

AP 8 Untersuchungen zur Kompostierung

1. Einleitung

Die Entwicklung biobasierter Verpackungslösungen endet nicht mit der Herstellung eines funktionalen Produkts. Ebenso entscheidend ist die Frage, wie sich die eingesetzten Materialien nach ihrer Nutzung in bestehende Stoffkreisläufe zurückführen lassen. Für die im Projekt entwickelten Verpackungs- und Kultivierungsschalen aus Luzerneheu spielte die Kompostierbarkeit daher bereits während der Produktentwicklung eine zentrale Rolle. Sie stellt einen wesentlichen Baustein für die ökologische Bewertung der Materialien dar und beeinflusst gleichzeitig die praktische Einsetzbarkeit sowie die Vermarktungsmöglichkeiten der entwickelten Produkte.

Im Rahmen dieses Arbeitspakets wurde untersucht, wie sich die entwickelten Materialverbunde unter unterschiedlichen Kompostierungsbedingungen verhalten. Hierfür wurden zwei sich ergänzende Versuchsansätze gewählt. Zum einen erfolgte in Zusammenarbeit mit dem Projektpartner ein Kompostierungsversuch unter industriell orientierten Bedingungen. Dieser orientierte sich an den Anforderungen der DIN EN 13432 und ermöglichte eine Einordnung der Materialien anhand etablierter Prüfbedingungen. Auch wenn keine vollständige Normprüfung durchgeführt wurde, bot dieser Versuchsansatz einen fachlich anerkannten Referenzrahmen für die Bewertung der Desintegration.

Zum anderen wurde auf dem landwirtschaftlichen Betrieb ein praxisnaher Heimkompostversuch durchgeführt. Dieser griff einen zentralen Gedanken des Projekts auf: Die erzeugernahe Herstellung der Verpackungen sollte möglichst auch eine regionale und verbrauchernahe Rückführung der Materialien ermöglichen. Im Idealfall endet der Stoffkreislauf daher nicht in einer industriellen Kompostierungsanlage, sondern direkt beim Endverbraucher im eigenen Gartenkompost. Unter den dort vorherrschenden, deutlich weniger kontrollierten Bedingungen wurde untersucht, wie sich die entwickelten Materialien im realen Einsatz verhalten und ob eine vollständige Desintegration auch unter diesen Voraussetzungen erreicht werden kann.

Die Ergebnisse beider Versuche ergänzen sich und ermöglichen eine fundierte Bewertung der Kompostierbarkeit der entwickelten Verpackungs- und Kultivierungsschalen. Gleichzeitig bilden sie eine wichtige Grundlage für die ökologische Bewertung des Gesamtsystems sowie für die weitere Entwicklung der Materialrezeptur.

2. Normativer Rahmen der Kompostierbarkeit

Die Bewertung der Kompostierbarkeit von Verpackungen erfolgt auf Grundlage etablierter Normen und Zertifizierungsprogramme. Für das vorliegende Projekt waren dabei zwei unterschiedliche Entsorgungswege von Bedeutung. Einerseits erfolgt die Verwertung kompostierbarer Verpackungen in industriellen Kompostierungsanlagen, andererseits können biobasierte Materialien unter geeigneten Voraussetzungen auch im Heimkompost entsorgt werden. Da sich beide Systeme hinsichtlich ihrer Prozessbedingungen deutlich unterscheiden, wurden sie im Projekt getrennt betrachtet.

Der folgende Abschnitt stellt die wesentlichen Anforderungen beider Systeme vor und bildet damit den fachlichen Rahmen für die Einordnung der im Projekt durchgeführten Kompostierungsversuche. Ziel ist dabei keine vollständige Darstellung der zugrunde liegenden Normen, sondern die Beschreibung derjenigen Aspekte, die für die Bewertung der entwickelten Verpackungs- und Kultivierungsschalen relevant sind.

2.1 Industrielle Kompostierung

Für die Bewertung industriell kompostierbarer Verpackungen bildet die DIN EN 13432 den maßgeblichen europäischen Referenzstandard. Die Norm definiert Anforderungen, die Verpackungen erfüllen müssen, damit sie in industriellen Kompostierungsanlagen als kompostierbar gelten. Hierzu gehören neben der chemischen Charakterisierung der eingesetzten Materialien insbesondere die biologische Abbaubarkeit, die sichtbare Desintegration während des Kompostierungsprozesses sowie der Nachweis, dass die entstehenden Komposte keine nachteiligen Auswirkungen auf Pflanzenwachstum oder Kompostqualität besitzen. Darüber hinaus regelt die Norm die Voraussetzungen für eine entsprechende Kennzeichnung kompostierbarer Verpackungen.

Industrielle Kompostierungsanlagen arbeiten unter kontrollierten Bedingungen mit hohen Temperaturen, geregelter Belüftung und definierten Feuchtegehalten. Diese konstanten Prozessbedingungen ermöglichen einen deutlich schnelleren biologischen Abbau als unter natürlichen Kompostierungsbedingungen. Für das vorliegende Projekt diente die DIN EN 13432 daher als fachlicher Referenzrahmen für den gemeinsam mit dem Projektpartner durchgeführten Kompostierungsversuch. Eine vollständige Zertifizierungsprüfung war jedoch nicht Bestandteil des Projekts.

2.2 Heimkompostierung

Neben der industriellen Kompostierung spielte im Projekt die Heimkompostierung eine besondere Rolle. Sie greift den Grundgedanken des entwickelten Verpackungssystems auf, regionale Stoffkreisläufe möglichst vollständig zu schließen. Wird eine Verpackung aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellt, liegt es nahe, sie nach ihrer Nutzung auch möglichst verbrauchernah wieder dem biologischen Kreislauf zuzuführen.

Im Gegensatz zu industriellen Anlagen findet die Heimkompostierung jedoch unter deutlich weniger kontrollierten Bedingungen statt. Temperaturen, Feuchtigkeit und Sauerstoffversorgung unterliegen natürlichen Schwankungen und werden maßgeblich durch den Aufbau und die Pflege des jeweiligen Komposts beeinflusst. Entsprechend verlaufen die biologischen Abbauprozesse langsamer und weniger gleichmäßig.

Für die Bewertung solcher Materialien existieren mit Programmen wie OK compost HOME eigenständige Zertifizierungsstandards. Diese orientieren sich grundsätzlich an denselben Anforderungen wie die industrielle Kompostierung, berücksichtigen jedoch die deutlich anspruchsvolleren Bedingungen eines privaten Gartenkomposts und setzen längere Abbauezeiten voraus.

2.3 Wesentliche Unterschiede beider Systeme

Obwohl beide Kompostierungsverfahren das Ziel verfolgen, organische Materialien biologisch abzubauen, unterscheiden sich ihre Rahmenbedingungen erheblich. Industrielle Kompostierungsanlagen arbeiten unter standardisierten Bedingungen mit dauerhaft hohen Temperaturen und ermöglichen dadurch einen vergleichsweise schnellen Abbau der Materialien. Heimkomposte unterliegen dagegen jahreszeitlichen Einflüssen sowie Schwankungen hinsichtlich Temperatur, Feuchtigkeit und Sauerstoffversorgung, wodurch sich der Rotteprozess deutlich langsamer entwickelt.

Für die Bewertung der im Projekt entwickelten Materialien bedeutet dies, dass Ergebnisse aus industriellen Kompostierungsversuchen nicht ohne Weiteres auf die Heimkompostierung übertragen werden können. Beide Betrachtungsweisen ergänzen sich daher und liefern gemeinsam ein umfassenderes Bild des Materialverhaltens.

Tabelle 1: Kriterien industrielle Kompostierung und Heimkompostierung im Vergleich

Kriterium	Industriell (EN 13432)	Heimkompost (OK compost HOME)
Temperatur	55–65 °C	20–30 °C
Zeit bis zur Desintegration	12 Wochen	180 Tage
Prozesskontrolle	hoch (standardisiert)	gering (nutzerabhängig)
Rottebedingungen	aerobe Hochtemperatur	heterogene Bedingungen
Abbauanforderung	90 % CO ₂ in 180 Tagen	90 % CO ₂ in 180 Tagen, aber unter erschwerten Bedingungen
Zertifikat	Seedling / OK compost INDUSTRIAL	OK compost HOME

2.4 Bedeutung für das Projekt

Vor dem Hintergrund dieser unterschiedlichen Rahmenbedingungen wurden im Projekt bewusst zwei Versuchsansätze gewählt. Der industriell orientierte Kompostierungsversuch ermöglichte eine Einordnung der entwickelten Materialien anhand eines etablierten normativen Referenzrahmens. Der Heimkompostversuch ergänzte diese Untersuchungen um die Bewertung unter realitätsnahen Bedingungen und griff damit den Gedanken einer möglichst regionalen und verbrauchernahen Kreislaufführung auf.

Die Kombination beider Versuchsreihen erlaubt eine differenzierte Bewertung der entwickelten Materialverbunde und bildet die Grundlage für die nachfolgenden Untersuchungen zur Kompostierbarkeit der Verpackungs- und Kultivierungsschalen.

3. Verwendete Materialien und Einordnung der Materialrezeptur

Die Untersuchung der Kompostierbarkeit setzt zunächst eine Betrachtung der eingesetzten Materialien voraus. Die im Projekt entwickelten Verpackungs- und Kultivierungsschalen bestehen aus einem Materialverbund, dessen einzelne Komponenten unterschiedliche Aufgaben erfüllen. Während das Luzerneheu die strukturbildende Grundlage bildet, übernehmen weitere Bestandteile Funktionen wie die Hydrophobierung oder dienen innerhalb der Kultivierungssets als Kultursubstrat.



