, wie Recommender-Systeme und Machine Learning-Verfahren, z. B. mittels Neuronaler Netze oder Klassifikation mittels k-Nearest-Neighbour Algorithmus. Letzteres Verfahren wurde ausgewählt und als Proof-of-Concept implementiert und getestet. Hierfür musste zunächst eine hinreichende Menge an Testdaten zu Kunststoffen bzw. deren Eigenschaften gesammelt, aufbereitet und aggregiert werden. Anschließend wurde experimentell ermittelt, mit welchen Parametern die Matching-Methode die besten Ergebnisse erzielt. Die Methode wurde in der Programmiersprache Python implementiert, wobei Standard-Bibliotheken wie z. B. Pandas, NumPy und Scikit-learn verwendet wurden. In Anbetracht der für Machine Learning i.d.R. benötigten Datenmengen, die bisher nicht zur Verfügung standen, lassen die Zwischenergebnisse auf mit zunehmender Datenverfügbarkeit gute Ergebnisse hoffen.

#### 4.3.5 Schnittstelle

In Zusammenarbeit mit den Kunststoffexperten des SKZ wurde eine Schnittstelle zur Anbindung von Prüfergebnissen und Sensorik an die Webplattform definiert und so genannter Softwareagent entwickelt. Dieser wird von den Nutzern der Plattform auf einem firmeninternen Gerät installiert und konfiguriert, sammelt vor Ort die gewünschten Daten und übermittelt sie anschließend zur Plattform. In diesem Fall liefert er Spektroskopie-Messergebnisse (aus AP 2.2) für ein spezifisches Material, die direkt in den zugehörigen Digitalen Produktpass übernommen werden können. Die Kommunikation zwischen dem Agenten und dem API-Gateway der Plattform erfolgt über eine REST-basierte Schnittstelle.

#### 4.3.6 Frontend

Die Entwicklung des Frontends teilt sich in den Designprozess der Benutzeroberfläche und die Implementierung der Anwendung auf.

Der Designprozess wurde begonnen, indem zunächst eine funktionale Struktur der Webapplikation entwickelt und erste Skizzen erstellt wurden, um erste Eindrücke zu Funktionalität und Benutzerfreundlichkeit der Applikation vermitteln und weiterentwickeln zu können. Diese wurden durch die Praxispartner, mithilfe von Online-Kooperationstools (z. B. Mural, Optimalsort), interaktiv bewertet. Das Design der Anwendung richtete sich anschließend nach den gewonnenen Erkenntnissen.

Konkret betrifft das beispielsweise die Einteilung der Informationen in diverse Unterseiten und die Anordnung der Menüpunkte. Diese gingen unmittelbar in die Implementierung der Benutzeroberfläche ein. Im weiteren Designprozess wurde basierend auf diesen Grundlagen ein Gestaltungskonzept inkl. Farbpalette entworfen und zusammen mit den erarbeiteten User Stories in Mockups umgesetzt. Gestaltung und Formatierung einzelner Elemente der DiLinK-Webapplikation konnten mithilfe der verwendeten Software (AdobeXD) direkt in der für die Implementierung des Frontends benötigten Sprache CSS zur Verfügung gestellt werden.

Die Implementierung des Frontends wurde mittels Angular Framework umgesetzt, in dem sowohl online als auch intern eine umfangreiche Auswahl an Komponenten zur Verfügung stand, mit der die Elemente aus dem Design-Mockup umgesetzt werden konnten. Es wurde eine Schnittstelle zur Kommunikation mit dem Backend, die Seitennavigation und das Management von Sessions und Cookies implementiert sowie das Backend über eine GraphQL-Schnittstelle angebunden.

Die fertige Benutzeroberfläche umfasst die Bereiche:

- Startseite: Allgemeine einführende Informationen zum Projekt und zu den Inhalten der Webapplikation
- Produktpass erstellen: Eingabe von Informationen zur Erstellung eines Digitalen Produktpasses für ein/en Kunststoffabfall bzw. -rezyklat
- Produktpass finden: Übersichtseite inkl. Suche vorhandener Produktpässe (
- Wissen: Präsentation der in AP 2.3 erarbeiteten Inhalte

## 5 Arbeitspaket 2.3 – Konzeption eines Wertschöpfungsnetzwerks

In Arbeitspaket 2.3 – Konzeption eines Wertschöpfungsnetzwerks wurden durch die Ergänzung der in AP 1 ermittelten Erkenntnisse drei zentrale Zielsetzungen verfolgt, um das Ecosystem genauer zu gestalten und die ressourceneffiziente Kreislaufschließung durch die DiLink-Anwendung zu ermöglichen.

- 1) Konzeption und Visualisierung eines zukünftigen Wertschöpfungsnetzwerks durch Anwendung der Methode des Business Ecosystem Designs
- 2) Konzept für einen gemeinschaftlichen Kooperationswettbewerb (Kooptition)
- 3) Geschäftsmodellmuster für Kunststoffverarbeiter und weitere Dienstleister für die Kreislaufführung (basierend auf der Anwendung)

Für dieses Arbeitspaket wurde die Definition des Forschungsinstituts für Rationalisierung (FIR) zugrunde gelegt, in der der Begriff Business Ecosystem als eine dynamische, zumindest teilweise offene Struktur verschiedener voneinander abhängiger, aber autonomer Akteure verstanden wird, die ihre Aktivitäten auf ein gemeinsames Ziel hin koordinieren, um gemeinsam einen Mehrwert zu schaffen. Für die Entwicklung des Business Ecosystems wurden die Ergebnisse von AP 1 herangezogen, in dem die aktuellen Hemmnisse der Kunststoffkreislaufwirtschaft zusammengefasst wurden. Darauf aufbauend wurden die jeweiligen Lösungsvorschläge mit Hilfe der DiLink Anwendung gegenübergestellt. So konnten Anforderungen an das Wertschöpfungsnetzwerk und an DiLink definiert werden.

### Hemmnisse der Aktuellen Kreislaufwirtschaft gegenübergestellt mit Lösungsansätzen als Input für das Ecosystem Design

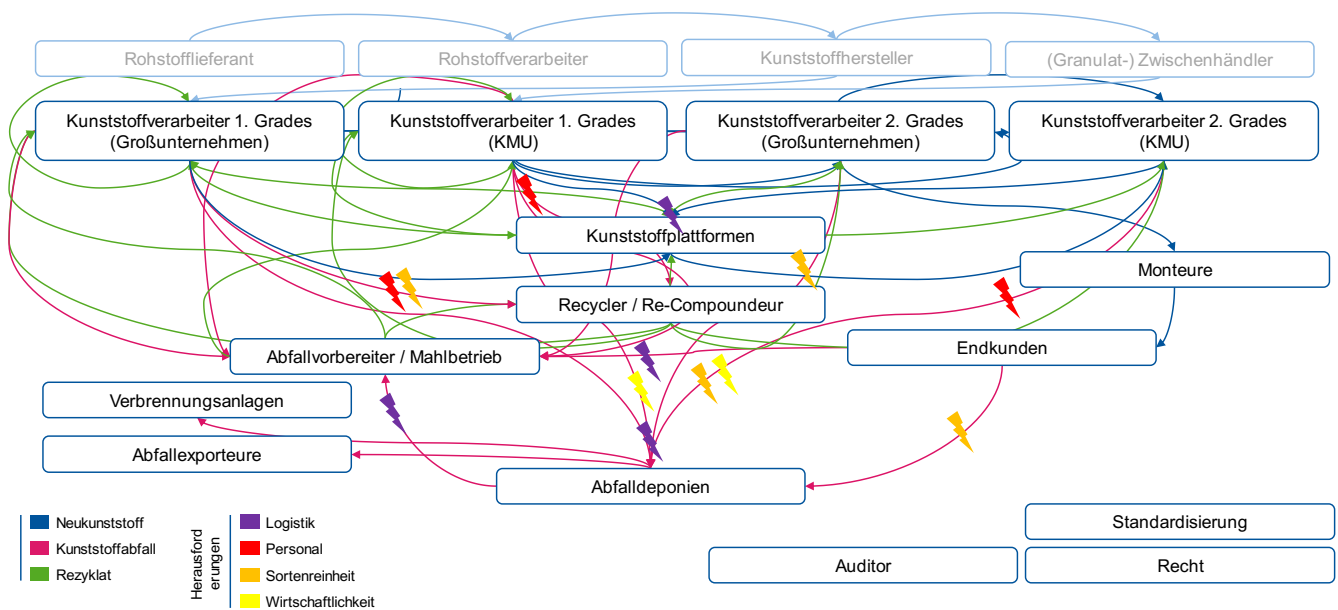
Problem:	Erörterung	Lösung
Sortenreine Input-Mengen des Mahlbetriebes zu klein	Mengen und Kunststofftypen sind nicht in dem Maße verfügbar, wie sie gebraucht werden Unzuverlässigkeit bei Abnahmemengen führt zu fehlender strategischen Bedeutung Volumen und Verfügbarkeit(-schwankung) als Problem	Matchmaking und „Gesuche“ Aufgabe führt ggf. zu höherer Menge an Sortenreinem Input Darlegung der potenziell zu erzielenden Gewinne bei Sortentrennung als Teil der Beratung (Incentivierung der reinen Abfälle bzw. Abfalltrennung) Plattformfunktion führt zur Glättung an Angebot und zu variableren Bezugspunkten
Vermarkung und Abnahme Mahlgut	Geringe Output-Mengen führen zu schlechten Abnahme Voraussetzungen Akteur Händler als Lösung, die Mühsam kleine Mengen Bündeln → Schwieriges Matchmaking	Angebot kleiner Mengen auch über Plattform realisierbar (höhere Wahrscheinlichkeit für Kundenfindung und einmaliger Aufwand bei der Angebotserstellung) Intermediär Händler über Plattform ggf. ersetzbar oder erleichtertes Management für Händler;
Unzureichende Verlässlichkeit bei den Mengen vom reinen Recompounds		Händler- oder Logistik-Konzept, das es erlaubt einem Kunden von verschiedenen Partnern zu bestellen, und Auslastung der LKW fördert Plattformfunktion führt zur Glättung an Angebote und variablem Bezugspunkten
Kleine sortenreine Abfallmengen lohnen sich nicht zu mahlen	Menge <1000 kg → keine Vermahlung, sonst müssen Maschinenrückkosten zusätzlich gezahlt werden → Prüfaufwände bei kleinen Mengen genauso groß wie bei kleinen Mengen	Spezifizierung auf besondere Marktbedürfnisse pro Mahlbetrieb (ggf. in Absprache mit Recompounder als neue Co-Creation)
Störfaktoren bei Sortenreinheit nicht überschaubar	Input meist ohne Lieferantenerklärung bekommt; Sortenrein aber Oberflächenverunreinigt bspw. durch Vorbehandlung, Softlacke und Lackierungen oder weitere Störfaktoren;	Nachverfolgbarkeit der Materialien ab früher Wertschöpfungsphase; Spezifische bzw. lokale Kreisläufe schließen (Abfall wird nach Aufbereitung mit sehr ähnlichen Abfall ans selbe Unternehmen zurückgeführt) Abfälle mit Informationen über Inhalt führen zu besser abzuschätzenden Eigenschaften.
Mahlgut teils mit unzureichender Qualität bei Rezyklat-Herstellern	Rezyklierer kümmern sich selbst um Wareneingangskontrolle und wissen dann sicher, was sie vor sich haben; Wer haftet, wenn es nicht so wäre? Mahlbetriebe meist „Schrotthändler“ ohne Anspruch auf qualitativ hochwertige Endprodukte	Lösung: Sortiersystem und Rückverfolgbarkeit des Materialtyps? → Rezyklierer sehen das kritisch → Grund: SG-Betrieb will seinen Abfall möglichst schnell und für etwas Geld loswerden (kein kompliziertes Sortiersystem, funktioniert in der Praxis nicht; Abfallgedanke im Vordergrund) Doppellösung: Anreize über Di-Link Matching finden mit aufgezeigten potenziellen Gewinnen
Hemmnisse bzgl. Rezyklateinsatz	Kundenanforderungen verhindern sehr oft den Einsatz von Rezyklaten → Änderung / Lockerung „Psychologisches Problem“ → viele trauen sich nicht Rezyklate einzusetzen	Informationsbereitstellung über Di-Link Web Applikation (Informationsflüsse) Nachvollziehbarkeit der Rezyklate als Psychologischer Vorteil; Aufklärung bzgl. Anwendbarkeit und Eigenschaften
Vorbehalte auf Grund unsicherer und geringer Qualität	Vorbehalte gegen Recompounds (Unsichere und geringe Qualität) (fehlende historisches Vertrauen; schlechte Vergangenheit)	Nachweis der hinreichenden Qualität über online Prüfverfahren;
Händische Informationsweitergabe von Rezyklat an Mahlbetrieb	Rückmeldung Rezyklierer an Zulieferer → „Wie war die Ware?; Rezyklierer gibt Daten an Mahlbetrieb weiter, damit er in seinen Produktionsprozess eingreifen und sich verbessern kann	Austausch über Datenplattform inkl. zurückgehende Informationen über Kundenfeedback (?)
Überzogene Anforderung für Rezyklate		Nachweisbarkeit des Ursprungs und der Qualität für Kommunikation an Auditoren und Regulierende Instanzen nutzen

Abbildung 23 Hemmnisse der aktuellen Kreislaufwirtschaft gegenübergestellt mit Lösungsansätzen als Input für das Ecosystem Design

In einem ersten Schritt wurden, basierend auf den Forschungsergebnissen aus AP 1 die einzelnen Akteure in konkrete Rollen im Wertschöpfungsnetzwerk des Status Quo überführt. Dies diente als Grundlage für die Entwicklung des Business Ecosystems von DiLink. Hierfür wurde für alle 19 Rollen eine systematische Beschreibung

vorgenommen. So wurden die Austauschbeziehungen mit anderen Akteuren („Nachgelagert“ und „Vorgelagert“) erfasst. Nutzungs- und Verteilungseigenschaften wurden unter dem Begriff der „Wertschöpfung“ zusammengefasst. Hinzukommend wurden die Auswirkungen einer steigenden Verwendung von Sekundärkunststoffen auf die Rolle beschrieben. Die folgende Abbildung 24 zeigt die 19 relevanten Rollen, die identifiziert wurden, sowie die verschiedenen Herausforderungen, mit denen die Kunststoffkreislaufwirtschaft derzeit konfrontiert ist (Ergebnisse aus AP1). Jene wurden, wie in der Legende erkennbar in Logistik, Personal, Wirtschaftlichkeit und Sortenreinheit klassifiziert.

**Business Ecosystem des Kunststoffkreislaufs  
Herausforderungen im Status Quo**



**Abbildung 24 Visualisierung des Business Ecosystem der Kunststoffindustrie im Status Quo und aktuelle Herausforderungen (eigene Abbildung FIR)**

Das zukünftige Soll-Business Ecosystem wurde vom FIR durch ein zweigeteiltes Vorgehen entwickelt: Zum einen konnten durch die Annahme der Lösungen, welche von den in AP1 identifizierten Herausforderungen abgeleitet wurden, neue Rollenbilder identifiziert werden.

Durch eine iterative Erweiterung dieser Rollen wurde das bestehende Wertschöpfungssystem optimiert und bzgl. der neuen Anforderungen weiterentwickelt. Zum anderen wurde ein Soll-Business Ecosystem für DiLink entwickelt. Hierfür wurde die Methode von Wieninger et al., ein vom FIR entwickelter Forschungsansatz, weiterentwickelt und effizient zur Visualisierung und Vorgehenserläuterung genutzt. Konkret wurde diese Methodik vom FIR weiterentwickelt, da deren Grundlage sich am besten eignet, um bei Forschungsprojekten wie DiLink, mehrere Akteure in das Ecosystem einzubeziehen. So kann ein allumfassendes Verständnis des Ecosystems geschaffen werden. Hierdurch kann die Koopetition und die Substituierbarkeit der verschiedenen Ecosystem Mitglieder gezielt analysiert und Wahrnehmungsunterschiede aufgezeigt werden. Die Methodik lässt sich in 4-Phasen aufgliedern:



*Phase 1: Business Ecosystem Identifizierung*

In dieser Phase wurden grundlegende Ideen hinsichtlich der Value Proposition analysiert und diese klar formuliert.

*Phase 2: Business Ecosystem Analyse*

Auf Grundlage beschriebener Funktionseigenschaften der Unternehmen wurde deren Ersetzbarkeit sowie Kooperations- und Wettbewerbsverhältnis bewertet und abschließend den Koopetitionsindex zu ermittelt.

*Phase 3: Business Ecosystem Visualisierung*

In diesem Schritt wurden der ermittelte Koopetitionsindex, Ersetzbarkeitsverhältnisse sowie das weitere Umfeld, wie die Gesetzgebung, ins Verhältnis zueinander und zu den am Ecosystem beteiligten Akteuren gesetzt und visualisiert. Dies ermöglichte eine ganzheitliche Analyse des Ecosystems.

*Phase 4: Ableitung von Strategien*

Anhand der allumfassenden Analyse aus Phase 3 wurden in diesem Schritt neue konsistente Strategien für die Ausgestaltung des Ecosystems abgeleitet.

Die übergreifende Methode für die Gestaltung des Business Ecosystem ist in der folgenden Abbildung dargestellt.

**Mit der wertschöpfungsorientierten Business-Ecosystem-Analyse haben wir die Anspruchsgruppen und deren Rollen für eine zukunftsorientierte zirkuläre Wertschöpfung definiert**



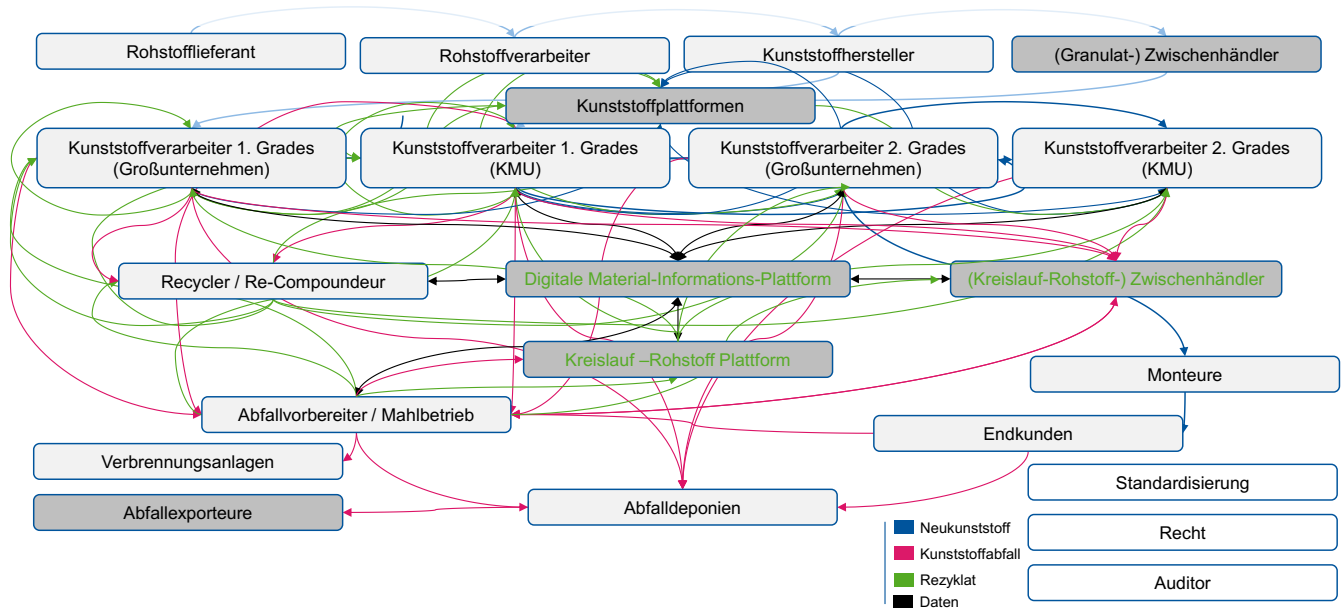
**Abbildung 25 Die aus vier Phasen bestehende Methode der Business Ecosystem Analysis (eigene Abbildung FIR).**

Mit Hilfe des Ansatzes, der am FIR entwickelt wurde, konnten ein Soll-Wertschöpfungsnetzwerk entwickelt sowie die bereits identifizierten Rollenbilder und Aufgaben der Akteure in dem Wertschöpfungsprozess bestätigt werden. Die benötigten Erkenntnisse konnten auf Grund ausgewerteter Feedback-Gespräche sowie einer Gegenüberstellung von Hemmnissen in der aktuellen Kreislaufwirtschaft und deren Lösungen ermittelt werden. Nutzungs- und Verteilungseigenschaften der unterschiedlichen



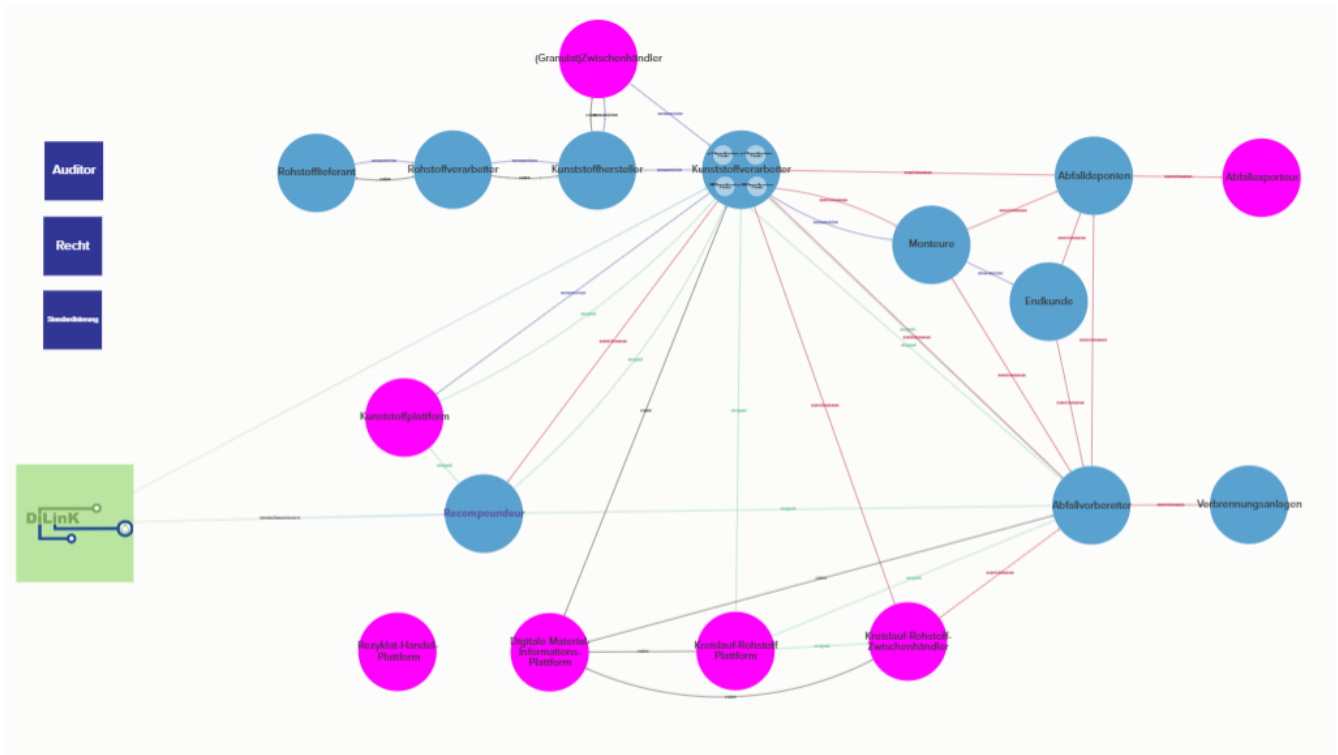
Rollen wurden in das Wertschöpfungsnetzwerk aufgenommen. Ebenfalls ergänzt wurden Akteure, die durch die Kreislaufschließung neu hinzukommen.

Die Ergänzung von Akteuren, wie beispielsweise die verschiedenen Plattformen (siehe folgende Abbildung in grün), zeigt auf, dass durch die Value Proposition von DiLink verschiedene Akteure innerhalb der Kreislaufwirtschaft verknüpft werden, sodass eine gesteigerte Einsetzbarkeit von Rezyklaten durch valide Informationsbereitstellung über deren Qualität, Ursprung und Mengen erzielt werden kann. Es kommt zum Austausch von Daten und anderen relevanten Informationen, wodurch ein Match-Making von einzelnen Mitgliedern des Ecosystems gestaltet werden kann.



**Abbildung 26 Soll-Business Ecosystem des Kunststoffkreislaufs inkl. neuer Akteure und Austauschbeziehungen (eigene Abbildung FIR).**

Aufgrund der großen Menge an Informationen und durch die Einführung neuer Rollen wurde die Darstellung für ein statisches Bild zu komplex. Das FIR hat die Plattform „KuMu“ für eine genauere Visualisierung des Business Ecosystems hinzugezogen (Abbildung 27).



**Abbildung 27 Komplexes Business Ecosystem des Kunststoffkreislaufs. Darstellung über KuMu (eigene Abbildung FIR).**

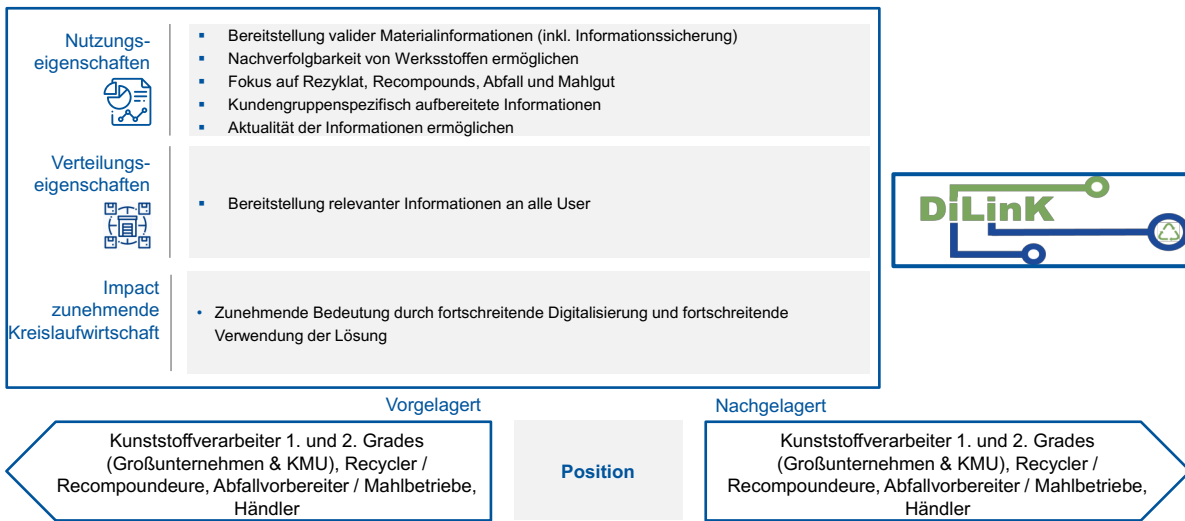
Anhand der Nutzung von „KuMu“ konnten Wechselwirkungen, Schnittstellen, Abhängigkeiten etc. anschaulicher dargestellt werden. Die neu ermittelten Akteure wurden ebenfalls in das Modell mitaufgenommen. So konnte aufgezeigt werden, wie die in AP1 ermittelten Ist-Zustände durch zukünftige Wechselbeziehungen verändert werden.

Beispielsweise werden Akteure wie Rohstofflieferanten in der zukünftigen Kreislaufwirtschaft an Relevanz verlieren, da durch die steigende Sekundärverwertung die Abhängigkeit bzw. der Nutzen vom Rohstofflieferant sinkt. Hingegen wird die Bedeutung von Austauschplattformen wie DiLinK ansteigen. Der Grund hierfür sind Funktionen wie die Bereitstellung von qualitativ-hochwertigen Materialien bzw. Rohstoff-Informationen anhand geprüfter Messtechniken oder der Beratungsfunktion. Somit können Sekundärstoffe in den Kunststoffkreislauf effizient zurückgeführt werden. Dem wirtschaftlichen sowie gesellschaftlichen Druck zur Entwicklung alternativer Rollen und Umorientierung zu nachwachsenden Rohstoffen kann nachgekommen werden. Die detaillierte Beschreibung aller Rollen kann für gesteigerte Lesbarkeit dem Anhang entnommen werden.

Im neuen Soll-Business-Ökosystem wurden die neuen Rollen unter Berücksichtigung der Nutzungseigenschaften, Verteilungseigenschaften sowie der Relevanz für die Kreislaufwirtschaft beschrieben. In Abbildung 6 ist die neue Rolle der digitalen Material-Informationen-Plattform mit der dazugehörigen Beschreibung zu sehen.

## Digitale Material-Informations-Plattform

### Wertschöpfung



**Abbildung 28** Beschreibung der neuen Rolle: Digitale Material-Informations-Plattform (eigene Abbildung FIR).

Der erste Entwurf des Soll Wertschöpfungssystem, der durch das FIR entwickelt wurde, wurde in 4 intensiven Workshops mit den Projektpartnern diskutiert und weiterentwickelt. Weiterhin wurde die wertschöpfungsorientierten Business-Ecosystem-Analyse aus der Perspektive von drei unterschiedlichen Akteuren im System durchgeführt. Mit diesen drei Akteuren (Infosim, SKZ, Hoffmann & Voss) wurde auch noch die individuelle Gestaltung von kooperativen Geschäftsmodellen im neuen Soll-Wertschöpfungssystem durchgeführt.

Um die Visualisierung des Business-Ökosystems weiterzuentwickeln, wurde eine Kreis-Ersetzbarkeit-Analyse durchgeführt. Die notwendigen Daten, um die Funktion sowie die Ersetzbarkeit und die Koopetitivität bewerten zu können, wurden in den Workshops mit Kooperationspartnern individuell erarbeitet. Auf diese Weise war es möglich, eine Ersetzbarkeitsanalyse durchzuführen, die ausgewertet und mit dem Durchschnittswert anderer Projektpartner verglichen wurde. In zweiter Instanz war es auch möglich, den Koopetitions-Index zu ermitteln. In Anlehnung an die Schritte der Ersetzbarkeits-Analyse, wurde diese ausgewertet und mit dem Durchschnittswert der anderen Projektpartner verglichen. Anhand der durchgeführten Kreis-Ersetzbarkeitsanalyse war es möglich, das Konzept für einen gemeinschaftlichen Kooperationswettbewerb unter Berücksichtigung der DiLink Anwendung zu konsolidieren.

Das resultierende wertstromorientierte Business Ecosystem für DiLink ist in *Abbildung 7* dargestellt. Im Folgenden werden die Schritte zur Erarbeitung noch weiter erörtert.

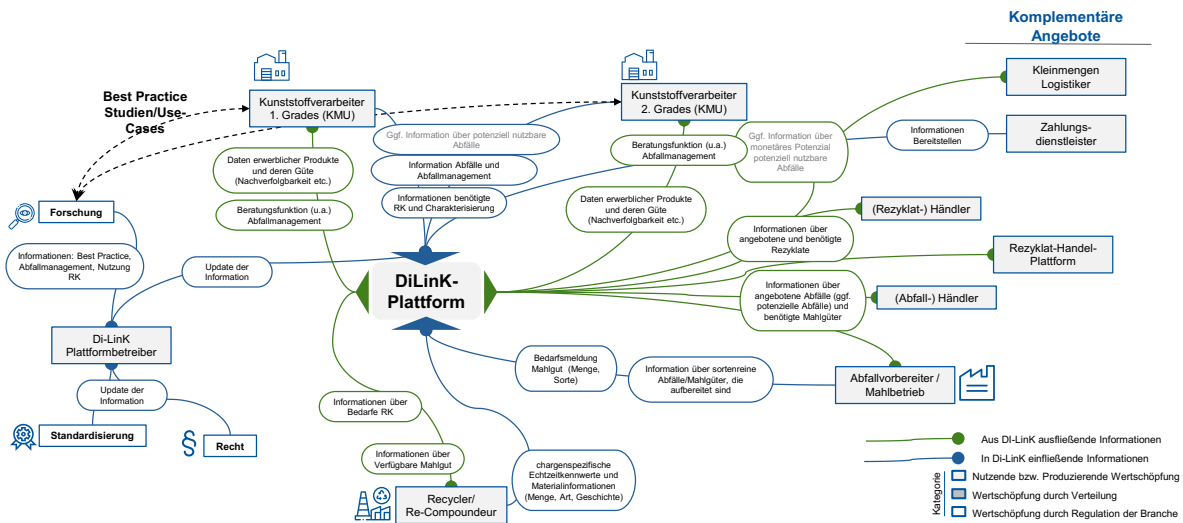


Abbildung 29 Neugestaltetes Wertstromsystem unter Integration der Di-LinK Lösung (eigene Abbildung FIR).

Vor der Entwicklung der verschiedenen Geschäftsmodelle für die unterschiedlichen Rollen wurde gemeinsam mit den Projektpartnern die Value Proposition für die DiLink -Anwendung erarbeitet:

**DiLink ist eine datenzentrierte Plattform zur gesteigerten Einsetzbarkeit von Rezyklaten durch valide Informationsbereitstellung über Qualität, Ursprung und Nutzung.**

Auf den Workshopkenntnissen aufbauend konnten Konzepte für einen Kooperationswettbewerb erarbeitet werden. Als Beispiele hierfür dient die Problematik der zu kleinen sortenreinen Inputmenge: Die Mengen und Kunststofftypen, die die Mahlbetriebe zu Verfügung stellen können, sind nicht in dem Maße verfügbar, wie sie bspw. vom Recompoundeur gebraucht werden. Eine Folge kann Unzuverlässigkeit bei Abnahmemengen sein, diese führt zu fehlender strategischer Bedeutung, weshalb es zu einem Hemmnis in der Kreislaufwirtschaft im Bereich Volumen und Verfügbarkeit(-schwankung) kommt. Die Lösung wäre ein Angebot zum Matchmaking und „Gesuche“-Aufgabe. Dies führt ggf. zu höherer Menge an sortenreinen Inputmengen. Durch diese Plattformfunktion von DiLink kommt es zur Glättung an Angebot und zu variableren Bezugspunkten. Die Nutzungs- und Verteilungseigenschaften der jeweiligen Akteure würde sich diesbezüglich verändern, da nun bspw. Mahlbetriebe und Recompoundeure die benötigten Inputmengen liefern bzw. erhalten würden und so eine größere Menge an Ressourcen in die Kreislaufwirtschaft einführen könnten. Dementsprechend kommt es auch zu einer Anpassung des Geschäftsmodells und eines gemeinschaftlichen Kooperationswettbewerbs. Durch die genannten Ergänzungen sowie die Auflistung der verschiedenen Eigenschaften der unterschiedlichen Akteure wurden die Beschreibung und Gestaltung des in AP 2 zu ermittelnden Ecosystems detailliert erweitert sowie ein Konzept für neue Geschäftsmodellmuster entwickelt.

Es wurde zudem aufgezeigt, welche Geschäftsmodelle der Akteure bereits bekannt sind. Beispielsweise wurden diese Erkenntnisse aus den gemeinsamen Workshops mit

den Kooperationspartnern gezogen. Aus dieser Auflistung sind folgenden Fragen entstanden (siehe *Abbildung 8*).

- 1** Welche Akteure bleiben zukünftig relevant bzw. werden zukünftig relevant sein?
- 2** Welche Akteure könnten relevant sein, aber auch aus dem Markt verdrängt werden?
- 3** Welche Akteure sollten aus der Kunststoffproduktion ausscheiden? (werden es aber auf Grund der anhaltenden Notwendigkeit nicht)
- 4** Was sind die Kooperationsmöglichkeiten aufgrund des Wettbewerbs?
- 5** Welche Kooperationsmöglichkeiten bieten sich an, um ein gemeinsames Ziel zu erreichen?

**Abbildung 30 Fragestellungen bei der Entwicklung von neuen Geschäftsmodellen (eigene Abbildung FIR).**

Mit Hilfe eines Mural-boards wurden digitale Workshops mit den Projektpartnern durchgeführt. Diese wurden speziell auf die Rolle des jeweiligen Partners in dem Kreislaufsystem angepasst und hatten zum Ziel, passende Geschäftsmodelle zu identifizieren. Die Workshops folgten dem u. g. Vorgehen und wurden durch drei primäre Leitfragen strukturiert:

- I. Sind die aktuellen Arbeitsstände und erarbeiteten Lösungen valide?
- II. Haben diese Lösungen eine realistische Umsetzungschance?
- III. Welche (koopetitiven) Geschäftsmodelle werden zukünftig auf dem Markt entstehen? Ändern sich diese und welche werden für neue Akteure entstehen?

