

Universität Kassel
Fachbereich Ökologische Agrarwissenschaften
Studiengang Ökologische Landwirtschaft (B. Sc.)

Bachelorarbeit

zum Thema

**Praxisnahe Innovationen in der Edelpilzzucht - Technische
Gestaltungsmöglichkeiten der Pilzproduktion für kleine und mittlere
Betriebe**

Anhand ausgewählter Edelpilzbetriebe in Deutschland

1. Betreuer: Dr. Hubertus Siebald
2. Betreuerin: Dipl. Ing. agr. Birge Wolf

Vorgelegt von:
Henrik Hellmann
(geb. am 22.07.1992 in Heidelberg)
Matrikelnummer: 35862868

Inhaltsverzeichnis

I Abkürzungsverzeichnis	iii
II Abbildungsverzeichnis	iv
III Tabellenverzeichnis	v
1 Einleitung	1
2 Theoretischer Hintergrund	2
2.1 Kurzüberblick: Lebenskreislauf der Pilze	2
2.2 Prozess der Pilzkultivierung	3
2.2.1 Durchwachungsphase	4
2.2.2 Primordienbildung	5
2.2.3 Fruchtkörperentwicklung	5
2.3 Überblick: Gestaltungsfelder der <i>Indoor</i> -Pilzkultivierung	6
2.3.1 Räumliche Organisation und Infrastruktur	6
2.3.2 Substrate und deren Behandlungsverfahren	7
2.3.3 Klimaführung und dessen technische Ausgestaltungsmöglichkeiten	9
2.4 Definitionen und Begriffsklärungen	11
2.4.1 Innovation	11
2.4.2 <i>Low-Tech</i>	11
3 Methodik	12
3.1 Experteninterview	12
3.1.1 Auswahl der Interviewpartner	13
3.1.2 Leitfadenkonstruktion	13
3.1.3 Durchführung der Interviews	14
3.1.4 Transkription und Codierung	15
3.2 Qualitative Inhaltsanalyse	15
3.3 Wahl geeigneter Kriterien	15
3.3.1 Bewertungsschlüssel ausgewählter Kriterien	19
4 Ergebnisse und Diskussion	19
4.1 Betriebsprofile	19
4.1.1 Kompetenzen und Wissensbeschaffung	20
4.2 Ergebnisse und Diskussion - Darstellung nach Kriterien	21
4.2.1 Räumlichkeiten	21
4.2.2 Substrat	28
4.2.3 Fruchtung	33
4.3 Methodische Reflexion	38

5 Schlussfolgerung.....	39
5.1 Bewertung der Ergebnisse	39
5.2 Ausblick für Politik und Forschung	41
IV Literaturverzeichnis	43
V Nutzung generativer Künstlicher Intelligenz und Eigenständigkeitserklärung	46

I Abkürzungsverzeichnis

DV	Dieter Völkers
NSt	Nils Steinbiß
EB	Evgeni Bratovanov
AOB	Ana Orias Balderas
FS	Freimut Stephan

II Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Wachstumsphasen von Pilzen (Quelle: Reindl und Friedl 2024, S. 23)	2
Abbildung 2 Pilzzucht im Überblick (Quelle: Wurth, M. und Wurth, H. 2018, S.10)	3
Abbildung 3 Hofladen (DV)	21
Abbildung 4 Pack- und Arbeitstisch (DV)	21
Abbildung 5 Produktionsbereiche (DV)	21
Abbildung 6 Eingang Wechselbrücken (NSt)	22
Abbildung 7 Inkubationsraum (NSt)	22
Abbildung 8 Inkubationsraum (EB)	22
Abbildung 9 Blick auf Fruchtungsraum (EB)	22
Abbildung 10 Fruchtungszelt (AOB)	23
Abbildung 11 Zelt mit Ultraschallverneblerbox (AOB)	23
Abbildung 12 Inkubationsraum (FS)	23
Abbildung 13 Fruchtungsraum (FS)	23
Abbildung 14 Pasteurisorbox (NSt)	30
Abbildung 15 Brauereipasteurisor (NSt)	30
Abbildung 16 Pasteurisatoren (EB)	31
Abbildung 17 Beimpfungsplatz (FS)	32
Abbildung 18 Schnellkochtöpfe (FS)	32
Abbildung 19 Wasserschläuche zur Vortemperierung (DV)	33
Abbildung 20 Feinvernebler (DV)	33
Abbildung 21 Ultraschallverneblerbox (NSt)	34
Abbildung 22 Ultraschallverneblerköpfe (NSt)	34
Abbildung 23 Ultraschallverneblerbox mit Schwimmerventil (AOB)	35
Abbildung 24 Feinvernebler (FS)	35

III Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Vorstellung der Interviewpartner*innen	13
Tabelle 2 Exemplarischer Aufbau des Leitfadens.....	14
Tabelle 3 Themenblock Räumlichkeiten mit begründeten Kriterien	16
Tabelle 4 Themenblock Substrate mit begründeten Kriterien	17
Tabelle 5 Themenblock Fruchtung mit begründeten Kriterien	18
Tabelle 6 Bewertungsschlüssel.....	19
Tabelle 7 Betriebsprofile.....	20
Tabelle 8 Übersicht des Kriteriums Anpassungsfähigkeit	25
Tabelle 9 Übersicht der Kriterien Reinigungsaufwand und Energieeffizienz/Isolationsqualität	28
Tabelle 10 Übersicht der Kriterien Anpassungsfähigkeit und Erprobbarkeit	29
Tabelle 11 Übersicht der Kriterien Aufwand, Effizienz und Ressourcen.....	32
Tabelle 12 Übersicht der Kriterien Klimastabilität und technischer Anspruch.....	36
Tabelle 13 Übersicht der Kriterien Aufwand und Energiebedarf.....	37

1 Einleitung

In Deutschland wächst die Produktion von Edelpilzen seit über einem Jahrzehnt (HLP, 2022), bleibt im champignondominierten Markt jedoch weiterhin klein und umfasst nur rund zwei Prozent der gesamten Speisepilz-Erzeugung (BLE, 2024). Gerade diese wachsende, aber noch junge Branche rückt zunehmend in den Fokus von Erzeugung, Handel und Verbraucher*innen. Als sinnvoll ergänzende Eiweißquelle sind Edelpilze daher besonders in vegetarischer und veganer Ernährung als alternative Proteinquelle beliebt (BDC, 2025).

Vor diesem Markthintergrund lohnt der Blick auf die ernährungsphysiologischen Eigenschaften: Pilze gelten als nährstoffreiche, kalorienarme Lebensmittel (Liu et al., 2025). Der Proteingehalt ist im Vergleich zu tierischen Produkten zwar moderat (ca. 2,25 g/100 g), macht Pilze aber als alternative und klimafreundliche Eiweißquelle interessant (Pashaei et al., 2024). Entscheidend für die Nachhaltigkeitsdebatte ist, dass die Herstellung, bezogen auf die gleiche Proteinmengen, deutlich geringere Umweltwirkungen verursacht als bei Rindfleisch. Pilzproduktion benötigt weniger Wasser, Land und Energie und führt zu niedrigeren CO²-Emissionen (Liu et al., 2025; Pashaei et al., 2024).

