

ESD-fähige Vollpappe aus recyceltem Altpapier für nachhaltige Transportmittel und Ladungsträger

Dr.-Ing. Sebastian Weise, Prof. Dr.-Ing. Markus Golder

*Professur Förder- und Materialflusstechnik, Fakultät für Maschinenbau
Technische Universität Chemnitz, Chemnitz*

Elektrostatisch empfindliche Bauteile erfordern entlang logistischer Prozesse geeignete Schutzmaßnahmen gegen elektrostatische Entladungen. Für Transport-, Bereitstellungs- und Montageaufgaben werden hierzu häufig Ladungsträger aus leitfähig modifizierten Kunststoffen oder entsprechend funktionalisierte, faserbasierte Verpackungen eingesetzt. Im vorgestellten Forschungsprojekt wurde ein alternativer Werkstoffansatz untersucht, bei dem eine aus 100% recyceltem Altpapier hergestellte Vollpappe bereits während der Halbzeugherstellung mit elektrisch leitfähigen Additiven versehen wird. Auf diese Weise wird die ESD-Funktion unmittelbar in den Werkstoff integriert, ohne dass hierfür eine nachträgliche leitfähige Beschichtung erforderlich ist. Im Mittelpunkt der Untersuchungen standen die Auswahl eines geeigneten Additivs, die Überführung der Materialrezeptur in einen industriellen Herstellprozess, die elektrische, physikalische und mechanische Charakterisierung sowie die Verarbeitung zu logistischen Funktionselementen. Carbonfasern erwiesen sich als geeignete Vorzugsvariante. Eine industrielle Vollpappe mit einer Dicke von 3 mm, einer Grammatur von 2.100 g/m² und einem Carbonfaseranteil von 2,5% konnte auf vorhandener Wickelpappentechnik hergestellt werden. Die Untersuchungen zeigten eine gezielte Beeinflussbarkeit der elektrischen Eigenschaften über den Additivanteil. An gefertigten Behälterprototypen lagen sowohl Oberflächen- als auch Volumenwiderstände im projektseitig definierten ESD-Zielbereich. Die konventionelle Verarbeitung durch z. B. Schneiden oder Stanzen war ohne grundlegende Verfahrensanpassungen möglich. Für dreidimensionale Geometrien zeigte insbesondere das Vakuumformen im nassen Zustand ein hohes Potenzial. Die Fertigung von stapelbaren Faltschachteln und formangepassten Transporttrays demonstriert die technische Übertragbarkeit des entwickelten Werkstoff- und Prozessansatzes auf ESD-gerechte logistische Anwendungen.

[Schlüsselwörter: ESD, Vollpappe, Recyclingpapier, Carbonfasern, Ladungsträger]

1 Einleitung

1.1 ESD-Schutz in logistischen Anwendungen

Elektronische und elektromechanische Komponenten werden entlang ihrer Wertschöpfungskette wiederholt transportiert, zwischengelagert, kommissioniert, bereitgestellt und montiert. Elektrostatische Entladungen können dabei zu Beschädigungen elektrostatisch empfindlicher Bauelemente führen. Entsprechend behandelt DIN EN IEC 61340-5-1 den Schutz elektronischer Bauelemente gegen elektrostatische Phänomene als systematische Aufgabe eines ESD-Kontrollprogramms [1]. Für Materialfluss- und Logistikprozesse ergibt sich daraus die Anforderung, den ESD-Schutz auch während Handhabung, Transport und Bereitstellung aufrechtzuerhalten.

Eine besondere Rolle übernehmen dabei Verpackungen, Transportbehälter, Trays und Montagehilfen. Sie stellen die unmittelbare Schnittstelle zwischen dem zu schützenden Bauteil und seiner logistischen Umgebung dar. DIN EN IEC 61340-5-3 beschreibt Eigenschaften, Prüfverfahren und Anforderungen für Verpackungen, die zum Schutz ESD-empfindlicher Bauelemente während Produktion, Transport und Lagerung eingesetzt werden [2]. Mögliche technische Lösungen umfassen unter anderem elektrisch funktionalisierte Kunststoffbehälter sowie faserbasierte Verpackungsmaterialien mit ableitfähigen oder leitfähigen Eigenschaften.

Der im Projekt untersuchte Ansatz verfolgt eine werkstoffseitige Integration der ESD-Funktion. Anstelle einer nachträglichen Oberflächenfunktionalisierung werden elektrisch leitfähige Additive bereits bei der Herstellung der Vollpappe in die Fasersuspension eingebracht. Dadurch soll ein durchgängiger funktionaler Werkstoff entstehen, der anschließend mit etablierten Verfahren der Pappverarbeitung zu Transport-, Bereitstellungs- und Montagehilfsmitteln weiterverarbeitet werden kann.

1.2 Werkstoffintegrierte ESD-Funktion in recyclingbasierter Vollpappe

Als Grundwerkstoff wurde eine Vollpappe auf Basis von 100% recyceltem Altpapier gewählt. Die Verwendung eines etablierten faserbasierten Werkstoffsystems ermöglicht es, die vorhandene industrielle Prozesskette der Wickelpappenherstellung weitgehend beizubehalten. Die zusätzliche elektrische Funktion wird während der Pulpeaufbereitung erzeugt, indem leitfähige Additive gemeinsam mit den Papierfasern verteilt und anschließend lagenweise zum Pappwerkstoff aufgebaut werden.