<b>1</b>	<b>Einleitung und Zusammenfassung des Projektes Di-Link</b>	09:00 – 09:30
<b>2</b>	<b>Entwicklung des neuen Business Ecosystems</b>	09:30 – 10:30
<b>3</b>	<b>Entwicklung potenzieller (koopetitiver) Geschäftsmodelle</b>	10:30 – 11:30
<b>4</b>	<b>Diskussionen &amp; Next-Steps</b>	11:30 – 12:00

**Abbildung 31 Agenda der Workshops am Beispiel des Workshops mit dem SKZ (eigene Abbildung FIR).**

Im ersten Schritt wurde das Ecosystem validiert sowie die funktionale Zuordnung erörtert und gemeinsam mit dem Projektpartner besprochen. Der Ansatz nach Wieninger et al. zur Analyse von unternehmerischen Ecosystems stellte die Basis der Workshops dar. Mit Hilfe dieses Tools sollte der jeweilige Projektpartner dazu angeleitet werden, seine eigene Rolle in dem neuen Ecosystem zu definieren, ihre Funktion kritisch und zukunftsorientiert zu hinterfragen sowie zu klären, ob bzw. wie leicht andere Akteure diesen Partner ersetzen können. Die Parameter der Ersetzbarkeit und der sogenannte Koopetitionsindex (*vgl. Abbildung 10*) boten eine quantifizierte Hilfestellung, um die o. g. Fragen zu beantworten und dem FIR dabei zu helfen, das neue Ecosystem primär aus der Perspektive der Unternehmen zu entwickeln.

Begonnen wurde daher mit der Identifizierung des Business Ecosystems sowie mit dem Herausarbeiten der Einflüsse der Kreislaufwirtschaft auf den jeweiligen Projektpartner.

In einem nächsten Schritt wurden die Ertragsmechaniken des Projektpartners aufgenommen sowie dessen Stärken und Schwächen herausgearbeitet. So konnte die Value Proposition erarbeitet werden. Dadurch konnte gemeinsam ermittelt werden, welcher Akteur in welcher Weise agieren wird.

Gleichzeitig wurden mit Hilfe einer Bewertungsskala weitere Rollen des Wertschöpfungsnetzwerkes als unverzichtbare bzw. verzichtbare Kooperationspartner oder als Konkurrenten eingestuft.

## Phase 2: Business Ecosystem Analyse

### a. Unternehmenszuordnung



© FIR e. V. an der RWTH Aachen

Unter Verwendung Wieninger et al. (2019)

21

**Abbildung 32** Beispiel für die Analyse des Business Ecosystems Phase 2. des SKZ. Inkl. Ersetzbarkeitsbewertung, Kooperationsanalyse und Unternehmenszuordnung (eigene Abbildung FIR).

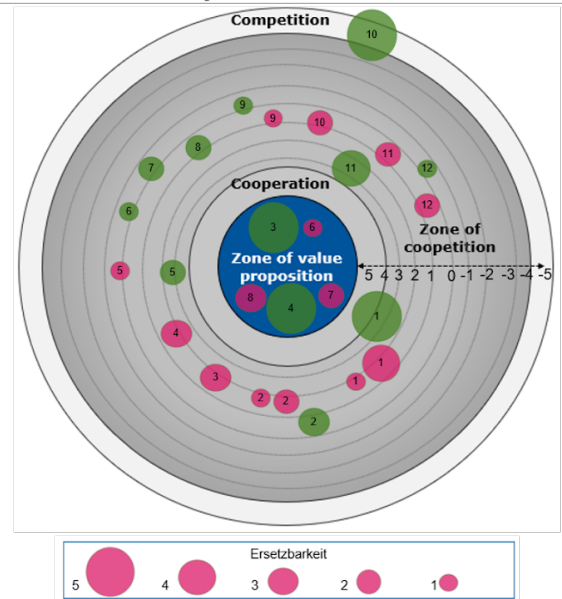


**Kreis-Ersetzbarkeitsanalyse auf Basis der Workshops**  
**Vergleich: Infosim und Hoffmann & Voss**

**Funktionen des Ökosystems**

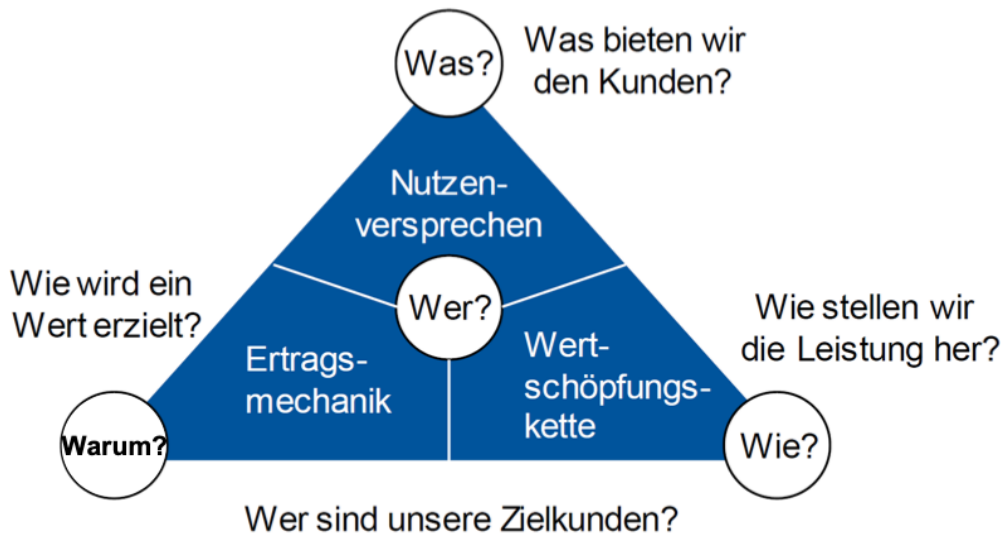
1. Messmethodik-Entwicklung & Herstellung
2. Messmethodik-Montage & Wartung
3. Erfassung der Chargen-Qualität der Rezyklate (intern)
4. Bereitstellung von Rezyklaten (intern)
5. Bereitstellung von Rohstoffen
6. Datenspeicherung & Auswertung (intern)
7. Applikation-Entwicklung (intern)
8. Bereitstellung & Optimierung Applikation (intern)
9. Transport Kleinmengen an Materialien
10. Bereitstellung von Bedarfs- und Angebots-Informationen
11. Bereitstellung Beratungsinformationen
12. Auditierung der Prozess- und Qualitätsmesstechnik

**Neue Methodik zur Förderung von kooperativen Modellen in Ökosystemen**



**Abbildung 33** Beispiel für einen Vergleich der Kreisersetzbarkeitsanalyse, die für Infosim und Hoffmann & Voss durchgeführt wurde (eigene Abbildung FIR).

Aufbauend auf diesen Ergebnissen wurden anschließend Kooperationspartner ermittelt sowie die Stärken und Schwächen des Partnerunternehmens erneut aufgegriffen und ergänzt. Anschließend wurden die Folgen für das Geschäftsmodell ermittelt und darauf aufbauend ein potenzielles zukünftiges (kooperatives) Geschäftsmodell anhand des St. Galler Business Model gemeinsam erarbeitet.



**Abbildung 34** St.Galler Business Model Navigator (GASSMANN U. FRANKENBERGER 2013)

Während des Workshops mit dem SKZ und den anderen Projektpartnern wurden weitere potenzielle Geschäftsmodelle erarbeitet und visualisiert.

Nach dem Austausch und der Sammlung von Informationen auf der Grundlage der Antworten auf die Fragen und eine Analyse der Ist-Zustände der Funktionsweisen der

Akteure, die an der Kunststoff-(Kreislauf)Wirtschaft beteiligt sind, wurde ermittelt, welche Akteure diesen nach bzw. vorgelagert sind, um mögliche Kooperationen zu ermitteln. Anschließend wurden die Funktionsweisen der jeweiligen Akteure analysiert, um eine Ersetzbarkeit mit zunehmender Kreislaufwirtschaft auszuschließen bzw. näher in Betracht zu ziehen. Bei diesem Schritt konnten zwei Gruppen von Akteuren unterschieden werden. Die erste Gruppe von Akteuren, die in ihrer Bedeutsamkeit zunehmen und eine zweite, die von den neuen Akteuren der Kreislaufwirtschaft verdrängt werden könnten. Beide Gruppen wurden mit potenziell konkurrierenden Akteuren verglichen. Schließlich wurden mit Hilfe des St. Galler Business Modell Navigator Geschäftsmodelle für eine Koopetition von unterschiedlichen Akteuren erfasst, um dessen Markterhalt zu sichern bzw. auszubauen.



Abbildung 35 Beispiel für ein potenzielles Geschäftsmodell für die Qualitätsmesstechnik/SKZ anhand des St. Galler Business Modells (eigene Abbildung FIR).

Insgesamt konnten im Zuge dieses Arbeitspaketes 19 Geschäftsmodelle (siehe Anhang Abbildung 28-47) für die zentralen Akteure des zukünftige Wertschöpfungsnetzwerk beschrieben und auf Validität getestet werden. Hierbei wurde der kooperative Charakter der Kreislaufwirtschaft besondere Beachtung geschenkt. Des Weiteren konnte das neue Soll-Wertschöpfungs-system (siehe Abbildung 4) des Kunststoffkreislaufs bestehend aus 22 Rollen und den dazugehörigen Rollenbeschreibungen (siehe Anhang Abbildung 1-22) sowie deren Austauschbeziehungen aufgezeigt werden. Hierbei wurden insbesondere die Veränderungen durch eine zunehmende Schließung des Kunststoffkreislaufes analysiert und. Die spezifischen Implikationen wurden in zwei



Praxisworkshops der Industrie insbesondere kunststoffverarbeitenden KMU vermittelt. Iterativ zu den Rollenbeschreibungen wurde mit der weiterentwickelten Methode der wertstromorientierte Business Ecosystem Analyse das Ökosystem und insbesondere die Informationsflüsse für die Di-LinK Lösung (*Abbildung 7*) entwickelt, und visualisiert. Koopetitive Zusammenhänge in diesem Ökosystem wurden durch die Methodik visualisiert (*Abbildung 11*) und detailliert mit den Industriepartnern diskutiert. Jene galten auch als zentrale Inputfaktoren für das Design der technischen Di-LinK Lösung.

## 6 Arbeitspaket 3.1 – Erprobung und Optimierung

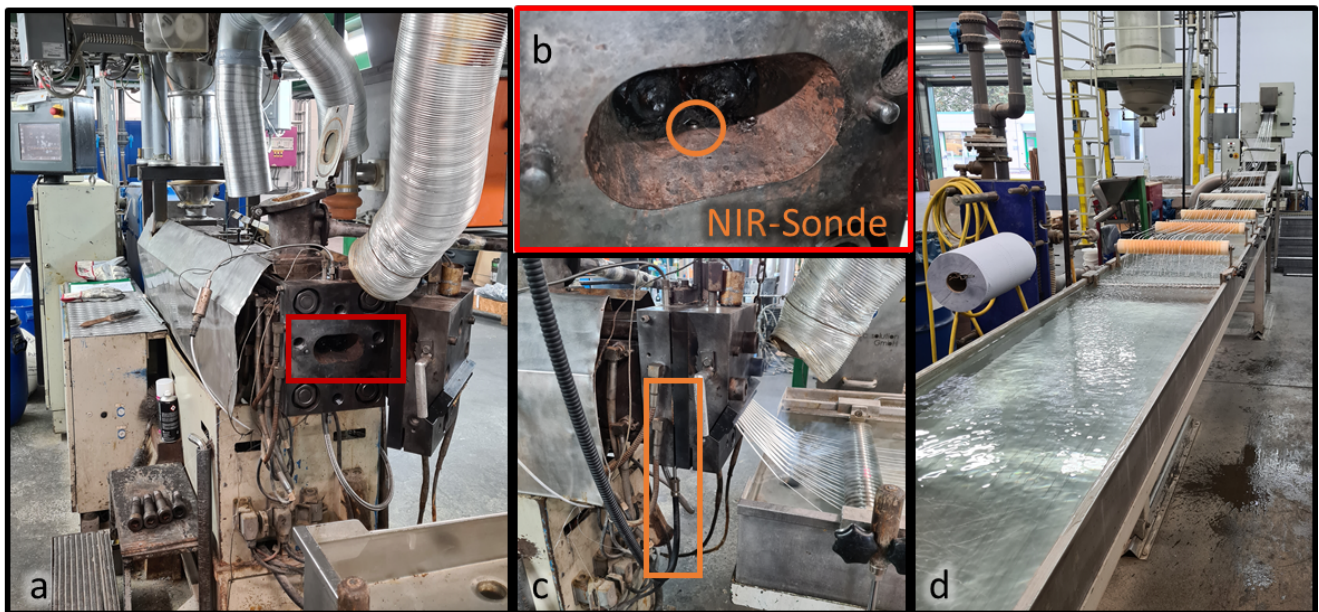
In diesem Arbeitspaket wurde die Inline-Spektroskopiemessung in der Praxis bei den zwei Industriepartnern getestet. Generell ist das Ziel, die Daten eines jeden Spektrums über eine Schnittstelle direkt an die Applikation zu übertragen. Die Kennwerttabelle sowie die Kernkennwerttabelle, als Basis für den Produktpass, wurde im Rahmen einer Bachelorarbeit als Umfrage unter Industrieakteuren überprüft. Arbeitsergebnisse aus den Spektroskopieversuchen und dem Projekt sollen im Rahmen von zwei wissenschaftlichen Artikeln veröffentlicht werden.

### 6.1 Software zur Ausgabe der Messergebnisse an die DiLink Applikation

Das AddiCheck-Spektrometer wird mit der Software TIDAS von J & M Analytik bedient. Diese ist auf LabView-Basis entwickelt und ermöglicht die Aufnahme und Vorverarbeitung von Spektren. Beim Verarbeiten speichert die Software die Spektren in einer temporären Datei. Um weitere Analysen auf den gemessenen Spektren durchzuführen, wurde ein Tool auf Python-Basis entwickelt, welches die Spektren in Echtzeit aus der zuvor beschriebenen temporären Datei ausliest. Anschließend werden die Spektren vorverarbeitet. Dabei werden die nicht für die Auswertung relevanten Randbereiche der Spektren entfernt. Zudem werden die Spektren abgeleitet, um den Sensor drift des Spektrometers zu eliminieren. Die Auswertung erfolgt durch eine Korrelation zwischen einem zuvor bestimmten Referenzspektrum und dem aktuell erfassten Spektrum. Die Differenz zwischen dem Referenzspektrum und der Korrelation beschreibt den Abstand der beiden Spektren und somit die Ähnlichkeit. Je größer die Differenz, desto unterschiedlicher sind sich die beiden Spektren. Die Bestimmung dieser Differenz bzw. ab wann sich die Schmelze zur Referenz so stark unterscheidet, dass die Qualität des Produktes darunter leidet, sollte in Vor-Ort-Versuchen evaluiert werden. Eine Möglichkeit besteht im Anfitzen einer parametrisierten Sigmoid-Funktion an die Messwerte. Nach der Auswertung jedes Spektrums, werden die Daten über eine Schnittstelle direkt an die App, die von Infosim entwickelt wird, übertragen.

### 6.2 Praxistest bei Hoffmann + Voss GmbH

Von Hoffmann + Voss wurde für die ersten Vor-Ort-Versuche eine ZSK 50 von Copeiron (ehem. Werner & Pfleiderer) mit einem Schmelzekanaldurchmesser von 50 mm zur Verfügung gestellt. Die Messsonde wurde im Düsenkopf direkt in der Nähe der Schnecken spitzen anstelle eines Temperaturschmelzeschwertes eingebaut. In Abbildung 1 ist der Messaufbau gezeigt.



**Abbildung 36** Versuchsaufbau des Praxistests bei Hoffmann + Voss. a) ZSK 50 mit offener Düse, b) Zoom auf offene Düse mit eingebauter NIR-Sonde, c) Seitenansicht der geschlossenen Düse im laufenden Betrieb mit NIR-Sonde, d) Kühlstrecke für Schmelzestränge mit Granulator am Ende (eigene Abbildung SKZ).

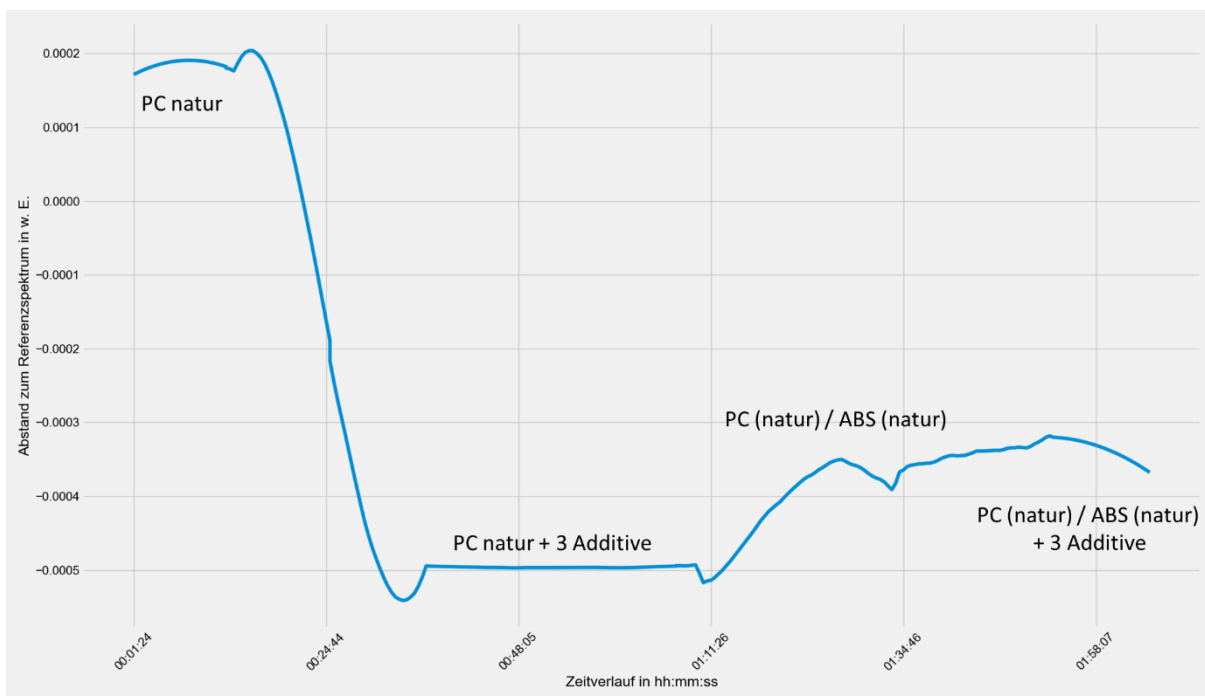
Bei den Versuchen wurden PC (naturfarben) und ein Blend aus PC (naturfarben)/ABS (naturfarben) sowie mit TiO<sub>2</sub> weiß eingefärbtes PC und ein Blend aus PC (weiß)/ABS (naturfarben) jeweils mit unterschiedlichen Additivkonzentrationen verwendet. Die PC-Materialien waren Rezyklate und das ABS-Neuware. Als Additive kamen die Entformungshilfe PETS (Herwemag P4S), der Hitzestabilisator Addovate ThermoStab und eine Mischung aus Euronox 26 und Thanox 626 zum Einsatz. Im Zuge der Versuche wurden folgende Kombinationen untersucht:

- PC natur
  - PC natur ohne Additive (als Referenz für Spektroskopie)
  - PC natur + alle 3 Additive
  - PC natur + ABS natur (1:1) ohne Additive
  - PC natur + ABS natur (1:1) + alle 3 Additive
- PC weiß (TiO<sub>2</sub>)
  - PC weiß ohne Additive (als Referenz für Spektroskopie)
  - PC weiß + alle 3 Additive
  - PC weiß + Euronox 26 / Thanox 626
  - PC weiß + Addovate ThermoStab
  - PC weiß + ABS natur (1:1) ohne Additive
  - PC weiß + ABS natur (1:1) + Addovate ThermoStab
  - PC weiß + ABS natur (1:1) + alle 3 Additive

Die Heizzonen des Extruders wurden so eingestellt, dass die Schmelztemperatur zwischen 300 und 320 °C lag (auf Basis von Erfahrungswerten, da die NIR-Sonde die Schmelztemperatursonde ersetzt hat). Die Versuchspunkte wurden jeweils mit einem Durchsatz von 350 kg/h und 500 kg/h durchgeführt.

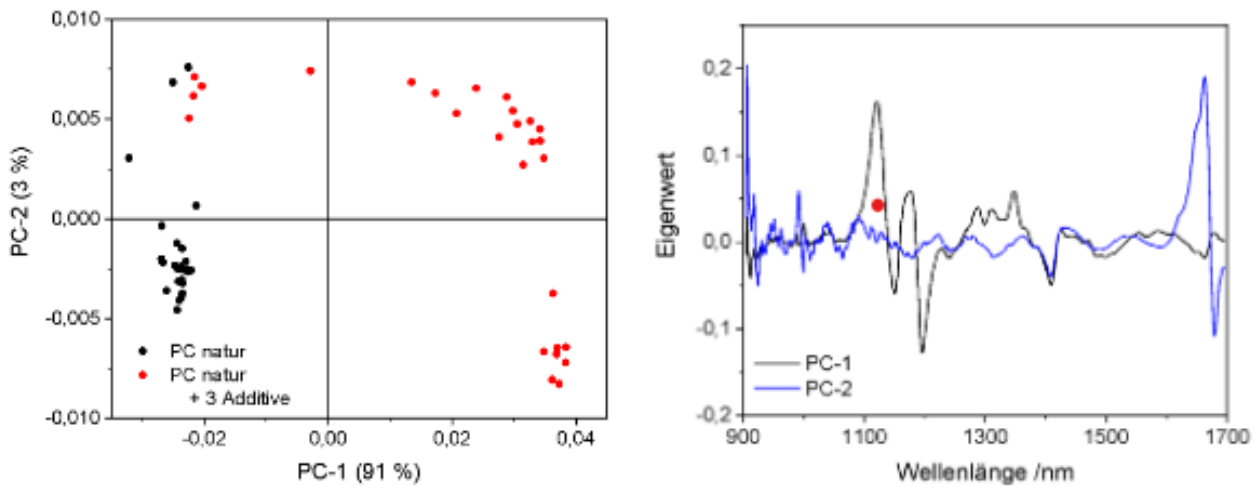
Bei den ersten Tests des Spektrometers zeigte sich auch hier verstärkt die thermische Strahlung der hohen Schmelzetemperatur. Aus diesem Grund wurde der Dunkelstrom (Rauschen der Elektronik) mit einem internen Rückkanal des Spektrometers aufgenommen und als Referenzspektrum diente das Spektrum des naturfarbenen PC. Da die thermische Strahlung in Referenz und Messspektrum gleichermaßen vorhanden war, wurde dieser Einfluss somit bei der Berechnung der Absorbanz ausgeglichen. Als Integrationszeit für die Aufnahme der Spektren wurden 2800 ms eingestellt und es erfolgte eine Mittelung über 10 Spektren.

Parallel dazu wurde die Python-Software an den Spektraldaten erprobt. Abbildung 2 zeigt den damit generierten Zeitverlauf für die Versuche mit naturfarbenem PC, welcher die Abweichungen vom Referenzspektrum über die Zeit darstellt. Die Übergänge zu den anderen Versuchspunkten und deren Verläufe passen dabei gut zu den protokollierten Zeitwerten der einzelnen Versuchspunkte. Der absolute Zahlenwert des Abstandes ist hier noch nicht aussagekräftig. Zudem sollen für weitere Iterationen der Software noch andere Datenglättungsverfahren getestet werden, da die hier verwendete Glättung mit Ableitung beim Übergang der Versuchspunkte abrupte Umbrüche erzeugt, welche real nicht stattfinden.



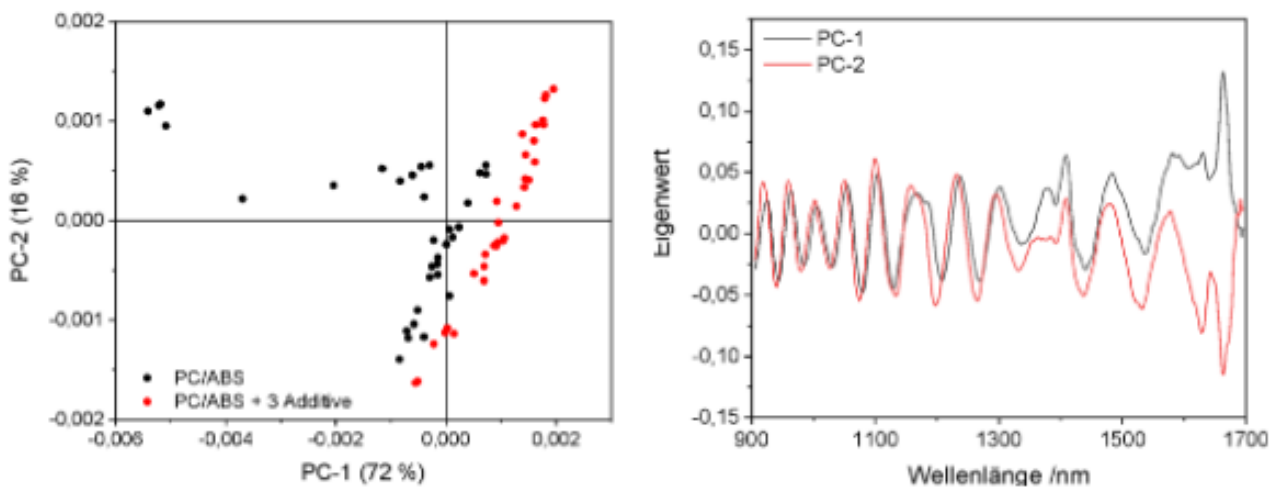
**Abbildung 37** Mit Python-Software ermittelter zeitlicher Verlauf des Abstands zum Referenzsignal der Versuche mit PC natur bei Hoffmann + Voss (eigene Abbildung SKZ).

Im Nachgang des Praxistests erfolgte noch eine MVA der aufgenommenen Spektren. Hierbei wurde zuerst untersucht, ob sich die Spektren des naturfarbenen PC von denen mit zusätzlichem Additiv trennen lassen. Die Ergebnisse der PCA sind in Abbildung 3 dargestellt. Es lassen sich auf PC-1 zwei Gruppen erkennen, wobei hier auch noch die Übergänge der Versuchspunkte ineinander nicht sauber getrennt sind. Zudem bilden sich bei den PC + Additiv-Spektren zwei Cluster, welche sehr wahrscheinlich auf die beiden unterschiedlichen Durchsätze im Extruder zurückzuführen sind.



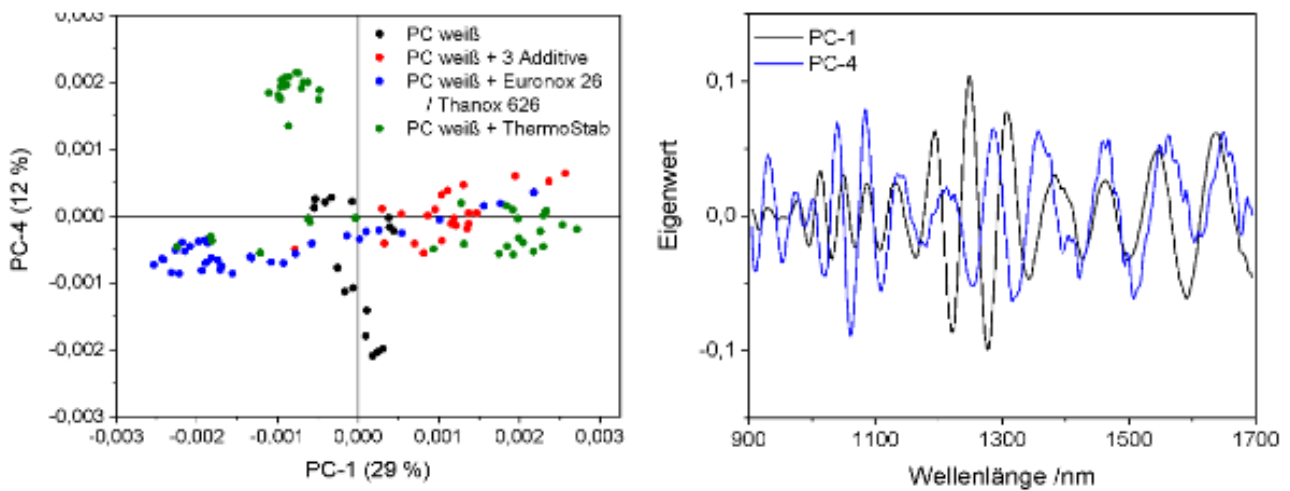
**Abbildung 38** PCA-Scores aus den Spektren mit PC natur als Referenz (links) und zugehörige Loadings (rechts) (eigene Abbildung SKZ).

Bei der PCA der Spektren von PC/ABS natur ohne und mit den drei Additiven, siehe Abbildung 4, waren zwei Gruppen zu erkennen. Allerdings liegen diese sehr nahe beieinander, sodass eine Trennung in diesem Fall schwierig ist. Hinzu kommt die starke Streuung innerhalb der Versuchspunkte. Möglicherweise könnte eine Referenz direkt von PC/ABS bessere Ergebnisse erzielen.



**Abbildung 39** PCA-Scores aus den Spektren von PC/ABS mit PC natur als Referenz (links) und zugehörige Loadings (rechts) (eigene Abbildung SKZ).

Zudem wurden eine PCA der Versuche mit dem weiß eingefärbten PC durchgeführt. Diese gestaltete sich deutlich komplexer als die bisherigen PCA und benötigte auch eine höhere Anzahl an Hauptkomponenten. So waren bei PC-5 gerade einmal 80 % der Varianz der Spektren erklärt. Bei den Sonstigen PCA waren meist mit zwei Hauptkomponenten mehr als 90 % erklärt. Die Scores und Loadings im Vergleich von PC-1 und PC-4 für das weiße PC sind in Abbildung 5 gezeigt. Dabei ist zu erkennen, dass eine Trennung nur schwer möglich ist. Ein Erklärungsansatz hierfür ist die hohe Streuung durch  $\text{TiO}_2$ , sodass die NIR-Strahlung an der Oberfläche gestreut wird und nur wenig Tiefeninformation verfügbar ist. Hinzu kommt ein zu geringes Signal der diskreten Banden der Additive.



**Abbildung 40** PCA-Scores aus den Spektren mit PC weiß als Referenz (links) und zugehörige Loadings (rechts) für PC-1 und PC-4 (eigene Abbildung SKZ).

Insgesamt können die Praxisversuche bei Hoffmann + Voss positiv bewertet werden, da die verwendete Python-Software bereits vielversprechende Ergebnisse lieferte. Für bessere PCA-Ergebnisse sind ausgedehntere Messreihen erforderlich, die jedoch in einer realen Fertigungsumgebung nicht umsetzbar sind. Hier müssen Konzepte zur Kalibrationsübertragung aus dem Labor evaluiert werden. Darüber hinaus sollte für zukünftige Ansätze der Sonden- bzw. Spektrometerfertigung eine Korrektur der thermischen Strahlung implementiert werden.

### 6.3 Praxistest bei MKV GmbH

Für die Vor-Ort-Versuche bei MKV wurde eine Leistritz ZSE 60 HP - 36D bereitgestellt. Der Einbau der Sonde erfolgte in einem Düsen-Adapter nach den Schnecken (siehe Abbildung 41). Der Schmelzekanaldurchmesser betrug bei der Sonde 50 mm.



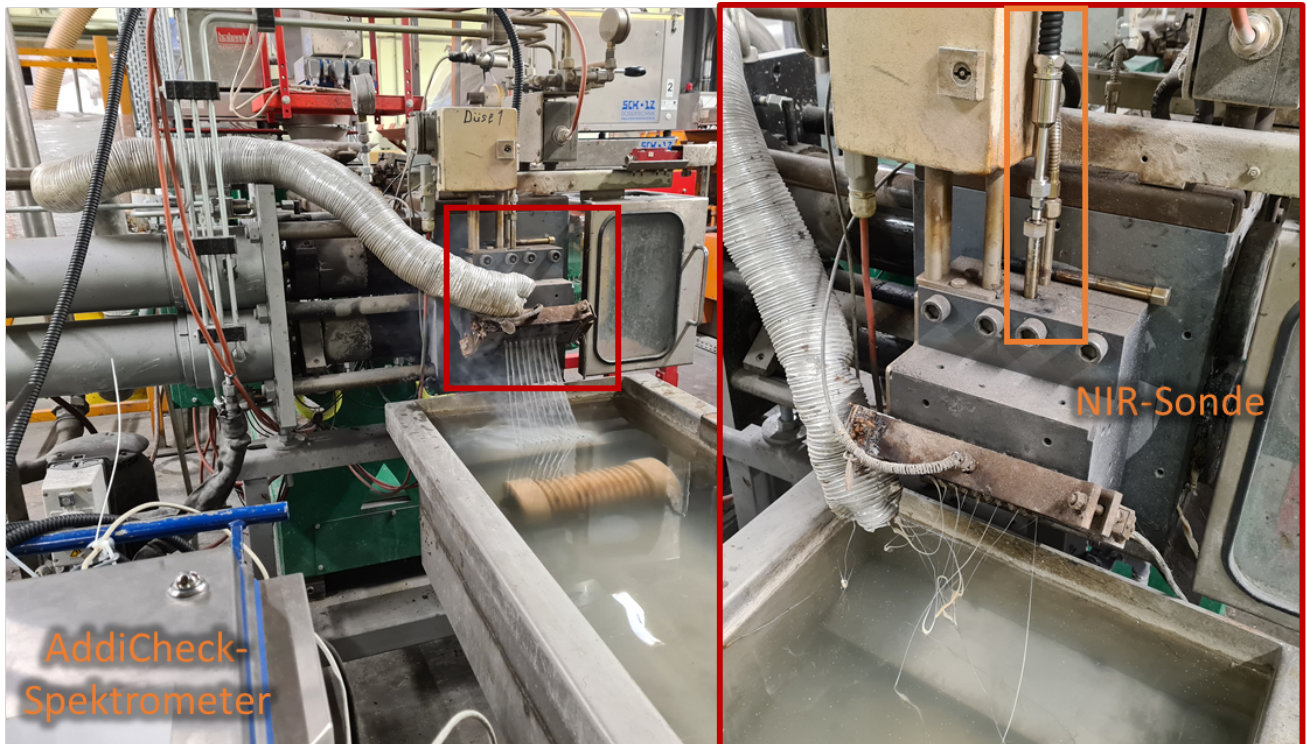


Abbildung 41 Versuchsaufbau mit NIR-Sonde für Praxistest bei MKV (eigene Abbildung SKZ).

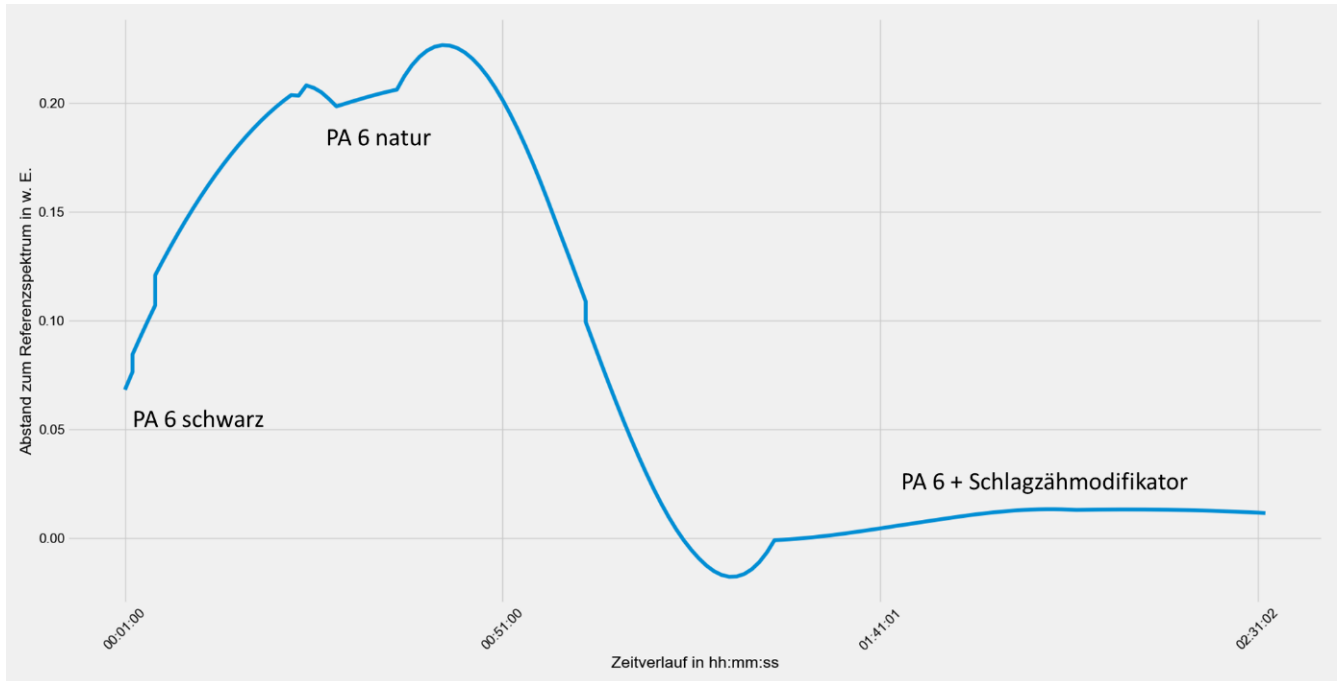
Als Versuchsmaterial wurde unverstärktes PA6-Rezyklat in natur verwendet. Dieses sollte mit unterschiedlichen Gehalten des Schlagzähmodifikators Compoline CO/PA 02 verarbeitet werden. Die Schmelzetemperatur betrug bei den Versuchen ca. 275 °C. Auch hier zeigte sich im Dunkelstrom bereits wieder thermische Strahlung, sodass eine Aufnahme auf dem internen Referenzkanal, wie bei den Versuchen bei Hoffmann + Voss, erfolgte.