Diese deutlich geringeren Umwelt- und Ressourcenlasten weisen sowohl auf das Potenzial der Pilzproduktion im Allgemeinen als auch auf ihren möglichen Beitrag betrieblicher Anpassungsstrategien hin. Interessanterweise kann eine Zusammenlegung bislang selten gekoppelter Produktionszweige solch eine Anpassungsstrategie bieten. Eine Simulation von Quacoe et al. (2024) zeigt, dass Rinderhaltung und Pilzanbau die Profitabilität kleiner Betriebe steigern könnte. Praxisberichte aus Deutschland zeigen, dass auch der vollständige Umstieg auf Pilzzucht möglich ist. Dokumentiert sind beispielsweise Umnutzungen ehemaliger Schweineställe zu Edelpilz-Produktionsräumen (Jaisfeld, 2024; Kokenbrink, 2022). Allgemein kann für landwirtschaftliche Betriebe, deren traditionelle Einkommensquellen unter Preis- und Klimadruck stehen, betriebliche Diversifizierung eine wirtschaftlich sinnvolle Option sein und sollte gezielt durch bspw. Beratung oder Förderung unterstützt werden (Ebers & Forstner, 2020). Ein entsprechendes Projekt der Universität Kassel (NuPiWi¹) soll diese Herausforderung angehen und praktisches Wissen aus der Pilz- und Nussbranche organisieren und an Interessierte vermitteln.

Vor diesem Hintergrund soll diese Arbeit einen Beitrag dazu leisten, praktisches Wissen zur Edelpilzproduktion zu sammeln und einzuordnen. Es soll herausgefunden werden, ob und wie es Betriebe schaffen, eine tragfähige Pilzproduktion aufzubauen. Grundlage sind leitfadengestützte

¹ NussPilzWissenstransfer: Heimische Erzeugung von Nüssen und Pilzen als gefragte und gesunde Eiweißquellen durch Wissenstransfer fördern. NuPiWi Förderkennzeichen: 2824CPH015.

Experteninterviews mit kleinen und mittleren Betrieben. Im Zentrum stehen folgende Forschungsfragen:

1. Welche innovativen und praxisnahen Strategien, von der Substratherstellung über die Raumgestaltung bis hin zur Fruchtungstechnik, entwickeln und nutzen kleine und mittlere Edelpilzbetriebe, um mit einfachen Mitteln und vorhandener Infrastruktur wirtschaftlich erfolgreich zu produzieren?
2. Unter welchen Voraussetzungen werden in den Betrieben unterschiedliche technische Lösungen (z.B. Low-Tech oder No-Tech Ansätze) entwickelt und eingeführt, und wie bewerten die Betreiber*innen deren Stärken und Schwächen?

2 Theoretischer Hintergrund

In diesem Kapitel wird zunächst eine kurze Einführung in den Lebenskreislauf der Pilze (Kapitel 2.1) gegeben. Dann wird der Stand des Wissens zum Prozess der Kultivierung von Edelpilzen (Kapitel 2.2) näher erläutert. Im Anschluss wird beschrieben, welche praktische Gestaltungsmöglichkeiten für Pilzproduktionen (Kapitel 2.3) existieren. Zum Schluss werden Begriffe wie Innovation und *Low-Tech* definiert (Kapitel 2.4).

2.1 Kurzüberblick: Lebenskreislauf der Pilze

In der Natur folgen die Entwicklungsschritte eines Pilzes einem Kreislauf, der im Folgenden durch **(7) sieben Einzelschritte** beschrieben wird.

Reindl & Friedl (2024) beschreiben den Vorgang (siehe Abb. 1) folgendermaßen: Ähnlich der Keimung eines Samens in der Pflanzenwelt, beginnt der Zyklus mit der **(1) Sporenkeimung**. Ein einzelner Fruchtkörper kann bis zu einer Milliarde Sporen freisetzen, welche in der Nähe des Pilzes abgelagert oder durch Wind, Wasser oder Lebewesen über größere Distanzen verteilt werden. Trifft eine Spore auf geeignete Bedingungen, keimt sie aus und bildet feine Fäden, sogenannte Hyphen. Treffen Hyphen zweier kompatibler, also unterschiedlich-geschlechtlicher Sporen aufeinander, findet eine **(2) Verschmelzung (Plasmogamie)** statt. Aus vielen Hyphen entsteht somit ein Geflecht, das Myzel, welches das organische Substrat durchwächst. Die Fruchtung des Myzels, bzw. die Entstehung des oberirdischen Fruchtkörpers wird durch unterschiedliche äußere Umstände eingeleitet (siehe



Abbildung 1 Wachstumsphasen von Pilzen
(Quelle: Reindl und Friedl 2024, S. 23)

Kapitel 2.2.2). Stimmen diese äußeren Signale, leitet der Pilz die Fruchtung ein. Aus zunächst sehr kleinen **(3) Hyphenknoten (Primordien)** bilden sich die ersten sichtbaren **(4) Verdickungen**, oft als *Pinheads* (dt. **Stecknadelköpfe**) bezeichnet. Im weiteren Verlauf wächst der Fruchtkörper heran. Zunächst bleibt der **(5) Hut geschlossen**, häufig durch einen Schleier (Velum) bedeckt, welcher das Innere des Pilzes schützt. Mit zunehmendem Alter **(6) öffnet sich der Hut**, die Lamellen (oder Röhren) werden freigelegt und neue Sporen können heranreifen. Am Ende der Entwicklung erfolgt die **(7) Abgabe von Sporen (Sporulation)**. Die reifen Sporen werden massenhaft freigesetzt, gelangen in die Umgebung und können erneut keimen. Damit schließt sich der Kreislauf.

Der natürliche Lebenszyklus bildet die Grundlage für die Kultivierung im Betrieb, denn jede Phase entspricht einem praktischen Prozessschritt von Substratwahl und Beimpfung über Durchwuchsphase bis zur Fruchtung mit artspezifischen Signalen (Stamets, 2011). In den folgenden Kapiteln wird versucht, diesen Ablauf in praktische Entscheidungsgrundlagen für kleine und mittlere Pilzbetriebe zu übersetzen, um die genannten Forschungsfragen zu beantworten.

2.2 Prozess der Pilzkultivierung

Im Folgenden soll ein Überblick des aktuellen Wissenstandes in den verschiedenen Teilbereichen der Pilzzucht gegeben werden.

Die Kultivierung vieler Pilzarten erfolgt durch die vegetative Vermehrung des Myzels. Dies kann wie folgt ablaufen (siehe Abb. 2): Die Pilzstämme werden durch das Klonen von in der Natur gefundenen Fruchtkörpern gewonnen und anschließend in Agar-Nährmedien auf Petrischalen vermehrt (MyCoy, 2016). Das mit Myzel durchwachsene Agarmedium wird dann in kleinen Stücken in sterilisiertes Getreide eingebracht, um das Myzel weiter zu vermehren (Schuldes & Lanceata, 2016). Das dadurch entstandene, vollständig durchwachsene Getreide wird als Brut, Pilzbrut oder *Spawn* bezeichnet (Schmidt, 2020). Anschließend wird das passende Fruchtungssubstrat mit der Brut beimpft. Eine generative Vermehrung wird in der Pilzzucht aus unterschiedlichen Gründen eher selten genutzt (Oei, 2016; Stamets, 2005).

Nach der Beimpfung des Fruchtungssubstrates mit der Pilzbrut lässt sich der weitere Verlauf in **drei Hauptphasen** gliedern: Die erste Phase ist die Inkubationszeit, in der das Myzel das Substrat durchwächst, auch bekannt als **Durchwuchsphase** (eng.