Abbildung 1: Zu kompostierende Anzuchtschalen mit Wachshydrophobierung

Da sich Herkunft, Verarbeitung und Materialeigenschaften der einzelnen Komponenten unterscheiden, ist auch ihre Einordnung hinsichtlich der Kompostierbarkeit unterschiedlich. Im Rahmen dieses Kapitels werden daher die verwendeten Materialien vorgestellt und hinsichtlich ihrer Funktion im Produkt sowie ihrer Bedeutung für die nachfolgenden Kompostierungsversuche erläutert. Gleichzeitig wird aufgezeigt, welche Materialzusammensetzung den Versuchen zugrunde lag und welche Anpassungen im weiteren Projektverlauf vorgenommen wurden.

3.1 Luzerneheu als Hauptbestandteil der Schalen

Den mengenmäßig größten Anteil der entwickelten Verpackungs- und Kultivierungsschalen bildet Luzerneheu aus ökologischem Anbau. Das geerntete Material wurde nach der Trocknung schonend zerkleinert und fraktioniert, sodass sich die Fasern anschließend für den Formpressprozess einsetzen ließen. Luzerne übernimmt innerhalb der entwickelten Produkte die Funktion des eigentlichen Fasergerüsts und bestimmt damit sowohl die mechanische Stabilität als auch das spätere Verhalten während der Kompostierung.

Da es sich um einen rein pflanzlichen Rohstoff handelt, kann grundsätzlich von einer guten biologischen Abbaubarkeit ausgegangen werden. Für eine Bewertung nach den Anforderungen der DIN EN 13432 beziehungsweise entsprechender Heimkompostierungsstandards genügt diese grundsätzliche Eigenschaft jedoch nicht. Entscheidend ist vielmehr, wie sich der verarbeitete Materialverbund während des Rotteprozesses verhält und ob die Schalen ihre ursprüngliche Struktur verlieren und in die Kompostmatrix übergehen.

Im Rahmen der Kompostierungsversuche bildeten die gepressten Luzernefasern daher den zentralen Untersuchungsgegenstand. Sämtliche Verpackungs- und Kultivierungsschalen basierten auf diesem Material und wurden hinsichtlich ihrer Desintegration unter unterschiedlichen Kompostierungsbedingungen untersucht.



Abbildung 2: Verpresste luzerneplatten und loses Luzerneheu für den Kompostierungsversuch

3.2 Hanffasermatten als Kultursubstrat

Für die entwickelten Kultivierungssets wurden zusätzlich Hanffasermatten eingesetzt. Sie dienen als Träger für Saatgut und Wasser und schaffen während der Kultivierung geeignete Bedingungen für die Keimung der Microgreens. Die Hanffasern werden mechanisch verarbeitet und enthalten keine zusätzlichen Bindemittel.

Da die Hanfmatten gemeinsam mit den Kultivierungsschalen entsorgt werden können, wurden sie ebenfalls in die Untersuchungen zur Kompostierbarkeit einbezogen. Ziel war es zu überprüfen, ob sich auch dieses zusätzliche Funktionselement während des Kompostierungsprozesses ausreichend abbaut und somit den biologischen Stoffkreislauf nicht beeinträchtigt.



Abbildung 3: Hanfmatten im Kompostierungsversuch

3.3 Hydrophobierung durch Naturharz und Bienenwachs

Damit die Verpackungs- und Kultivierungsschalen den Anforderungen während ihrer Nutzung entsprechen, musste der natürliche Faserverbund gegenüber Feuchtigkeit widerstandsfähiger gemacht werden. Hierzu wurden im Projekt verschiedene natürliche Hydrophobierungssysteme untersucht.

Als wesentliche Komponente kam Kiefernharz zum Einsatz. Dieses wurde fein vermahlen und während des Herstellungsprozesses homogen in den Luzernefaserverbund eingearbeitet. Durch diese gleichmäßige Verteilung verbessert das Harz die Wasserbeständigkeit der Schalen, ohne dass zusätzliche Beschichtungen erforderlich sind.

Ergänzend wurde Bienenwachs eingesetzt. Je nach Produktvariante erfolgte dessen Verwendung als Oberflächenbehandlung beziehungsweise als Bestandteil der Wachseinlage innerhalb der Kultivierungssets. Auch diese Materialien sollten im Rahmen der Kompostierungsversuche hinsichtlich ihres späteren Abbauverhaltens betrachtet werden.

Da sowohl Harz als auch Wachs direkten Einfluss auf die Wasseraufnahme der Materialien besitzen, war zu erwarten, dass sie auch den zeitlichen Verlauf der Desintegration beeinflussen. Aus diesem Grund wurden unterschiedliche Materialvarianten gezielt miteinander verglichen.



Abbildung 4: Harzplatten und Wachtissues für den Heimkompostierungsversuch

3.4 Massive Harzplatten als ergänzende Materialuntersuchung

Neben den eigentlichen Verpackungs- und Kultivierungsschalen wurden im Heimkompostversuch zusätzlich massive Harzplatten untersucht. Diese stellen keine reale Produktvariante dar, sondern dienen ausschließlich der Beurteilung des Harzes als Einzelmaterial.

Während das Harz in den entwickelten Schalen fein verteilt in den Faserverbund eingebunden ist, besitzen die Platten eine deutlich geringere spezifische Oberfläche. Dadurch unterscheiden sich die Bedingungen für den biologischen Abbau erheblich. Die Harzplatten wurden deshalb bewusst als ergänzende Worst-Case-Betrachtung in den Versuch aufgenommen.

Die Ergebnisse dieser Prüfkörper dienen ausschließlich der Einordnung des Materialverhaltens des Harzes selbst und dürfen nicht unmittelbar auf die fertigen Verpackungs- und Kultivierungsschalen übertragen werden.

3.5 Weiterentwicklung der Materialrezeptur

Während der Projektlaufzeit wurde die Materialzusammensetzung kontinuierlich weiterentwickelt. Die Kompostierungsversuche beziehen sich auf den damaligen Entwicklungsstand der Schalen, bei denen Luzerneheu, Naturharz beziehungsweise Bienenwachs die wesentlichen Materialkomponenten bildeten.

Im weiteren Projektverlauf wurde die Rezeptur um Erbsenpulver ergänzt. Ziel dieser Anpassung war eine Optimierung der Materialeigenschaften sowie des Formpressprozesses. Da diese Entwicklung erst nach Abschluss der praktischen Kompostierungsversuche erfolgte, konnte die finale Rezeptur innerhalb dieses Arbeitspakets nicht mehr experimentell untersucht werden.

Für die Bewertung der Versuchsergebnisse ist dieser zeitliche Zusammenhang von Bedeutung. Sämtliche dargestellten Ergebnisse beziehen sich daher auf die zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführung verfügbare Materialzusammensetzung.

3.6 Einordnung der verwendeten Materialien im Hinblick auf die Kompostierbarkeit

Die eingesetzten Materialien unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Funktion innerhalb des Produktes, weisen jedoch überwiegend einen natürlichen beziehungsweise biobasierten Ursprung auf. Luzerneheu, Hanffasern und Bienenwachs gelten grundsätzlich als biologisch abbaubar. Auch

Naturharz besitzt als pflanzlicher Rohstoff grundsätzlich geeignete Voraussetzungen für eine biologische Umsetzung. Für die Bewertung der Kompostierbarkeit ist jedoch nicht allein die Herkunft der Materialien ausschlaggebend, sondern vielmehr deren Verhalten innerhalb des gepressten Materialverbundes.

Aus diesem Grund beschränkte sich das Projekt bewusst nicht auf eine theoretische Einordnung der Einzelmaterialien. Stattdessen wurden vollständige Verpackungs- und Kultivierungsschalen sowie ausgewählte Materialkomponenten unter praxisnahen Bedingungen untersucht. Dadurch konnte beurteilt werden, wie sich die einzelnen Bestandteile im Verbund gegenseitig beeinflussen und welchen Einfluss sie auf den zeitlichen Verlauf der Desintegration besitzen.

Die nachfolgenden Kapitel beschreiben diese Untersuchungen zunächst unter industriell orientierten Bedingungen und anschließend anhand eines mehrmonatigen Heimkompostversuchs.

4. Untersuchung der Kompostierbarkeit unter industriell orientierten Bedingungen

Die erste Versuchsreihe zur Untersuchung der Kompostierbarkeit wurde gemeinsam mit dem Projektpartner durchgeführt. Ziel war es, das Verhalten der entwickelten Luzerneheu-basierten Materialverbunde unter definierten und reproduzierbaren Bedingungen zu untersuchen. Als fachlicher Orientierungsrahmen diente dabei die DIN EN 13432, welche die Anforderungen an industriell kompostierbare Verpackungen beschreibt. Eine vollständige Zertifizierung oder Normprüfung war jedoch nicht Bestandteil des Projektes.

Die Untersuchungen sollten insbesondere klären, ob sich die entwickelten Verpackungs- und Kultivierungsschalen unter Bedingungen einer industriellen Kompostierung ausreichend desintegrieren und welchen Einfluss die eingesetzten Hydrophobierungssysteme auf den zeitlichen Verlauf des Abbauprozesses besitzen. Gleichzeitig bildeten die Ergebnisse die Grundlage für den späteren Vergleich mit dem praxisnahen Heimkompostversuch.