Bei den spektroskopischen Messungen am naturfarbenen PA6 zeigte sich trotz einer Integrationszeit von 6000 ms (bei 10 Mittelungen) kaum Signal. Grund hierfür war die hohe Transparenz der Schmelze, sodass kaum Licht reflektiert wurde. Im Labormaßstab ist transparente Schmelze oftmals weniger problematisch, da die Reflexion der Rückwand noch messbar ist. Bei den hier gegebenen 50 mm war dies nicht mehr der Fall.

Aus diesem Grund wurde versucht, die Transparenz der Schmelze mangels Alternativen durch Beigabe von Ruß (starker NIR-Absorber) zu verringern. Die Beigabe von 0,5 Gew.-% (bei einem Durchsatz von 150 kg/h) reichte bereits aus, um die Schmelze komplett schwarz einzufärben. Entsprechend wurde auch sämtliches Licht komplett absorbiert. Im nächsten Schritt wurde der Rußanteil auf 0,3 Gew.-% reduziert und der Durchsatz auf 200 kg/h erhöht. Auch hier war die Absorption noch immer sehr hoch.

Ausgehend von diesem Punkt, der als NIR-Referenz diente, wurde die Zugabe von Ruß gestoppt und mit PA6 natur gespült. Da der geringer werdende Anteil an Ruß die Absorption verringerte und gleichzeitig die Rußpartikel aber noch als Streuer dienten, konnte die spektrale Veränderung während des Ausspülvorgangs gut erfasst werden. Anschließend erfolgte die Zugabe des Schlagzähmodifiers in unterschiedlichen Mengen (5 Gew.-%, danach 10 Gew.-% und wieder 2 Gew.-%), welcher die Schmelze weiß einfärbte.

Mit der Python-Software konnte der beschriebene Versuchsablauf erneut gut erfasst werden. Dieser ist in Abbildung 42 dargestellt. Dabei ist zu erkennen, dass der Betrag des Abstands im Vergleich zu den Versuchen bei Hoffmann + Voss diesmal beim Übergang von schwarz zu natur zunimmt. Ebenso ist der leichte Anstieg der Kurve bei der Variation der Menge an Schlagzähmodifikator von 5 auf 10 Gew.-% zu erkennen.

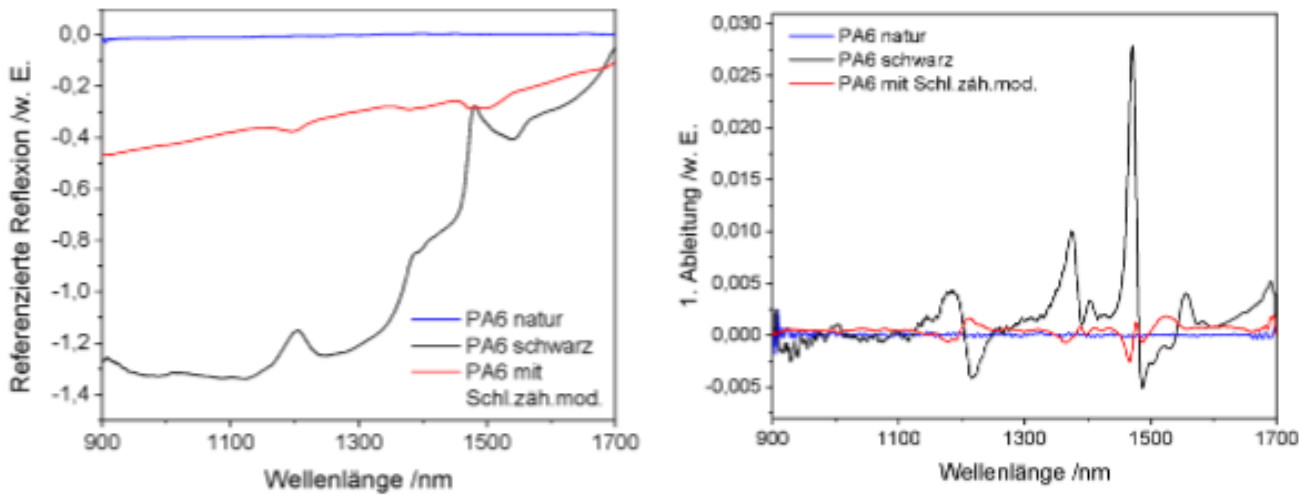


**Abbildung 42** Mit Python-Software ermittelter zeitlicher Abstand zum Referenzsignal der Versuche mit PA6 bei MKV (eigene Abbildung SKZ).

Auch nach diesen Praxisversuchen erfolgte im Nachgang eine Betrachtung mittels MVA. Da die im Rahmen der Versuche aufgenommen Spektren sehr unterschiedlich waren, war eine entsprechende Vorverarbeitung notwendig. Zudem musste beachtet werden, dass mit der Referenzierung auf ein stark absorbierendes Material die Änderungen hin zum Naturmaterial als abnehmende Absorption und somit als negative Banden sichtbar sind.

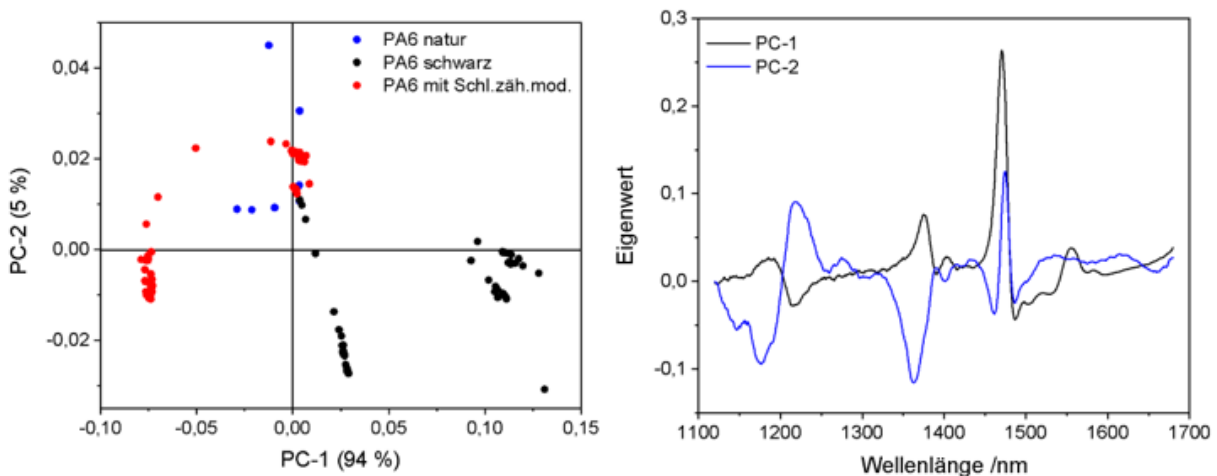
Es wurden verschiedene Vorverarbeitungsschritte bzw. Kombinationen daraus getestet. Das beste Resultat für die spätere PCA lieferte die 1. Ableitung nach Savitzky-Golay (7 Punkte, 0. Ordnung). Abbildung 43 zeigt hierzu beispielhaft einige der unterschiedlichen Spektren (links) und das Ergebnis der Ableitung (rechts). Zusätzlich erfolgte eine Einschränkung des relevanten Messbereichs auf 1.120 – 1.680 nm.





**Abbildung 43** Beispielspektren von PA6 natur, schwarz und mit Schlagzähmodifikator (links) sowie Ableitung der Spektren (rechts) (eigene Abbildung SKZ).

Die Ergebnisse der PCA anhand der Spektren sind in Abbildung 44 dargestellt. Die Trennung erfolgt nahezu nur auf PC-1 (94 % der Varianz). Die in der Mitte der PC-1-Achse liegenden Punkte sind vermutlich Übergangspunkte (hier wurde der Prozess umgestellt). Die Spektren von PA6 natur liegen nahe an der Mitte, da die Referenzierung auf PA6 natur stattfand (Spektren ca. Nulllinie). PA6 schwarz zeigt drei Cluster, welche sich auf die unterschiedlichen Rußdosierungen (0,5; 0,3 und <0,3 Gew.-% beim Ausspülen) zurückführen lassen. PA6 mit Schlagzähmodifikator lässt sich auch in zwei Gruppen trennen. Einerseits mit noch schwarzen Restanteilen (in der Mitte) und ohne schwarze Einfärbung (links).



**Abbildung 44** PCA-Scores aus den Spektren von PA6 natur, schwarz und mit Schlagzähmodifikator (links) und zugehörige Loadings (rechts) (eigene Abbildung SKZ).

Für tiefere Untersuchungen zu diesen Materialien wären weitere Versuchsreihen empfehlenswert. Im Rahmen des Praxistests waren bei Hoffmann & Voss keine weiteren Versuche möglich.

Bei den Vor-Ort-Versuchen bei MKV erwies sich ein Schmelzequerschnitt im industriellen Maßstab als schwierig im Zusammenhang mit transparentem Material. Hier könnte zukünftig ggf. eine Lösung in Transmission Sinn machen. Alternativ könnte

auch der im AddiCheck-System von Göttfert verwendete Ansatz mit einem definierten Bypass genutzt werden.

Die entwickelte Python-Software konnte auch in diesem Test die essenziellen Veränderungen erkennen. In weiteren Entwicklungsschritten gilt es nun die von der Software ausgegebenen Zahlenwerte für Anwender nutzbar zu machen, indem sie z. B. in ein Ampelsystem überführt werden.

#### **6.4 Umfrage unter Industrieakteuren zur Kennwerttabelle**

Die Bachelorarbeit befasste sich mit der Ermittlung einer reduzierten Anzahl an Kennwerten die sog. Kernkennwerte, die einen größtmöglichen Anteil der geforderten Informationen der Industrieakteure abdecken. Diese Kernkennwerte wurden zuvor innerhalb des Forschungsprojekts erarbeitet. Das Ziel bestand darin, zu bestimmen, welche Kriterien für Rezyklate im Vergleich zu Neuware entscheidend sind. Dazu wurden die folgenden Forschungsfragen gestellt: Welche Informationen sind für Einkäufer und Entwickler in kunststoffverarbeitenden Unternehmen nötig, um Rezyklate einsetzen zu können? Ist dafür auch eine kleinere Auswahl an Materialkennwerten möglich und variiert diese Auswahl zwischen verschiedenen Anwendungsbereichen? Um die Forschungsfragen zu beantworten, wurde die reduzierte Materialkennwertauswahl erstellt und anschließend durch eine qualitative Umfrage durch betroffene Industrieunternehmen anwendungsspezifisch validiert und ergänzt.

Das Abgleichen der „Kernkennwerte“ mit den Industrieakteuren hat sich als zielführend erwiesen. Der Vorschlag einer geringeren Anzahl an Kennwerten, die abgefragt werden, scheint demnach praktikabel. Ergänzt werden sollte allerdings der Bereich der „Reinheit“ und die damit einhergehenden rezyklatspezifischen Eigenschaften, da diese die Qualität des Sekundärkunststoffes klarer definieren können. Anwendungsspezifisch wurde zusätzlich klar, dass die Menge an benötigten Materialkennwerten variiert. Beispielsweise ist in technischen Anwendungsbereichen wie der Automobilbranche eine größere Informationsmenge nötig als in Bereichen der Verpackungs- und Baubranche. Die Ergebnisse dieser Arbeit fließen direkt in die Weiterentwicklung der DiLinK Applikation ein, um diese zu optimieren. Beispielsweise wurde die Kategorie „Zirkularität“ mit aufgenommen, die bei der Erstellung eines Produktpasses Angaben u.a. über Rezyklatgehalt, Schmelzfiltration oder Gehalt an Verunreinigungen ermöglicht.

Die Resonanz auf die Fragebögen hat gezeigt, wie schwer es ist, Informationen von Unternehmen zu erhalten. Viele Firmen präsentieren zwar öffentlich ihre Ambitionen, Nachhaltigkeit zu unterstützen, lassen sich jedoch schwer zur Teilnahme bewegen. Industrieunternehmen nehmen zwar bereits an der öffentlichen Debatte des nachhaltigen Umschwungs teil, verhalten sich in der Realität aber noch zögerlich. Auch die sehr geringe Teilnahmebereitschaft Erfahrungsberichte auf der DiLinK Seite öffentlich zu teilen zeigt, dass aufgrund unternehmensinterner Strukturen weiterhin Hemmnisse bezüglich der Transparenzsteigerung von Rezyklat-Informationen bestehen.

Über den Austausch von Informationen, Daten, Empfehlungen und Erfahrungen können die noch immer bestehenden Zweifel an rezyklierten Kunststoffen verringert werden und andere überzeugen. Genau darin besteht das Potential des Projektes und der Applikation DiLinK.

## 6.5 Veröffentlichungen

Im Rahmen des Arbeitspaketes 3.1 wurden zwei Fachartikel und ein Policy Brief veröffentlicht.

- Artikel “A Framework for Leveraging Twin Transition In the Manufacturing Industry“ im Rahmen der COMA 2022 in Stellenbosch
- Artikel „Interaktion räumlicher und digitaler Strukturen in der B2B-Kreislaufführung von Kunststoffen“ in STANDORT Zeitschrift für angewandte Geografie
- Policy Brief: Digitaler Produktpass für Kunststoffrezyklate

Der vollständige Policy Brief findet sich im Anhang, die zwei weiteren Artikel befinden sich im Veröffentlichungsprozess.

## 6.6 Weiterentwicklung der digitalen Applikation

Das Konsortium und dessen Anforderungen wurden bei der Entwicklung der digitalen Lösungen berücksichtigt und über kurze Iterationsschleifen bspw. im Rahmen der Jour Fixes über den aktuellen Stand der digitalen Lösung auf dem Laufenden gehalten. Herausforderungen und zu erwartende Stärken und Schwächen wurden hier besprochen und direkt in die Weiterentwicklung mit aufgenommen.

Im Rahmen der Softwareentwicklung wurden strukturierte Einzelinterviews mit mehreren Teilnehmern von allen Projektpartnern durchgeführt, um Verbesserungsvorschläge einzuholen, sowie ein Feedback-Workshop mit Branchenvertretern aus der gesamten Lieferkette, die im Arbeitskreis „Kunststoff & Umwelt“ des Kunststoff-Netzwerks Franken organisiert sind. Die übereinstimmenden Vorschläge und Wünsche wurden anschließend analysiert, ausgearbeitet und im Demonstrator umgesetzt.

Die folgenden Abbildungen geben einige Eindrücke vom finalen Produkt.

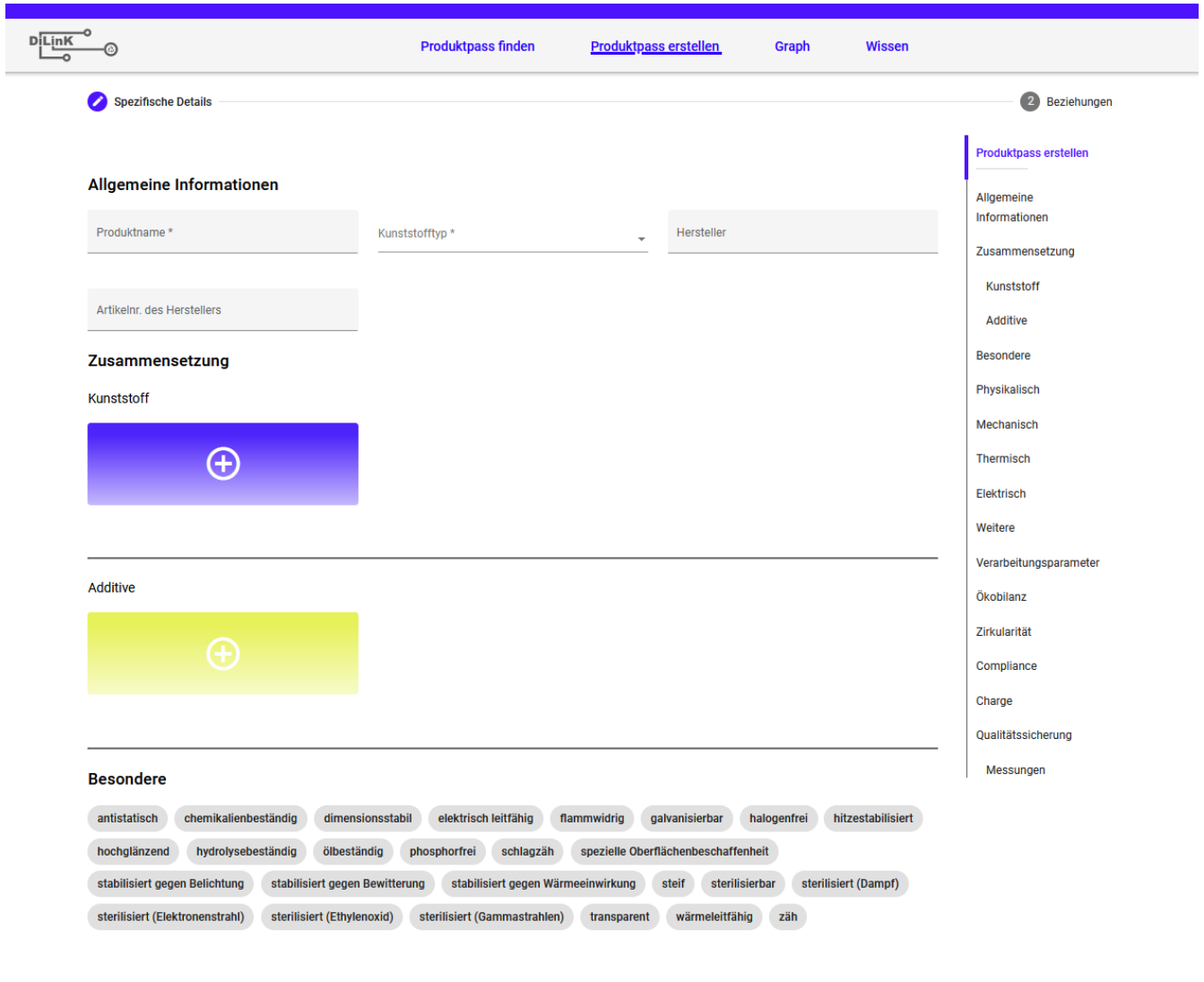


Abbildung 45 Eindruck eines Ausschnitts aus der Produktpass-Erstellung (eigene Abbildung Infosim).

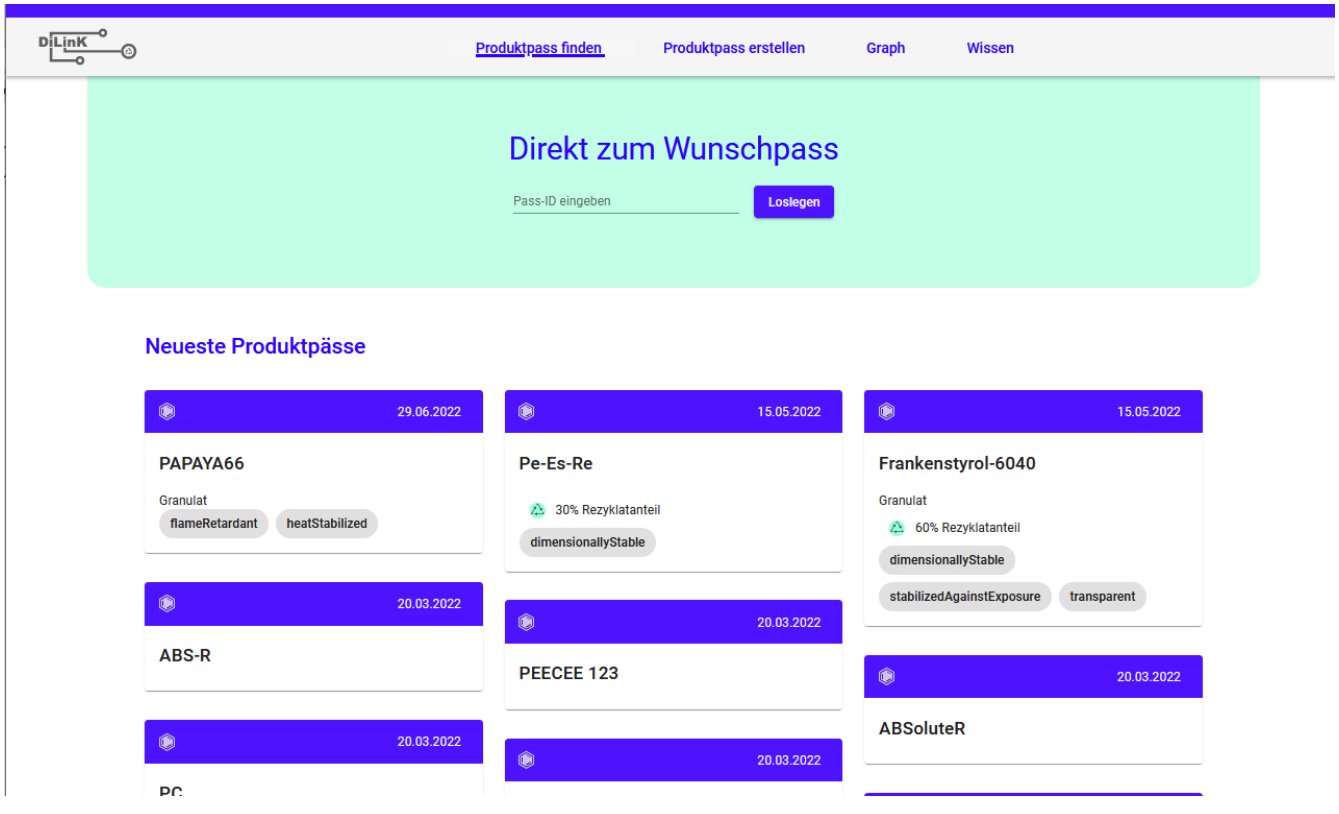


Abbildung 46 Eindruck eines Ausschnitts aus der Übersicht zu Produktpässen (eigene Abbildung Infosim).

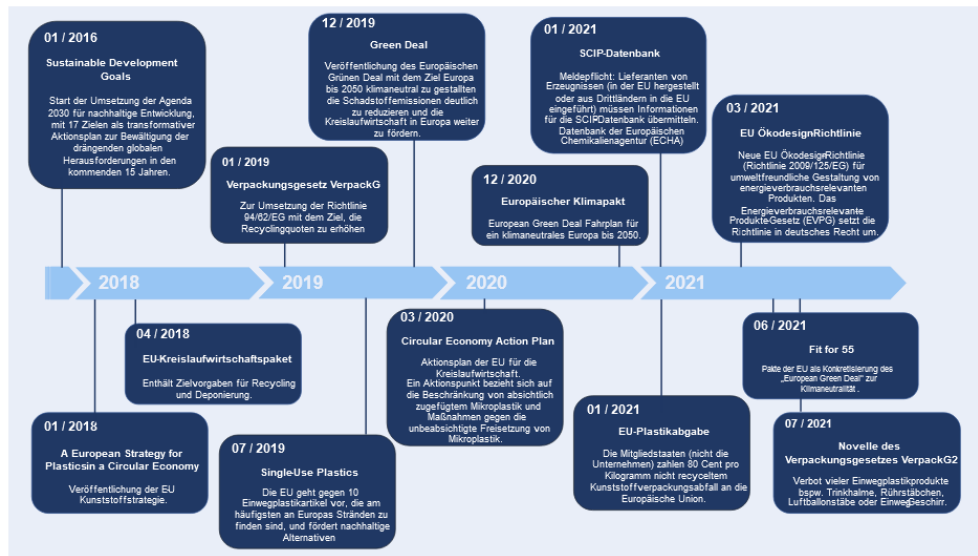
## Für Kunststoffverarbeiter

### Gesetzliche Rahmenbedingungen

Rezyklate sind Sekundärrohstoffe, die gemäß ISO 15270 aus dem Recycling von Kunststoffabfällen gewonnen werden. Abfälle werden gemäß DIN EN ISO 14021 unterschieden nach post-consumer (nach Gebrauch) und pre-consumer (vor Gebrauch), auch Produktionsabfälle oder post-industrial bezeichnet. Nicht enthalten ist gemäß ISO 14021 jedoch „die Wiederverwendung von Materialien aus Nachbearbeitung, Nachschliff oder Schrott, die im Verlauf eines technischen Verfahrens entstehen und im selben Prozess wiederverwendet werden können.“

Die deutsche und europäische Politik betont mit der EU-Kunststoffstrategie die Transformation der Linear- in eine echte zirkuläre Kunststoffwirtschaft, womit Kunststoffemissionen konsequent vermieden und der Bedarf fossiler Rohstoffe drastisch reduziert wird. Dabei steigt die Notwendigkeit vermehrt Rezyklate einzusetzen. Die EU gibt vor, dass bis 2025 mindestens 10 Millionen Tonnen Kunststoffrezyklate in Neuprodukten verarbeitet werden sollen. Dafür sollen bei bestimmten Produkten Mindesteinsatzquoten für Kunststoffrezyklate festgelegt werden.

Folgend sind die relevanten Aktivitäten für Europa und Deutschland zusammengefasst.



Vorrausschauend nehmen die rechtlichen Anforderungen, an die Nutzung und den Umgang mit Kunststoffen immer weiter zu.

#### Wissensbasis

- Für Kunststoffverarbeiter
- Gesetzliche Rahmenbedingungen
- Standards für Rezyklate
- Anwendungsbeispiele für Rezyklate
- Verarbeitungstechnische Unterschiede zur Neuware
- Qualitätssicherung
- Treibhausgasemissionen senken durch Rezyklateinsatz
- Für Abfallgeber
- Hemmnisse im Abfallmanagement
- Verbessern Sie Ihr Abfallmanagement
- Entsorgungskosten und CO2-Emissionen senken
- Für Recycler
- Verbesserung der Rezyklatqualität in der Aufbereitung
- Best Practice
- Nachhaltigkeit nachweisen (SKZ, Score tool)

**Abbildung 47** Gesetzliche Rahmenbedingungen für Kunststoffverarbeiter bei digitalen Produktpässen (eigene Abbildung Infosim).

## 7 Arbeitspaket 3.2 – Nachhaltigkeitsbewertung

Mit der durchgeführten Nachhaltigkeitsbewertung wurde überprüft, ob die im Projekt Di-Link entwickelten Technologien einen Beitrag zur Nachhaltigkeit liefern. Im Fokus stand hier vor allem die Schonung von Ressourcen, zudem wurden die Vermeidung von Treibhausgasemissionen untersucht sowie eventuelle Reboundeffekte identifiziert.

Die in diesem Projekt entwickelten Technologien wurden mit dem Ziel konzipiert, den Einsatz von Sekundärkunststoffen zu erhöhen. Hierzu wurden verschiedene Ansätze gewählt, die im Folgenden detailliert für die einzelnen Technologien dargestellt werden. Hauptangriffspunkte sind dabei eine optimierte Prozessüberwachung und Produktion des Rezyklates, sodass Kosten gesenkt werden können und damit die Konkurrenzfähigkeit zu Kunststoff Neuware gegeben ist. Außerdem lassen sich durch die optimierte Produktion höhere Rezyklatqualitäten erzielen bzw. eine hohe Rezyklatqualität nachweisen, sodass der Rezyklateinsatz auch in Produkten möglich wird, die vorher aus Qualitätsgründen nicht mit Rezyklat hergestellt wurden. Eine genaue Analyse der kausalen Zusammenhänge wird für die einzelnen Technologien beispielhaft beschrieben und findet sich in den Wirkketten in Kapitel 7.1.2 wieder.

Allen diesen Wirkketten gemein ist die Annahme, dass eine erhöhter Rezyklateinsatz den Verbrauch an Kunststoffneuware sinken lässt und somit Ressourcen geschont werden. Die für die Produktion von Kunststoffen eingesetzten Ressourcen sind insbesondere Erdöl oder Erdgas als Rohstoff sowie zur Bereitstellung der Prozesswärme aber auch elektrische Energie (aus Kohle, Erdgas, Atomstrom, Wind, Sonne, etc.) für den Betrieb der Produktionsmaschinen. Für die Produktion von Rezyklaten fällt hier nur der Verarbeitungsschritt des Recyclings an, so dass entsprechend Ressourcen insbesondere Erdöl bzw. -gas eingespart werden können. Es wurde vereinfachend angenommen, dass produziertes Rezyklat seine eigene Masse an Neukunststoffen ersetzt. Es wird aufgezeigt wie die im Projekt entwickelten Lösungen zur Nachhaltigkeit, also insbesondere zu qualitativ und quantitativ verbesserten Rezyklatnutzung beitragen. Um die Betrachtung zu vervollständigen, werden außerdem mögliche Rebound-Effekte aufgezeigt und diskutiert. Eine Quantifizierung des Einsparpotentials sowie der Rebound-Effekte war aufgrund des Entwicklungsstadiums der Technologie sowie der spärlichen Daten jedoch nicht möglich.

### 7.1 Theorie, Methodik und Vorgehen

#### 7.1.1 Input, Output, Outcome, Impact

Für die Nachhaltigkeitsbewertung wurde eine Wirkungsanalyse nach dem IOOI-Modell durchgeführt. Die im Projekt aufgewandten Mittel und die daraus generierten Wirkungen werden hierfür in vier Kategorien unterteilt:

- 1) Input – welche Mittel werden zur Erforschung und Implementierung der Technologien in diesem Projekt eingesetzt?
  - a. Hierzu zählen aufgewendete Projektmittel, die eingesetzte Zeit, verwendete Infrastrukturen, eingesetzte Maschinenstunden und eingesetzte Produkte wie Rezyklatkunststoffe.



- 2) Output: Welche Aktivitäten und Maßnahmen werden umgesetzt? Outputs in diesem Projekt waren z.B. die geschaffenen Produkte, technologische Entwicklungen und entwickelte Geschäftsmodelle.
- 3) Outcome: Als Outcome wird die Wirkung der Aktivitäten und Maßnahmen auf die Zielgruppe bezeichnet. Also zum Beispiel der erhöhte Einsatz von Sekundärmaterial.
- 4) Impact: Welche langfristigen „Erfolge“ werden erzielt? Im Kontext dieses Projektes also eine Erhöhung der Ressourcen- und Energieeffizienz.

Anhand von Wirkketten (siehe folgendes Kapitel) werden kausale Zusammenhänge zwischen diesen Kategorien angenommen.

Die einzelnen Inputs, Outputs, Outcomes und Impacts der durchgeführten Arbeiten wurden in Workshops mit den Projektpartnern erarbeitet. Der Fokus lag dabei auf Outputs sowie Outcomes. Die Erarbeitung fand im Zuge der Modellierung von Wirkketten statt. Im folgenden Kapitel zu Wirkketten findet sich ein konkretes Beispiel zur Anwendung dieser Methodik.

### 7.1.2 Wirkketten

Gerade im Bereich der Nachhaltigkeit beruht die Wirkung von Inputs meist auf einer Abfolge komplexer Zusammenhänge. Um sich dieser Komplexität anzunähern, wurden Wirkketten aufgestellt. Hierfür werden erwiesene, logisch ableitbare oder postulierte Zusammenhänge ausgehend von einem Input dargestellt. So kann gezeigt werden, wie die Aktivitäten dieses Projekts auf das Ziel der Erhöhung der Nachhaltigkeit einzahlen. Ein Beispiel findet sich in Kapitel 7.2.4. Optimalerweise können Output, Outcome oder Impact direkt qualitativ oder sogar quantitativ erfasst und gemessen werden. Da dies oft nicht der Fall ist, können vorherige Schritte in der Wirkkette als Indikator erfasst werden. Unter der Annahme, dass eine positive Korrelation zwischen den sich anschließenden Schritten der Wirkkette besteht, kann dann daraus geschlossen werden, dass auch ein positiver Effekt auf die Nachhaltigkeit besteht.

In der Modellvorstellung der Wirkkette ist diese dabei nur so stark, wie ihr schwächstes Glied. Ist einer der Wirkzusammenhänge nicht gegeben oder kann die Wirkung im konkreten Fall nicht stattfinden, ist auf diesem Weg auch kein kausaler Zusammenhang zwischen Input und Nachhaltigkeit gegeben. Sind die Zusammenhänge der Wirkkette nur für einen gewissen Anteil des betrachteten Systems gültig, kann die Wirkkette als eine Reihenschaltung von Widerständen verbildlicht werden. Diese Vorstellung geht dabei natürlich vereinfachend vor. Einerseits wird angenommen, dass die in der Wirkkette abgebildeten Zusammenhänge unabhängig von äußeren Einflüssen und Bedingungen sind. Andererseits, dass keine Rückkopplungseffekte zwischen den Gliedern der Wirkkette bestehen. Eine realitätsnähere Darstellung wäre ein Wirknetz bzw. ein n-Dimensionaler Darstellung der Zusammenhänge, die auch negative Rückkopplungen darstellbar macht

Die für die Nachhaltigkeitsbewertung in diesem Projekt relevanten Wirkketten wurden in Zusammenarbeit des WI mit den beteiligten Partnern in Workshops erarbeitet.

### 7.1.3 Rebound Effekte

Als Rebound Effekt wird eine negative Rückkopplung, eigentlich positiver Effekte, bezeichnet. Ein klassisches Beispiel ist die Erhöhung des Energieverbrauchs als Folge von Effizienzsteigerung. Z.B. werden Lampen durch den Einsatz neuer Technologien zwar sparsamer, aber dadurch werden auch mehr Lampen verbaut. Solche Rebound Effekte treten in den verschiedensten Bereichen auf. Sie sind oft inhärenter Teil einer Entwicklung und lassen sich, vor allem technisch, nur bedingt vermeiden. Trotzdem sollten Sie soweit möglich schon während der Entwicklungsphase antizipiert und mögliche Maßnahmen zu deren Reduzierung in Betracht gezogen werden.

Für die Identifizierung möglicher Rebound-Effekte wurde zunächst eine Liste mit möglichen Rebound-Effekten für die Effizienzsteigerung in der Kunststoffproduktion angelegt. Die Liste findet sich in Kapitel 7.2.5. Auf Grundlage dieser Liste und der entwickelten Wirkketten wurden dann in Workshops mit den jeweiligen Projektpartnern die relevanten Rebound-Effekte identifiziert. Es wurden die verschiedenen, als Wirkkette konzipierten, Anwendungsfälle mit der Liste möglicher Rebound-Effekte abgeglichen, um für den jeweiligen Anwendungsfall relevante Rebound-Effekte zu identifizieren. Zusätzlich wurde erörtert, ob es spezielle, für den Anwendungsfall spezifische, nicht in der Liste aufgeführte Rebound-Effekte gibt.

Das Ausmaß der Rebound-Effekte im Verhältnis zum Einsparungspotential durch den Anwendungsfall wurde abgeschätzt und kategorisiert. Falls möglich wurden auch Mitigationmöglichkeiten für die Rebound-Effekte identifiziert.