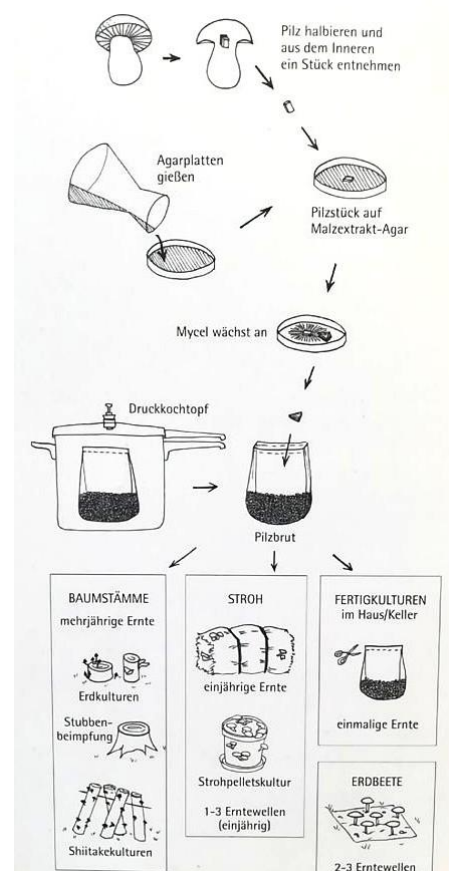


Abbildung 2 Pilzzucht im Überblick (Quelle: Wurth, M. und Wurth, H. 2018, S.10)

Spawnrun). In der zweiten Phase entstehen kleine Verdichtungen sowie Fruchtkörperansätze, die **Primordienbildung** beginnt. Die dritte Phase beschreibt das Wachstum der eigentlichen Fruchtkörper (**Fruchtkörperentwicklung**). Jede dieser Phasen hat spezifische Anforderungen an die Umweltbedingungen (Stamets, 2011). Im Folgenden werden die drei Phasen näher erläutert.

2.2.1 Durchwachsungsphase

Mit dem Beimpfen des Fruchtungssubstrates beginnt automatisch die Durchwachsungsphase. Üblicherweise werden 10% der Pilzbrut zum Beimpfen benötigt, was je nach Pilzart und Vorhaben variieren kann. Je mehr Brut im Substrat, desto schneller wird es besiedelt (Goldscheider, 2018; Stamets, 2011). Schließlich wird der Substratsack verschlossen und der Inhalt bestmöglich homogenisiert durch z.B. Schütteln. Nun geht es darum, dem Pilzmyzel die optimalen Wachstumsbedingungen zu ermöglichen. Folgende Parameter sind entscheidend:

Luftfeuchtigkeit: Möglichst bei 95-100%. Pilze bestehen zu 90% aus Wasser, daher ist die Luftfeuchtigkeit wichtig, damit sie nicht austrocknen (Goldscheider, 2018; Stamets, 2011).

Substratfeuchtigkeit: Optimal bei 60–65 % (McCoy, 2016; Schmidt, 2020). Andere Quellen behaupten bis max. 75 %, jedoch niemals gesättigt (Goldscheider, 2018; Stamets, 2011). Feuchtigkeit unter 40 % hemmt das Myzelwachstum (Stamets, 2011).

pH-Wert: Der optimale pH-Wert liegt im Bereich 4-8 (McCoy, 2016).

Licht: Das Myzel sollte in Dunkelheit wachsen können (Goldscheider, 2018), wobei moderates Licht keinen nennenswerten Effekt auf das Myzelwachstum hat. Zu viel Licht wirkt in dieser Phase schädigend (Stamets, 2011).

Temperatur: Die Umgebungstemperatur sollte über 20°C liegen (Goldscheider, 2018), optimal für die meisten Spezies bei 25°C (Oei, 2003). Die Pilze selbst erzeugen durch ihren Stoffwechsel ebenfalls Wärme. Im Inneren der Substrate sollte die Temperatur nie über 35°C steigen (Stamets, 2011).

CO²: Das Myzel ist sehr tolerant gegenüber hohen CO²-Werten (Stamets, 2011; Oei, 2003). Laut Goldscheider (2018) braucht es sogar 5.000-40.000ppm (15- bis 100-mal mehr als in der Luft). Diese Werte werden in den verschlossenen Behältern erreicht und sind somit nicht im Raum erforderlich.

Während des *Spawnruns* durchwächst das Myzel das gesamte Substrat, bildet feine Verästelungen und verbindet es zu einem kompakten, weiß überzogenen Block. Der Prozess endet, wenn das Substrat vollständig besiedelt ist oder erste Primordien sichtbar werden (Schmidt, 2020).

2.2.2 Primordienbildung

Die Primordienbildung bei Pilzen ist ein Prozess, der durch Veränderungen in den Umweltbedingungen ausgelöst wird. In dieser Phase wechselt der Pilz von seiner vegetativen, unterirdischen oder holzbewohnenden Phase in die sexuelle, fruchtkörperbildende Phase. Faktoren wie Nährstoffknappheit, ein Wechsel der Temperatur, Feuchtigkeitsveränderungen oder Licht können diesen Übergang einleiten (Cotter, 2014; Oei, 2003).

Je nach Pilzart und dessen individuellen Anforderungen müssen die Parameter angepasst werden, um eine Primordienbildung zu initiieren. Mögliche Veränderungen der Umweltbedingungen können wie folgt zusammengefasst werden:

Luftfeuchtigkeit: Sollte auf etwa 90–95 % reduziert werden.

Licht: Für einige Pilzarten notwendig, idealerweise sollte es im Bereich von 50 bis 1000 Lux und 380 bis 480 nm (grün bis blau) eingestellt werden, was die Lichtverhältnisse im Wald nachahmt (Stamets, 2011).

Temperatur: Je nach Pilzart muss die Temperatur angepasst werden. In der Regel sinkt die Substrattemperatur innerhalb von 24–72 Stunden nach der Umstellung (Stamets, 2011).

CO²: Der CO²-Gehalt sollte deutlich gesenkt werden, idealerweise auf unter 1000 ppm, besser noch unter 500 ppm. Ein regelmäßiger Luftaustausch ist essenziell (Stamets, 2011).

Manche Kulturen benötigen besondere Behandlungen wie einen Kälteschock oder eine längere Ruhepause. Auch Erschütterungen können zur Fruchtkörperbildung anregen, wie es beim Shiitake der Falls ist (Stamets, 2011). Cotter (2014) beschreibt längere Ruhephasen, bevor gewisse Kulturen in die reproduktive Phase übergehen. Er sieht diese Zeit als Teil des Wachstumszyklus, in der optisch nichts passiert, der Pilz aber Nährstoffe anreichert.

2.2.3 Fruchtkörperentwicklung

Um das Fruchtkörperwachstum einzuleiten und zu fördern, sind wieder die verschiedenen Klimafaktoren zu beachten. Diese müssen leicht angepasst werden, können jedoch je nach Kulturart variieren, bzw. Sonderanforderungen mit sich bringen (Goldscheider, 2018).

Luftfeuchtigkeit: Sollte weiterhin hoch bleiben, aber nicht übermäßig ansteigen (Oei, 2003).

Licht: Die Lichtintensität kann variieren. Bei einigen Pilzarten ist die Pigmentierung der Fruchtkörper stark durch Licht beeinflusst, was in der Zucht teilweise genutzt wird, um gewünschte Ergebnisse zu erzielen (Stamets, 2011).