4.1 Zielsetzung der Untersuchungen

Während der Entwicklung der Verpackungs- und Kultivierungsschalen stand nicht ausschließlich die Herstellung geeigneter Formkörper im Mittelpunkt. Ebenso wichtig war die Frage, wie sich die verwendeten Materialverbunde nach ihrer Nutzung verhalten und ob sie sich wieder in biologische Stoffkreisläufe zurückführen lassen.

Industrielle Kompostierungsanlagen bieten hierfür standardisierte und weitgehend reproduzierbare Bedingungen. Im Vergleich zu einem Gartenkompost lassen sich Temperatur, Feuchtigkeit, Sauerstoffversorgung und Rotteführung gezielt steuern, wodurch der biologische Abbau deutlich schneller und gleichmäßiger verläuft. Dadurch eignet sich dieser Versuchsansatz besonders, um unterschiedliche Materialvarianten miteinander zu vergleichen und erste Aussagen über ihr Desintegrationsverhalten zu treffen.

Für das Projekt stand dabei nicht die Erfüllung einzelner Zertifizierungskriterien im Vordergrund, sondern das grundsätzliche Verhalten der entwickelten Materialverbunde während des Kompostierungsprozesses. Insbesondere sollte untersucht werden,

- ob die Luzerneheu-basierten Schalen ihre ursprüngliche Form verlieren,
- welchen Einfluss Naturharz und Bienenwachs auf den Zerfall besitzen,
- wie sich unterschiedliche Materialvarianten im direkten Vergleich verhalten,

- und welche Erkenntnisse sich für die weitere Materialentwicklung ableiten lassen.

4.2 Versuchsaufbau

Der Kompostierungsversuch wurde an der Technischen Universität Dresden unter kontrollierten Bedingungen durchgeführt. Die Prüfkörper wurden in feinmaschigen Netzbeuteln eingebracht, wodurch sie während des gesamten Versuches eindeutig zugeordnet und für regelmäßige Kontrollen problemlos entnommen werden konnten.



Abbildung 5: Industrieller Kompostierungsversuch, Boxen von außen

Als Rottematerial diente ein homogen aufbereitetes Kompostsubstrat, dessen Temperatur, Feuchtigkeit und pH-Wert während des Versuches regelmäßig kontrolliert wurden. Durch das periodische Umsetzen des Komposts wurde eine gleichmäßige Durchlüftung sichergestellt und gleichzeitig verhindert, dass sich innerhalb des Komposthaufens Bereiche mit deutlich unterschiedlichen Rottebedingungen ausbildeten.



Abbildung 6: Industrieller Kompostierungsversuch, Einschichtung der Proben

Untersucht wurden verschiedene Varianten der entwickelten Luzerneheu-Schalen. Neben unbehandelten Referenzproben kamen auch hydrophobierte Schalen mit Naturharz beziehungsweise Wachskomponenten zum Einsatz. Dadurch konnte beurteilt werden, welchen Einfluss die unterschiedlichen Materialzusammensetzungen auf den biologischen Abbau besitzen.

Während des gesamten Versuchszeitraums wurden die Prüfkörper in regelmäßigen Abständen entnommen und dokumentiert. Neben der fotografischen Erfassung wurden insbesondere Veränderungen der Formstabilität, der Oberflächenstruktur sowie der fortschreitenden Fragmentierung bewertet. Ergänzend erfolgten Wägungen der Prüfkörper, um den Materialabbau auch quantitativ verfolgen zu können.

4.3 Verlauf des Kompostierungsversuchs

Nach dem Einbringen der Prüfkörper begann unter den kontrollierten Rottebedingungen unmittelbar die biologische Umsetzung der organischen Bestandteile. Bereits während der ersten Versuchstage erhöhte sich die Temperatur innerhalb des Komposts deutlich und erreichte die für industrielle Kompostierungsprozesse typischen thermophilen Bereiche. Diese Phase schafft günstige Bedingungen für den mikrobiellen Abbau organischer Materialien und stellt gleichzeitig einen wesentlichen Unterschied zur Heimkompostierung dar.

Bereits bei den ersten Zwischenkontrollen zeigten sich Veränderungen an den untersuchten Schalen. Die Oberflächen wirkten zunehmend aufgeraut und erste Fasern lösten sich aus dem Materialverbund. Besonders die unbehandelten Luzerneheu-Schalen verloren relativ früh ihre ursprüngliche Festigkeit und begannen sichtbar zu fragmentieren.

Mit fortschreitender Versuchsdauer nahm dieser Prozess weiter zu. Die Schalen verloren zunehmend ihre Formstabilität und zerfielen schrittweise in kleinere Materialbestandteile. Gleichzeitig entwickelte sich der Kompost selbst kontinuierlich weiter. Die hohen Temperaturen gingen im weiteren Verlauf langsam zurück und der Rotteprozess wechselte in eine ruhigere Umsetzungsphase.

Auch die hydrophobierten Materialvarianten zeigten während dieser Zeit eine fortschreitende Desintegration. Im Vergleich zu den unbehandelten Schalen verlief der Zerfall zwar etwas langsamer, dennoch war auch hier ein deutlicher Verlust der ursprünglichen Materialstruktur zu beobachten. Weder Naturharz noch Wachskomponenten verhinderten den biologischen Abbau des Faserverbundes.

Nach insgesamt 77 Versuchstagen wurde der Kompostierungsversuch beendet. Zu diesem Zeitpunkt waren sämtliche untersuchten Schalen deutlich desintegriert und nur noch in Form kleiner Materialfragmente vorhanden, die bereits weitgehend Bestandteil der umgebenden Kompostmatrix geworden waren.

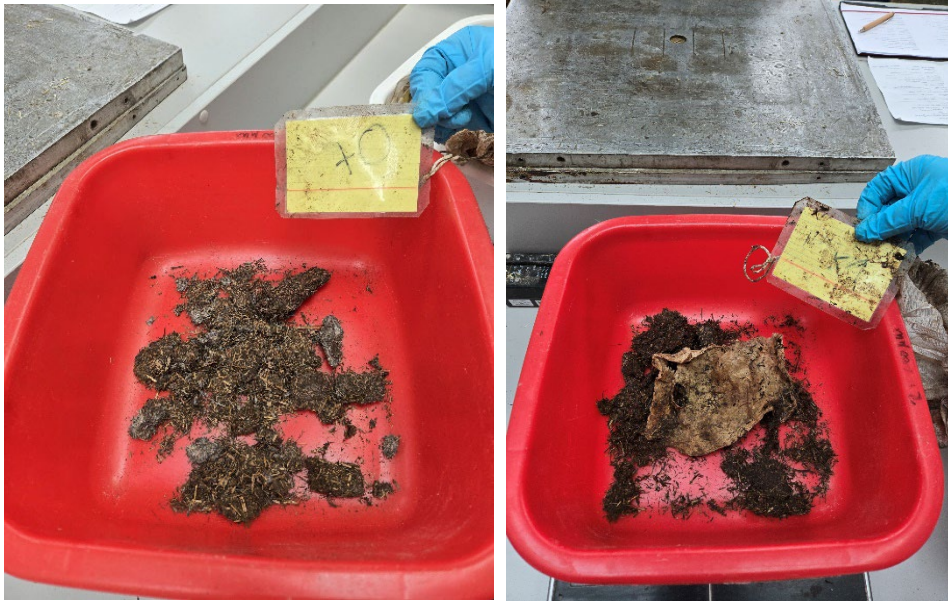


Abbildung 7: Bewertung der Proben aus dem Industriellen Kompostierungsversuch

4.4 Ergebnisse der Desintegration

Die Untersuchungen zeigten, dass alle untersuchten Luzerneheu-basierten Materialvarianten unter industriell orientierten Kompostierungsbedingungen einen deutlichen biologischen Zerfall aufweisen.

Die unbehandelten Schalen reagierten erwartungsgemäß am schnellsten auf die hohen Temperaturen und die intensive mikrobielle Aktivität. Bereits nach kurzer Zeit verloren sie ihre ursprüngliche Festigkeit und gingen zunehmend in einzelne Faserbestandteile über.

Bei den hydrophobierten Varianten verzögerte sich dieser Prozess geringfügig. Sowohl Naturharz als auch Wachskomponenten reduzierten zunächst die Wasseraufnahme der Materialien und beeinflussten dadurch den zeitlichen Verlauf der Desintegration. Im weiteren Rotteprozess verloren jedoch auch diese Schalen ihre Stabilität und wurden schrittweise in die Kompostmatrix integriert.

Die Unterschiede zwischen den Materialvarianten lagen somit überwiegend in der Geschwindigkeit des Zerfalls, nicht jedoch im grundsätzlichen Abbauverhalten. Alle untersuchten Verbundwerkstoffe zeigten eine deutliche Desintegration während des Versuchszeitraums.

4.5 Einordnung der Ergebnisse

Die Ergebnisse des industriell orientierten Kompostierungsversuchs bestätigen, dass sich die entwickelten Luzerneheu-basierten Materialverbunde unter kontrollierten Rottebedingungen grundsätzlich biologisch abbauen lassen. Gleichzeitig wurde deutlich, dass die eingesetzten Hydrophobierungssysteme zwar Einfluss auf die Geschwindigkeit der Desintegration besitzen, den biologischen Abbau jedoch nicht grundsätzlich verhindern.