Die grundsätzliche Funktionalisierbarkeit cellulosebasierter Papiere zu elektrisch leitfähigen Werkstoffen ist aus der Forschung bekannt. Jabbour et al. stellten beispielsweise Graphit-/Carbonfaser-/Cellulose-Verbundpapiere mit über die Zusammensetzung einstellbarer elektrischer Leitfähigkeit mittels papiertechnischer Herstellverfahren her [3]. Weitere Arbeiten erzeugten leitfähige Papiere durch Polymerisation leitfähiger Polymere auf den Papierfasern [4] oder durch die Einlagerung metallischer Partikel in Cellulosefasern [5]. Diese Ansätze zeigen die Bandbreite möglicher Funktionalisierungsstrategien. Der hier untersuchte Ansatz fokussiert demgegenüber auf eine 3 mm starke, aus Recyclingfasern hergestellte Vollpappe, die auf industrieller Wickelpappentechnik gefertigt und anschließend zu ESD-fähigen logistischen Funktionselementen weiterverarbeitet wird.

Für die logistische Anwendung ist neben der elektrischen Funktion insbesondere entscheidend, dass sich das Halbzeug mit verfügbaren Fertigungsverfahren bearbeiten und in anwendungsgerechte Geometrien überführen lässt. Der Entwicklungsansatz umfasste daher nicht nur die Werkstoffrezeptur, sondern die gesamte Prozesskette vom Ausgangsmaterial über die industrielle Halbzeugherstellung und Werkstoffcharakterisierung bis hin zu konkreten Demonstratoren.

Damit verbindet der Ansatz drei wesentliche Anforderungen: die Integration einer ESD-Funktion in einen recyclingbasierten Faserwerkstoff, die industrielle Herstellbarkeit auf bestehender Anlagentechnik und die Weiterverarbeitung zu funktionsfähigen logistischen Ladungsträgern und Einlagen.

1.3 Zielsetzung und Forschungsansatz

Ziel des Projekts war die Entwicklung einer ESD-fähigen Vollpappe auf Basis von 100% recyceltem Altpapier, deren elektrische Funktion durch Additivierung bereits während der Urformung erzeugt wird. Der Werkstoff sollte nicht nur an seiner Oberfläche, sondern über den Materialaufbau hinweg elektrisch wirksam sein und mit etablierten Verfahren der Pappeverarbeitung zu Transport- und Montagehilfsmitteln weiterverarbeitet werden können.

Der Forschungsansatz umfasste drei aufeinander aufbauende Ebenen. Zunächst wurden unterschiedliche leitfähige Additive und Materialvarianten untersucht, um eine geeignete Kombination aus Recyclingfaserstoff und leitfähiger Komponente zu identifizieren. Anschließend wurde die Vorzugsvariante hinsichtlich elektrischer, physikalischer und mechanischer Eigenschaften charakterisiert und auf einen industriellen Herstellprozess übertragen. In der dritten Ebene wurde untersucht, wie sich das entwickelte Halbzeug mit konventionellen sowie neuartigen Formgebungsverfahren zu logistischen Funktionselementen verarbeiten lässt.

Im Mittelpunkt standen damit zwei übergeordnete Fragestellungen: Zum einen war zu klären, ob ein faserbasierter Recyclingwerkstoff mit gezielt einstellbaren ESD-Eigenschaften im industriellen Maßstab hergestellt werden kann. Zum anderen war zu untersuchen, ob die elektrische Funktion während der Weiterverarbeitung erhalten bleibt und sich daraus anwendungsgerechte Behälter, Trays und Montagehilfen fertigen lassen.

2 Werkstoffentwicklung und Untersuchungsmethodik

2.1 Werkstoffkonzept, Additivauswahl und Herstellung der Vollpappe

Als Ausgangswerkstoff wurde eine Graupappe mit einer Nenndicke von 3 mm und einer Grammatur von 2.100 g/m² betrachtet. Der Faserstoff bestand vollständig aus recyceltem Altpapier. Zur Erzeugung der elektrischen Leitfähigkeit wurden im Projekt zunächst unterschiedliche leitfähige Additive betrachtet. Hierzu gehörten unter anderem kohlenstoffbasierte sowie metallische Varianten. Im Verlauf der Materialentwicklung wurden Carbonfasern als Vorzugsadditiv ausgewählt, da sich mit zunehmender Carbonfaserkonzentration eine systematische Verringerung des elektrischen Widerstands einstellen ließ.

Für die Untersuchungen wurden Materialvarianten mit unterschiedlichen Carbonfaseranteilen hergestellt. Die Versuchsreihe diente dazu, den Zusammenhang zwischen Additivkonzentration und elektrischem Widerstand zu bestimmen und daraus einen geeigneten Arbeitsbereich für die industrielle Fertigung abzuleiten. Für die großformatige Herstellung wurde eine Vorzugsvariante mit einem Carbonfaseranteil von 2,5% im Endprodukt eingesetzt. Als Carbonfaser kam das Produkt SIGRAFIL C C3-4.0/240-G100 zum Einsatz.

Die Herstellung erfolgte auf einer vorhandenen Wickelpappenanlage. Das Altpapier wurde zunächst in eine wässrige Fasersuspension, die Pulpe, überführt. Die Carbonfasern wurden während der Pulpeaufbereitung zudosiert und durch die im Standardprozess vorhandene intensive Durchmischung verteilt. Mittels Siebtrommeln wurde aus

Tabelle 1: Ausgewählte Werkstoff- und Prozessparameter der industriell gefertigten Vorzugsvariante.