Temperatur: Je nach Ziel kann die Temperatur entweder konstant gehalten oder leicht erhöht werden. Während höhere Temperaturen die Fruchtkörperbildung beschleunigen, führen laut Stamets (2011) kühlere Temperaturen oft zu qualitativ hochwertigeren Speisepilzen.

Insgesamt sind für den Fruchtungsprozess ein regelmäßiger Luftaustausch essenziell, um das CO²-Level im Raum niedrig zu halten und gleichzeitig die Sauerstoffzufuhr zu erhöhen. Zur Behandlung der Pilze während dieser Phase ist zu beachten, dass die Fruchtkörper für ihre Entwicklung in der Lage sein müssen, Wasser an der Oberfläche zu evaporieren. Direktes Einsprühen der Fruchtkörper ist aber eher schädlich (Oei, 2003). Die Ernte der Fruchtkörper erfolgt, sobald sie voll ausgebildet sind, jedoch bevor die Massensporulierung einsetzt (McCoy, 2016).

2.3 Überblick: Gestaltungsfelder der *Indoor*-Pilzkultivierung

Zur weiteren Einordnung folgt ein Überblick drei wichtiger Gestaltungsfelder der Pilzkultivierung: räumliche Organisation und Infrastruktur, Substrate und Behandlungsverfahren sowie Klimaführung und dessen technische Ausgestaltungsmöglichkeiten.

2.3.1 Räumliche Organisation und Infrastruktur

Historisch wurden Pilzkultivierungsbedingungen erstmals in Höhlen gefunden. Früh beschriebene Versuche in Frankreich nutzten stabile, kühle Temperaturen und hohe Luftfeuchtigkeit, was für die Kultivierung von Champignons vorteilhaft war (Stamets, 2011). Diese Grundidee prägt moderne Pilzbetriebe bis heute.

In der Literatur wird die Organisation verfügbarer Räume als klar abgegrenzte Funktionsbereiche beschrieben. Diese Bereiche können in den verschiedensten räumlichen Grundkonstellationen entstehen. Stamets (2011, S. 481 Übersetzung mit DeepL) beschreibt die Thematik wie folgt: „Im Allgemeinen sind speziell angefertigte Anbauräume leistungsfähiger als Gebäude, die für andere Zwecke konzipiert wurden. Mit sinnvollen Modifikationen können jedoch alle genannten Gebäude zu intensiven Anbaukammern umgebaut werden.“ Als beispielhafte („genannte“) Gebäude werden u.a. Hallen, Schlachthäuser, Schweinezuchtbetriebe, Frachtcontainer, Gewächshäuser, Scheunen oder Kellerräume genannt.

Stamets (2011) unterscheidet zwei übergeordnete Raumkomplexe. Der erste umfasst Laborfunktionen, also z.B. die Entwicklung von Substraten und die Herstellung von Brut. Empfohlen wird eine bauliche Trennung vom Produktionsbereich, gute Wärmedämmung und ein Überdrucksystem (siehe Kapitel 2.3.3) mit hochwirksamer Filterung, damit Partikel von außen ferngehalten werden. Der Raum sollte klimatische Umgebungswerte zwischen etwa 21 und 27 °C bei einer Luftfeuchtigkeit von etwa 35 bis 50% erlauben (Stamets, 2011). Oberflächen sollten glatt, feuchtebeständig und gut zu reinigen sein, auch langfristig. Schadorganismen setzen sich gerade über einen längeren Zeitraum gerne in Spalten

oder rauen Oberflächen ab und beschädigen die Substrate oder Fruchtkörper (Krämer & Englbrecht, 2021). Ziel ist ein reproduzierbar sauberes Umfeld für kritische Arbeitsschritte wie Beimpfung und Transfers von Kulturen (Stamets, 2011).

Der zweite Komplex umfasst die nicht laborgebundenen Bereiche. Dazu zählen Fruchträume, ein Raum zur Pasteurisierung oder Sterilisierung von Substraten, ggfs. Verkehrsflächen, Sortier- und Packflächen, Kühlung sowie Bereiche für Warenannahme und Versand. Speziell für Fruchträume wird eine prozessorientierte Anordnung empfohlen. Rechteckige Grundrisse mit großen Türen sollen Warenfluss und Reinigung erleichtern. Betonböden mit Abläufen, wasserfeste und schimmelresistente Wandmaterialien (Stamets, 2011). Beispielsweise kann ein Kalkanstrich der Wände den pH-Wert so beeinflussen, dass Pilze (also auch Schimmel) sich nicht so gut ausbreiten können (McCoy, 2016). Weiterhin werden spritzwassergeschützte Elektroinstallationen und die Minimierung von Holzanteilen empfohlen. Wie auch in Laborräumen sollten sich auch Innenoberflächen mit gebräuchlichen Reinigungsmitteln gut säubern lassen. Die klimatischen Umgebungswerte dieser Räume sollten je nach Pilzart und Nutzung variabel einstellbar sein. Die Filterung kann etwas weniger wirksam ausfallen, als im Labor, jedoch sollte auch hier ein Überdrucksystem geschaffen werden, um Staub und Sporen von außen zu begrenzen (Stamets, 2011).

Für kleinere und mittlere Betriebsgrößen wird die Anpassung und Umnutzung vorhandener Infrastruktur beschrieben. McCoy (2016) beschreibt fruchtungsgeeignete Räume eines Kellers mit Zementwänden und Bodenablauf. Auch Lagerhäuser, Schiffscontainer oder Gewächshäuser lassen sich umfunktionieren. Ein Container kann auch so umgebaut werden, dass ein Labor, ein Inkubationsraum und eine Fruchtungsumgebung im selben Raum beherbergt ist. Zusätzlich besteht die Möglichkeit Raum-im-Raum Systeme durch mit Plastikfolie ausgekleideter Holzrahmen zu installieren. Diese können in beliebiger Größe und Anzahl gebaut werden, wodurch sich die Luftfeuchtigkeit leichter regulieren lässt als in einem einzelnen großen Raum (McCoy, 2016).

2.3.2 Substrate und deren Behandlungsverfahren

Substrate bilden die Nahrungsgrundlage kultivierter Pilze. Sie bestehen aus Mischungen mehrerer Komponenten, die dem Pilz die nötigen Nährstoffe bereitstellen und gleichzeitig eine geeignete Struktur für Luftaustausch und Durchwachsung bieten (Krämer & Englbrecht, 2021).

In der Praxis werden vor allem Reststoffe aus Land- und Forstwirtschaft genutzt. Für eine wirtschaftliche Produktion kann die lokale Verfügbarkeit zu geringen Kosten entscheidend sein. Weltweit werden unter anderem Weizen- oder Reisstroh, Holzkomponenten verschiedener Baumarten, Biotreber, Soja- oder Sonnenblumenschalen sowie Kaffeesatz als Substratkomponenten verwendet. Diese Stoffe lassen sich

allein oder kombiniert verwenden und an die Ansprüche der jeweiligen Pilzart anpassen (Reindl & Friedl, 2024).

