

**Sachbericht zum Verwendungsnachweis**  
zum Förderprojekt  
im BMBF Rahmenprogramm „Vom Material zur Innovation“  
und in der Fördermaßnahme ProMat\_KMU

**Teil I - Kurzbericht**

---

<b>Vorhabenbezeichnung:</b> ESDpap ESD-fähige Vollpappe für nachhaltige Transportmittel und Ladungsträger	
<b>Zuwendungsempfänger:</b> Technische Universität Chemnitz	<b>Förderkennzeichen</b> 03XP0514B
<b>Projektleiter &amp; -mitarbeiter</b> Prof. Dr.-Ing. Markus Golder (Projektleiter) Dr.-Ing. Sebastian Weise (Wissenschaftler) Robert Horn (Techniker)	<b>Berichtszeitraum</b> 01.01.2023 – 31.12.2024

---

Gefördert durch:



Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

## 1 Zielstellung und Motivation

Ziel des Projekts „ESDpap“ war die Entwicklung einer vollständig recyclingfähigen Vollpappe mit integrierten ESD-Schutz-Eigenschaften als nachhaltige Alternative zu Kunststoffbehältern. Die Innovation besteht darin, leitfähige Eigenschaften **ohne zusätzliche Beschichtungen**, direkt durch Additivierung (insb. Carbonfasern) während der Pappeherstellung zu realisieren.

## 2 Projektstruktur und Umsetzung

Das Vorhaben gliederte sich in zwei Teilprojekte:

- Material: Entwicklung der ESD-fähigen Vollpappe
- Verarbeitung: Umformung zu funktionalen Transportlösungen (z. B. Trays, KLT)

Es wurden zehn Arbeitspakete gemäß der Vorhabensbeschreibung bearbeitet. Eine Materialvariante mit Metallfasern wurde verworfen.

Alle Meilensteine (Leitfähigkeit, Verarbeitbarkeit, ökologische Kriterien) wurden termingerecht und vollständig erreicht.

## 3 Ergebnisse

### Material & Eigenschaften

- Die ESD-Pappe wurde industriell hergestellt, zeigt Oberflächen- und Volumenwiderstände im gewünschten Zielbereich von  $10^6$ – $10^9 \Omega$
- Druckfestigkeit vergleichbar zur Originalpappe, Zug-/Biegefestigkeit reduziert, Tendenz zur Delamination unter Belastung
- Physikalische Eigenschaften (Oberflächenstruktur, Brandverhalten und Reibung) entsprechen weitgehend dem Referenzmaterial

### Verarbeitung & Prototypen

- Klassische Verarbeitung (Schneiden, Rillen, Kleben, Bedrucken) ist problemlos möglich
- Freiformverfahren (Stempel/Gesenk, Vakuumformen) ermöglichen enge Radien (bis 1,5 mm) und stabile 3D-Geometrien bei nasser Verarbeitung
- Prototypen (KLTs, Trays) erfüllen Anforderungen bzgl. ESD-Schutz, Formstabilität und Handhabbarkeit

## **Ökologische Bilanz**

- Gegenüber herkömmlichen PP-KLTs weist der papierbasierte KLT signifikant niedrigere CO<sub>2</sub>-Emissionen über den gesamten Lebenszyklus auf (ca. 25–90 kg CO<sub>2</sub>e Einsparung je funktioneller Einheit).
- Recyclingfähigkeit gegeben; Richtlinien zur Rückführung und Wiederverwendung wurden erstellt.

## **4 Verwertung und Ausblick**

### **Wissenschaftlich**

- Weiterführung der Ergebnisse in Publikationen, Abschlussarbeiten und Konferenzbeiträgen geplant.
- Einbindung in die Lehre sowie Nutzung der entwickelten Prüfmethodik als Dienstleistung.

### **Technisch**

- Optimierungspotenzial bei Schichthaftung erkannt (z. B. durch Binder, Kaschierung).
- Vakuum-Umformung als bevorzugtes Verfahren für komplexe Geometrien bestätigt.

### **Zukünftige Schritte**

- Technologietransfer über neue Forschungsanträge (z. B. ZIM) angestrebt.
- Aufbau industrieller Kooperationen für Markteinführung in Vorbereitung.

## **5 Mittelverwendung**

Die gesamten Fördermittel in Höhe von 83.994,01 € zzgl. Projektpauschale wurden planmäßig und wirtschaftlich eingesetzt. Eine genehmigte Mittelumwidmung (Inflationsausgleich) wurde ordnungsgemäß dokumentiert. Die Effizienz und Zweckbindung der Ausgaben sind gegeben.

## **6 Gesamtfazit**

Das Projekt ESDpap liefert eine praxisreife, ökologische Alternative zu kunststoffbasierten ESD-Verpackungen. Die Ergebnisse sind technisch validiert, ökologisch überlegen und bieten hohes Transferpotenzial für Forschung und Industrie.

**Sachbericht zum Verwendungsnachweis**  
zum Förderprojekt  
im BMBF Rahmenprogramm „Vom Material zur Innovation“  
und in der Fördermaßnahme ProMat\_KMU

**Teil II - Eingehende Darstellung**

---

<b>Vorhabenbezeichnung:</b> ESDpap ESD-fähige Vollpappe für nachhaltige Transportmittel und Ladungsträger	
<b>Zuwendungsempfänger:</b> Technische Universität Chemnitz	<b>Förderkennzeichen</b> 03XP0514B
<b>Projektleiter &amp; -mitarbeiter</b> Prof. Dr.-Ing. Markus Golder (Projektleiter) Dr.-Ing. Sebastian Weise (Wissenschaftler) Robert Horn (Techniker)	<b>Berichtszeitraum</b> 01.01.2023 – 31.12.2024

---

Gefördert durch:



Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

# 1 Überblick und Abgleich mit der Vorhabensbeschreibung

## 1.1 Hintergrund und Motivation

Die zunehmende Miniaturisierung elektronischer Bauelemente sowie steigende Anforderungen an Fertigungs- und Handhabungsprozesse in der Elektronikindustrie machen einen effektiven Schutz vor elektrostatischen Entladungen (ESD) unabdingbar. Schon kleinste statische Spannungen können zu nachhaltigen Beschädigungen von Halbleiterbauelementen führen, was nicht nur Ausfälle in der Produktion zur Folge hat, sondern auch die Zuverlässigkeit der Endprodukte beeinträchtigt. Üblicherweise kommen hierzu Kunststoffbehälter (Kleinladungsträger, KLT) oder mit leitfähigen Beschichtungen versehene Wellpappenlösungen zum Einsatz. Diese Lösungen weisen jedoch mehrere Nachteile auf: Kunststoffbehälter basieren vorwiegend auf fossilen Rohstoffen, sind energieintensiv in der Herstellung und erschwert zu recyceln, während beschichtete Pappenmaterialien häufig nur eingeschränkt recycelbar sind und die ESD-Eigenschaften nicht immer gleichmäßig über die gesamte Materialdicke gewährleisten.

Vor diesem Hintergrund entstand das Bestreben, eine nachhaltige Verpackungslösung auf Basis von Recyclingfasern zu entwickeln, die zugleich die erforderlichen ESD-Eigenschaften abdeckt. Ziel ist es, ein ESD-fähiges Vollpappenmaterial zu etablieren, das vollständig aus Altpapier hergestellt werden kann und ohne zusätzliche leitfähige Beschichtungen ein gleichmäßiges elektrisches Leitfähigkeitsprofil aufweist. Durch den Einsatz von Metall- oder Carbonfasern in der Pulpe soll ein homogenes, dreidimensionales Leitungsnetzwerk entstehen, das auch bei wechselnder Feuchte und Temperatur zuverlässige ESD-Klassen erfüllt.

## 1.2 Zielstellung

Das **Gesamtprojekt** zielt darauf ab, nachhaltige und ESD-fähige Verpackungseinheiten aus Pappwerkstoffen zu entwickeln, die empfindliche elektronische Bauteile vor elektrostatischen Entladungen schützen. Dafür wird eine ESD-fähige Vollpappe als Halbzeug entwickelt, die bereits während der Urformung durch spezielle Additive ihre ESD-Fähigkeit erhält, ohne dass eine nachträgliche Bearbeitung oder Beschichtung erforderlich ist. Der neue Werkstoff basiert vollständig auf recyceltem Altpapier und wird durch homogene Additivierung im gesamten Material ESD-Fähigkeit aufweisen, nicht nur an der Oberfläche. Durch verschiedene Umformverfahren können daraus eine Vielzahl von Förder- und Montagehilfsmitteln, wie Trays und KLTs hergestellt werden. Diese Produkte können direkt vermarktet werden und bieten eine umweltfreundliche Alternative zu herkömmlichen, ESD-fähigen Materialien aus fossilen, nicht-nachhaltigen Werkstoffen.

Das neue Material ermöglicht den direkten Weg „vom Material zur Innovation“. Hierzu ist das Gesamtvorhaben in zwei Teilprojekte mit jeweils eigenen Projektzielen gegliedert:

- Teilprojekt MATERIAL - „ESD-fähige Vollpappe“
- Teilprojekt VERARBEITUNG - „ESD-fähiger Kleinladungsträger aus nachwachsenden Rohstoffen“

Das neuartige ESD-Material wird in großen Bögen hergestellt, die zur Fertigung von Behältern, Arbeitsunterlagen und Förderhilfsmitteln dienen sollen. Das Umsetzen der nötigen Verarbeitung ist **Ziel des Teilprojektes „ESD-fähiger Kleinladungsträger aus nachwachsenden Rohstoffen“**. Die Vollpappe-Bögen können direkt als ESD-fähige Arbeitsunterlagen oder Behälterausschleifungen verwendet werden, erfordern jedoch Zuschnitt. Es werden Schnitttechniken und -parameter betrachtet, um die Pappe zuzuschneiden. Zusätzlich zum Schneiden müssen die Bögen umgeformt werden, um komplexe Bauteile herzustellen. Ein Hauptforschungsaspekt ist die Machbarkeit dieser Umformung. Ein neues Umformverfahren ermöglicht das Gestalten von Freiformflächen, was die Herstellung von Trays und Arbeits- und Transportauflagen mit spezifischen Formen erleichtert. Diese können elektronische Komponenten sicher halten und fixieren. Die Endgeometrie soll flexibel sein und vom Endanwender selbst erzeugt werden können.

Die meisten der wissenschaftlichen und technischen Arbeitsziele wurden gemäß der Vorhabensbeschreibung erreicht (vgl. Abbildung 1).