Parameter	Wert
Ausgangswerkstoff	100% recyceltes Altpapier
Pappendicke	3 mm
Grammatur	2.100 g/m ²
Additiv	Carbonfasern SIGRAFIL C C3-4.0/240-G100
Carbonfaseranteil	2,5% im Endprodukt
Pulpendurchsatz	3 m ³ /h
Mischdauer	45 min
Walzengeschwindigkeit	bis 60 m/min
Restfeuchte nach Trocknung	8–12% je nach Anwendung

der Suspension eine nasse Faserstoffbahn gebildet und lagenweise auf einer Formatwalze abgelegt. Der Aufbau wurde so lange fortgeführt, bis die angestrebte Pappendicke erreicht war. Anschließend wurde der Pappzylinder geöffnet, der noch feuchte Bogen getrocknet und auf das erforderliche Format zugeschnitten.

Ausgewählte Werkstoff- und Prozessparameter der industriell gefertigten Vorzugsvariante sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Die Versuche zeigten, dass die Carbonfasern ohne grundlegende Änderung der bestehenden Anlagen- und Prozessstruktur in die industrielle Wickelpappenherstellung integriert werden können.

2.2 Elektrische und werkstofftechnische Charakterisierung

Die elektrische Charakterisierung umfasste die Bestimmung des Oberflächenwiderstands und des Durchgangsbeziehungsweise Volumenwiderstands. Hierfür wurde ein Messgerät Metriso B 530 in Kombination mit einer Ringelektrode DPV 880 eingesetzt. Als einschlägige methodische Referenz für die Bestimmung von Widerstand und spezifischem Widerstand fester Werkstoffe wurde DIN EN 61340-2-3:2017-05 einschließlich Berichtigung 1:2024-01 herangezogen [6]. Neben unadditiverter Referenzpappe und additivierten Halbzeugen wurden auch gefertigte Behälterprototypen untersucht.

Für die Versuchsreihen zum Einfluss der Additivkonzentration wurden die Messwerte als Mittelwerte aus drei Proben je Variante und drei Einzelmessungen je Probe ausgewertet. Ergänzend wurden Messungen unter unterschiedlichen Temperatur- und Feuchtebedingungen durchgeführt. Diese Erweiterung ist insbesondere für cellulosebasierte Werkstoffe relevant, da deren elektrische Leitfähigkeit beziehungsweise Widerstandswerte deutlich durch den Feuchtegehalt beeinflusst werden können [7].

Die Homogenität der Additivverteilung wurde mikroskopisch bei 50- und 175-facher Vergrößerung untersucht. Dabei wurden Materialoberflächen, Quer-

schnitte und freigelegte Mittellagen betrachtet. Ziel war es, Verteilung und Orientierung der Carbonfasern zu erfassen und diese mit den elektrischen Eigenschaften des Verbundwerkstoffs in Beziehung zu setzen.

Ergänzend wurden ausgewählte physikalische und mechanische Eigenschaften der ESD-Pappe mit denen der unadditivierten Ausgangspappe verglichen. Hierzu gehörten unter anderem Oberflächenbeschaffenheit, Brandverhalten sowie Druck-, Zug- und Biegeeigenschaften. Die Zugeigenschaften wurden bei einer konstanten Prüfgeschwindigkeit von 20 mm/min in Anlehnung an DIN EN ISO 1924-2:2009-05 bestimmt [8]. Die Untersuchungen dienten insbesondere dazu, die Eignung des neuen Werkstoffs für die nachfolgenden Verarbeitungs- und Demonstratorversuche zu bewerten.

2.3 Untersuchungen zur Verarbeitung und Umformung

Die Weiterverarbeitung wurde in zwei Gruppen unterteilt. Zunächst wurden etablierte Verfahren der industriellen Pappeverarbeitung untersucht. Dazu gehörten Schneiden, Stanzen, Rillen, Schlitzen, Heften, Nieten, Kleben und Bedrucken; ergänzend wurde das Lasern untersucht. Für die betrachteten Verfahren wurde die ESD-Pappe unter praxishen Bedingungen mit konventioneller Pappe vergleichbarer Dicke verglichen.

Die zweite Untersuchungsgruppe umfasste Verfahren zur zwei- und dreidimensionalen Freiformung. Für zweidimensionale Biegeversuche wurde eine Pressform mit inneren Radien zwischen 1,5 und 18 mm und äußeren Radien zwischen 4,5 und 21 mm eingesetzt. Die Proben wurden sowohl trocken als auch nass umgeformt. Bewertet wurden insbesondere erreichbarer Biegeradius, Rückfederung und Formstabilität nach der Trocknung.

Für die dreidimensionale Umformung wurden zwei Ansätze untersucht. Beim Verfahren "Stempel und Gesenk" kamen unterschiedliche Stempeldurchmesser zum Einsatz. Zusätzlich wurde ein Vakuumformverfahren genutzt. Dabei wurde ein nasser Pappebogen auf eine Positivform gelegt, gemeinsam mit der Matrize in einen Vakuumbeutel eingebracht und durch Unterdruck an die Kontur angelegt. In mehr als 25 Varianten wurden unter anderem Materialzustand und Matrizengeometrie variiert.

3 Eigenschaften der ESD-fähigen Vollpappe

3.1 Einfluss der Carbonfaseradditivierung auf die ESD-Eigenschaften

Die elektrische Charakterisierung zeigte einen eindeutigen Zusammenhang zwischen Carbonfaseranteil und elektrischem Widerstand. Mit zunehmender Additivkonzentration verringerte sich sowohl der Oberflächen- als auch der

Volumenwiderstand. Damit konnte nachgewiesen werden, dass sich die elektrische Funktion des Werkstoffs über die Materialrezeptur gezielt beeinflussen lässt.