Häufig wird zwischen Stroh- und Holzsubstraten unterschieden. Pilzarten mit Strohpräferenz, z.B. Seitlinge, gedeihen auf halmastigen Substraten, während holzbewohnende Arten wie Shiitake oder Igelstachelbart auf Sägespäne bessere Ergebnisse liefern. Die gewählte Substratmischung beeinflusst in der Folge die Behandlungsmethode. Nährstoffreichere Rezepturen und feinere Partikel erhöhen im Allgemeinen das Risiko mikrobielle Konkurrenz zu fördern. Somit ergibt sich die Notwendigkeit einer angepassten Vorbehandlung des Substrates, von einer Keimreduktion bis zur vollständigen Entkeimung jeglicher Mikroorganismen (Schmidt, 2020).

In der Literatur werden viele unterschiedliche Vorbehandlungsmethoden beschrieben, welche jeweils Vor- und Nachteile mit sich bringen. Einige davon werden im Folgenden erläutert.

Eine sehr einfache Methode ist die Heißwasserpasteurisierung. Hier werden die Substratmaterialien bei etwa 74 bis 80°C ein bis zwei Stunden im Wasser gehalten (Cotter, 2014). Reindl & Friedl (2024) empfehlen zwei bis drei Stunden bei 60 bis 70°C. Für kleine Betriebe eignen sich große Töpfe oder Fässer, die über einer Wärmequelle erhitzt werden können. Das Verfahren ist kostengünstig und wirksam, da es einen großen Teil der Konkurrenzorganismen reduziert und gleichzeitig den Wasserhaushalt des Materials einstellt (Cotter, 2014).

Eine weitere Methode ist die Dampfpasteurisierung. Dabei wird das zuvor befeuchtete Substrat in einem geschlossenen Behälter für mindestens zwei Stunden mit heißem Dampf behandelt (Stamets, 2011). Dabei ist es wichtig, die Temperaturen im Kern des Behälters zu kontrollieren, welche nicht unter 71°C fallen sollte (Stamets, 2011). Für kleine Substratmengen sind umgebaute Fässer mit Sensor und Heizelement eine einfache und günstige Lösung (Cotter, 2014).

Auch eine chemische Behandlung des Substrates kann eine gute Option sein. Beschrieben werden zum Beispiel Wasserstoffperoxidbäder in niedriger Konzentration oder eine Behandlung mit gelöschtem Kalk. Durch Kalk wird der pH-Wert soweit angehoben, dass Konkurrenzorganismen weitgehend inaktiviert werden (Stamets, 2011).

Eine weitgehende Keimfreiheit wird nur durch eine Sterilisation des Substrates erreicht. Beispielsweise durch die Behandlung mit heißem Dampf, welcher in einem geschlossenen Behälter unter Druck gesetzt wird. Erforderlich sind Kerntemperaturen von mindestens 121°C über ein bis zwei Stunden. Größere Anlagen sind teuer und energieintensiv, kleinere Lösungen mit Druckkochtöpfen oder Sterilisatoren sind als *Low-Tech*-Variante möglich (Cotter, 2014).

Pasteurisieren gilt im Vergleich als energieärmer und bezüglich Investitionen als günstiger. Zudem verbleiben hitzetolerante Mikroorganismen, die gegenüber dem Pilzmyzel nicht konkurrenzfähig sind und das Substrat stabilisieren können (McCoy, 2016). Höhere Erträge eröffnet jedoch die Sterilisation, erfordert aber konsequente Hygienestandards, damit das sterile Substrat nicht erneut kontaminiert wird. Der methodische Einsatz der verschiedenen Vorbehandlungsmethoden sollte also in Relation zu Pilzart, Rezeptur, Budget und Arbeitsorganisation getroffen werden (Cotter, 2014).

Eine Schlüsselrolle im Prozess hat die Pilzbrut, insbesondere Körnerbrut. Darunter versteht man mit Myzel durchwachsene Getreidekörner wie z.B. Roggen, Weizen oder Hirse (Reindl & Friedl, 2024). Körner liefern leicht verfügbare Nährstoffe und viele Inokulationspunkte, wodurch das Myzel nach dem Einbringen schnell in das Produktionssubstrat einwächst. Wegen der hohen Nährstoffdichte ist Körnerbrut sehr kontaminationsanfällig (Stamets, 2011). Sie wird deshalb grundsätzlich steril hergestellt und unter möglichst keimarmen Bedingungen beimpft und gehandhabt (McCoy, 2016; Miles & Chang, 2004; Stamets, 2011).

2.3.3 Klimaführung und dessen technische Ausgestaltungsmöglichkeiten

Die Bildung und Reifung von Fruchtkörpern hängt entscheidend von stabil geführten Umweltparametern ab. Für hohe und gleichmäßige Erträge ist eine verlässliche Klimasteuerung in den Fruchträumen unerlässlich (Krämer und Englbrecht, 2021). Wie diese Parameter erreicht werden können und welche Technik dafür benutzt werden kann, wird im Folgenden anhand der Literatur erläutert.

Eine hohe und gut verteilte Luftfeuchtigkeit unterstützt, bzw. leitet die Primordienbildung ein (siehe Kapitel 2.2.2). In der Praxis reichen die technischen Lösungen von einfachen Raumluftbefeuchtern über Ultraschallvernebler bis zu Karbonisierungspumpen oder Feinnebelanlagen (Crosby, 2021b). Für kleine bis mittelgroße Räume sind Ultraschallgeräte eine kostengünstige Option, größere rechteckige Räume profitieren häufiger von druckbasierten Systemen mit fein zerstäubenden Düsen. Bei Ultraschallgeräten empfiehlt sich die Nutzung von mineralarmem Wasser, um Ablagerungen am Zerstäuber und im Raum zu reduzieren und die Lebensdauer des Gerätes zu erhöhen (Russell, 2014).

Weiterhin muss eine angemessene Belüftung der Fruchträume mitgedacht werden. Frischluftzufuhr senkt den CO²-Gehalt im Fruchtraum und kann zugleich als Temperatur- und Luftfeuchtigkeitskorrektur wirken (Oei, 2003). Am häufigsten werden Axial- und Zentrifugalventilatoren in verschiedensten Kombinationen verwendet (Stamets, 1984). Oei (2003 S.110f) beschreibt zwei grundlegende Lüftungsprinzipien, die mit Unter- oder Überdruck funktionieren. Ein Unterdrucksystem besteht aus mehreren Ventilatorkomponenten und funktioniert wie folgt: Ein Abluftventilator saugt die Luft direkt aus dem Fruchtraum ab. Frische Luft strömt dann durch einen Lufteinlass, welche durch

einen Mischventilator verteilt wird. Dieses System ist einfach zu installieren und günstig, führt aber laut Oei (2003) eher zu Klimaschwankungen, da kalte Außenluft im Raum absinken und sich schwerer homogen verteilen kann. Bei Überdrucksystemen wird die Zuluft (Außenluft) außerhalb des Fruchtungsraums vorkonditioniert. Sie wird durch einen Einlass in einen Luftkanal gesaugt und dort temperiert und befeuchtet. Anschließend wird sie in den Fruchtungsraum geblasen, wodurch ein Überdruck entsteht (Oei, 2003). Gerade in Phasen der Primordienbildung mit etwa sechs bis zwölf Luftwechseln pro Stunde ist eine vollständige Befeuchtung im Raum schwierig, wenn trockene Außenluft direkt angesaugt wird (Stamets, 2011). Insgesamt ergeben Überdrucksysteme eine stabilere Klimaführung, sind aber kostenintensiv und energetisch anspruchsvoller, weil die gesamte Luft über die Klimakomponenten geführt und mit höherem Druck gefördert werden muss. Das Prinzip wird vermehrt in der industriellen Champignonzucht angewendet, lässt sich jedoch für kleinere Betriebe modular und niedrig technisiert übertragen (Oei, 2003). Zum Beispiel kann durch eine zu kleine Abluftöffnung (etwa halb so groß wie die Frischluftzufuhr) auf einfache Art und Weise Überdruck in einem Raum entstehen (Stamets, 1984).