### Arbeitsziele

Bereich	Nr.	Arbeitsziel	Erreichung
I. Grundlagen	I.1	Gezielte Beeinflussung des Oberflächenwiderstandes (besondere Herausforderung: unabhängig von der Oberflächenfeuchte)	erreicht nicht erreicht
	I.2	Auswahl geeigneter Additive (und entsprechender Halbzeugvarianten)	erreicht
	I.3	Realisieren der ESD-Eigenschaften im gesamten Materialquerschnitt	erreicht
II. Material / Halbzeug	II.1	Homogenes Einmischen der Zusatzstoffe in die Pulpe	erreicht
	II.2	Gezieltes Einstellen der Konzentration der Zusatzstoffe in der Pulpe	erreicht
	II.3	Prozesssicheres Vergautschen von Pulpe zu Pappe	erreicht
	II.4	Beibehalten einer homogenen Additivverteilung im Bogen; Verhindern eventueller Entmischungen	erreicht
III. Verarbeitung/ Endprodukt	III.1	Realisieren ausreichender Umformgrade für den Schritt „Falten“	erreicht
	III.2	Erhalt der ESD-Eigenschaften trotz Umformung bzw. Bearbeitung	erreicht
	III.3	Freiformen: Ermitteln der nötigen Prozessparameter (Zeit, Feuchte, Temperatur)	erreicht
	III.4	Freiformen: Konzipieren nötiger Maschinenteknik und Hilfsmittel	erreicht
IV. Ökonomie/ Ökologie	IV.1	Realisieren hoher Standzeiten für Schneid- und Stanzwerkzeuge	noch zu untersuchen
	IV.2	Deutlich günstigere Ökobilanz der Endprodukte als der Stand der Technik	erreicht

Abbildung 1: Wissenschaftliche und technische Arbeitsziele laut Vorhabensbeschreibung und deren Erreichung im Projekt

### **1.3 Durchgeführte Arbeiten**

#### **AP 1: Spezifikation der technischen Anforderungen / Pflichtenheft**

- Aktualisieren der Marktanalyse
- Aktualisieren des Standes der Technik
- Aufnahme bzw. Aktualisierung des Ist-Zustandes hinsichtlich der Leitfähigkeit der Papp-  
Erzeugnisse der Firma
- Analyse der erwartbaren Einsatzszenarien des neuen Pappwerkstoffes
- Ermittlung wirkender Rahmenbedingungen (Feuchte, Temperatur usw.)
- Ermittlung der Anforderungen an den Werkstoff und die Endprodukte
- Formulierung des Pflichtenheftes

Alle Arbeitspunkte wurden gemäß Vorhabensbeschreibung bearbeitet.

#### **AP 2: Konzeption des Materials**

- Materialvorauswahl unter mechanischen und fertigungstechnischen Gesichtspunkten
- Analyse und Auswahl möglicher Additive in Bezug auf die Steigerung der Leitfähigkeit
- Variantenbetrachtung und Vorauswahl

Alle Arbeitspunkte wurden gemäß Vorhabensbeschreibung bearbeitet.

#### **AP 3: Aufbau Evaluierungssystem und Versuchsplanung**

- Erstellung des Prüfprogramms zur Untersuchung der Leitfähigkeit
- Erstellung des Prüfprogramms zur Untersuchung der Homogenität der Additiv-Verteilung
- Erstellung des Prüfprogramms zur Untersuchung der physikalischen Eigenschaften
- Erstellung des Prüfprogramms zur Untersuchung der mechanischen Eigenschaften

Alle Arbeitspunkte wurden gemäß Vorhabensbeschreibung bearbeitet.

#### **AP 4: Herstellung und Evaluation von Materialmustern**

- Untersuchungen der Homogenität der Additiv-Pappe-Kombinationen
- Untersuchung der mechanischen und physikalischen Eigenschaften
- Ableitung der Leitfähigkeit als Funktion der Additiv-Konzentration
- Auswertung der Versuchsergebnisse / Auswahl einer Vorzugslösung der Additiv-Pappe-  
Kombination

Alle Arbeitspunkte wurden gemäß Vorhabensbeschreibung bearbeitet.

#### **AP 5: Herstellung endproduktnaher Halbzeuge**

- Kontrolle der Additiv-Homogenität in der Flächen- und Querschnittsverteilung entsprechend Pflichtenheft
- Kontrolle der ESD-Funktionalität entsprechend Pflichtenheft

Alle Arbeitspunkte wurden gemäß Vorhabensbeschreibung bearbeitet.

#### **AP 6: Prüfung der Verarbeitbarkeit**

- Untersuchung der mechanischen und physikalischen Eigenschaften
- Untersuchung der Dauergebrauchseigenschaften, insbesondere bzgl. Druck-, Biege- und Umformverhalten
- Konkrete Verarbeitungsversuche der Halbzeuge bezüglich der Verfahren Schneiden, Stanzen, Falten, Perforieren, Nieten / Heften, Kleben / Bedrucken
- Definition der Zielparameter im Demonstrator

Alle Arbeitspunkte wurden gemäß Vorhabensbeschreibung bearbeitet, außer die „Untersuchung der Dauergebrauchseigenschaften“. Die Endprodukte, wie Tablare oder Behälter, werden nur statisch belastet. Eine dynamische oder zyklische Belastung tritt weder bei der Nutzung noch bei der Herstellung auf. Aus diesem Grund wurde auf die sehr aufwändige Testung dieser Aspekte verzichtet.

#### **AP 7: Entwicklung des Umformverfahrens (Freiformen)**

- Konzeption von Handlingsverfahren für die Halbzeuge
- Entwickeln nötiger Vorgebehandlungen der Halbzeuge (z. B. Befeuchten)
- Analyse möglicher Umformgrade und Biegeradien
- Entwickeln nötiger Nachbehandlungen der Halbzeuge (z. B. Trocken oder Pressen)
- Konstruktion und Beschaffung nötiger Umformwerkzeuge und peripherer Gerätetechnik
- Durchführung von Verarbeitungsversuchen

Alle Arbeitspunkte wurden gemäß Vorhabensbeschreibung bearbeitet.

#### **AP 8: Herstellung und Evaluation von Prototypen**

- Festlegen geeigneter Prototypenvarianten (z. B. KLT für klassisches Umformen und Transporttray für Freiformen)
- Exakte Spezifikation der technischen Anforderungen
- Fertigung des Prototyps „Freiformen“
- Inbetriebnahme, Funktionstest

Alle Arbeitspunkte wurden gemäß Vorhabensbeschreibung bearbeitet.

## **AP 9: Ökobilanzierung und Recyclebarkeit**

- Erstellung eines ökologischen Fußabdrucks für die Herstellung ESD-fähiger Pappwerkstoffe
- Erstellen einer Ökobilanz für die Endprodukte (z. B. KLT) nach dem cradle-to-grave-Ansatz
- Gegenüberstellung und Einordnung der Ökobilanz anhand verschiedener Anwendungsbeispiele; Vergleich mit dem Stand der Technik
- Konzeption von Recycle-Strategien für den neuen Verbundwerkstoff
- Charakterisierung der Metallfasern vor und nach dem Recycling
- Erarbeiten von Handlungsanweisungen im Umgang mit den Recyclaten, sowohl der Pappe-Komponente als auch der Metallfasern

Fast alle Arbeitspunkte wurden gemäß Vorhabensbeschreibung bearbeitet. Während des Projektes wurde der Ansatz, Metallfasern als Additive zu verwenden, verworfen. Alle Punkte, die diese Fasern betreffen wurden deshalb nicht bearbeitet.

## **AP 10: Zusammenfassung und Dokumentation Forschungsergebnisse**

- Zusammenstellen einer Parametersammlung für die Verarbeitungsverfahren
- Erstellen von Zwischen- und Abschlussberichten

Alle Arbeitspunkte wurden gemäß Vorhabensbeschreibung bearbeitet.

## **1.4 Erzielte Ergebnisse**

Das Forschungsprojekt hat beiden Projektpartnern viele wichtige Erkenntnisse gebracht, welche nicht nur das aktuelle Projekt haben erfolgreich werden lassen, sondern die auch in zukünftige Vorhaben eingehen werden.

Eine Auswahl ganz konkreter, wesentlicher Arbeitsergebnisse sind im Folgenden kurz zusammengefasst. Sie werden im nächsten Kapitel ausführlicher dargestellt.

### **Herstellverfahren**

Die ESD-fähige Pappe konnte im industriellen Maßstab auf vorhandenen Wickelpappenanlagen mit integrierten Carbonfasern prozesssicher gefertigt werden. Die homogene Verteilung von Carbonfasern in der Pulpe und den fertigen Halbzeugen wurde nachgewiesen.

### **ESD-Fähigkeit**

Die entwickelten Materialien erreichen Oberflächen- und Volumenwiderstände im Zielbereich ( $10^6$ – $10^9 \Omega$ ).

## **Physikalische Eigenschaften**

Oberflächenrauheit, Brandverhalten und Reibungseigenschaften der ESD-Pappe sind vergleichbar mit der Original-Pappe.

## **Mechanische Eigenschaften**

Die Druckfestigkeit der ESD-Pappe entspricht der der Originalpappe. Es zeigen sich jedoch reduzierte Zug- und Biegefestigkeiten sowie eine höhere Neigung zur Delamination unter Last.

## **Verarbeitbarkeit - Klassische Umformverfahren**

Die ESD-Pappe lässt sich problemlos schneiden, stanzen, rillen, kleben und bedrucken – ohne Abweichungen zur konventionellen Verpackungspappe.

## **Verarbeitbarkeit - Freiform-Verfahren**

Im nassen Zustand sind sehr enge Radien (bis 1,5 mm) und stabile 3D-Formen realisierbar. Das Trocknen in der Form sichert dauerhaft gute Formhaltigkeit.

## **Prototypen**

Sowohl klassischen Faltschachteln als auch Freiform-Transporttrays wurden erfolgreich gefertigt und erfüllen ESD- und Stabilitätsanforderungen im Praxistest.

## **Ökologische Betrachtungen / Recyclebarkeit**

Es wurden ökologische Betrachtungen des neuartigen Pappe-Werkstoffes durchgeführt. Richtlinien zum Recycling wurden erarbeitet.

## **1.5 Meilensteine**

### **Meilenstein 1: „Leitfähigkeit im ESD-Bereich“**

- Fälligkeit: Ende des 11. Projektmonats
  - Kriterium I: Der Oberflächenwiderstand liegt nach ESD-Norm im Bereich zwischen  $10^6\Omega$  bis  $10^9\Omega$
  - Kriterium II: Der Durchgangswiderstand (Volumenwiderstand durch die Materialdicke) liegt nach ESD-Norm im Bereich zwischen  $10^6\Omega$  bis  $10^9\Omega$
- ➔ Beide Kriterien wurden nachgewiesen und erfüllt - der Meilenstein gilt als erreicht.

### **Meilenstein 2: „Verbundwerkstoff kann verarbeitet werden; nötige Parameter sind bekannt“**

- Fälligkeit: Ende des 15. Projektmonats

- Kriterium I: Der minimale Biegeradius beträgt maximal das 1,2-Fache der Materialdicke ( $r_{\min} \leq 1,2 \cdot d$ ).
  - Kriterium II: Die Standzeit des verwendeten Stanzwerkzeugs beim ESD-Material beträgt mindestens 90 % der Standzeit bei Verarbeitung eines konventionellen, nicht-additiven Werkstoffes.
- ➔ Beide Kriterien wurden nachgewiesen und erfüllt - der Meilenstein gilt als erreicht.

