

AP 8 Projektbaustein: Ökologische Bewertung

1. Einleitung

Im Forschungsprojekt MicroGrow wurde eine biobasierte Verpackungsschale auf Basis von Luzernefasern entwickelt. Ziel des Projektes war es, nachwachsende Rohstoffe aus der Landwirtschaft für die Herstellung nachhaltiger Verpackungslösungen nutzbar zu machen und gleichzeitig eine erzeugernahe Herstellungstechnologie zu entwickeln. Neben der technischen Entwicklung der Verpackung standen dabei auch wirtschaftliche und ökologische Fragestellungen im Mittelpunkt.

Die technischen Grundlagen des Verpackungssystems, die Materialrezeptur sowie das Herstellungsverfahren wurden bereits in den Projektbausteinen Technisches Anlagenkonzept und Wirtschaftlichkeit erarbeitet. Der vorliegende Projektbaustein baut auf diesen Ergebnissen auf und ergänzt sie um eine ökologische Einordnung des entwickelten Verpackungssystems.

Ziel der ökologischen Bewertung ist es, die wesentlichen Umweltauswirkungen der entwickelten Verpackungsschale entlang des betrachteten Herstellungsprozesses systematisch zu untersuchen. Im Mittelpunkt stehen dabei die Rohstoffbereitstellung, der Materialeinsatz, der Herstellungsprozess, Transport und regionale Wertschöpfung sowie die möglichen End-of-Life-Szenarien. Zur Einordnung des entwickelten Verpackungssystems werden darüber hinaus marktübliche Verpackungslösungen aus Karton/Pappe und Faserguss hinsichtlich ihrer grundlegenden Herstellungsverfahren betrachtet.

Da sich das entwickelte Verpackungssystem derzeit noch im Demonstratorstadium befindet und für marktübliche Referenzverpackungen nur eingeschränkt belastbare und vergleichbare Prozessdaten verfügbar sind, wurde bewusst auf die Durchführung einer vollständigen Lebenszyklusanalyse verzichtet. Stattdessen werden die im Projekt erhobenen Daten mit einer gezielten Literaturrecherche kombiniert und durch qualitative Bewertungen ergänzt. Dadurch entsteht eine praxisorientierte ökologische Einordnung des entwickelten Verpackungssystems, die die technischen Projektergebnisse um ökologische Aspekte erweitert und eine Grundlage für die weitere Entwicklung sowie Bewertung des Verpackungskonzeptes schafft.

2. Methodische Grundlagen und Vorgehensweise

2.1 Grundlagen ökologischer Produktbewertungen

Die ökologische Bewertung von Verpackungssystemen erfolgt üblicherweise mithilfe von Lebenszyklusanalysen (Life Cycle Assessment, LCA), welche die Umweltwirkungen eines Produkts entlang seines gesamten Lebenswegs systematisch erfassen. Als international anerkannter Standard dienen hierfür die Normen DIN EN ISO 14040 und DIN EN ISO 14044. Sie beschreiben den grundsätzlichen Aufbau einer Ökobilanz, bestehend aus Ziel- und Untersuchungsrahmen, Sachbilanz, Wirkungsabschätzung sowie Auswertung.

Für das im Projekt entwickelte Verpackungssystem lagen zum Zeitpunkt der Bearbeitung bereits umfangreiche Projektdaten zur Materialrezeptur sowie zu einzelnen Prozessschritten der Herstellung vor. Gleichzeitig befindet sich das Verpackungssystem noch im Demonstratorstadium, sodass für einzelne Bereiche, insbesondere für eine spätere industrielle Produktion, noch keine belastbaren Praxisdaten verfügbar sind. Hinzu kommt, dass für marktübliche Referenzverpackungen aus Karton/Pappe und Faserguss trotz gezielter Literaturrecherche keine ausreichend vergleichbaren und belastbaren Prozessdaten identischer Verpackungseinheiten ermittelt werden konnten. Eine vollständige und methodisch saubere Lebenszyklusanalyse war unter diesen Rahmenbedingungen daher nicht möglich.

Aus diesem Grund wurde für den vorliegenden Projektbaustein eine praxisorientierte ökologische Bewertungsmethodik gewählt. Quantitative Aussagen werden ausschließlich dort getroffen, wo belastbare Projektdaten vorliegen. In Bereichen mit begrenzter Datenverfügbarkeit erfolgt die Bewertung auf Grundlage verfügbarer Fachliteratur sowie qualitativer Einordnungen. Dadurch wird eine nachvollziehbare ökologische Bewertung des entwickelten Verpackungssystems ermöglicht, ohne die Aussagekraft der vorhandenen Daten zu überschreiten.

2.2 Projektspezifische Vorgehensweise

Auf Grundlage der beschriebenen methodischen Vorgehensweise wurde für den vorliegenden Projektbaustein eine projektspezifische Bewertungsmethodik entwickelt. Diese orientiert sich an den verfügbaren Projektdaten und wird durch eigene Recherchen ergänzt.

Für die ökologische Bewertung wurde eine projektspezifische Methodik entwickelt, die sowohl die im Projekt erhobenen Daten als auch geeignete Literaturquellen berücksichtigt. Aufgrund des Demonstratorcharakters des entwickelten Verpackungssystems sowie der noch nicht vorhandenen industriellen Produktionsanlage wurde bewusst auf die Erstellung einer vollständigen Lebenszyklusanalyse verzichtet. Stattdessen erfolgt eine annähernde quantitative Bewertung, bei der vorhandene Daten mit Literaturwerten und qualitativen Bewertungen kombiniert werden.

Als funktionale Einheit wurde die Bereitstellung einer Verpackungseinheit für 250 g Beerenobst im Bio-Lebensmitteleinzelhandel festgelegt. Im Bio-Lebensmitteleinzelhandel werden Beerenobst überwiegend in Verpackungsgrößen von 125 g und 250 g vermarktet. Da sich das entwickelte Verpackungssystem auf die größere, im Handel ebenfalls etablierte Gebindegröße konzentriert, wurde die 250-g-Verpackung als Vergleichsmaßstab gewählt.

Die Systemgrenze beginnt mit dem geernteten Luzerneheu und umfasst die Rohstoffaufbereitung, die Herstellung der Verpackung, den Transport, die Nutzung sowie die vorgesehenen Entsorgungswege. Die landwirtschaftliche Erzeugung der Luzerne wird nicht Bestandteil der eigentlichen Systemgrenze, da diese bereits im Arbeitspaket „Landwirtschaft“ ausführlich untersucht wurde. Für die ökologische Bewertung werden daraus lediglich die für das Verpackungssystem relevanten Aspekte aufgegriffen und eingeordnet.

