

# AP 11 Projektbaustein: Wirtschaftlichkeit

## 1. Einleitung

Die Entwicklung biobasierter Verpackungsmaterialien gewinnt vor dem Hintergrund steigender Anforderungen an Ressourceneffizienz, Klimaschutz und nachhaltige Wertschöpfung zunehmend an Bedeutung. Gleichzeitig stehen landwirtschaftliche Betriebe vor der Herausforderung, zusätzliche Einkommensquellen zu erschließen und vorhandene Rohstoffe möglichst vollständig zu nutzen. Nachwachsende Rohstoffe bieten hierfür die Möglichkeit, stoffliche und wirtschaftliche Nutzung miteinander zu verbinden und regionale Wertschöpfungsketten zu stärken.

Im Rahmen des Forschungsprojektes MicroGrow wurde deshalb eine neuartige Prozesskette entwickelt, die Luzerneheu nicht ausschließlich als Futter- oder Biomasserohstoff betrachtet, sondern dessen stoffliches Nutzungspotenzial erweitert. Durch die Fraktionierung des Rohstoffes entstehen eine Fein- und eine Grobfraction, die unterschiedlichen hochwertigen Nutzungspfaden zugeführt werden können. Die Feinfraction dient der Herstellung von Luzerneproteinpellets, während die Grobfraction als Ausgangsmaterial für biobasierte Formpressteile genutzt wird. Die im Projekt entwickelte Kultivierungsschale stellt hierbei einen Demonstrator dar und dient als Nachweis der grundsätzlichen Material- und Prozessfähigkeit. Langfristig wird insbesondere in der Übertragung auf Verpackungsschalen und weitere Formpressteile mit deutlich höheren Stückzahlen das wirtschaftliche Potenzial der entwickelten Materiallösung gesehen.

Neben der technischen Machbarkeit stellt die wirtschaftliche Umsetzbarkeit einen entscheidenden Faktor für die praktische Anwendung der entwickelten Prozesskette dar. Die Einführung neuer Wertschöpfungsketten erfordert Investitionen in Aufbereitung und Weiterverarbeitung sowie eine Einordnung unterschiedlicher betrieblicher Ausgangssituationen. Gleichzeitig ergeben sich durch die Mehrproduktstrategie zusätzliche Erlösmöglichkeiten, neue Vermarktungspotenziale sowie eine verbesserte Nutzung vorhandener Infrastruktur.

Ziel dieses Projektbausteins ist die Entwicklung einer nachvollziehbaren Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für die im Projekt entwickelte Wertschöpfungskette. Hierzu werden zunächst die wirtschaftlichen Grundlagen der Rohstoffbereitstellung sowie der Weiterverarbeitung beschrieben. Darauf aufbauend werden die wesentlichen Einflussgrößen der Wirtschaftlichkeit, unterschiedliche betriebliche Umsetzungsmöglichkeiten sowie der wirtschaftliche Nutzen der entwickelten Systemlösung systematisch eingeordnet. Die Betrachtung dient dabei nicht der Ableitung allgemeingültiger Investitionsempfehlungen, sondern der wirtschaftlichen Bewertung möglicher Entwicklungspfade für unterschiedliche landwirtschaftliche Betriebsstrukturen.

## 2. Methodisches Vorgehen der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung verfolgt das Ziel, die im Forschungsprojekt entwickelte Wertschöpfungskette hinsichtlich ihrer wirtschaftlichen Umsetzungsmöglichkeiten systematisch einzuordnen. Aufgrund des Demonstratorcharakters des Projektes steht dabei nicht die Erstellung einer vollständigen Investitionsrechnung für einen konkreten Betrieb im Vordergrund. Vielmehr werden belastbare wirtschaftliche Grundlagen geschaffen, auf deren Basis unterschiedliche betriebliche Umsetzungsszenarien bewertet und miteinander verglichen werden können.

Die Berechnungen basieren auf einer Kombination verschiedener Datenquellen. Grundlage der Rohstoffbereitstellung bilden standardisierte Verfahrensdaten des Kuratoriums für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL), die anhand betrieblicher Rahmenbedingungen und projektspezifischer Annahmen auf das entwickelte Verfahren übertragen wurden. Dabei wurden

unter anderem die eingesetzte Technik, die jeweiligen Arbeitsverfahren sowie die betrieblichen Gegebenheiten des im Projekt betrachteten Referenzbetriebes berücksichtigt. Ergänzend wurden Versuchsergebnisse aus dem Forschungsvorhaben, Herstellerangaben zu den eingesetzten Maschinen sowie projektspezifische Material- und Prozessdaten herangezogen.

Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung gliedert sich in mehrere aufeinander aufbauende Betrachtungsebenen. Zunächst werden die Kosten der Rohstoffbereitstellung sowie der anschließenden Aufbereitung und Weiterverarbeitung ermittelt. Darauf aufbauend erfolgt die Beschreibung der entwickelten Mehrproduktstrategie einschließlich der Skalierungsbetrachtung und der daraus ableitbaren Produktpotenziale. Anschließend werden die wesentlichen wirtschaftlichen Einflussgrößen analysiert und unterschiedliche Betriebsmodelle hinsichtlich ihrer wirtschaftlichen Umsetzungsmöglichkeiten bewertet. Abschließend erfolgt eine zusammenfassende Einordnung des wirtschaftlichen Nutzens der entwickelten Systemlösung.

Zur Sicherstellung einer nachvollziehbaren und transparenten Bewertung werden sämtliche Berechnungen auf ein einheitliches Referenzszenario bezogen. Grundlage bildet eine jährliche Verarbeitungsmenge von 90 t Trockenmasse Luzerneheu, welche den betrieblichen Gegebenheiten des im Projekt betrachteten Praxisbetriebes entspricht. Ergänzend werden unterschiedliche Skalierungsstufen betrachtet, um die Übertragbarkeit der entwickelten Prozesskette auf verschiedene Betriebsgrößen und Organisationsformen beurteilen zu können.

Da sich einzelne Teilbereiche der entwickelten Prozesskette – insbesondere die industrielle Herstellung biobasierter Formpressteile – noch im Demonstratorstadium befinden, konnten nicht für alle Prozessschritte belastbare Serienkosten ermittelt werden. In diesen Fällen werden nachvollziehbare Annahmen, wirtschaftliche Zielwerte sowie Marktpreisbandbreiten verwendet. Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung verfolgt dabei bewusst das Ziel, keine Scheingenauigkeit zu erzeugen. Stattdessen werden die Ergebnisse als belastbare Orientierung für mögliche betriebliche Entwicklungspfade interpretiert und hinsichtlich ihrer wirtschaftlichen Bedeutung eingeordnet.

### **3. Quantitative Grundlagen der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung**

#### **3.1 Zielsetzung und Einordnung**

Die Entwicklung einer wirtschaftlich tragfähigen Verwertungskette für Luzerneheu setzt eine belastbare Datengrundlage voraus, auf deren Basis die im Projekt entwickelten technischen Lösungen bewertet werden können. Während im Technischen Anlagenkonzept die technischen Voraussetzungen für eine erzeugernahe sowie industrielle Verarbeitung untersucht und unterschiedliche Anlagen- und Betriebskonzepte entwickelt wurden, verfolgt der vorliegende Projektbaustein das Ziel, diese technischen Konzepte aus wirtschaftlicher Sicht einzuordnen und hinsichtlich ihrer Umsetzbarkeit zu bewerten. Beide Projektbausteine bauen dabei unmittelbar aufeinander auf: Das Technische Anlagenkonzept beantwortet die Frage, wie eine technische Umsetzung der Prozesskette erfolgen kann, während die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung untersucht, unter welchen wirtschaftlichen Rahmenbedingungen diese Prozesskette tragfähig umgesetzt werden kann.

Die Grundlage hierfür bilden die im Forschungsprojekt erarbeiteten quantitativen Ergebnisse aus den verschiedenen Arbeitspaketen. Hierzu zählen insbesondere die Untersuchungen zur Rohstoffbereitstellung und Fraktionierung des Luzerneheus, die Entwicklung der Formpresstechnologie, die Material- und Rezepturentwicklung der Verpackungsschalen sowie die Erkenntnisse aus der Herstellung und Erprobung des Demonstrators. Diese Ergebnisse werden im vorliegenden Kapitel zunächst zusammengeführt und in einen wirtschaftlichen Zusammenhang eingeordnet. Ziel ist es, eine einheitliche Datengrundlage zu schaffen, auf der die anschließende

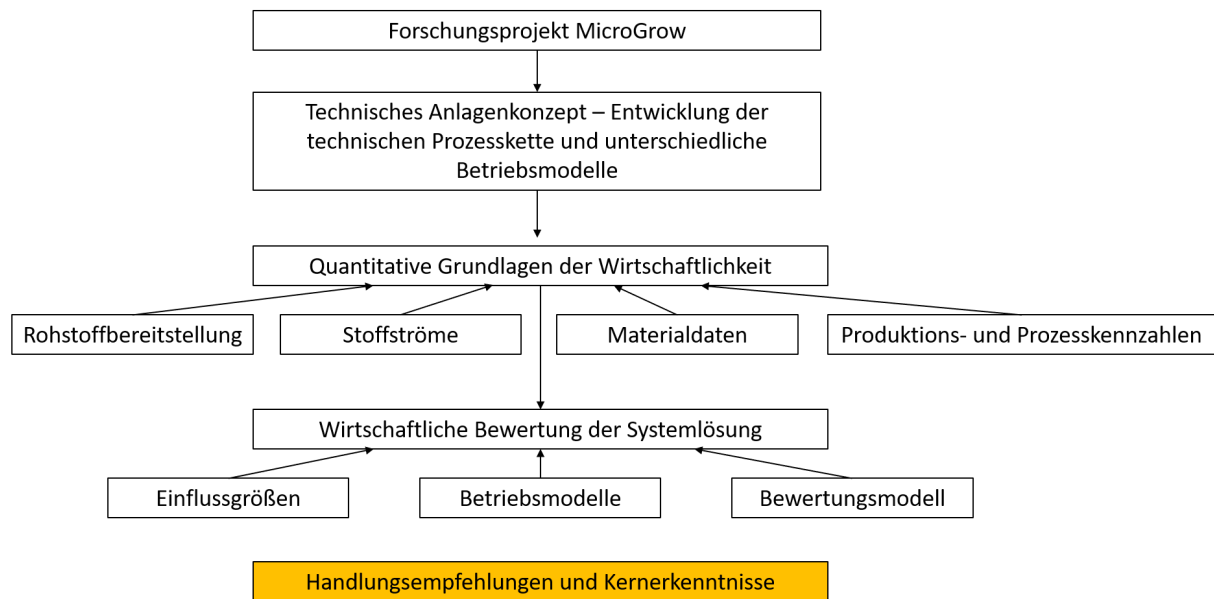
Bewertung unterschiedlicher Betriebsmodelle sowie die Ableitung wirtschaftlicher Schlussfolgerungen aufbauen können.

Im Gegensatz zu einer klassischen Investitions- oder Vollkostenrechnung verfolgt die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung bewusst einen systemorientierten Ansatz. Gegenstand der Untersuchung ist nicht die Kalkulation eines einzelnen Produktes oder einer konkreten Produktionsanlage, sondern die Bewertung einer im Projekt entwickelten Wertschöpfungskette, die mehrere stoffliche Nutzungspfade miteinander verbindet. Die wirtschaftliche Leistungsfähigkeit ergibt sich daher nicht aus der isolierten Betrachtung einzelner Prozessschritte, sondern aus dem Zusammenspiel der gesamten Prozesskette – beginnend bei der landwirtschaftlichen Rohstoffbereitstellung über die Fraktionierung und Weiterverarbeitung bis hin zur Nutzung der entstehenden Stoffströme in unterschiedlichen Produktlinien.