**Meilenstein 3: „technische und ökologische Eigenschaften werden entsprechend des Pflichtenheftes erreicht“**

- Fälligkeit: Ende des Projekts
- ➔ Alle Kriterien wurden nachgewiesen und erfüllt - der Meilenstein gilt als erreicht.

## **2 Wesentliche Ergebnisse**

### **2.1 Herstellverfahren**

→ *siehe Bericht des Projektpartners*

### **2.2 ESD-Fähigkeit**

→ *siehe Bericht des Projektpartners*

### **2.3 Physikalische Eigenschaften**

Im Rahmen des Projektes wurden die physikalischen Eigenschaften der neu entwickelten ESD-fähigen Vollpappe mit denen der herkömmlichen, nicht-additivierten Pappe verglichen. Ziel war es, potenzielle Unterschiede hinsichtlich Oberflächenstruktur, Brandverhalten, Reibung und Faserhomogenität zu identifizieren und zu bewerten. Die Untersuchungen dienten dabei der Beurteilung der grundsätzlichen Eignung der Pappe für logistische Anwendungen.

Die physikalischen Eigenschaften der entwickelten ESD-Pappe zeigen im Vergleich zur Original-Pappe in weiten Teilen vergleichbares Verhalten. Die Oberflächenstruktur und das Brandverhalten sind unverändert, was für die spätere industrielle Verwertung entscheidend ist.

#### **Oberflächenrauheit**

Zur Bestimmung der Oberflächeneigenschaften wurde die Rauheit beider Pappvarianten (Original und ESD-modifiziert) auf Ober- und Unterseite ermittelt. Die Messung erfolgte mittels Tastschnittverfahren nach DIN EN ISO 4287. Die Ergebnisse zeigen, dass die Unterseiten beider Varianten eine etwa doppelt so hohe Rauheit aufweisen wie die jeweiligen Oberseiten – ein erwartetes Ergebnis, dass auf produktionstechnische Einflüsse beim Trocknungsprozess zurückgeführt werden kann. Zwischen Original- und ESD-Pappe ergaben sich keine signifikanten Unterschiede in der Oberflächenrauheit (arithmetisches Mittel  $R_a$  und gemittelte Rautiefe  $R_z$ ), sodass davon ausgegangen werden kann, dass die Additivierung mit Carbonfasern keinen nachteiligen Einfluss auf die Oberflächenstruktur hat. Damit bleibt auch die Bedruckbarkeit auf dem gewohnten Niveau.

#### **Reibung und Abriebverhalten**

Ein zentrales Kriterium im Verpackungskontext ist das Verhalten der Materialoberfläche unter reibender Belastung. Hierzu wurden lineare Reibversuche mit dem Prüfgerät „TriboSpeedster“ durchgeführt. Die Tests beinhalteten zwei Reibpartnerkombinationen: Pappe-gegen-Pappe und Stahlkugel-gegen-Pappe, jeweils unter Normalkraft (20 N) und bei einer Geschwindigkeit von 0,25 m/s.

Bei den Original-Pappen zeigten sich unter den Testbedingungen ein deutlich ausgeprägter Materialabrieb sowie stabile Reibwerte. Bei der ESD-Pappe hingegen kam es im Kontakt „Pappe gegen Pappe“ zu einem schnellen strukturellen Versagen der Proben – insbesondere durch Ablösen von Einzelschichten. Auch im Kontakt mit der Stahlkugel war das Abriebverhalten problematisch: Die Carbonfasern scheinen die Adhäsion der Schichten unter dynamischer Belastung zu beeinträchtigen, was zu Schichtablösungen führt, obwohl die Gleitreibung selbst vergleichsweise gering blieb. Die Erkenntnis zeigt, dass die modifizierte Pappe unter Reibbeanspruchung empfindlicher auf Scherkräfte reagiert und dass mögliche Anwendungen mit hoher Relativbewegung oder abrasivem Kontakt gesondert geprüft werden müssen.

### Brandverhalten

Eine potenzielle Schwäche neuartiger Materialformulierungen ist ein verändertes Brandverhalten durch die Zugabe nicht-organischer Bestandteile. Um dies auszuschließen, wurde das Entzündungsverhalten beider Materialvarianten in Anlehnung an DIN EN 60695-11-10 geprüft. Die Proben wurden dabei unter einem Winkel von 45° beflammt, die Beflammungsdauer betrug max. 10 Sekunden oder bis zum selbstständigen Brand. Die Proben wurden nach 30 Sekunden gelöscht und das Nachglimmen und eventuelles Weiterbrennen wurden dokumentiert.

Beide Pappvarianten – sowohl die Original- als auch die mit Carbonfasern modifizierte ESD-Pappe – zeigten ein vergleichbares Verhalten: Nach kurzer Flammenausbildung erlosch der Brand von selbst, ohne dass ein signifikantes Nachglimmen beobachtet wurde. Die Carbonfaserbeimischung führte weder zu einer Beschleunigung noch zu einer Intensivierung der Flammenentwicklung. Das Brandverhalten bleibt damit im Rahmen der sicherheitstechnischen Anforderungen für Transportverpackungen unverändert.



Abbildung 2: Ergebnisse der Brandtests (links: Standardpappe (Original + 3 Proben); rechts: ESD-Pappe (3 Proben + Original))

## Homogenität / Faserverteilung

Mikroskopische Untersuchungen (50x- und 175x-Vergrößerung) zeigten, dass die Carbonfasern in der Pulpe weitgehend gleichmäßig verteilt sind: Auf der Oberfläche bilden sie ein dichtes Netz, während im Querschnitt die Fasern überwiegend in Längsrichtung der Pappe angeordnet sind. Ein echtes 3D-Leitungsnetzwerk ist im Kernbereich nicht vorhanden, aber durch die Schichthomogenität entsteht ausreichend Kontakt entlang der Lagen, um die geforderte Volumenleitfähigkeit sicherzustellen.

### Homogenität (Faserverteilung)

Ergebnisse - Oberfläche

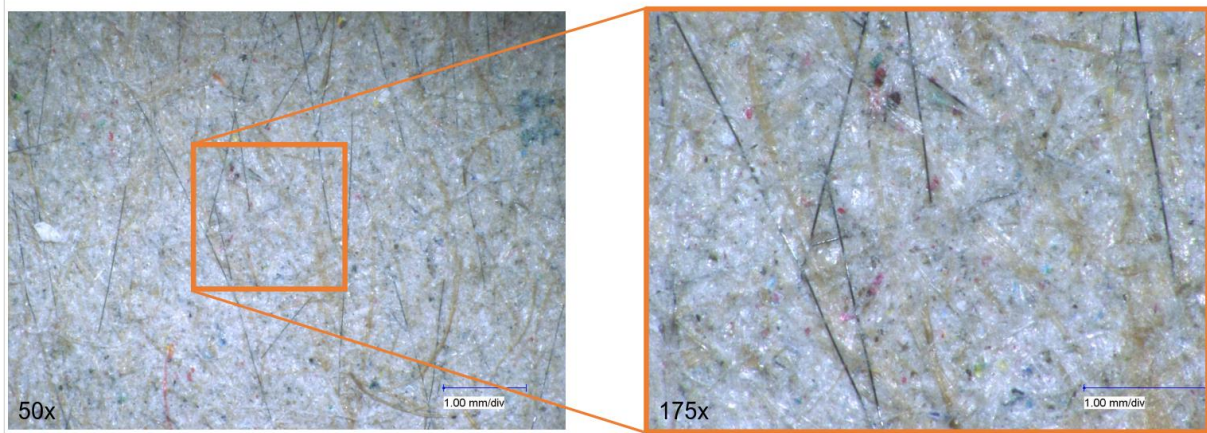


Abbildung 3: Mikroskopaufnahmen der Carbonfaser-Verteilung an der Oberfläche

### Homogenität (Faserverteilung)

Ergebnisse - Oberfläche (Vergleich original (links) vs. ESD (rechts))

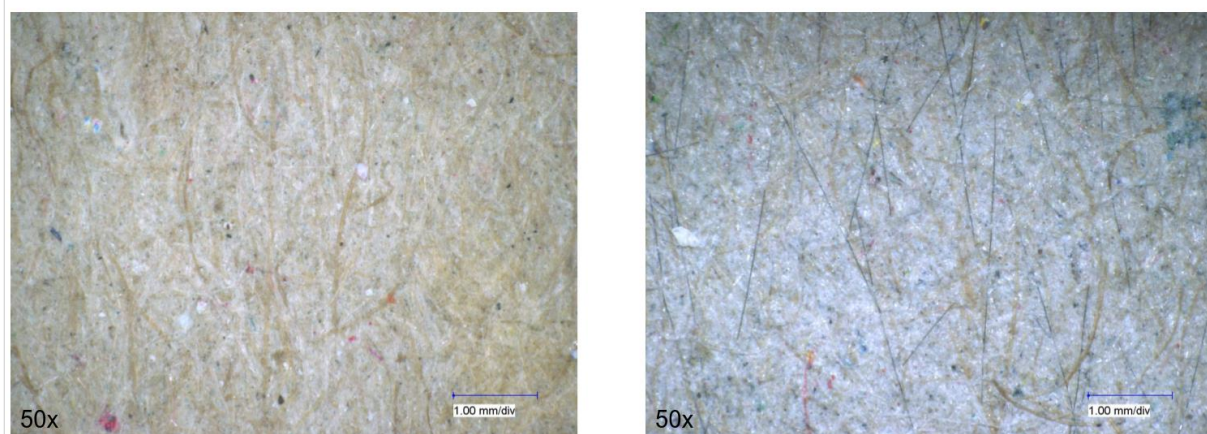


Abbildung 4: Mikroskopaufnahmen: Vergleich Standardpappe vs. ESD-Pappe

### **Zusätzliche Beobachtung: Schichtverhalten im Querschnitt**

Im Zuge der physikalischen Untersuchungen wurde ergänzend eine mikroskopische Analyse der Querschnittsstruktur durchgeführt. Während bei der Original-Pappe die Einzelschichten visuell eine gute Kohärenz und Haftung zeigen, war bei der ESD-Pappe eine erhöhte Tendenz zur Delamination erkennbar. Dies zeigte sich insbesondere bei mechanischer Beanspruchung, z. B. bei den Reibversuchen, aber auch im unbeanspruchten Zustand unter dem Mikroskop. Die Carbonfasern scheinen die Haftung zwischen den Lagen punktuell zu stören, was vor allem bei starker lokaler Belastung kritisch werden kann. Für Anwendungen mit geringen Belastungen oder bei zusätzlicher Fixierung (z. B. durch Kaschierung oder Klebung) ist die Schichtstruktur jedoch ausreichend stabil.

## **2.4 Mechanische Eigenschaften**

Im Rahmen des Projekts wurden systematisch mechanische Kennwerte der ESD-fähigen Vollpappe mit denen der konventionellen, nicht-additivierten Pappe verglichen. Die Untersuchungen umfassen Druck-, Zug- und Biegeversuche, jeweils nach einschlägigen Normen, um sowohl tragfähigkeitsbezogene als auch duktilitätsbezogene Eigenschaften zu erfassen. Ziel war es, mögliche Einflüsse der Carbonfasern auf Steifigkeit, Festigkeit und Schichthaftung zu quantifizieren und daraus Rückschlüsse auf Anwendungsgrenzen zu ziehen.