Als Referenzsysteme wurden marktübliche Faserguss- sowie Karton- beziehungsweise Pappeschalen ausgewählt, da diese insbesondere im Bio-Lebensmitteleinzelhandel häufig für die Vermarktung von Beerenobst eingesetzt werden. Ziel der Bewertung ist dabei nicht die vollständige ökologische Analyse dieser Verpackungssysteme, sondern eine Einordnung der entwickelten Luzerneschale anhand verfügbarer Literaturodaten und öffentlich zugänglicher Informationen.

Die Bewertung basiert auf Projektdaten, Ergebnissen der durchgeführten Kompostierungsversuche, wissenschaftlicher Fachliteratur sowie weiteren öffentlich zugänglichen Datenquellen. Aufgrund der unterschiedlichen Datenverfügbarkeit werden nicht alle Bewertungskriterien quantitativ betrachtet. Stattdessen werden die wesentlichen ökologischen Hotspots entlang des Verpackungssystems identifiziert und hinsichtlich ihrer Bedeutung für das entwickelte Verpackungskonzept bewertet.

Für die projektspezifische ökologische Bewertung wurden folgende Bewertungskriterien festgelegt:

- Rohstoffbasis der Verpackung
- Ressourceneffizienz und Materialnutzung
- Herstellungsprozess
- Transport und regionale Wertschöpfung

- Einordnung gegenüber marktüblichen Referenzverpackungen
- End-of-Life-Szenarien
- Gesamtbewertung der ökologischen Hotspots

3. Beschreibung des betrachteten Verpackungssystems

Im folgenden Kapitel wird das im Projekt entwickelte Verpackungssystem als Grundlage der ökologischen Bewertung beschrieben. Hierzu werden die Systemgrenze, die zugrunde liegenden Prozessdaten sowie die wesentlichen technischen Kenngrößen zusammengefasst.

3.1 Betrachtetes Verpackungssystem

Grundlage der nachfolgenden ökologischen Bewertung ist die im Projekt entwickelte Verpackungsschale aus Luzernefasern. Die technische Entwicklung der Schale, die Materialzusammensetzung sowie die zugehörige Prozesskette wurden bereits in den Projektbausteinen „Technisches Anlagenkonzept“ und „Wirtschaftlichkeit“ erarbeitet und bilden die Datengrundlage für die nachfolgende Bewertung. Im Mittelpunkt dieses Projektbausteins steht nicht die erneute Beschreibung der technischen Entwicklung, sondern die ökologische Einordnung des entwickelten Verpackungssystems.

Die ökologische Bewertung beginnt mit getrocknetem Luzerneheu als Ausgangsrohstoff. Die landwirtschaftliche Erzeugung der Luzerne wird bewusst nicht in die Systemgrenze aufgenommen, da diese bereits im Projektbaustein „Landwirtschaft“ ausführlich betrachtet wurde. Für die ökologische Bewertung werden daraus lediglich die für das Verpackungssystem relevanten Eigenschaften, wie die Nutzung eines nachwachsenden Rohstoffs sowie ausgewählte pflanzenbauliche Vorteile, im folgenden Kapitel kurz eingeordnet.

Betrachtet wird ausschließlich die entwickelte Verpackungsschale für 250 g Beerenobst. Die ebenfalls im Projekt entwickelten Anzuchtschalen werden nicht gesondert bewertet, da sich diese hinsichtlich Materialaufbau und Herstellungsverfahren nur geringfügig unterscheiden und der Schwerpunkt der ökologischen Bewertung auf der Verpackungslösung für den Lebensmitteleinzelhandel liegt.

Die Systemgrenze umfasst die Aufbereitung des getrockneten Luzerneheus, die Herstellung der Verpackungsschale, den Transport, die Nutzung sowie die vorgesehenen End-of-Life-Szenarien. Diese Prozessschritte bilden die Grundlage für die nachfolgende ökologische Bewertung und den Vergleich mit marktüblichen Verpackungslösungen aus Faserguss sowie Karton beziehungsweise Pappe.

3.2 Datengrundlage der ökologischen Bewertung

Für die ökologische Bewertung werden die bereits im Projekt erarbeiteten technischen und stofflichen Grundlagen genutzt. Die folgende Übersicht fasst die Daten zusammen, die im weiteren Verlauf bewertet und mit marktüblichen Verpackungslösungen verglichen werden.

Tabelle 1: Datengrundlage und Verwendung in der Ökologischen Bewertung

Datengrundlage	Wert bzw. Projektergebnis	Verwendung in der Ökologischen Bewertung
Ausgangsrohstoff	Getrocknetes Luzerneheu aus ökologischer Bewirtschaftung	Ausgangspunkt der betrachteten Prozesskette
Aufbereitung des Luzerneheus	Zerkleinerung mit Stroh­mühle: 8 kW; Fraktionierung mit Trommelvorreiniger: 3 kW; angenommene Fördertechnik: 1,5 kW; gemeinsamer Durchsatz: 0,2 t/h	Ermittlung des Energiebedarfs der Rohstoffaufbereitung
Stoffstromaufteilung	Rund 60 % Feinfraktion und 40 % Grobfraktion	Qualitative Einordnung der parallelen Nutzung beider Fraktionen
Materialrezeptur je Verpackungsschale	36 g Luzernefasern, 7 g Kiefernharz und 7 g Erbsenprotein; Gesamtmasse 50 g	Bewertung der eingesetzten Materialien und Vergleich je Verpackungseinheit
Prozesswasser	7,2 g Wasser je Schale, entsprechend 20 % der eingesetzten Luzerne-Trockenmasse; das Wasser verdampft während des Formpressens	Bewertung des direkten Wasserbedarfs des Herstellungsprozesses
Formpressung	59,06 kWh je 8-Stunden-Schicht; Ausbringung 36 Schalen/h beziehungsweise 288 Schalen je Schicht	Ermittlung des spezifischen Energiebedarfs der Schalenherstellung
Materialverluste	Keine relevanten Verschnittverluste; geringe Verluste lediglich durch Dosierung, Anhaftungen oder Fehlteile möglich	Qualitative Einordnung der Materialeffizienz
Referenzverpackungen	Karton-/Pappschale: 14 g; Fasergusschale: 16 g	Vergleich des Materialeinsatzes marktüblicher Verpackungslösungen
Produktanwendung	Verpackungseinheit für 250 g Beerenobst im Bio-Lebensmitteleinzelhandel	Funktionale Einheit der Bewertung
Prozess- und Vermarktungskonzept	Erzeugernahe Aufbereitung und Verarbeitung sowie Vermarktung über den eigenen Bio-Lebensmitteleinzelhandel	Qualitative Bewertung regionaler Wertschöpfung und möglicher Transportvorteile
End-of-Life	Biotonne beziehungsweise industrielle Kompostierung sowie Heimkompostierung	Grundlage für den Vergleich der Entsorgungswege

Die Angaben zur Aufbereitung, zum Durchsatz, zur Stoffstromaufteilung und zur Materialrezeptur wurden bereits in den Projektbausteinen „Technisches Anlagenkonzept“ und „Wirtschaftlichkeit“ erarbeitet. Die Daten zur Formpressung basieren auf dem für den Demonstrator entwickelten Produktionskonzept. Sie beschreiben daher noch keinen industriellen Serienprozess.