Diese Herangehensweise trägt gleichzeitig dem Entwicklungsstand der im Projekt erarbeiteten Technologien Rechnung. Zahlreiche technische Lösungen wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens erfolgreich entwickelt und anhand eines Demonstrators validiert, befinden sich jedoch noch nicht in einer industriellen Produktionsumgebung. Für wesentliche Einflussgrößen, wie beispielsweise zukünftige Investitionskosten, den Automatisierungsgrad einer großtechnischen Fertigung oder langfristige Markt- und Absatzentwicklungen, liegen derzeit keine belastbaren Praxiserfahrungen vor. Eine vollständige Investitionsrechnung würde daher auf einer Vielzahl hypothetischer Annahmen beruhen und eine Genauigkeit suggerieren, die dem Entwicklungsstand der Technologie nicht gerecht werden würde. Stattdessen werden im vorliegenden Projekt ausschließlich solche Kenngrößen quantitativ ausgewertet, die innerhalb des Forschungsvorhabens experimentell oder konzeptionell belastbar ermittelt werden konnten. Ergänzend werden qualitative Einflussgrößen systematisch bewertet und in die wirtschaftliche Gesamtbetrachtung integriert.

Die quantitative Betrachtung übernimmt damit eine grundlegende Funktion innerhalb des gesamten Projektbausteins. Sie bildet nicht das Ergebnis der Wirtschaftlichkeitsbewertung, sondern deren Ausgangspunkt. Erst die Kombination der hier dargestellten Datengrundlagen mit den nachfolgenden Analysen der wirtschaftlichen Einflussgrößen und der unterschiedlichen Betriebsmodelle ermöglicht eine belastbare Einordnung der entwickelten Systemlösung. Das Kapitel stellt somit die Verbindung zwischen den technischen Ergebnissen des Forschungsprojektes und deren wirtschaftlicher Bewertung her und schafft gleichzeitig die Grundlage für das in den folgenden Kapiteln entwickelte wirtschaftliche Bewertungsmodell.

Zur Einordnung der einzelnen Projektbausteine innerhalb der Gesamtbewertung ist der methodische Aufbau der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung in Abbildung 1 schematisch dargestellt.



**Abbildung 1: Methodischer Aufbau der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung innerhalb des Gesamtprojektes**

Die Abbildung verdeutlicht die Stellung des vorliegenden Kapitels innerhalb des Gesamtprojektes. Aufbauend auf den technischen Ergebnissen werden zunächst die wirtschaftlich relevanten Datengrundlagen systematisch zusammengeführt. Diese bilden die Basis für die nachfolgende Bewertung der wirtschaftlichen Einflussgrößen, die vergleichende Einordnung der entwickelten Betriebsmodelle sowie die Ableitung eines wirtschaftlichen Bewertungsmodells. Die quantitativen Grundlagen sind damit nicht als isolierte Datensammlung zu verstehen, sondern als verbindendes Element zwischen der technischen Entwicklung und der wirtschaftlichen Bewertung der im Projekt entwickelten Wertschöpfungskette.

### 3.2 Wirtschaftliche Beschreibung der Rohstoffbereitstellung

Die Bereitstellung des Rohstoffes bildet die wirtschaftliche Ausgangsbasis der im Projekt entwickelten Wertschöpfungskette. Unabhängig davon, welche Produkte im weiteren Verlauf der Prozesskette hergestellt oder welches Betriebsmodell umgesetzt wird, beginnt die Wertschöpfung stets mit der Erzeugung und Bereitstellung des Luzerneheus. Die hierbei entstehenden Kosten stellen zunächst gemeinsame Systemkosten dar und können zu diesem Zeitpunkt noch keinem einzelnen Produkt oder Stoffstrom zugeordnet werden. Aus diesem Grund wird die Rohstoffbereitstellung zunächst als eigenständiger Prozess betrachtet und hinsichtlich ihrer wirtschaftlichen Rahmenbedingungen beschrieben.

Im Technischen Anlagenkonzept wurde bereits dargestellt, wie die technische Prozesskette aufgebaut ist und welche Verfahrensschritte für die Verarbeitung des Luzerneheus erforderlich sind. Für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung ist zunächst entscheidend, unter welchen betrieblichen Rahmenbedingungen der Rohstoff bereitgestellt wird und welche Kosten hierfür entstehen. Erst auf dieser Grundlage können die nachfolgenden Prozessschritte sowie die unterschiedlichen Betriebsmodelle wirtschaftlich bewertet werden.

Die Berechnung der Rohstoffbereitstellung orientiert sich an der im Projekt zugrunde gelegten betrieblichen Umsetzung. Hierfür wurde das vollständige Arbeitsverfahren der Luzerneheubereitstellung – von der Bestandsführung über Mahd, Schwaden, Bergen und Transport bis hin zur Trocknung und Einlagerung – entsprechend der vorgesehenen Prozesskette abgebildet. Die einzelnen Arbeitsgänge wurden mit Hilfe des KTBL-Verfahrensrechners kalkuliert. Grundlage hierfür

bilden standardisierte Arbeitsverfahren des KTBL, wobei die jeweils eingesetzten Maschinen, Leistungsdaten und Verfahrenskombinationen entsprechend den betrieblichen Gegebenheiten ausgewählt wurden. Die Berechnung stellt somit keine allgemeine Standardkalkulation dar, sondern bildet das im Projekt betrachtete Bereitstellungsverfahren unter den zugrunde gelegten Rahmenbedingungen nachvollziehbar ab.

Die einzelnen Arbeitsgänge einschließlich der zugehörigen Maschinenkombinationen und Arbeitserledigungskosten sind in Tabelle 1 dargestellt.

**Tabelle 1: Arbeitsverfahren der Rohstoffbereitstellung einschließlich Maschinen-, Arbeitszeit- und Arbeitserledigungskosten**

| Häufigkeit | Zeit-<br>raum | Arbeitsvorgang                            | Menge   | Arbeits-<br>zeitbe-<br>darf | Diesel-<br>bedarf | Maschinen<br>kosten |
|------------|---------------|-------------------------------------------|---------|-----------------------------|-------------------|---------------------|
| rel.       |               |                                           | .../ ha | h/ ha                       | l/ ha             | €/ ha               |
| 0,25       | Sep 02        | Bodenprobe                                |         |                             |                   |                     |
|            |               | Entnahme von Hand, Fahrten<br>mit Pickup  |         | 0,05                        | 0,12              | 0,31                |
| 0,33       | Sep 02        | Grubbern mit<br>Flügelschargrubber        |         |                             |                   |                     |
|            |               | 4,5 m; 102 kW                             |         | 0,15                        | 2,23              | 8,77                |
| 0,33       | Sep 02        | Grubbern mit<br>Flügelschargrubber        |         |                             |                   |                     |
|            |               | 4,5 m; 102 kW                             |         | 0,15                        | 2,23              | 8,77                |
| 0,33       | Sep 02        | Aussaat mit Kreiselegge und<br>Sämaschine | 30 kg   |                             |                   |                     |
|            |               | 4 m; 120 kW                               |         | 0,27                        | 4,57              | 17,64               |
| 0,66       | Mrz 02        | Nachsaat                                  | 14 kg   |                             |                   |                     |
|            |               | 3 m 67 kW                                 |         | 0,62                        | 5,25              | 20,45               |
| 1          | Mai 02        | Mähen mit Rotationsmähwerk                | 12 t    |                             |                   |                     |
|            |               | 4,5 m, Front-Heck-<br>Kombination; 102 kW |         | 0,34                        | 4,27              | 15,22               |
| 1,5        | Mai 02        | Wenden mit Kreiselzettwender              |         |                             |                   |                     |
|            |               | 8,75 m; 67 kW                             |         | 0,36                        | 3,99              | 13,73               |
| 1          | Mai 02        | Schwaden mit Bandschwader                 |         |                             |                   |                     |
|            |               | 9 m; 120 kW                               |         | 0,22                        | 3,82              | 17,62               |

|      |              |                                                               |       |       |       |        |
|------|--------------|---------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|--------|
| 1    | Mai 02       | Belüftungsheu bergen mit<br>Ladewagen                         | 2,4 t |       |       |        |
|      |              | 25 m <sup>3</sup> ; 2,8 t; 83 kW                              |       | 0,46  | 3,07  | 22,69  |
|      |              | Heukran, 5mt, 30 m Schiene, 2<br>t                            |       | 0,48  | 0,00  | 5,81   |
| 3    | Jun -<br>Aug | Mähen mit<br>Rotationsmäähwerk                                | 28 t  |       |       |        |
|      |              | 4,5 m, Front-Heck-<br>Kombination; 102 kW                     |       | 1,02  | 15,63 | 47,94  |
| 4,5  | Jun -<br>Aug | Wenden mit Kreiselzettwender                                  |       |       |       |        |
|      |              | 8,75 m; 67 kW                                                 |       | 1,08  | 11,97 | 41,19  |
| 3    | Jun -<br>Aug | Schwaden mit Bandschwader                                     |       |       |       |        |
|      |              | 9 m; 120 kW                                                   |       | 0,66  | 11,46 | 52,85  |
| 3    | Jun -<br>Aug | Belüftungsheu bergen mit<br>Ladewagen                         | 5,6 t |       |       |        |
|      |              | 25 m <sup>3</sup> ; 2,8 t; 83 kW                              |       | 2,4   | 14,73 | 119,52 |
|      |              | Heukran, 5mt, 30 m Schiene, 2<br>t                            |       | 2,67  | 0,00  | 31,89  |
| 0,33 | Jun 02       | Kalk streuen, ab Schlagrand                                   | 3 t   |       |       |        |
|      |              | Radlader, 67 kW;<br>Mineraldüngerschaufel, 1,2 m <sup>3</sup> |       |       |       |        |
|      |              | 8 m <sup>3</sup> ,<br>Anhängerschleuderstreuer, 67<br>kW      |       |       |       |        |
|      |              | Zinskosten (3%, 3 Monate)                                     |       |       |       | 1,32   |
|      |              | Summe                                                         |       | 11,15 | 86,11 | 436,46 |

Die Übersicht verdeutlicht, dass sich die Rohstoffbereitstellung aus einer Vielzahl aufeinander abgestimmter Arbeitsgänge zusammensetzt. Neben den klassischen Feldarbeiten umfasst das Verfahren auch Transport- und Trocknungsschritte, welche insbesondere bei der Bereitstellung von hochwertigem Luzerneheu einen wesentlichen Einfluss auf die spätere Materialqualität besitzen. Gleichzeitig wird deutlich, dass die Bereitstellungskosten nicht durch einen einzelnen Arbeitsgang bestimmt werden, sondern aus dem Zusammenwirken der gesamten Prozesskette entstehen.

Die in Tabelle 2 dargestellten Arbeitserledigungskosten bilden einen wesentlichen Bestandteil der variablen Verfahrenskosten. Für die wirtschaftliche Bewertung eines zusätzlichen Betriebszweiges reicht ihre alleinige Betrachtung jedoch nicht aus. Ziel des Projektes ist die Einordnung einer

vollständigen Wertschöpfungskette und damit die Beurteilung der tatsächlich entstehenden Kosten der Rohstoffbereitstellung. Aus diesem Grund wird im weiteren Verlauf eine Vollkostenbetrachtung durchgeführt.

Hierzu werden die Direkt- und Arbeiterledigungskosten um weitere Kostenbestandteile ergänzt. Neben den unmittelbar dem Arbeitsverfahren zuordenbaren Kosten werden unter anderem Personal- und Betriebsmittelkosten, Gemeinkosten, Pachtansätze sowie die Kosten der Nährstoffabfuhr berücksichtigt. Auf diese Weise wird die Rohstoffbereitstellung als vollständiger betrieblicher Prozess wirtschaftlich beschrieben.

Die daraus resultierenden Direkt- und Arbeiterledigungskosten sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

**Tabelle 2: Direkt- und Arbeiterledigungskosten des Arbeitsverfahrens „Belüftungsheuerzeugung für das Boxentrocknungsverfahren“ in €/ha**

| Kosten                         | in €/ ha |
|--------------------------------|----------|
| Maschinenkosten                | 436,46   |
| Kosten für Dienstleistungen    | 3,78     |
| Personalkosten                 | 200,62   |
| Betriebsstoffe (Diesel, Strom) | 76,67    |
| Zinskosten                     | 38,64    |
| Gesamt                         | 756,16   |

Die Zusammenstellung zeigt, dass sich die Kosten der Rohstoffbereitstellung aus mehreren Kostenarten zusammensetzen. Während Maschinen- und Arbeiterledigungskosten unmittelbar aus den einzelnen Arbeitsgängen hervorgehen, werden Personal-, Betriebsmittel- und weitere variable Kosten ergänzend berücksichtigt. Die Tabelle dient damit als Bindeglied zwischen der technischen Beschreibung des Arbeitsverfahrens und der anschließenden Vollkostenbetrachtung.