## 7.2 Ergebnisse

### 7.2.1 Instrumente

Es wurden folgende *Instrumente* identifiziert:

- 1) Inline-Spektroskopie: Vermessung des IR-Spektrums zur Überwachung der Materialzusammensetzung oder der Menge kritischer Inhaltstoffe
- 2) Online-Schlagzähigkeit: Vermessung eines Schlagzähigkeitsproportionalen Kennwertes zur Klassifizierung der mechanischen Eigenschaften
- 3) Software: Web-Applikation, in der die Hauptfunktionalitäten von Di-Link implementiert und digitale Komponenten aus weiteren AP (z.B. Messtechnik) integriert werden.
- 4) Wertschöpfungsnetzwerk: Beschreibung und Visualisierung des Status quos und eines konkreten Zukunftsszenario als Soll-Zustand
- 5) Koopetition: Konzept bzw. Tool zur Entwicklung und Förderung von Koopetitions-Mechanismen
- 6) Geschäftsmodellmuster: Von den Mechanismen und dem zentralen Werteverprechen der Applikationen abgeleitete Geschäftsmodelle für involvierte Akteure.

### 7.2.2 Nutzergruppen

Außerdem wurden folgende Nutzergruppen identifiziert, die die oben beschriebenen Instrumente verwenden können:

- a) Recycler/Recompoudeure: Unternehmen, die Kunststoffabfälle weiterverarbeiten oder aufbereiten
- b) Kunststoffverarbeiter: Unternehmen, die Kunststoffprodukte (inkl. Halbzeuge) herstellen.
- c) Gewerbliche Unternehmen: Unternehmen aus vielfältigen Branchen, die Kunststoffabfälle aus ihrem Produktentstehungsprozess an Recycler abgeben.
- d) Kunststoffhändler: Unternehmen, die Kunststoffe und Kunststoffabfälle an- und verkaufen mit der Untergruppe der Abfallplattformen als Unternehmen die ausschließlich Abfälle handeln.
- e) Logistikunternehmen: Unternehmen die die Güterverteilung realisieren
- f) Multiplikatoren: Verbände und andere Akteure die Informationen an die verschiedenen Anwendergruppen weitergeben können.

Die identifizierten Instrumente können jeweils von einer Untermenge der Nutzergruppen verwendet werden. Die in Tabelle 13 markierten Kombinationsmöglichkeiten sind relevant für dieses Projekt. Für jede diese Kombination existieren ein oder mehrere Anwendungsfälle, die eine mittelbare, nachhaltige Wirkung haben.

**Tabelle 14** Kombinationsmöglichkeiten von Instrumenten und Nutzergruppen

	Inline-Spektroskopie	Online-Schlagfähigkeit	Software	Wertschöpfungsnetzwerk	Kooperation	Geschäftsmodellmuster
Recycler/Recompoudeure	X		X	X	X	X
Kunststoffverarbeiter	X	X	X	X	X	X
Gewerbliche Unternehmen			X	X		
Kunststoffhändler			X	X	X	
Logistikunternehmen				X		X
Multiplikatoren				X		

### 7.2.3 Anwendungsfälle

Zu den dargestellten Kombinationen wurden die folgenden möglichen Anwendungsfälle gefunden:

**Tabelle 15 Anwendungsfälle zu den jeweiligen Instrument-Nutzergruppen-Kombinationen**

Nr.	Bezeichnung	Erläuterung	Instrument	Nutzergruppe
1	Soll-Spektrum Recycler	Überwachung der Abweichung von einem Soll-Spektrum durch den Recycler / Recompoundeur	1	a
2	Konzentration Recycler	Überwachung der Konzentration definierter Inhaltsstoffe durch den Recycler / Recompoundeur	1	a
3	Soll-Spektrum Verarbeiter	Überwachung der Abweichung von einem Soll-Spektrum durch den Kunststoffverarbeiter	1	b
4	Konzentration Verarbeiter	Überwachung der Konzentration definierter Inhaltsstoffe durch den Kunststoffverarbeiter	1	b
5	Schwankungsbreite	Überwachung der Schwankungsbreite der Schlagzähigkeit bzw. der mechanischen Eigenschaften des Materials	2	a
6	Schlagzähigkeit	Messung der Schlagzähigkeit	2	a
7	Informationen	Qualitative und quantitative Verbesserung der Verfügbarkeit von Informationen zu Kunststoffrezyklaten	3	a, b, d
8	Transparenz	Transparenz, und lückenlose Rückverfolgbarkeit von Rezyklaten in der Lieferkette	3	a, b, c, d
9	Datenhandling	Einfaches und schnelles Datenhandling	3	a, b, c, d
10	Integration	Integration von Daten aus externen Systemen (z.B. ERP, Messtechnik)	3	a, b, c, d
11	Matching	Algorithmusbasiertes Matching von Materialeigenschaften und Anforderungsprofilen, sowie Angebot und Nachfrage	3	a, b, c, d
12	Reflexion und Strategie	Unternehmen werden angeregt, ihren Status quo (insbesondere hinsichtlich der Schließung von Stoffkreisläufen) zu hinterfragen und ihre Erkenntnisse in ihre strategische Ausrichtung und Geschäftsprozesse zu integrieren.	4	alle
13	Partnerschaften	Unternehmen bekommen den Denkanstoß für innovative Partnerschaften, die neuen Mehrwert (für das Unternehmen und für das Gesamtsystem) generieren	5	a, b, d
14	Geschäftsmodelle	Unternehmen bekommen Denkanstöße und Umsetzungsideen für neue Wertschöpfungspotentiale	6	a, b, e

Aus dem tabellarischen Überblick wird klar, dass die technischen Instrumente „Inline-Spektroskopie“ und „Online-Schlagzähigkeit“ auf spezielle Nutzergruppen abgestimmt sind, während andere Instrumente wie „Software“ oder „Wertschöpfungsnetzwerk“ einen breiteren Ansatz haben. Für die verschiedenen Instrumente bestehen zu meist mehrere Anwendungsfälle, d.h. sie haben verschiedene Möglichkeiten nachhaltig zu wirken.

## 7.2.4 Wirkketten

Im Nachfolgenden sind die Wirkketten für den jeweiligen Anwendungsfall beschrieben, die möglichen Rebound Effekte sind auch aufgeführt. Eine Diskussion erfolgt im Anschluss.

Wirkketten 1 – 6 beziehen sich auf die Analytikinstrumente der Inline-Spektroskopie und Online-Schlagzähigkeit. Wirkketten 7 - 11 auf die in Di-Link erstellte Software und die Wirkketten 12 – 14 auf das Design des Business Ecosystem.

### Wirkkette Anwendungsfall 1 – Soll-Spektrum Recycler

#### **Output**

Entwicklung, Erprobung und Verbreitung von Inline-Spektroskopie zur Überwachung der Abweichung von einem Soll-Spektrum bei Recyclern / Recompoundeuren

#### **Outcome**

Verbesserte Darstellung des Eigenschaftsprofils

##### ■ Verbesserte Definition von Prozessparametern:

Rebound-Effekt: Diese Funktion kann auch von Compoundeuren verwendet werden, die Kunststoff-Neuware einsetzen

- Erhöhung des Durchsatzes → erhöhte Wirtschaftlichkeit → erhöhte Konkurrenzfähigkeit des Recyclingmaterials
- Rebound-Effekt - I: Diese Funktion gilt auch für die Produktion mit Kunststoff-Neuware
- Rebound-Effekt -II: Durch die resultierende Kostensenkung werden neue Anwendungsfälle wirtschaftlich umsetzbar, die Gesamtmenge an verarbeitetem Kunststoff steigt
- Erhöhter Einsatz von Sekundärmaterial

##### ■ Verbesserte Prozesskontrolle durch zusätzliche Messdaten (sekundärer Outcome)

- Frühzeitigeres Gegensteuern → Verringerung von Ausschussproduktion → Kostensenkung → Preissenkung des Rezyklats → erhöhte Konkurrenzfähigkeit des Recyclingmaterials
- Rebound-Effekt -I: Diese Funktion gilt auch für die Produktion mit Kunststoff-Neuware
- Rebound-Effekt -II: Durch die resultierende Kostensenkung werden neue Anwendungsfälle wirtschaftlich umsetzbar, die Gesamtmenge an verarbeitetem Kunststoff steigt
- Erhöhter Einsatz von Sekundärmaterial

##### ■ Genauere / verlässlichere Kundeninformation über die Materialeigenschaften

- Erhöhtes Vertrauen in das Material
- Erhöhter Einsatz von Sekundärmaterial

### Wirkkette Anwendungsfall 2 – Konzentration Recycler

#### **Output**

Entwicklung, Erprobung und Verbreitung von Inline-Spektroskopie zur Überwachung der Konzentration definierter Inhaltsstoffe bei Recyclern / Recompoundeuren

#### **Outcome**

Verbesserte Darstellung des Eigenschaftsprofils

- Verbesserte Definition von Prozessparametern
- erhöhter Durchsatz → höhere Wirtschaftlichkeit → erhöhte Konkurrenzfähigkeit des Recyclingmaterials
- Erhöhter Einsatz von Sekundärmaterial
  
- Verbesserte Prozesskontrolle durch zusätzlichen Messdaten (sekundärer Outcome)
- Frühzeitigeres Gegensteuern → Verringerung von Ausschussproduktion → Kostensenkung → Preissenkung des Rezyklats → erhöhte Konkurrenzfähigkeit des Recyclingmaterials
- Erhöhter Einsatz von Sekundärmaterial
  
- Genauere Information über (ggf. schwankende) Additiv-Gehalte des Ausgangsmaterials
- Zielgenauere (sparsamere) Nach-Additivierung
- Kostensenkung
- Erhöhter Einsatz von Sekundärmaterial
  
- Genauere / verlässlichere Kundeninformation über die Materialeigenschaften
- Erhöhtes Vertrauen in das Material
- Erhöhter Einsatz von Sekundärmaterial

### Wirkkette Anwendungsfall 3 – Soll-Spektrum Verarbeiter

#### **Output**

Entwicklung, Erprobung und Verbreitung von Inline-Spektroskopie zur Überwachung der Abweichung von einem Soll-Spektrum bei Kunststoffverarbeitern

#### **Outcome**

Verbesserte Darstellung des Eigenschaftsprofils

- Verbesserte Definition von Prozessparametern
- Erhöhung des Durchsatzes → erhöhte Wirtschaftlichkeit → erhöhte Konkurrenzfähigkeit der Produkte aus Recyclingmaterial

- Erhöhter Einsatz von Sekundärmaterial
- Verbesserte Prozesskontrolle durch zusätzlichen Messdaten (sekundärer Outcome)
- Frühzeitigeres Gegensteuern → Verringerung von Ausschussproduktion → Kostensenkung → erhöhte Ausbeute → erhöhte Konkurrenzfähigkeit der Produkte aus Recyclingmaterial
- Erhöhter Einsatz von Sekundärmaterial

#### Wirkkette Anwendungsfall 4 – Konzentration Verarbeiter

##### **Output**

Entwicklung, Erprobung und Verbreitung von Inline-Spektroskopie zur Überwachung der Konzentration definierter Inhaltsstoffe bei Kunststoffverarbeitern

##### **Outcome**

Verbesserte Darstellung des Eigenschaftsprofils

- Verbesserte Definition von Prozessparametern
- erhöhter Durchsatz → höhere Wirtschaftlichkeit → erhöhte Konkurrenzfähigkeit der Produkte aus Recyclingmaterial
- Erhöhter Einsatz von Sekundärmaterial
  
- Verbesserte Prozesskontrolle durch zusätzlichen Messdaten (sekundärer Outcome)
- Frühzeitigeres Gegensteuern → Verringerung von Ausschussproduktion → Kostensenkung → erhöhte Ausbeute → erhöhte Konkurrenzfähigkeit der Produkte aus Recyclingmaterial
- Erhöhter Einsatz von Sekundärmaterial
  
- Genauere Information über (ggf. schwankende) Additiv-Gehalte des Ausgangsmaterials
- Zielgenauere (sparsamere) Nach-Additivierung
- Kostensenkung
- Erhöhter Einsatz von Sekundärmaterial
  
- Genauere / verlässlichere Kundeninformation über die Materialeigenschaften
- Erhöhtes Vertrauen in das Material
- Erhöhter Einsatz von Sekundärmaterial

#### Wirkkette Anwendungsfall 5 – Schwankungsbreite

##### **Output**



Entwicklung, Erprobung und Verbreitung von Online-Schlagzähigkeitsmessung zur Überwachung der Schwankungsbreite der mechanischen Eigenschaften des Materials bei Recyclern / Recompoundeuren

### **Outcome**

Verbesserte Darstellung des Eigenschaftsprofils

- Verbesserte Definition von Prozessparametern
- erhöhter Durchsatz → höhere Wirtschaftlichkeit → erhöhte Konkurrenzfähigkeit des Recyclingmaterials
- Erhöhter Einsatz von Sekundärmaterial
  
- Verbesserte Prozesskontrolle durch zusätzlichen Messdaten (sekundärer Output)
- Frühzeitigeres Gegensteuern → Verringerung von Ausschussproduktion → Kostensenkung → Preissenkung des Rezyklats → erhöhte Konkurrenzfähigkeit des Recyclingmaterials
- Erhöhter Einsatz von Sekundärmaterial
  
- Genauere / verlässlichere Kundeninformation über die Materialeigenschaften
- Erhöhtes Vertrauen in das Material
- Erhöhter Einsatz von Sekundärmaterial

### Wirkkette Anwendungsfall 6 – Schlagzähigkeit

#### **Output**

Entwicklung, Erprobung und Verbreitung von Online-Schlagzähigkeitsmessung (kalibriert) bei Recyclern / Recompoundeuren

#### **Outcome**

Welche Wirkungen haben die Aktivitäten und Maßnahmen?

- Genauere / verlässlichere Kundeninformation über die Materialeigenschaften
- Erhöhtes Vertrauen in das Material
- Erhöhter Einsatz von Sekundärmaterial
  
- Verbesserte Darstellung des Eigenschaftsprofils (Recycler)
- Verbesserte Definition von Prozessparametern (Verarbeiter)
- erhöhter Durchsatz → höhere Wirtschaftlichkeit → erhöhte Konkurrenzfähigkeit des Recyclingmaterials
- Erhöhter Einsatz von Sekundärmaterial
  
- Verbesserte Prozesskontrolle durch zusätzlichen Messdaten (sekundärer Output)

- Frühzeitigeres Gegensteuern → Verringerung von Ausschussproduktion → Abfallvermeidung → Kostensenkung → Preissenkung des Rezyklats → erhöhte Konkurrenzfähigkeit des Recyclingmaterials
- Erhöhter Einsatz von Sekundärmaterial

### Wirkkette Anwendungsfall 7- Informationen

#### **Output**

Entwicklung, Erprobung und Verbreitung einer Web-Applikation, in der die Hauptfunktionalitäten von Di-Link implementiert und digitale Komponenten aus weiteren AP (z.B. Messtechnik) integriert werden.

#### **Outcome**

- Kunststoffverarbeiter und -händler können Recyclern zusätzliche und präzisere Informationen über ihr angebotenes Material zur Verfügung stellen
- Recycler erhalten zusätzliche Informationen über angebotenes oder eingekauftes Material
- Recycler können die Qualität des angebotenen Materials besser einschätzen und bevorzugen höherwertiges Material
- Kunststoffverarbeiter erhalten einen Anreiz, eine höhere Wertigkeit ihrer Abfälle zu erreichen (z. B. durch bessere Trennung, Sortierung); Kunststoffhändler erhalten einen Anreiz, mit höherwertigem (z.B. besser sortiertem) Material zu handeln
- Qualität des Inputstroms verbessert sich
  - Qualität der Rezyklate verbessert sich
    - Rezyklate eignen sich für weitere Anwendungen
      - Erhöhter Einsatz von Sekundärmaterial
- Aufwand für Recycler, Informationen über eingekauftes Material zu generieren (Prüfungen), reduziert sich
- Kosten für Rezyklataufbereitung verringern sich
  - Preis für Rezyklat verringert sich
    - Konkurrenzfähigkeit von Rezyklat gegenüber Neuware erhöht sich
      - Erhöhter Einsatz von Sekundärmaterial
- Effizienz in der Aufbereitung erhöht sich
- Kosten für Rezyklataufbereitung verringern sich
  - Preis für Rezyklat verringert sich
    - Konkurrenzfähigkeit von Rezyklat gegenüber Neuware erhöht sich
      - Erhöhter Einsatz von Sekundärmaterial
- Die für Kunststoffverarbeiter verfügbaren Informationen zu Kunststoffrezyklaten (Chargen-bezogene Kennzahlen) verbessern sich qualitativ und quantitativ

- Verarbeiter und deren Kunden erhalten Fakten dazu, inwieweit Rezyklate die Anforderungsprofile erfüllen
- Erhöhter Einsatz von Sekundärmaterial

### Wirkkette Anwendungsfall 8 – Transparenz

#### **Output**

Entwicklung, Erprobung und Verbreitung einer Web-Applikation, in der die Hauptfunktionalitäten von Di-Link implementiert und digitale Komponenten aus weiteren AP (z.B. Messtechnik) integriert werden.

#### **Outcome**

Die Transparenz und Rückverfolgbarkeit von Rezyklaten in der Lieferkette verbessert sich

- Nachweis von Rezyklatanteilen wird ermöglicht
- Zertifizierung von Rezyklatanteilen wird ermöglicht
- Neue Anwendungen für Rezyklate werden erschlossen (für die Rezyklateinsatz gesetzlich oder aus Marketinggründen erforderlich ist)
  - Erhöhter Einsatz von Sekundärmaterial
- Herkunft (geographisch, vorherige Anwendungen) kann belegt werden
- (vorherige Anwendung) Sekundärmaterialien aus Anwendungen mit sehr hohen Anforderungen – z. B. technisch (Hochtemperatur-Anwendung im Auto) oder regulatorisch (z. B. Medizintechnik) erhalten damit eine „Auszeichnung“ und können in Anwendungen mit geringerem Anforderungsniveau unproblematischer (weniger Prüfaufwand, einfacheres Überwinden von Ressentiments) als Neuware-Substitut eingesetzt werden
- Konkurrenzfähigkeit von Rezyklat gegenüber Neuware erhöht sich
  - Erhöhter Einsatz von Sekundärmaterial
- (geogr.) Genauere Daten zur Ökobilanz verfügbar und bei geographischer Nähe zur Verarbeitung des Rezyklats können die ökologischen Vorteile berechnet/belegt werden;
- Konkurrenzfähigkeit von Rezyklat gegenüber Neuware / Rezyklat mit größer Lieferentfernung erhöht sich
- Erhöhter Einsatz von Sekundärmaterial

### Wirkkette Anwendungsfall 9 – Datenhandling

#### **Output**

Es wird ein einheitliches Tool zur Verfügung gestellt.

### **Outcome**

- Aufwand für Datenerfassung und -Verarbeitung wird reduziert
- Es werden mehr und qualitativ bessere Daten erfasst
- Datenlage verbessert sich (quantitativ, qualitativ)
  - Kenntnis über Qualität der Rezyklate verbessert sich → Anwendungsfall 1, 2, 5
    - Erhöhter Einsatz von Sekundärmaterial
  
- Fehleranfälligkeit für Datenerfassung und -Verarbeitung wird reduziert
- Datenlage verbessert sich (qualitativ)
- Kenntnis über Qualität der Rezyklate verbessert sich → Anwendungsfall 1, 2, 5
  - Erhöhter Einsatz von Sekundärmaterial

### Wirkkette Anwendungsfall 10 – Integration

#### **Output**

Es werden Schnittstellen für den automatischen Datenaustausch mit anderen Systemen angeboten.

#### **Outcome**

- Es können umfassendere und genauere Daten genutzt werden
- Datenlage verbessert sich (quantitativ, qualitativ)
  - Kenntnis über Qualität der Rezyklate verbessert sich → Anwendungsfall 1, 2, 5
    - Erhöhter Einsatz von Sekundärmaterial
  
- Aufwand für Datenerfassung wird reduziert
- Es werden mehr und qualitativ bessere Daten erfasst
- Datenlage verbessert sich (quantitativ, qualitativ)
  - Kenntnis über Qualität der Rezyklate verbessert sich → Anwendungsfall 1, 2, 5
    - Erhöhter Einsatz von Sekundärmaterial
  
- Fehleranfälligkeit für Datenerfassung und -Verarbeitung wird reduziert
- Datenlage verbessert sich (quantitativ, qualitativ)
  - Kenntnis über Qualität der Rezyklate verbessert sich → Anwendungsfall 1, 2, 5
    - Erhöhter Einsatz von Sekundärmaterial

### Wirkkette Anwendungsfall 11 – Matching

## **Output**

Es wird ein algorithmusbasiertes Matching von Materialeigenschaften und Anforderungsprofilen, sowie von Angebot und Nachfrage, zur Verfügung gestellt

## **Outcome**

- Die Übereinstimmung von Rezyklingmaterial und der Zielanwendung kann bewertet werden
- Zusätzliche Anwendungsoptionen für Recyclingmaterial (auch für ansonsten nicht rohstofflich verwertetes Material) werden sichtbar
- Erhöhter Einsatz von Sekundärmaterial
- Handlungsoptionen in Bezug auf die Ertüchtigung des Recyclingmaterials für die angestrebte Anwendung werden aufgezeigt
- Erhöhter Einsatz von Sekundärmaterial

### Wirkkette Anwendungsfall 12 - Reflexion und Strategie

## **Output**

- Entwicklung, Visualisierung und Validierung eines Wertschöpfungsnetzwerks
- Dissemination des Wissens (Veröffentlichung und Vorträge)

## **Outcome**

- Die erreichten Unternehmen sind angeregt, ihren Status quo (insbesondere hinsichtlich der Schließung von Stoffkreisläufen) zu hinterfragen
- Aufgeschlossene Unternehmen integrieren Erkenntnisse in strategische Ausrichtung und Geschäftsprozesse
- Stimulation von Innovation (Dienstleistungen, Produkte, Prozesse), die zur Schließung von Stoffkreisläufen beitragen
- Veränderung oder Aufbau neuer Organisations-Strukturen, sowie Kompetenzen, die der Schließung von Stoffkreisläufen dienen
  - Erhöhter Einsatz von Sekundärmaterial

### Wirkkette Anwendungsfall 13 – Partnerschaften

## **Output**

- Entwicklung von nutzergruppenspezifischen Koopetitionsmodellen
- Entwicklung und Durchführung von Workshops (Vermittlung der Koopetitionsmodelle, basierend auf dem Wertschöpfungsnetzwerk)
- Aufbereitung und Verbreitung der Erkenntnisse und Workshopergebnisse

## **Outcome**

- Die teilnehmenden Unternehmen bekommen den Denkanstoß für innovative Partnerschaften, die neuen Mehrwert (für ihr Unternehmen und für das Gesamtsystem) generieren

- Koopetitionsmodelle werden von konkreten Unternehmungen aufgegriffen, gegebenenfalls durch Unternehmen weiterentwickelt, und umgesetzt
- Die beteiligten Unternehmen können über veränderte Wertschöpfungsmuster Rezyklate konkurrenzfähiger am Markt anbieten bzw. einsetzen
  - Erhöhter Einsatz von Sekundärmaterial

### Wirkkette Anwendungsfall 14- Geschäftsmodelle“)

#### **Output**

- Entwicklung, anwenderorientierte Aufbereitung und Verbreitung von rollenspezifischen Geschäftsmodellmustern

#### **Outcome**

- Die erreichten Unternehmen bekommen Denkanstöße und Umsetzungsideen für die Erschließung neuer Wertschöpfungspotentiale
- Aufgeschlossene Unternehmen entwickeln und implementieren neue Geschäftsmodelle für eine ökonomisch sinnvolle Erzeugung, Distribution und Verwendung von Sekundärmaterial
- Erhöhter Einsatz von Sekundärmaterial.

#### **7.2.5 Rebound – Effekte**

Einige generelle dem Rezyklateinsatz inhärente Rebound-Effekte wurden identifiziert und werden im Folgenden dargestellt:

Rebound-I: Die positiven Effekte der Rezyklatverwendung manifestieren sich nur dann, wenn das Rezyklat den Einsatz von Kunststoff Neuware ersetzt. Zwei Mechanismen können dem entgegenwirken:

- 1) aus materialtechnischen Gründen muss mehr Rezyklat eingesetzt werden, um ein Produkt herzustellen das dieselben Anforderungen, z.B. hinsichtlich Stabilität, erfüllt. Der positive, nachhaltige Effekt des Rezyklateinsatzes wird entsprechend verringert.
- 2) Durch den Einsatz von Rezyklaten wird nicht notwendigerweise weniger Neuware hergestellt. Hier ist die entscheidende Frage was die Produktionsmenge an Kunststoffprodukten begrenzt: die Nachfrage nach Kunststoffprodukten oder das Angebot an Material. Für den ersten Fall wird für jedes, aus Rezyklat hergestellte, Produkt kein weiteres aus Kunststoff Neuware hergestellt und der Rezyklateinsatz kann sein volles ökologisches Potential ausschöpfen. Für den zweiten Fall, dass die Kunststoffmenge die Menge an hergestellten Produkten limitiert würden zwar Rezyklatprodukte hergestellt aber die verwendete Menge an Kunststoffneuware nimmt nicht ab, sondern wird für andere Produkte verwendet und der gesamtökologische Fußabdruck steigt. Die Realität bewegt sich zwischen diesen beiden Extremen.

Rebound-II: Der Konsument bewertet den Kauf oder die Nutzung des Produktes aus Rezyklaten positiver und erhöht daher seinen Konsum.

Rebound-III: Ein gut funktionierendes Recyclingsystem mit günstigem Rezyklatprodukten erhöht den Anreiz dieses zu verwenden. Das kann dazu führen, dass andere vorgelagerte Schritte der Abfallhierarchie wie Abfallvermeidung, Verlängerung der Produktlebensdauer oder Wiederverwendung vernachlässigt wären. Diese sind in vielen Fällen die nachhaltigeren Optionen.

Zusätzlich wurden die folgenden, speziellen Rebound-Effekte für die im Projekt durchgeführten Tätigkeiten identifiziert.

Für alle Anwendungsfälle der Analytik Instrumente (1 – 6) gelten die folgenden Rebound Effekte:

Rebound-Effekt IV: Diese Funktion kann auch für die Produktion mit Kunststoff-Neuware verwendet werden

Rebound-Effekt V: Durch die resultierende Kostensenkung werden neue Anwendungsfälle wirtschaftlich umsetzbar, die Gesamtmenge an verarbeitetem Kunststoff steigt

Rebound-Effekt VI: Die Möglichkeiten Qualität von Rezyklaten genauer zu charakterisieren und dies zu kommunizieren erniedrigt das Vertrauen in Rezyklate die nicht entsprechend charakterisiert werden. Es wird insgesamt weniger Rezyklat verkauft.

Rebound-Effekte V und VI können auch für die Anwendungsfälle 7 - 11 relevant sein.

Rebound-Effekt VII: Für den Anwendungsfall 9 wurde als möglicher Rebound-Effekt identifiziert, dass der ökologische Aufwand für das Datenhandling den ökologischen Nutzen des Rezyklateinsatzes überwiegt. Dies kann mit folgender Abschätzung widerlegt werden:

Losgröße Rezyklat  $m \geq 250\text{kg}$

Datenmenge pro Rezyklatlos  $d \leq 20\text{ MByte}$

Leistung Cloudspeicher:  $P = 3\text{mW}/100\text{ MByte}$

Speicherdauer der Daten  $t \leq 10\text{ Jahre}, 87600\text{ Stunden}$

$P \cdot t = 262.8\text{ Wh}/100\text{mByte}$

Datenübertragung:  $W = 5,2\text{ Wh}/100\text{MByte}$

Übertragungshäufigkeit  $\phi \leq 100\text{ mal}$

$W \cdot \phi = 520\text{Wh}/100\text{Mbyte}$



Als Summe daraus multipliziert mit der Datenmenge pro Rezyklatlos ergibt sich:

$$(P \cdot t + W \cdot \varphi) \cdot d = 157 \text{ Wh/Rezyklatlos}$$

Bei ca. 400 g CO<sub>2eq</sub> / kWh im deutschen Strommix entspricht das ca. 63 g CO<sub>2eq</sub> pro Rezyklatlos. Mit einer niedrig angesetzten Masse von 250 kg ergibt sich für das Los:

$$\text{Einsparung CO}_{2\text{eq}} / 250 \text{ kg Rezyklat} \geq 175 \text{ kg CO}_{2\text{eq}}$$

Die Einsparungen durch Plastikrecycling sind je nach Quelle und den darin gewählten Systemgrenzen und Gutschriften verschieden und unterscheiden sich auch für verschiedene Polymertypen. Die hier angenommene Einsparung von 700 kg CO<sub>2eq</sub> ist klein gewählt und damit konservativ geschätzt. Alle Zahlen, zu denen keine Quelle angegeben ist, sind Abschätzungen der Projektpartner.

Damit ist die Einsparung mehr als 3 Zehnerpotenzen größer als der Aufwand für das Datenhandling. Auch wenn hier der Aufwand für die Herstellung der End-Geräte nicht mit einfließt ist absehbar, dass sich die Größenordnung nicht ändern wird.

### 7.2.6 Mögliche Mitigationsmaßnahmen

Auch wenn die meisten Rebound-Effekte nicht durch die Gestaltung der im Projekt entwickelten Instrumente beeinflussbar sind, lassen sich für einzelne Rebound-Effekte Mitigationsmaßnahmen nennen.

Rebound-I: Eine hohe, homogene, garantierte Rezyklatqualität bezüglich der mechanischen Eigenschaften kann verhindern, dass in Rezyklaten mehr Material verwendet werden muss. Dies ist in vielen Produkten bereits jetzt der Fall. Die in diesem Projekt entwickelten Anwendungsfälle 1, 3 und 5 wirken in diesem Sinne.

Rebound-IV: Die Verwendung einzelner Instrumente für Kunststoff Neuware kann zwar nicht ausgeschlossen werden. Durch Auslegung der Instrumente und Design der Oberfläche sowie durch gezielte, ausschließliche Ansprache von Recyclern kann eine Verwendung für Rezyklat aber begünstigt und gefördert werden.

Rebound-VII: Dieser Rebound-Effekt kann durch die Verwendung von Strom aus erneuerbaren Quellen einfach minimiert werden. Digitale Obsoleszenz von Geräten sollte vermieden werden, indem die Anforderungen der zugehörigen Software geringgehalten werden.

Tabelle 15 stellt in einer Übersicht dar, welche der Rebound-Effekte für welche Anwendungsfall relevant sind.

**Tabelle 16 Relevanz der Rebound-Effekte für jeweiligen Anwendungsfall**

Anwendungsfall		Rebound-Effekt						
Nr.	Bezeichnung	I	II	III	IV	V	VI	VII
1	Soll-Spektrum Recycler	x	x	x	x	x	x	
2	Konzentration Recycler	x	x	x	x	x	x	
3	Soll-Spektrum Verarbeiter	x	x	x	x	x	x	

4	Konzentration Verarbeiter	x	x	x	x	x	x	
5	Schwankungs-breite	x	x	x	x	x	x	
6	Schlagzähigkeit	x	x	x	x	x	x	
7	Informationen	x	x	x		x	x	
8	Transparenz	x	x	x		x	x	
9	Datenhandling	x	x	x		x	x	x
10	Integration	x	x	x		x	x	
11	Matching	x	x	x		x	x	
12	Reflexion und Strategie	x	x	x				
13	Partnerschaften	x	x	x				
14	Geschäftsmodelle	x	x	x				

### 7.3 Diskussion

Die Instrumente wurden mit dem Ziel entwickelt, Möglichkeiten zur nachhaltigeren Gestaltung der Produktion von Kunststoffprodukten zu Verfügung zu stellen. Das Hauptziel ist dabei die Erhöhung des Einsatzes von Rezyklaten da deren Einsatz erwiesenermaßen nachhaltiger ist als der Einsatz von Neuware Kunststoff.

Die entwickelten Instrumente steigern den Rezyklateinsatz über mehrere Zwischenschritte, die in den Wirkketten dargestellt sind. Die hier aufgeführten Wirkketten sind in sich logisch schlüssig, eine Quantifizierung der Zusammenhänge ist allerdings in diesem frühen Stadium der Technologieentwicklung nicht sinnvoll möglich, da die in den Wirkketten angegebenen Zusammenhänge nicht direkt messbar sind. So geht z.B. Anwendungsfall 10 davon aus, dass durch die qualitativ und quantitativ verbesserte Datenerfassungen von Rezyklaten, Kunststoffverarbeiter mehr Rezyklate verwenden. Diese Annahme basiert auf Expertenaussagen, ist aber schwer quantitativ nachzuweisen. Der Effekt der hier entwickelten App allein ist nicht messbar, zumal die Verwendung der App erst gegen Ende des Projektes möglich war und dort auch nur getestet wurde. Grundsätzlich wird aber mit Hilfe der hier entwickelten Instrumente versucht, Einfluss auf Größen zu nehmen, die von vielen Parametern abhängig sind, sodass eine Trennung der einzelnen Einflussgrößen schwierig bis unmöglich ist. Die Zusammenhänge der Wirkketten lassen sich zwar logisch ableiten oder sind als allgemein anerkannte, qualitative Zusammenhänge klar. Eine isolierte Betrachtung dieser Zusammenhänge ist aber in der Praxis nicht möglich.

Der Spruch „eine Kette ist nur so stark wie ihr schwächstes Glied“ gilt auch für die hier genannten Wirkketten. Ist einer der aufgeführten Zusammenhänge so nicht, oder nur teilweise gültig, oder gilt nur in speziellen Fällen, so wirkt sich das auf die gesamte Wirkkette aus. Auf einige Zusammenhänge kann durch entsprechende Gestaltung der Instrumente Einfluss genommen werden. Um die Nachhaltige Wirkung dieser Instrumente zu erhöhen, so kann z.B. das Instrument 6, „Geschäftsmodellmuster“, spezifisch für nachhaltige Geschäftsmodelle gestaltet werden.

Es können außerdem die die oben genannten Rebound-Effekte eine Rolle spielen. Die meisten der Rebound-Effekte sind zwar dem Rezyklateinsatz inhärent, doch in Einzelfällen kann dem durch eine Anpassung der Instrumente entgegengewirkt werden.

Um die hier genannten Instrumente und Anwendungsfälle vergleichend betrachten zu können wurden diese in einem Aufwand vs. Nutzen Diagramm dargestellt. Die Einordnung beziehen sich in hier auf Abschätzungen der Projektpartner.

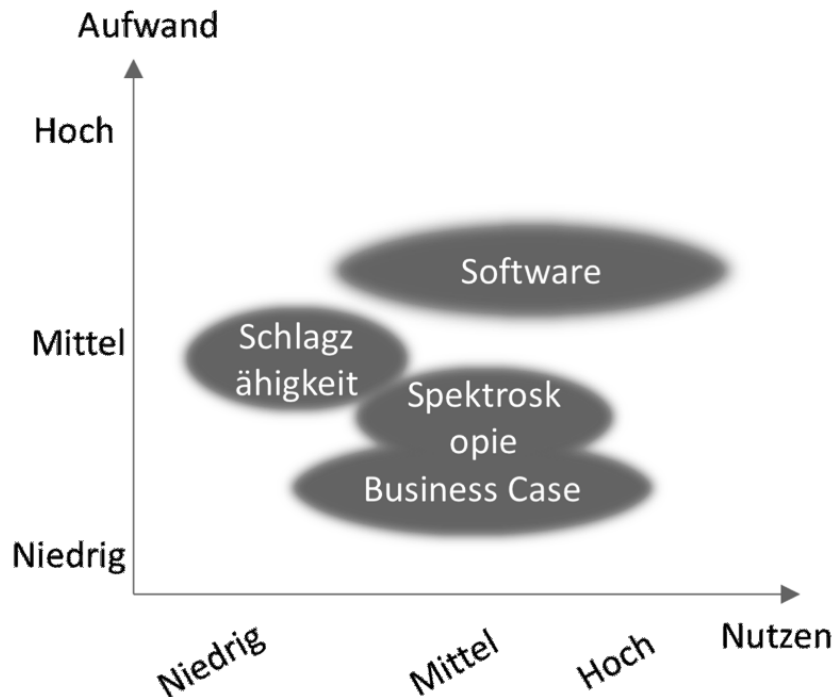


Abbildung 48 Aufwand vs. Nutzen Diagramm der genannten Instrumente und Anwendungsfälle (eigene Abbildung WI).

### Effekte erster, zweiter und dritter Ordnung

Das Projekt CYCLOPS, das sich mit einer sehr ähnlichen Technologie Entwicklung beschäftigt wurde in einer Ex-Ante Analyse durch das Ökoinstitut bewertet. Dabei wurde die folgenden drei Kategorien unterschieden:

#### Effekte erster Ordnung

Direkter Ressourcen- und Energiebedarf der verwendeten Digitalisierungstechnologien (Infrastruktur und Geräte) einschließlich der Umweltleistung von vorgelagerten Prozessen wie Hardwareherstellung und Energiebereitstellung

#### Effekte zweiter Ordnung

Unmittelbare Auswirkungen der Digitalisierungstechnologien auf die Nachhaltigkeitsperformance anderer (bereits bestehender) Produkt- / Dienstleistungssystem

#### Effekte dritter Ordnung

Mittelbare Auswirkungen auf Nachhaltigkeitsaspekte infolge der Nutzung von Digitalisierungstechnologien und deren Einfluss auf Werte, Leitbilder, Produktions-, Arbeits- und Konsumgewohnheiten, etc.