Die Verwendung der Feinfraktion wird in der ökologischen Bewertung nicht eigenständig bilanziert. Es wird jedoch berücksichtigt, dass die Grobfraktion nicht isoliert erzeugt wird, sondern gemeinsam mit einer proteinreichen Feinfraktion entsteht, die einem weiteren Nutzungspfad zugeführt werden kann. Eine quantitative Aufteilung der Umweltwirkungen zwischen beiden Fraktionen erfolgt nicht, da hierfür keine belastbare Datengrundlage vorliegt.

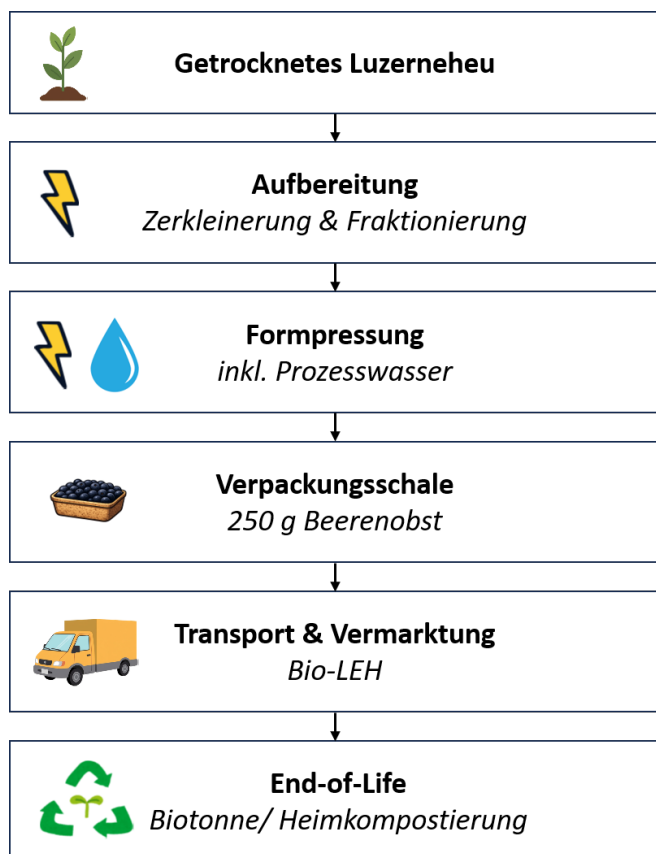


Abbildung 1: Prozessübersicht des betrachteten Verpackungssystems und Zuordnung der wesentlichen Bewertungsbereiche.

4. Ökologische Einordnung der Rohstoffbereitstellung

Die ökologische Bewertung beginnt mit der Betrachtung der Rohstoffbasis des entwickelten Verpackungssystems. Ausgangspunkt ist dabei das bereits aufbereitete und getrocknete Luzerneheu, welches im weiteren Verlauf des Herstellungsprozesses zu Verpackungsschalen verarbeitet wird. Aspekte des landwirtschaftlichen Anbaus werden nur soweit berücksichtigt, wie sie für die ökologische Einordnung der verwendeten Rohstoffbasis relevant sind.

4.1 Ausgangsrohstoff Luzerne

Ausgangspunkt der ökologischen Bewertung ist getrocknetes Luzerneheu aus ökologischer Bewirtschaftung. Die pflanzenbaulichen Eigenschaften der Luzerne sowie deren Bedeutung innerhalb der Fruchtfolge wurden bereits im Projektbaustein „Landwirtschaft“ ausführlich beschrieben und

werden daher an dieser Stelle nicht erneut behandelt. Für die ökologische Bewertung des entwickelten Verpackungssystems sind jedoch einige Eigenschaften des Rohstoffs von besonderer Bedeutung.

Luzerne ist ein mehrjähriger, nachwachsender Rohstoff und kann über mehrere Jahre auf derselben Fläche genutzt werden. Durch die dauerhafte Bodenbedeckung sowie den reduzierten Bedarf an Bodenbearbeitung ergeben sich gegenüber einjährigen Kulturen ökologische Vorteile. Darüber hinaus ist Luzerne als Leguminose in der Lage, Luftstickstoff über eine Symbiose mit Knöllchenbakterien zu binden. Dadurch kann auf eine mineralische Stickstoffdüngung weitgehend verzichtet werden.

Ein weiterer Vorteil ergibt sich aus der Einbindung der Luzerne in die Fruchtfolge. Durch das ausgeprägte Wurzelsystem sowie die im Boden verbleibenden Wurzeln, Stoppeln und Ernterückstände trägt Luzerne zur Humusbildung und damit zur Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit bei. Gleichzeitig wirkt sich der Luzerneanbau positiv auf die Fruchtfolge aus und kann den Anbau nachfolgender Kulturen unterstützen.

Die genannten Eigenschaften beschreiben die ökologischen Voraussetzungen des eingesetzten Rohstoffs und bilden die Grundlage für die nachfolgende Bewertung des Verpackungssystems.

4.2 Nutzung der Grobfraction als Ausgangsmaterial der Verpackung

Die im Projekt entwickelte Verpackungsschale wird ausschließlich aus der bei der Aufbereitung anfallenden Grobfraction des Luzerneheus hergestellt. Im Rahmen der Fraktionierung wird das zerkleinerte Luzerneheu in eine proteinreiche Feinfraction und eine faserreiche Grobfraction aufgeteilt. Die Feinfraction dient als Ausgangsmaterial für die Herstellung von Luzerneproteinpellets, während die Grobfraction für die Formpressung der Verpackungsschalen genutzt wird.

Für die ökologische Bewertung ist dieser Zusammenhang von besonderer Bedeutung. Die Grobfraction wird nicht als eigenständiger Rohstoff erzeugt, sondern entsteht gemeinsam mit der Feinfraction innerhalb eines gemeinsamen Aufbereitungsschrittes. Die für Zerkleinerung und Fraktionierung benötigte Energie wird daher entsprechend der im Projekt ermittelten Stoffstromaufteilung von 60 % Feinfraction und 40 % Grobfraction anteilig der Verpackungsschale zugeordnet (massenbezogene Allokation).