Für die Wirtschaftlichkeitsbewertung des im Projekt entwickelten zusätzlichen Betriebszweiges wird bewusst eine Vollkostenbetrachtung gewählt. Dadurch werden sämtliche Kosten berücksichtigt, die langfristig mit der Bereitstellung des Rohstoffes verbunden sind. Dieses Vorgehen ermöglicht eine realistische Einordnung der wirtschaftlichen Ausgangsbasis und schafft gleichzeitig eine belastbare Grundlage für die nachfolgenden Berechnungen der gesamten Wertschöpfungskette.

Die vollständigen Vollkosten der Rohstoffbereitstellung sind in Tabelle 3 dargestellt.

**Tabelle 3: Vollkosten des Arbeitsverfahrens „Belüftungsheuerzeugung für das Boxentrocknungsverfahren“**

| Kosten                                                           | in €/ ha |
|------------------------------------------------------------------|----------|
| Fixe Kosten                                                      |          |
| Gemeinkosten                                                     | 76       |
| Variable Kosten                                                  |          |
| Direkt- und Arbeitserledigungskosten (inkl. Maschinenfestkosten) | 756      |
| Pachtansatz                                                      | 340      |
| Nährstoffabfuhr*                                                 | 491      |
| Prämien                                                          | -210     |
| Gesamt                                                           | 1.377    |
|                                                                  |          |
| Gesamtkosten (fixe + var. Kosten)                                | 1.453    |
|                                                                  |          |
|                                                                  | in €/ t  |
| Fixe Kosten                                                      | 10       |
| Variable Kosten                                                  | 172      |
| Gesamtkosten                                                     | 182      |

Die Vollkostenberechnung fasst sämtliche Kostenbestandteile der Rohstoffbereitstellung zusammen und stellt damit die wirtschaftliche Ausgangsbasis der weiteren Betrachtungen dar. Neben den variablen Kosten fließen auch fixe Kostenbestandteile sowie betriebliche Gemeinkosten in die Berechnung ein. Durch die Umrechnung auf die Tonne Trockenmasse entsteht eine einheitliche Bezugsgröße, welche unabhängig von Flächengrößen oder Erträgen für die nachfolgenden Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen verwendet werden kann.

Aus der Vollkostenrechnung ergeben sich Bereitstellungskosten von 182 €/t Trockenmasse Luzerneheu. Dieser Wert beschreibt die vollständigen Kosten der Rohstoffbereitstellung unter den im Projekt zugrunde gelegten Rahmenbedingungen und bildet die wirtschaftliche Ausgangsbasis sämtlicher weiterer Berechnungen. Er wird daher im weiteren Verlauf des Projektbausteins als einheitlicher Modellparameter verwendet.

Die bisher dargestellte Vollkostenberechnung beschreibt die Bereitstellung des Luzerneheus bis zum Zeitpunkt der Einlagerung. Im Projekt erfolgt die weitere Verarbeitung jedoch nicht unmittelbar nach der Ernte, sondern nach einer schonenden Trocknung des Erntegutes im Boxentrocknungsverfahren. Die Trocknung stellt damit einen eigenständigen Bestandteil der Rohstoffbereitstellung dar und muss bei einer vollständigen wirtschaftlichen Betrachtung ebenfalls berücksichtigt werden.

Im Rahmen des Projektes wurde hierfür die auf dem Betrieb vorhandene Boxentrocknungsanlage betrachtet. Da diese ursprünglich für den Betriebszweig Milchvieh ausgelegt wurde, können die

Investitions- und Betriebskosten nicht unmittelbar auf den neuen Betriebszweig übertragen werden. Gleichzeitig bietet die bereits vorhandene Infrastruktur einen erheblichen wirtschaftlichen Vorteil, da keine vollständige Neuinvestition erforderlich ist. Die wirtschaftliche Bewertung der Trocknung berücksichtigt daher sowohl die bestehenden betrieblichen Gegebenheiten als auch die zusätzlichen Anforderungen der im Projekt entwickelten Wertschöpfungskette.

Zur Ermittlung der Trocknungskosten wurden zunächst die Investitionskosten der vorhandenen Anlage sowie die daraus resultierenden jährlichen Fixkosten bestimmt. Diese umfassen insbesondere Abschreibungen, kalkulatorische Reparaturkosten sowie kalkulatorische Zinsen. Ergänzend wurden die variablen Energiekosten berücksichtigt. Während die Investitionsdaten auf den betrieblichen Daten von Vorwerk Podemus beruhen, wurden die Energiekosten auf Grundlage veröffentlichter KTBL-Daten angesetzt, da hierfür keine belastbaren betrieblichen Verbrauchsdaten vorlagen. Durch diese Kombination aus betrieblichen und standardisierten Datengrundlagen konnte die Trocknung wirtschaftlich nachvollziehbar abgebildet werden.

**Tabelle 4: Investitionsbedarf, Fixkosten und Energiekosten der Boxentrocknung bei Vorwerk Podemus**

|                                                      |         |
|------------------------------------------------------|---------|
| Für 60 ha = 480 t TM Heu                             | VWP     |
| Investitionsbedarf Halle                             |         |
| Gebäudehülle (1200 m <sup>2</sup> )                  | 300.000 |
| Boxen (3 x 330 m <sup>2</sup> = 990 m <sup>2</sup> ) | 55.000  |
| Kran                                                 | 90.000  |
| Summe Halle                                          | 445.000 |
| Trocknungstechnik                                    |         |
| Lüfter (2 x 22 kW)                                   | 24.000  |
| Unterdachabsaugung (1200 m <sup>2</sup> )            | 30.000  |
| Bodenheizung                                         | 30.000  |
| Steuerung                                            | 5.000   |
| Summe Trocknungstechnik                              | 89.000  |
| Summe Investitionsbedarf                             | 534.000 |
| Fixe Kosten                                          | €/ a    |
| Abschreibung*                                        | 27.683  |
| Reparaturkosten**                                    | 11.270  |
| Zinskosten                                           | 8.010   |
| Gesamt                                               | 46.963  |
|                                                      | €/ t    |
| Fixe Kosten trockenes Heu                            | 97,8    |

| Energiekosten Boxentrocknung                               | €/ 1. Schnitt und 1. Charge |
|------------------------------------------------------------|-----------------------------|
| Strom                                                      | 202***                      |
| Hackschnitzel                                              | 252***                      |
|                                                            | €/ t Heu                    |
| Energiekosten                                              | 16***                       |
|                                                            |                             |
| Gesamtkosten (fixe + var. Kosten) bei Grundkapazität 480 t | 114                         |
| Gesamtkosten (fixe + var. Kosten) Grundkapazität + 90 t TM | 82                          |

\*AfA Halle mit 20 Jahren abgeschrieben; AfA Trocknungstechnik mit 15 Jahren abgeschrieben

\*\* AfA 20 Jahre – Reparatur 2 %; AfA 15 Jahre – Reparatur 3 %

\*\*\* Daten aus KTBL-Literatur angenommen

Die Berechnung zeigt zunächst Gesamtkosten der Boxentrocknung von 114 €/t Heu, bestehend aus fixen und variablen Kosten. Für die weitere Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wurde dieser Wert jedoch nicht unmittelbar übernommen. Hintergrund ist die betriebliche Nutzung der vorhandenen Infrastruktur. Die Boxentrocknung wird bereits durch den bestehenden Milchviehbetrieb genutzt und ist dementsprechend auf dessen Produktionsumfang ausgelegt. Die im Projekt zusätzlich betrachteten 90 t Trockenmasse Luzerneheu stellen somit keine eigenständige Auslastung der Anlage dar, sondern werden innerhalb der vorhandenen Infrastruktur verarbeitet.

Für die wirtschaftliche Bewertung des neuen Betriebszweiges wurde deshalb die bestehende Auslastung der Trocknungsanlage berücksichtigt. Ausgangspunkt bildet eine jährliche Auslastung von 480 t Trockenmasse, welche durch die zusätzlichen Mengen des Projektes auf insgesamt 570 t Trockenmasse erhöht wird. Dadurch verteilen sich die Fixkosten auf eine größere Gesamtmenge, wodurch sich die spezifischen Fixkosten je Tonne entsprechend reduzieren.

Für die weiteren Berechnungen werden daher Fixkosten von 82 €/t Trockenmasse angesetzt. Dieser Wert beschreibt die wirtschaftliche Situation unter den im Projekt betrachteten betrieblichen Rahmenbedingungen und berücksichtigt die gemeinsame Nutzung der vorhandenen Trocknungsinfrastruktur. Gleichzeitig verdeutlicht dieses Vorgehen einen wesentlichen Aspekt der entwickelten Systemlösung: Die Nutzung bereits vorhandener Infrastruktur kann einen erheblichen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit neuer Wertschöpfungsketten besitzen und stellt insbesondere für landwirtschaftliche Betriebe einen wichtigen Vorteil bei der Umsetzung zusätzlicher Betriebszweige dar.

Die Herleitung der Rohstoffbereitstellung sowie der Trocknungskosten bildet die Grundlage für die nachfolgenden Wirtschaftlichkeitsberechnungen. Um sämtliche Berechnungen auf einer einheitlichen Datengrundlage aufzubauen, werden die wesentlichen Modellparameter der weiteren Wirtschaftlichkeitsbetrachtung in Tabelle 5 zusammengefasst.

**Tabelle 5: Modellparameter der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung**

| Modellparameter                           | Wert                                                     | Grundlage                                                                          |
|-------------------------------------------|----------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| Bereitstellungskosten Luzerneheu          | 182 €/t TM                                               | Vollkostenberechnung der Rohstoffbereitstellung                                    |
| Fixkosten Boxentrocknung                  | 82 €/t TM                                                | Projektspezifische Berechnung unter Berücksichtigung der vorhandenen Infrastruktur |
| Stoffstromverhältnis Fein- : Grobfraction | 60:40                                                    | Ergebnisse der Fraktionierungsversuche (AP2)                                       |
| Materialeinsatz Verpackungsschale         | 36 g Luzernefasern / 7 g Kiefernharz / 7 g Erbsenprotein | Materialentwicklung und Demonstrator (AP6/AP9)                                     |
| Kiefernharz                               | 2,00 €/kg                                                | Projektkalkulation                                                                 |
| Zielpreis Proteinpellets                  | 600–1.000 €/t                                            | Wirtschaftlichkeitsszenarien                                                       |

Die in Tabelle 5 zusammengefassten Modellparameter bilden die gemeinsame Berechnungsgrundlage der weiteren Wirtschaftlichkeitsbetrachtung. Sie fassen die wesentlichen Ergebnisse der Rohstoffbereitstellung zusammen und schaffen eine einheitliche Ausgangsbasis für die Bewertung der nachfolgenden Prozessschritte. Während die bisherige Betrachtung die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen der Bereitstellung beschreibt, erfolgt im nächsten Kapitel erstmals eine Differenzierung des Rohstoffes in unterschiedliche Stoffströme. Erst durch die Fraktionierung entstehen eigenständige Wertschöpfungspfade, auf deren Grundlage die wirtschaftliche Bewertung der entwickelten Systemlösung aufbaut.

### **3.3 Die Fraktionierung als wirtschaftlicher Schlüsselprozess der Systemlösung**

Mit der Bereitstellung des Luzerneheus liegt zunächst ein einheitlicher landwirtschaftlicher Rohstoff vor, dessen wirtschaftliche Ausgangsbasis in Kapitel 3.2 beschrieben wurde. Zu diesem Zeitpunkt können die entstehenden Kosten noch keinem einzelnen Produkt oder Verwertungsweg zugeordnet werden, da sämtliche Pflanzenbestandteile gemeinsam vorliegen. Erst die im Projekt entwickelte Fraktionierung schafft die Voraussetzung dafür, den Rohstoff entsprechend seiner stofflichen Eigenschaften aufzuteilen und unterschiedlichen Wertschöpfungspfaden zuzuführen. Damit stellt die Fraktionierung den Übergang von der landwirtschaftlichen Rohstoffbereitstellung zur eigentlichen wirtschaftlichen Nutzung der Biomasse dar.