Ordnet man die in den Wirkketten gezeigten Wirkungen der Di-Link Entwicklungen diesen Kategorien zu, zeigt sich, dass vor allem Effekte zweiter Ordnung und dritter Ordnung für die positiven Effekte verantwortlich sind. Zum einen soll durch die Di-Link Entwicklungen der Produktionsprozess verbessert werden, also ein Effekt zweiter Ordnung geschaffen werden, zum anderen sollen z.B. Organisationsstrukturen geändert werden und so zu besserem Recycling beigetragen werden, ein Effekt dritter Ordnung.

## 8 Arbeitspaket 4 – Aktivierung und Dissemination der Ergebnisse

In AP4 werden die Lösungen, Erfahrungen und Erkenntnisse in Informationsmaterial zur praktischen Anwendung überführt. Es wurden Transfermaterialien, Trainingskonzepte und Transferworkshops für Unternehmen und Multiplikatoren entwickelt, um die entwickelte Systemlösung in möglichst großen Umfang bekannt zu machen. Zunächst wurde damit begonnen ein Konzept zu erarbeiten, welches mit fortschreitendem Projektverlauf weiter angepasst wurde. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass Meilenstein M6 „Transfermaterial und Trainingskonzepte entwickelt“ abgeschlossen werden konnte und M7 „Zwei Unternehmensworkshops und ein Multiplikatorenworkshop sind durchgeführt“ gegen Projektende im Mai 2022 realisiert wurden.

### 8.1 Transfermaterialien

Während der Projektlaufzeit gewonnenes Wissen über Kunststoffkreisläufe und Informationen zur Software-Applikation, werden in Form eines dreistufigen Konzepts der Öffentlichkeit bereitgestellt. Dazu wird sich verschiedener Medien bedient, zum einen die klassische Projektbroschüre, die einen schnellen Informationstransfer bietet und als PDF leicht an Unternehmen und Institutionen verteilt werden kann. Inhaltlich tiefer geht es mit dem Wissenstransfer, der direkt und leicht zugänglich in einem eigenen Wissensbereich auf der Di-LinK Applikation platziert wurde. Abgerundet werden die Transfermaterialien durch einen Kurzfilm, der die App vorstellt und die Projektinhalte zusammenfasst.

#### a) Aktuelle Projektbroschüre



Im PDF-Format wurde eine Broschüre (vgl. Abbildung 49) erstellt, die besonders dafür genutzt wurde, um die Projektergebnisse zusammenzufassen und Teilnehmer/-innen für die unterschiedlichen Workshops zu aktivieren. Der Flyer stellt die wichtigsten Erkenntnisse zur DiLinK App, Digitaler Messtechnik und den untersuchten Geschäftsmodellen dar, außerdem wird das interdisziplinäre Expertenteam vorgestellt. Anschaulich ergänzt werden die Texte durch aussagekräftige Bilder.

Abbildung 49 Titelbild der DiLinK Projektbroschüre (eigene Abbildung WI).

#### b) Der Wissenstransfer

Die Darstellung des Wissenstransfers wurde bereits in Abschnitt F&E zu einer digitalen Applikation unter dem Stichwort Wissensbereich inhaltlich näher beschrieben.

Durch die Platzierung direkt in der DiLink Applikation (vgl. Abbildung 50) ist das Wissen für jeden kostenfrei und leicht zugänglich erreichbar. Durch Klicken auf das Wort „Wissen“ öffnet sich die Seite, links ist die Menüleiste mit einer Auflistung aller Themenbereiche untergliedert in Grundlagen für Kunststoffverarbeiter, Abfallgeber und Recycler. Auf der rechten Seite erschließen sich die Themen durch graphische, tabellarische und textliche Aufbereitung der Inhalte. Die Navigation erfolgt durch Scrollen nach unten.

Die Motivation ist dabei die Imageverbesserung von Rezyklaten bei Kunststoffverarbeitern mit dem Ziel mehr Rezyklate einzusetzen. Herausforderungen zu den Themen Rezyklateinsatz und Abfallmanagement sollen berücksichtigt werden, um vorhandene Hemmnisse oder Informationsdefizite abzubauen und bestehendes Best-Practice Wissen in der Kunststoffindustrie zu verbreiten.

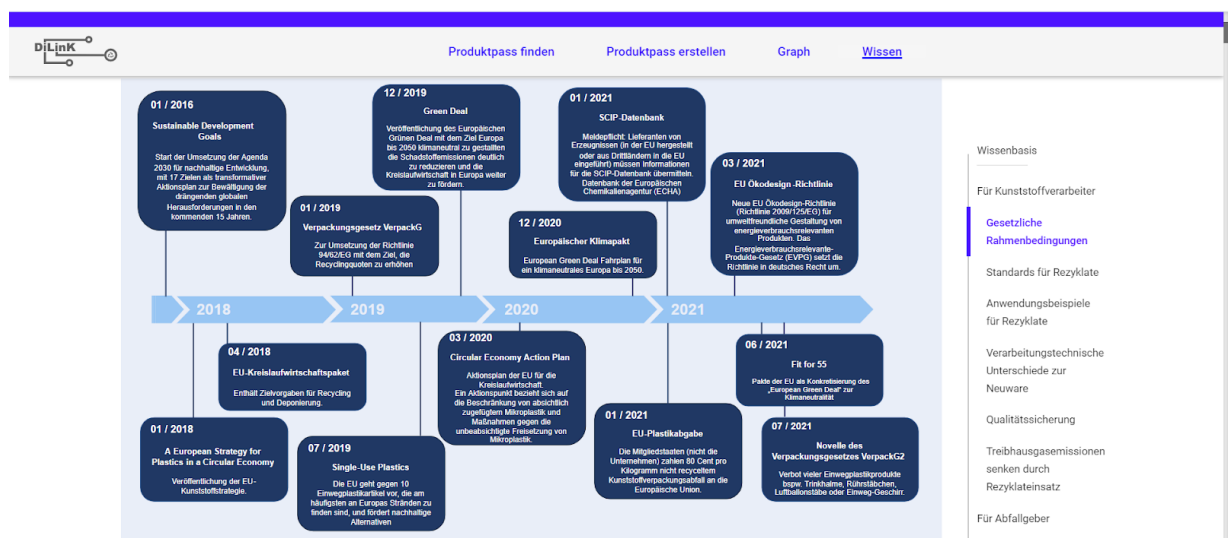


Abbildung 50 Ausschnitt Wissensbereich aus der DiLink Applikation; Kategorie „Gesetzliche Rahmenbedingungen“ (eigene Abbildung Infosim).

c) Kurzfilm

Dem Konsortium erschien es als sinnvoll, noch unerfahrenen Nutzern/-innen zunächst ein kurzes Erklärvideo bereitzustellen, um einen schnellen Einstieg in die App Nutzung zu ermöglichen. Der Kurzfilm zeigt die Motivation und Ziele für die App-Entwicklung sowie Benefits für die Zielgruppe der App beschreiben und eine theoretische App-Nutzung am Bildschirm mit Voiceover zeigen.

An dieser Stelle sei noch angemerkt, dass der ursprüngliche Gedanke aus dem Pflichtenheft bezüglich des Videomaterials „Erstellung von Video-Tutorials, die Informationen leicht verständlich aufbereiten und Mitarbeiter/-innen an den Anlagen bzgl. sortenreiner Trennung sensibilisieren“ nicht weiterverfolgt wurde. Es stellte sich heraus, dass die Arbeitsschritte in einer Produktion so individuell auf das Unternehmen und ihre Produkte abgestimmt sind, dass es schwierig umsetzbar gewesen wäre, allgemeingültige Aufnahmen zu erzeugen.

8.2 Trainingskonzepte

Praxisorientierte Transfermaßnahmen werden so aufgebaut, dass ein Modul in bestehende Lehrgänge der SKZ-Akademie eingebaut wird. Für das SKZ hat es sich zunächst

als sehr nützlich erwiesen, die Erkenntnisse der Inline-Spektroskopie aus dem DiLink Projekt sowie weiteren Ergebnissen aus zusätzlich durchgeführten Projekten, in bestehende Bildungsinitiativen zu integrieren. Für die Überwachung der Prozessqualität kommt die Onlinespektroskopie zum Einsatz. Diese misst die Lichtabsorption der Kunststoffschmelze im Extruder. Mit einer geeigneten Datenauswertung (multivariate Datenanalyse) können dann Veränderungen im Kunststoff, z.B. durch thermischen Abbau, nachgewiesen bzw. verfolgt werden. Diese Informationen können verwendet werden, um Inhomogenitäten im Ausgangsmaterial zu detektieren oder Prozessparameter wie Temperatur und Drehmoment anzupassen. Ihre Anwendbarkeit wurde auf die speziellen Problemstellungen im Recompounding getestet.

So werden heute bereits, wie in Tabelle 16 dargestellt, in den folgenden SKZ-Kursen die multivariate Datenanalyse integriert:

**Tabelle 17 Kurstermine für das Modul multivariate Datenanalyse (Inline-Spektroskopie)**

SKZ-Kursbezeichnung	Kurstermine für 2021 und 2022
<b>Farb- und Pigmentdispersionen</b>	jährliche Durchführung 10. – 11. November 2021 09. – 10. November 2022
<b>Farbsicherung in der Kunststoffverarbeitung</b>	jährliche Durchführung 18. – 19. November 2021 24. – 25. November 2022
<b>Qualitätssicherung in der Compoundierung</b>	02. Mai 2022
<b>Qualitätssicherung in der Extrusion</b>	03. Mai 2022

### 8.3 Transferworkshops für Unternehmen und Multiplikatoren

Die Transferworkshops dienen dazu die Projektergebnisse aus Messtechnikentwicklung, Applikation und Geschäftsmodelle einer möglichst breiten Öffentlichkeit zur Verfügung zu stellen. Gleichzeitig sollen die Teilnehmer/-innen die Möglichkeit erhalten die Applikation kennen zu lernen, um anschließend dem Konsortium Feedback zu möglichen Verbesserungen zu geben. Ebenso wichtig ist es dem Forschungskonsortium in die offene Diskussion mit den interessierten Anwesenden zu gehen, um Chancen und Hürden z. B. eines Produktpasses zu ermitteln.

Alle Workshops fanden gegen Projektende im Mai 2022 statt, als der Großteil der Projektergebnisse vorlag. Es wurde eine Mischung aus zwei Präsenz- und einer Online-Veranstaltung gewählt.

#### 04. Mai 2022 // Tagung in Würzburg: Digitalisierung – Erfolgreiche Geschäftsmodelle für die Kunststoffindustrie

Die Fachtagung „Digitalisierung – Erfolgreiche Geschäftsmodelle für die Kunststoffindustrie“ bietet allen Teilnehmern/-innen die Möglichkeit, über Technologien und neue Tools zu diskutieren und damit die Digitalisierung aktiv zu gestalten. Durch Digitalisierung, KI und Machine Learning entstehen neue Geschäftsfelder, die Komplexität steigt und zusätzliche Anforderungen erfordern kollaboratives Arbeiten in Netzwerken. In diesen Kontext passte auch die erstmals von Oliver Stübs und Gerrit



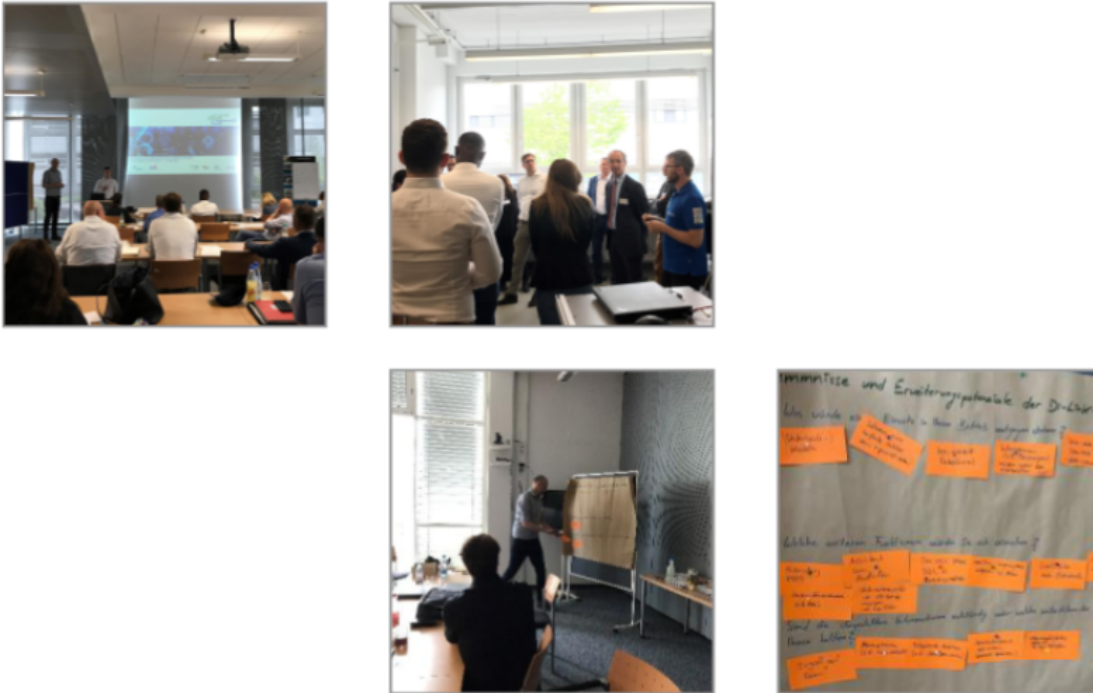
Höborn vorgestellte DiLinK Applikation. Die Tagung wird vom SKZ zweijährig ausgerichtet und begeistert ein breites Publikum aus Industrie und Forschung. Im Mai verzeichnete die Tagung insgesamt 52 Teilnehmende. Interessierte Anwesende kamen auch in direkten Austausch mit den DiLinK Präsentatoren, siehe Abbildung 51.



**Abbildung 51** O. Stübs im Austausch mit Tagungs-Teilnehmer/-innen (eigene Abbildung SKZ).

#### 16. Mai 2022 // Workshop in Kooperation mit Kunststoff-Netzwerk Franken e.V.

Das Kunststoff-Netzwerk Franken (KNF) versteht sich als Austauschplattform für die Kunststoffbranche, indem sie in diversen Arbeitskreisen den persönlichen Kontakt zwischen Fachleuten fördern. Das KNF ist dadurch ein ausgezeichnete Multiplikator für das Forschungskonsortium von DiLinK. Das KNF hat seinen Arbeitskreis Kunststoff & Umwelt mit insgesamt 25 Teilnehmer/-innen am SKZ in Würzburg abgehalten (siehe Abbildung 52). Die Herren Hoeborn, Stübs und Kugler stellten die Projektergebnisse zu Geschäftsmodell, Applikation (mit praktischer Demonstration) und Messtechnik vor. Am Ende des Arbeitskreistreffens konnten die Teilnehmer/-innen in zwei Gruppen, im Rahmen eines Workshops, ihre Ideen zu den Themen „Hemmnisse und Erweiterungspotenziale der DiLinK-Anwendung“ und „Einsetzen der Di-LinK Anwendung im Betrieb“ einbringen und somit weiteren wertvollen Input für die Reflexion der Applikation liefern. Nach der Veranstaltung wurde den Teilnehmern/-innen ein Link zur Verfügung gestellt, um die Applikation frei testen zu können.



**Abbildung 52** Impressionen des DiLinK Workshops und Rundgang durch die SKZ Technika während des Arbeitskreistreffen des KNF (eigene Abbildung SKZ).

19. Mai 2022 // Onlinemultiplikatoren und Abschlussworkshop

Gemeinsam mit dem Wuppertal Institut wurden Multiplikatoren (Verbände aus der Kunststoffindustrie), Unternehmen und Institute eingeladen an der online Abschlussveranstaltung des Projekts DiLinK teilzunehmen. Als potenzielle Multiplikatoren wurden folgende Verbände identifiziert:

- GKV Gesamtverband Kunststoffverarbeitende Industrie e.V.
- bsve - Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung e.V.
- kunststoffland NRW e.V.
- Kunststoff-Netzwerk Franken e.V.
- TecPart e.V.
- IKV Institut für Kunststoffverarbeitung
- INNONET Kunststoff
- PlasticsEurope Deutschland e.V.
- BKV GmbH
- Umwelttechnik BW GmbH
- NRW.Energy4Climate
- Stiftung 2Grad

Insgesamt meldeten sich 36 Teilnehmer/-innen an, tatsächlich haben davon dann aber nur 10 teilgenommen. Dies zeigt wiederum, dass die Bereitschaft sich an online Veranstaltungen anzumelden groß ist, allerdings auch die Tendenz anderen Terminen möglicherweise eine wichtigere Priorität einzuräumen auch hoch ist, um dann letztendlich doch nicht teilzunehmen.

Die Agenda folgte diesen zentralen Punkten:

- Kontext des Projektes

- Ergebnisse der Messtechnikentwicklung, Applikation und Geschäftsmodelle (siehe Abbildung 53)
- Hürden und Chancen für das Recycling – Aktuelle Erfahrungen aus der Praxis von Hoffmann & Voss und MKV
- Fragerunde
- DiLinK Applikation kennen lernen und App Demonstration
- Gemeinschaftliche Weiterentwicklung zu Chancen und Herausforderungen des digitalen Produktpass (über Mural Board)



Abbildung 53 Präsentation der DiLinK Projektergebnisse während der Abschlussveranstaltung (eigene Abbildung FIR).

Auch hier wurde den Teilnehmern/-innen ein Link zur Testversion der Applikation zugestellt.

Insgesamt konnten 3 erfolgreiche Workshop zum Projektende ausgerichtet werden.

## 9 Arbeitspaket 5 – Kommunikation

Die Kommunikation im Projekt wurden vom Wuppertal Institut koordiniert und geleitet aber von allen Partnern durchgeführt. Durch das öffentliche Interesse am Thema Recycling von Kunststoffabfällen sowie durch die Gesetzgebungsinitiativen zum Thema digitaler Produktpass war das Interesse an den Ergebnissen des Projektes groß und die Resonanz gut.

### 9.1 Website

Das Wuppertal Institut hat eine Website zum Projekt erstellt, die unter der Adresse [www.DiLink.de](http://www.DiLink.de) aufgerufen werden kann. Die Website wird gepflegt und enthält folgende Inhalte:

- Übersicht über das Projekt, die Partner etc.
- informiert mit regelmäßigen aktuellen Neuigkeiten zum in DiLink behandelten Themenfeld
- informiert über die aktuelle Presseberichtserstattung zu DiLink
- informiert über Veranstaltung im Rahmen von DiLink oder mit Überschneidungen zu DiLink Themengebieten
- informiert über im Rahmen von DiLink entstandene Veröffentlichungen
- bietet die Möglichkeit der einfachen Kontaktaufnahme zum DiLink Projektteam

Die Website wird nach Ende der Projektlaufzeit stillgelegt.



Abbildung 54 Screenshot der Di-Link Website (eigene Abbildung WI).

### 9.2 Flyer

Als analoges Informationsmaterial wurde zu Beginn des Projektes ein Flyer zum Projekt gestaltet und gedruckt. Der Flyer findet sich im Anhang. Für die Workshops und die Abschlussphase des Projektes wurde ein zweiter Flyer entworfen der die Ergebnisse und Erkenntnisse des Projektes kommuniziert. Auch dieser Flyer findet sich im Anhang zum Bericht.

### 9.3 Social Media

Inhalte zu Di-Link wurden über die Social Media Kanäle (LinkedIn, Twitter) der beteiligten Partner geteilt und verbreitet.

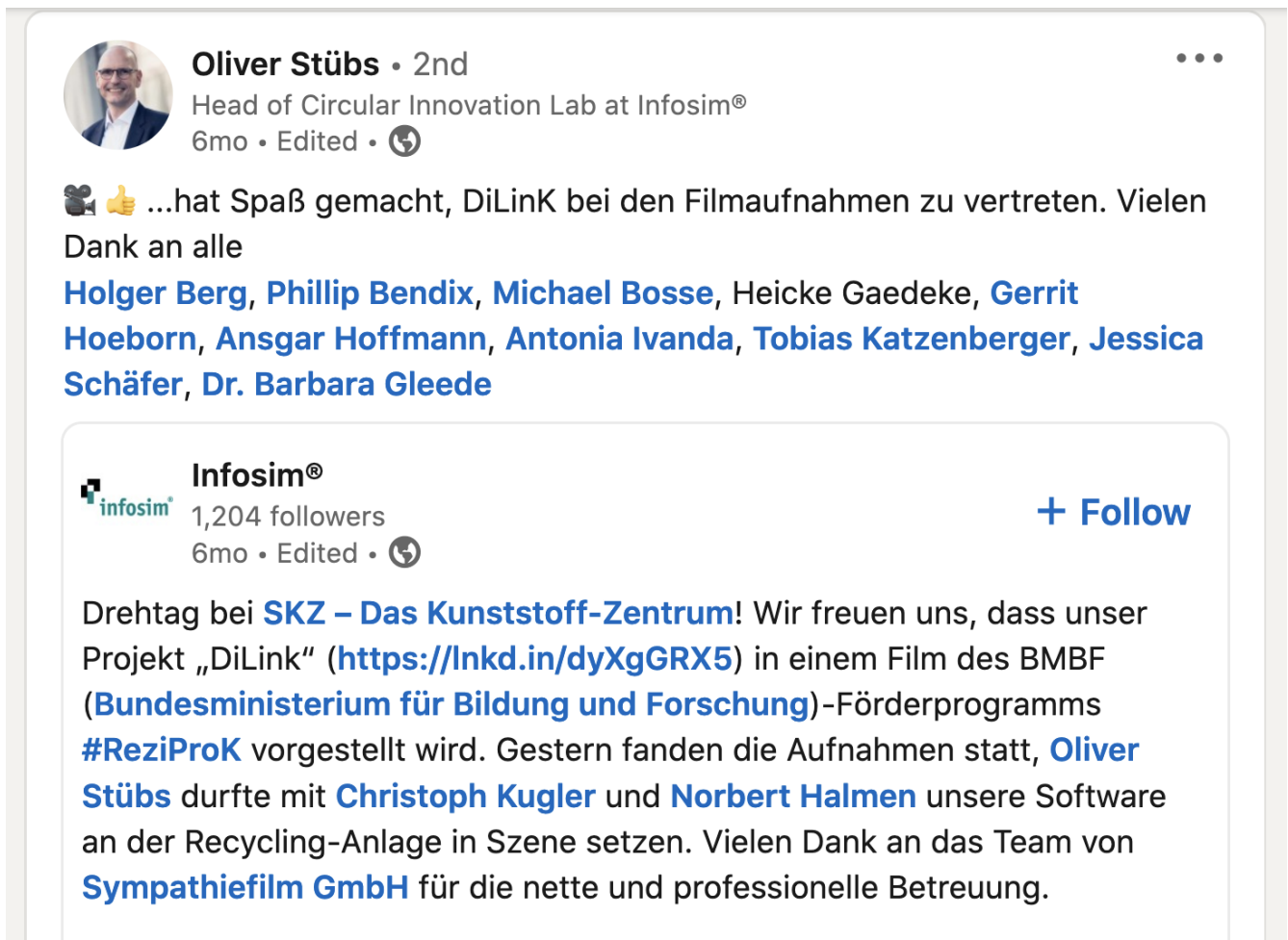


Abbildung 55 Screenshot eines Social-Media Posts zu den Filmaufnahmen am SKZ (Quelle LinkedIn).



Abbildung 56 Screenshot eines Social Media Posts zum Abschlussworkshop von DiLink (Quelle LinkedIn).

#### 9.4 Berichterstattung und Veranstaltungen zu DiLink

Das Projekt DiLink findet in Fachkreisen und auch darüber hinaus Beachtung. Folgende Berichterstattung zu DiLink fand statt:

- Recyclingportal – Berichterstattung zum Beginn des Projektes am 31.07.2019
- Recyclingmagazin – Bericht zum Projektstart am 31.07.2019
- EU-Recycling – Allgemeiner Bericht über das Projekt am 09.09.2019
- BMBF – Pressemitteilung des Bundesministeriums zur Förderung des Projektes am 16.12.2019
- BVSE – allgemeine Berichterstattung zum Projekt auf der Seite des Fachverbandes für Kunststoffrecycling am 17.12.2019
- Di-Link wurde als Projekt der Woche durch das Bundesministerium für Forschung und Bildung ausgezeichnet und pressewirksam präsentiert.
- Ein Interview mit Herrn Dr. Berg zu den Hintergründen und Inhalten des Projektes sowie zu den dort entwickelten technischen Lösungen wurde im Onlineangebot der (populär)wissenschaftlichen Zeitschrift Spektrum der Wissenschaft veröffentlicht, 19.02.2020
- Es wurde ein Bericht zum Projekt in 320°, Deutschlands Online-Magazin für die Recyclingwirtschaft, veröffentlicht.
- Der Thementag "Zukunftstrends in der Kreislaufwirtschaft" wurde durch das SKZ organisiert und am 11.03.2020 durchgeführt. Die Fachkonferenz zum Thema Kreislaufwirtschaft: „Innovationstag Circular Economy“ wurde am 28.05.202 durch das SKZ organisiert. Bei beiden Veranstaltungen wurde durch das SKZ auf das Projekt aufmerksam gemacht.



- Das Projekt wurde im Online-Webinar "Digitale Tools als Wegbereiter der Circular Economy" vom UmweltCluster Bayern am 08.12.2020 durch InfoSim vorgestellt.
- Das Projekt wurde im Energie- und Umweltausschuss der IHK Würzburg-Schweinfurt durch Infosim vorgestellt.
- Das Projekt wurde in „PLASTICS ECONOMY – KUNSTSTOFFE IN DER KREISLAUFWIRTSCHAFT“ eine Veranstaltung von Hessen Trade & Invest gemeinsam mit der DECHEMA am 24.09.2019 vertreten.
- Vorstellung des Projektes beim Reziprok Vernetzungstreffen am 10.12. und 11.12.2019
- Di-Link wurde durch das FIR beim Zero Waste Berlin Festival am 17-19.09.2021 vertreten.
- Di-Link wurde durch das FIR bei der “International Conference on Competitive Manufacturing (COMA)” vertreten.

## 9.5 Publikationen

Außer den oben erwähnten Artikeln im Zuge der Berichterstattung zu Di-Link wurden aus der Projektarbeit heraus die folgenden Publikationen von den Projektpartnern verfasst:

- Artikels „Di-Link – Digitale Lösungen für industrielle Kunststoffkreisläufe: Ressourceneffiziente Kreislaufschließung der Kunststoffwirtschaft mithilfe innovativer und passgerechter digitaler Lösungen“ bei der Zeitschrift „Unternehmen der Zukunft UdZ“
- Artikel „Kein Kreislauf von Kunststoffen ohne Digitalisierung“ in der K-Zeitung
- Policy Brief „Stärkung des Kunststoffrecyclings – Lessons learned aus Recherche und Unternehmensbefragung“
- Policy Brief „Digitaler Produktpass für Kunststoffrezyklate“
- Artikel “A Framework for Leveraging Twin Transition In the Manufacturing Industry“ im Rahmen der COMA
- Artikel „Interaktion räumlicher und digitaler Strukturen in der B2B-Kreislaufführung von Kunststoffen“ in STANDORT Zeitschrift für angewandte Geografie

## 9.6 Einfluss der Corona-Pandemie

Die übliche Kommunikation hat sich während der Projektlaufzeit stark verändert, da im Zuge der Corona-Pandemie Präsenzveranstaltungen zu großen Teilen nicht mehr stattgefunden haben. Auf der anderen Seite wurden viele Veranstaltungen in einem digitalen Format durchgeführt. Die Projektpartner haben ihre Kommunikation diesen Gegebenheiten angepasst. So wurde auch der Abschluss- und Multiplikatorenworkshop online durchgeführt. Die hierdurch entstandenen Herausforderungen wurden vom Projektteam gut gelöst, es gab keinen negativen Einfluss auf die Außendarstellung des Projektes.

## 9.7 Reziprok

Die Ergebnisse und Fortschritte des Projektes fanden auch Einfluss in die Kommunikation des Begleitvorhabens Reziprok. So wurden z.B. Projektblätter erstellt, Videoaufnahmen für einen Film gemacht, gemeinsame Publikationen verfasst und ein deutscher und englischer Flyer gestaltet.



## 10 **Arbeitspaket 6 – Projektmanagement**

Neben generellen organisatorischen Aufgaben im Verlauf des Projekts wurden insbesondere folgende Punkte vom Wuppertal Institut bearbeitet:

### **Cloud Storage**

Zum Start des Projektes wurden allen Beteiligten die Cloud Storage Lösung „Nextcloud“ zur Verfügung gestellt. „Gehosted“ wird dieser Service von Hetzner in Deutschland, relevante Sicherheitsanforderungen wurden zuvor durch das WI geprüft und sind sichergestellt. Die Administration und Nutzerverwaltung erfolgt durch das WI. Die Hauptfunktion dieser Cloud-Lösung war der gemeinsame Speicherplatz für Daten, die das Projekt betreffen. Das System erfüllt die gesetzlichen Ansprüche An Datenschutz und -sicherheit.

### **Regelmäßige Besprechungen**

Zusätzlich zu den internen Besprechungen der Partner untereinander fanden weitere Besprechungen im Kreis des ganzen Projektteams statt, um über den aktuellen Arbeitsstand der Arbeitspakete zu berichten, dass weitere Vorgehen gemeinsam festzulegen und Absprachen innerhalb des Teams zu treffen. Diese Besprechungen innerhalb des Projektteams fanden über Video- und Telefonkonferenzen statt. Die Besprechungen wurden nach Bedarf und aktuellem Arbeitsstand einberufen, durch das WI organisiert und protokolliert. Die betreffenden Protokolle standen allen Projektpartnern auf dem File-Storage zur Verfügung.

### **Organisation der Projekttreffen**

Projekttreffen wurden durch das Wuppertal Institut organisiert. Bedingt durch die Corona-Pandemie fand nur das Projekt Kick-Off Treffen als Vor-Ort Termin statt. Alle anderen Projekttreffen fanden digital statt.

### **Kooperationsverträge**

Es wurden Kooperationsverträge zwischen allen am Projekt beteiligten Partnern geschlossen.

### **Erstellung des Zwischenberichts**

Die Zwischenberichte wurden von allen Partnern erstellt und dem Projektträger durch das Wuppertal Institut zur Verfügung gestellt.

### **Mitwirken bei den Treffen des Verbundvorhabens**

Das Projektteam wirkte bei den Treffen des Verbundvorhabens mit und engagierte sich in den Querschnittsfragen „Geschäftsmodelle“ und „Bewertungswerkzeuge / LCA“ sowie bei den Lenkungskreissitzungen.

### **Corona Pandemie**

Zu Beginn der pandemischen Lage des COVID-19 Erregers wurde als Reaktion auf die neu eingetretene Situation das Risiko für die Durchführung des Projektes bewertet und das Ergebnis dem Auftraggeber als Bericht zur Verfügung gestellt. Die Risiken durch COVID-19 wurden kontinuierlich bewertet. Es kam zu keinem Zeitpunkt eine größere negative Auswirkung auf den Projektverlauf. Wichtige Vor-Ort Termine wie z.B. zur Erprobung der Messtechnik bei den Industriepartnern konnten unter den gegebenen Schutzvorkehrungen durchgeführt werden.

## 11 Anhang

### 11.1 Interviewleitfaden Kunststoffverarbeiter / Compoudeure

#### Hintergrundinformationen zum Interview

Um den Abfall- und Rezyklatmarkt von Kunststoffen im Sinne einer funktionierenden Kreislaufwirtschaft zu stabilisieren, soll den Akteuren unterschiedlicher Branchen eine neuartige Systemlösung zur Verfügung gestellt werden. Zum einen soll eine digitale Anwendung Wiederaufbereitern von Kunststoffabfällen und Kunststoffverarbeitern ermöglichen für ihre Anforderungen geeignete Sekundärkunststoffquellen zu identifizieren und langfristige Liefersicherheiten garantieren. Zum anderen soll eine prozessintegrierte Qualitätssicherungsmethode für die Herstellung von Regranulaten und Recompounds weiterentwickelt werden. Wiederaufbereiter haben dadurch die Möglichkeit ihre Qualitätsprüfung im Labor durch eine durchgehende Prozessüberwachung zu erweitern.

#### Ziel des Interviews

Die zu entwickelnde digitale Anwendung inkl. ihrer Funktionen soll von möglichst großem Nutzen für die jeweiligen Unternehmen in der Wertschöpfungskette sein. Um dies zu garantieren, erfolgt zunächst eine Bestimmung der Ist-Situation. Dabei ist folgenden übergeordneten Fragen nachzugehen: Wie wird mit Kunststoffabfällen umgegangen? Wie verbreitet ist der Einsatz von Rezyklaten in den Unternehmen (im Vergleich zu Primärmaterial)? Wo sind / werden die größten Probleme / Hindernisse bzgl. mehr Rezyklatverwertung gesehen? Besteht Bereitschaft herkömmliche Handlungsweisen zu verändern (z.B. Daten auszutauschen)?

#### Gliederung des Interview-Fragebogens

1. Allgemeine Angaben zum Unternehmen und der Wertschöpfungskette
2. Einsatz von Rezyklaten im Unternehmen
3. Angaben zu Produktions- und Verpackungsabfällen
4. Technische (Prozess-) Angaben
5. Digitalisierung

## 1. Allgemeine Angaben

- 1.1. Name ihres Unternehmens
- 1.2. Ihr Name und ihre Position
- 1.3. Für welchen Anwendungsbereich produziert ihr Unternehmen? (z.B. Automobilindustrie, Verpackungsindustrie, Bauwesen, Elektronik, Medizinischer Bereich, Landwirtschaft, etc.)
- 1.4. Ist ihr Unternehmen zertifiziert?
  - 1.4.1. nach ISO 9001:
  - 1.4.2. ISO 14001:
  - 1.4.3. weiteres Managementsystem:
- 1.5. Welche Menge Kunststoff verarbeitet ihr Unternehmen jährlich?
- 1.6. Nennen Sie bitte ihre „Top 3“ Produkte, die in ihrem Unternehmen produziert werden?
- 1.7. Welche Materialien verarbeiten Sie? (z.B. PE-LD/LLD, PE-HD, PP, PS, PS-E, PVC, ABS, ASA, SAN, PMMA, PA, PET, PUR, etc.) Geben Sie bitte die ungefähre Aufteilung in Prozent an.

### WERTSCHÖPFUNGSKETTE

- 1.8. Wer sind ihre typischen Zulieferer?
- 1.9. Wer sind ihre typischen Kunden?
- 1.10. Arbeiten Sie mit Intermediären zusammen, wie bspw. Handelsplattformen und dienen diese dem Kauf oder Verkauf von Gütern?
- 1.11. Gibt es in der gesamten Wertschöpfungskette bei Ihnen Unternehmen, die besonders viel oder besonders wenig Wert schöpfen oder Einfluss auf die Wertschöpfungskette haben?
- 1.12. Neben dem Gut und Geld als Handelsbasis, gibt es weitere Dienstleistungen oder spez. Informationen (Daten) die Sie an Ihre Kunden weitergeben oder von Ihrem Zulieferer erhalten?
- 1.13. Kommt bei der Herstellung ihrer Produkte Rezyklat zum Einsatz? Wenn ja, dann weiter bei 2. „Einsatz von Rezyklaten“. Wenn nein, dann weiter bei 1.14.
- 1.14. Was hindert Sie daran Rezyklate einzusetzen? (Gesetzgebung, Lebensmittelkontakt, Verunreinigungen, Geruch, Farbe, Verfügbarkeit, Flammenschutz, Kundenanforderung). Weiter bei Frage 2.11.

## 2. Einsatz von Rezyklaten

- 2.1. Welche Produkte stellen Sie (teilweise) aus Rezyklaten her? Aus welchen Materialien?