Durch diese Nutzung werden unterschiedliche Bestandteile des Luzerneheus verschiedenen Verwertungswegen zugeführt. Während die proteinreiche Feinfraction stofflich weiterverarbeitet wird, dient die faserreiche Grobfraction als Ausgangsmaterial für die Herstellung der Verpackungsschalen. Dadurch wird die im Projekt entwickelte Prozesskette um eine zusätzliche stoffliche Nutzung erweitert und die gesamte Biomasse umfassender genutzt.

Aufbauend auf der beschriebenen Rohstoffbasis werden im folgenden Kapitel die einzelnen Herstellungsprozesse des entwickelten Verpackungssystems hinsichtlich ihrer ökologischen Relevanz bewertet.

5. Bewertung des Herstellungsprozesses

Im folgenden Kapitel wird der Herstellungsprozess der entwickelten Verpackungsschale ökologisch bewertet. Betrachtet werden die einzelnen Prozessschritte von der Rohstoffaufbereitung über den Materialeinsatz bis zur Formpressung. Ergänzend erfolgt eine Einordnung des entwickelten Formpressverfahrens anhand etablierter Herstellungsverfahren sowie eine qualitative Betrachtung von Transport und regionaler Wertschöpfung.

5.1 Bewertung der Rohstoffaufbereitung

Für die Herstellung der Verpackungsschalen wird das getrocknete Luzerneheu zunächst zerkleinert und anschließend in Fein- und Grobfraction getrennt. Für die Aufbereitung werden folgende Leistungsdaten angesetzt:

- Strohühle: 8 kW
- Trommelvorreiniger: 3 kW
- Fördertechnik: 1,5 kW
- Gesamte Leistungsaufnahme: 12,5 kW
- Materialdurchsatz: 0,2 t/h

Daraus ergibt sich ein rechnerischer Energiebedarf von:

$$\frac{12,5 \text{ kW}}{0,2 \text{ t/h}} = 62,5 \text{ kWh/t Luzerneheu}$$

Bei der Fraktionierung entstehen rund 60 % Feinfraktion und 40 % Grobfraction. Entsprechend werden 40 % des gemeinsamen Energiebedarfs der Grobfraction zugeordnet (massenbezogene Allokation). Aus einer Tonne Luzerneheu entstehen etwa 0,4 t Grobfraction. Bezogen auf die tatsächlich gewonnene Grobfraction ergibt sich damit ebenfalls ein spezifischer Energiebedarf von:

$$62,5 \text{ kWh/t Grobfraction} = 0,0625 \text{ kWh/kg Grobfraction}$$

Für eine Verpackungsschale werden 36 g Luzernefasern aus der Grobfraction benötigt. Der anteilige Energiebedarf der Rohstoffaufbereitung beträgt damit:

$$\frac{0,00225 \text{ kWh}}{0,05 \text{ kg}} = 0,045 \text{ kWh/kg Verpackung}$$

Dies entspricht rund 2,25 Wh je Verpackungsschale.

Die Aufbereitung trägt damit nur einen kleinen Teil zum gesamten Energiebedarf der Schalenherstellung bei. Der deutlich größere Energieeinsatz ist beim späteren Formpressprozess zu erwarten. Gleichzeitig dient die Aufbereitung nicht ausschließlich der Verpackungsherstellung, sondern stellt parallel die proteinreiche Feinfraktion für einen weiteren Nutzungspfad bereit.

5.2 Bewertung des Materialeinsatzes

Die Materialrezeptur der entwickelten Verpackungsschale besteht aus 36 g Luzernefasern, 7 g Kiefernharz und 7 g Erbsenpulver. Die ökologische Bewertung der einzelnen Bestandteile erfolgt auf Grundlage der verfügbaren Projektdaten sowie ergänzender Literatur. Da für die eingesetzten Materialien unterschiedliche Datengrundlagen vorliegen, werden diese entsprechend differenziert betrachtet.

Den Hauptbestandteil der Verpackung bilden die Luzernefasern aus der Grobfraction des aufbereiteten Luzerneheus. Für diesen Rohstoff liegen projektspezifische Daten zur Materialmenge sowie zum Energiebedarf der Aufbereitung vor. Die ökologische Einordnung des Rohstoffs erfolgte bereits in Kapitel 4.

Das eingesetzte Erbsenpulver stammt aus aussortierten Kleinerbsen der Saatgutaufbereitung. Für diesen Stoffstrom bestand nach Angaben des Projektpartners bislang keine weitere stoffliche Nutzung. Für die ökologische Bewertung wird daher lediglich der zusätzliche Aufwand für das Vermahlen berücksichtigt. Literaturangaben weisen für das Mahlen vergleichbarer pflanzlicher Rohstoffe Energiebedarfe von etwa 10 bis 50 kWh je Tonne aus. Bezogen auf den Materialeinsatz von 7 g je Verpackungsschale entspricht dies einem Energiebedarf von lediglich 0,07 bis 0,35 Wh je Schale. Der Beitrag des Mahlprozesses ist damit im Vergleich zu den übrigen Herstellungsschritten als gering einzustufen.

Für das eingesetzte Kiefernharz konnten keine belastbaren und auf das verwendete Material übertragbaren Umweltkennwerte ermittelt werden. Eine quantitative Bewertung erfolgt daher nicht. Mit einem Materialeinsatz von lediglich 7 g je Verpackungsschale besitzt das Harz jedoch nur einen vergleichsweise geringen Anteil an der Gesamtmasse der Verpackung und wird im weiteren Verlauf qualitativ berücksichtigt.

Insgesamt zeigt sich, dass der überwiegende Materialanteil der Verpackung aus dem im Projekt bereitgestellten Faserrohstoff besteht. Die weiteren Bestandteile werden in vergleichsweise geringen Mengen eingesetzt und dienen in erster Linie der Erfüllung der erforderlichen Materialeigenschaften.

5.3 Bewertung des Formpressprozesses

Die Formpressung stellt den zentralen Herstellungsschritt der entwickelten Verpackungsschale dar. Grundlage der Bewertung sind die im Rahmen des Projektes für das Demonstratorkonzept ermittelten Prozessdaten. Für eine achtstündige Produktionsschicht wurde ein Gesamtenergiebedarf von 59,06 kWh bei einer Produktionsleistung von 36 Verpackungsschalen je Stunde beziehungsweise 288 Schalen je Schicht ermittelt. Daraus ergibt sich ein spezifischer Energiebedarf von 0,205 kWh je Verpackungsschale beziehungsweise 4,10 kWh je Kilogramm Verpackungsmaterial.