Für die weitere Produktentwicklung stellte diese Erkenntnis eine wichtige Grundlage dar. Sie zeigte, dass sich die für die Gebrauchseigenschaften notwendige Hydrophobierung grundsätzlich mit einer späteren biologischen Verwertung vereinbaren lässt. Gleichzeitig wurde deutlich, dass die Materialzusammensetzung einen unmittelbaren Einfluss auf den zeitlichen Verlauf des Zerfalls besitzt und deshalb bei der weiteren Optimierung berücksichtigt werden muss.

Die Ergebnisse erlauben damit eine fundierte Bewertung des Materialverhaltens unter industriell orientierten Kompostierungsbedingungen. Eine Aussage über die Erfüllung sämtlicher Anforderungen

der DIN EN 13432 oder eine Zertifizierbarkeit der entwickelten Schalen kann daraus jedoch nicht abgeleitet werden, da hierfür zusätzliche normgerechte Prüfungen – beispielsweise zur biologischen Abbaubarkeit, zur Ökotoxizität oder zur Kompostqualität – erforderlich gewesen wären.

5. Heimkompostversuch unter praxisnahen Bedingungen

5.1 Motivation und Zielsetzung

Neben den Untersuchungen unter industriell orientierten Kompostierungsbedingungen stellte die Heimkompostierung einen zentralen Bestandteil dieses Arbeitspakets dar. Während die DIN EN 13432 einen etablierten Referenzrahmen für die Bewertung kompostierbarer Verpackungen unter standardisierten Bedingungen bietet, sollte im Projekt zusätzlich untersucht werden, wie sich die entwickelten Verpackungs- und Kultivierungsschalen unter den deutlich variableren Bedingungen eines privaten Gartenkomposts verhalten.

Diese Fragestellung ergab sich unmittelbar aus dem Gesamtkonzept des Projektes. Ziel war es nicht nur, Verpackungen und Kultivierungsschalen aus regional erzeugtem Luzerneheu zu entwickeln, sondern gleichzeitig einen möglichst geschlossenen biologischen Stoffkreislauf zu ermöglichen. Im Idealfall sollen die Produkte nach ihrer Nutzung ohne aufwendige Entsorgungswege direkt über den Heimkompost wieder in den natürlichen Kreislauf zurückgeführt werden können. Damit ergänzt der Heimkompost den Gedanken einer regionalen Wertschöpfungskette konsequent bis zum Ende des Produktlebenszyklus.

Gleichzeitig unterscheiden sich die Bedingungen eines Heimkomposts grundlegend von denen einer industriellen Kompostierungsanlage. Während dort Temperatur, Feuchtigkeit, Sauerstoffversorgung und Rotteführung gezielt gesteuert werden können, unterliegt ein Gartenkompost natürlichen Schwankungen. Witterung, Jahreszeit, Materialzusammensetzung sowie die Bewirtschaftung des Komposts beeinflussen den biologischen Abbau in erheblichem Maße. Dadurch entstehen Bedingungen, die zwar weniger reproduzierbar sind, die spätere Nutzung durch Verbraucher jedoch wesentlich realistischer widerspiegeln.

Vor diesem Hintergrund wurde ein eigener Versuchskompost aufgebaut und über einen Zeitraum von rund sechs Monaten begleitet. Ziel war es, die entwickelten Materialien unter praxisnahen Bedingungen zu untersuchen und ihre Desintegration während des natürlichen Rotteprozesses kontinuierlich zu dokumentieren. Anders als bei einer normgerechten Laboruntersuchung stand dabei nicht die Einhaltung definierter Prüfparameter im Vordergrund, sondern die Beobachtung des Materialverhaltens unter realen Bedingungen.

Hierfür wurden sowohl einzelne Materialkomponenten als auch vollständige Verpackungs- und Kultivierungsschalen in den Kompost eingebracht. Durch regelmäßige Probeentnahmen konnten Veränderungen der Materialstruktur über den gesamten Versuchszeitraum verfolgt und fotografisch dokumentiert werden. Auf diese Weise ließ sich nachvollziehen, wie sich die verschiedenen Materialien während der einzelnen Rottephasen verhielten und welche Unterschiede sich zwischen den jeweiligen Materialvarianten ergaben.

Die Ergebnisse des Heimkompostversuchs sollten anschließend mit den Erkenntnissen aus der industriell orientierten Kompostierung verglichen werden. Dadurch konnte beurteilt werden, inwieweit sich die unter standardisierten Bedingungen beobachteten Materialeigenschaften auch unter praxisnahen Bedingungen bestätigen lassen und welche zusätzlichen Erkenntnisse sich für die Weiterentwicklung der Verpackungs- und Kultivierungsschalen ableiten lassen.

5.2 Aufbau und Entwicklung des Versuchskomposts

Um die Kompostierbarkeit der entwickelten Verpackungs- und Kultivierungsschalen unter realitätsnahen Bedingungen untersuchen zu können, wurde ein eigener Versuchskompost aufgebaut. Ziel war es, über einen längeren Zeitraum einen möglichst natürlichen Rotteprozess zu erzeugen und diesen kontinuierlich zu begleiten. Anders als bei einer standardisierten Labor- oder Anlagenkompostierung sollten dabei bewusst die Bedingungen eines privat betriebenen Gartenkomposts nachgebildet werden.

Als Ausgangsmaterial dienten überwiegend pflanzliche Reststoffe aus den Biomärkten von Vorwerk Podemus. Hierbei handelte es sich vor allem um Gemüse- und Obstabfälle, die im täglichen Betrieb anfielen und aufgrund ihrer Zusammensetzung eine gute Grundlage für einen biologischen Rotteprozess darstellen. Ergänzend wurden Holzhackschnitzel als Strukturmaterial eingesetzt. Diese sorgen für eine lockere Kompoststruktur, verbessern die Sauerstoffversorgung innerhalb des Komposthaufens und verhindern eine übermäßige Verdichtung der feuchten Gemüseabfälle. Gleichzeitig unterstützen sie den Wasserhaushalt des Komposts, indem sie überschüssige Feuchtigkeit aufnehmen und gleichmäßig verteilen.

Der Kompost wurde schichtweise aufgebaut. Organisches Material und Strukturmaterial wurden dabei abwechselnd eingebracht und miteinander vermischt, um eine möglichst gleichmäßige Verteilung der unterschiedlichen Bestandteile zu erreichen. Bereits beim Aufbau wurde darauf geachtet, ausreichend Hohlräume innerhalb des Komposts zu erhalten, damit Mikroorganismen dauerhaft mit Sauerstoff versorgt werden und sich eine aktive Rotte entwickeln kann.



Abbildung 8: Heimkompost Aufbau

Nach dem Aufbau begann zunächst die Anrottephase. In dieser Zeit entwickelte sich der Kompost jedoch zunächst langsamer als erwartet. Die Temperatur stieg nur verzögert an, sodass zunächst keine ausgeprägte thermophile Rottephase erreicht wurde. Dies machte deutlich, dass sich ein Heimkompost nicht unmittelbar nach seinem Aufbau stabil entwickelt, sondern dass sich die biologischen Prozesse zunächst etablieren müssen.

Um die Rotteentwicklung zu unterstützen, wurde der Kompost mehrfach umgesetzt und erneut durchmischt. Gleichzeitig wurde zusätzliches Strukturmaterial eingebracht, um die Belüftung weiter zu verbessern und verdichtete Bereiche aufzulockern. Erst nach diesen Maßnahmen stellte sich eine deutlich aktivere mikrobielle Umsetzung ein. Mit steigenden Temperaturen entwickelte sich schließlich ein stabiler Rotteprozess, der die Grundlage für die eigentlichen Kompostierungsversuche bildete.

Diese Entwicklung verdeutlicht einen wesentlichen Unterschied zwischen Heimkompost und industrieller Kompostierung. Während industrielle Anlagen mit definierten Ausgangsbedingungen arbeiten und der Prozess gezielt gesteuert wird, hängt die Entwicklung eines Gartenkomposts wesentlich stärker von den eingesetzten Materialien, der Witterung sowie der regelmäßigen Pflege des Komposts ab. Das Umsetzen und Nachsteuern sind daher keine Besonderheit des Versuchs, sondern typische Bestandteile einer praxisgerechten Kompostbewirtschaftung.



Abbildung 9: Heimkompost im Rotteverlauf

Erst nachdem sich der Kompost stabil entwickelt hatte und eine ausreichende biologische Aktivität erkennbar war, wurden die eigentlichen Prüfkörper eingebracht. Dadurch konnte sichergestellt werden, dass alle untersuchten Materialien vergleichbaren Rottebedingungen ausgesetzt waren und die anschließenden Beobachtungen auf einem aktiven Kompostierungsprozess basierten.

5.3 Vorbereitung und Einbringung der Prüfkörper

Nachdem sich im Versuchskompost eine stabile Rotte entwickelt hatte, konnten die eigentlichen Kompostierungsversuche beginnen. Hierfür wurden die zuvor hergestellten Prüfkörper vorbereitet, dokumentiert und anschließend in den Kompost eingebracht. Ziel war es, die verschiedenen Materialvarianten über den gesamten Versuchszeitraum unter möglichst vergleichbaren Bedingungen zu beobachten und ihre Veränderungen kontinuierlich zu dokumentieren.



Abbildung 10: Einbringen der Prüfkörper im Heimkompostversuch

Die Auswahl der Prüfkörper orientierte sich dabei an den im Projekt entwickelten Materialien und Produktvarianten. Neben einzelnen Materialkomponenten wurden insbesondere vollständige

Verpackungs- und Kultivierungsschalen untersucht, da diese den späteren Anwendungsfall möglichst realitätsnah abbilden. Ergänzend wurden ausgewählte Einzelmaterialien in den Versuch aufgenommen, um deren Verhalten unabhängig vom Materialverbund beurteilen zu können.