Für die weitere Entwicklung wurde projektseitig ein Zielbereich von 10^6 bis $10^9 \Omega$ für Oberflächen- und Volumenwiderstand festgelegt. Dieser Bereich diente innerhalb des Forschungsprojekts als Auslegungskriterium für die Materialentwicklung. Die übergeordneten Anforderungen und Klassifizierungen von ESD-Schutzverpackungen werden normativ in DIN EN IEC 61340-5-3 behandelt [2]. Die Untersuchungen der Materialvarianten dienten dazu, eine Konzentration zu identifizieren, die sich sowohl elektrisch als auch fertigungstechnisch für die Übertragung auf die industrielle Wickelpappenherstellung eignet. Auf dieser Grundlage wurde die Variante mit 2,5% Carbonfasern als bevorzugte industrielle Rezeptur eingesetzt.

Die ergänzenden Klimaversuche bestätigten den für faserbasierte Werkstoffe erwartbaren Einfluss von Temperatur und relativer Luftfeuchte auf die elektrischen Eigenschaften. Diese Ergebnisse wurden bei der Bewertung der Materialvarianten und der Festlegung der Vorzugsrezeptur berücksichtigt. Entscheidend für die logistische Anwendung ist die elektrische Funktion des fertig verarbeiteten Produkts. Deshalb wurden die hergestellten Behälterprototypen abschließend erneut vermessen.

Für die kleine und die große Kiste lagen die gemessenen Oberflächenwiderstände bei $5,20 \times 10^7 \Omega$ beziehungsweise $4,94 \times 10^7 \Omega$. Die Volumenwiderstände betrugen $3,34 \times 10^7 \Omega$ beziehungsweise $1,55 \times 10^7 \Omega$. Damit lagen sämtliche an den beiden Behälterprototypen bestimmten Werte innerhalb des projektseitig spezifizierten Bereichs. Die Versuche belegen somit, dass die durch die Carbonfaseradditivierung erzeugte elektrische Funktion auch nach den erforderlichen Verarbeitungsschritten im fertigen Ladungsträger erhalten bleibt.

Abbildung 1 stellt die Oberflächen- und Volumenwiderstände der beiden gefertigten Behälterprototypen gemeinsam mit dem projektseitig festgelegten Zielbereich dar.

3.2 Homogenität und Ausbildung des leitfähigen Fasernetzwerks

Die mikroskopischen Untersuchungen zeigen, dass die Carbonfasern während der Pulpeaufbereitung und Wickelpappenherstellung weitgehend gleichmäßig in den Werkstoff eingebracht werden können. Auf den Materialoberflächen sind die Fasern deutlich erkennbar und in unterschiedlichen Richtungen orientiert, sodass zahlreiche Kontaktmöglichkeiten innerhalb der jeweiligen Materiallage entstehen.

Die charakteristische Faserverteilung an der Materialoberfläche ist in Abbildung 2 exemplarisch bei 50- und 175-facher Vergrößerung dargestellt.

Im Querschnitt zeigt sich die für den Wickelpappenprozess typische lagenweise Werkstoffstruktur. Die Carbonfasern orientieren sich überwiegend in der Ebene der einzelnen Faserstofflagen. Gleichzeitig liegen sie innerhalb der Einzellagen bis an deren Grenzbereiche vor, sodass Kontakte zwischen benachbarten Lagen möglich sind. In Verbindung mit den gemessenen Volumenwiderständen zeigt dies, dass der Materialaufbau eine elektrische Funktion nicht nur an der Oberfläche, sondern auch durch die Dicke des Werkstoffs ermöglicht.

Die mikroskopische Untersuchung stützt damit den gewählten Werkstoffansatz: Die elektrische Funktion wird nicht durch eine separate äußere Beschichtung erzeugt, sondern durch die Verteilung leitfähiger Fasern innerhalb des Pappverbunds.

3.3 Physikalische und mechanische Werkstoffeigenschaften

Die untersuchten physikalischen Eigenschaften blieben durch die Carbonfaseradditivierung in wesentlichen Punkten auf dem Niveau der Ausgangspappe. Bei der Oberflächenrauheit zeigten sich keine relevanten Unterschiede zwischen Original- und ESD-Pappe. Die für die Wickelpappenherstellung typische Differenz zwischen Ober- und Unterseite blieb erhalten. Auch beim Brandverhalten wurden unter den gewählten Prüfbedingungen keine wesentlichen Unterschiede zwischen den beiden Werkstoffvarianten festgestellt.

Die mechanischen Prüfungen zeigten ein differenziertes Bild. Im Druckversuch verliefen die Kraft-Weg-Kurven von Original- und ESD-Pappe nahezu deckungsgleich. Die für Behälter- und Stapelanwendungen besonders relevante Druckbeanspruchung wird durch die Carbonfaseradditivierung somit nicht grundlegend verändert.

Bei Zug- und Biegebeanspruchung beeinflusst die Additivierung das mechanische Verhalten stärker. Diese Ergebnisse wurden bei der Auslegung und Bewertung der Demonstratoren berücksichtigt. Für die im Projekt realisierten Behälter- und Traygeometrien konnte dennoch eine ausreichende Stabilität erreicht werden. Die Werkstoffcharakterisierung liefert damit eine geeignete Grundlage, um Geometrie, Belastungsrichtung und Fügeverfahren an die Eigenschaften der ESD-Pappe anzupassen.