Im Technischen Anlagenkonzept wurde die Fraktionierung bereits als zentraler technischer Prozessschritt der entwickelten Prozesskette beschrieben. Im Mittelpunkt standen dabei die technische Umsetzung sowie die Trennung der unterschiedlichen Pflanzenbestandteile. Für die wirtschaftliche Bewertung besitzt dieser Prozessschritt jedoch eine weitergehende Bedeutung. Die Fraktionierung entscheidet darüber, welche Stoffströme entstehen, welche Produkte daraus hergestellt werden können und wie flexibel die entwickelte Prozesskette auf unterschiedliche Markt- und Produktionsbedingungen reagieren kann. Sie bildet damit den wirtschaftlichen Schlüsselprozess der gesamten Systemlösung.

Im Rahmen der Untersuchungen wurde das Luzerneheu in eine blattreiche Feinfraktion sowie eine faserreiche Grobfraktion getrennt. Die Fraktionierung führte dabei zu einem Stoffstromverhältnis von rund 60 % Feinfraktion und 40 % Grobfraktion bezogen auf die Trockenmasse. Dieses Verhältnis stellt ein Ergebnis der im Projekt entwickelten Fraktionierung dar und bildet die Grundlage für die nachfolgenden Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen.

Während die Feinfraktion aufgrund ihres höheren Blatt- und Proteingehaltes bevorzugt für die Herstellung hochwertiger Luzerneproteinpellets vorgesehen ist, dient die Grobfraktion als Ausgangsmaterial für die im Projekt entwickelten biobasierten Formpressteile. Gleichzeitig eröffnet die Grobfraktion einen weiteren wirtschaftlichen Nutzungspfad. Abhängig von der jeweiligen Produktionssituation kann sie alternativ oder ergänzend zu proteinärmeren Luzernepellets verarbeitet werden. Dadurch lässt sich die vorhandene Produktionskapazität flexibler auslasten und auf unterschiedliche Marktanforderungen reagieren. Die entwickelte Prozesskette ist somit nicht auf ein einzelnes Endprodukt ausgerichtet, sondern ermöglicht eine bedarfsgerechte Kombination verschiedener Produktlinien.

Gerade diese Flexibilität stellt einen wesentlichen wirtschaftlichen Vorteil der entwickelten Systemlösung dar. Die Wirtschaftlichkeit wird nicht ausschließlich durch den Absatz eines einzelnen Produktes bestimmt, sondern durch die Möglichkeit, unterschiedliche Stoffströme gezielt verschiedenen Verwertungswegen zuzuführen. Veränderungen der Nachfrage oder der Produktionsplanung können dadurch innerhalb der bestehenden Prozesskette berücksichtigt werden, ohne dass die stoffliche Nutzung des Rohstoffes grundsätzlich verändert werden muss.

Die wirtschaftliche Bedeutung der Fraktionierung liegt daher nicht allein in der Trennung unterschiedlicher Pflanzenbestandteile, sondern in der Schaffung einer Mehrproduktstrategie. Während konventionelle Nutzungskonzepte häufig auf ein einzelnes Hauptprodukt ausgerichtet sind, entstehen im vorliegenden Projekt mehrere eigenständige Wertschöpfungspfade, die gemeinsam zur wirtschaftlichen Nutzung des Rohstoffes beitragen. Die Fraktionierung erhöht somit nicht den Wert eines einzelnen Produktes, sondern den wirtschaftlichen Nutzen des gesamten Rohstoffes.

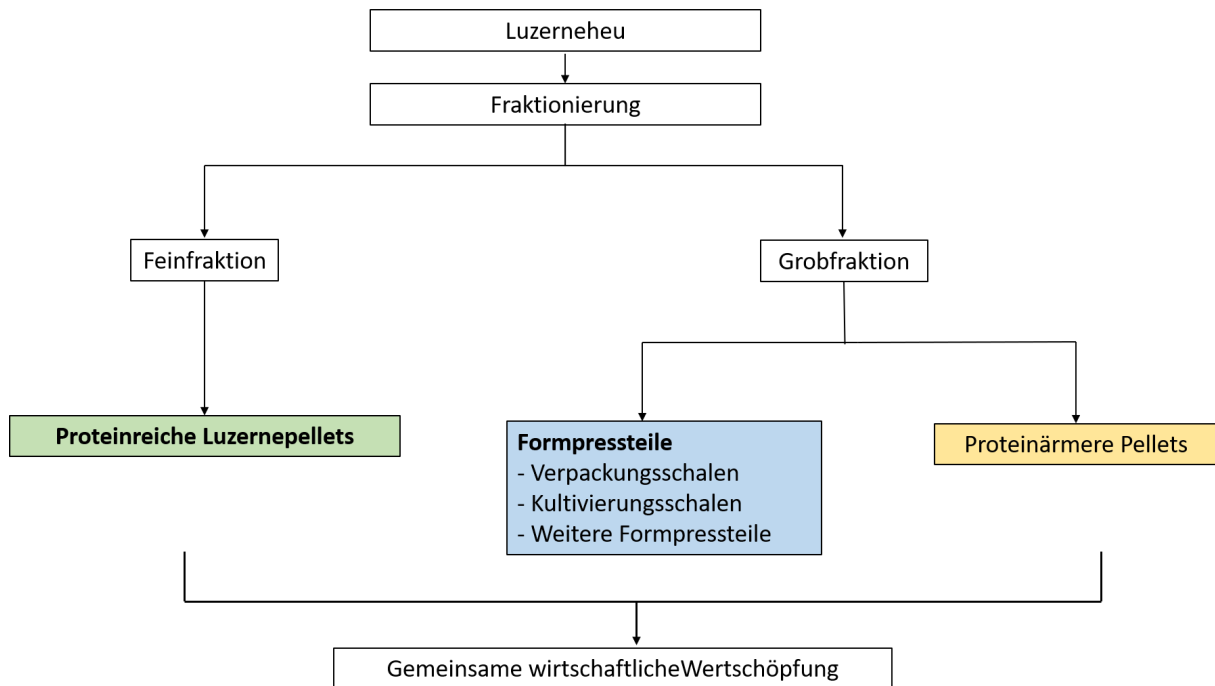
Die aus der Fraktionierung resultierenden Stoffströme sowie deren wirtschaftliche Funktion sind in Tabelle 6 zusammengefasst.

**Tabelle 6: Stoffströme und wirtschaftliche Nutzung der Fraktionen**

| Stoffstrom   | Anteil an der Trockenmasse | Primäre Nutzung                                | Alternative Nutzung                                                   | Wirtschaftliche Bedeutung                                                                           |
|--------------|----------------------------|------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Feinfraktion | ca. 60 %                   | Herstellung hochwertiger Luzerneproteinpellets | Weitere hochwertige stoffliche oder futterwirtschaftliche Anwendungen | Erschließung hochwertiger Wertschöpfung durch proteinreiche Blattbestandteile                       |
| Grobfraktion | ca. 40 %                   | Herstellung biobasierter Formpressteile        | Herstellung proteinärmerer Luzernepellets                             | Flexible Nutzung der faserreichen Strukturfraktion sowie Anpassung an Auslastung und Marktsituation |

Die Gegenüberstellung verdeutlicht, dass die wirtschaftliche Bedeutung der Fraktionierung über die reine Stofftrennung hinausgeht. Beide Fraktionen übernehmen innerhalb der entwickelten Prozesskette unterschiedliche Aufgaben und tragen gemeinsam zur wirtschaftlichen Nutzung des Rohstoffes bei. Gleichzeitig ermöglicht insbesondere die alternative Nutzung der Grobfraction eine höhere Flexibilität bei der Produktionsplanung und unterstützt eine bedarfsgerechte Auslastung der vorhandenen Verarbeitungskapazitäten.

Zur Verdeutlichung der Zusammenhänge zwischen Rohstoff, Fraktionierung und den daraus entstehenden Wertschöpfungspfaden ist die entwickelte Mehrproduktstrategie in Abbildung 2 schematisch dargestellt.



**Abbildung 2: Mehrproduktstrategie der entwickelten Wertschöpfungskette**

Die Fraktionierung bildet damit den wirtschaftlichen Übergang zwischen der Bereitstellung des Rohstoffes und dessen stofflicher Weiterverarbeitung. Während durch die Trennung in Fein- und Grobfraction die Grundlage der Mehrproduktstrategie geschaffen wird, bestimmen die nachfolgenden Verarbeitungsschritte maßgeblich die weitere Wertschöpfung der einzelnen Stoffströme. Für eine vollständige Wirtschaftlichkeitsbetrachtung sind daher neben der Rohstoffbereitstellung und Fraktionierung auch die Aufbereitung, Weiterverarbeitung und Skalierung der entwickelten Prozesskette zu berücksichtigen. Diese quantitativen Grundlagen werden in den folgenden Abschnitten dargestellt.

### 3.4 Aufbereitung und Weiterverarbeitung der Stoffströme

Mit der Fraktionierung des Luzerneheus entstehen zwei stofflich unterschiedliche Fraktionen, die jeweils einer eigenen Weiterverarbeitung zugeführt werden. Während die Feinfraktion aufgrund ihres höheren Blatt- und Proteingehaltes überwiegend für die Herstellung hochwertiger Luzernepellets vorgesehen ist, bildet die Grobfraction den Ausgangsstoff für die im Projekt entwickelten Formpressteile. Für die wirtschaftliche Betrachtung der entwickelten Wertschöpfungskette reicht die Betrachtung der Rohstoffkosten allein daher nicht aus. Zusätzlich müssen die Kosten der Aufbereitung sowie der jeweiligen Weiterverarbeitung berücksichtigt werden, da diese die Wirtschaftlichkeit der einzelnen Nutzungspfade maßgeblich beeinflussen.

Die Berechnung basiert auf einem im Projekt betrachteten Praxisbeispiel mit einer jährlichen Verarbeitungsmenge von 90 t Luzerneheu. Dieses Szenario dient im weiteren Verlauf als Referenz für die Skalierungsbetrachtungen und die Bewertung der unterschiedlichen Betriebsmodelle.

Die Aufbereitung umfasst im entwickelten Verfahren zunächst die Zerkleinerung des Luzerneheus mittels Strohühle. Anschließend erfolgt die Fraktionierung des zerkleinerten Materials mit einem Trommelvorreiniger, wodurch die Trennung in eine Fein- und eine Grobfraktion erfolgt. Diese Prozessschritte bilden die Grundlage der im Projekt entwickelten Mehrproduktstrategie und stellen gleichzeitig einen eigenständigen Kostenblock innerhalb der Wertschöpfungskette dar.

Für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wurden die Aufbereitungskosten auf Grundlage der im Projekt eingesetzten Technik sowie der im Versuch ermittelten Leistungsdaten berechnet. Hierzu wurden die Investitionskosten der eingesetzten Maschinen einschließlich Abschreibungen, kalkulatorischer Reparatur- und Zinskosten sowie der Energie- und Personalkosten berücksichtigt. Während die Strohühle ausschließlich für das Projekt beschafft wurde und daher vollständig in die Berechnung eingeht, wird der Trommelvorreiniger lediglich anteilig berücksichtigt, da dieser auch für weitere betriebliche Anwendungen genutzt wird. Entsprechend wurden hierfür 30 % der Investitionskosten angesetzt.

Die Berechnung erfolgt für eine jährliche Verarbeitungsmenge von 90 t Luzerneheu. Auf Grundlage der Versuchsergebnisse wurde für die spätere Praxisanwendung ein erreichbarer Durchsatz von 0,2 t/h angenommen. Die Leistungsaufnahme der eingesetzten Maschinen beträgt nach Herstellerangaben 8 kW für die Strohühle sowie 3 kW für den Trommelvorreiniger. Zusammen mit den ermittelten Personal-, Energie- und Kapitalkosten ergibt sich daraus ein spezifischer Kostenansatz für die Aufbereitung des Rohstoffes.

Die wesentlichen Berechnungsgrundlagen sowie die daraus resultierenden Kosten sind in Tabelle 7 zusammengefasst.