Zu den untersuchten Prüfkörpern gehörten unter anderem:

- Verpackungsschalen aus Luzerneheu,
- Kultivierungsschalen für die Microgreen-Anzucht,
- Hanffasermatten,
- Luzerneplatten beziehungsweise gepresste Luzerneprüfkörper ohne Additive,
- Naturharz in unterschiedlichen Zerkleinerungs- beziehungsweise Fraktionsstufen
- massivere Harzplatten
- Wachsinslays und weitere Bienenwachsproben sowie
- weitere Materialvarianten entsprechend dem jeweiligen Entwicklungsstand der Produktrezeptur.

Alle Prüfkörper wurden vor Versuchsbeginn fotografisch dokumentiert und eindeutig gekennzeichnet. Dadurch konnte während der späteren Probeentnahmen jederzeit nachvollzogen werden, um welche Materialvariante es sich handelte und wie sich diese im Verlauf des Kompostierungsprozesses verändert hatte.

Für die Kompostierung wurden die Prüfkörper in feinmaschige Netzbeutel eingebracht. Diese ermöglichten es, die einzelnen Materialien während der gesamten Versuchsdauer sicher im Kompost zu positionieren und bei den regelmäßigen Probeentnahmen wiederzufinden, ohne die bereits fortgeschrittene Desintegration zu beeinträchtigen. Gleichzeitig erlaubte diese Vorgehensweise eine direkte Zuordnung der einzelnen Materialien über den gesamten Versuchszeitraum.

Die Netzbeutel wurden an verschiedenen Positionen innerhalb des Komposts eingebracht. Dabei wurde bewusst darauf geachtet, dass sich die Prüfkörper innerhalb der aktiven Rottezone befanden und möglichst gleichmäßigen Bedingungen ausgesetzt waren. Dennoch war bekannt, dass innerhalb eines Heimkomposts natürliche Unterschiede hinsichtlich Temperatur, Feuchtigkeit und Sauerstoffversorgung auftreten. Diese Schwankungen gehören zu einem praxisnahen Kompostierungsprozess und waren daher ausdrücklich Bestandteil der Untersuchung.

Die in den Versuch eingebrachten Materialien werden nachfolgend exemplarisch für ihre Gruppe dargestellt:



Abbildung 11: Verschiedene Prüfkörper in der Gruppe Luzernefasern, Luzernepressformen ohne Additive in verschiedenen Zuschnitten



Abbildung 12: Prüfkörper der Gruppe Hanfmatten, links kleingeschnitten und rechts vorab mechanisch aufgebrochen



Abbildung 13: Prüfkörper der Gruppe Harz verschieden fraktioniert und Bienenwachs in verschiedenen Zuschnitten und ganze Inlayschale



Abbildung 14: Prüfkörper Komplette Kultivierungsschale

Nach dem Einbringen der Prüfkörper begann die eigentliche Beobachtungsphase des Versuchs. Während der folgenden Monate wurde der Kompost regelmäßig kontrolliert und entsprechend einer üblichen Kompostbewirtschaftung umgesetzt. Zu festgelegten Zeitpunkten erfolgten Probeentnahmen, bei denen sämtliche Prüfkörper geborgen, fotografisch dokumentiert und hinsichtlich ihres Materialzustandes beurteilt wurden. Anschließend wurden sie wieder an vergleichbarer Position in den Kompost eingebracht, sodass sich der Rotteprozess kontinuierlich fortsetzen konnte.

Bereits bei der Planung des Versuchs wurde festgelegt, dass nicht ausschließlich der Endzustand bewertet werden sollte. Vielmehr sollte insbesondere die Entwicklung der Materialien während der verschiedenen Rottephasen nachvollzogen werden. Aus diesem Grund wurde jeder Entnahmezeitpunkt umfassend dokumentiert. Dadurch ließ sich später nicht nur feststellen, ob ein Material desintegriert war, sondern auch, wann erste Veränderungen auftraten, wie sich die Materialstruktur entwickelte und welche Unterschiede zwischen den einzelnen Materialvarianten bestanden.

Die erste Probeentnahme erwies sich dabei als besonders aussagekräftig. Zu diesem Zeitpunkt waren sämtliche Prüfkörper noch eindeutig identifizierbar, gleichzeitig zeigten sich jedoch bereits die ersten charakteristischen Veränderungen der Materialstruktur. Dadurch ließ sich der Beginn des biologischen Abbauprozesses besonders gut dokumentieren. Im weiteren Versuchsverlauf nahm die Desintegration kontinuierlich zu, sodass einzelne Materialien zunehmend Bestandteil der Kompostmatrix wurden und auf Fotografien nur noch eingeschränkt voneinander zu unterscheiden waren.

5.4 Erste Probeentnahme – Beginn des biologischen Abbaus

Nach einer definierten Verweildauer im Kompost erfolgte die erste Probeentnahme der eingebrachten Prüfkörper. Zu diesem Zeitpunkt befand sich der Kompost bereits in einer aktiven Rottephase und wies eine deutlich erhöhte mikrobielle Aktivität auf. Ziel der ersten Zwischenuntersuchung war es, den Beginn der Desintegration zu dokumentieren und erste Unterschiede zwischen den einzelnen Materialvarianten sichtbar zu machen.

Nach der Entnahme wurden sämtliche Netzbeutel geöffnet und die Prüfkörper einzeln aus dem Kompost entnommen. Bereits während dieses Arbeitsschrittes zeigte sich, dass die Materialien Feuchtigkeit aufgenommen hatten und sich ihre Oberflächen gegenüber dem Ausgangszustand sichtbar verändert hatten. Gleichzeitig waren sämtliche Prüfkörper noch vollständig identifizierbar, wodurch sich ihr Zustand sehr gut dokumentieren und miteinander vergleichen ließ.

Die Luzerneheu-basierten Schalen zeigten bereits erste deutliche Veränderungen. Die ursprünglich feste Oberfläche wirkte weicher und unregelmäßiger, einzelne Fasern begannen sich aus dem Materialverbund zu lösen und die Kanten verloren zunehmend ihre ursprüngliche Schärfe. Trotz dieser Veränderungen besaßen die Schalen noch eine weitgehend zusammenhängende Struktur und konnten ohne Beschädigung entnommen werden.



Abbildung 15 Verschiedene Prüfkörper in der Gruppe Luzernefasern, Luzernepressformen ohne Additive in verschiedenen Zuschnitten nach der ersten Probeentnahme

Auch die Kultivierungsschalen wiesen erste Anzeichen des biologischen Abbaus auf. Insbesondere an den dauerhaft feuchten Bereichen waren Auflockerungen der Materialstruktur sowie erste faserige Ablösungen erkennbar. Die Form der Schalen blieb jedoch noch erhalten, sodass sich der beginnende Rotteprozess sehr gut nachvollziehen ließ.



Abbildung 16: Prüfkörper Komplette Kultivierungsschale nach der ersten Probeentnahme

Die Hanffasermatten hatten sich während der Kompostierung deutlich mit Feuchtigkeit vollgesogen. Gleichzeitig begann sich ihre Faserstruktur aufzulockern, wodurch einzelne Fasern bereits aus dem ursprünglichen Verbund herausgelöst werden konnten. Auch hier war die ursprüngliche Form noch gut erkennbar, allerdings zeigte sich bereits deutlich der Beginn des biologischen Abbaus.



Abbildung 17: Prüfkörper der Gruppe Hanfmatten nach der ersten Probeentnahme

Ein anderes Bild ergab sich bei den massiven Harzplatten. Diese zeigten lediglich oberflächliche Veränderungen. An einzelnen Bereichen waren erste Verfärbungen sowie leichte Veränderungen der Oberflächenstruktur zu erkennen. Die Platten selbst blieben jedoch formstabil und unterschieden sich damit deutlich von den untersuchten Naturfaserverbunden. Die Wachsinslays und das zerkleinerte Harz zeigten ebenfalls deutliche Anzeichen eines beginnenden Abbauprozesses.



Abbildung 18: Prüfkörper der Gruppe Harz und Bienenwachs nach der ersten Probenahme

Insgesamt bestätigte bereits die erste Probeentnahme, dass der biologische Abbau der Naturfaserverbunde eingesetzt hatte. Die Veränderungen unterschieden sich zwar hinsichtlich ihrer Ausprägung zwischen den einzelnen Materialvarianten, bei allen Luzerneheu-basierten Prüfkörpern waren jedoch erste deutliche Anzeichen einer fortschreitenden Desintegration erkennbar. Gleichzeitig zeigte sich, dass die massive Form der Harzplatten den biologischen Angriff deutlich verlangsamte und damit ein anderes Verhalten aufwies als das fein im Materialverbund verteilte Harz.

Gerade diese erste Zwischenuntersuchung erwies sich im weiteren Projektverlauf als besonders wertvoll. Sie dokumentiert den Übergang vom unveränderten Prüfkörper zum beginnenden biologischen Abbau und ermöglicht einen direkten Vergleich aller untersuchten Materialien. Im weiteren Verlauf der Kompostierung nahm die Desintegration kontinuierlich zu, sodass einzelne Prüfkörper zunehmend ihre ursprüngliche Form verloren und schließlich kaum noch voneinander unterschieden werden konnten.