Insgesamt belegen die mechanischen Untersuchungen, dass die Zug- und Biegefestigkeit der ESD-Pappe signifikant geringer sind als bei nicht-additiverter Pappe, während die Druckfestigkeit nahezu gleichbleibt. Die Delaminationstendenzen legen nahe, dass für spätere Anwendungen eine zusätzliche Optimierung der Schichthaftung (z. B. über Binder oder Kaschierungen) notwendig ist.

### **Druckeigenschaften**

Für die Bestimmung der Druckfestigkeit kamen quadratische Proben zum Einsatz, die in einem Universalprüfgerät mit einer Stahlkugel (Durchmesser 17,45 mm) und einer Vorkraft von 5 N gedrückt wurden. Die Prüfgeschwindigkeit betrug 5 mm/min, und der Versuch wurde bei Erreichen einer Prüfkraft von 2.000 N abgebrochen.

Im Vergleich zur Original-Pappe verläuft die Kurve der ESD-Pappe weitestgehend identisch. Es zeigen sich keine signifikanten Änderungen in Steifigkeit oder Tragfähigkeit, sodass die Druckfestigkeit des Verbundwerkstoffs unverändert beibehalten wurde.

### **Zugeigenschaften**

Die Zugfestigkeit wurde anhand genormter Prüflinge im Format 15 × 250 mm<sup>2</sup> gemessen. Die Prüfgeschwindigkeit betrug 20 mm/min bei einer Vorkraft von 10 N, gemäß DIN EN ISO 1924-2. In den Tests wurden Dehnung, Bruchspannung und Steifigkeit ermittelt.

*Ergebnis Original-Pappe:* Die durchschnittliche Bruchspannung betrug ca. 24,4 MPa bei einer Dehnung von etwa 3%. Die Steifigkeit wurde mit rund 2.500 MPa erfasst.

*Ergebnis ESD-Pappe:* Das Carbonfasernetzwerk reduziert signifikant die mechanische Kohäsion. Die gemessene Bruchspannung liegt im Mittel bei etwa 9,4 MPa (2,6-mal niedriger), und die Steifigkeit beträgt rund 1.100 MPa (2,3-mal geringer). Die Dehnung bis zum Bruch bleibt mit rund 3% vergleichbar, jedoch ist die Streuung der Werte durch Delaminationsphänomene erhöht.

### **Biegeeigenschaften**

Die Biegefestigkeit wurde in einem 3-Punkt-Biegeversuch ermittelt (Stützweite 64 mm, Prüfling  $15 \times 80 \text{ mm}^2$ , Vorkraft 2 N, Prüfgeschwindigkeit 5 mm/min). Untersucht wurden sowohl der Biegemodul als auch die Bruchspannung unter Biegung.

*Ergebnis Original-Pappe:* Die Original-Pappe wies eine durchschnittliche Bruchspannung von etwa 19 MPa auf, bei einer Steifigkeit von ca. 2.400 MPa und einer Dehnung von etwa 2%. Delaminationen traten selten auf und waren meist Folge extremer Randbelastung.

*Ergebnis ESD-Pappe:* Die Biegemodul- und Spannungswerte sind deutlich reduziert: Die Bruchspannung beträgt im Mittel ca. 12 MPa (1,6-mal kleiner), und die Steifigkeit liegt bei rund 1.500 MPa (1,6-mal geringer). Hinzu kommt eine ausgeprägtere Neigung zur Delamination unter Biegebeanspruchung, was zu frühzeitigem Versagen einzelner Schichten führt.

#### **Biegeeigenschaften**

##### Methode

- 3-Punkt-Biegeversuch
- Vorkraft: 2 N
- Prüfgeschwindigkeit: 5 mm/min
- Stützweite: 64 mm
- Prüflinge: 15 mm x 80 mm

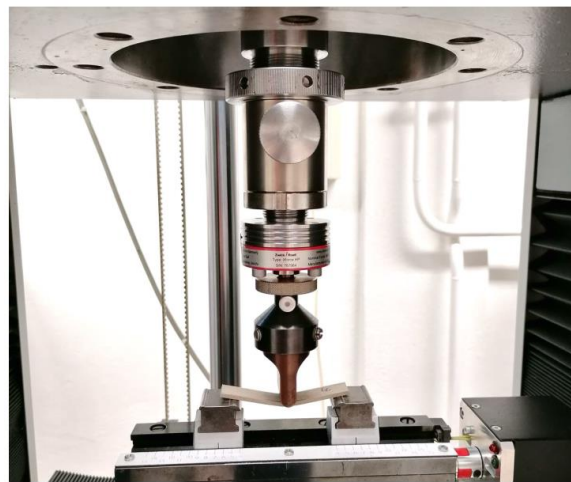


Abbildung 5: Methode zur Ermittlung der Biegeeigenschaften

## 2.5 Verarbeitbarkeit - Klassische Umformverfahren

→ siehe Bericht des Projektpartners

## 2.6 Verarbeitbarkeit - Freiform-Verfahren

Das Freiform-Verfahren wurden entwickelt, um aus der ESD-fähigen Vollpappe dreidimensionale, formstabile Bauteile, wie Transporttrays oder Einlagen zu erzeugen. Im Projekt wurden dabei gezielt zwei Ansätze verfolgt:

- Umformbarkeit in 2D
- Umformbarkeit in 3D, sowohl mit Stempel/Gesenk als auch mittels Vakuumtiefziehen

Im Fokus stand jeweils die Untersuchung, ob die additivierten Papp-Halbzeuge bei nassem und bei trockenem Materialzustand ausreichend plastisch verformbar sind, welche maximalen Umformgrade erzielt werden können und inwieweit nachfolgende Schichthaftung bzw. Formhaltigkeit vorliegt.

### Umformbarkeit - 2D

Zunächst wurden 2D-Biegetests mit einer formgebenden Pressform durchgeführt, bei der Proben mit inneren Radien zwischen 1,5 und 18 mm und äußeren Radien zwischen 4,5 und 21 mm umgeformt wurden. Die Pappeproben wurden dabei sowohl im trockenen als auch im nassen Zustand in die Pressform eingelegt und anschließend in die Form gedrückt. Dann erfolgte eine Bewertung der Rückfederung und der Formstabilität.

*Ergebnis Trockenzustand:* Nach Entnahme aus der Form zeigten beide Varianten nahezu vollständige Rückfederung; die resultierende Restplastizität war vernachlässigbar, da das trockene Material sehr spröde reagierte.

*Ergebnis Nasszustand:* Die nasse Pappe ließ sich deutlich leichter umformen und behielt nach Entnahme und Trocknung in der Form den eingestellten Krümmungsradius bei. Damit wurden sehr enge, innere Radien von 1,5 mm reproduzierbar realisiert, ohne dass die Decklage riss.

Für die sich anschließenden Untersuchungen zum 3D-Umformen wurde ein Kantenradius der Stempel und Gesenke von 9 mm gewählt.

## Umformbarkeit - Freiformen - 2D

### Methode

Pressform für unterschiedliche Radien; Einlegen von Probekörpern und belassen bis trocken

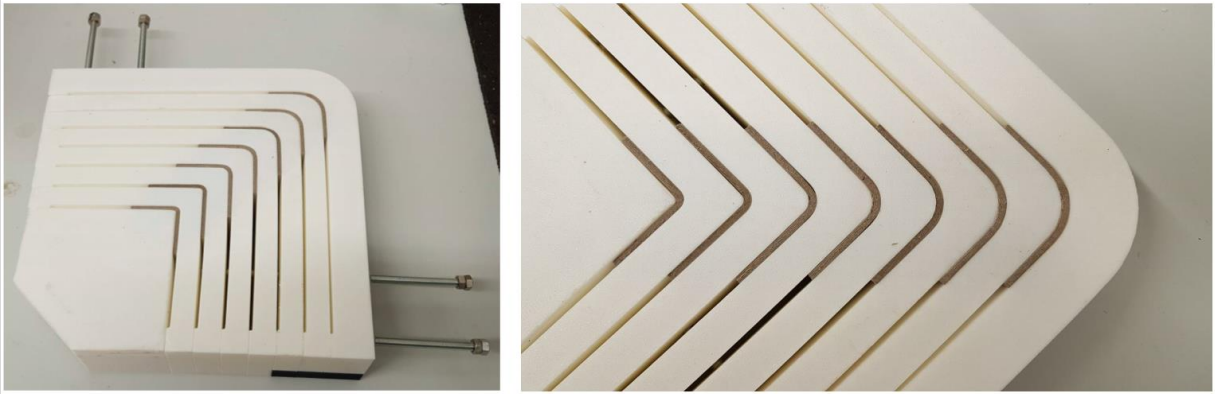


Abbildung 6: Vorrichtung zur Ermittlung unterschiedlicher, möglicher Biegeradien für das Freiformen in 2D-Richtung

## Umformbarkeit - Freiformen - 2D

### Ergebnis - ESD-Pappe; nass

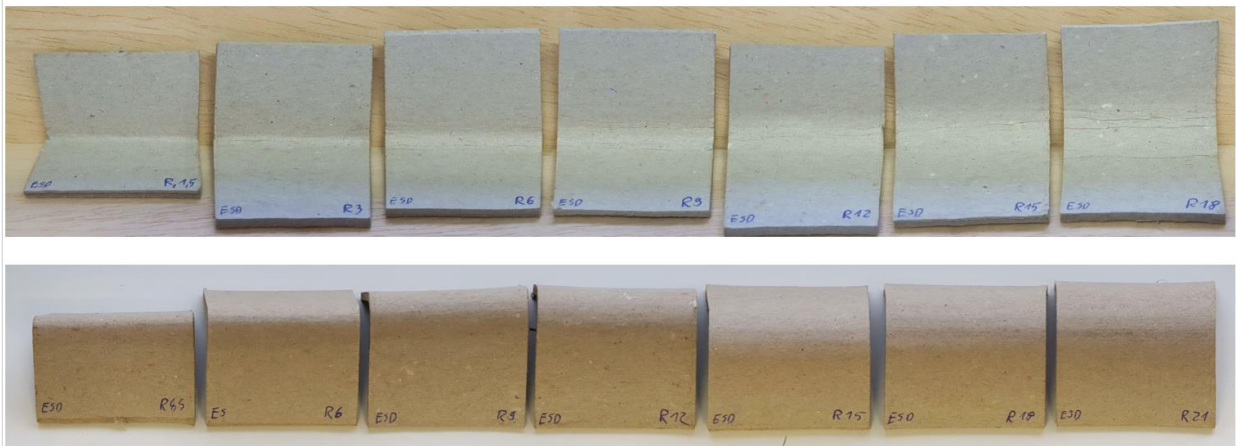


Abbildung 7: mögliche Biegeradien (innen und außen) an Pappe (hier exemplarisch: ESD-Pappe, nass umgeformt)

## Umformbarkeit - Freiformen - 2D

### Rückverformung bzw. Formstabilität - Vergleich



Abbildung 8: Formstabilität bei verschiedenen Umformtechniken und Materialien

## Umformbarkeit - 3D - Verfahren „Stempel und Gesenk“

Für die Ermittlung der maximalen Eindringtiefe unter realitätsnahen 3D-Bedingungen wurden Pappe-Proben (Kantenmaße 315 x 315 mm<sup>2</sup>) mit Stempeln variablen Durchmessers (50 mm, 100 mm, 150 mm, 180 mm) umgeformt. Dabei wurden sie in einem eigens gefertigten Gesenk (flexibles Bauteil aus Holz, 3D-Druck, Metall und Plexiglas) gehalten. Die Proben wurden jeweils trocken und nass umgeformt, und zwar jeweils unter den gleichen Bedingungen (Prüfgeschwindigkeit 60 mm/min und Vorkraft 5 N).