**Tabelle 7: Investitionsbedarf, fixe Kosten und Energiekosten des Aufbereitungsverfahrens; Produktionsumfang 90 t Luzerneheu in €**

| Kosten                | Trommelvorreiniger (€) | Strohühle (€) |
|-----------------------|------------------------|---------------|
| Investitionskosten    | 48.900                 | 3.740         |
| Fixe Kosten/ a        |                        |               |
| AfA anteilig          | 1.223                  | 468           |
| Reparatur/ Unterhalt* | 147                    | 75            |
| Zinskosten            | 220                    | 56            |
| Gesamt                | 1.589                  | 598           |
|                       | 2.188                  |               |
| Variable Kosten/ t    |                        |               |
| Energiekosten         | 3                      | 9             |
| Personalkosten        | 90                     |               |
| Gesamt                | 103                    |               |

Die Feinfraktion wird anschließend pelletiert. Für die Pelletierung wurden zwei Szenarien betrachtet. Zum einen wurde eine Neuanschaffung einer Pelletieranlage angenommen, zum anderen die Nutzung bereits vorhandener Anlagentechnik. Diese Betrachtung trägt den unterschiedlichen betrieblichen Ausgangssituationen Rechnung und ermöglicht eine realitätsnahe Einordnung verschiedener Betriebsmodelle. Die Berechnungen basieren auf Herstellerangaben einer landwirtschaftsnahen Pelletieranlage mit einem Durchsatz von rund 0,2 t/h, einem durchschnittlichen Leistungsbedarf von 40 kW sowie den im Projekt festgelegten Investitions- und Betriebskosten. Während sich bei einer Neuanschaffung die Kapitalkosten deutlich auf die Produktionskosten auswirken, reduziert sich dieser Kostenblock bei Nutzung bereits vorhandener Technik erheblich. Damit bestätigt sich erneut die im Technischen Anlagenkonzept entwickelte Annahme, dass bestehende Infrastruktur einen wesentlichen wirtschaftlichen Vorteil darstellen kann.

Für die Herstellung der Formpressteile wurde die im Projekt entwickelte Materialrezeptur zugrunde gelegt. Diese besteht überwiegend aus der erzeugten Grobfraktion und wird durch Kiefernharz als sowie Erbsenprotein als funktionelle Zuschlagstoffe ergänzt. Die Materialzusammensetzung wurde im Rahmen der Materialentwicklung hinsichtlich Formstabilität, Verarbeitungseigenschaften und Kompostierbarkeit optimiert und bildet die Grundlage sämtlicher nachfolgender Kostenberechnungen.

**Tabelle 8: Wirtschaftliche Grundlagen der Weiterverarbeitung der beiden Stoffströme**

| Aspekt                                       | Pelletierung                                                                              | Formpressteile                                                                              |
|----------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| Ausgangsstoff                                | Feinfraktion                                                                              | Grobfraktion                                                                                |
| Entwicklungsstand im Projekt                 | Wirtschaftliche Bewertung auf Grundlage belastbarer technischer Kennwerte                 | Materialentwicklung und Demonstrator erfolgreich abgeschlossen                              |
| Grundlage der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung | Herstellerdaten, Investitions- und Betriebskosten, Energiebedarf sowie Versuchsergebnisse | Materialrezeptur, Materialkosten und wirtschaftlicher Zielwert                              |
| Vorliegende wirtschaftliche Kennwerte        | Durchsatz, Leistungsbedarf, Investitionskosten, Energiebedarf, Produktionskosten          | Materialeinsatz und Materialkosten der entwickelten Rezeptur                                |
| Noch nicht belastbar bestimmbar              | –                                                                                         | Serienprozess (Taktzeit, Personaleinsatz, Werkzeugkosten, Anlagenauslastung, Prozesskosten) |
| Wirtschaftliche Einordnung                   | Vergleich zweier Szenarien (Neuanschaffung bzw. vorhandene Pelletiertechnik)              | Wirtschaftlicher Zielwert als Orientierung für eine spätere Serienfertigung                 |

In Tabelle 8 wird verdeutlicht, dass die beiden Weiterverarbeitungspfade auf unterschiedlichen Datengrundlagen beruhen. Für die Pelletierung liegen belastbare technische Kennwerte und Kostenansätze vor, sodass sowohl die Nutzung vorhandener Technik als auch eine Neuanschaffung wirtschaftlich betrachtet werden können. Für die Herstellung der Formpressteile konnten im Projekt die Materialrezeptur sowie die daraus resultierenden Materialkosten bestimmt werden. Die Kosten eines späteren industriellen Formpressprozesses lassen sich dagegen aufgrund des

Demonstratorstadiums noch nicht belastbar ermitteln. Der wirtschaftliche Zielwert von 0,10 € je Verpackungsschale dient deshalb nicht als kalkulierter Verkaufspreis, sondern als Vergleichsmaßstab für eine zukünftige Serienfertigung. Damit werden keine Scheingenaugkeiten erzeugt und gleichzeitig die wirtschaftlichen Entwicklungspotenziale der entwickelten Verpackungslösung aufgezeigt.

Um die Wirtschaftlichkeit der entwickelten Produkte einordnen zu können, wurden für beide Produktgruppen wirtschaftliche Referenzwerte definiert. Diese stellen keine Verkaufspreise der im Projekt entwickelten Produkte dar, sondern dienen als Orientierungswerte für die nachfolgenden Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen.

Für die Luzernepellets wurde eine Marktanalyse vergleichbarer Produkte durchgeführt. Dabei wurden verschiedene Anbieter hochwertiger Luzerne- und Proteinpellets hinsichtlich ihrer Verkaufspreise ausgewertet. Die ermittelten Marktpreise bewegten sich innerhalb einer Bandbreite von etwa 600 bis 1.000 €/t. Diese Preisbandbreite wurde als wirtschaftlicher Referenzrahmen für die Bewertung der Pelletproduktion übernommen. Sie dient nicht der Prognose zukünftiger Verkaufspreise, sondern der Einordnung möglicher Erlöspotenziale unter aktuellen Marktbedingungen.

Für die entwickelten Formpressteile wurde ein wirtschaftlicher Zielwert von 0,10 € je Verpackungsschale angesetzt. Dieser Wert entspricht dem betrieblichen Beschaffungspreis einer vergleichbaren konventionellen Schale und dient als Vergleichsmaßstab für eine spätere Serienfertigung. Da für das Formpressverfahren im derzeitigen Entwicklungsstand noch keine belastbaren Prozess- und Investitionskosten vorliegen, wird der Zielwert nicht zur Berechnung eines Deckungsbeitrags verwendet. Er zeigt vielmehr, innerhalb welcher Kostengrößenordnung sich die Summe aus Material-, Prozess- und Gemeinkosten einer späteren Produktionslösung bewegen müsste.

**Tabelle 9: Markt- und Zielwerte der entwickelten Produktpfade**

| Produkt               | Grundlage                                                   | Wert bzw. Bandbreite | Funktion in der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung                             |
|-----------------------|-------------------------------------------------------------|----------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| Luzerneproteinpellets | Marktanalyse verschiedener Anbieter                         | 600–1.000 €/t        | Marktpreisbandbreite zur Einordnung möglicher Erlöspotenziale              |
| Verpackungsschale     | Betrieblicher Beschaffungspreis einer vergleichbaren Schale | 0,10 €/Schale        | Wirtschaftlicher Ziel- und Vergleichswert für eine spätere Serienfertigung |

Die Marktpreisbandbreite der Pellets und der Zielwert der Verpackungsschale erfüllen unterschiedliche Funktionen. Während die Pelletpreise zur Einordnung möglicher Erlöse dienen, beschreibt der Zielwert der Verpackungsschale die wirtschaftliche Obergrenze, an der eine spätere Serienfertigung gemessen werden muss. Die Skalierungsbetrachtung des folgenden Kapitels basiert dagegen zunächst ausschließlich auf den entstehenden Stoff- und Produktmengen.

Im folgenden Kapitel wird diese Datengrundlage genutzt, um unterschiedliche Produktionsmengen und Betriebsgrößen zu betrachten. Dabei stehen die Skalierbarkeit der entwickelten Prozesskette, die Flächeneffizienz sowie die aus unterschiedlichen Rohstoffmengen ableitbaren Produktpotenziale im Mittelpunkt der Untersuchung.

### 3.5 Skalierung und Produktpotenziale

Die bisherigen Abschnitte haben die wirtschaftlichen Grundlagen der Rohstoffbereitstellung sowie der Weiterverarbeitung beschrieben. Aufbauend auf diesen Berechnungen wird im Folgenden

untersucht, welche Produktmengen sich aus unterschiedlichen Verarbeitungsmengen ableiten lassen und wie sich diese auf verschiedene Betriebsgrößen übertragen lassen. Ziel ist nicht die Ableitung optimaler Betriebsgrößen, sondern die Darstellung des Skalierungspotenzials der entwickelten Wertschöpfungskette sowie die Veranschaulichung der daraus resultierenden Produktpotenziale.

Für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wurden vier Skalierungsstufen definiert, die unterschiedliche betriebliche Ausgangssituationen repräsentieren. Ausgangspunkt bildet das im Projekt betrachtete Referenzszenario mit einer jährlichen Verarbeitung von 90 t Trockenmasse Luzerneheu. Dieses Szenario orientiert sich an den betrieblichen Gegebenheiten von Vorwerk Podemus und dient als Grundlage sämtlicher Wirtschaftlichkeitsberechnungen. Ergänzend wurden kleinere sowie größere Verarbeitungsmengen betrachtet, um die Übertragbarkeit der entwickelten Prozesskette auf unterschiedliche Betriebsstrukturen einordnen zu können.

**Tabelle 10: Betrachtete Skalierungsstufen der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung**

| Skalierungsstufe | Verarbeitungs-<br>menge<br>(t TM/Jahr) | Typische betriebliche<br>Einordnung                                                                       | Wirtschaftliche Zielsetzung                                                            |
|------------------|----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| S1               | 45                                     | Kleiner<br>landwirtschaftlicher<br>Betrieb                                                                | Einstieg in die<br>Wertschöpfungskette mit<br>geringer Rohstoffmenge                   |
| S2               | 90                                     | Mittelgroßer Betrieb<br>mit Lager- und<br>Trocknungsmöglichkei-<br>ten (Referenzbetrieb<br>des Projektes) | Referenzszenario der<br>Wirtschaftlichkeitsbetrachtung                                 |
| S3               | 135                                    | Kooperation<br>mehrerer Betriebe<br>oder sehr großer<br>Einzelbetrieb                                     | Verbesserung der<br>Anlagenauslastung und<br>Verteilung fixer Kosten                   |
| S4               | ≥180                                   | Zentrale bzw.<br>industrielle<br>Verarbeitung                                                             | Hohe Auslastung<br>investitionsintensiver Anlagen<br>und Nutzung von<br>Skaleneffekten |

Die Skalierungsstufen dienen ausschließlich der Einordnung unterschiedlicher Umsetzungsszenarien und stellen keine Bewertung einzelner Betriebsgrößen dar. Mit zunehmender Verarbeitungs- menge verteilen sich insbesondere die Fixkosten investitionsintensiver Prozessschritte auf größere Produktionsmengen. Dadurch verkürzt sich die Amortisationsdauer der eingesetzten Anlagen und die wirtschaftlichen Voraussetzungen für die Umsetzung der entwickelten Prozesskette verbessern sich. Gleichzeitig können kleinere Betriebsgrößen unter bestimmten Rahmenbedingungen ebenfalls wirtschaftlich sinnvoll sein. Insbesondere die Eigennutzung der entwickelten Verpackungsschalen oder deren Vermarktung im Rahmen regionaler Direktvermarktung kann höhere Produktionskosten teilweise kompensieren und zusätzliche betriebliche Mehrwerte schaffen. Die Skalierung beschreibt daher keine Rangfolge wirtschaftlicher Vorteilhaftigkeit, sondern unterschiedliche Entwicklungspfade für die Umsetzung der entwickelten Wertschöpfungskette.