Tabelle 2: Energiebedarf des Formpressprozesses

Kennwert	Wert
Energiebedarf je Schicht	59,06 kWh
Produktionsdauer	8 h
Produktionsleistung	36 Schalen/h
Schalen je Schicht	288
Energiebedarf je Schale	0,205 kWh
Energiebedarf je kg Verpackungsmaterial	4,10 kWh/kg

Für die Formgebung werden den Luzernefasern zusätzlich 7,2 g Prozesswasser je Verpackungsschale zugesetzt. Das Wasser dient ausschließlich der Einstellung der für den Pressvorgang erforderlichen Materialfeuchte und verdampft während der Formpressung vollständig. Es verbleibt somit nicht im fertigen Produkt. Der hierfür erforderliche Energiebedarf ist bereits im Gesamtenergiebedarf des Formpressprozesses enthalten und wird daher nicht gesondert berücksichtigt.

Durch die direkte Dosierung der Materialmenge entstehen im Formpressprozess keine nennenswerten Verschnittverluste. Materialverluste beschränken sich auf geringe Mengen durch

Anhaftungen oder vereinzelte Fehlteile und werden für die ökologische Bewertung als vernachlässigbar eingestuft.

Im Vergleich zur Rohstoffaufbereitung stellt die Formpressung den mit Abstand energieintensivsten Prozessschritt der Verpackungsherstellung dar und bildet damit den wesentlichen ökologischen Hotspot innerhalb des betrachteten Herstellungsprozesses. Gleichzeitig handelt es sich bei den zugrunde liegenden Daten um Werte eines Demonstratorkonzeptes. Es ist daher davon auszugehen, dass sich der spezifische Energiebedarf bei einer späteren industriellen Umsetzung durch eine höhere Anlagenauslastung und weitere Prozessoptimierungen reduzieren lässt.

5.4 Einordnung des Formpressverfahrens anhand etablierter Herstellungsverfahren

Vor der Einordnung des entwickelten Formpressverfahrens wurden die in der Praxis gängigen Herstellungsverfahren für Verpackungsschalen aus Karton/Pappe sowie Faserguss recherchiert. Ziel dieser Betrachtung ist nicht die vollständige ökologische Bewertung der Referenzsysteme, sondern das Verständnis der jeweiligen Herstellungsprozesse als Grundlage für die Einordnung des im Projekt entwickelten Verfahrens.

Herstellungsverfahren von Karton- und Pappschalen

Karton- und Pappschalen werden in der Regel nicht unmittelbar aus Fasern geformt. Ausgangspunkt ist bereits hergestellter Karton beziehungsweise Vollpappe, die überwiegend aus Holzfasern oder Recyclingfasern besteht. Die Herstellung des Kartonmaterials erfolgt in einem vorgelagerten Prozess. Hierfür werden die Fasern zunächst in Wasser suspendiert, zu einer Kartonbahn geformt, entwässert, gepresst und anschließend getrocknet. Erst danach erfolgt die eigentliche Herstellung der Verpackungsschale durch Stanzen, Rillen und Aufrichten des flächigen Kartonmaterials.

Der wesentliche Wasser- und Energieeinsatz entsteht somit bereits während der Herstellung des Kartonmaterials und nicht bei der späteren Formgebung der Schale. Die eigentliche Schalenproduktion erfolgt anschließend überwiegend trocken und umfasst hauptsächlich mechanische Bearbeitungsschritte.

Herstellungsverfahren von Fasergusschalen

Im Gegensatz zur Kartonschale wird die Form der Verpackung beim Faserguss unmittelbar aus einer Fasersuspension erzeugt. Hierzu werden Papier-, Karton- oder Holzfasern mit Wasser zu einer stark verdünnten Suspension aufbereitet. Diese wird auf ein Formwerkzeug aufgebracht, wobei das Wasser mittels Unterdruck abgesaugt wird und sich die Fasern auf dem Werkzeug ablagern. Anschließend erfolgt die weitere Entwässerung sowie die thermische Trocknung beziehungsweise Heißpressung der noch feuchten Schale.

Das Wasser dient dabei nicht lediglich der Befeuchtung des Materials, sondern bildet die Grundlage des gesamten Formgebungsprozesses. Entsprechend stellen Wasserführung, Entwässerung und Trocknung wesentliche Bestandteile des Herstellungsverfahrens dar.

Einordnung des Wasser- und Energieeinsatzes

Sowohl bei Karton- und Pappverpackungen als auch beim Faserguss spielt Wasser eine zentrale Rolle innerhalb des Herstellungsprozesses. Dabei ist jedoch zwischen Wasserentnahme, Prozesswasser und dem tatsächlichen Wasserverbrauch zu unterscheiden. Ein erheblicher Anteil des eingesetzten Wassers wird innerhalb der Produktionsanlagen im Kreislauf geführt, aufbereitet und erneut verwendet. Ein hoher Wassereinsatz bedeutet daher nicht zwangsläufig einen entsprechend hohen Netto-Wasserverbrauch.

Unabhängig davon ist die Bereitstellung und Führung dieser Wassermengen mit einem technischen Aufwand verbunden. Das Wasser muss gefördert, bewegt, teilweise gereinigt und anschließend wieder aus dem Fasermaterial entfernt werden. Insbesondere die Entwässerung und Trocknung stellen energieintensive Prozessschritte dar und werden in der Fachliteratur als wesentliche Einflussgrößen papier- und faserbasierter Herstellungsverfahren beschrieben.

Beim im Projekt entwickelten Formpressverfahren wird dagegen keine wasserbasierte Fasersuspension eingesetzt. Die bereits trockene Luzerne-Grobfraktion wird lediglich mit 20% (7,2 g) Prozesswasser je Verpackungsschale angefeuchtet und anschließend direkt verpresst. Das zugesetzte Wasser verdampft während des Pressvorgangs vollständig. Im Vergleich zu den beschriebenen Nassverfahren wird somit nur eine geringe Menge Prozesswasser benötigt.

Für die Formpressung wurde im Projekt ein Energiebedarf von 0,205 kWh je Verpackungsschale beziehungsweise 4,10 kWh je Kilogramm Verpackungsmaterial ermittelt. Hinzu kommt der vergleichsweise geringe Energiebedarf der Rohstoffaufbereitung von 2,25 Wh je Verpackungsschale. Direkt vergleichbare quantitative Literaturdaten für marktübliche Karton- oder Fasergusschalen konnten im Rahmen der Recherche nicht ermittelt werden. Die qualitative Gegenüberstellung der Herstellungsverfahren zeigt jedoch, dass das entwickelte Formpressverfahren ohne die für papier- und faserbasierte Nassverfahren typischen wasserintensiven Prozessschritte auskommt.

Zusammenfassende Einordnung

Die recherchierten Herstellungsverfahren zeigen deutliche Unterschiede in der Art der Formgebung. Während bei Karton- und Pappschalen der wasserintensive Herstellungsprozess bereits bei der Produktion des Kartonmaterials erfolgt und beim Faserguss Wasser unmittelbar als Formgebungsmedium eingesetzt wird, basiert das im Projekt entwickelte Verfahren auf der direkten Formpressung einer angefeuchteten Fasermischung.