Allgemein ist im Kontext von Frischluftzufuhr zu beachten, dass diese eine Vielzahl von Partikeln und Mikroorganismen in die Produktionsräume bringen kann. Daher ist eine abgestufte Filterung der Zuluft gängige Praxis. Für sensible Arbeitsschritte werden HEPA-Filter (*high efficiency particulate air*) empfohlen. Sie entfernen Partikel bis etwa 0,3 Mikrometer mit sehr hoher Abscheideleistung. In weniger kritischen Abschnitten können auch niedrigere Filterklasse ausreichen (Stamets, 2011).

Da viele Edelpilze bei Temperaturen von ca. 18°C gedeihen (17 bis 20°C), sollten Heiz- oder Kühlelemente ganzjährig um diese Temperatur einstellbar sein (Crosby, 2021b). Natürlich gibt es viele artspezifische Unterschiede und Toleranzen, weshalb andere Quellen Temperaturen von 13 bis 24°C als Richtwert beschreiben (Stamets, 2011). Diesbezüglich kann die Auswahl von Pilzsorten, die bei bestimmten Temperaturen wachsen können, den Kühl- oder Heizbedarf reduzieren (Crosby, 2021b). Als einfache aber vergleichsweise teure Lösungen für kleine Betriebe werden Raumheizkörper oder Klimaanlage beschrieben (Russell, 2014). Auch Heizrohre können in Über- und Unterdrucksystemen eingesetzt werden, welche sich durch geringe Betriebskosten lohnen können, die Luft aber sehr trocken werden lässt (Oei, 2003).

Licht dient vor allem als morphogenes Signal und nicht als Energiequelle. Ein gleichmäßiges Beleuchtungsniveau mit tagesrhythmischer Schaltung ist für die meisten Kulturarten ausreichend. Die Lichtführung wird mit der Frischluftstrategie und der Luftfeuchte abgestimmt um Austrocknung oder Tropfenbildung zu vermeiden (Krämer und Englbrecht, 2021).

2.4 Definitionen und Begriffsklärungen

2.4.1 Innovation

In der Literatur finden sich verschiedene Definitionen von „Innovation“. Etymologisch gesehen stammt der Begriff von den lateinischen Wörtern „novus“ = neu und „innovare“ = erneuern, woraus sich das Wort „innovatio“ = Erneuerung/Veränderung gebildet hat (Granig & Perusch, 2012, S. 21). Häufig wird darunter das Einführen und Anwenden neuer Lösungen oder Methoden verstanden, die messbare Vorteile bringen, etwa in Form von sozialem oder wirtschaftlichem Nutzen (Häring et al., 2012). Innovationen sind durch verschiedene Kriterien oder Merkmale charakterisiert. Rogers (2003, S.11) betont insbesondere den Neuheitsaspekt, wonach eine Innovation eine „Idee, Praxis oder ein Objekt ist, das von einem Individuum oder einer anderen Einheit als neu wahrgenommen wird“. Daneben bestimmen Merkmale wie u.a. Anpassungsfähigkeit, Komplexität oder Erprobbarkeit die Annahme und Bewertung solcher Neuerungen.

Innovationen entstehen meist über einen gewissen Zeitraum. Der Prozess lässt sich in drei Schritte gliedern: Zuerst steht die Invention, in der Ideen entstehen und in Form von Konzepten oder Prototypen Gestalt annehmen. Daran schließt die Innovation an, also die wirtschaftliche Umsetzung und Markteinführung dieser Ideen. Abschließend folgt die Diffusion, in der sich die Neuerung in sozialen und wirtschaftlichen Kontexten verbreitet und angewandt wird (Schumpeter, 2020). Erst mit der Verbreitung und Übernahme einer Neuerung in einem sozialen System lässt sich von einer „durchgesetzten“ Innovation sprechen (Häring et al., 2012).

Im Anschluss an gängige Definitionen wird der Innovationsbegriff in dieser Arbeit bewusst zurückhaltend verwendet. Um die genannten Ebenen nicht zu vermischen, werden betriebsnahe, noch erprobte Lösungen hier vorrangig als betriebsinterne Neuerungen beziehungsweise als innovative Merkmale bezeichnet.

2.4.2 Low-Tech

Es gibt keine einheitliche, universelle Definition von *Low-Tech*. Der Begriff bleibt je nach Kontext oft ungenau und offen (Abrassart et al., 2020). Im weitesten Sinne bezeichnet der Begriff jedoch Technologien, Systeme oder Prozesse, die bewusst eine geringere technische Komplexität aufweisen als hochentwickelte Lösungen (Dellsperger, 2024). *Low-Tech* ist nicht einfach nur fehlende Technologie, sondern ein Ansatz, der auf einfache, langlebige und zugängliche Technik setzt. Historisch lässt sich der „*Low-Tech-Gedanke*“, oder auch die „*Low-Tech-Bewegung*“, in der Technikkritik der 1970er-Jahre verorten, als infolge von Grenzen-des-Wachstums-Debatten nach alternativen Technologien gesucht wurde (Schumacher, 1973).

Das *Low-Tech-Lab*² definiert folgende Kernprinzipien für *Low-Tech*-Ansätze:

- **Nützlichkeit** (Technik soll grundlegende Bedürfnisse erfüllen)
- **Zugänglichkeit** (lokal herstellbar, einfach zu nutzen und für die meisten Menschen erschwinglich)
- **Nachhaltigkeit** (geringer ökologischer Fußabdruck, langlebig und reparierbar)

Low-Tech wird häufig mit einfacher oder alter Technik gleichgesetzt, aber auch sehr moderne Elemente können Teil von *Low-Tech*-Lösungen sein, sofern sie den Kernprinzipien entsprechen. So schließen *Low-Tech*-Ansätze *High-Tech* nicht pauschal aus, sondern fordern ein kritisches Auswählen eines angemessenen Technikeinsatzes (Dellsperger, 2024). In dieser Arbeit werden ausgewählte betriebliche Lösungen als Ausprägungen mit Merkmalen der *Low-Tech*-Bewegung interpretiert.

3 Methodik

Neben einer Literaturstudie, die allgemeine Zusammenhänge und Hintergründe abdecken soll, spielt die qualitative Sozialforschung in dieser Bachelorarbeit eine große Rolle. Die qualitative Sozialforschung beruht auf der detaillierten Analyse einzelner Fälle und untersucht die Mechanismen und Hintergründe einer Thematik (Gläser & Laudel, 2009). Für die Beantwortung der Forschungsfragen wurden Experteninterviews durchgeführt und ein Leitfaden mit Analyseraster erstellt. Dieses Raster gliedert die im Leitfaden definierten Themenblöcke in Kriterien, die sowohl Innovations- als auch Technikaspekte abbilden. Durch diese systematische Struktur lassen sich die in den Interviews gewonnenen Erkenntnisse in Bezug auf Innovation und Technik vergleichend einordnen. Die Ergebnisse werden im Rahmen einer integrierten Diskussion anhand des Analyserasters bewertet und kritisch reflektiert. Ab Kapitel 3.1 wird das methodische Vorgehen der Experteninterviews dargestellt. Dabei wird auf die Auswahl der Interviewpartner*innen, die Leitfadenskonstruktion, die Durchführung der Interviews sowie die inhaltliche Analyse der Interviewprotokolle eingegangen.