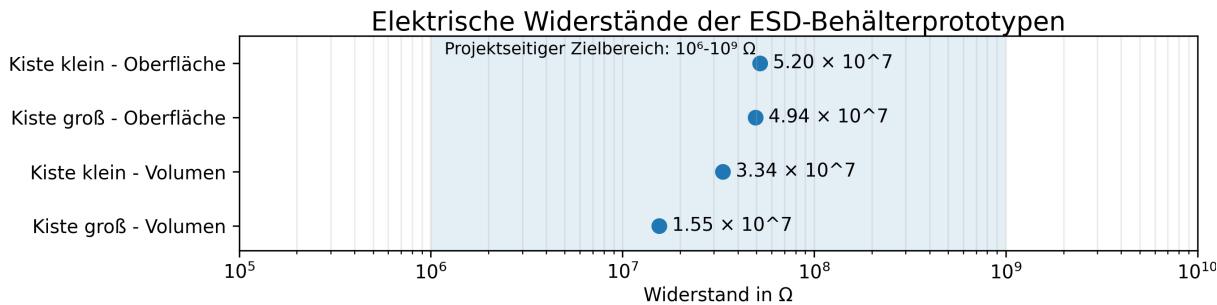


Abbildung 1: Oberflächen- und Volumenwiderstand der gefertigten ESD-Behälterprototypen im Vergleich zum projektseitig festgelegten Zielbereich.

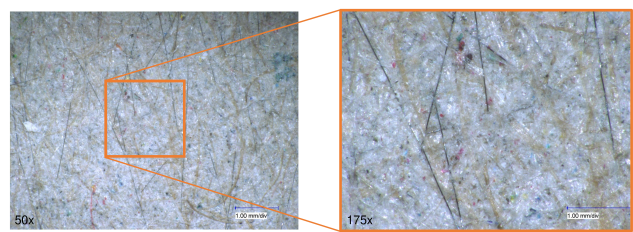


Abbildung 2: Mikroskopische Carbonfaserverteilung an der Oberfläche der ESD-Pappe bei 50-facher und 175-facher Vergrößerung.

Tabelle 2: Ergebnisse der untersuchten Verarbeitungsverfahren.

Verfahren	Ergebnis im Vergleich zur konventionellen Pappe
Schneiden	vergleichbare Verarbeitung und Schnittqualität
Stanzen	keine grundlegenden Einschränkungen festgestellt
Rillen	vergleichbare Verarbeitung
Schlitzen	vergleichbare Verarbeitung
Heften	analog zur konventionellen Pappe möglich
Nieten	analog zur konventionellen Pappe möglich
Kleben	sehr gute Ergebnisse mit Kalt- und Heißleim
Bedrucken	beim untersuchten Digitaldruck keine Unterschiede festgestellt
Lasern	grundsätzlich möglich; höhere Schneidleistung als bei konventioneller Pappe erforderlich

4 Verarbeitung und Formgebung zu logistischen Funktionselementen

4.1 Konventionelle Verarbeitung der ESD-Pappe

Ein wesentliches Ziel des Projekts war die Prüfung, ob sich die neu entwickelte ESD-Pappe mit vorhandenen Verfahren der Verpackungsherstellung verarbeiten lässt. Dies konnte für die betrachteten Standardverfahren weitgehend bestätigt werden. Die wesentlichen Ergebnisse sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Damit können die für Faltschachteln und KLT-ähnliche Behälter typischen Zuschnitt-, Formgebungs- und Fügeoperationen mit etablierter Maschinentechnik durchgeführt werden. Dieser Befund ist für eine spätere industrielle Nutzung von besonderer Bedeutung, da nicht nur die Herstellung des Halbzeugs, sondern auch die nachgelagerte Verarbeitung weitgehend in vorhandene Prozessketten integrierbar ist.

4.2 Zwei- und dreidimensionale Freiformverfahren

Neben den klassischen Verfahren wurde untersucht, ob aus dem plattenförmigen Halbzeug auch stärker dreidimensional ausgeprägte Geometrien hergestellt werden können. Hierfür wurden zunächst zweidimensionale Umformversuche mit unterschiedlichen Biegeradien durchgeführt.

Die Versuche zeigten, dass der Feuchtezustand einen entscheidenden Einfluss auf die Formbarkeit besitzt. Im nassen Zustand ließ sich die Vollpappe deutlich leichter umformen als im trockenen Zustand. Insbesondere ein innerer Radius von 1,5 mm konnte reproduzierbar realisiert werden. Zwischen nasser Original-Pappe und nasser ESD-Pappe zeigten sich hinsichtlich der erreichbaren Radien keine wesentlichen Unterschiede. Die Carbonfaseradditivierung schränkt die für das Freiformen relevante Umformbarkeit damit nicht grundsätzlich ein.

Für die dreidimensionale Umformung wurde zunächst das Prinzip “Stempel und Gesenk” untersucht. Die nassen Proben ließen sich bei deutlich geringeren Kräften formen als trockene Proben. Besonders wichtig für die Formstabilität war die Trocknung im Werkzeug. Wurde die Pappe während des Trocknens in der gewünschten Geometrie fixiert, blieb ein deutlich höherer Anteil der erzeugten Form erhalten.