Auf Grundlage der im Projekt erhobenen Prozessdaten sowie der recherchierten Herstellungsverfahren kann das entwickelte Formpressverfahren als ressourcenschonender Ansatz mit einem geringen direkten Prozesswassereinsatz eingeordnet werden. Eine vollständige quantitative Gegenüberstellung der Verfahren war aufgrund fehlender vergleichbarer Literaturdaten zu Energie- und Wasserverbräuchen marktüblicher Verpackungsschalen nicht möglich.

5.5 Transport und regionale Wertschöpfung

Neben dem Herstellungsprozess beeinflussen auch Transportwege und die Organisation der Wertschöpfungskette die ökologische Einordnung eines Verpackungssystems. Da sich diese je nach Produktionsstruktur erheblich unterscheiden können, erfolgt die Bewertung im Rahmen dieses Projektes ausschließlich qualitativ. Grundlage bilden die im Technischen Anlagenkonzept entwickelten Umsetzungsmodelle sowie das im Projekt betrachtete Unternehmensmodell.

Einordnung der Referenzsysteme

Für Karton-, Papp- und Fasergussverpackungen können keine allgemein gültigen Transportentfernungen oder Logistikkonzepte ermittelt werden. Die Transportwege hängen wesentlich vom jeweiligen Rohstoff, dem Standort der Produktionsanlagen sowie dem späteren Verpackungs- und Vermarktungsprozess ab.

Grundsätzlich ist jedoch davon auszugehen, dass die Rohstoffe zunächst zu spezialisierten Papier-, Karton- oder Fasergusswerken transportiert werden. Nach der Herstellung der Verpackungen erfolgt ein weiterer Transport zum Lebensmittelproduzenten beziehungsweise Abfüller und anschließend

zum Handel. Die Wertschöpfung ist damit häufig auf mehrere spezialisierte Produktionsstandorte verteilt.

Eine quantitative Bewertung der Transportaufwendungen ist auf dieser Grundlage nicht möglich.

Einordnung des entwickelten Verpackungssystems

Für das im Projekt entwickelte Verpackungssystem wurden im Technischen Anlagenkonzept verschiedene Möglichkeiten der betrieblichen Umsetzung untersucht. Diese reichen von einer einzelbetrieblichen Verarbeitung über regionale Kooperationen bis hin zur Einbindung bestehender Verarbeitungsunternehmen.

Die größte ökologische Stärke des entwickelten Systems liegt dabei in der Möglichkeit, mehrere Verarbeitungsschritte räumlich miteinander zu verbinden. So können Luzerneanbau, Trocknung, Aufbereitung und Fraktionierung im landwirtschaftlichen Betrieb oder innerhalb regionaler Kooperationen erfolgen. Dadurch lassen sich Transportwege innerhalb der Rohstoffbereitstellung deutlich reduzieren.

Ein weiterer Vorteil ergibt sich aus der Aufbereitungstechnik. Der im Projekt eingesetzte Trommelvorreiniger dient nicht ausschließlich der Fraktionierung des Luzerneheus, sondern kann ebenfalls zur Aufbereitung von Erbsen eingesetzt werden. Dabei können unterkörnige Erbsen ausgesiebt und anschließend zu Erbsenpulver verarbeitet werden. Alternativ besteht die Möglichkeit, aussortierte Kleinerbsen regionaler Saatgutaufbereiter zu nutzen. Beide Ansätze ergänzen sich und ermöglichen eine regionale Bereitstellung des Zuschlagstoffes für die Verpackungsrezeptur.

Lediglich das eingesetzte Kiefernharz muss überregional beschafft werden. Bezogen auf die Gesamtmasse der Verpackung stellt dieser Rohstoff jedoch nur einen vergleichsweise kleinen Materialanteil dar.

Verbindung von Landwirtschaft und Bio-Lebensmitteleinzelhandel

Das Unternehmensmodell von Vorwerk Podemus verbindet landwirtschaftliche Erzeugung und Vermarktung innerhalb einer gemeinsamen Unternehmensstruktur. Dadurch besteht die Möglichkeit, regional erzeugte Verpackungsschalen unmittelbar für die Vermarktung regional erzeugter Lebensmittel einzusetzen.

Ein typisches Anwendungsbeispiel stellt die Vermarktung regional erzeugter Erdbeeren oder Himbeeren in den eigenen Biomärkten dar. Die Verpackung wird damit Teil einer regionalen Wertschöpfungskette, in der Rohstoffbereitstellung, Verpackungsherstellung und Vermarktung räumlich eng miteinander verbunden werden können.

Aus ökologischer Sicht bietet dieses Modell insbesondere das Potenzial, Transportwege zwischen den einzelnen Wertschöpfungsstufen zu reduzieren und vorhandene Infrastruktur mehrfach zu nutzen. Gleichzeitig stärkt es den Grundgedanken regionaler Bioökonomie, indem landwirtschaftliche Rohstoffe, Verarbeitung und Vermarktung innerhalb einer Region miteinander verknüpft werden.

Zusammenfassende Bewertung

Eine quantitative Bewertung der Transportwirkungen war im Rahmen des Projektes aufgrund fehlender standortbezogener Vergleichsdaten nicht möglich. Die qualitative Betrachtung zeigt jedoch, dass das entwickelte Verpackungssystem eine räumlich enge Verbindung von Rohstoffbereitstellung, Verarbeitung und Vermarktung ermöglicht.

Insbesondere bei einer einzelbetrieblichen oder regional organisierten Umsetzung bestehen Potenziale zur Verkürzung von Transportwegen sowie zur mehrfachen Nutzung vorhandener

Infrastruktur. Dadurch unterscheidet sich das entwickelte Verpackungssystem von klassischen, häufig arbeitsteilig organisierten Verpackungssystemen und bietet zusätzliche Ansätze für eine regional ausgerichtete Wertschöpfung.

6. End-of-Life-Betrachtung

Neben der Rohstoffbereitstellung und dem Herstellungsprozess stellt auch die Entsorgung einer Verpackung einen wichtigen Bestandteil ihrer ökologischen Bewertung dar. Im folgenden Kapitel werden die vorgesehenen End-of-Life-Szenarien der entwickelten Luzerneschale den möglichen Entsorgungswegen marktüblicher Verpackungssysteme gegenübergestellt und qualitativ eingeordnet.

6.1 End-of-Life der entwickelten Luzerneschale

Nach der Nutzung kann die entwickelte Verpackungsschale sowohl über die Biotonne als auch über den Heimkompost entsorgt werden. Im Rahmen des Projektes wurden hierzu Kompostierungsversuche durchgeführt, deren Ergebnisse bereits im entsprechenden Arbeitspaket dargestellt wurden. Die Untersuchungen bestätigten die grundsätzliche biologische Abbaubarkeit der entwickelten Verpackungsschalen und zeigen, dass eine stoffliche Rückführung über biologische Kreisläufe grundsätzlich möglich ist.