5.5 Entwicklung bis zum Versuchsende

Nach der ersten Probeentnahme wurden sämtliche Prüfkörper wieder an vergleichbarer Position in den Versuchskompost eingebracht. Während der folgenden Monate entwickelte sich der Rotteprozess kontinuierlich weiter. Der Kompost wurde regelmäßig kontrolliert und entsprechend einer praxisüblichen Bewirtschaftung umgesetzt, um eine gleichmäßige Durchmischung und ausreichende Sauerstoffversorgung sicherzustellen.

Mit zunehmender Versuchsdauer verstärkte sich die Desintegration der Luzerneheu-basierten Materialien deutlich. Die zuvor noch klar erkennbaren Schalen verloren zunehmend ihre Formstabilität und zerfielen schrittweise in kleinere Faserverbunde. Gleichzeitig wurden diese Fragmente immer stärker in die umgebende Kompostmatrix eingearbeitet, sodass eine eindeutige Zuordnung einzelner Prüfkörper zunehmend erschwert wurde.

Auch die Hanffasermatten verloren ihre ursprüngliche Struktur. Die Fasern wurden im Verlauf der Rotte immer feiner und gingen schließlich weitgehend in den umgebenden Kompost über. Ein ähnliches Verhalten zeigten die übrigen pflanzlichen Materialbestandteile der Verpackungs- und Kultivierungsschalen.

Die regelmäßigen Zwischenkontrollen bestätigten damit den kontinuierlichen Fortschritt des biologischen Abbaus. Während sich die Veränderungen zu Beginn des Versuches noch gut fotografisch dokumentieren ließen, nahm der Informationsgehalt der späteren Aufnahmen deutlich ab. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Prüfkörper mit fortschreitender Desintegration ihre ursprüngliche Form verloren und schließlich kaum noch eindeutig von der umgebenden Kompostmasse unterschieden werden konnten.



Abbildung 19: Exemplarische Prüfkörper bei zweiter Probenahme für den fortschreitenden Abbau

Aus diesem Grund wurde im weiteren Projektverlauf der Schwerpunkt der Dokumentation zunehmend auf die Beschreibung des Materialzustandes und die abschließende Bewertung der einzelnen Materialgruppen gelegt. Lediglich die massiven Harzplatten blieben während des gesamten Versuchszeitraums als eigenständige Prüfkörper sichtbar und konnten deshalb bis zur Abschlussuntersuchung kontinuierlich beobachtet werden.

Nach Abschluss des rund sechsmonatigen Versuches wurden sämtliche Prüfkörper ein letztes Mal geborgen und bewertet. Zu diesem Zeitpunkt waren die Luzerneheu-basierten Verpackungs- und Kultivierungsschalen sowie die weiteren pflanzlichen Materialbestandteile weitgehend beziehungsweise vollständig in die Kompostmatrix übergegangen. Lediglich die massiven Harzplatten waren weiterhin als eigenständige Prüfkörper vorhanden und bildeten damit die einzige Materialgruppe, die auch nach Abschluss des Versuchs noch eindeutig identifiziert werden konnte.

5.6 Ergebnisse des Heimkompostversuchs

Die über den gesamten Versuchszeitraum durchgeführten Beobachtungen zeigen, dass sich die untersuchten Materialien hinsichtlich ihres Abbauverhaltens deutlich unterscheiden. Während die pflanzlichen Faserverbunde im Verlauf der Kompostierung ihre ursprüngliche Struktur weitgehend verloren und schließlich in die Kompostmatrix übergingen, blieben einzelne Materialien länger erhalten. Die Unterschiede lassen sich im Wesentlichen auf die Materialzusammensetzung sowie die Art der Verarbeitung innerhalb des Materialverbundes zurückführen.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der einzelnen Materialgruppen zusammenfassend dargestellt und hinsichtlich ihrer Bedeutung für die Produktentwicklung eingeordnet.

Luzerneheu-basierte Verpackungs- und Kultivierungsschalen

Die Verpackungs- und Kultivierungsschalen aus Luzerneheu bildeten den Schwerpunkt der Untersuchungen. Bereits bei der ersten Probeentnahme waren erste Veränderungen der Materialstruktur erkennbar. Die Schalen nahmen Feuchtigkeit auf, verloren zunehmend ihre ursprüngliche Festigkeit und zeigten erste Auflösungserscheinungen an den Kanten und Oberflächen. Gleichzeitig begann sich der Faserverbund zu öffnen, wodurch einzelne Pflanzenfasern sichtbar wurden.

Mit fortschreitender Kompostierung setzte sich dieser Prozess kontinuierlich fort. Die Schalen verloren zunehmend ihre Formstabilität und zerfielen schrittweise in kleinere Faserverbunde. Während die ursprüngliche Geometrie zu Beginn des Versuches noch deutlich erkennbar war, gingen die Materialien im weiteren Verlauf zunehmend in die umgebende Kompostmatrix über. Gegen Ende des Versuchs konnten die Schalen nicht mehr eindeutig identifiziert werden, da sie weitgehend beziehungsweise vollständig desintegriert waren.

Die Ergebnisse zeigen, dass der verwendete Luzernefaserverbund auch unter den wechselnden Bedingungen eines Heimkomposts einen fortschreitenden biologischen Abbau aufweist. Gleichzeitig bestätigte sich, dass die Formpressung die grundsätzliche Kompostierbarkeit des eingesetzten Pflanzenmaterials nicht verhindert.

Hanffasermatten

Die eingesetzten Hanffasermatten wurden ergänzend untersucht, da sie Bestandteil der entwickelten Kultivierungssets sind und gemeinsam mit den Kultivierungsschalen entsorgt werden können.

Bereits nach kurzer Zeit nahmen die Matten große Mengen Wasser auf und zeigten erste Veränderungen ihrer Faserstruktur. Im weiteren Verlauf lockerte sich der Materialverbund zunehmend auf und einzelne Fasern wurden aus dem ursprünglichen Gefüge herausgelöst. Mit fortschreitender Rotte verloren die Matten ihre ursprüngliche Form und gingen schließlich weitgehend in die Kompostmatrix über.

Damit zeigte sich auch für dieses Material ein günstiges Verhalten hinsichtlich der biologischen Verwertung. Da die Hanffasermatten ausschließlich aus pflanzlichen Fasern bestehen, fügt sich ihr Abbauverhalten gut in das Gesamtkonzept der entwickelten Kultivierungssets ein.

Schalen mit Naturharz

Ein besonderer Schwerpunkt der Untersuchungen lag auf den Schalen, bei denen Naturharz als Hydrophobierung in den Luzernefaserverbund eingearbeitet wurde. Für die Produktentwicklung war von besonderem Interesse, ob diese zusätzliche Komponente den biologischen Abbau der Schalen wesentlich beeinflusst.

Während der Kompostierung zeigte sich, dass sich die hydrophobierten Schalen zunächst etwas langsamer veränderten als unbehandelte Materialvarianten. Die Wasseraufnahme war zu Beginn geringer und die ursprüngliche Form blieb etwas länger erhalten. Im weiteren Verlauf setzte jedoch auch hier eine deutliche Desintegration des gesamten Materialverbundes ein.

Die Beobachtungen zeigen, dass das fein verteilte Harz den biologischen Abbau der Luzerneverbunde nicht verhindert. Vielmehr blieb der Faserverbund weiterhin für Mikroorganismen zugänglich und verlor während der Rotte kontinuierlich seine Stabilität. Für die entwickelte Materialrezeptur stellt

dies eine wichtige Erkenntnis dar, da die gewünschte Verbesserung der Gebrauchseigenschaften nicht grundsätzlich im Widerspruch zu einer späteren biologischen Verwertung steht.

Additive: Wachsinlays und Harz

Neben den Luzerneheu-basierten Materialverbunden wurden im Heimkompostversuch auch die eingesetzten Hydrophobierungsmaterialien separat betrachtet. Hierzu gehörten Wachsinlays, zerkleinertes Harz sowie massive Harzplatten. Ziel war es, das Verhalten dieser Materialien unabhängig von den vollständigen Schalen beurteilen und mit ihrer Einbindung in den Faserverbund vergleichen zu können.

Die Wachsinlays und das zerkleinerte Harz zeigten im Vergleich zu den Luzernefaserverbunden einen langsameren Abbau. Während die pflanzlichen Faserbestandteile bereits früh ihre Struktur verloren, blieben die hydrophobierenden Materialien zunächst länger erkennbar. Im weiteren Verlauf des Versuchs nahmen jedoch auch bei den Wachsinlays die sichtbaren Materialreste kontinuierlich ab. Zum Abschluss des Heimkompostversuchs konnten sie nicht mehr eindeutig als eigenständige Bestandteile identifiziert werden und wurden daher als abgebaut bewertet.

Ein vergleichbares Ergebnis zeigte sich beim zerkleinerten Harz. Die einzelnen Harzstücke blieben zunächst länger erhalten als die Luzernefasern, wurden mit fortschreitender Rotte jedoch zunehmend in die Kompostmasse eingearbeitet. Am Ende des Versuchs waren sie in der Kompostmatrix nicht mehr eindeutig auffindbar beziehungsweise von dieser zu unterscheiden. Das zerkleinerte Harz wurde daher ebenfalls als abgebaut bewertet.