- 2.2. Welche Verarbeitungsprozesse kommen für die Herstellung von Produkten aus Rezyklat/mit Rezyklatanteil zum Einsatz? (z.B. Extrusion, Spritzgießen, Thermoformen, Folienblasen, etc.)
- 2.3. Was ist der durchschnittliche Prozentsatz an eingesetztem Rezyklat im Verhältnis zur Gesamtmenge des verarbeiteten Kunststoffes?
- 2.4. Falls der Rezyklateinsatz bei ihren Produkten unter 50% liegt, was hindert Sie daran mehr Rezyklate einzusetzen? (Gesetzgebung, Lebensmittelkontakt, Verunreinigungen, Geruch, Farbe, Verfügbarkeit, Flammschutz, Kundenanforderung)
- 2.5. Woher bezieht ihr Unternehmen Rezyklat (im eigenen Unternehmen hergestellt, zugekauft)? Wenn im eigenen Unternehmen produziert, dann weiter bei Frage 2.9.
- 2.6. Werden für das von Ihnen gekaufte Rezyklat und den entsprechenden Recyclingmaschinen weitere Informationen (technische Daten) mitgeliefert?
- 2.7. Gibt es Probleme mit der Verfügbarkeit und/oder Qualität von Rezyklaten? Wenn ja, welche sind das?
- 2.8. Werden für das von Ihnen gekaufte Rezyklat und den entsprechenden Recyclingmaschinen weitere Informationen (technische Daten) mitgeliefert?
- 2.9. Welche Daten müssen Ihnen mindestens zu einem Rezyklat vorliegen, um es zu kaufen und einzusetzen?
- 2.10. Welche zusätzlichen Daten liegen i.d.R. nicht vor, die Sie aber benötigen, um die Rezyklatmenge in Ihrer Produktion zu erhöhen?
- 2.11. Gibt es Produkte, für die Sie Rezyklat verwenden möchten, bei denen Sie sich [aber aufgrund von Engpässen und / oder fehlenden zusätzlichen Spezifikationen] unwohl fühlen? Welche zusätzlichen Spezifikationen wären für Sie hilfreich? Warum scheitert es? Erfüllen die Spezifikationen ihre Anforderungen nicht oder wissen Sie überhaupt nicht, was die Spezifikationen sind? (vgl. Datenblattwerten) MFI MFR, Temp.-Bereich, um Kunststoff anzuwenden; Welche Größen sind nötig? Wie ist es in der Branche? (Einschätzung des Interviewpartners hilfreich)
- 2.12. Was hindert Sie über die o.g. Gründe hinaus daran, Rezyklat für Ihre Produkte zu verwenden?
- 2.13. Nehmen wir an, ein möglichst hoher Einsatz von Rezyklat soll angestrebt werden. Können sie kurz umschreiben, welche dafür idealen Voraussetzungen (bzgl. Material und Anlagentechnik) für ihr Unternehmen gegeben sein müssten?

### 3. Angaben zu anfallenden Abfällen

- 3.1. Wie viel Produktionsabfall fällt bei Ihnen pro Monat an? (Anfahr-/Fehlteile)
- 3.2. Wie viele Verpackungsabfälle fallen bei Ihnen pro Monat an?

- 3.3. Wie gehen Sie mit dem Produktionsabfall und den Verpackungsabfällen um? (internes bzw. externes Recycling, externe thermische Verwertung)
- 3.4. Können Sie mit diesem Abfall Gewinne erzielen oder müssen Sie für Entsorgungsleistungen bezahlen?
- 3.5. Stellen Sie dem Rezyklierer, der Ihre Produktionsabfälle verarbeitet, weitere Materialdaten bereit? (Handelsname, Kunststoff-Typ, Datenblatt, Dichte, MFI, REACH, Füllstoffe, mögliche Verunreinigungen, Farbe Masterbatch)  
Wenn nicht, warum? Wann wäre es attraktiv für Sie? Unter welchen Voraussetzungen würden Sie es tun? Wenn ja: Warum tun sie das? Welchen Zweck hat das Ganze? (gilt für Fragen 3.5 – 3.7)
- 3.6. Stellen Sie dem Rezyklierer, der Ihre Produktionsabfälle verarbeitet weitere Informationen zu den Prozessdaten bereit? (Industriebereich, Herstellungsprozess, Produktionszeitraum, wurde bereits verarbeitet, hat bereits einen Trennprozess durchlaufen)
- 3.7. Wenn Sie Ihre Produktionsabfälle extern recyceln lassen, geben Sie dann weitere Informationen zu Maschinendaten an? (Verarbeitungstemperatur, Grundlegende Maschineninformationen)
- 3.8. Gibt es weitere Informationen, die Sie dem externen Recycler zusätzlich zur Verfügung stellen können?
- 3.9. Was sind die Hindernisse für das werkstoffliche Recycling Ihrer Produktionsabfälle?

## 4. Technische Angabe

- 4.1. Welche Analyseverfahren verwenden Sie für regelmäßige Laboruntersuchungen an Ihren Produkten?
- 4.2. Wie viele Sensoren verwenden Sie pro Produktionslinie?
- 4.3. Verwenden Sie in Ihren Verarbeitungsmaschinen neben Druck- und Temperaturmessgeräten weitere Sensoren?
- 4.4. Verwenden Sie in Ihren Verarbeitungsmaschinen Online-Sensoren? (Online Rheologiemessung / Farbmessung)
- 4.5. Welche Prozessdaten erfassen Sie?
- 4.6. Speichern Sie Sensor- oder Prozessdaten? (Dateityp, Programm, Anwendung)
- 4.7. Nutzen Sie Datenvisualisierungstechniken zur Unterstützung Ihrer Mitarbeiter?
- 4.8. Verwenden Sie Daten für die Entscheidungsfindung in der Prozess-/Qualitätskontrolle und Prozessoptimierung? (Manuelle / Automatische Entscheidungsfindung)

## 5. Digitalisierung

- 5.1. Welche Softwaresysteme setzt ihr Unternehmen ein?
  - In der Unternehmenssteuerung (z.B. ERP-System, Warenwirtschaftssystem)
  - In der Produktion (z.B. PPS, MES)
- 5.2. Wie müsste die digitale Lösung aussehen? Was wäre ihre Lösung? Was würde ihnen helfen? Z.B. Maschinendaten automatisch aufbereiten, damit ich die weitergeben kann? Eine digitale Lösung muss xy können, dass sie mir hilft
- 5.3. Gibt es in Ihrer Produktion ein zentrales System, z.B. zur Produktionsüberwachung, zum Datenmanagement?
- 5.4. Spüren sie steigende Anforderungen ihrer Kunden hinsichtlich der „Digitalisierung“, werden z.B. mehr Datentransparenz oder eine schnellere Abwicklung gefordert?
- 5.5. Planen sie, ihre Anlagen /Geräte zu vernetzen (in welchem Zeitraum) oder haben sie dies schon umgesetzt?
- 5.6. Welche technischen Voraussetzungen müssten dazu vorhanden sein, welche fehlen bislang?



## 11.2 Anhang zum Stauts-Quo Wertschöpfungssystem

### Rohstofflieferant

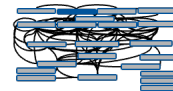


#### Wertschöpfung

- Fördern Erdgas / Erdöl
- Mit steigender Sekundärverwertung sinkt Abhängigkeit / Nutzen vom Rohstofflieferant
- Bsp.: Gazprom, ExxonMobil, Shell



### Rohstoffverarbeiter

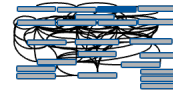


#### Wertschöpfung

- Raffinerien, die das Rohöl zu Naphtha (Rohbenzin) destillieren
- Steamcracker, welche Naphtha zu kurzketige Kohlenwasserstoffe (bspw. Ethen / Ethylen) wandeln
- Ebenso negative Korrelation mit steigendem Grad der Sekundärkunststoffverwertung
- Bsp.: BASF, Aral/BP, Total,



## Kunststoffhersteller



### Wertschöpfung

- Verarbeiten von bspw. Ethen zu Polyethylen (in Rohrreaktoren)
- Oft in Granulatform (Pelletierung)
- Beliefern von Kunststoffverarbeiter 1. Grades (Großunternehmen & KMU)
- Einmischen von Sekundärkunststoffanteil in Pelletproduktion & ggf. zusätzliche Reinigung
- Bsp.: BASF, Covestro



## (Granulat-) Zwischenhändler

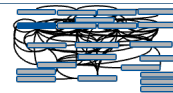


### Wertschöpfung

- Schnittstelle zwischen großen Kunststoffhersteller und KMU-Kunststoffverarbeiter
- Kauft vom Hersteller große Mengen ein und vertreibt sie an mehrere KMU-Verarbeiter



## Kunststoffverarbeiter 1. Grades (Großunternehmen)

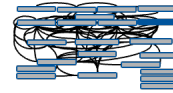


### Wertschöpfung

- Großunternehmen, welche Kunststoffgranulat zu Halbzeug oder Teilprodukten (Bspw. Profilprodukte, welche noch in nachfolgenden Schritten weiterverarbeitet/integriert werden) durch Extrusion/Spritzguss/Spritzpress/usw. verarbeiten
- Primär direkter B2B Auftragsgeschäft, Vertrieb aber auch über Plattformen möglich
- Einmischen von Sekundärkunststoffanteil in Produktion & ggf. zusätzliche Reinigung
- Größere Mengen an nicht kontaminierten, sortenreinen Kunststoffabfällen
- Besitzen gute (aber nicht optimale) Wege & Informationensysteme Kunststoffabfälle zum Recycler zu bringen
- Bsp.: Covestro, Arburg



## Kunststoffverarbeiter 2. Grades (KMU)



### Wertschöpfung

- Kleine und mittlere Unternehmen, welche Teilprodukte zu Kunststoffendprodukten (Bspw. Verpackungen, Behälter die von Monteuren für ihre Produkte verwendet werden) verarbeitet
- Primär direkter B2B Auftragsgeschäft, Vertrieb aber auch über Plattformen möglich
- Kleinere Mengen an sortengemischten Kunststoffabfällen erschweren den Recyclingprozess immens (Lagerungsproblem, Sortierungsproblem)
- Kunststoffmüll wird primär an Abfalldeponien abgegeben

### Vorgelagert

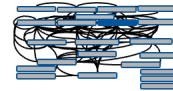
(Granulat-) Zwischenhändler, Kunststoffverarbeiter 1. Grades (Großunternehmen & KMU), Kunststoffplattformen, Recycler / Recompoundeure, Abfallvorbereiter / Mahlbetriebe

Position

### Nachgelagert

Kunststoffplattformen, Recycler / Recompoundeure, Abfallvorbereiter / Mahlbetriebe, Monteure, Abfalldeponien

## Kunststoffverarbeiter 2. Grades (Großunternehmen)



### Wertschöpfung

- Großunternehmen, welche Teilprodukte zu Kunststoffendprodukten (Bspw. Verpackungen, Behälter die von Monteuren für ihre Produkte verwendet werden) verarbeitet
- Primär direkter B2B Auftragsgeschäft, Vertrieb aber auch über Plattformen möglich
- Größere Mengen an nicht kontaminierten, sortenreinen Kunststoffabfällen
- Besitzen gute (aber nicht optimale) Wege & Informationensysteme Kunststoffabfälle zum Recycler zu bringen

### Vorgelagert

Kunststoffhersteller, (Granulat-) Zwischenhändler, Kunststoffverarbeiter 1. Grades (Großunternehmen & KMU), Kunststoffplattformen, Recycler / Recompoundeure, Abfallvorbereiter / Mahlbetriebe

Position

### Nachgelagert

Kunststoffplattformen, Recycler / Recompoundeure, Abfallvorbereiter / Mahlbetriebe, Monteure, Abfalldeponien

## Kunststoffverarbeiter 1. Grades (KMU)

### Wertschöpfung

- Kleine und mittlere Unternehmen, welche Kunststoffgranulat zu Teilprodukten (Bspw. Profilprodukte, welche noch in nachfolgenden Schritten weiterverarbeitet/integriert werden) durch Spritzguss/Spritzpress/usw. verarbeiten
- Primär direkter B2B Auftragsgeschäft, Vertrieb aber auch über Plattformen möglich
- Einmischen von Sekundärkunststoffanteil in Produktion & ggf. zusätzliche Reinigung
- Kleinere Mengen an sortengemischten Kunststoffabfällen erschweren den Recyclingprozess immens (Lagerungsproblem, Sortierungsproblem)
- Kunststoffmüll wird primär an Abfalldeponien abgegeben

### Vorgelagert

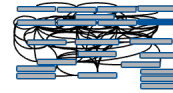
(Granulat-) Zwischenhändler, Kunststoffhersteller, Kunststoffplattformen, Kunststoffrecycler, Kunststoffplattformen, Recycler / Recompoundeure, Abfallvorbereiter / Mahlbetriebe

Position

### Nachgelagert

Kunststoffverarbeiter 2. Grades (Großunternehmen & KMU), Kunststoffplattformen, Recycler / Recompoundeure, Abfallvorbereiter / Mahlbetriebe, Abfalldeponien

## Kunststoffverarbeiter 2. Grades (KMU)



### Wertschöpfung

- Kleine und mittlere Unternehmen, welche Teilprodukte zu Kunststoffendprodukten (Bspw. Verpackungen, Behälter die von Monteuren für ihre Produkte verwendet werden) verarbeitet
- Primär direkter B2B Auftragsgeschäft, Vertrieb aber auch über Plattformen möglich
- Kleinere Mengen an sortengemischten Kunststoffabfällen erschweren den Recyclingprozess immens (Lagerungsproblem, Sortierungsproblem)
- Kunststoffmüll wird primär an Abfalldeponien abgegeben

### Vorgelagert

(Granulat-) Zwischenhändler, Kunststoffverarbeiter 1. Grades (Großunternehmen & KMU), Kunststoffplattformen, Recycler / Recompoundeure, Abfallvorbereiter / Mahlbetriebe

Position

### Nachgelagert

Kunststoffplattformen, Recycler / Recompoundeure, Abfallvorbereiter / Mahlbetriebe, Monteure, Abfalldeponien

## Kunststoffplattformen



### Wertschöpfung

- Online Plattformen, worüber Kunststoffgranulat und Teilprodukte angeboten und vertrieben werden
  - Primärkunststoffe (alibaba)
  - Sekundärkunststoffe (Cirplus)
- Verbindet Kunststoffrecycler und Kunststoffverarbeiter / -hersteller miteinander

### Vorgelagert

Kunststoffhersteller, Kunststoffverarbeiter 1. und 2. Grades (Großunternehmen & KMU), Recycler / Recompoundeure, Abfallvorbereiter / Mahlbetriebe

Position

### Nachgelagert

Kunststoffverarbeiter 1. und 2. Grades (Großunternehmen & KMU), Recycler / Recompoundeure, Abfallvorbereiter / Mahlbetriebe, Monteure

## Recycler / Re-Compoundeur



### Wertschöpfung

- Sortieren und anschließendem Regranulieren von kontaminationsfreien Kunststoffabfällen
- (Einschmelzen und Vorverarbeitung von Sekundärkunststoffen)
- Rücklieferung an Kunststoffplattformen, welche Sekundärkunststoffe dann weiter an Kunststoffverarbeiter 1. Grades weiterleiten können
- Direkte Lieferung von gereinigte hochwertigen Sekundärkunststoff an Kunststoffverarbeiter 1. Grades

### Vorgelagert

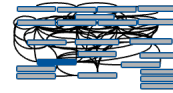
Kunststoffverarbeiter 1. und 2. Grades (Großunternehmen & KMU), Kunststoffplattformen, Abfallvorbereiter / Mahlbetriebe

Position

### Nachgelagert

Kunststoffverarbeiter 1. und 2. Grades (Großunternehmen & KMU), Kunststoffplattformen

## (Kunststoff-) Abfallvorbereiter / Mahlbetriebe

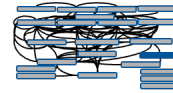


### Wertschöpfung

- In Besitz von Maschinen (bspw. Shredder) für Verarbeitung von Kunststoffabfall
- Erste Sammelstelle des Kunststoffabfalls
- Erste Reinigung und Zerkleinerung des Plastikmülls



## Monteur

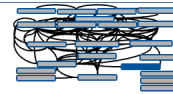


### Wertschöpfung

- Beschaffung von Kunststoffverarbeiter 2. Grades (Großunternehmen & KMU)
- Kommissionierung der Kunststoffprodukte (bspw. Behälter, Folien) zu Konsumprodukte (bspw. Flaschen, Joghurtbecher)
- Vertrieb an Endkunden
- Bsp.: Pril, Danon



## Endkunden

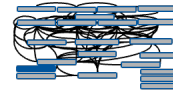


### Wertschöpfung

- Privathaushalte (Konsumenten), welche Kunststoffe(-produkte) im Alltag verbrauchen
- Entsorgungsmöglichkeit besteht mit wenigen Ausnahmen (PET-Flaschen) nur aus Abfalldeponien



## Verbrennungsanlagen

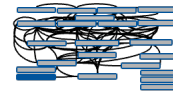


### Wertschöpfung

- Thermische Verwertung vom gesammelten Kunststoffabfall



## Abfallexporteure

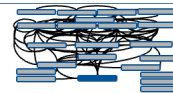


### Wertschöpfung

- Exportiert Kunststoffabfall ins Ausland



## Abfalldeponien

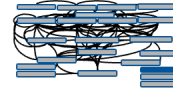


### Wertschöpfung

- Sammeln sortenunreinen, ggf. kontaminierten Kunststoffabfall
- Ein geringer Teil wird aussortiert und weiter zum Kunststoffrecycler gebracht
- Großteil wird entweder verbrannt (thermische Verwertung) oder exportiert



## Standardisierung

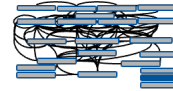


### Wertschöpfung

- Kann sowohl von internen (bspw. Weitverbreitete Industriestandards) als auch externen Quellen (Gesetzgebung) geschaffen werden
- Setzt qualitative / methodische Rahmenbedingungen für das Ecosystem



## Recht

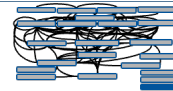


### Wertschöpfung

- Gesetzesgeber
- Erlässt Gesetze, welche großen Einfluss auf die Industrie haben können (bspw. EU-Verbot für Einwegplastik)
- Setzt rechtliche Rahmenbedingungen für das Ecosystem



## Auditor



### Wertschöpfung

- Prüft, ob Unternehmen sich an Standards der Kunststoffherstellung / -verarbeitung / -recycling halten (?)
- Kontrolliert, ob Rahmenbedingungen des Ecosystems vom Unternehmen eingehalten wird



## 11.3 Veröffentlichungen

### 11.3.1 „Kein Kreislauf von Kunststoffen ohne Digitalisierung“

23.6.2022

Kein Kreislauf von Kunststoffen ohne Digitalisierung - K-ZEITUNG



#### Kein Kreislauf von Kunststoffen ohne Digitalisierung

28. Januar 2020 / Recycling, Technik

Das Projekt Di-Link soll die Datentransparenz und -kommunikation entlang der Kunststoffwertschöpfungskette erhöhen, um den Stoffkreislauf zu schließen.

An der Kreislaufführung von Kunststoffen führt kein Weg mehr vorbei, doch dies ist nicht nur eine große Herausforderung, sondern birgt auch Chancen für innovative Unternehmen.

#### Kunststoffstrategie der EU forciert Kreislaufwirtschaft

Die im Jahr 2018 veröffentlichte Kunststoffstrategie der EU sowie das neue deutsche Verpackungsgesetz setzen den Wunsch der Öffentlichkeit um, die Kreislaufwirtschaft weiter voranzutreiben. Auch die Kunststoffbranche forciert bereits zirkuläres Wirtschaften, jedoch stehen der werkstofflichen Verwertung von Kunststoffen immer noch entscheidende Hemmnisse entgegen. Dazu zählen vor allem Mengen- und Qualitätsprobleme bei Regranulaten und Recompounds.

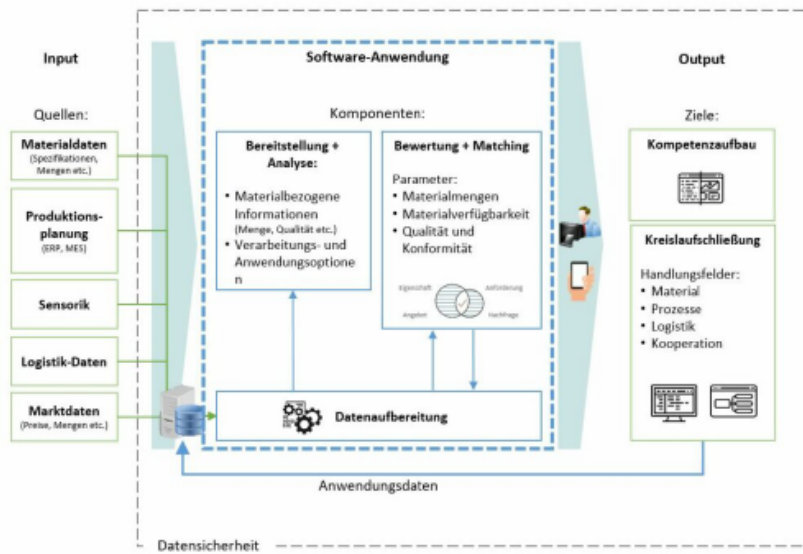
Diesen Hemmnissen kann durch den Einsatz digitaler Instrumente, wie beispielsweise Online-Handelsplattformen für Kunststoffabfälle und -rezyklate oder digitale Prozessmesstechniken entgegengetreten werden. Viele Unternehmen, insbesondere KMU, haben jedoch oft Schwierigkeiten, den Anschluss an die digitale Transformation zu finden und diese im eigenen Tagesgeschäft zu etablieren.

Im Forschungsprojekt Di-Link werden genau diese Herausforderungen adressiert und dafür digitale Lösungen für die Bildung vertrauensvoller Wertschöpfungsnetzwerke erarbeitet. Sie sollen Kunststoffverarbeiter, gewerbliche Unternehmen, Wiederaufbereiter und Recompoundeure in die Lage versetzen, relevante, bisher noch nicht verfügbare Informationen zu Materialien zu erhalten und diese dann entlang der Wertschöpfungskette auszutauschen.

<https://www.k-zeitung.de/kein-kreislauf-von-kunststoffen-ohne-digitalisierung/>

1/7





Schematische Darstellung der digitalen Systemlösung „Di-Link“, die mit digitalen Lösungen dazu beitragen soll, den Kunststoffkreislauf zu schließen. Foto: SKZ

Das hierfür gebildete Projektkonsortium besteht forschungsseitig aus dem SKZ – Das Kunststoff-Zentrum, dem Forschungsinstitut für Rationalisierung der RWTH Aachen sowie dem Wuppertal Institut für Klima, Umwelt und Energie. Die industrielle Expertise tragen die Unternehmen Infosim, für die Softwareentwicklung der digitalen Applikation sowie Hoffmann + Voss und MKV Kunststoffgranulate, für Prozessintegration und Praxiserprobung, bei.

### Di-Link – Digitalisierung schließt den Kunststoffkreislauf

Die angestrebte Systemlösung soll den Akteuren der Branche ermöglichen, Mengen-, Qualitätsdaten und Verfügbarkeitszeitpunkte zu erfassen, aufzubereiten und auszutauschen, um verlässliche Wertschöpfungsnetzwerke zu bilden. Insbesondere wird eine prozessintegrierte Qualitätssicherungsmethode für die Herstellung von Regranulaten und Recompounds zur Anwendungsreife weiterentwickelt. Damit sollen Wiederaufbereiter die Möglichkeit erhalten, zusätzlich zu ihren Laborprüfungen die Qualität der späteren Produkte bereits im Prozess kontinuierlich zu überwachen und zu belegen.

Damit die entwickelte Anwendung von möglichst großem Nutzen für die Unternehmen in der Wertschöpfungskette ist, wurden die Probleme und Bedarfe hinsichtlich einer verbesserten Kreislaufführung von Kunststoffen durch Interviews ermittelt. Befragt wurden verschiedene

Akteure der Wertschöpfungskette – darunter Kunststoffverarbeiter, Recompoundeure, Behörden und Umweltauditoren.

### Hemmnis bei der Kreislaufführung

Aus Sicht der Recompoundeure sind die größten Hindernisse beim Bezug ihrer Rohstoffe: Sortenreinheit, Störfaktoren in den Fraktionen wie Softlacke und Lackierungen, mangelndes Kunststoff-Know-how bei Mahlbetrieben und Händlern sowie unetige Verfügbarkeiten von Mengen und Kunststofftypen. Als Haupthindernis beim Verkauf ihrer Produkte hingegen nannten die Recompoundeure, dass immer noch große Vorbehalte gegenüber ihren Produkten bestehen.

Ein Interviewpartner bringt typische Vorurteile auf den Punkt: „Recompounds stinken, es ist kein Spritzgießen im Heißkanal möglich, die Formen verschleiben schneller und sowieso sind Recompounds schlechter. Diese falsche Vorstellung ist immer noch bei vielen Kunststoffverarbeitern in den Köpfen. Von unserer Seite ist viel Überzeugungsarbeit nötig und wir müssen oft erst Vertrauen schaffen. Das liegt daran, dass in der Vergangenheit viel schiefgelaufen ist und minderwertige Rezyklate als hochwertig verkauft wurden.“

Ein weiteres Hindernis beim Verkauf ihrer Produkte sehen die Recompoundeure im Bereich der Kundenanforderungen. Diese seien vor allem im Automobilbereich überzogen, was den Einsatz von Sekundärkunststoffen verhindert.

Laut Kunststoffverarbeitern und Qualitätsmanagementauditoren sind mangelndes Vertrauen in Recompoundeure, zu strenge Kundenanforderungen, die geringe Preisdifferenz von Rezyklat zu Neuware sowie das schlechte Image von Rezyklaten die Haupthindernisse für deren Wiedereinsatz. Jedoch beziehen Kunststoffverarbeiter nicht nur Rohstoffe, sondern sie fungieren auch als Rohstofflieferanten für Wiederaufbereiter, an die sie ihre Kunststoffabfälle häufig verkaufen.

Die größten Herausforderungen sind hier bei innerbetrieblichen Prozessen des Abfallmanagements zu finden. Oft mangle es an dem nötigen Bewusstsein der Mitarbeiter\*innen, Kunststoffabfälle ordentlich zu trennen. Aber auch Zeitdruck in der Produktion, zu wenige Abfallbehälter oder deren unzureichende Beschriftung erweisen sich als Hindernisse einer sortenreinen Trennung von Kunststoffabfällen. Zudem wurde die zu geringe Vergütung sortenreiner Abfälle genannt, welche oft nicht einmal die Kosten deckt.

Die befragten Vertreter von Umweltministerien und Abfallwirtschaftsbehörden kritisieren vor allem die enorme Vielfalt an Kunststoffen, Zusatzstoffen und Verbunden, die eine sortenreine Sortierung schwierig mache. Darüber hinaus würde dem „Design for Recycling“ in der Praxis viel zu wenig Beachtung geschenkt. Nicht vorhandene Qualitätsanforderungen an Rezyklate, unzureichende Unterstützung von Seiten des Staates sowie fehlende Maßnahmen für die

23.6.2022

Kein Kreislauf von Kunststoffen ohne Digitalisierung - K-ZEITUNG

Stabilisierung des Sekundärkunststoffmarkts seien Gründe, warum der Kunststoffkreislauf noch nicht geschlossen ist.

Eine Abfallwirtschaftsbehörde verwies auch auf die aktuelle gesetzliche Lage und merkt an „Das Gesetz hinkt entweder der Realität hinterher oder ist viel zu zögerlich. Mit einem Wattestäbchen- oder Plastiktütenverbot retten wir die Welt nicht.“

### Di-Link für mehr Datentransparenz und -kommunikation

Das Projekt Di-Link – Digitale Lösungen für industrielle Kunststoffkreisläufe zielt darauf ab, die Datentransparenz und -kommunikation entlang der Kunststoffwertschöpfungskette zu erhöhen, um den Stoffkreislauf zu schließen. Hemmnisse, die der Kreislaufführung dabei entgegenstehen, sind vor allem das schlechte Image von Rezyklaten, Verfügbarkeiten von Mengen und Kunststofftypen, sowie Qualitätsrisiken und Sortenreinheit.

Die neu entwickelte digitale Applikation soll daher durch Rückverfolgbarkeit der Materialien und deren Informationen entlang der Wertschöpfungskette mehr Transparenz sowie Vertrauen zwischen den Akteuren schaffen, um Vorbehalte gegen Recompounds zu beseitigen. Zudem soll eine Beratungsfunktion für Kunststoffverarbeiter integriert werden, die fundierte Informationen zur Materialauswahl und anschließenden Verarbeitung bereitstellt. Eine vorgeschaltete Qualitätskontrolle soll darüber hinaus Recompoundeure bei der Auswahl und beim Kauf ihrer Rohstoffe unterstützen. Eine neu entwickelte Sensortechnologie zur Onlineschlagfähigkeitsmessung, welche kontinuierlich Prozessdaten erfasst und mit der Softwarelösung verbunden ist, rundet die digitale Applikation ab. Das im Juni 2019 gestartete Projekt wird durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung im Rahmen der Fördermaßnahme „ReziProK – Ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft – Innovative Produktkreisläufe“ gefördert und läuft noch bis Mai 2022.

*Die Autoren:*

*Prof. Dr.-Ing. Martin Bastian, Institutsdirektor, SKZ – Das Kunststoff - Zentrum*

*Dipl.-Ing. Daniela Eckert, wissenschaftliche Mitarbeiterin, SKZ – Das Kunststoff - Zentrum*

*Phillip Bendix, wissenschaftlicher Mitarbeiter; Wuppertal Institut für Klima, Umwelt und Energie*

Schlagwörter: Kreislaufwirtschaft

### 11.3.2 Di-Link Policy Brief I

#### Stärkung des Kunststoffrecyclings – Lessons learned aus Recherche und Unternehmensbefragung

##### Die Ausgangslage

Die Problematik steigender Abfallmengen als Folge unseres gestiegenen materiellen Konsums wird von weiten Teilen der Gesellschaft immer mehr wahrgenommen.<sup>1</sup> Eine Kreislaufwirtschaft, in der materielle Ressourcen im Kreis geführt werden, anstatt sie für immer zu entsorgen, wird von Öffentlichkeit, Politik und Unternehmen gewünscht. Gerade auf dem Bereich von Kunststoffabfällen und Kunststoffrecycling liegt derzeit ein besonderer Fokus. Das zeigt sich in der intensiven Bearbeitung des Themas durch politische Gremien auf allen Ebenen, vgl. Tabelle 1<sup>2-4</sup> aber daneben auch am großen öffentlichen Interesse, das zu einer breiten Berichterstattung in überregionalen Zeitungen<sup>5-8</sup> sowie in der prominenten Platzierung des Themas in den Webauftritten der Industrieverbände führt.<sup>9-12</sup> Gerade für die Kunststoffwirtschaft stellt sich das Prinzip der Kreislaufwirtschaft aber in der Umsetzung als herausfordernd dar. Technologisch ist eine signifikante Verbesserung des Status-Quo des Kunststoffrecyclings möglich.<sup>13,14</sup> Allerdings bestehen viele andere Hemmnisse welche einer umfassenden Etablierung der Kreislaufwirtschaft entgegenstehen<sup>15-17</sup>.

Tabelle 1: Beispiele für die Kreislaufwirtschaft in der Politik und Gesetzgebung

European Green Deal & Circular Economy Action Plan	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A number of actions foreseen in this Plan, notably introducing requirements for recycled content in products, will contribute to preventing a mismatch between supply and demand of secondary raw materials and ensure the smooth expansion of the recycling sector in the EU1</li> <li>• The Commission will review Directive 94/62/EC27 to reinforce the mandatory essential requirements for packaging to be allowed on the EU market and consider other measures, with a focus on: [...] driving design for re-use and recyclability of packaging [...]</li> </ul>
Verpackungs-gesetz	<ul style="list-style-type: none"> <li>• §1 (1) Dieses Gesetz legt Anforderungen an die Produktverantwortung nach § 23 des Kreislaufwirtschaftsgesetzes für Verpackungen fest. Es bezweckt, die Auswirkungen von Verpackungsabfällen auf die Umwelt zu vermeiden oder zu verringern. Um dieses Ziel zu erreichen, soll das Gesetz das Verhalten der Verpflichteten so regeln, dass Verpackungsabfälle vorrangig vermieden und darüber hinaus einer Vorbereitung zur Wiederverwendung oder dem Recycling zugeführt werden.</li> <li>• §4 Verpackungen sind so herzustellen und zu vertreiben, dass [...] 4. die Wiederverwendbarkeit von Verpackungen und der Anteil von sekundären Rohstoffen an der Verpackungsmasse auf ein möglichst hohes Maß gesteigert wird, welches unter Berücksichtigung der Gewährleistung der erforderlichen Sicherheit und Hygiene der zu verpackenden Ware und unter Berücksichtigung der Akzeptanz für den Verbraucher technisch möglich und wirtschaftlich zumutbar ist.</li> </ul>

<sup>1</sup> Deutsch: Eine Reihe von Maßnahmen, die in diesem Plan vorgesehen sind, insbesondere die Einführung von Anforderungen an den Rezyklatgehalt von Produkten, wird dazu beitragen, ein Missverhältnis zwischen Angebot und Nachfrage von Sekundärrohstoffen zu verhindern und die reibungslose Expansion des Recyclingsektors in der EU zu gewährleisten.

<sup>2</sup> Deutsch: Die Kommission wird die Richtlinie 94/62/EG27 überprüfen, um die obligatorischen grundlegenden Anforderungen an Verpackungen, die auf dem EU-Markt zugelassen werden sollen, zu verschärfen, und weitere Maßnahmen in Betracht ziehen, wobei der Schwerpunkt auf diesen liegt: [...] Förderung des Designs für die Wiederverwendung und die Recyclingfähigkeit von Verpackungen [...]

Gewerbeabfallverordnung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• § 3 (1) [...] haben Erzeuger und Besitzer von gewerblichen Siedlungsabfällen die folgenden Abfallfraktionen jeweils getrennt zu sammeln und zu befördern sowie nach Maßgabe des § 8 Absatz 1 des Kreislaufwirtschaftsgesetzes vorrangig der Vorbereitung zur Wiederverwendung oder dem Recycling zuzuführen: [...], 3. Kunststoffe [...]</li> <li>• § 6 (1) 1) Betreiber von Vorbehandlungsanlagen haben zur Gewährleistung eines ordnungsgemäßen, schadlosen und hochwertigen Recyclings, insbesondere der Abfallfraktionen Papier, Pappe und Karton, Kunststoff, Metall sowie Holz, ihre Anlagen mit mindestens den in der Anlage genannten Komponenten auszustatten.</li> </ul>
Abfallrahmenrichtlinie	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Artikel 9 (1) Die Mitgliedstaaten treffen Maßnahmen, um die Entstehung von Abfällen zu vermeiden</li> <li>• Artikel 10 (1) Die Mitgliedstaaten treffen die erforderlichen Maßnahmen, um sicherzustellen, dass Abfälle im Einklang mit Artikel 4 und 13 zur Wiederverwendung vorbereitet, recycelt oder sonstig verwertet werden..</li> <li>• Artikel 4 (3) Die Mitgliedstaaten nutzen wirtschaftliche Instrumente und andere Maßnahmen, um Anreize für die Anwendung der Abfallhierarchie zu schaffen. [...]</li> </ul>
Single-Use Plastics Directive	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Artikel 1: Ziel dieser Richtlinie ist es, die Auswirkungen bestimmter Kunststoffprodukte auf die Umwelt, insbesondere die Meeresumwelt, und die menschliche Gesundheit zu vermeiden und zu vermindern und den Übergang zu einer Kreislaufwirtschaft mit innovativen und nachhaltigen Geschäftsmodellen, Artikeln und Werkstoffen zu fördern [...]</li> <li>• Artikel 5 (5) Für Getränkeflaschen nach Teil F des Anhangs stellt jeder Mitgliedstaat sicher, dass [...] b) ab 2030 diese Getränkeflaschen zu mindestens 30 % aus recyceltem Kunststoff bestehen [...]</li> </ul>

**Die Herausforderungen**

Das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderte Projekt DiLink hat es sich in seiner ersten Phase zur Aufgabe gemacht, diese Hemmnisse näher zu bestimmen. Die dazu betrachtete Wertschöpfungskette des Kunststoffrecyclings besteht im Wesentlichen aus drei Akteuren – Verbraucher\*innen, die Kunststoffabfälle erzeugen, Recycler die diese Abfälle zu Rezyklat aufbereiten, sowie Kunststoffverarbeiter, die mit diesem Regranulat neue Produkte erzeugen (siehe Abbildung 1). Die Hemmnisse für ein erfolgreiches Recycling in der Interaktion zwischen diesen Akteuren wurden in Expert\*inneninterviews erfasst. Als Hemmnisse wurden vor allem identifiziert:

- Mangelndes Vertrauen in recycelte Kunststoffe und die Recycler. Dieses Problem besteht vor allem in der Beziehung zwischen Recyclern und kunststoffverarbeitenden Betrieben. Probleme aus vorhergegangenen Prozessen und Vorurteile prägen diesen Punkt.<sup>3</sup>
- *Mangelndes Wissen* über die Qualitäten und Eigenschaften von Rezyklaten. Den Abnehmer\*innen und verarbeitenden Betriebe sind nicht über die gegenwärtigen Möglichkeiten des Rezyklateinsatzes informiert. Auch dies führt zu Rückgriffen auf Primärmaterial.
- *Mangelnde Transparenz zu Materialeigenschaften*: Die beschriebenen Probleme werden durch die bisher oft wenig transparenten Eigenschaften konkreter Chargen verstärkt, da Informationen über Sorten- und Farbreinheit etc. nicht immer voll verfügbar sind oder zuverlässig mitgegeben werden.
- *Unklare Verfügbarkeit*: Mangelnde Datenverfügbarkeit und -austausch lassen potentielle Abnehmer im Unklaren hinsichtlich zuverlässiger Rezyklatverfügbarkeit.
- *Strenge Produktanforderungen* der Nachfrageseite verhindern den umfassenden Einsatz von Rezyklat.
- *Ökonomische Faktoren*: Rezyklate verfügen zumeist nur über einen geringen *Preisvorteil* gegenüber Neuware, erfordern gleichzeitig aber mehr Aufwand in der Fertigung, sodass ihr Einsatz wirtschaftlich unattraktiv ist. Zusammen mit einer höheren Unsicherheit zu verfügbaren Mengen am Markt ist das auch für Unternehmen, die der Idee einer Kreislaufwirtschaft positiv gegenüberstehen, eine substantielle Hürde.