Neben der Entsorgung über kommunale Bioabfallsysteme bietet insbesondere die Heimkompostierbarkeit einen zusätzlichen Vorteil. Dadurch besteht die Möglichkeit, die Verpackung unmittelbar am Ort der Nutzung dem natürlichen Stoffkreislauf zurückzuführen, ohne dass hierfür ein industrieller Recyclingprozess erforderlich ist.

Die tatsächliche Nutzung dieses Entsorgungsweges hängt jedoch vom Nutzerverhalten sowie von den regional vorhandenen Entsorgungsmöglichkeiten ab.

6.2 Einordnung der End-of-Life-Szenarien etablierter Verpackungssysteme

Für Verpackungen aus Karton, Pappe oder Faserguss wird häufig die Entsorgung über das Altpapierrecycling als bevorzugter Verwertungsweg angegeben. Voraussetzung hierfür ist jedoch, dass die Verpackungen ausreichend sauber und recyclingfähig sind.

Gerade bei Verpackungen für empfindliches Obst wie Erdbeeren, Himbeeren oder anderes Beerenobst entspricht dies jedoch häufig nicht der tatsächlichen Nutzungssituation. Während Lagerung, Transport und Verkauf können Fruchtsäfte austreten oder einzelne Früchte beschädigt beziehungsweise verschimmelt sein. Dadurch werden auch die Verpackungen mit organischen Rückständen verunreinigt.

Stark verschmutzte Papier- und Kartonverpackungen sind für das werkstoffliche Papierrecycling nur eingeschränkt geeignet. Je nach Verschmutzungsgrad sowie den regionalen Vorgaben der Entsorgungsbetriebe erfolgt die Entsorgung daher über die Biotonne oder den Restmüll. Ein einheitlicher Entsorgungsweg kann deshalb nicht angenommen werden.

Auch bei Fasergusschalen hängt der tatsächliche Verwertungsweg wesentlich vom Verschmutzungsgrad sowie von eventuell vorhandenen Beschichtungen oder weiteren Materialbestandteilen ab. Die theoretische Recyclingfähigkeit entspricht daher nicht zwangsläufig der tatsächlichen Entsorgungspraxis.

6.3 Zusammenfassende Bewertung der End-of-Life-Szenarien

Die Betrachtung der möglichen Entsorgungswege zeigt, dass zwischen theoretisch möglichen und praktisch tatsächlich genutzten Verwertungswegen unterschieden werden muss.

Im Idealfall können Karton-, Papp- und geeignete Fasergussverpackungen dem Papierrecycling zugeführt werden. Bei Verpackungen für frisches Obst ist jedoch regelmäßig mit Feuchtigkeit, Fruchtsaft oder organischen Rückständen zu rechnen, wodurch dieser Verwertungsweg teilweise eingeschränkt wird.

Die entwickelte Luzerneschale bietet in diesem Zusammenhang den Vorteil, dass sowohl die Entsorgung über die Biotonne als auch die Heimkompostierung unabhängig vom Verschmutzungsgrad möglich sind. Gerade bei Verpackungen, die während der Nutzung ohnehin mit organischen Rückständen in Kontakt kommen, stellt dies einen praxisnahen Entsorgungsweg dar.

Eine abschließende ökologische Bewertung der verschiedenen End-of-Life-Szenarien ist ohne detaillierte Lebenszyklusanalyse nicht möglich. Die qualitative Betrachtung zeigt jedoch, dass die entwickelte Verpackung insbesondere im praktischen Anwendungsfall eine robuste und einfach handhabbare Entsorgungsmöglichkeit bietet.

7. Zusammenfassende ökologische Bewertung und Fazit

Die vorangegangenen Kapitel haben die einzelnen ökologisch relevanten Aspekte des entwickelten Verpackungssystems getrennt betrachtet. Zur abschließenden Einordnung werden diese Ergebnisse im Folgenden zusammengeführt und den betrachteten Referenzverpackungen aus Karton/Pappe und Faserguss gegenübergestellt. Die Tabelle dient dabei als zusammenfassende Übersicht der wesentlichen Bewertungsergebnisse und bildet die Grundlage des abschließenden Fazits.

Tabelle 3: Zusammenfassende ökologische Bewertung im Vergleich

Bewertungs-kriterium	Luzerneschale	Karton-/Pappschale	Fasergusschale	Einordnung
Rohstoff-basis	Grobfraktion aus Luzerneheu, nachwachsender Rohstoff	Holz- bzw. Recyclingfasern	überwiegend Papier-, Karton- oder Holzfasern	Alle Systeme basieren auf nachwachsenden Rohstoffen. Die Luzerneschale nutzt jedoch einen im Projekt bereits vorhandenen Stoffstrom.
Material-nutzung	Nutzung der Grobfraktion, Feinfraktion wird anderweitig genutzt	Nutzung vorhandener Papier- bzw. Kartonfasern	Nutzung von Papier-, Karton- oder Frischfasern	Bei der Luzerne entsteht eine stoffliche Kaskadennutzung der Biomasse.
Herstellung-verfahren	Direkte Formpressung einer angefeuchteten Fasermischung	Stanzen und Falten aus fertigem Karton	Formgebung aus einer wasserhaltigen Fasersuspension	Unterschiedliche Prozessprinzipien.

Prozess- wasser	7,2 g je Schale	Wasserbedarf überwiegend bei der vorgelagerten Karton- herstellung	Wasser dient unmittelbar als Formgebungsmedium	Das entwickelte Verfahren benötigt im Herstellungsprozess nur geringe Mengen Prozesswasser.
Energie- einsatz	Projektdaten vorhanden (Aufbereitung + Formpressung)	Keine direkt vergleichbaren Literaturdaten verfügbar	Keine direkt vergleichbaren Literaturdaten verfügbar	Ein quantitativer Vergleich ist nicht möglich. Die Prozessanalyse zeigt jedoch einen einfacheren Herstellungsablauf ohne wasserintensive Nassprozesse.
Material- verluste	praktisch keine Verschnittverluste	Stanzreste, überwiegend Recycling	geringe Verluste, häufig Rückführung in den Prozess	Alle Systeme arbeiten materialeffizient, unterscheiden sich jedoch im Umgang mit Reststoffen.
Transport- potenzial	Regionale Produktion grundsätzlich möglich	arbeitsteilige Produktions- kette	arbeitsteilige Produktionskette	Das entwickelte System ermöglicht eine enge räumliche Verknüpfung von Landwirtschaft, Verarbeitung und Vermarktung.
End-of-Life	Heimkompost und Biotonne	überwiegend Altpapier, bei Verschmutzung häufig Rest- oder Biomüll	je nach Material und Verschmutzung Altpapier, Biomüll oder Restmüll	Die tatsächliche Entsorgung hängt wesentlich vom Verschmutzungsgrad und den regionalen Entsorgungswegen ab.