Deutlich anders verhielten sich die massiven Harzplatten. Sie blieben während des gesamten Versuchszeitraums weitgehend formstabil. Zwar zeigten sich oberflächliche Veränderungen sowie erste Anzeichen eines beginnenden Abbaus, ein mit den Wachsinlays, dem zerkleinerten Harz oder den Luzerneheu-basierten Verbundwerkstoffen vergleichbarer Zerfall konnte jedoch nicht festgestellt werden. Auch nach Abschluss des Versuchs waren die Platten weiterhin eindeutig identifizierbar.

Die Unterschiede verdeutlichen den erheblichen Einfluss der Materialform auf das Verhalten im Kompost. Wachsinlays und zerkleinertes Harz besitzen im Verhältnis zu ihrer Masse eine größere Oberfläche und können dadurch stärker mit Feuchtigkeit, Mikroorganismen und der umgebenden Kompostmasse in Kontakt treten. Die massiven Harzplatten weisen dagegen eine deutlich geringere spezifische Oberfläche auf, wodurch der Abbau wesentlich langsamer verläuft.

Für die Bewertung der tatsächlich entwickelten Schalen ist daher insbesondere das Verhalten des fein beziehungsweise zerkleinert eingesetzten Harzes maßgeblich. Die Ergebnisse zeigen, dass sowohl die Wachskomponenten als auch das zerkleinerte Harz zwar langsamer als die pflanzlichen Faserbestandteile abgebaut wurden, am Ende des Heimkompostversuchs jedoch nicht mehr als eigenständige Materialreste erkennbar waren. Die massiven Harzplatten stellen demgegenüber eine ergänzende Betrachtung des Harzes unter ungünstigen geometrischen Bedingungen dar und sind nicht repräsentativ für seine tatsächliche Verwendung innerhalb der Schalen.

Gesamtbewertung der Materialgruppen

Die Ergebnisse des Heimkompostversuchs zeigen insgesamt ein konsistentes Bild. Sämtliche pflanzenbasierten Materialverbunde wiesen während des Versuchs einen kontinuierlichen biologischen Abbau auf. Unterschiede bestanden vor allem hinsichtlich der Geschwindigkeit der Desintegration, nicht jedoch hinsichtlich des grundsätzlichen Abbauverhaltens.

Besonders hervorzuheben ist das Verhalten der hydrophobierten Schalen. Trotz der verbesserten Wasserbeständigkeit während der Nutzungsphase konnte kein grundsätzlicher Widerspruch zwischen

Gebrauchstauglichkeit und späterer Kompostierung festgestellt werden. Gleichzeitig machte der Vergleich mit den massiven Harzplatten deutlich, dass die Art der Einbindung eines Materials einen entscheidenden Einfluss auf dessen späteres Verhalten im Kompost besitzt.

Für die weitere Entwicklung der Verpackungs- und Kultivierungsschalen stellt dies eine wesentliche Erkenntnis dar. Die Kombination aus Luzernefasern und fein eingearbeitetem Naturharz ermöglicht eine Verbesserung der Gebrauchseigenschaften, ohne den biologischen Abbau des gesamten Materialverbundes grundsätzlich zu verhindern.

5.7 Einordnung und Aussagekraft des Heimkompostversuchs

Der Heimkompostversuch lieferte wichtige Erkenntnisse zum Verhalten der entwickelten Verpackungs- und Kultivierungsschalen unter praxisnahen Bedingungen. Über einen Zeitraum von rund sechs Monaten konnte die Entwicklung der unterschiedlichen Materialverbunde kontinuierlich begleitet und dokumentiert werden. Dadurch ließ sich der biologische Abbau nicht nur am Ende des Versuchs beurteilen, sondern bereits während der einzelnen Rottephasen nachvollziehen.

Die Untersuchungen zeigen, dass die Luzerneheu-basierten Materialverbunde unter den Bedingungen eines aktiv bewirtschafteten Gartenkomposts ihre ursprüngliche Struktur schrittweise verlieren und schließlich weitgehend in die Kompostmatrix übergehen. Gleichzeitig wurde deutlich, dass die eingesetzten Hydrophobierungssysteme den zeitlichen Verlauf der Desintegration zwar beeinflussen können, den biologischen Abbau des Faserverbundes jedoch nicht grundsätzlich verhindern.

Besonders hervorzuheben ist, dass die Ergebnisse unter realen Kompostierungsbedingungen erzielt wurden. Im Gegensatz zu standardisierten Labor- oder Anlagenversuchen unterlag der Versuch den natürlichen Schwankungen eines Gartenkomposts. Temperatur, Feuchtigkeit und mikrobielle Aktivität veränderten sich während des Versuchs kontinuierlich und wurden zusätzlich durch Witterungseinflüsse sowie die regelmäßige Pflege des Komposts beeinflusst. Gerade diese Bedingungen spiegeln jedoch die spätere Entsorgungssituation beim Endverbraucher wesentlich besser wider als standardisierte Prüfverfahren.

Die im Projekt gewählte Vorgehensweise erlaubt daher eine praxisnahe Bewertung der entwickelten Materialien. Gleichzeitig ersetzt der Heimkompostversuch keine normgerechte Zertifizierungsprüfung. Aussagen über eine Zertifizierbarkeit nach Programmen wie OK compost HOME oder über die vollständige Erfüllung aller Anforderungen entsprechender Prüfstandards lassen sich aus den vorliegenden Untersuchungen nicht ableiten. Hierfür wären weitere standardisierte Prüfungen erforderlich, beispielsweise zur biologischen Mineralisierung, zur Kompostqualität oder zu möglichen Auswirkungen auf das Pflanzenwachstum.

Unabhängig davon liefert der Versuch eine belastbare Grundlage für die Bewertung der entwickelten Materialverbunde im Rahmen dieses Projektes. Insbesondere der direkte Vergleich zwischen den einzelnen Materialvarianten sowie die kontinuierliche Dokumentation des Rotteverlaufs ermöglichen eine fundierte Einordnung des Materialverhaltens und liefern wertvolle Hinweise für die weitere Produktentwicklung.

6. Geplanter Kompostqualitätsversuch

Im Rahmen des Arbeitspakets wurde nicht nur die Desintegration der Materialien unter verschiedenen Kompostbedingungen untersucht, sondern darüber hinaus ein detailliertes Konzept für einen Kompostqualitätsversuch erarbeitet. Dieser Versuch sollte im Anschluss an die Desintegrationsversuche durchgeführt werden und prüfen, ob der entstehende Kompost die Anforderungen an eine sichere und pflanzenverträgliche Verwertung erfüllt.

Aufgrund des Reifegrades des Komposts und der zeitlichen Begrenzung des Projekts konnte der Versuch nicht praktisch umgesetzt werden. Die vollständige Planung des Versuchs stellt jedoch ein eigenständiges Ergebnis des Arbeitspakets dar und bildet eine fachlich belastbare Grundlage für eine spätere Durchführung.

6.1 Ausgangslage und Zielsetzung des geplanten Versuchs

Die Desintegrationsversuche haben gezeigt, dass die Luzerne-basierten Materialien unter industriell orientierten und heimkompostähnlichen Bedingungen sichtbar zerfallen und weitgehend in die Kompostmatrix übergehen. Damit ist die Desintegration qualitativ nachgewiesen.

Für eine umfassende Bewertung im Sinne der DIN EN 13432 wäre zusätzlich zu untersuchen:

- ob der entstehende Kompost pflanzenverträglich ist,
- ob keine problematische Anreicherung von Schadstoffen erfolgt,
- und ob der Kompost strukturell und chemisch der Qualität eines reifen Komposts entspricht.

Der geplante Kompostqualitätsversuch sollte daher folgende Fragen beantworten:

1. Hat der Kompost aus der Verwertung der Verpackungs- und Kultivierungsschalen negative Auswirkungen auf Keimung und Pflanzenwachstum?
2. Hält der Kompost die wesentlichen chemischen Anforderungen (z. B. Schwermetallgrenzwerte) ein?
3. Unterscheidet sich der Kompost qualitativ von einem Referenzkompost ohne Materialzugabe?

6.2 Versuchsdesign – Aufbau und Prüfvarianten

Das Versuchsdesign wurde so ausgearbeitet, dass es sich eng an die Anforderungen der DIN EN 13432 anlehnt, ohne eine vollständige Normprüfung zu imitieren. Geplant waren mehrere Kompostvarianten und Substratmischungen.

6.2.1 Kompostvarianten

Vorgesehen waren mindestens drei Komposttypen:

1. Referenzkompost (ohne Projektmaterial)
 - Kompost aus üblichen organischen Reststoffen (z. B. Grünschnitt, Stallmist, Marktgemüseabfälle)
 - Dient als Vergleichsmaßstab
2. Projektkompost „mit Verpackungsschalen“
 - Kompost, in den während der Rotte gezielt Luzerne-Verpackungsschalen eingebracht wurden
 - Vollständig abgerottet und gereift
3. Projektkompost „mit Kultivierungsschalen / -sets“
 - Kompost, in den Kultivierungsschalen mit Hanfmatten und hydrophober Ausrüstung eingebracht wurden
 - Ebenfalls bis in die Reifephase geführt

Für alle Kompostvarianten war vorgesehen, dass sie bis zum Ende der Rotte und in eine erkennbare Reifephase geführt werden (mehrere Monate Nachrottung).

6.2.2 Analytische Kompostcharakterisierung

Geplant war eine grundlegende chemische Charakterisierung der Komposte, angelehnt an DIN EN 13432:

- pH-Wert
- Leitfähigkeit / Salzgehalt
- Glühverlust (organische Substanz)
- Trockensubstanzgehalt
- Schwermetallgehalte (wenigstens eine Screening-Analyse; gezielt, wenn Laborzugang vorhanden)

Ziel dieser Analysen:

- Abgleich, ob sich Komposte mit Projektmaterial deutlich von Referenzkomposten unterscheiden,
- Prüfung, ob sich Hinweise auf unerwünschte Anreicherungen ergeben.