<sup>3</sup> Ein Interviewpartner nennt folgende regelmäßig wiederkehrende Vorurteile: „*Recompounds stinken, es ist kein Spritzgießen im Heißkanal möglich, die Formen verschleßen schneller und sowieso sind Recompounds schlechter. Diese falsche Vorstellung ist immer noch bei vielen Kunststoffverarbeitern in den Köpfen. Von unserer Seite ist viel Überzeugungsarbeit nötig und wir müssen oft erst Vertrauen schaffen*“.



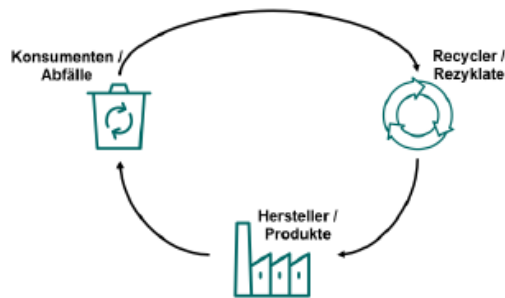


Abbildung 1: Vereinfachtes Modell der Akteure in der Wertschöpfungskette einer Kreislaufwirtschaft im Kunststoffsektor.

Positiv ist zu vermerken, dass zwischen den Befragten ein Grundkonsens besteht, dass die Umsetzung der Kreislaufwirtschaft in der Kunststoffindustrie vorteilhaft und notwendig ist. Das Projekt Di-Link trägt zu diesen Bemühungen bei, indem relevante Technologien weiterentwickelt werden, eine Softwareoberfläche zum erleichterten Rezyklataustausch entwickelt wird und indem die Akteure der Wertschöpfungskette in einem geeigneten Ökosystem untereinander vernetzt werden. Die Funktionsweise der Softwarelösung ist in Abbildung 2 dargestellt. Durch die Software wird die Weitergabe relevanter Informationen zwischen den Akteuren ermöglicht und Wissen für eine hochwertige Trennung und Verwertung aufbereitet zur Verfügung gestellt. So wird zum Abbau der Vorurteile und besserer Rezyklatqualität beigetragen. Es wird Vertrauen geschaffen und mit Daten untermauert. Diese Anstrengungen erfordern aber flankierende Handlungen seitens der Politik.

#### Ansatzpunkt für politisches Handeln zur besseren Ermöglichung von Kunststoffrecycling

Die identifizierten Schwachpunkte im gegenwärtigen System des Kunststoffrecyclings zeigen eine breite Palette unterschiedlicher, aber zusammenhängender Schwierigkeiten auf. Um eine Kreislaufwirtschaft zu ermöglichen und zu fördern, müssen die oben identifizierten Probleme daher ganzheitlich angegangen werden. Die Behandlung einzelner Problemfelder wird nicht ausreichen. Ansatzpunkte hierzu sind:

- Das *Wissen* über Einsatzmöglichkeiten für Rezyklate muss aktiv verbessert werden. Hier sind vor allem die Recycler selbst und die Verbände sowie Institute der Kunststoffwirtschaft in der Pflicht. Notwendig sind die Einbindung in die Aus- und Weiterbildung sowie gezielte Informationskampagnen. Politik kann dies durch eigene Aufklärungskampagnen und Zusammenarbeit mit den vorgenannten Institutionen unterstützen.
- Das *Vertrauen* innerhalb der Wertschöpfungskette in Rezyklat als Werkstoff muss hergestellt werden. Dies kann erfolgen durch
  - eine garantierte Mindestqualität nach standardisierten Messbedingungen durch Normierung seitens der Verbände
  - die Überprüfbarkeit der Materialqualität z.B. mittels digitaler Weitergabe von Informationen zum Herstellungsprozess des Rezyklates – diese Informationen müssen von den Recyclern zur Verfügung gestellt werden
- Politik kann *Transparenz* und Informationen über *Verfügbarkeit* durch die verpflichtende Vorgabe bereitzustellender Daten erhöhen
- Forschungsförderung in diesem Gebiet ist ein weiterer wichtiger Punkt. Forschung muss dabei mindestens den Punkt der Abfallentstehung mit einbeziehen. Forschungsförderung sollte zudem neben der Verbesserung der technischen Prozesse des Sortierens und Aufbereitens auch das Gesamtwertschöpfungsnetzwerk betrachten und die Zusammenarbeit und Informationsweitergabe zwischen den Akteuren ermöglichen.
- Gleichzeitig muss die *Nachfrage* nach Rezyklaten auf ein zuverlässig hohes Niveau gehoben werden. Dadurch entsteht eine ausreichende Sicherheit für die Recyclingbranche, die notwendigen Investitionen zu tätigen, um diese Nachfrage bedienen zu können. In der öffentlichen Beschaffung kann die

Verwendung von Recyclingmaterial als Kriterium in Ausschreibungen und beim Materialkauf dienen. Um schwierige Einzelprüfungen und Vergleiche zu ersparen, können Produkte, die mit entsprechenden Gütesiegeln wie dem Blauen Engel ausgezeichnet sind, bevorzugt werden. Die Einführung einer Rezyklatquote, die die Hersteller geeigneter Produkte dazu verpflichtet, anteilig Recyclingkunststoff zu verwenden, kann die Nachfrage zusätzlich steigern. Eine stetig steigende Rezyklatquote schafft dabei die notwendige Planungssicherheit für langfristige Investitionen in entsprechende Anlagentechnik und macht eine schnelle, niederschwellige Einführung auf zunächst noch niedrigem Niveau möglich.

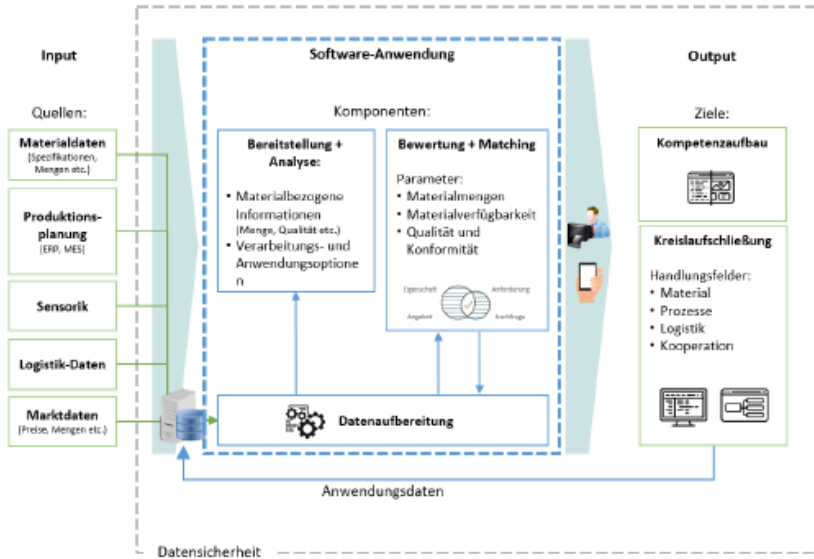


Abbildung 2: Schematische Darstellung der im Projekt Di-Link entwickelten Software-Lösung

1. Google Trends. Plastikmüll. <https://trends.google.de/trends/explore?date=all&geo=DE&q=Plastikm%C3%BCll>.
2. Bundesrat. Entwurf eines Ersten Gesetzes zur Änderung des Verpackungsgesetzes. <https://www.bundesrat.de/drs.html?id=578-19>.
3. European Commission. A European Green Deal. [https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal\\_en](https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en).
4. World Economic Forum. The world needs a circular economy. Let's make it happen. <https://www.weforum.org/agenda/2020/01/the-world-needs-a-circular-economy-lets-make-it-happen/>.
5. Die Tageszeitung: taz. Recycling.
6. Süddeutsche. Recycling - Entsorgung und Wiederverwertung. <https://www.sueddeutsche.de/thema/Recycling>.
7. Frankfurter Allgemeine Zeitung. Recycling: Aktuelle Nachrichten der FAZ zur Müllverwertung. <https://www.faz.net/aktuell/gesellschaft/thema/recycling>.
8. DIE WELT. Recycling. <https://www.welt.de/themen/recycling/>.
9. Industrievereinigung Kunststoffverpackungen. Nachhaltigkeit, Kreislaufwirtschaft und Eco Design. <https://kunststoffverpackungen.de/themen/nachhaltigkeit-kreislaufwirtschaft/>.
10. Internationale Fachmesse für Kunststoff, Kautschuk, Kunststoffverarbeitung und Kunststoffherstellung. Abschlusspressemeldung: K 2019 setzt deutliches Zeichen für den verantwortungsvollen Umgang mit Kunststoff. [https://www.k-online.de/de/Presse/Pressematerial/Pressemeldungen/Abschlusspressemeldung\\_K\\_2019\\_setzt\\_deutliches\\_Zeichen\\_für\\_den\\_verantwortungsvollen\\_Umgang\\_mit\\_Kunststoff](https://www.k-online.de/de/Presse/Pressematerial/Pressemeldungen/Abschlusspressemeldung_K_2019_setzt_deutliches_Zeichen_für_den_verantwortungsvollen_Umgang_mit_Kunststoff).
11. PlasticsEurope. Circular Economy. <https://www.plasticseurope.org/en/focus-areas/circular-economy>.
12. Gesamtverband Kunststoffverarbeitende Industrie. Kunststoffprodukte und Umweltschutz. <https://www.gkv.de/de/themen/umwelt.html>.
13. EREMA Kunststoff Recycling Systeme. Post Consumer Recycling. [https://www.erema.com/de/anwendungen\\_post\\_consumer\\_recycling/](https://www.erema.com/de/anwendungen_post_consumer_recycling/).
14. Grüner Punkt. Systemen – das Regranulat des Grünen Punkts. <https://www.gruener-punkt.de/de/rezyklat-systemen/ueber-systemen.html>.
15. Berg, H. & Wilts, H. Digital platforms as market places for the circular economy – requirements and challenges. *Nachhalt. Sustain. Manag. Forum* 27, 1–9 (2019).
16. Henning Wilts, Holger Berg. The digital circular economy: can the digital transformation pave the way for resource-efficient materials cycles? - WI in-brief 04e/2017. (2018).
17. Polymer Comply Europe. The Usage of Recycled Plastics Materials by Plastics Converters in Europe. A qualitative European industry survey. (2017).

### 11.3.3 Di-Link Policy Brief II

## Policy Brief Digitaler Produktpass für Kunststoffrezyklate

#### Abstract

*Ein Digitaler Produktpass speichert Daten zu Herkunft, Zusammensetzung und Eigenschaften eines bestimmten Materials sowie weitere relevante Informationen. Die Verwendung dieses Produktpasses ermöglicht es dabei auch diese Daten zu speichern und zugänglich zu machen, die für die Optimierung der Kreislaufwirtschaft von Kunststoffprodukten notwendig sind. Die in DiLinK entwickelte Software implementiert Teile der auch für einen Produktpass notwendigen Funktionen. Im Verlauf des Projektes wurde festgestellt, dass es sinnvoll ist, für jede Rezyklat-Charge eine neue Produktidentität zu schaffen, ohne dass ein direkter Verweis auf die Inputprodukte erforderlich ist. Die digitale Infrastruktur sowie deren Vernetzung ist auf Seiten der Industrie noch zu verbessern, bevor ein Produktpass eingeführt wird. Die erhobenen Daten und der Produktpass ermöglichen Transparenz, dies wiederum schafft Vertrauen in die mit Vorbehalten behaftete Verwendung von Rezyklaten.*

#### Zielsetzung

Dieser Policy Brief fasst die Erkenntnisse des DiLinK Projektes zum Thema des Digitalen Produktpasses für Kunststoffrezyklate zusammen. Zielgruppe des Briefs sind Entscheidungsträger in Politik und Wirtschaft. Unsere Erkenntnisse haben den hohen Informationsbedarf für ein gezieltes, hochwertiges Kunststoffrecycling noch einmal untermauert. Digitale Anwendungen wie Sensorik in der Produktion können diese Informationen liefern, sie benötigen aber entsprechende Software, Umgebungen und Datenräume zur Speicherung und Weitergabe. Das Konzept des Digitalen Produkt- und Materialpasses kann hier wegweisend sein. Aus Sicht des Projekts müssen dafür von Seiten der Politik folgende zentrale Maßnahmen getroffen werden:

- Unterstützung der mittelständisch geprägten Kunststoffbranche beim Aufbau der nötigen digitalen Fähigkeiten
- Unterstützung der Erstellung eines Standards für Produktpässe mit hinreichendem Funktionsumfang aber minimaler Komplexität. Erstellung des Standards unter Beteiligung aller relevanten Akteure
- Eine gestaffelte Einführung der Funktionen des Produktpasses erwägen

#### Was ist ein Produkt- oder Materialpass?

Bei dem Digitalen Produktpass handelt es sich um eine digitale Akte, die alle entlang der Wertschöpfungskette benötigten Daten und darauf basierende Informationen zu dem entsprechenden Produkt oder Material enthält.<sup>1</sup> Das kann z.B. eine Liste der Komponenten und deren Zustand beinhalten, die chemische Zusammensetzung eines

---

<sup>1</sup> Siehe hierzu auch: <https://www.bmu.de/faqs/umweltpolitische-digitalagenda-digitaler-produktpass>



Produktes, dessen Reparierbarkeit und Rezyklierbarkeit oder auch Entsorgungshinweise.

Es sind nicht nur Daten zum aktuellen Ist-Zustand, sondern auch zur Vergangenheit gespeichert. Der Materialpass geht dabei zum Zeitpunkt der Produktion in den Produktpass über.

Die Bereitstellung der Informationen zu einem Produkt eröffnet dabei viele Möglichkeiten für die Umsetzung einer ressourceneffizienten Kreislaufwirtschaft. Der Produktpass liefert die Datengrundlage für eine hochwertige Reparatur oder hochwertiges Recycling.

### **Erkenntnisse aus Di-Link**

Im Projekt DiLinK wurde unter anderem eine Software entwickelt, mit deren Hilfe Daten zu Kunststoffchargen gesammelt und bereitgestellt werden können. Diese Daten stehen firmenintern zur Verfügung, können aber bedarfsbezogen auch von anderen Nutzenden der Wertschöpfungskette eingesehen und verwendet werden. Auch die automatische Erhebung von Daten aus dem Produktionsprozess durch die verarbeitenden Maschinen und die anschließende Einbettung in die Software wurde in DiLinK implementiert. Der in diesem Projekt verwendete Ansatz ist, das Rezyklat als neues Produkt zu sehen, das einen eigenen Produktpass erhält. Dabei ist es erforderlich, dass gezielt einzelne, relevante Informationen zu den Abfällen in diesen Produktpass übernommen werden. Dies gilt insbesondere für gesundheitlich bedenkliche Stoffe. Daten hierzu, die auch von REACH für die Rezyklate gefordert werden, müssen im Produktpass abgebildet werden. Die DiLinK-Software erfasst die Produktpässe sowie deren Beziehungen in Wissensgraphen, wodurch u.a. Potenziale für neue Kreisläufe visualisiert werden können.

Im Zuge dieser Arbeiten wurden die im Folgenden diskutierten Erkenntnisse gewonnen, welche die unten dargestellten Empfehlungen begründen:

1. In den meisten kunststoffverarbeitenden Firmen fehlt zurzeit noch die technische Infrastruktur, um die Prozesse für die Benutzung eines digitalen Produktpasses abbilden zu können.
2. Die Eintragung der Daten in den Produktpass muss durch Automatisierung unterstützt werden, um das Verhältnis von Aufwand zu Nutzen attraktiv zu gestalten. Zudem kann dies eine höhere Zuverlässigkeit gewährleisten. Hierfür ist eine digitale Erfassung der relevanten Informationen auf Seiten des Recyclers oder Recompoundierers notwendig.
3. Die Gefahr besteht, dass mittelständische Unternehmen den notwendigen Investitions- und Innovationsaufwand für die Umsetzung nicht leisten können, bzw. dass die Kosten für mittelständische Unternehmen schwerer zu tragen sind.
4. Die immer wieder geforderte Transparenz in Bezug auf Lieferketten und Materialherkunft kann durch die Verwendung eines Digitalen Produktpasses gewährleistet werden. Diese Datenplattform ermöglicht auch weiterführendes Monitoring wie die CO<sub>2</sub>-Bilanzierung. Zum anderen schafft die einfache Verfügbarkeit dieser Daten Vertrauen in einem wachsenden Markt. Dieses Vertrauen ist wichtig, da so ein Austausch auch zwischen „unbekannten“ Partnern stattfinden kann.
5. Es besteht zum einen die Gefahr einer überkomplexen Lösung, die auf einen kleinen Anwenderkreis optimal zugeschnitten ist, aber keine Kompatibilität zulässt. Zum anderen besteht aber auch die Gefahr einer minimalen Lösung,

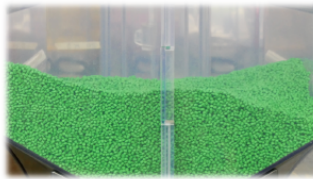
die zwar für alle nutzbar ist, deren Mehrwert und Funktionalität aber dadurch zu stark beschnitten wird.

### **Handlungsempfehlungen**

Folgende Handlungsempfehlungen ergeben sich aus den durchgeführten Arbeiten:

1. Zur Umsetzung des Digitalen Produktpasses muss sichergestellt werden, dass möglichst alle beteiligten Akteure über die Möglichkeit verfügen, an diesem zu partizipieren. Die notwendigen digitalen Voraussetzungen sind zu schaffen.
2. Kleine und mittelständische Unternehmen dürfen durch die Einführung nicht übermäßig belastet werden. Dies kann z.B. durch kostenlose Bereitstellung des notwendigen Know-hows, strikte Verwendung von offener Software und Standards sowie der Bereitstellung von gemeinsam nutzbarer Infrastruktur ermöglicht werden.
3. Das Vorhandensein der digitalen Fähigkeiten in der mittelständisch geprägten Kunststoffbranche soll weitgehend ermöglicht werden, bevor ein Produktpass verpflichtend eingeführt wird.
4. Unterstützung der Erstellung eines geeigneten Standards für einen Produktpass unter Beteiligung aller relevanten Akteure. Um erfolgreich eingesetzt zu werden, muss der Standard von allen beteiligten Akteuren sinnvoll verwendet werden können. Dies stellt für den Fall des Produktpasses eine besondere Herausforderung dar. Sowohl die Anforderungen der kompletten Wertschöpfungskette als auch die zur Umsetzung notwendigen informationstechnischen Anforderungen müssen dabei berücksichtigt werden.
5. Die Kompatibilität mit anderen Produkt-Datenbanken sollte gewährleistet sein und eine Vereinfachung durch Vereinheitlichung angestrebt werden.
6. Eine anpassungsfähige, flexible und skalierbare Lösung muss hier als Standard gefunden werden.
7. Viele Funktionen, wie z.B. Materialinformationen, Informationen zur Lieferkette oder zum CO<sub>2</sub>-Fußabdruck können unabhängig voneinander implementiert werden. Hier sollten grundlegende Funktionen wie Datenerhebung etc. zuerst eingeführt werden und in späteren Schritten ausgebaut werden. So können Erfolgchancen für die Einführung und Akzeptanz des Digitalen Produktpasses erhöht werden.

### 11.3.4 Flyer 1



#### Das Projekt

DiLinK ist ein Projekt zur Förderung von Kreislaufwirtschaft durch technologische Entwicklung. DiLinK steht als Abkürzung für „Digitale Lösungen für industrielle Kunststoffkreisläufe“.

Das Projekt entwickelt und verbreitet innovative digitale Systeme sowie ergänzende Kooperationskonzepte zur Unterstützung der Kreislaufschließung in der Kunststoffwirtschaft.



#### Projektpartner



GEFÖRDERT VOM



#### Kontakt

Wuppertal Institut  
 Dr. Holger Berg  
 Holger.berg@wupperinst.org



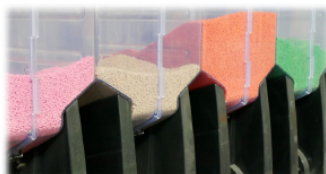
Digitale Lösungen  
 für industrielle  
 Kunststoffkreisläufe



#### Lösungen

Im Projekt DiLinK werden Technologien entwickelt und Infrastrukturen aufgebaut, um Potentiale zum Einsatz von Kunststoffrezyklat auszuschöpfen.

Die Entwicklung von Sensortechnologien zur Datenaufnahme ermöglicht die Prozessüberwachung zur Qualitätssicherung. Unterstützende Softwarelösungen zur Datenverarbeitung und der Aufbau von Wertschöpfungsnetzwerken tragen zur Steigerung der Informationstransparenz bei und schaffen ein Ökosystem für Recycling.



#### Ziele

Durch die Entwicklung innovativer, digitaler System- und Softwarelösungen zur Aufnahme, Verarbeitung und Weitergabe von Daten werden sichere Versorgungsstrukturen geschaffen, die den Austausch von Ressourcen entlang der Wertschöpfungskette ermöglichen.

*"Kreislaufwirtschaftliche Prozesse, Kooperationen und Geschäftsmodelle können auf Unternehmensebene und in Form von Wertschöpfungsverbänden aufgebaut werden."*

Ziel ist es, die Verwendung von Sekundärkunststoffen durch eine kooperative Sammlung, Aufbereitung und Verteilung zu erhöhen. Diese Rückführung in geschlossene Kreisläufe trägt gezielt zur Abfallvermeidung und zur Steigerung der Rohstoffeffizienz bei.



#### Potentiale

Nur 13 % der eingesetzten Materialien in der Kunststoffverarbeitung sind aktuell Rezyklate. Das Projekt DiLinK greift diesen Handlungsbedarf auf und erarbeitet eine passgerechte und anwendungsorientierte Systemlösung zur Steigerung des Rezyklateinsatzes.

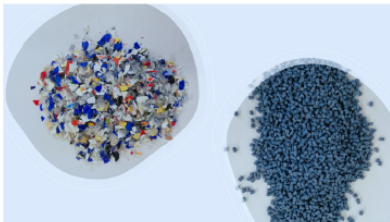
Die Systemlösung schafft ein Wertschöpfungsnetzwerk mit erhöhter Informationstransparenz. Dadurch können die Transaktionskosten und Qualitätsrisiken der Verwendung von Sekundärmaterialien reduziert werden. Der Einsatz von Rezyklaten wird durch eine erfolgreiche Kreislaufführung erhöht.





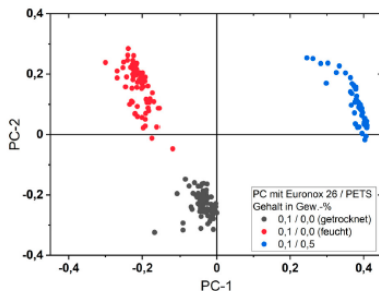
## DiLink

### Digitale Lösungen für industrielle Kunststoffkreisläufe



#### Digitale Messtechnik

Für die Überwachung der Prozessqualität kommt die Online-Spektroskopie zum Einsatz. Diese misst die Lichtabsorption der Kunststoffschmelze im Extruder. Mit einer geeigneten Datenauswertung können dann Veränderungen im Kunststoff, z.B. durch thermischen Abbau, nachgewiesen bzw. verfolgt werden. Diese Informationen können verwendet werden um Inhomogenitäten im Ausgangsmaterial zu detektieren oder Prozessparameter wie Temperatur und Drehmoment anzupassen. Ihre Anwendbarkeit wurde auf die speziellen Problemstellungen im Recompounding getestet.



Beispiel einer Hauptkomponentenanalyse anhand von Polycarbonat mit unterschiedlichen Gehalten an Stabilisatoren.

#### Geschäftsmodelle

Der zunehmende Einsatz von Kunststoffrezyklaten verändert den Material- und Informationsaustausch zwischen den verschiedenen Akteuren des Wertschöpfungsnetzwerkes des verdichtenden Kunststoffkreislaufs. Um die DiLink-Anwendung zu integrieren und den Informationsfluss zwischen den Akteuren zu optimie-

Wie nutzen wir die digitalen Möglichkeiten, um den Kunststoffkreislauf effizient zu schließen? Welche neuen Geschäftsmodelle können dadurch entstehen? Wie setzt man eine einfache und effiziente Kommunikation der wichtigen Daten um?

Dieser Frage haben sie die Projektpartner aus Forschung, IT-Industrie und der Kunststoffbranche im Projekt DiLink angenommen und präsentieren die frei verfügbare DiLink Applikation.

#### Geschlossene Kreisläufe

Große Mengen an Sekundärkunststoffen – Rezyklate – können zurzeit gar nicht oder nur zu minderwertigen Produkten weiterverarbeitet werden. Die Vielzahl der verschiedenen Quellen von Reststoffen für das Recycling kann sich in der Produktqualität der Rezyklate niederschlagen. Mitunter schwanken Produkteigenschaften von Charge zu Charge. Das erschwert die Verarbeitung im Rahmen der maßgeschneiderten Prozesse der Kunststoffverarbeiter. Informationen zu der Qualität und Verfügbarkeit der Abfälle oder Rezyklate sind teilweise schlecht oder gar nicht verfügbar. Doch gerade für Rezyklate sind Informationen zum Produkt enorm wichtig. Zum einen arbeiten Recycler mit variierenden Input-Strömen und müssen zunehmend die Qualität Ihrer Produkte dokumentieren, zum anderen beziehen kunststoffverarbeitende Betriebe ihre Rohstoffe aus unterschiedlichen Quellen und verfügen daher nicht über ausreichende Daten als Entscheidungsgrundlage für Ihre Materialbeschaffung. Hier setzt die DiLink Applikation an. Sie erleichtert den Informationsfluss, z.B. zwischen Recycler und Kunststoffverarbeiter.

ren, werden die Rollenmodelle der verschiedenen Akteure weiterentwickelt und ein neues Wertstromsystem auf der Grundlage des Business Ecosystem Designs entworfen. Basierend auf der Applikation werden innovative und nachhaltige Geschäftsmodelle für die zentralen Rollen identifiziert, mit Schwerpunkt auf dem Nutzenversprechen, der Ertragsmechanik und der Wertschöpfungslogik. So konnten neue kooperative Geschäftsmodelle und neuartige Rollen im Gesamtsystem identifiziert werden.

#### Die Vorteile der DiLink Applikation im Überblick:

- ❖ Digitaler Produktpass für Kunststoffabfälle und Rezyklate
- ❖ Informationslücken werden verringert oder geschlossen
- ❖ Integrierbare Messtechnik wie online Spektroskopie
- ❖ Lokale Netzwerke stärken und den Informationsaustausch fördern
- ❖ Best-Practice Wissen zur Rezyklat Aufbereitung und -verarbeitung

#### Interdisziplinäres Expertenteam

Für die Aufgabe hat sich ein interdisziplinäres Team gebildet. Auf Forschungsseite wird das dreijährige Projekt durch das SKZ – Das Kunststoff-Zentrum, das Forschungsinstitut für Rationalisierung der RWTH Aachen (FIR) sowie das Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie (Konsortialleitung) durchgeführt. Aus der Industrie sind die Unternehmenspartner Infosim, Experten auf dem Gebiet der industriellen Softwareentwicklung, sowie die Unternehmen Hoffmann + Voss und

#### DiLink App

Daten zu Kunststoffen werden vom Hersteller an die verarbeitenden Betriebe weitergegeben. Das geschieht zumeist über mitgelieferte Datenblätter. Die DiLink App geht hier einen Schritt weiter und erstellt ein virtuelles Abbild der Kunststoffe, das die benötigten Daten bereithält und für die entsprechenden Betriebe verfügbar macht. Sensoren ermitteln die Qualität der Rezyklate und belegen die gleichmäßige hohe Qualität über den gesamten Produktionszeitraum. Die App ermöglicht die Kommunikation relevanter Qualitätsparameter zwischen Recycler und kunststoffverarbeitendem Betrieb. Mit den Daten zu Beschaffenheit und Menge von Kunststoffresten sowie den aus ihnen hergestellten Rezyklaten und einer Möglichkeit, diese Daten entlang der Wertschöpfungskette digital weiterzureichen, können kunststoffverarbeitende und gewerbliche Unternehmen sowie Recycler in die Lage versetzt werden, solche Kunststoffe als hochwertige Wertstoffe im Kreislauf zu halten. Komplementär dazu kann Fachwissen zur Rezyklat Aufbereitung und -verarbeitung angezeigt werden.



Die DiLink Applikation in ihrer Anwendung

MKV Kunststoffgranulate beteiligt, die über große Erfahrung im Kunststoffrecycling verfügen.

Die entwickelten Lösungen aus der DiLink-Forschung können von der gesamten kunststoffverarbeitenden Industrie sowie von anderen Unternehmen, bei denen Kunststoffabfälle anfallen, genutzt werden, um mehr Recyclingkunststoffe bereitzustellen oder zu verwenden.

#### Ansprechpartner

Dr. Holger Berg  
Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie  
Döppersberg 19  
42103 Wuppertal  
Telefon: 0202 2492-179  
E-Mail: holger.berg@wupperinst.org

Das Projekt wurde im Rahmen der Fördermaßnahme „Ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft – Innovative Produktkreisläufe (ReziProK)“ gefördert. „ReziProK“ ist Teil des BMBF-Forschungskonzeptes „Ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft“ und unterstützt Projekte, die Geschäftsmodelle, Designkonzepte oder digitale Technologien für geschlossene Produktkreisläufe entwickeln.

#### Jetzt informieren!



[www.di-link.de](http://www.di-link.de)

## 11.4 CO<sub>2</sub>-Kennwerte für Neuware

Abkürzung	Quelle	Kunststoff	CO <sub>2</sub> -Äq. kg CO <sub>2</sub> e/kg	CO <sub>2</sub> -Mittelwert	Land	Jahr	Datenquelle	Information zur Datenerhebung
ABS	Neuware	Acrylnitril-Butadien-Styrol	3,100	3,339	Europa	2015	PlasticsEurope	EPD
ABS	Neuware		4,540			2017	SKZ Datenbank	eigene Industrieberechnungen
ABS	Neuware		4,460			2021	SKZ Datenbank	eigene Industrieberechnungen
ABS	Neuware	Emulsion	2,810		EU28	2021	PlasticsEurope	quelle: plasticsEurope bezogen aus Sphera
ABS HH	Neuware	temperaturbeständiges, unverstärktes ABS	3,460	3,460	Deutschland	2021	SKZ Datenbank	eigene Industrieberechnungen
EPS	Neuware	expandiertes Polystyrol	3,500	2,670	Deutschland	2011	Öko-Institut	<a href="http://www.gemis.de/de/doc/prc/%7B5940E429-2731-4FA6-81D1-9D745EDDC8B3%7D.htm">http://www.gemis.de/de/doc/prc/%7B5940E429-2731-4FA6-81D1-9D745EDDC8B3%7D.htm</a>
EPS	Neuware	expandiertes Polystyrol	2,370		Europa	2015	PlasticsEurope	EPD
EPS	Neuware	weiß und grau	2,140		EU28	2021	PlasticsEurope	quelle: plasticsEurope bezogen aus Sphera
GPPS	Neuware	General-Purpose Polystyrene	2,250	2,155	Europa	2012	PlasticsEurope	EPD
GPPS	Neuware	geneal purpose polystyrene	2,060		EU28	2021	PlasticsEurope	quelle: plasticsEurope bezogen aus Sphera
HDPE	Neuware	Polyethylen high density	2,430	2,141	Deutschland	2011	Öko-Institut	<a href="http://www.gemis.de/de/doc/prc/%7B17EE0594-3CF6-4901-8690-6019418504BE%7D.htm">http://www.gemis.de/de/doc/prc/%7B17EE0594-3CF6-4901-8690-6019418504BE%7D.htm</a>

Abschlussbericht

<b>HDPE</b>	Neu-ware	Polyethylen high density	1,800		Europa	2014	PlasticsEurope	
<b>HDPE</b>	Neu-ware	Polyethylen high density	3,110		Deutsch-land	2020	SKZ Datenbank	eigene Industrieberechnungen
<b>HDPE</b>	Neu-ware	Polyethylen high density	3,120		Deutsch-land	2020	SKZ Datenbank	eigene Industrieberechnungen
<b>HDPE</b>	Neu-ware	granulat	1,700		EU28	2021	PlasticsEurope	quelle: plasticsEurope bezogen aus Sphera
<b>HDPE</b>	Neu-ware	Spritzgussanwendung, schwarz gefärbt	3,110	3,110	Deutsch-land	2020	SKZ Datenbank	eigene Industrieberechnungen
<b>HIPS</b>	Neu-ware	High-Impact Polystyrene	2,430	2,330	Europa	2012	PlasticsEurope	EPD
<b>HIPS</b>	Neu-ware	high impact polystyrene	2,230		EU28	2021	PlasticsEurope	quelle: plasticsEurope bezogen aus Sphera
<b>LDPE</b>	Neu-ware	Polyethylen low density	2,610	2,025	Deutsch-land	2011	Öko-Institut	<a href="http://www.gemis.de/de/doc/prc/%7B48CFC911-59BE-4B9A-B1B0-41FE2AA152A8%7D.htm">http://www.gemis.de/de/doc/prc/%7B48CFC911-59BE-4B9A-B1B0-41FE2AA152A8%7D.htm</a>
<b>LDPE</b>	Neu-ware	Polyethylen low density	1,870		Europa	2014	PlasticsEurope	EDP
<b>LDPE</b>	Neu-ware	für Tütenherstellung	2,130		EU28	2013	Mori, Drobnic; Gantar, Sekavcnik,	LIFE CYCLE ASSESSMENT OF SUPERMARKET CARRIER BAGS AND OPPORTUNITY OF BIOPLASTICS
<b>LDPE</b>	Neu-ware	Granulat	1,770		Eu28	2021	PlasticsEurope	quelle: plasticsEurope bezogen aus Sphera
<b>LDPE</b>	Neu-ware	Granulat-Herstellung	2,130		Slovenien	2013	M. Mori, M. Sekavcnik, B. Drobnic	life cycle assessment of supermarket carrier bags and opportunity of bioplastics
<b>LDPE</b>	Neu-ware	Spritzgussanwendung	3,420	3,420	Deutsch-land	2020	SKZ Datenbank	eigene Industrieberechnungen
<b>LDPE</b>	Neu-ware	Waschware, schwarz gefärbt	3,530	3,540	Deutsch-land	2020	SKZ Datenbank	eigene Industrieberechnungen