## Umformbarkeit - Freiformen - 3D

### Methode I: Stempel und Gesenk

- Gesenk als Halterung für Pappebögen (befestigt an Prüfmaschine bzw. Presse)
- Eindringen eines Stempels von oben
- Stempel-Ø: 50 mm, 100 mm, 150 mm und 180 mm (Außenradius jeweils 9 mm)
- Prüfgeschwindigkeit: 60 mm/min
- Vorkraft: 5 N
- Drücken einer Probe bis zur Zerstörung
- Ermittlung der maximalen Eindringtiefe ohne Zerstörung aus den Messwerten
- Wiederholung bis knapp unter die maximale Eindringtiefe

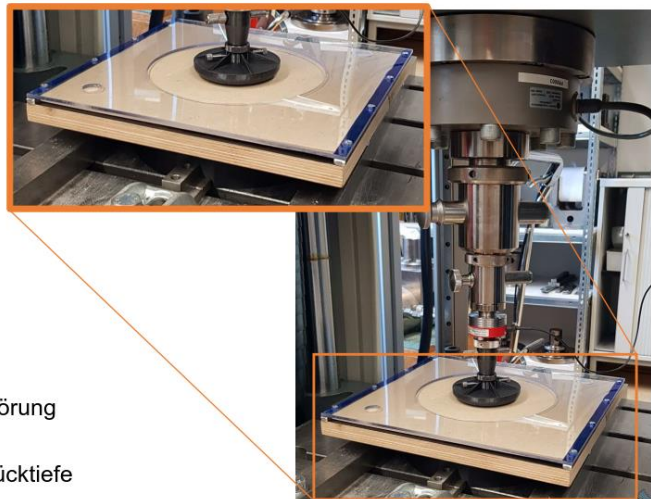
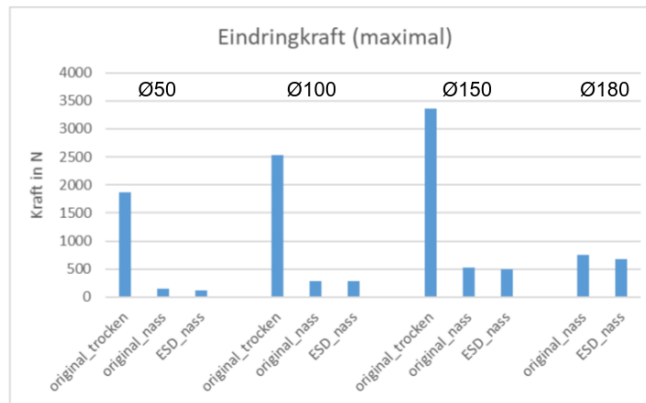


Abbildung 9: Aufbau zum Freiformen mit Stempel und Gesenk

**Ergebnis Trockenzustand:** Die Eindringtiefe war relativ gering, da das trockene Material eher spröde reagiert, wenig „nachfließt“ und Risse an der Decklage auftraten.

## Umformbarkeit - Freiformen - 3D

### Ergebnis – Auswertung



- Eindringkraft „trocken“ sehr viel größer als „nass“
- Eindringkraft nimmt mit zunehmendem Stempeldurchmesser zu

Abbildung 10: Eindringkräfte bei verschiedenen Proben-Zuständen

**Ergebnis Nasszustand:** Die nasse ESD-Pappe ließ sich signifikant tiefer in die Matrize drücken, wobei deutlich geringere Kräfte als im trockenen Zustand benötigt wurden. Nach Trocknung in der Form blieb durchschnittlich 77% der ursprünglichen Eindringtiefe erhalten, während Proben, die erst nach Entnahme getrocknet wurden, fast vollständig zurückfederten. Die Ergebnisse zeigten eine konsistente Umformbarkeit über alle Stempeldurchmesser.

## Umformbarkeit - Freiformen - 3D

### Ergebnis (Auswahl)

Pappe; nass; Stempel 180 mm

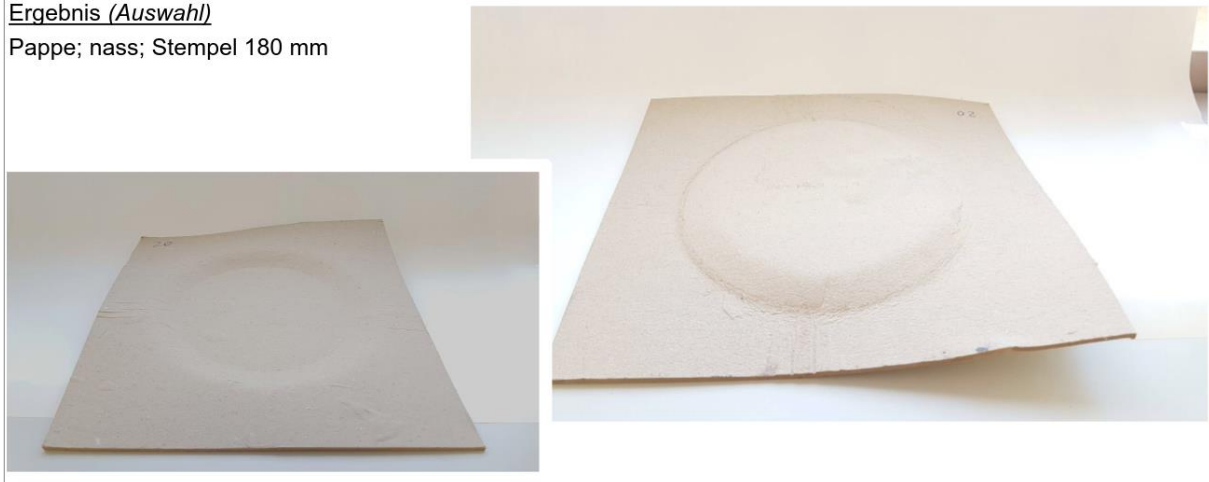


Abbildung 11: Ergebnis (Beispiel) des Freiformens mit Stempel und Gesenk

### Umformbarkeit - Freiformen - 3D

Ergebnis - Pappe; nass; Stempel 180 mm

Vergleich „entnommen und getrocknet“ vs. „in der Form getrocknet“

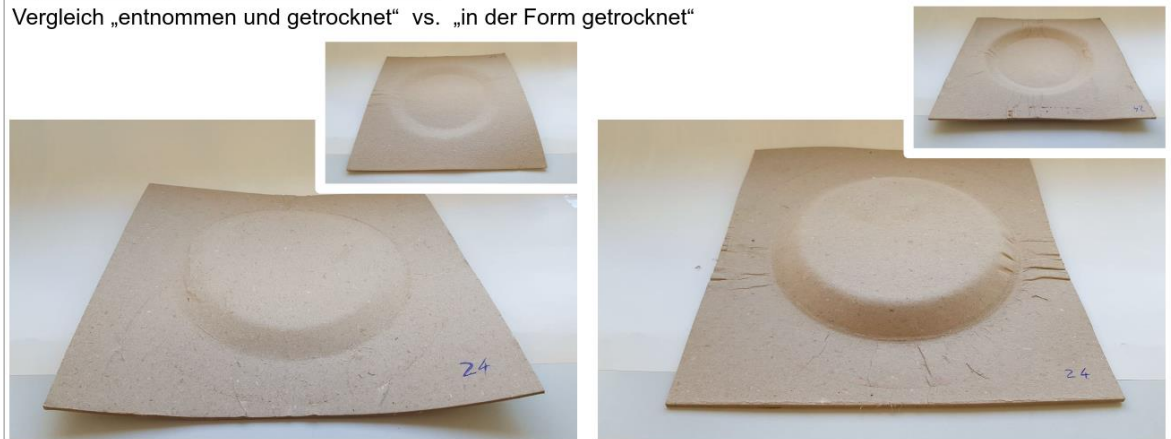
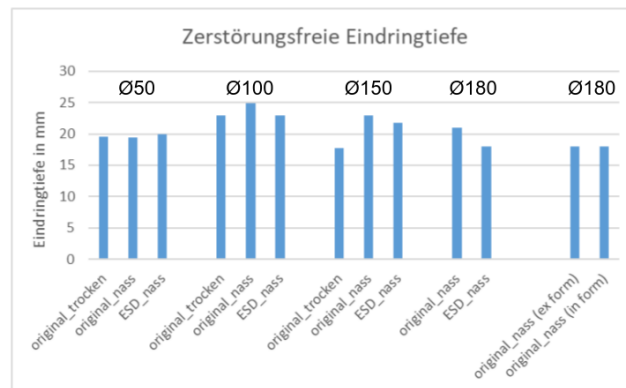


Abbildung 12: Vergleich zweier Trocknungsvarianten

### Umformbarkeit - Freiformen - 3D

Ergebnis – Auswertung



- Zerstörungsfreie Eindringtiefe praktisch unabhängig vom Zustand und der Stempelgröße

Abbildung 13: mögliche Eindringtiefe bei verschiedenen Probenvarianten

### Umformbarkeit - 3D - Vakuumformverfahren

Im zweiten Ansatz wurden nasse Pappebögen auf eine Positiv-Matrize gelegt und in einen Vakuumbutel eingebracht. Durch Anlegen eines Unterdrucks konnte die Pappe spielfrei an die Kontur gezogen werden. Insgesamt wurden über 25 Varianten getestet, um den Einfluss von Materialdicke, Feuchtegrad und Matrizengeometrie zu untersuchen.

*Ergebnis Umformgrad:* Das Vakuumformen ermöglichte den höchsten Umformgrad ohne Rissbildung an der Decklage. Komplexe Formen mit Mulden und Ausnehmungen wurden reproduzierbar hergestellt, wobei die Oberflächenqualität insbesondere an scharfen Kanten besser war als beim Stempel/Gesenk-Verfahren.

*Vergleich Original vs. ESD-Pappe:* Es zeigten sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Varianten im nassen Zustand. Die ESD-Pappe verhielt sich wie das unadditivierte

Original, da Carbonfasern im Fasernetzwerk die Umformfähigkeit nicht negativ – allerdings auch nicht, wie erhofft, positiv – beeinflussen.