3.1 Experteninterview

Bei Experteninterviews handelt es sich um eine Methode der qualitativen Sozialforschung, um sozialen Sachverhalt zu untersuchen. Im Kontext der Sozialforschung wird eine Person zum Experten, durch seine spezifische Rolle als Quelle von Spezialwissen über einen sozialen Sachverhalt. Mithilfe der Interviews wird die Sichtweise und Einstellung eines Individuums erfasst und gedeutet (Gläser & Laudel, 2009). In dieser Arbeit wurde das Experteninterview so angepasst, dass vor allem technisches Fachwissen erhoben wird, dabei jedoch auch die Kompetenz und das Erfahrungswissen der Befragten als wesentliche Erfolgsfaktoren jeder technischen Lösung berücksichtigt werden kann. Weiterhin wurden in dieser Arbeit eine nichtstandardisierte Herangehensweise und leitfadengestützte

² Nach Dellsperger (2024) ist das *Low-Tech-Lab* die größte kollaborative Dokumentationsplattform für *Low-Tech*-Lösungen (<https://lowtechlab.org/en>).

Durchführung des Interviews gewählt. Für nichtstandardisierte Interviews wurden weder die Fragen des Interviewers noch die Antworten der Interviewpartner*innen begrenzt oder standardisiert. Im Leitfaden wurden im Vorfeld klare Themen und Fragen festgelegt, die im Interview behandelt und beantwortet wurden. Die Formulierung und Reihenfolge der Fragen ist allerdings flexibel, wodurch ein möglichst natürlicher Gesprächsverlauf erzeugt werden soll (Gläser & Laudel, 2009).

3.1.1 Auswahl der Interviewpartner

Im Rahmen dieser Arbeit soll die Frage nach innovativen und praxisnahen Strategien in der Edelpilzzucht anhand von kleinen und mittleren Betrieben untersucht werden. Auf der Suche nach passenden Pilzbetrieben wurden zunächst umfangreiche Internetrecherchen sowie Hinweise aus dem persönlichen und projektinternen NuPiWi-Netzwerk genutzt. Anschließend stellte ein Vorgespräch durch das NuPiWi-Projekt der Universität den Primärkontakt zu potenziellen Teilnehmenden her. Im Verlauf der geführten Interviews entstanden zudem durch Empfehlungen der Teilnehmenden weitere Kontakte zu Betrieben, die einer Teilnahme an einem Interview zustimmten. Letztlich sollten 3–5 passende Betriebe gefunden werden (siehe Tabelle 1), die bestenfalls unterschiedliche Betriebsgrößen, bauliche Ausstattungen und Technisierungsgrade repräsentieren und so eine möglichst vielfältige Datenbasis bereitstellen.

Tabelle 1 Vorstellung der Interviewpartner*innen

Betrieb	Name (Kürzel)	Funktion
Magdeburger Pilzmanufaktur	Dieter Völkers (DV)	Inhaber
Pilzmanufaktur Steinbiß	Nils Steinbiß (NSt)	Inhaber
Paradiespilze	Dr. Evgeni Bratovanov (EB)	Inhaber
Ana's Pilzfarm	Ana Orias Balderas (AOB)	Inhaberin
Gourmet Pilze Stephan	Freimut Stephan (FS)	Inhaber

3.1.2 Leitfadenkonstruktion

Für die Experteninterviews wurde ein Leitfaden für alle Betriebe gleichermaßen vorbereitet. Dieser enthielt mehrere Themenblöcke, zu denen jeweils offene Fragen formuliert wurden (siehe Tabelle 2). Unter jedem Themenblock wurden stichpunktartig eine oder mehrere Detailfragen aufgeführt. Die offenen Fragen dienten der Erzählanregung der Interviewpartner*innen und wurden zu Beginn gestellt. Teilweise konnten dabei bereits Detailfragen beantwortet werden, die anschließend nicht mehr gesondert gestellt werden mussten (Gläser & Laudel, 2009).

Tabelle 2 Exemplarischer Aufbau des Leitfadens

	Themenblöcke	Offene Fragen (hier nur exemplarisch aufgelistet)
Leitfaden	Räumlichkeiten	- Anpassung/Umbau welcher baulichen Gegebenheiten? - Entscheidungsgründe für diese Gebäude/Räume? - Aufwand der Ausgestaltung der Räume? - Reinigung/Klima/Isolation? - Allg. Herausforderungen?
	Substrate	- Verfahren/Methoden zur Substratherstellung/Inokulation? - Was hat gut funktioniert, was nicht? - Aufwand Substratherstellung ggü. Zukauf Fertigsubstrate? - Rohstoffe/Energie- bzw. Zeitaufwand?
	Fruchtung	- Einstellung der klimatischen Bedingungen für die Fruchtung? - Welche Technik für Luftfeuchte, Temperatur, CO² und Licht? - Welche Pilzarten und wie flexibel ist das Setup? - Entscheidungsgründe für das Setup? - Ausfälle/Eingriffe/Kontaminationen?

3.1.3 Durchführung der Interviews

Die Absprache zum genauen Ablauf des Interviews wurde im Vorfeld mit den Interviewpartner*innen per Mail geführt. Sie wurden darauf hingewiesen, dass es in dem Interview um ihre individuellen Erfahrungen, betrieblichen Lösungen und Einschätzungen zu technischen und organisatorischen Strategien in der Edelpilzproduktion geht. Dabei wurde betont, dass sowohl die technische Umsetzung als auch persönliche Erfahrungswerte und Entscheidungsprozesse von Interesse sind. Es wurde den Interviewpartner*innen zugesichert, dass sensible betriebliche Informationen, interne Abläufe oder geschäftsrelevante Details auf Wunsch nicht veröffentlicht werden und im Rahmen der Auswertung anonymisiert oder ausgelassen werden. Zusätzlich erhielten die Teilnehmenden eine kurze schriftliche Zusammenfassung der Zielsetzung der Arbeit sowie eine Einverständniserklärung zur Datenverarbeitung. Nach dem Bundesdatenschutzgesetz dürfen personenbezogene und personenbeziehbare Daten nur mit Zustimmung der betroffenen Person verarbeitet oder veröffentlicht werden (BDSG, 2018).

Die Interviews wurden vorzugsweise als persönliche Gespräche vor Ort durchgeführt. Zu Beginn des Gesprächs wurden die Interviewpartner*innen ausdrücklich über die Tonaufzeichnung informiert und um Zustimmung gebeten.

3.1.4 Transkription und Codierung

Auf eine händische Transkription der Interviews wurde verzichtet, stattdessen wurde eine KI-gestützte Transkription (noScribe³) auf Basis der Tonaufzeichnungen vorgenommen. Die Transkripte wurden mit Hilfe der Software MaxQDA⁴, anhand der für diese Arbeit geeigneten Kriterien, codiert. Die Codierung diente der systematischen Strukturierung der Ergebnisse nach den Kriterien. Diese Form der Auswertung wurde dem speziellen Charakter der Arbeit gerecht und ermöglichte eine praxisnahe Erfassung der behandelten Themen. Ergänzend wurden auch im Interview entstandene Fotos zur Dokumentation benutzt. Die vollständige Transkription ist nicht Bestandteil des Anhangs dieser Arbeit, kann aber auf Anfrage und mit Zustimmung der Interviewpartner*innen eingesehen werden. Zitate wurden wortgetreu und inhaltlich unverändert übernommen, lediglich Füllwörter und für die Analyse unwichtige Passagen wurden entfernt.