Neben der Skalierung der Verarbeitungsmenge wurde das theoretische Produktpotenzial der entwickelten Mehrproduktstrategie betrachtet. Auf Grundlage der im Projekt ermittelten Stoffstromverteilung von 60 % Feinfraktion und 40 % Grobfraktion lässt sich abschätzen, welche Produktmengen aus einem Hektar Luzerneanbau theoretisch erzeugt werden können. Die Darstellung dient dabei ausschließlich der Veranschaulichung des stofflichen Nutzungspotenzials und berücksichtigt keine prozessbedingten Verluste oder produktionstechnischen Einschränkungen.

**Tabelle 11: Theoretisches Produktpotenzial je Hektar Luzerne**

| Kenngröße                          | Wert                                  |
|------------------------------------|---------------------------------------|
| Trockenmasseertrag                 | 8,0 t TM/ha                           |
| Stoffstromverteilung               | 60 % Feinfraktion / 40 % Grobfraktion |
| Theoretische Luzerneproteinpellets | 4,8 t/ha                              |
| Theoretische Verpackungsschalen    | ca. 88.900 Stück/ha                   |

Die dargestellten Produktpotenziale verdeutlichen die Möglichkeiten der entwickelten Mehrproduktstrategie. Durch die Fraktionierung des Luzerneheus entstehen zwei stofflich unterschiedliche Fraktionen, die parallel hochwertigen Nutzungspfaden zugeführt werden können. Während die Feinfraktion als Ausgangsstoff für die Herstellung hochwertiger Luzerneproteinpellets dient, kann die Grobfraktion für die Produktion biobasierter Verpackungsschalen genutzt werden. Dadurch wird das stoffliche Nutzungspotenzial des Rohstoffes gegenüber einer ausschließlichen Einproduktnutzung deutlich erweitert.

Die theoretischen Produktpotenziale verdeutlichen gleichzeitig die hohe Flächeneffizienz der entwickelten Prozesskette. Bereits aus einem Hektar Luzerne lassen sich mehrere Tonnen hochwertiger Proteinpellets sowie eine große Anzahl biobasierter Verpackungsschalen ableiten. Die Darstellung stellt bewusst keine Produktionsprognose dar, sondern dient als anschauliche Einordnung des im Projekt entwickelten Nutzungskonzeptes und seiner stofflichen Potenziale.

Mit den dargestellten Rohstoff-, Kosten- und Produktdaten sind die quantitativen Grundlagen der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung vollständig beschrieben. Die nachfolgenden Kapitel bauen auf diesen Ergebnissen auf und untersuchen, welche technischen, betrieblichen und marktbezogenen Einflussgrößen die Wirtschaftlichkeit der entwickelten Wertschöpfungskette bestimmen und unter welchen Rahmenbedingungen die verschiedenen Betriebsmodelle wirtschaftlich umgesetzt werden können.

#### **4. Wirtschaftliche Einflussgrößen der entwickelten Wertschöpfungskette**

Die bisherigen Kapitel haben die quantitativen Grundlagen der im Projekt entwickelten Wertschöpfungskette beschrieben. Ausgehend von der Rohstoffbereitstellung wurden zunächst die Bereitstellungskosten des Luzerneheus hergeleitet. Anschließend wurden die Fraktionierung als Grundlage der Mehrproduktstrategie, die wirtschaftlichen Kennwerte der Weiterverarbeitung sowie die daraus ableitbaren Produktpotenziale und Skalierungsmöglichkeiten dargestellt. Damit liegt eine vollständige Datengrundlage für die nachfolgende wirtschaftliche Einordnung der entwickelten Prozesskette vor. Diese Ergebnisse bilden die quantitative Basis der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung. Für eine belastbare Einordnung der entwickelten Wertschöpfungskette reichen diese Kennzahlen allein jedoch nicht aus. Die Wirtschaftlichkeit wird nicht ausschließlich durch die Höhe einzelner

Kosten bestimmt, sondern durch das Zusammenwirken verschiedener technischer, betrieblicher und marktbezogener Einflussgrößen.

Bereits während der Projektbearbeitung zeigte sich, dass identische technische Prozessketten unter unterschiedlichen betrieblichen Rahmenbedingungen zu deutlich verschiedenen wirtschaftlichen Ergebnissen führen können. Unterschiede ergeben sich beispielsweise aus der vorhandenen Infrastruktur, der verfügbaren Rohstoffmenge, der Auslastung einzelner Prozessschritte oder den Vermarktungsmöglichkeiten der erzeugten Produkte. Die Bewertung der Wirtschaftlichkeit erfordert daher eine ganzheitliche Betrachtung der entwickelten Wertschöpfungskette und kann nicht auf einzelne Kostenkennzahlen reduziert werden.

Eine wesentliche Einflussgröße stellt dabei die Rohstoffverfügbarkeit dar. Sie bestimmt nicht nur die verfügbare Produktionsmenge, sondern beeinflusst gleichzeitig die Auslastung der nachgelagerten Prozessschritte und bestimmt darüber hinaus unmittelbar das erreichbare Skalierungsniveau und damit die Auslastung investitionsintensiver Prozessschritte. Während kleinere Rohstoffmengen eine flexible einzelbetriebliche Verarbeitung ermöglichen können, sind größere Verarbeitungskapazitäten auf eine kontinuierliche Versorgung angewiesen, um wirtschaftlich betrieben werden zu können. Die Rohstoffbasis bildet damit den Ausgangspunkt sämtlicher wirtschaftlicher Überlegungen.

Eng damit verbunden ist die betriebliche Infrastruktur. Im Projekt konnte gezeigt werden, dass vorhandene Anlagen und Einrichtungen einen erheblichen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit besitzen. Insbesondere die Nutzung bestehender Infrastruktur, wie beispielsweise der Boxentrocknung, ermöglicht es, Investitionen zu reduzieren und vorhandene Kapazitäten für zusätzliche Wertschöpfung zu nutzen. Gleichzeitig verdeutlichen die Berechnungen, dass sich die spezifischen Kosten durch eine höhere Auslastung vorhandener Anlagen deutlich verringern können. Die vorhandene Infrastruktur stellt damit nicht nur einen technischen, sondern vor allem einen wirtschaftlichen Standortvorteil dar.

Von besonderer Bedeutung ist darüber hinaus die Auslastung der Prozesskette. Zahlreiche Verfahrensschritte der entwickelten Wertschöpfungskette sind mit fixen Kosten verbunden, die unabhängig von der tatsächlich verarbeiteten Rohstoffmenge anfallen. Mit zunehmender Auslastung verteilen sich diese Kosten auf größere Produktionsmengen, wodurch die spezifischen Kosten je Produkteinheit sinken. Die Auslastung besitzt daher insbesondere für investitionsintensive Prozessschritte einen wesentlichen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit und stellt gleichzeitig eine wichtige Verbindung zwischen der technischen Auslegung der Anlagen und ihrer wirtschaftlichen Nutzung dar.

Eine weitere zentrale Einflussgröße ergibt sich aus der im Projekt entwickelten Mehrproduktstrategie. Anders als bei klassischen Produktionssystemen basiert die Wirtschaftlichkeit der entwickelten Prozesskette nicht auf einem einzelnen Endprodukt. Vielmehr entstehen durch die Fraktionierung mehrere Stoffströme, die unterschiedlichen Verwertungswegen zugeführt werden können. Dadurch erhöht sich die Flexibilität der gesamten Prozesskette. Insbesondere die Möglichkeit, die Grobfraktion alternativ zur Herstellung von Formpressteilen oder proteinärmeren Luzernepellets einzusetzen, erlaubt eine Anpassung an unterschiedliche Marktbedingungen sowie eine flexiblere Auslastung der Produktionskapazitäten. Die Wirtschaftlichkeit wird somit wesentlich durch die Kombination verschiedener Produkte und nicht ausschließlich durch deren Einzelbetrachtung bestimmt.

Neben den technischen und betrieblichen Rahmenbedingungen beeinflussen auch die Absatz- und Marktbedingungen die Wirtschaftlichkeit der entwickelten Wertschöpfungskette. Während einzelne Produkte unterschiedlichen Märkten zugeordnet werden können, ermöglicht die Mehrproduktstrategie eine breitere Verteilung wirtschaftlicher Risiken. Veränderungen der Nachfrage nach einzelnen Produkten können innerhalb der Prozesskette teilweise durch alternative

Verwertungswege ausgeglichen werden. Gleichzeitig eröffnet die Entwicklung verschiedener Produktlinien zusätzliche Möglichkeiten zur Erschließung neuer Absatzmärkte und erhöht damit die wirtschaftliche Robustheit der gesamten Wertschöpfungskette.

Die im Projekt identifizierten wirtschaftlichen Einflussgrößen sind in Tabelle 12 zusammengefasst.

**Tabelle 12: Identifizierte wirtschaftliche Einflussgrößen im Projekt**

| Einflussgröße                | Bedeutung für die Wirtschaftlichkeit                                                      | Projektbezug                                    |
|------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| Rohstoffverfügbarkeit        | Bestimmt Produktionsmenge und Auslastung der Prozesskette                                 | Rohstoffbereitstellung und Fraktionierung       |
| Betriebliche Infrastruktur   | Nutzung vorhandener Anlagen reduziert Investitionen und verbessert die Wirtschaftlichkeit | Boxentrocknung, bestehende Betriebsstruktur     |
| Auslastung                   | Verteilung fixer Kosten auf größere Produktionsmengen                                     | Dimensionierung der Prozesskette                |
| Mehrproduktstrategie         | Flexible Nutzung unterschiedlicher Stoffströme erhöht die Wertschöpfung                   | AP2, AP6 und AP9                                |
| Absatz- und Marktbedingungen | Wirtschaftlicher Erfolg hängt von der Vermarktung mehrerer Produktlinien ab               | Verpackungsschalen, Protein- und Luzernepellets |

Die Gegenüberstellung zeigt, dass keine der dargestellten Einflussgrößen isoliert über die Wirtschaftlichkeit entscheidet. Erst ihr Zusammenwirken bestimmt die wirtschaftliche Leistungsfähigkeit der entwickelten Wertschöpfungskette. Während einzelne Faktoren unmittelbar durch betriebliche Entscheidungen beeinflusst werden können, ergeben sich andere aus den jeweiligen Standort- und Marktbedingungen. Die Wirtschaftlichkeit der entwickelten Prozesskette ist daher stets als Ergebnis eines Gesamtsystems zu verstehen, in dem technische, betriebliche und wirtschaftliche Rahmenbedingungen eng miteinander verknüpft sind.

Die dargestellten Einflussgrößen bilden gleichzeitig den Bewertungsrahmen für die nachfolgende Einordnung der unterschiedlichen Betriebsmodelle. Obwohl alle Modelle auf derselben technischen Prozesskette basieren, unterscheiden sie sich hinsichtlich Rohstoffverfügbarkeit, Infrastruktur, Auslastung und Vermarktungsorganisation. Im folgenden Kapitel wird daher untersucht, wie sich diese Einflussgrößen auf die Wirtschaftlichkeit der im Technischen Anlagenkonzept entwickelten Betriebsmodelle auswirken und unter welchen Rahmenbedingungen die jeweiligen Umsetzungsvarianten ihre wirtschaftlichen Stärken entfalten können.

## 5. Wirtschaftliche Einordnung der Betriebsmodelle

Die bisherigen Kapitel haben die quantitativen Grundlagen der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung sowie die wesentlichen Einflussgrößen der entwickelten Wertschöpfungskette dargestellt. Aufbauend auf diesen Ergebnissen erfolgt nachfolgend die wirtschaftliche Einordnung der im Technischen Anlagenkonzept entwickelten Betriebsmodelle. Im Mittelpunkt steht dabei nicht die technische Beschreibung der einzelnen Konzepte, sondern die Frage, unter welchen betrieblichen Rahmenbedingungen die entwickelte Wertschöpfungskette wirtschaftlich umgesetzt werden kann.

Alle betrachteten Betriebsmodelle basieren auf derselben Prozesskette – von der Rohstoffbereitstellung über die Fraktionierung bis zur Weiterverarbeitung der beiden Stoffströme. Die wirtschaftlichen Unterschiede ergeben sich daher nicht aus der eingesetzten Verfahrenstechnik, sondern aus den jeweiligen betrieblichen Voraussetzungen. Insbesondere die vorhandene Infrastruktur, die verfügbare Rohstoffmenge, die Auslastung der Anlagen sowie die Organisation der

Verarbeitung beeinflussen maßgeblich die Wirtschaftlichkeit der verschiedenen Umsetzungsvarianten.