Als zweiter Ansatz wurde das Vakuumformen erprobt. Dabei wird der angefeuchtete Pappebogen durch Unterdruck an eine Positivform angelegt und anschließend in der Form getrocknet. In mehr als 25 untersuchten Varianten konnten unterschiedliche Konturen und lokale

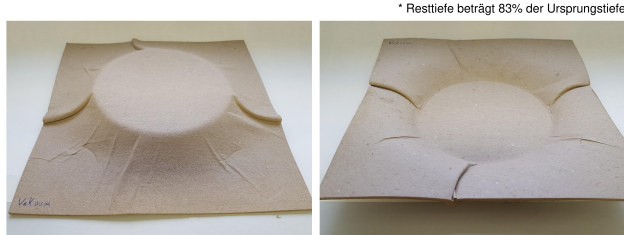


Abbildung 3: Beispiel einer dreidimensionalen Nassumformung der Vollpappe mittels Vakuumformen und anschließender Formstabilisierung durch Trocknung.

Formelemente erzeugt werden. Im Vergleich der untersuchten Freiformansätze ermöglichte das Vakuumformen die größten Umformgrade und erwies sich damit als besonders geeignet für die Herstellung formangepasster Transport- und Montageeinlagen.

Ein Beispiel des erzielten Umformergebnisses zeigt Abbildung 3.

4.3 Ableitung geeigneter Prozessstrategien

Aus den Umformversuchen lässt sich eine grundlegende Prozessstrategie für dreidimensional geformte ESD-Pappe ableiten. Der Pappebogen wird zunächst auf die gewünschte Kontur zugeschnitten und anschließend kontrolliert befeuchtet. Die Befeuchtung erhöht die Formbarkeit des Faserverbands deutlich und ermöglicht kleinere Radien sowie komplexere räumliche Geometrien.

Die eigentliche Formgebung kann abhängig von der Zielgeometrie über Presswerkzeuge oder Vakuumformen erfolgen. Für einfache, klar definierte Geometrien kann das Verfahren "Stempel und Gesenk" eingesetzt werden. Für stärker freigeformte und bauteilspezifische Konturen bietet das Vakuumformen einen hohen geometrischen Freiheitsgrad.

Die anschließende Trocknung in der Form ist ein wesentlicher Bestandteil des Verfahrens. Dadurch wird die eingestellte Geometrie stabilisiert und die Rückverformung reduziert. Für komplexere Geometrien können zusätzlich gezielte Entlastungsschnitte oder lokale konstruktive Anpassungen vorgesehen werden. Auf diese Weise lässt sich die Formgebung an die jeweilige Bauteil- und Logistikanforderung anpassen.

5 Anwendungspotenzial und technische Einordnung

5.1 Demonstratoren für Transport-, Bereitstellungs- und Montageaufgaben

Zur Überführung der Werkstoff- und Prozessergebnisse in konkrete Anwendungen wurden zwei Demonstratorlinien aufgebaut. Die erste Linie umfasste klassische Faltschachteln beziehungsweise KLT-ähnliche Behälter. Die ESD-Pappe wurde zugeschnitten, gestanzt, gerillt und durch Falten und Heften zu Behältern aufgebaut. Es entstanden unter anderem Formate von 400 mm × 300 mm × 147 mm und 200 mm × 300 mm × 147 mm. Die Konstruktionen wurden so ausgelegt, dass die Behälter stapelbar sind.

Die Prototypen wurden hinsichtlich ihrer Handhabungs- und Belastbarkeit orientierend geprüft. In einem Fallversuch mit 3 kg Beladung aus etwa 1 m Höhe wurde der Behälter wiederholt auf dieselbe Ecke fallen gelassen. Auch nach zehn Wiederholungen blieben die grundlegende Stand- und Stapelfunktion erhalten. Unabhängig davon bestätigten die ESD-Messungen, dass die elektrische Funktion des Materials im verarbeiteten Behälter gegeben war.

Die zweite Demonstratorlinie umfasste freigeformte Transport- und Montageeinlagen. Hierfür wurden nasse ESD-Pappe-Bögen über flexible Matrizen vakuumgeformt und anschließend in der Form getrocknet. Neben direkt geformten Varianten wurden Geometrien mit gezielten Schlitz- und Ausklinkungen umgesetzt. Die Demonstratoren zeigen, dass sich Bereiche zur Bauteilaufnahme, Positionierung und Montageunterstützung in einem faserbasierten Halbzeug kombinieren lassen.

Abbildung 4 stellt die beiden Anwendungspfade exemplarisch gegenüber: einen stapelbaren Behälter aus konventionell verarbeiteter ESD-Pappe sowie eine formangepasste Einlage auf einem standardisierten Eurobehälter.

Damit reicht das Anwendungsspektrum des entwickelten Werkstoffs von einfachen ESD-Zwischenlagen und Behältern bis zu formangepassten Trays. Besonders interessant ist die Möglichkeit, die elektrische Funktion direkt mit geometrischen Positionier- und Bereitstellungsfunktionen zu verbinden.