### Umformbarkeit - Freiformen - 3D

#### Methode II: Vakuumformen

- Erstellen einer Matrize mit Positiv-Formen
- Auflegen eines nassen Pappebogens auf diese Formen
- Verbringen der Anordnung in einen Beutel mit Ventil
- Anlegen eines Unterdruckes



Abbildung 14: Aufbau zum Freiformen mittels Vakuumformen

### Umformbarkeit - Freiformen - 3D

#### Ergebnis

\* Resttiefe beträgt 83% der Ursprungstiefe

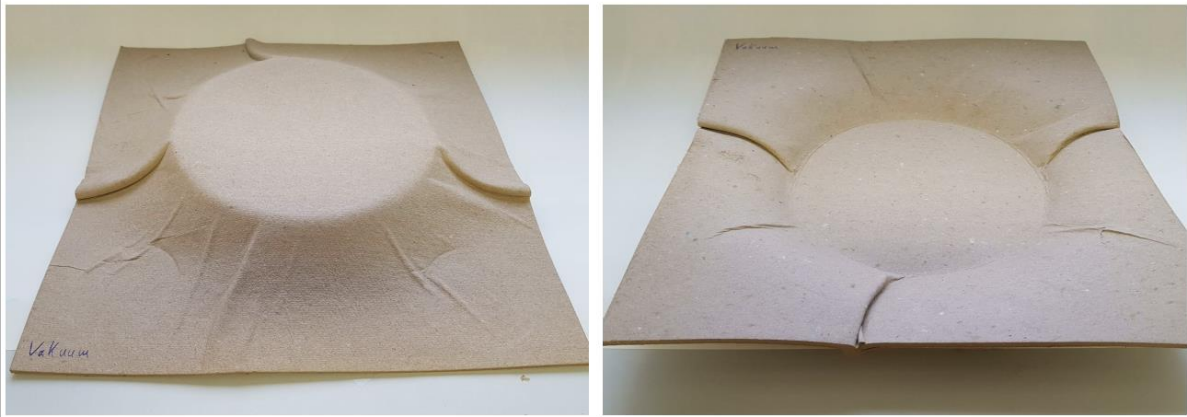


Abbildung 15: Ergebnis des Freiformens mittels Vakuum

### Schlussfolgerung und Ausblick

Die Ergebnisse der Freiform-Verfahren belegen, dass die ESD-fähige Pappe im nassen Zustand eine vergleichbare Umformbarkeit wie die Original-Pappe aufweist und nach Trocknung in der Form eine ausreichende Formhaltigkeit erzielt. Vakuumformen erweist sich dabei als das technisch vorteilhafteste Verfahren, da der höchste Umformgrad bei guter Oberflächenqualität erreicht wird.

Kritisch bleibt jedoch die Schichthftung: Die Delaminationsneigung der ESD-Pappe unterstreicht die Notwendigkeit, in zukünftigen Materialgenerationen die Faserkohäsion zu

optimieren (z. B. durch gezielten Bindereinsatz oder angepasste Temperatur- o. Feuchtführung). Insgesamt ermöglichen die Freiform-Verfahren die Herstellung komplexer, dreidimensionaler ESD-Behälter und Einlagen, die hinsichtlich ihrer elektrischen Eigenschaften sowie Formstabilität in realen Logistikszenerarien unmittelbar einsetzbar sind.

## 2.7 Prototypen

→ siehe auch Bericht des Projektpartners

Im letzten Schritt wurden aus den entwickelten ESD-Pappe-Halbzeugen funktionsfähige Prototypen gefertigt, um die Praxistauglichkeit hinsichtlich ESD-Eigenschaften, mechanischer Stabilität und Handhabbarkeit zu überprüfen. Dabei differenzierte das Projekt zwischen zwei Prototypenkategorien:

- klassische Umformprototypen als KLT und
- freiform-gefertigte Transporttrays.

### Freiform-Prototypen (Transporttrays)

Parallel wurden Freiform-Transporttrays konzipiert, um elektronische Bauteile formangepasst aufzunehmen. Basierend auf den Ergebnissen aus den 2D- und 3D-Umformversuchen (siehe Punkt 2.6) wurde ein mehrstufiger Ablauf gewählt: Zuschnitt der ESD-Pappe-Bögen, kontrollierte Befeuchtung bis zur Sättigung, Umformung mittels Vakuumformen und abschließende Trocknung im Werkzeug.

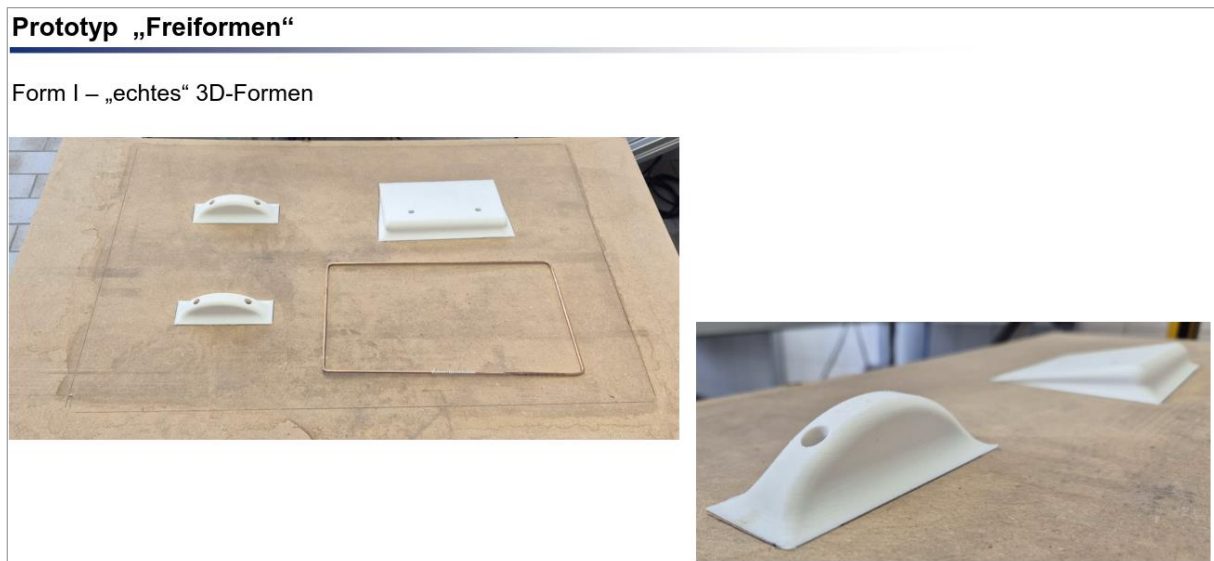
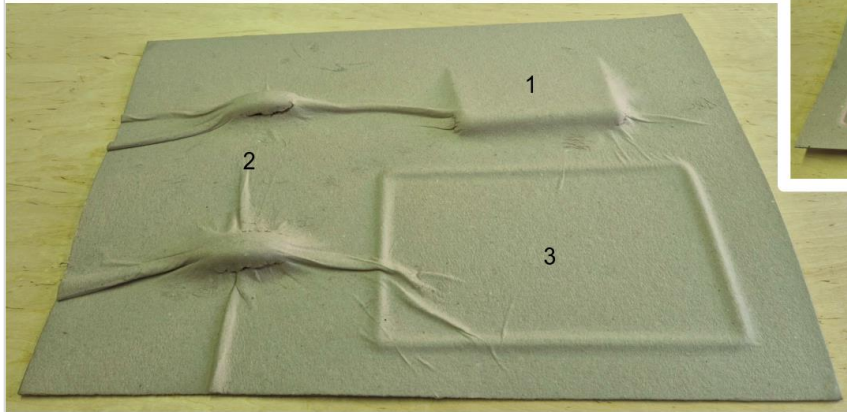


Abbildung 16: Negativ-Form (hier: Holzplatte + 3D-Druck + Draht); sehr flexibel; frei gestaltbar

## Prototyp „Freiformen“

Form I – „echtes“ 3D-Formen



- 1 – Bereich zur Kistenaufnahme
- 2 – Bereich zur Bauteilaufnahme
- 3 – Montagebereich

Abbildung 17: Prototyp "echtes 3D-Formen"

## Prototyp „Freiformen“

Form I – „echtes“ 3D-Formen

passgenau für Eurobehälter  
(600 x 400 mm<sup>2</sup>) als Unterbau

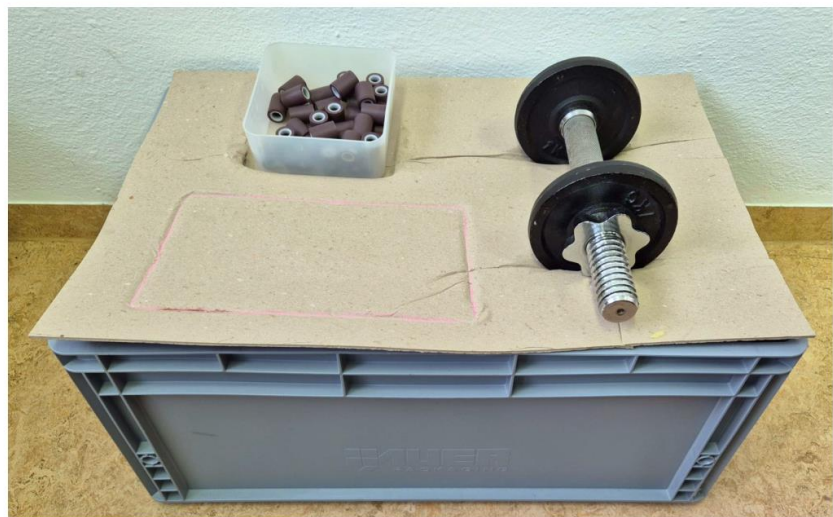


Abbildung 18: Prototyp "echtes 3D-Formen" mit Unterbau

Als „echtes 3D-Formen“ wird im Projekt eine Verfahrensvariante bezeichnet, bei der das Pappe-Halbzeug direkt und ohne weitere Bearbeitung auf die Matrize gelegt wird. Das Verfahren ist schnell, hat aber Grenzen bei Umformgraden und Umformradien (siehe Abbildungen oben).

„Unterstütztes 3D-Formen“ funktioniert ähnlich, allerdings wird hier das Halbzeug durch gezieltes Schlitzten und Ausstellen auf die eigentliche Umformung vorbereitet. Auf diese Weise lassen sich höhere Umformgrade und geringe Radien realisieren.