6.3 Geplanter Pflanzentest (Keimung und Biomasse)

Kernstück des Versuchs sollte ein Pflanzentest zur Beurteilung der Kompostverträglichkeit sein. Dieser sollte sich methodisch an den in der Norm beschriebenen Keimtests orientieren.

6.3.1 Testkulturen

Geplant war der Einsatz von zwei schnell wachsenden, sensiblen Kulturen:

- Kresse (*Lepidium sativum*)
- Weizen (*Triticum aestivum*) oder alternativ eine andere gängige Testkultur

Diese Kulturen sind für Keimtests etabliert und reagieren empfindlich auf toxische Bestandteile oder zu hohe Salzgehalte.

6.3.2 Substratmischungen

Für jede Kompostvariante sollten Substratmischungen hergestellt werden, zum Beispiel:

- 25 % Kompost : 75 % Referenzsubstrat (z. B. Torfersatz / Einheitserde)
- 50 % Kompost : 50 % Referenzsubstrat
- 75 % Kompost : 25 % Referenzsubstrat

Zusätzlich:

- ein Kontrollsubstrat ohne Kompostzusatz (nur Referenzsubstrat)

Dadurch wäre eine Abstufung erkennbar, ab welcher Kompostzugabemenge eventuelle Hemmungen auftreten.

6.3.3 Versuchsführung

- Aussaat einer definierten Kornzahl pro Topf bzw. Schale,
- mindestens 3–4 Wiederholungen pro Variante,

- Kulturführung über einen definierten Zeitraum (z. B. 10–14 Tage),
- standardisierte Bewässerung und gleichmäßige Lichtbedingungen.

6.3.4 Geplante Kenngrößen

Erfasst werden sollten:

- Keimungsrate (Anzahl gekeimter Samen im Vergleich zur Kontrolle),
- Sprosslänge / Wurzellänge (visuelle Bewertung, ggf. Messung),
- Frisch- und Trockenmasse der oberirdischen Biomasse,
- optische Auffälligkeiten (Verfärbungen, Kümmerwuchs, Ausfall).

Damit wäre eine qualitative und teilweise quantitative Einschätzung der Pflanzenverträglichkeit möglich.

6.4 Geplanter Auswertungsansatz

Die Auswertung sollte sich an einem einfachen, aber klar strukturierten Schema orientieren:

1. Vergleich mit der Kontrolle
 - Keimung und Biomasse der Kompostvarianten im Verhältnis zur kontrollierten Substratvariante (ohne Kompost).
2. Vergleich der Komposttypen untereinander
 - Referenzkompost vs. Kompost mit Verpackungsschalen vs. Kompost mit Kultivierungsschalen.
3. Einordnung der Ergebnisse
 - Keine bzw. geringe Abweichungen → Hinweis auf unproblematische Kompostqualität.
 - Deutliche Keim- oder Wuchshemmungen → Hinweis auf weiteren Untersuchungsbedarf.

Eine statistische Auswertung (z. B. Mittelwerte, Standardabweichungen, einfache Tests auf Unterschiede) wäre ergänzend möglich, sofern Datengrundlage und Laborzugang dies zulassen.

6.5 Gründe für die Nichtumsetzung im Projektzeitraum

Obwohl das Versuchsdesign ausgearbeitet wurde, war eine praktische Umsetzung im Projekt nicht möglich. Wesentliche Gründe:

- Der im Heimkompostversuch verwendete Kompost befand sich am Ende des Projektzeitraums noch nicht in einem ausreichend stabilen Reifezustand.
- Eine sinnvolle Kompostqualitätsprüfung setzt jedoch gut abgelagerten, weitgehend humifizierten Kompost voraus.
- Die dafür notwendige zusätzliche Reifezeit (mehrere Monate) überschritt den verfügbaren Projektzeitraum.

Eine Durchführung des Versuchs unter diesen Bedingungen wäre fachlich nicht sinnvoll gewesen und hätte zu nicht belastbaren Ergebnissen geführt.

6.6 Einordnung als Ergebnis des Arbeitspakets

Auch wenn der Kompostqualitätsversuch nicht praktisch realisiert wurde, stellt die systematische Planung und Ausarbeitung des Versuchsdesigns ein eigenständiges Ergebnis des Arbeitspakets dar:

- Das Konzept zeigt konkret, welche Schritte für eine Kompostqualitätsbewertung erforderlich sind.
- Es beschreibt nachvollziehbar, wie ein späterer Test mit reifem Kompost aufgebaut werden sollte.
- Es schafft Transparenz darüber, welche Prüfungen bei einer geplanten Zertifizierung zusätzlich zu den Desintegrationsuntersuchungen notwendig sind.

Damit ist der geplante Kompostqualitätsversuch ein fachlich belastbarer Baustein der Gesamtbewertung, auch wenn seine praktische Umsetzung außerhalb des vorliegenden Projektzeitraums liegt.

7. Ausblick

Mit den im Rahmen dieses Arbeitspakets durchgeführten Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass die entwickelten Verpackungs- und Kultivierungsschalen aus Luzerneheu sowohl unter industriell orientierten als auch unter praxisnahen Heimkompostbedingungen ein grundsätzlich günstiges Kompostierungsverhalten aufweisen. Die gewonnenen Erkenntnisse bilden damit eine wichtige Grundlage für die weitere Entwicklung biobasierter Verpackungslösungen auf Basis nachwachsender Rohstoffe.

Während des Projektverlaufs wurde die Materialrezeptur durch die Ergänzung von Erbsenpulver weiter optimiert. Da diese Anpassung erst nach Abschluss der praktischen Kompostierungsversuche erfolgte, konnte die finale Rezeptur innerhalb dieses Arbeitspakets nicht mehr untersucht werden. Aufgrund der Art der vorgenommenen Optimierung ist jedoch davon auszugehen, dass die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse zum Kompostierungsverhalten grundsätzlich auch auf die finale Materialzusammensetzung übertragbar sind.

Darüber hinaus können die gewonnenen Erkenntnisse als Grundlage für weiterführende Untersuchungen im Hinblick auf eine mögliche Zertifizierung nach etablierten Kompostierungsstandards dienen. Die im Projekt durchgeführten Desintegrationsversuche sowie das ausgearbeitete Konzept zur Kompostqualitätsprüfung schaffen hierfür eine belastbare Ausgangsbasis und zeigen auf, welche ergänzenden Nachweise für eine vollständige Bewertung der Materialien erforderlich wären.

Insgesamt bestätigt das Arbeitspaket, dass sich die im Projekt entwickelte Materialtechnologie grundsätzlich mit einer biologischen Verwertung am Ende des Produktlebenszyklus vereinbaren lässt. Damit leisten die Ergebnisse einen wichtigen Beitrag zur Entwicklung regional erzeugter, kreislauffähiger Verpackungs- und Kultivierungslösungen auf Basis von Luzerneheu.

8. Fazit

Im Rahmen dieses Arbeitspakets wurde die Kompostierbarkeit der entwickelten Verpackungs- und Kultivierungsschalen umfassend untersucht. Durch die Kombination aus industriell orientierten Kompostierungsversuchen und einem über rund sechs Monate begleiteten Heimkompostversuch konnten sowohl standardnahe als auch praxisorientierte Erkenntnisse zum Abbauverhalten der entwickelten Materialverbunde gewonnen werden.

Die Untersuchungen zeigen, dass die Luzerneheu-basierten Schalen während des Kompostierungsprozesses ihre ursprüngliche Struktur schrittweise verlieren und weitgehend in die Kompostmatrix übergehen. Gleichzeitig wurde deutlich, dass die eingesetzten Hydrophobierungsmaterialien zwar den zeitlichen Verlauf des Abbaus beeinflussen können, den biologischen Abbau des Materialverbundes jedoch nicht grundsätzlich verhindern. Insbesondere das Verhalten des fein eingearbeiteten Naturharzes sowie der Wachsinlays bestätigt, dass sich die Verbesserung der Gebrauchseigenschaften mit einer späteren biologischen Verwertung vereinbaren lässt.

Mit dem zusätzlich erarbeiteten Konzept für einen Kompostqualitätsversuch wurden darüber hinaus die Grundlagen geschaffen, um die Untersuchungen in zukünftigen Arbeiten um eine Bewertung der Kompostqualität und Pflanzenverträglichkeit zu ergänzen. Auch wenn diese Untersuchungen innerhalb des Projektzeitraums nicht mehr umgesetzt werden konnten, stellt das ausgearbeitete Versuchsdesign einen wichtigen Baustein für die weitere Entwicklung und Bewertung der Materialien dar.

Insgesamt konnte im Rahmen dieses Arbeitspakets nachgewiesen werden, dass die entwickelten Verpackungs- und Kultivierungsschalen das Potenzial besitzen, nach ihrer Nutzung wieder in den biologischen Stoffkreislauf zurückgeführt zu werden. Die gewonnenen Erkenntnisse bilden damit eine wesentliche Grundlage für die ökologische Bewertung der entwickelten Materialien und unterstützen das übergeordnete Ziel des Projekts, nachhaltige und regional erzeugte Verpackungs- und Kultivierungslösungen aus Luzerneheu zu entwickeln.