5.2 Einordnung des Anwendungspotenzials

Die Projektergebnisse zeigen, dass sich eine ESD-Funktion in einen industriell herstellbaren Vollpappenwerkstoff integrieren und über nachfolgende Verarbeitungsschritte bis zum fertigen logistischen Funktionselement erhalten lässt. Für die betrachteten Anwendungen sind insbesondere die Herstellung auf bestehender Wickelpappentechnik, die gute Kompatibilität mit etablierten Verarbeitungsverfahren und

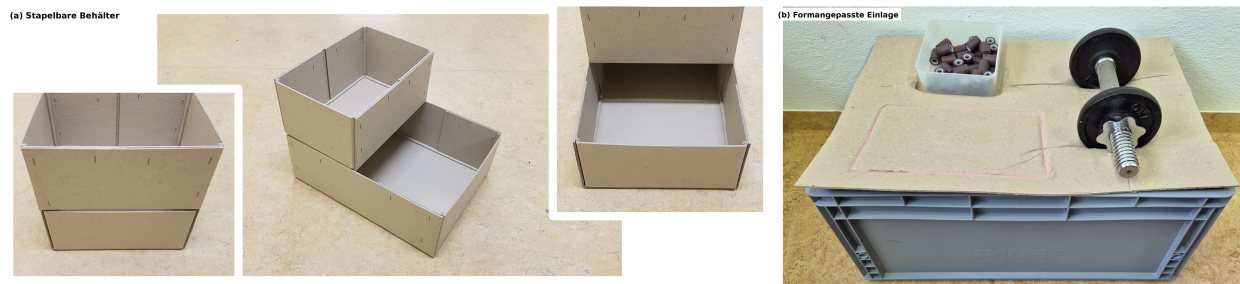


Abbildung 4: Demonstratoren aus ESD-fähiger Vollpappe: (a) stapelbare Faltschachteln und (b) formangepasste ESD-Einlage auf einem standardisierten Eurobehälter.

die zusätzlichen Möglichkeiten der Nassumformung hervorzuheben.

Die konventionelle Verarbeitung ermöglicht die Herstellung klassischer Verpackungs- und Behältergeometrien. Gleichzeitig erweitert das Freiformen den konstruktiven Lösungsraum um konturangepasste Trays und Einlagen. Dadurch kann der Werkstoff sowohl für standardisierte Ladungsträger als auch für produktspezifische Transport-, Bereitstellungs- und Montageaufgaben eingesetzt werden.

Ein weiteres Potenzial liegt in hybriden Logistikkonzepten. Dabei kann beispielsweise ein vorhandener Standardbehälter als tragender Unterbau genutzt und durch eine funktionspezifische ESD-Einlage aus Vollpappe ergänzt werden. Auf diese Weise lassen sich standardisierte Behältersysteme mit einer bauteilspezifischen Positionier- und ESD-Funktion kombinieren.

Für die weitere Überführung in industrielle Anwendungen stehen vor allem die Stabilisierung der Material- und Prozessparameter über größere Produktionschargen, die Auslegung weiterer Demonstratorgeometrien sowie die anwendungsspezifische Qualifizierung im Vordergrund. Die Projektergebnisse bilden hierfür eine belastbare technische Ausgangsbasis.

6 Zusammenfassung und Ausblick

6.1 Wesentliche Erkenntnisse

Im Projekt wurde eine Vollpappe aus 100% recyceltem Altpapier entwickelt, deren ESD-Funktion durch die Zugabe leitfähiger Carbonfasern während der Pulpeaufbereitung erzeugt wird. Eine industrielle Vorzugsvariante mit 3 mm Dicke, 2.100 g/m² Grammatur und 2,5% Carbonfasern konnte auf vorhandener Wickelpappentechnik hergestellt werden.

Zwischen Carbonfaseranteil und elektrischem Widerstand wurde ein klarer Zusammenhang festgestellt. Die

Materialuntersuchungen ermöglichten die Auswahl einer Vorzugsrezeptur für die industrielle Fertigung. An den fertiggestellten Behälterprototypen lagen sowohl Oberflächen- als auch Volumenwiderstände innerhalb des projektseitig festgelegten ESD-Zielbereichs. Damit konnte die elektrische Funktion auch am verarbeiteten Endprodukt nachgewiesen werden.

Für die industrielle Weiterverarbeitung ist wesentlich, dass Schneiden, Stanzen, Rillen, Schlitzen, Heften, Nieten, Kleben und Bedrucken mit etablierten Verfahren möglich bleiben; ergänzend ist auch Lasern grundsätzlich möglich. Gleichzeitig eröffnet die Nassumformung zusätzliche Gestaltungsmöglichkeiten. Sehr kleine Biegeradien konnten im nassen Zustand realisiert und durch Trocknung in der Form stabilisiert werden. Für komplexere dreidimensionale Geometrien zeigte das Vakuumformen das größte Potenzial.

Mit stapelbaren Faltschachteln und freigeformten Transport- beziehungsweise Montageeinlagen wurde die Übertragbarkeit der Werkstoff- und Prozessergebnisse auf konkrete logistische Funktionselemente demonstriert. Der entwickelte Ansatz verbindet damit die werkstoffintegrierte ESD-Funktion mit etablierten Verpackungsverfahren und zusätzlichen Möglichkeiten zur geometrischen Anpassung.

6.2 Potenzielle Einsatzfelder

Aus den Ergebnissen lassen sich mehrere Einsatzfelder ableiten. Im einfachsten Fall kann die ESD-Pappe als flächige Arbeits-, Zwischen- oder Behältereinlage eingesetzt werden. Durch die gute konventionelle Verarbeitbarkeit sind darüber hinaus gefaltete Behälter und KLT-ähnliche Verpackungslösungen realisierbar. Diese Produkte können insbesondere dort eingesetzt werden, wo ESD-sensible Komponenten transportiert, zwischengelagert oder bereitgestellt werden.