## Prototyp „Freiformen“

Form II – unterstütztes 3D-Formen

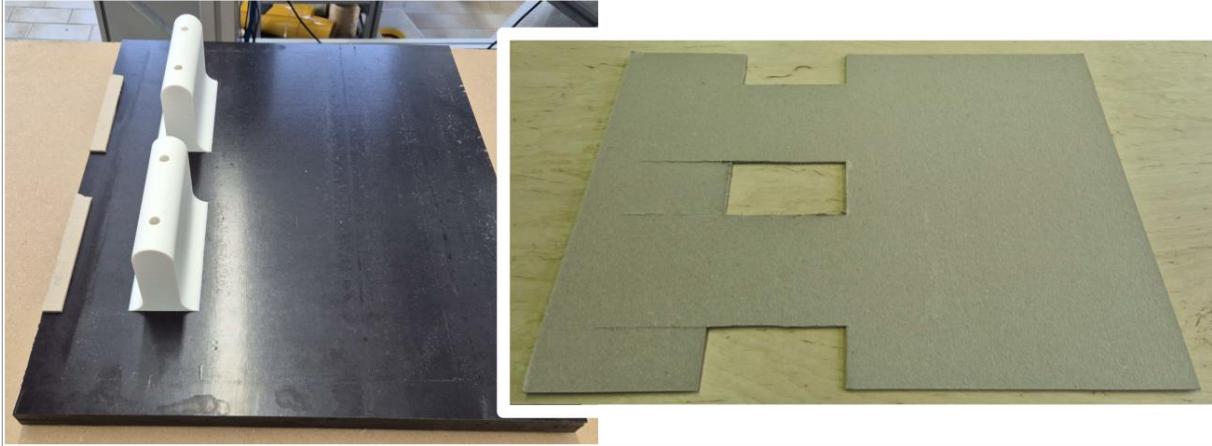


Abbildung 19: Negativ-Form (hier: Holzplatte + 3D-Druck); sehr flexibel; frei gestaltbar; Halbzeug muss geschlitzt bzw. ausgeklinkt werden

## Prototyp „Freiformen“

Form II – unterstütztes 3D-Formen

saubere, tiefe Taschen möglich; Nutzung der hohen 2D-Umformgrade

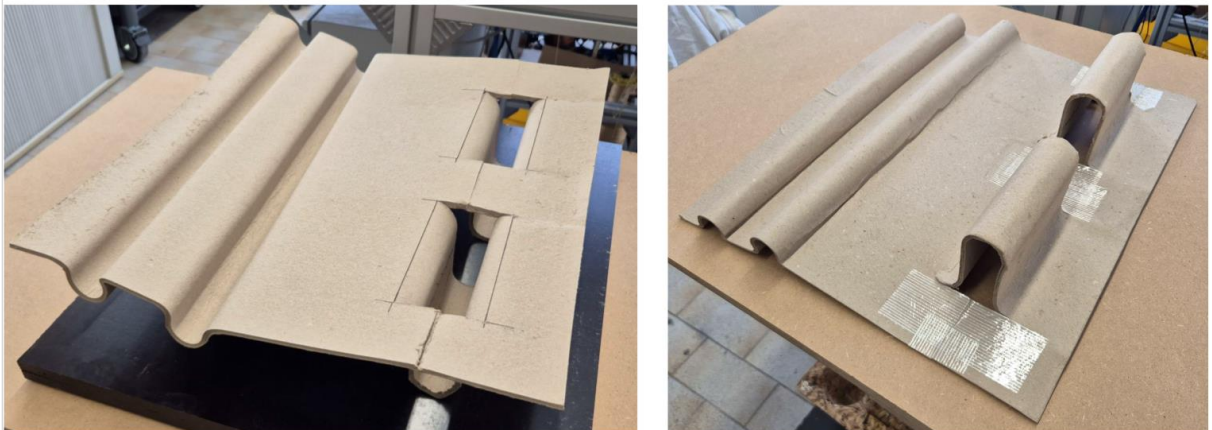


Abbildung 20: Prototyp "unterstütztes 3D-Formen"

## Gesamtfazit Prototypen

Beide Prototypenkategorien (klassische KLT und Freiform-Trays) erfüllen die primären Anforderungen hinsichtlich ESD-Schutzes, mechanischer Robustheit und Formbarkeit. Klassische Umformverfahren lassen sich nahtlos in bestehende Produktionslinien integrieren und garantieren sofort einsatzfähige ESD-KLT. Freiform-Verfahren über Stempel/Gesenk und Vakuum bieten zusätzliche Freiheit in der Tray-Gestaltung und ermöglichen maßgeschneiderte Bauteilaufnahmen. Die nachgewiesene Formhaltigkeit und elektrische Leitfähigkeit belegen das Potenzial für den industriellen Einsatz in der Elektroniklogistik. Empfehlungen zur Optimierung der Schichthftung liegen vor, um die Langzeitlebensdauer weiter zu steigern.

## 2.8 Ökologische Betrachtungen / Recyclebarkeit

→ siehe auch Bericht des Projektpartners

### Betrachtungsobjekte

	KLT	Schachtel
Eigengewicht	1,22 kg	0,866 kg
Deckel?	nein	nein
Maße	400 x 300 x 147	400 x 300 x 147
max. Zuladung	20 kg	15 kg
ESD-geeignet?	ja	ja
Grundwerkstoff	95% Polypropylen	97% Altpapier
Additiv	5% Leitruß (Carbon Black)	3% Carbonfasern

Abbildung 21: gewählte Objekte der ökologischen Betrachtung

### Funktionelle Einheit

Als Funktionelle Einheit wird der Transport von 300 kg ESD-sensitiver Nutzlast angenommen. Gemäß der maximalen Zuladung der Varianten (vgl. Abbildung 21) sind dazu 15 Kunststoff-KLT bzw. 20 Pappe-KLT nötig.

### Ökologische Betrachtung und Vergleich

Unter den gegebenen Rahmenbedingungen erweist sich der Pappe-KLT in der Ökobilanz als deutlich vorteilhafter. Bereits in der Herstellungsphase liegen die CO<sub>2</sub>-Emissionen pro Pappe-KLT bei rund 1,67 kg CO<sub>2</sub>e, während ein PP-KLT etwa 4,12 kg CO<sub>2</sub>e verursacht. Für die funktionelle Einheit von 300 kg Zuladung benötigt man 20 Pappe-KLTs, was in Summe zu gut 33,4 kg CO<sub>2</sub>e führt. Im Vergleich dazu verlangt die Produktion von 15 PP-KLTs bereits knapp 61,7 kg CO<sub>2</sub>e. Dieser Unterschied ist letztlich auf den geringeren Materialaufwand (0,6 kg Pappe vs. 1,4 kg PP) sowie auf den niedrigeren Energiebedarf im kartonbasierten Herstellprozess zurückzuführen.

In der Nutzungsphase, in der beide Varianten über lange Transportstrecken (Annahme: 5.000 km Seefracht + 500 km Binnentransport) ihre Emissionen generieren, bleibt der Pappe-KLT erneut im Vorteil. Für 300 kg Zuladung summieren sich seine CO<sub>2</sub>-Emissionen auf etwa 292,3 kg CO<sub>2</sub>e, während die PP-Variante circa 317,6 kg CO<sub>2</sub>e an Emissionen verursacht. Grund hierfür ist das etwas höhere Gesamtgewicht der PP-Lösung (339 kg vs. 312 kg), das den Seefracht- und Lkw-Transport belastet. Selbst bei Berücksichtigung möglicher Variationen bei Ladevolumen und Logistik bleibt der Pappe-Behälter in dieser Phase ökologisch günstiger, da er leichter ist und weniger Rohstoffe pro Einheit erfordert.

Beim End-of-Life-Management ergibt sich ebenfalls ein Vorteil für die Pappe-KLT-Lösung. Selbst unter konservativen Annahmen, wonach pro Pappe-KLT 0,7 kg CO<sub>2</sub>e „Gutschrift“ durch Altpapierrecycling erzielt werden, ergibt sich für 20 Schachteln eine Gutschrift von insgesamt 14 kg CO<sub>2</sub>e. Würde man die Kartons dagegen thermisch verwerten, lägen die Emissionen nur

bei 12 kg CO<sub>2</sub>e insgesamt. Im Gegensatz dazu kann der PP-KLT, abhängig vom Recyclinggrad, zwischen -31,5 kg und -42 kg CO<sub>2</sub>e (bei bestmöglichem Recycling) an Gutschrift erzielen oder aber beim Verbrennen mit 35,7 bis 52,5 kg CO<sub>2</sub>e belasten. Doch selbst wenn der PP-KLT werkstofflich recycelt würde, lässt sich sein Vorteil nicht komplett gegen den niedrigeren Papp-Wert ausgleichen, weil die Recyclinggutschrift von nur 14 kg CO<sub>2</sub>e für die Karton-Variante weniger schwankt und die Herstellungs- und Transportemissionen niedriger bleiben.

In der Gesamtbilanz – unter Berücksichtigung aller Phasen von der Herstellung über den Transport bis hin zur Entsorgung – kommt der Papp-KLT auf etwa 311,7 kg CO<sub>2</sub>e (inklusive Recycling), während der PP-KLT trotz ebenfalls guter Recyclinggutschriften auf mindestens 337,3 kg CO<sub>2</sub>e (und im ungünstigen Fall bis zu 347,8 kg CO<sub>2</sub>e) kommt. Entscheidet man sich für eine thermische Verwertung, beträgt der Vergleichswert für Papp rund 337,7 kg CO<sub>2</sub>e, während der PP-KLT bei 414 bis 431,8 kg CO<sub>2</sub>e liegt. Das heißt, selbst im Szenario schlechterer Recyclingquoten liegt der Papp-KLT um etwa 25 bis über 90 kg CO<sub>2</sub>e unter dem Kunststoffbehälter.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass der Papp-KLT aufgrund seines geringeren Material- und Energieaufwands in der Herstellung, des niedrigeren Transportgewichts und der relativ stabilen Recyclingbilanz klar ökologisch überlegen ist, wenn es um den einmaligen oder auch mehrfachen Transport von 300 kg Zuladung geht. Insbesondere dann, wenn nur moderate Wiederbenutzungszyklen stattfinden und eine zuverlässige Altpapier-Erfassung gewährleistet ist, bietet die papierbasierte Lösung eine robuste, ressourcenschonende Alternative.