Der einzelbetriebliche Ansatz bietet insbesondere Betrieben mit bereits vorhandener Infrastruktur die Möglichkeit, zusätzliche Wertschöpfung aus dem eigenen Rohstoff zu generieren. Bestehende Trocknungs-, Lager- oder Verarbeitungskapazitäten können in die neue Prozesskette integriert werden, wodurch sich der zusätzliche Investitionsbedarf reduziert. Gleichzeitig verbleibt die gesamte Wertschöpfung auf dem Betrieb und ermöglicht eine enge Verzahnung zwischen Rohstofferzeugung, Verarbeitung und Vermarktung.

Verfügt ein Betrieb hingegen noch nicht über die erforderliche Infrastruktur, entstehen zunächst erhebliche Investitionen für Trocknung, Aufbereitung und gegebenenfalls Weiterverarbeitung. Aufgrund der vergleichsweise geringen Rohstoffmengen verteilen sich diese Investitionen auf kleinere Produktionsmengen, wodurch sich die Amortisationsdauer verlängern kann. Dennoch kann der einzelbetriebliche Ansatz wirtschaftlich sinnvoll sein, wenn die erzeugten Produkte im eigenen Betrieb eingesetzt oder über eine regionale Direktvermarktung mit entsprechend höherer Wertschöpfung vermarktet werden. In diesen Fällen können betriebliche Vorteile den höheren Produktionskosten gegenüberstehen.

Das Kooperationsmodell erweitert diesen Ansatz durch die Zusammenarbeit mehrerer landwirtschaftlicher Betriebe. Die gemeinsame Bereitstellung größerer Rohstoffmengen ermöglicht eine bessere Auslastung investitionsintensiver Anlagen und schafft damit günstigere wirtschaftliche Rahmenbedingungen für die Aufbereitung und Weiterverarbeitung. Gleichzeitig können Investitionen, Betriebskosten und vorhandene Infrastruktur gemeinsam genutzt werden. Dadurch reduziert sich die Investitionsbelastung der einzelnen Betriebe, ohne dass die Gesamtinvestition zwangsläufig geringer ausfällt.

Den wirtschaftlichen Vorteilen stehen jedoch erhöhte Anforderungen an die Zusammenarbeit gegenüber. Rohstoffbereitstellung, Qualitätsanforderungen, Logistik, Investitionsentscheidungen und Vermarktung müssen zwischen den beteiligten Partnern abgestimmt werden. Der wirtschaftliche Erfolg des Kooperationsmodells hängt daher neben den technischen Voraussetzungen wesentlich von einer funktionierenden organisatorischen Zusammenarbeit ab. Insbesondere in Regionen mit mehreren geeigneten Luzernebetrieben kann dieses Modell jedoch erhebliche wirtschaftliche Vorteile gegenüber einer rein einzelbetrieblichen Umsetzung bieten.

Die industrielle Umsetzung verfolgt einen anderen wirtschaftlichen Ansatz. Hier stehen große Rohstoffmengen, kontinuierliche Auslastung und standardisierte Produktionsprozesse im Vordergrund. Die hohe Verarbeitungskapazität ermöglicht eine effiziente Nutzung investitionsintensiver Anlagen und schafft die Voraussetzungen für Skaleneffekte innerhalb der gesamten Prozesskette. Gleichzeitig können größere Produktmengen erzeugt und überregionale Absatzmärkte bedient werden.

Dem stehen ein hoher Investitionsbedarf sowie erhöhte Anforderungen an die Rohstofflogistik gegenüber. Die Wirtschaftlichkeit hängt maßgeblich von einer dauerhaft gesicherten Rohstoffversorgung und einer hohen Anlagenauslastung ab. Besonders geeignet erscheint dieses Modell daher für Regionen mit entsprechendem Rohstoffpotenzial oder für Unternehmen, die bereits über geeignete Verarbeitungsanlagen verfügen und die entwickelte Prozesskette in bestehende Produktionsstrukturen integrieren können.

Die wirtschaftliche Bewertung der drei Betriebsmodelle ist in Tabelle 13 zusammengefasst.

**Tabelle 13: Wirtschaftliche Einordnung der entwickelten Betriebsmodelle**

| Bewertungskriterium               | Einzelbetrieb                                                  | Kooperation                                                | Industrielle Umsetzung                                 |
|-----------------------------------|----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| Rohstoffversorgung                | Eigene Erzeugung                                               | Gemeinsame Rohstoffbasis mehrerer Betriebe                 | Regionale bzw. überregionale Rohstoffbeschaffung       |
| Nutzung vorhandener Infrastruktur | Hoher Vorteil bei bereits vorhandener Technik                  | Gemeinsame Nutzung vorhandener Infrastruktur möglich       | Integration in bestehende industrielle Anlagen möglich |
| Zusätzlicher Investitionsbedarf   | Stark abhängig von vorhandener Infrastruktur                   | Auf mehrere Partner verteilbar                             | Hoch                                                   |
| Anlagenauslastung                 | Betriebsabhängig                                               | Gut                                                        | Sehr gut                                               |
| Logistikaufwand                   | Gering                                                         | Mittel                                                     | Hoch                                                   |
| Koordinationsaufwand              | Gering                                                         | Hoch                                                       | Mittel                                                 |
| Skalierungspotenzial              | Begrenzt                                                       | Hoch                                                       | Sehr hoch                                              |
| Geeignete Vermarktung             | Eigennutzung und Direktvermarktung                             | Regionale Vermarktung                                      | Überregionale Märkte                                   |
| Wirtschaftlicher Schwerpunkt      | Nutzung vorhandener Ressourcen und betrieblicher Wertschöpfung | Gemeinsame Auslastung, Kostenteilung und Ressourcennutzung | Hohe Auslastung und Skaleneffekte                      |

Die Gegenüberstellung verdeutlicht, dass keines der betrachteten Betriebsmodelle grundsätzlich wirtschaftlicher ist als die übrigen. Vielmehr ergeben sich je nach betrieblicher Ausgangssituation unterschiedliche Vorteile. Während einzelbetriebliche Konzepte insbesondere von vorhandener Infrastruktur sowie einer direkten Nutzung oder Vermarktung der erzeugten Produkte profitieren können, stehen im Kooperationsmodell die gemeinsame Nutzung von Ressourcen und die bessere Auslastung investitionsintensiver Anlagen im Vordergrund. Die industrielle Umsetzung bietet schließlich die größten Skalierungsmöglichkeiten, setzt jedoch gleichzeitig eine hohe Rohstoffverfügbarkeit sowie eine kontinuierliche Auslastung der Anlagen voraus.

Die Ergebnisse unterstreichen zugleich einen wesentlichen Ansatz des Forschungsvorhabens. Die entwickelte Wertschöpfungskette wurde bewusst so konzipiert, dass sie nicht an eine bestimmte Betriebsgröße oder Organisationsform gebunden ist. Vielmehr können unterschiedliche Betriebe entsprechend ihrer jeweiligen Voraussetzungen geeignete Entwicklungspfade wählen und die Prozesskette an ihre betrieblichen Rahmenbedingungen anpassen. Damit wird deutlich, dass die Wirtschaftlichkeit nicht allein durch die eingesetzte Technologie bestimmt wird, sondern wesentlich von deren Einbindung in die vorhandenen betrieblichen Strukturen abhängt.

Die wirtschaftliche Einordnung der Betriebsmodelle bildet zugleich die Grundlage für die abschließende Bewertung der entwickelten Systemlösung. Im folgenden Kapitel werden die

wirtschaftlichen Nutzenpotenziale der verschiedenen Nutzungspfade systematisch zusammengeführt und hinsichtlich ihrer Bedeutung für landwirtschaftliche Betriebe und weitere Akteure der Wertschöpfungskette eingeordnet.

## **6. Wirtschaftlicher Nutzen der entwickelten Systemlösung**

Die vorangegangenen Kapitel haben die wirtschaftlichen Grundlagen der entwickelten Wertschöpfungskette, die wesentlichen Einflussgrößen sowie unterschiedliche betriebliche Umsetzungsmöglichkeiten dargestellt. Abschließend erfolgt eine zusammenfassende wirtschaftliche Einordnung der entwickelten Systemlösung. Im Mittelpunkt steht dabei nicht die isolierte Bewertung einzelner Produkte oder Prozessschritte, sondern der wirtschaftliche Nutzen, der sich aus der Kombination verschiedener Nutzungspfade und ihrer Integration in bestehende landwirtschaftliche Betriebsstrukturen ergibt.

Die entwickelte Prozesskette erweitert die bisherige Nutzung des Rohstoffes Luzerne um zusätzliche stoffliche Verwertungsmöglichkeiten. Durch die Fraktionierung entstehen zwei unterschiedliche Stoffströme, die parallel hochwertigen Nutzungspfaden zugeführt werden können. Dadurch wird nicht nur das Nutzungspotenzial des Rohstoffes erweitert, sondern gleichzeitig die Grundlage für zusätzliche Erlösquellen, eine höhere Wertschöpfung sowie neue betriebliche Entwicklungsmöglichkeiten geschaffen.

### **6.1 Direkte Erlöspotenziale**

Der unmittelbarste wirtschaftliche Nutzen ergibt sich aus der Möglichkeit, mehrere marktfähige Produkte aus einem gemeinsamen Rohstoff herzustellen. Die Feinfraktion dient der Herstellung hochwertiger Luzerneproteinpellets und erschließt damit einen Produktbereich mit höherer Wertschöpfung als eine ausschließliche Nutzung des gesamten Luzerneheus. Die Grobfraktion bildet den Ausgangsstoff für biobasierte Formpressteile. Neben den im Projekt entwickelten Kultivierungsschalen eröffnet diese Materialbasis insbesondere Perspektiven für Verpackungsschalen und weitere Formpressteile mit deutlich größeren potenziellen Absatzmengen. Darüber hinaus kann die Grobfraktion alternativ auch zur Herstellung proteinärmerer Luzernepellets genutzt werden und ermöglicht damit eine flexible Anpassung der Produktion an unterschiedliche Marktanforderungen.

Die wirtschaftliche Stärke der entwickelten Prozesskette liegt somit nicht in einem einzelnen Produkt, sondern in der Möglichkeit, mehrere stoffliche Nutzungspfade innerhalb derselben Rohstoffbasis zu kombinieren und den Produktmix an betriebliche oder marktseitige Anforderungen anzupassen.

### **6.2 Vermiedene Kosten**

Neben zusätzlichen Erlösmöglichkeiten eröffnet die entwickelte Systemlösung Potenziale zur Reduzierung betrieblicher Kosten. Betriebe mit bereits vorhandener Infrastruktur können bestehende Lager-, Trocknungs- oder Verarbeitungskapazitäten in die neue Prozesskette integrieren und dadurch zusätzliche Investitionen reduzieren. Gleichzeitig ermöglicht die Nutzung sowohl der Fein- als auch der Grobfraktion eine weitgehende stoffliche Verwertung des Rohstoffes, wodurch das vorhandene Biomassepotenzial deutlich umfassender genutzt wird als bei einer ausschließlichen Einproduktstrategie.

Ein weiterer wirtschaftlicher Vorteil ergibt sich für Betriebe, die bereits heute Verpackungen für eigene Produkte einsetzen. Im Praxisbetrieb Vorwerk Podemus werden beispielsweise Verpackungsschalen für verschiedene Obst- und Gemüseprodukte benötigt. Unter der Voraussetzung, dass die entwickelte biobasierte Verpackung hinsichtlich Stabilität, Produktschutz und Verarbeitungseigenschaften vergleichbare Anforderungen erfüllt, besteht grundsätzlich die

Möglichkeit, bisher zugekaufte Verpackungen ganz oder teilweise durch eigene Verpackungslösungen zu ersetzen. Dadurch können bestehende Beschaffungsprozesse ergänzt und zusätzliche Wertschöpfung innerhalb des Betriebes realisiert werden.