## Abschlussbericht

<b>LDPE</b>	Neu-ware	Waschware, trübnatur	3,550		Deutsch-land	2020	SKZ Datenbank	eigene Industrieberechnungen
<b>LLDPE</b>	Neu-ware	Linear low density polyethyl-ene	1,840	1,660	Deutsch-land	2011	Öko-Institut	<a href="http://www.gemis.de/de/doc/prc/%7B80615AEE-087C-44AE-ABDB-B91B66539354%7D.htm">http://www.gemis.de/de/doc/prc/%7B80615AEE-087C-44AE-ABDB-B91B66539354%7D.htm</a>
<b>LLDPE</b>	Neu-ware	Linear low density polyethyl-ene	1,790		Europa	2014	PlasticsEurope	EPD
<b>LLDPE</b>	Neu-ware	Granulat	1,670		EU28	2021	PlasticsEurope	quelle: plasticsEurope bezogen aus Sphera
<b>PA 6</b>	Neu-ware	Polyamid 6	6,700	7,534	Europa	2014	PlasticsEurope	EPD European Plastic Production
<b>PA 6</b>	Neu-ware	Polyamid 6	4,010		EU28	2021	PlasticsEurope	quelle: plasticsEurope bezogen aus Sphera
<b>PA 6</b>	Neu-ware	Granulat	11,170		Deutsch-land	2017	SKZ Datenbank	eigene Industrieberechnungen
<b>PA 6</b>	Neu-ware	30 % GF, hitzestabilisiert, schwarz	7,600	7,600	Deutsch-land	2018	SKZ Datenbank	eigene Industrieberechnungen
<b>PA 6</b>	Neu-ware	10 % GF, 6 % Glas Bubbles, verstärkt, hoch hitzestabili-siert, schwarz	8,500	8,500	Deutsch-land	2018	SKZ Datenbank	eigene Industrieberechnungen
<b>PA 6 GF 15</b>	Neu-ware	PA 6 Granulat mit 15 % GF	9,720	8,435	Deutsch-land	2017	SKZ Datenbank	eigene Industrieberechnungen
<b>PA 6 GF 15</b>	Neu-ware	PA 6 Granulat mit 15 % GF	7,150		Deutsch-land	2021	SKZ Datenbank	eigene Industrieberechnungen
<b>PA 6 GF 30</b>	Neu-ware	PA 6 Granulat mit 30 % GF	8,490	7,597	Deutsch-land	2017	SKZ Datenbank	eigene Industrieberechnungen
<b>PA 6 GF 30</b>	Neu-ware	PA 6 Granulat mit 30 % GF	6,470		Deutsch-land	2021	SKZ Datenbank	eigene Industrieberechnungen



## Abschlussbericht

<b>PA 6 GF 30</b>	Neu-ware	PA 6 Granulat mit 30 % GF	7,830		Deutsch-land	2016	SKZ Datenbank	eigene Industrieberechnungen
<b>PA 6+66</b>	Neu-ware	PA 6 + 66 mit 30 % GF, hitze-stabilisiert, schwarz	8,400	8,400	Deutsch-land	2018	SKZ Datenbank	eigene Industrieberechnungen
<b>PA 66 GF 15</b>	Neu-ware	PA 66 Granulat mit 15 % GF	9,820	8,355	Deutsch-land	2017	SKZ Datenbank	eigene Industrieberechnungen
<b>PA 66 GF 15</b>	Neu-ware	PA 66 Granulat mit 15 % GF	6,890		Deutsch-land	2021	SKZ Datenbank	eigene Industrieberechnungen
<b>PA 66 GF 30</b>	Neu-ware	PA 66 Granulat mit 30 % GF	8,600	7,420	Deutsch-land	2017	SKZ Datenbank	eigene Industrieberechnungen
<b>PA 66 GF 30</b>	Neu-ware	PA 66 Granulat mit 30 % GF	6,240		Deutsch-land	2021	SKZ Datenbank	eigene Industrieberechnungen
<b>PA 66 HI 10</b>	Neu-ware	schlagzähmodifiziertes PA 66	9,910	9,910	Deutsch-land	2016	SKZ Datenbank	eigene Industrieberechnungen
<b>PA 66</b>	Neu-ware	Granulat	11,280	7,657	Deutsch-land	2017	SKZ Datenbank	eigene Industrieberechnungen
<b>PA 66</b>	Neu-ware	Polyamid	4,770		EU28	2021	PlasticsEurope	quelle: plasticsEurope bezogen aus Sphera
<b>PA 66</b>	Neu-ware	Polyamid 66	6,400		Europa	2014	PlasticsEurope	EPD
<b>PB</b>	Neu-ware	Polybutadien	3,485	2,972	Europa	2005	PlasticsEurope	PlasticsEurope
<b>PC</b>	Neu-ware	Polycarbonat	3,400	3,550	Europa	2019	PlasticsEurope	Eco-profiles and Environmental Product Declarations of the European Plastics Manufacturers
<b>PC GF 10</b>	Neu-ware	PC Granulat mit 10 % GF	6,170	5,125	Deutsch-land	2017	SKZ Datenbank	eigene Industrieberechnungen
<b>PC GF 10</b>	Neu-ware	PC Granulat mit 10 % GF	4,080		Deutsch-land	2021	SKZ Datenbank	eigene Industrieberechnungen

Abschlussbericht

<b>PC GF 20</b>	Neu-ware	PC Granulat mit 20 % GF	5,750	4,815	Deutsch-land	2017	SKZ Datenbank	eigene Industrieberechnungen
<b>PC GF 20</b>	Neu-ware	PC Granulat mit 20 % GF	3,880		Deutsch-land	2021	SKZ Datenbank	eigene Industrieberechnungen
<b>PC GF 30</b>	Neu-ware	PC Granulat mit 30 % GF	5,320	4,520	Deutsch-land	2017	SKZ Datenbank	eigene Industrieberechnungen
<b>PC GF 30</b>	Neu-ware	PC Granulat mit 30 % GF	3,720		Deutsch-land	2021	SKZ Datenbank	eigene Industrieberechnungen
<b>PC-ABS</b>	Neu-ware	Blend	3,780	3,780	Deutsch-land	2021	SKZ Datenbank	eigene Industrieberechnungen
<b>PC-ABS GF 20</b>	Neu-ware	Granulat-Blend	4,910	4,225	Deutsch-land	2017	SKZ Datenbank	eigene Industrieberechnungen
<b>PC-ABS GF 20</b>	Neu-ware	Granulat-Blend	3,540		Deutsch-land	2021	SKZ Datenbank	eigene Industrieberechnungen
<b>PE</b>	Neu-ware	Granulat	3,800	3,800	Deutsch-land	2019	SKZ Datenbank	eigene Industrieberechnungen
<b>PE/PP</b>	Neu-ware	Polyolefine	1,500	1,500	Europa	2018	Karl Hillman, Anders Damgaard, Ola Eriksson, Daniel Jonsson and Lena Fluck	Studie: Climate Benefits of Material Recycling
<b>PET</b>	Neu-ware	Polyethylenetherephtalat	3,710	3,217	Europa	2017	Karl Hillman, Anders Damgaard, Ola Eriksson, Daniel Jonsson and Lena Fluck	Studie: Climate Benefits of Material Recycling
<b>PET</b>	Neu-ware	Polyethylenetherephtalat	3,200		Deutsch-land	2010	Öko-Institut	<a href="http://www.gemis.de/de/doc/prc/%7B0E0B299C-9043-11D3-B2C8-0080C8941B49%7D.htm">http://www.gemis.de/de/doc/prc/%7B0E0B299C-9043-11D3-B2C8-0080C8941B49%7D.htm</a>
<b>PET</b>	Neu-ware	PET Flaschen-Qualität	2,190		Europa	2017	PlasticsEurope	EPD
<b>PET</b>	Neu-ware	bottle grade granulat	2,070		EU28	2021	PlasticsEurope	quelle: plasticsEurope bezogen aus Sphera

Abschlussbericht

<b>PLA</b>	Neu-ware	Polylactid	3,190	2,685	USA / Europa	2011	Öko-Institut	<a href="http://www.gemis.de/de/doc/prc/%7BB44A786A-0365-4BFB-9DDD-05D19B2A9A6E%7D.htm">http://www.gemis.de/de/doc/prc/%7BB44A786A-0365-4BFB-9DDD-05D19B2A9A6E%7D.htm</a>
<b>PMMA</b>	Neu-ware	Polymethylmethacrylat	3,750	3,560	Europa	-	PlasticsEurope	Excel Tabelle von eigenem Server (SKZ)
<b>POM</b>	Neu-ware	Polyoxymethylen	3,200	3,130	Europa	2014	PlasticsEurope	EPD
<b>POM</b>	Neu-ware	Polyoxymethylen	2,890		EU28	2021	PlasticsEurope	quelle: plasticsEurope bezogen aus Sphera
<b>PP</b>	Neu-ware	Polypropylen	2,880	2,167	Deutschland	2011	Öko-Institut	<a href="http://www.gemis.de/de/doc/prc/%7B109B44FC-3E16-4528-82FF-641E040D47DB%7D.htm">http://www.gemis.de/de/doc/prc/%7B109B44FC-3E16-4528-82FF-641E040D47DB%7D.htm</a>
<b>PP</b>	Neu-ware	Polypropylen	1,630		Europa	2014	PlasticsEurope	EPD
<b>PP</b>	Neu-ware	Granulat	1,540		EU28	2021	PlasticsEurope	quelle: plasticsEurope bezogen aus Sphera
<b>PP</b>	Neu-ware	Granulat	3,900		Deutschland	2019	SKZ Datenbank	eigene Industrieberechnungen
<b>PP</b>	Neu-ware	für Tütenherstellung	1,990		EU27	2013	Mori, Drobnic; Gantar, Sekavcnik,	LIFE CYCLE ASSESSMENT OF SUPERMARKET CARRIER BAGS AND OPPORTUNITY OF BIOPLASTICS
<b>PP</b>	Neu-ware	Spritzgussanwendung	3,220	3,420	Deutschland	2020	SKZ Datenbank	eigene Industrieberechnungen
<b>PP</b>	Neu-ware	Spritzgussanwendung; Produkte aus PP	3,620		EU27	2020	Viktoria Mannheim und Zoltan Simenfalvi	Studie: Total Life Cycle of Polypropylene Products: Reducing Environmental Impacts in the Manufacturing Phase Environmental Impacts in the Manufacturing Phase
<b>PP</b>	Neu-ware	PP Granulat mit 20 % GF, schwarz	2,930	2,930	Deutschland	2020	SKZ Datenbank	eigene Industrieberechnungen
<b>PP</b>	Neu-ware	PP Granulat mit 20 % Mineralanteil	2,820	2,820	Deutschland	2020	SKZ Datenbank	eigene Industrieberechnungen

## Abschlussbericht

<b>PS</b>	Neu-ware	Polystyrol	2,900	2,458	Deutsch-land	2011	Öko-Institut	<a href="http://www.gemis.de/de/doc/prc/%7B27CF6CA2-7DAF-44AE-899E-8FD686A8966C%7D.htm">http://www.gemis.de/de/doc/prc/%7B27CF6CA2-7DAF-44AE-899E-8FD686A8966C%7D.htm</a>
<b>PS</b>	Neu-ware	Polystyrol	2,250		-	-	PlasticsEurope	Excel Tabelle von eigenem Server (SKZ)
<b>PS</b>	Neu-ware	Polystyrol	3,500		Europa	2015	Karl Hillman, Anders Damgaard, Ola Eriksson, Daniel Jonsson and Lena Fluck	Studie: Climate Benefits of Material Recycling
<b>PS</b>	Neu-ware	Polystyrol	2,200		-	2005	Studie: Total Corbion PLA	END-OF-LIFE OPTIONS FOR BIOPLASTICS
<b>PS-HI</b>	Neu-ware	high impact polystyrene, granulat mix	2,430	2,295	Europa	-	PlasticsEurope	Excel Tabelle von eigenem Server (SKZ)
<b>PU</b>	Neu-ware	TDI-based PU foam without FR, density 35 to 40 kg/m <sup>3</sup>	3,220	3,117	Europa	2014-2015	PlasticsEurope	EPD EUROPUR
<b>PU</b>	Neu-ware	TDI-based PU foam without FR, density 18 to 25 kg/m <sup>3</sup>	3,180		Europa	2014-2015	PlasticsEurope	EPD EUROPUR
<b>PU</b>	Neu-ware	MDI-based viscoelastic PU foam with-out FR, density 45 to 53 kg/m <sup>3</sup>	2,950		Europa	2014-2015	PlasticsEurope	EPD EUROPUR
<b>PU</b>	Neu-ware	TDI-based PU foam with FR, density 40 to 54 kg/m <sup>3</sup>	3,560	3,560	Europa	2014-2015	PlasticsEurope	EPD EUROPUR
<b>PUR</b>	Neu-ware	PU-Hartschaum	3,388	3,388	Europa	2005	PlasticsEurope	Eco-profiles of the European Plastics Industry
<b>PUR-MDI</b>	Neu-ware	Polyuretan Hartschaum	4,380	4,380	Deutsch-land	2010	Öko-Institut	<a href="http://www.gemis.de/de/doc/prc/%7B7D803D25-E3D0-406C-8A4E-C883F6FEB851%7D.htm">http://www.gemis.de/de/doc/prc/%7B7D803D25-E3D0-406C-8A4E-C883F6FEB851%7D.htm</a>
<b>PUR-TDI</b>	Neu-ware	Polyurethan-Weichschaum	6,280	6,280	Deutsch-land	2010	Öko-Institut	<a href="http://www.gemis.de/de/doc/prc/%7B0E0B29A0-9043-11D3-B2C8-0080C8941B49%7D.htm">http://www.gemis.de/de/doc/prc/%7B0E0B29A0-9043-11D3-B2C8-0080C8941B49%7D.htm</a>
<b>PVC</b>	Neu-ware	Polyvinylchlorid	1,910	1,906	Europa	2016	Karl Hillman, Anders Damgaard, Ola Eriksson, Daniel Jonsson and Lena Fluck	Studie: Climate Benefits of Material Recycling

Abschlussbericht

<b>PVC</b>	Neu-ware	Suspension	1,880		EU28	2021	PlasticsEurope	quelle: plasticsEurope bezogen aus Sphera
<b>PVC</b>	Neu-ware	Polyvinylchlorid (Suspension)	1,800		Deutsch-land	2011	Öko-Institut	<a href="http://www.gemis.de/de/doc/prc/%7B4F44E475-53C0-41BD-9F5A-0359EA513586%7D.htm">http://www.gemis.de/de/doc/prc/%7B4F44E475-53C0-41BD-9F5A-0359EA513586%7D.htm</a>
<b>PVC</b>	Neu-ware	Polyvinylchlorid Suspension	1,990		Europa	2015	PlasticsEurope	The European Council of Vinyl Manufacturers (ECVM)
<b>PVC</b>	Neu-ware	Emulsion	2,420	2,393	EU28	2021	PlasticsEurope	quelle: plasticsEurope bezogen aus Sphera
<b>PVC</b>	Neu-ware	Polyvinylchlorid (Emulsion)	2,200		Deutsch-land	2011	Öko-Institut	<a href="http://www.gemis.de/de/doc/prc/%7BA8276F10-4E60-45C4-A7BA-5803FDD637C7%7D.htm">http://www.gemis.de/de/doc/prc/%7BA8276F10-4E60-45C4-A7BA-5803FDD637C7%7D.htm</a>
<b>PVC</b>	Neu-ware	Polyvinylchlorid Emulsion	2,560		Europa	2015	PlasticsEurope	The European Council of Vinyl Manufacturers (ECVM)
<b>PVC</b>	Neu-ware	Polyvinylchlorid Bulk Poly-merisation (Masse)	1,229	1,544	Europa	2005	PlasticsEurope	The European Council of Vinyl Manufacturers (ECVM)
<b>PVC</b>	Neu-ware	Polyvinylchlorid (Masse)	1,860		Deutsch-land	2011	Öko-Institut	<a href="http://www.gemis.de/de/doc/prc/%7B2E9ADEB4-20B2-4E89-A0CF-728D62C82E93%7D.htm">http://www.gemis.de/de/doc/prc/%7B2E9ADEB4-20B2-4E89-A0CF-728D62C82E93%7D.htm</a>
<b>SAN</b>	Neu-ware	Styrol-Acrylnitril	2,960	2,960	Europa	2015	PlasticsEurope	EPD

a) CO<sub>2</sub>-Kennwerte für Rezyklate

Ab-kür-zung	Quelle	Kunststoff	CO <sub>2</sub> -Äq. kg CO <sub>2</sub> e/kg	CO <sub>2</sub> -Mittel-wert	Land	Jahr	Datenquelle	Information zur Datenerhebung
<b>ABS</b>	Neu-ware	Acrylnitril-Butadien-Styrol	3,100	3,339	Europa	2015	PlasticsEurope	EPD
<b>ABS</b>	Neu-ware		4,540			2017	SKZ Datenbank	eigene Industrieberechnungen

## Abschlussbericht

<b>ABS</b>	Neu-ware		4,460			2021	SKZ Datenbank	eigene Industrieberechnungen
<b>ABS</b>	Neu-ware	Emulsion	2,810		EU28	2021	PlasticsEurope	quelle: plasticsEurope bezogen aus Sphera
<b>ABS HH</b>	Neu-ware	temperaturbeständiges, unverstärktes ABS	3,460	3,460	Deutschland	2021	SKZ Datenbank	eigene Industrieberechnungen
<b>EPS</b>	Neu-ware	expandiertes Polystyrol	3,500	2,670	Deutschland	2011	Öko-Institut	<a href="http://www.gemis.de/de/doc/prc/%7B5940E429-2731-4FA6-81D1-9D745EDDC8B3%7D.htm">http://www.gemis.de/de/doc/prc/%7B5940E429-2731-4FA6-81D1-9D745EDDC8B3%7D.htm</a>
<b>EPS</b>	Neu-ware	expandiertes Polystyrol	2,370		Europa	2015	PlasticsEurope	EPD
<b>EPS</b>	Neu-ware	weiß und grau	2,140		EU28	2021	PlasticsEurope	quelle: plasticsEurope bezogen aus Sphera
<b>GPPS</b>	Neu-ware	General-Purpose Polystyrene	2,250	2,155	Europa	2012	PlasticsEurope	EPD
<b>GPPS</b>	Neu-ware	geneal purpose polystyrene	2,060		EU28	2021	PlasticsEurope	quelle: plasticsEurope bezogen aus Sphera
<b>HDPE</b>	Neu-ware	Polyethylen high density	2,430	2,141	Deutschland	2011	Öko-Institut	<a href="http://www.gemis.de/de/doc/prc/%7B17EE0594-3CF6-4901-8690-6019418504BE%7D.htm">http://www.gemis.de/de/doc/prc/%7B17EE0594-3CF6-4901-8690-6019418504BE%7D.htm</a>
<b>HDPE</b>	Neu-ware	Polyethylen high density	1,800		Europa	2014	PlasticsEurope	
<b>HDPE</b>	Neu-ware	Polyethylen high density	3,110		Deutschland	2020	SKZ Datenbank	eigene Industrieberechnungen
<b>HDPE</b>	Neu-ware	Polyethylen high density	3,120		Deutschland	2020	SKZ Datenbank	eigene Industrieberechnungen
<b>HDPE</b>	Neu-ware	granulat	1,700		EU28	2021	PlasticsEurope	quelle: plasticsEurope bezogen aus Sphera
<b>HDPE</b>	Neu-ware	Spritzgussanwendung, schwarz gefärbt	3,110	3,110	Deutschland	2020	SKZ Datenbank	eigene Industrieberechnungen

Abschlussbericht

<b>HIPS</b>	Neu-ware	High-Impact Polystyrene	2,430	2,330	Europa	2012	PlasticsEurope	EPD
<b>HIPS</b>	Neu-ware	high impact polystyrene	2,230		EU28	2021	PlasticsEurope	quelle: plasticsEurope bezogen aus Sphera
<b>LDPE</b>	Neu-ware	Polyethylen low density	2,610	2,025	Deutsch-land	2011	Öko-Institut	<a href="http://www.gemis.de/de/doc/prc/%7B48CFC911-59BE-4B9A-B1B0-41FE2AA152A8%7D.htm">http://www.gemis.de/de/doc/prc/%7B48CFC911-59BE-4B9A-B1B0-41FE2AA152A8%7D.htm</a>
<b>LDPE</b>	Neu-ware	Polyethylen low density	1,870		Europa	2014	PlasticsEurope	EDP
<b>LDPE</b>	Neu-ware	für Tütenherstellung	2,130		EU28	2013	Mori, Drobnic; Gantar, Sekavcnik,	LIFE CYCLE ASSESSMENT OF SUPERMARKET CARRIER BAGS AND OPPORTUNITY OF BIOPLASTICS
<b>LDPE</b>	Neu-ware	Granulat	1,770		Eu28	2021	PlasticsEurope	quelle: plasticsEurope bezogen aus Sphera
<b>LDPE</b>	Neu-ware	Granulat-Herstellung	2,130		Slovenien	2013	M. Mori, M. Sekavcnik, B. Drobnic	life cycle assessment of supermarket carrier bags and opportunity of bioplastics
<b>LDPE</b>	Neu-ware	Spritzgussanwendung	3,420	3,420	Deutsch-land	2020	SKZ Datenbank	eigene Industrieberechnungen
<b>LDPE</b>	Neu-ware	Waschware, schwarz gefärbt	3,530	3,540	Deutsch-land	2020	SKZ Datenbank	eigene Industrieberechnungen
<b>LDPE</b>	Neu-ware	Waschware, trübnatur	3,550		Deutsch-land	2020	SKZ Datenbank	eigene Industrieberechnungen
<b>LLDPE</b>	Neu-ware	Linear low density polyethyl-ene	1,840	1,660	Deutsch-land	2011	Öko-Institut	<a href="http://www.gemis.de/de/doc/prc/%7B80615AEE-087C-44AE-ABDB-B91B66539354%7D.htm">http://www.gemis.de/de/doc/prc/%7B80615AEE-087C-44AE-ABDB-B91B66539354%7D.htm</a>
<b>LLDPE</b>	Neu-ware	Linear low density polyethyl-ene	1,790		Europa	2014	PlasticsEurope	EPD
<b>LLDPE</b>	Neu-ware	Granulat	1,670		EU28	2021	PlasticsEurope	quelle: plasticsEurope bezogen aus Sphera
<b>PA 6</b>	Neu-ware	Polyamid 6	6,700	7,534	Europa	2014	PlasticsEurope	EPD European Plastic Production



## Abschlussbericht

<b>PA 6</b>	Neu-ware	Polyamid 6	4,010		EU28	2021	PlasticsEurope	quelle: plasticsEurope bezogen aus Sphera
<b>PA 6</b>	Neu-ware	Granulat	11,170		Deutsch-land	2017	SKZ Datenbank	eigene Industrieberechnungen
<b>PA 6</b>	Neu-ware	30 % GF, hitzestabilisiert, schwarz	7,600	7,600	Deutsch-land	2018	SKZ Datenbank	eigene Industrieberechnungen
<b>PA 6</b>	Neu-ware	10 % GF, 6 % Glas Bubbles, verstärkt, hoch hitzestabilisiert, schwarz	8,500	8,500	Deutsch-land	2018	SKZ Datenbank	eigene Industrieberechnungen
<b>PA 6 GF 15</b>	Neu-ware	PA 6 Granulat mit 15 % GF	9,720	8,435	Deutsch-land	2017	SKZ Datenbank	eigene Industrieberechnungen
<b>PA 6 GF 15</b>	Neu-ware	PA 6 Granulat mit 15 % GF	7,150		Deutsch-land	2021	SKZ Datenbank	eigene Industrieberechnungen
<b>PA 6 GF 30</b>	Neu-ware	PA 6 Granulat mit 30 % GF	8,490	7,597	Deutsch-land	2017	SKZ Datenbank	eigene Industrieberechnungen
<b>PA 6 GF 30</b>	Neu-ware	PA 6 Granulat mit 30 % GF	6,470		Deutsch-land	2021	SKZ Datenbank	eigene Industrieberechnungen
<b>PA 6 GF 30</b>	Neu-ware	PA 6 Granulat mit 30 % GF	7,830		Deutsch-land	2016	SKZ Datenbank	eigene Industrieberechnungen
<b>PA 6+66</b>	Neu-ware	PA 6 + 66 mit 30 % GF, hitzestabilisiert, schwarz	8,400	8,400	Deutsch-land	2018	SKZ Datenbank	eigene Industrieberechnungen
<b>PA 66 GF 15</b>	Neu-ware	PA 66 Granulat mit 15 % GF	9,820	8,355	Deutsch-land	2017	SKZ Datenbank	eigene Industrieberechnungen
<b>PA 66 GF 15</b>	Neu-ware	PA 66 Granulat mit 15 % GF	6,890		Deutsch-land	2021	SKZ Datenbank	eigene Industrieberechnungen
<b>PA 66 GF 30</b>	Neu-ware	PA 66 Granulat mit 30 % GF	8,600	7,420	Deutsch-land	2017	SKZ Datenbank	eigene Industrieberechnungen

## Abschlussbericht

<b>PA 66 GF 30</b>	Neu-ware	PA 66 Granulat mit 30 % GF	6,240		Deutsch-land	2021	SKZ Datenbank	eigene Industrieberechnungen
<b>PA 66 HI 10</b>	Neu-ware	schlagzähmodifiziertes PA 66	9,910	9,910	Deutsch-land	2016	SKZ Datenbank	eigene Industrieberechnungen
<b>PA 66</b>	Neu-ware	Granulat	11,280	7,657	Deutsch-land	2017	SKZ Datenbank	eigene Industrieberechnungen
<b>PA 66</b>	Neu-ware	Polyamid	4,770		EU28	2021	PlasticsEurope	quelle: plasticsEurope bezogen aus Sphera
<b>PA 66</b>	Neu-ware	Polyamid 66	6,400		Europa	2014	PlasticsEurope	EPD
<b>PB</b>	Neu-ware	Polybutadien	3,485	2,972	Europa	2005	PlasticsEurope	PlasticsEurope
<b>PC</b>	Neu-ware	Polycarbonat	3,400	3,550	Europa	2019	PlasticsEurope	Eco-profiles and Environmental Product Declarations of the European Plastics Manufacturers
<b>PC GF 10</b>	Neu-ware	PC Granulat mit 10 % GF	6,170	5,125	Deutsch-land	2017	SKZ Datenbank	eigene Industrieberechnungen
<b>PC GF 10</b>	Neu-ware	PC Granulat mit 10 % GF	4,080		Deutsch-land	2021	SKZ Datenbank	eigene Industrieberechnungen
<b>PC GF 20</b>	Neu-ware	PC Granulat mit 20 % GF	5,750	4,815	Deutsch-land	2017	SKZ Datenbank	eigene Industrieberechnungen
<b>PC GF 20</b>	Neu-ware	PC Granulat mit 20 % GF	3,880		Deutsch-land	2021	SKZ Datenbank	eigene Industrieberechnungen
<b>PC GF 30</b>	Neu-ware	PC Granulat mit 30 % GF	5,320	4,520	Deutsch-land	2017	SKZ Datenbank	eigene Industrieberechnungen
<b>PC GF 30</b>	Neu-ware	PC Granulat mit 30 % GF	3,720		Deutsch-land	2021	SKZ Datenbank	eigene Industrieberechnungen
<b>PC-ABS</b>	Neu-ware	Blend	3,780	3,780	Deutsch-land	2021	SKZ Datenbank	eigene Industrieberechnungen

## Abschlussbericht

<b>PC-ABS GF 20</b>	Neu-ware	Granulat-Blend	4,910	4,225	Deutsch-land	2017	SKZ Datenbank	eigene Industrieberechnungen
<b>PC-ABS GF 20</b>	Neu-ware	Granulat-Blend	3,540		Deutsch-land	2021	SKZ Datenbank	eigene Industrieberechnungen
<b>PE</b>	Neu-ware	Granulat	3,800	3,800	Deutsch-land	2019	SKZ Datenbank	eigene Industrieberechnungen
<b>PE/PP</b>	Neu-ware	Polyolefine	1,500	1,500	Europa	2018	Karl Hillman, Anders Damgaard, Ola Eriksson, Daniel Jonsson and Lena Fluck	Studie: Climate Benefits of Material Recycling
<b>PET</b>	Neu-ware	Polyethylenetherephtalat	3,710	3,217	Europa	2017	Karl Hillman, Anders Damgaard, Ola Eriksson, Daniel Jonsson and Lena Fluck	Studie: Climate Benefits of Material Recycling
<b>PET</b>	Neu-ware	Polyethylenetherephtalat	3,200		Deutsch-land	2010	Öko-Institut	<a href="http://www.gemis.de/de/doc/prc/%7B0E0B299C-9043-11D3-B2C8-0080C8941B49%7D.htm">http://www.gemis.de/de/doc/prc/%7B0E0B299C-9043-11D3-B2C8-0080C8941B49%7D.htm</a>
<b>PET</b>	Neu-ware	PET Flaschen-Qualität	2,190		Europa	2017	PlasticsEurope	EPD
<b>PET</b>	Neu-ware	bottle grade granulat	2,070		EU28	2021	PlasticsEurope	quelle: plasticsEurope bezogen aus Sphera
<b>PLA</b>	Neu-ware	Polylactid	3,190	2,685	USA / Europa	2011	Öko-Institut	<a href="http://www.gemis.de/de/doc/prc/%7BB44A786A-0365-4BFB-9DDD-05D19B2A9A6E%7D.htm">http://www.gemis.de/de/doc/prc/%7BB44A786A-0365-4BFB-9DDD-05D19B2A9A6E%7D.htm</a>
<b>PMMA</b>	Neu-ware	Polymethylmethacrylat	3,750	3,560	Europa	-	PlasticsEurope	Excel Tabelle von eigenem Server (SKZ)
<b>POM</b>	Neu-ware	Polyoxymethylen	3,200	3,130	Europa	2014	PlasticsEurope	EPD
<b>POM</b>	Neu-ware	Polyoxymethylen	2,890		EU28	2021	PlasticsEurope	quelle: plasticsEurope bezogen aus Sphera
<b>PP</b>	Neu-ware	Polypropylen	2,880	2,167	Deutsch-land	2011	Öko-Institut	<a href="http://www.gemis.de/de/doc/prc/%7B109B44FC-3E16-4528-82FF-641E040D47DB%7D.htm">http://www.gemis.de/de/doc/prc/%7B109B44FC-3E16-4528-82FF-641E040D47DB%7D.htm</a>

Abschlussbericht

<b>PP</b>	Neu-ware	Polypropylen	1,630		Europa	2014	PlasticsEurope	EPD
<b>PP</b>	Neu-ware	Granulat	1,540		EU28	2021	PlasticsEurope	quelle: plasticsEurope bezogen aus Sphera
<b>PP</b>	Neu-ware	Granulat	3,900		Deutsch-land	2019	SKZ Datenbank	eigene Industrieberechnungen
<b>PP</b>	Neu-ware	für Tütenherstellung	1,990		EU27	2013	Mori, Drobnic; Gantar, Se-kavcnik,	LIFE CYCLE ASSESSMENT OF SUPERMARKET CARRIER BAGS AND OPPORTUNITY OF BIOPLASTICS
<b>PP</b>	Neu-ware	Spritzgussanwendung	3,220	3,420	Deutsch-land	2020	SKZ Datenbank	eigene Industrieberechnungen
<b>PP</b>	Neu-ware	Spritzgussanwendung; Pro-dukte aus PP	3,620		EU27	2020	Viktoria Mannheim und Zoltan Simenfalvi	Studie: Total Life Cycle of Polypropylene Products: Re- ducing Environmental Impacts in the Manufacturing Phase Environmental Impacts in the Manufacturing Phase
<b>PP</b>	Neu-ware	PP Granulat mit 20 % GF, schwarz	2,930	2,930	Deutsch-land	2020	SKZ Datenbank	eigene Industrieberechnungen
<b>PP</b>	Neu-ware	PP Granulat mit 20 % Mine- ralanteil	2,820	2,820	Deutsch-land	2020	SKZ Datenbank	eigene Industrieberechnungen
<b>PS</b>	Neu-ware	Polystyrol	2,900	2,458	Deutsch-land	2011	Öko-Institut	<a href="http://www.gemis.de/de/doc/prc/%7B27CF6CA2-7DAF-44AE-899E-8FD686A8966C%7D.htm">http://www.gemis.de/de/doc/prc/%7B27CF6CA2-7DAF-44AE-899E-8FD686A8966C%7D.htm</a>
<b>PS</b>	Neu-ware	Polystyrol	2,250		-	-	PlasticsEurope	Excel Tabelle von eigenem Server (SKZ)
<b>PS</b>	Neu-ware	Polystyrol	3,500		Europa	2015	Karl Hillman, Anders Dam-gaard, Ola Eriksson, Daniel Jonsson and Lena Fluck	Studie: Climate Benefits of Material Recycling
<b>PS</b>	Neu-ware	Polystyrol	2,200		-	2005	Studie: Total Corbion PLA	END-OF-LIFE OPTIONS FOR BIOPLASTICS
<b>PS-HI</b>	Neu-ware	high impact polystyrene, granulat mix	2,430	2,295	Europa	-	PlasticsEurope	Excel Tabelle von eigenem Server (SKZ)

Abschlussbericht

<b>PU</b>	Neu-ware	TDI-based PU foam without FR, density 35 to 40 kg/m <sup>3</sup>	3,220	3,117	Europa	2014-2015	PlasticsEurope	EPD EUROPUR
<b>PU</b>	Neu-ware	TDI-based PU foam without FR, density 18 to 25 kg/m <sup>3</sup>	3,180		Europa	2014-2015	PlasticsEurope	EPD EUROPUR
<b>PU</b>	Neu-ware	MDI-based viscoelastic PU foam with-out FR, density 45 to 53 kg/m <sup>3</sup>	2,950		Europa	2014-2015	PlasticsEurope	EPD EUROPUR
<b>PU</b>	Neu-ware	TDI-based PU foam with FR, density 40 to 54 kg/m <sup>3</sup>	3,560	3,560	Europa	2014-2015	PlasticsEurope	EPD EUROPUR
<b>PUR</b>	Neu-ware	PU-Hartschaum	3,388	3,388	Europa	2005	PlasticsEurope	Eco-profiles of the European Plastics Industry
<b>PUR-MDI</b>	Neu-ware	Polyuretan Hartschaum	4,380	4,380	Deutsch-land	2010	Öko-Institut	<a href="http://www.gemis.de/de/doc/prc/%7B7D803D25-E3D0-406C-8A4E-C883F6FEB851%7D.htm">http://www.gemis.de/de/doc/prc/%7B7D803D25-E3D0-406C-8A4E-C883F6FEB851%7D.htm</a>
<b>PUR-TDI</b>	Neu-ware	Polyurethan-Weichschaum	6,280	6,280	Deutsch-land	2010	Öko-Institut	<a href="http://www.gemis.de/de/doc/prc/%7B0E0B29A0-9043-11D3-B2C8-0080C8941B49%7D.htm">http://www.gemis.de/de/doc/prc/%7B0E0B29A0-9043-11D3-B2C8-0080C8941B49%7D.htm</a>
<b>PVC</b>	Neu-ware	Polyvinylchlorid	1,910	1,906	Europa	2016	Karl Hillman, Anders Damgaard, Ola Eriksson, Daniel Jonsson and Lena Fluck	Studie: Climate Benefits of Material Recycling
<b>PVC</b>	Neu-ware	Suspension	1,880		EU28	2021	PlasticsEurope	quelle: plasticsEurope bezogen aus Sphera
<b>PVC</b>	Neu-ware	Polyvinylchlorid (Suspension)	1,800		Deutsch-land	2011	Öko-Institut	<a href="http://www.gemis.de/de/doc/prc/%7B4F44E475-53C0-41BD-9F5A-0359EA513586%7D.htm">http://www.gemis.de/de/doc/prc/%7B4F44E475-53C0-41BD-9F5A-0359EA513586%7D.htm</a>
<b>PVC</b>	Neu-ware	Polyvinylchlorid Suspension	1,990		Europa	2015	PlasticsEurope	The European Council of Vinyl Manufacturers (ECVM)
<b>PVC</b>	Neu-ware	Emulsion	2,420	2,393	EU28	2021	PlasticsEurope	quelle: plasticsEurope bezogen aus Sphera
<b>PVC</b>	Neu-ware	Polyvinylchlorid (Emulsion)	2,200		Deutsch-land	2011	Öko-Institut	<a href="http://www.gemis.de/de/doc/prc/%7BA8276F10-4E60-45C4-A7BA-5803FDD637C7%7D.htm">http://www.gemis.de/de/doc/prc/%7BA8276F10-4E60-45C4-A7BA-5803FDD637C7%7D.htm</a>

Abschlussbericht

<b>PVC</b>	Neu-ware	Polyvinylchlorid Emulsion	2,560		Europa	2015	PlasticsEurope	The European Council of Vinyl Manufacturers (ECVM)
<b>PVC</b>	Neu-ware	Polyvinylchlorid Bulk Polymerisation (Masse)	1,229	1,544	Europa	2005	PlasticsEurope	The European Council of Vinyl Manufacturers (ECVM)
<b>PVC</b>	Neu-ware	Polyvinylchlorid (Masse)	1,860		Deutschland	2011	Öko-Institut	<a href="http://www.gemis.de/de/doc/prc/%7B2E9ADEB4-20B2-4E89-A0CF-728D62C82E93%7D.htm">http://www.gemis.de/de/doc/prc/%7B2E9ADEB4-20B2-4E89-A0CF-728D62C82E93%7D.htm</a>
<b>SAN</b>	Neu-ware	Styrol-Acrylnitril	2,960	2,960	Europa	2015	PlasticsEurope	EPD