Die zusammenfassende Betrachtung zeigt, dass alle drei Verpackungssysteme grundsätzlich auf nachwachsenden Rohstoffen basieren. Unterschiede ergeben sich insbesondere in der Bereitstellung der Rohstoffe sowie in den eingesetzten Herstellungsverfahren.

Das entwickelte Luzerne-Verpackungssystem zeichnet sich vor allem durch die Nutzung einer bereits im Projekt bereitgestellten Grobfraktion sowie durch das vergleichsweise einfache Formpressverfahren aus. Im Gegensatz zu Karton- und Fasergussverfahren wird keine wasserbasierte Fasersuspension hergestellt. Dadurch beschränkt sich der direkte Prozesswassereinsatz auf 7,2 g je

Verpackungsschale. Gleichzeitig entfallen wasserintensive Prozessschritte wie die Herstellung einer Fasersuspension oder deren anschließende Entwässerung.

Für die untersuchten Referenzverpackungen konnten keine belastbaren und direkt vergleichbaren Kennwerte zu Energie- und Wasserverbräuchen identischer Verpackungseinheiten ermittelt werden. Eine quantitative Gegenüberstellung dieser Kenngrößen war daher nicht möglich. Die Literaturrecherche zeigt jedoch, dass sowohl bei der Herstellung von Karton als auch beim Faserguss wasserbasierte Prozessschritte eine wesentliche Rolle spielen und mit zusätzlichem Aufwand für Wasserführung, Entwässerung und Trocknung verbunden sind.

Ein weiterer Vorteil des entwickelten Systems besteht in der Möglichkeit einer regionalen Umsetzung. Durch die räumliche Verbindung von landwirtschaftlicher Erzeugung, Rohstoffaufbereitung, Verpackungsherstellung und Vermarktung können Transportwege reduziert und vorhandene Infrastruktur mehrfach genutzt werden.

Fazit

Die im Rahmen dieses Projektbausteins durchgeführte ökologische Bewertung hatte das Ziel, das entwickelte Verpackungssystem auf Basis der im Projekt erhobenen Daten sowie einer ergänzenden Recherche einzuordnen und mit etablierten Verpackungssystemen aus Karton/Pappe und Faserguss zu vergleichen.

Die zusammenfassende Betrachtung zeigt, dass das entwickelte Verpackungssystem insbesondere in den Bereichen Rohstoffbereitstellung, Herstellungsverfahren, regionaler Wertschöpfung und End-of-Life ökologische Potenziale aufweist. Die Nutzung der im Projekt bereitgestellten Luzerne-Grobfraction, die Möglichkeit einer regionalen Rohstoffbereitstellung sowie die direkte Formpressung mit einem geringen Prozesswassereinsatz stellen wesentliche Unterschiede gegenüber den betrachteten Referenzsystemen dar. Ergänzt wird dieser Ansatz durch die stoffliche Nutzung aussortierter Erbsen sowie die Möglichkeit, vorhandene Aufbereitungstechnik für mehrere Stoffströme einzusetzen.

Ein wesentliches Ziel der Bearbeitung war eine möglichst quantitative Gegenüberstellung der verschiedenen Verpackungssysteme. Während für das entwickelte Verpackungssystem umfangreiche Projektdaten zur Rohstoffaufbereitung, Materialrezeptur sowie zum Energie- und Wasserbedarf der Herstellung vorlagen, konnten für marktübliche Karton- und Fasergussverpackungen trotz umfangreicher Recherche keine ausreichend vergleichbaren und belastbaren Kennwerte identischer Verpackungseinheiten ermittelt werden. Insbesondere für Energie- und Wasserverbräuche der Herstellungsprozesse lagen überwiegend allgemeine Branchenangaben oder Daten zu vorgelagerten Produktionsschritten vor, nicht jedoch zu den betrachteten Verpackungsschalen selbst.

Aus diesem Grund wurde bewusst darauf verzichtet, scheinbar exakte Vergleichswerte abzuleiten oder rechnerische Annahmen zu treffen, die durch die vorhandene Datenlage nicht ausreichend abgesichert gewesen wären. Stattdessen erfolgte die Einordnung der Referenzsysteme qualitativ auf Grundlage der recherchierten Herstellungsverfahren sowie der verfügbaren Rechercheergebnisse. Für das entwickelte Verpackungssystem konnten dagegen die im Projekt ermittelten Prozessdaten transparent dargestellt und bewertet werden.

Die ökologische Bewertung versteht sich daher nicht als vollständige Lebenszyklusanalyse nach ISO 14040/14044, sondern als praxisorientierte Einordnung eines im Projekt entwickelten Verpackungssystems. Durch die Kombination aus eigenen Projektdaten, Recherche und qualitativer Bewertung konnten dennoch belastbare Aussagen zu den ökologisch relevanten Eigenschaften der verschiedenen Verpackungssysteme getroffen werden.

Die Bewertung zeigt, dass das entwickelte Formpressverfahren einen vielversprechenden Ansatz für die Herstellung biobasierter Verpackungsschalen darstellt. Neben der Nutzung nachwachsender Rohstoffe ermöglicht das Verfahren eine regionale Verknüpfung von landwirtschaftlicher Erzeugung, Rohstoffaufbereitung, Verpackungsherstellung und Vermarktung. Damit wird der bioökonomische Grundgedanke einer regionalen und ressourceneffizienten Wertschöpfungskette in besonderem Maße unterstützt.

Für eine weiterführende ökologische Bewertung wäre im nächsten Schritt eine vergleichende Lebenszyklusanalyse unter identischen Systemgrenzen sinnvoll. Hierfür wären insbesondere belastbare Prozessdaten industrieller Referenzverpackungen sowie Produktionsdaten einer späteren Serienfertigung der entwickelten Luzerneschalen erforderlich. Dadurch könnten die in dieser Arbeit qualitativ dargestellten Unterschiede zukünftig auch quantitativ gegenübergestellt werden.

Die vorliegende ökologische Bewertung zeigt zugleich, dass die Entwicklung biobasierter Verpackungen nicht ausschließlich auf den Ersatz eines einzelnen Verpackungsmaterials abzielt. Das entwickelte Verpackungssystem verdeutlicht vielmehr, wie landwirtschaftliche Rohstoffe, stoffliche Kaskadennutzung, regionale Verarbeitung und Vermarktung zu einer ganzheitlichen bioökonomischen Wertschöpfungskette verbunden werden können. Gerade diese systemische Betrachtung stellt einen wesentlichen Mehrwert des im Projekt verfolgten Ansatzes dar.