Darüber hinaus gewinnen regulatorische Rahmenbedingungen im Verpackungsbereich zunehmend an wirtschaftlicher Bedeutung. Für konventionelle Verpackungen entstehen Kosten im Zusammenhang mit der Beteiligung an Rücknahme- und Entsorgungssystemen. Biobasierte und kompostierbare Verpackungslösungen können zukünftig – abhängig von der jeweiligen rechtlichen Ausgestaltung – zusätzliche wirtschaftliche Vorteile bieten. Da sich die regulatorischen Anforderungen kontinuierlich weiterentwickeln und eine belastbare quantitative Bewertung im Rahmen des Projektes nicht möglich war, wurde dieser Aspekt bewusst nicht monetär berücksichtigt.

### 6.3 Zusätzliche Wertschöpfung

Ein wesentlicher Mehrwert der entwickelten Systemlösung liegt in der Kombination mehrerer Wertschöpfungsquellen, die sich gegenseitig ergänzen und gemeinsam zur wirtschaftlichen Attraktivität der Prozesskette beitragen.

**Tabelle 14: Wertschöpfungsquellen der entwickelten Systemlösung**

| Wertschöpfungsquelle                           | Wirtschaftliche Bedeutung                                                                        |
|------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Aufwertung der Feinfraktion                    | Herstellung hochwertiger Luzerneproteinpellets mit höherem Wertschöpfungspotenzial               |
| Nutzung der Grobfraktion                       | Herstellung biobasierter Verpackungs- und Formpressteile sowie alternativ proteinärmerer Pellets |
| Erweiterung des stofflichen Nutzungspotenzials | Gleichzeitige Nutzung beider Stoffströme innerhalb einer gemeinsamen Prozesskette                |
| Flexible Marktanpassung                        | Anpassung des Produktmixes an Nachfrage und betriebliche Rahmenbedingungen                       |
| Regionale Wertschöpfung                        | Erzeugernahe Verarbeitung des Rohstoffes und zusätzliche regionale Wertschöpfung                 |
| Nutzung vorhandener Infrastruktur              | Integration bestehender Lager-, Trocknungs- und Verarbeitungstechnik                             |

Die dargestellten Wertschöpfungsquellen verdeutlichen, dass der wirtschaftliche Nutzen der entwickelten Systemlösung nicht auf einzelne Produkte beschränkt ist. Vielmehr entsteht der Mehrwert durch das Zusammenwirken verschiedener Nutzungspfade und die Möglichkeit, vorhandene Ressourcen effizienter zu nutzen. Gleichzeitig erhöht die Mehrproduktstrategie die Flexibilität der gesamten Prozesskette und schafft die Voraussetzung, auf unterschiedliche Markt- und Produktionsbedingungen reagieren zu können.

### 6.4 Zusätzlicher Vermarktungs- und Kommunikationsnutzen

Neben den unmittelbar wirtschaftlich quantifizierbaren Effekten eröffnet die entwickelte Systemlösung zusätzliche Potenziale im Bereich der Vermarktung. Insbesondere Verpackungsschalen aus regional erzeugter Luzerne ermöglichen es, die Herkunft des eingesetzten Rohstoffes sowie die regionale Verarbeitung entlang der gesamten Wertschöpfungskette sichtbar zu machen. Für regional

vermarktende landwirtschaftliche Betriebe kann dies einen zusätzlichen kommunikativen Mehrwert gegenüber konventionellen Verpackungslösungen darstellen.

Im Projekt wurde deutlich, dass insbesondere für Betriebe mit eigener Direktvermarktung oder regionalen Absatzkanälen die Kombination aus regionalem Rohstoff, biobasierter Verpackung und kurzer Wertschöpfungskette einen zusätzlichen Differenzierungsansatz bietet. Die Verpackung übernimmt damit nicht ausschließlich eine technische Funktion zum Produktschutz, sondern kann gleichzeitig Bestandteil der Vermarktungsstrategie werden.

Die im Projekt entwickelte Kultivierungsschale besitzt in diesem Zusammenhang vor allem Demonstratorcharakter. Sie dient als Nachweis der grundsätzlichen Material- und Prozessfähigkeit der entwickelten Rezeptur. Das deutlich größere wirtschaftliche Potenzial wird dagegen in einer späteren Übertragung des entwickelten Materials auf Verpackungsschalen und weitere Formpressteile mit wesentlich höheren Stückzahlen gesehen.

## **6.5 Strategischer Nutzen**

Neben den unmittelbar wirtschaftlichen Effekten besitzt die entwickelte Systemlösung einen langfristigen strategischen Nutzen für landwirtschaftliche Betriebe und weitere Akteure der Wertschöpfungskette. Die entwickelte Prozesskette eröffnet neue Möglichkeiten zur Diversifizierung bestehender Betriebszweige und schafft die Grundlage für zusätzliche Geschäftsmodelle im Bereich biobasierter Verpackungsmaterialien.

Gleichzeitig wurde die Prozesskette bewusst modular entwickelt. Dadurch können einzelne Prozessschritte entsprechend der jeweiligen betrieblichen Ausgangssituation schrittweise integriert oder erweitert werden. Diese Modularität erleichtert den Einstieg in die neue Wertschöpfungskette und ermöglicht eine Anpassung an unterschiedliche Betriebsgrößen, Organisationsformen und Investitionsmöglichkeiten.

Darüber hinaus bildet das entwickelte Konzept eine Grundlage für zukünftige Forschungs- und Entwicklungsarbeiten. Insbesondere im Bereich der industriellen Formpresstechnik, der Prozessautomatisierung sowie der Übertragung auf weitere Verpackungsanwendungen bestehen Entwicklungspotenziale, die im Rahmen des vorliegenden Demonstratorprojektes noch nicht vollständig untersucht werden konnten.

Die wirtschaftliche Betrachtung zeigt insgesamt, dass sich der Nutzen der entwickelten Systemlösung nicht allein aus den Erlösen einzelner Produkte ableiten lässt. Vielmehr entsteht ein Gesamtnutzen aus zusätzlichen Erlöspotenzialen, vermiedenen Kosten, einer erweiterten stofflichen Nutzung des Rohstoffes, zusätzlichen Vermarktungsmöglichkeiten sowie langfristigen strategischen Entwicklungsperspektiven. Die entwickelte Mehrproduktstrategie bildet damit die Grundlage einer flexibel an unterschiedliche betriebliche Rahmenbedingungen anpassbaren Wertschöpfungskette.

## **7. Schlussfolgerungen**

### **7.1 Zusammenfassende wirtschaftliche Einordnung**

Die vorliegende Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zeigt, dass die im Projekt entwickelte Wertschöpfungskette grundsätzlich das Potenzial besitzt, den Rohstoff Luzerne über mehrere stoffliche Nutzungspfade wirtschaftlich aufzuwerten. Ausgangspunkt ist dabei die Fraktionierung des Luzerneheus in eine Fein- und eine Grobfraktion, wodurch erstmals die parallele Herstellung unterschiedlicher Produkte innerhalb einer gemeinsamen Prozesskette ermöglicht wird. Die Kombination aus Luzerneproteinpellets und biobasierten Formpressteilen erweitert das stoffliche

Nutzungspotenzial des Rohstoffes erheblich und schafft zusätzliche wirtschaftliche Entwicklungsmöglichkeiten gegenüber einer ausschließlichen Einproduktnutzung.

Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zeigt gleichzeitig, dass die wirtschaftliche Vorteilhaftigkeit nicht allein von einzelnen Produkten oder Prozessschritten abhängt. Entscheidend ist vielmehr das Zusammenwirken der gesamten Prozesskette. Rohstoffbereitstellung, Aufbereitung, Fraktionierung, Weiterverarbeitung sowie Vermarktung beeinflussen sich gegenseitig und bestimmen gemeinsam die Wirtschaftlichkeit der entwickelten Systemlösung.

Die Untersuchung unterschiedlicher Betriebsmodelle verdeutlicht darüber hinaus, dass keine allgemeingültige wirtschaftlich optimale Lösung existiert. Vielmehr ergeben sich je nach vorhandener Infrastruktur, Rohstoffverfügbarkeit, Organisationsform und Vermarktungsstrategie unterschiedliche wirtschaftliche Entwicklungspfade. Die entwickelte Prozesskette wurde deshalb bewusst modular konzipiert und kann an verschiedene betriebliche Ausgangssituationen angepasst werden.

## **7.2 Grenzen der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung**

Die Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung sind vor dem Hintergrund des Demonstratorcharakters des Forschungsvorhabens zu bewerten. Zahlreiche Berechnungen beruhen auf Versuchsergebnissen, Herstellerangaben sowie praxisnahen Annahmen und dienen der wirtschaftlichen Einordnung möglicher Umsetzungsszenarien. Insbesondere für die industrielle Herstellung der entwickelten Formpressteile liegen derzeit noch keine belastbaren Prozesskosten einer Serienfertigung vor. Aus diesem Grund wurde bewusst auf eine vollständige Herstellkostenkalkulation verzichtet und stattdessen mit wirtschaftlichen Ziel- und Vergleichswerten gearbeitet.

Auch zukünftige Markt- und Preisentwicklungen sowie regulatorische Rahmenbedingungen konnten im Rahmen des Projektes nicht belastbar prognostiziert werden. Die dargestellten Marktpreisbandbreiten und wirtschaftlichen Einordnungen dienen daher als Orientierung und nicht als verbindliche Vorhersage zukünftiger wirtschaftlicher Entwicklungen.

Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung verfolgt damit nicht das Ziel, eine abschließende Investitionsentscheidung für einzelne Betriebe abzuleiten. Vielmehr schafft sie eine nachvollziehbare Datengrundlage, auf deren Basis unterschiedliche betriebliche Umsetzungsmöglichkeiten bewertet und zukünftige Entwicklungen eingeordnet werden können.

## **7.3 Entwicklungsperspektiven und Handlungsempfehlungen**

Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens verdeutlichen, dass insbesondere die Weiterentwicklung der Formpresstechnik ein wesentliches Potenzial für zukünftige Arbeiten darstellt. Während für die Rohstoffbereitstellung, Aufbereitung und Pelletierung bereits belastbare technische und wirtschaftliche Grundlagen geschaffen werden konnten, besteht bei der industriellen Herstellung biobasierter Verpackungsschalen weiterer Entwicklungsbedarf hinsichtlich Prozessführung, Automatisierung und Serienfertigung.

Darüber hinaus sollten zukünftige Untersuchungen die wirtschaftlichen Auswirkungen unterschiedlicher Produktionskapazitäten sowie weiterer Produktanwendungen analysieren. Insbesondere Verpackungsschalen für Obst-, Gemüse- und Kräuterprodukte stellen aufgrund der deutlich höheren Stückzahlen ein wesentlich größeres wirtschaftliches Potenzial dar als die im Projekt entwickelte Kultivierungsschale, die vor allem den Nachweis der grundsätzlichen Material- und Prozessfähigkeit der entwickelten Rezeptur ermöglicht.

Auch die zunehmenden Anforderungen an nachhaltige Verpackungslösungen sowie die Weiterentwicklung regulatorischer Rahmenbedingungen können die wirtschaftliche Bedeutung biobasierter Verpackungsmaterialien künftig weiter beeinflussen. Gleichzeitig eröffnet die entwickelte Prozesskette Potenziale für neue Kooperationen zwischen landwirtschaftlichen Betrieben, Verarbeitungsunternehmen und Vermarktungsorganisationen.

Die vorliegende Wirtschaftlichkeitsbetrachtung endet daher nicht mit einer Aussage zur Wirtschaftlichkeit einzelner Produkte oder Anlagen, sondern mit einer wirtschaftlichen Einordnung möglicher Entwicklungspfade für unterschiedliche betriebliche Ausgangssituationen. Sie zeigt, dass der wirtschaftliche Nutzen der entwickelten Systemlösung vor allem aus der Kombination verschiedener Nutzungspfade, der flexiblen Anpassung an betriebliche Rahmenbedingungen sowie der Erweiterung des stofflichen Nutzungspotenzials des Rohstoffes entsteht. Damit bildet sie eine belastbare Grundlage für die weitere technische und wirtschaftliche Entwicklung der im Projekt geschaffenen Wertschöpfungskette.