Ein zusätzliches Potenzial liegt in formangepassten Trays. Durch die Kombination aus Befeuchtung, Freiformung und Trocknung lassen sich Bauteilkonturen in die Pappe übertragen. Solche Trays können nicht nur dem

Transport dienen, sondern auch Funktionen der geordneten Bereitstellung und Montageunterstützung übernehmen. Die Möglichkeit, lokale Formelemente vergleichsweise flexibel zu variieren, ist insbesondere für wechselnde Produktvarianten und kleinere Serien interessant.

Weiterhin können hybride Logistikkonzepte adressiert werden, bei denen ein vorhandener Standardbehälter als tragender Unterbau genutzt und lediglich die funktionspezifische Einlage aus ESD-Pappe hergestellt wird. Dadurch lässt sich die mechanische Funktion etablierter Behältersysteme mit einer bauteilspezifischen ESD-Einlage kombinieren.

6.3 Ausblick

Die nächsten Entwicklungsschritte betreffen insbesondere die Übertragung der ermittelten Material- und Prozessparameter auf größere und wiederkehrende Produktionschargen sowie die anwendungsspezifische Qualifizierung weiterer Behälter- und Traygeometrien. Für die elektrische Funktion ist dabei das Zusammenwirken von Carbonfaserteil, Faserverteilung, Materialfeuchte und Herstellprozess weiter zu berücksichtigen.

Für die Formgebung bietet insbesondere das Vakuumformen weiteres Potenzial. Eine systematische Gestaltung von Matrizen, Entlastungsschnitten, Feuchteprofilen und Trocknungsbedingungen kann die erreichbare Geometrie weiter erweitern. In Verbindung mit flexibel herstellbaren Werkzeugen lässt sich daraus ein skalierbares Verfahren für anwendungsspezifische ESD-Trays entwickeln.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass ESD-fähige Vollpappe aus recyceltem Altpapier als technisch realisierbarer Werkstoff- und Prozessansatz für Transport-, Bereitstellungs- und Montageaufgaben grundsätzlich geeignet ist. Die Verbindung von integrierter elektrischer Funktion, etablierter Pappeverarbeitung und zusätzlichen Freiformmöglichkeiten schafft eine Grundlage für neue faserbasierte Logistikkösungen.

LITERATUR

- [1] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., “DIN EN IEC 61340-5-1:2025-06: Elektrostatik – Teil 5-1: Schutz von elektronischen Bauelementen gegen elektrostatische Phänomene – Allgemeine Anforderungen,” Berlin, 2025, iEC 61340-5-1:2024; Deutsche Fassung EN IEC 61340-5-1:2024. [Online]. Available: <https://www.dinmedia.de/de/norm/din-en-iec-61340-5-1/389728895>
- [2] —, “DIN EN IEC 61340-5-3:2024-04: Elektrostatik – Teil 5-3: Schutz von elektronischen Bauelementen gegen elektrostatische Phänomene – Eigenschaften und Anforderungen für die Klassifizierung von Verpackungen, welche für Bauelemente verwendet werden, die gegen elektrostatische Entladungen empfindlich sind,” Berlin, 2024, iEC 61340-5-3:2022; Deutsche Fassung EN IEC 61340-5-3:2022. [Online]. Available: <https://www.dinmedia.de/de/norm/din-en-iec-61340-5-3/374730479>
- [3] L. Jabbour, D. Chaussy, B. Eyraud, and D. Beneventi, “Highly conductive graphite/carbon fiber/cellulose composite papers,” *Composites Science and Technology*, vol. 72, no. 5, pp. 616–623, 2012. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2012.01.006>
- [4] C. Ding, X. Qian, J. Shen, and X. An, “Preparation and characterization of conductive paper via in-situ polymerization of pyrrole,” *BioResources*, vol. 5, no. 1, pp. 303–315, 2010. [Online]. Available: <https://doi.org/10.15376/biores.5.1.303-315>
- [5] M. Schreck, R. Deshmukh, E. Tervoort, and M. Niederberger, “Impregnation of cellulose fibers with copper colloids and their processing into electrically conductive paper,” *Chemistry of Materials*, vol. 34, no. 1, pp. 43–52, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.1c02232>
- [6] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., “DIN EN 61340-2-3:2017-05: Elektrostatik – Teil 2-3: Prüfverfahren zur Bestimmung des Widerstandes und des spezifischen Widerstandes von festen Werkstoffen, die zur Vermeidung elektrostatischer Aufladung verwendet werden,” Berlin, 2017, iEC 61340-2-3:2016; Deutsche Fassung EN 61340-2-3:2016; einschließlich Berichtigung 1:2024-01. [Online]. Available: <https://www.dinmedia.de/de/norm/din-en-61340-2-3/267896723>
- [7] H. Zhao, H. Mu, D. Zhang, B. Baumeier, H. Yao, G. Guo, and G. Zhang, “Mechanism study of the conductivity characteristics of cellulose electrical insulation influenced by moisture,” *Journal of Applied Physics*, vol. 132, no. 21, p. 215104, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1063/5.0121978>
- [8] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., “DIN EN ISO 1924-2:2009-05: Papier und Pappe – Bestimmung von Eigenschaften bei Zugbeanspruchung – Teil 2: Verfahren mit konstanter Dehngeschwindigkeit (20 mm/min),” Berlin, 2009, iISO 1924-2:2008; Deutsche Fassung EN ISO 1924-2:2008. [Online]. Available: <https://www.dinmedia.de/de/norm/din-en-iso-1924-2/111202964>