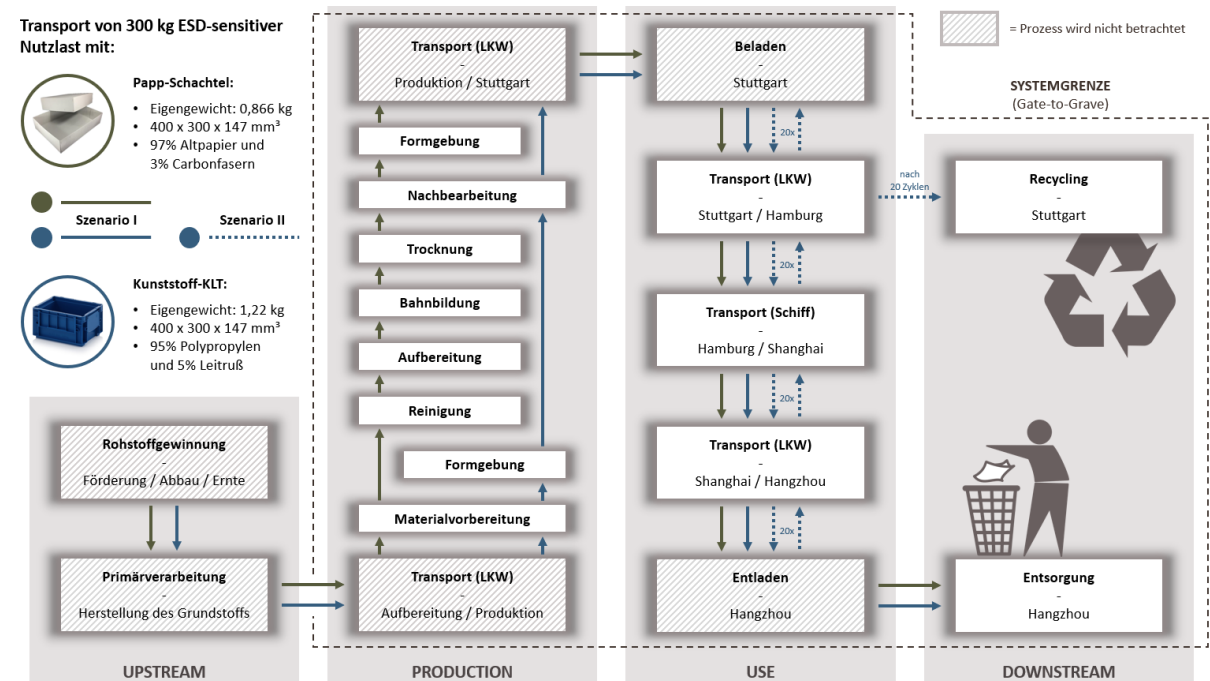


Abbildung 22: Zusammenfassung: Lebenszyklus beider KLT-Varianten

### 3 Verwertungsplan

Im Verwertungsplan werden die ermittelten Nutzenpotenziale für die Wissenschaft und die Industrie dargelegt, die Strategien zur Realisierung dieser Potenziale beschrieben sowie der zeitliche Ablauf der nächsten Schritte skizziert. Dabei sind wissenschaftliche und wirtschaftliche Aspekte getrennt voneinander betrachtet, um eine klare Zuordnung der jeweiligen Verwertungswege zu ermöglichen.

#### 3.1 Nutzen für Industrie und Forschung

##### Wissenschaftlicher Nutzen

- **Methodische Erweiterung der Prüfprogramme:**  
*Die im Projekt entwickelten Prüfprotokolle für ESD-Messungen unter klimatisierten Bedingungen sowie die kombinierten mechanischen Untersuchungen (Druck, Zug, Biegung) bilden einen reproduzierbaren Standard, der auf vergleichbare Projekte übertragen werden kann. Forschergruppen, die sich mit leitfähigen Papierverbunden oder Recycling-Werkstoffen befassen, profitieren von erprobten Messmethoden und können die Benchmark-Daten als Referenz einsetzen.*
- **Interdisziplinäre Kooperation:**  
*Die enge Zusammenarbeit zwischen PAKA (Materialentwicklung) und der TU Chemnitz (Verarbeitungstechnik) hat methodische und konzeptionelle Synergien freigesetzt, die potenziell auf andere Forschungsprojekte aus dem Bereich der nachhaltigen Verpackungstechnik übertragen werden können. Die gewonnenen Erkenntnisse aus dem Austausch fördern den interdisziplinären Dialog zu additiven Papieranwendungen.*

##### Wirtschaftlicher Nutzen

→ siehe Bericht des Projektpartners

#### 3.2 Verwertungsstrategien

##### Wissenschaftliche Verwertungsstrategien

- **Publikationen in Fachzeitschriften**  
*Die Einreichung vertiefender Artikel ist geplant (z. B. zu "Langzeitverhalten von ESD-Pappe unter Feuchtigkeitszyklen"). Diese Publikationen sollen die methodischen Erkenntnisse und die Materialcharakterisierung einem breiten Fachpublikum zugänglich machen.*
- **Konferenzbeiträge**  
*Für einschlägige Veranstaltungen, wie den ESD-Kongress oder die VDI-Fachtagung Verpackungsindustrie werden Präsentationen zu den Themen "Freiform-Umformprozesse für leitfähige Pappe" und "Ökobilanzanalyse nachhaltiger ESD-Verpackungen" vorbereitet.*

- Abschlussarbeiten  
*Weiterführende Untersuchungen, wie z. B. Konzeptstudien zur Optimierung der Schichthftung oder Alternativen zu Carbonfasern (z. B. Metalldrähte, Graphen) könnten im Rahmen von Bachelor- oder Masterarbeiten bearbeitet werden.*
- Kooperationen mit Forschungseinrichtungen:  
*Das Projekt ermöglicht es der TU Chemnitz, sich in Forschungsnetzwerken bzgl. nachhaltiger Verpackungssysteme zu engagieren.*

### **Wirtschaftliche Verwertungsstrategien**

→ *siehe Bericht des Projektpartners*

## **3.3 Zeithorizont und nächste Schritte**

### **Wissenschaftlicher Zeithorizont**

- Q1/2025: Einbeziehung der Ergebnisse in die Lehre → Wissenstransfer
- Q2/2025: Vermarktung der entwickelten Prüfmethodik als Dienstleistung (Test der ESD-Fähigkeit von Kundenprodukten)
- Q2/2025: Ableiten tangierender Forschungsfelder, z. B. „Herstellung von Brennstoff aus Laub mittels Papierherstellungsverfahren“
- Q3/2025: Führen des Freiformverfahrens zur Marktreife und Unterstützung bei der Vermarktung des Verfahrens
- Q3/2025: Publikation der wesentlichen Projektergebnisse
- Q4/2025: Beginn einer koordinierten Projektanfrage im Rahmen des Förderprogramms ZIM, um Folgeuntersuchungen zu finanzieren

### **Wirtschaftlicher Zeithorizont**

→ *siehe Bericht des Projektpartners*

## 4 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Den Projektpartnern sind keine Veröffentlichungen oder ähnliche Informationen von dritter Seite bekannt geworden, die in irgendeiner Weise Einfluss auf die Durchführung des Vorhabens gehabt haben könnten. Bei fortwährenden Recherchen zum Stand von Forschung und Technik wurden weder wissenschaftliche Publikationen und Konferenzbeiträge noch Patente oder andere Schutzrechte gefunden.

Parallel wurde stets auch der Markt für ESD-Verpackungs- und Transportlösungen beobachtet. Hier wurden folgende Produkte im Projektzeitraum bekannt:

- „ESD Paper Bag“
  - Flachbeutel mit Seitennaht und selbstklebender Verschlusslasche
  - ESD-Spezialpapier, 100% Recyclingpapier, 70 g/m<sup>2</sup>
  - WEBER Verpackungen GmbH & Co. KG, Deutschland
  - Auf dem Markt seit: Herbst 2024
  - Relevanz: unklar  
(es ist nicht bekannt, wie die ESD-Eigenschaften realisiert werden; eine Musterbestellung ist erfolgt, liegt aber noch nicht für Analysen und Tests vor)
  
- Antistatisches Packpapier und Antistatische Vollpappe
  - Froeb-Verpackungen GmbH, Deutschland
  - Auf dem Markt seit: Frühjahr 2024
  - Relevanz: keine  
(Die ESD-Eigenschaften werden durch eine separate Beschichtung realisiert. Das Wirkungsprinzip ist damit gänzlich anders als bei der ESD-Pappe im Projekt.)

## 5 Verwendung der Zuwendung / wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

### 5.1 Gesamtkosten und Zuwendungsstruktur

Im Rahmen des Projekts erfolgte die Finanzierung über Zuwendungen des Bundes. Die beantragten Mittel i.H.v. 83.994,01 € wurden zzgl. der Projektpauschale von 16.798,80 € komplett ausgezahlt.

Eigenmittel wurden nicht eingesetzt.

Zusätzliche Drittmittel wurden nicht akquiriert.

Die Mittelfreigabe durch den Projektträger erfolgte bzgl. Zeitpunkt und Höhe stets vereinbarungsgemäß.

Während des Projektzeitraumes gab es eine Mittelumwidmung: Aufgrund der zu zahlenden Inflationsausgleichsprämie wurden die Mittel aus der Position 0817 leider überschritten. Diese Kosten konnten mit Mitteln aus den Positionen 0846 und 0843 ausgeglichen werden. Der entsprechende Antrag wurde am 17.04.2024 durch den Projektträger genehmigt.

Die Details der Finanzierungsplanung und –umsetzung gehen aus dem „Zahlenmäßigen Nachweis“ hervor und sind dem Projektträger bekannt.

### 5.2 Aufschlüsselung nach Kostenarten

Die Ausgaben wurden entsprechend des Zuwendungsbescheides in vier zentrale Kostenpositionen gegliedert:

Positionen		Ausgaben	
		geplant lt. Bescheid	tatsächlich entstanden
0812	Beschäftigte E12-E15	64.691,49 €	74.201,29 €
0817	Beschäftigte E1-E11	15.402,52 €	19.697,68 €
0843	Sonstige allgemeine Verwaltungsausgaben	2.300,00 €	70,52 €
0846	Dienstreisen	1.600,00 €	94,34 €

Diese Struktur verdeutlicht, dass die zur Verfügung gestellten Mittel gezielt und transparent eingesetzt wurden, um sämtliche Projektaktivitäten effizient umzusetzen.

Der zahlenmäßige Nachweis belegt somit die wirtschaftliche Effizienz und die sorgfältige Verwaltung der Ressourcen, wodurch die finanzielle Solidität des Vorhabens unterstrichen wird.

## **5.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten**

### **Personalkosten**

Die Personalkosten stellen den größten Kostenblock dar (über 99 % des gesamten Budgets). Sie waren notwendig, um das multidisziplinäre Team (Verfahrenstechnik, Materialwissenschaft, ökologische Betrachtungen) kontinuierlich zu beschäftigen. Ohne diesen Personalaufwand hätten weder die umfangreichen Prüfprogramme noch die iterativen Optimierungen bei Materialzusammensetzung und Umformprozessen realisiert werden können.

### **Allgemeine Verwaltungsausgaben**

Durch diese Ausgaben konnte Verbrauchsmaterial beschafft werden, um Handmuster zu fertigen und Vorversuche durchzuführen.

### **Dienstreisen**

Die Reisekosten deckten Fabrikbesichtigungen und Abstimmungsgespräche mit dem Projektpartner ab. Die Mittel wurden sehr effizient eingesetzt, da aufgrund von Kommunikationsmitteln, wie Videokonferenzen, einige der geplanten Reisen nicht durchgeführt werden mussten.

### **Gesamtbewertung der Angemessenheit**

In Summe belegen die Zahlen, dass die tatsächlichen Ausgaben weitgehend den Planungen entsprachen. Die Mehrkosten beim Personal waren sachlich gerechtfertigt und sind mit dem Projektträger abgestimmt. Alle Kostenblöcke standen in direktem Zusammenhang mit den Projektzielen und wurden effizient eingesetzt. Die Mittelverwendung entspricht damit den Anforderungen des Fördergebers hinsichtlich Zweckbindung, Nachvollziehbarkeit und Effizienz.

## **6 Veröffentlichungen**

Bis zur Einreichung dieses Berichtes (Juni 2025) wurden keine projektrelevanten Veröffentlichungen durch die Projektpartner durchgeführt.