3.2 Qualitative Inhaltsanalyse

Bei der qualitativen Inhaltsanalyse handelt es sich um ein Verfahren zur systematischen und zusammenfassenden Beschreibung von Datenmaterialien, durch die Zerlegung der Materialien in ihre zu analysierende Bestandteile und Einteilung in Kategorien, bzw. Kriterien (Dresing & Pehl, 2018). Die Kriterien werden sowohl deduktiv als auch induktiv gebildet. Sie orientieren sich dabei an der Forschungsfrage und dem im Vorfeld erarbeiteten Leitfaden mit definierten Themengebieten bzw. -blöcken (deduktiv). Die Einordnung der Interviewinhalte erfolgt entlang dieser Themenblöcke. Die darin enthaltenen Kriterien und inhaltlichen Schwerpunkte können im Verlauf der Auswertung angepasst oder erweitert werden (induktiv), sofern sich neue relevante Aspekte aus dem Datenmaterial ergeben, oder unpassende Aspekte wegfallen (Gläser & Laudel, 2009; Kuckartz, 2018).

3.3 Wahl geeigneter Kriterien

Die Auswahl der Kriterien erfolgte gemäß der drei übergeordneten Themenblöcke der Arbeit, sie dienen dazu, die Interviewergebnisse systematisch und vergleichbar auszuwerten. Grundlage für die Kriterienauswahl ist eine durchgeführte Literaturrecherche zu Kultivierung von Edelpilzen sowie eigene Praxiserfahrungen und Gespräche mit Betrieben im Rahmen eines Praktikums. Ergänzend wurden Aspekte der Innovationsforschung und der *Low-Tech*-Bewegung berücksichtigt und mit Ansätzen der

³ noScribe ist eine KI-basierte Software zur Transkription von Interviews für die qualitative Sozialforschung oder den journalistischen Gebrauch (www.uni-hildesheim.de).

⁴ MaxQDA ist Software zur Analyse, Organisation, Transkription oder Visualisierung von Daten, Texten oder Audio- und Videodateien. Einsatzgebiete sind die qualitative und Mixed-Methods-Forschung (www.maxqda.com)

Technikbewertung verknüpft. Dadurch soll die Struktur der Diskussion gegliedert werden und zu einer bestmöglichen Beantwortung der Forschungsfragen führen. Folgende Tabellen (3-5) begründen die Auswahl der Kriterien.

Tabelle 3 Themenblock Räumlichkeiten mit begründeten Kriterien

Themenblock	Kriterium	Begründung
Räumlichkeiten	Anpassungsfähigkeit	Um eine nachhaltige Funktionalität von Prozessen oder Technik zu gewährleisten, sollten die jeweilige Umgebung und Räume im Hinblick auf Flexibilität und Anpassungsfähigkeit an gegenwärtige und künftige Szenarien mitgedacht werden. Bspw. die Möglichkeit, Bereiche zu erweitern sowie Anlagen auf- oder umzurüsten (UNEP, 2012). Anpassungsfähigkeit stärkt zugleich die betriebliche Resilienz. Probleme können schneller aufgefangen, Abläufe angepasst und der Betrieb stabilisiert werden (Kyrdoda et al., 2023).
	Reinigungsaufwand	Hygiene ist in der Pilzzucht grundlegend, weil Kontaminationen durch Schimmel oder Bakterien den Prozess gefährden (McCoy, 2016; Oei, 2003a; Stamets, 2011b). In der Technikbewertung wird der Reinigungsaufwand als gut erkennbares und abschätzbares Kriterium im Rahmen der Beurteilung von Lösungen mittels eines Bedeutungsprofils ⁵ beschrieben (Breiing & Knosala, 1997). Anhand der Interviews wird hier der subjektiv empfundene Grad der Erfüllbarkeit dieses Aufwandes eingeschätzt.
	Isolationsqualität/ Energieeffizienz	Energieeffiziente Gebäude verbrauchen weniger Energie und verursachen dadurch deutlich geringere Betriebskosten im laufenden Betrieb (Fischer, 2001). Beispielsweise reduziert eine hohe Isolationsqualität die Wärmeverluste und senkt dadurch den Energiebedarf eines Gebäudes erheblich (Umweltbundesamt, 2024).

⁵ Ein Bedeutungsprofil ist eine grafische Darstellung zur Präsentation der persönlichen Einstellung des Benutzers gegenüber der Erfüllung oder Nichterfüllung von Bewertungskriterien durch ein technisches System (Breiing & Knosala, 1997, S. 302).

Tabelle 4 Themenblock Substrate mit begründeten Kriterien

Themenblock	Kriterium	Begründung
Substrate	Anpassungsfähigkeit	In der Substratherstellung richtet sich Anpassungsfähigkeit u.a. auf Sortiment und Menge. Wechselnde Marktbedürfnisse erfordern ggfs. neue Pilzarten oder skalierbare Chargengrößen (Marshall & Nair, 2009).
	Erprobbarkeit	Erprobbarkeit bezeichnet die Möglichkeit, kleinskalierte Versuche durchzuführen, wodurch neue Rezepturen oder Prozessschritte getestet werden können. Gut funktionierende Verfahren lassen sich so risikoärmer und schneller in den laufenden Betrieb überführen. Das Kriterium ist aus der Innovationstheorie abgeleitet und hier auf Inventions- bzw. Vorstufen bezogen (Rogers, 2003).
	Aufwand	Dieses Kriterium leitet sich aus dem Entscheidungskriterium Kosten und Termine ab (Breiing & Knosala, 1997). Es fasst den finanziellen und zeitlichen Rahmen zusammen, der für die Planung und Umsetzung einer technischen Lösung als angemessen gilt. Im Kontext der Substratherstellung umfasst es u. a. Investitionen in Geräte sowie den laufenden Einsatz von Arbeitszeit. Bewertet wird, wie hoch diese Aufwände ausfallen und inwieweit sie im Betrieb so eingesetzt werden, dass sie das folgende Kriterium Effizienz unterstützen.
	Effizienz	Effizienz zielt darauf, den betrieblichen Nutzen mit möglichst geringem Einsatz von Energie und Ressourcen zu erreichen. In der Eco-Efficiency-Literatur wird dieser Doppelbezug, ökonomisch und ökologisch, als strategisches Ziel beschrieben (OECD, 2008). Im Kontext der Substratherstellung wird Effizienz an dieser Stelle, neben Aufwand, auch mit dem Kriterium der Ressourcen verbunden. Im Sinne der Ressourceneffizienz sollte

		Material- und Energieeinsatz systematisch verringert werden (Weber, 2019).
	Ressourcen	Ressourcen werden hier als <i>Low-Tech</i> -Merkmal eingeordnet und nach den Kernprinzipien Zugänglichkeit und Nachhaltigkeit beurteilt (Dellsperger, 2024).

Tabelle 5 Themenblock Fruchtung mit begründeten Kriterien

Themenblock	Kriterium	Begründung
Fruchtung	Klimastabilität	Klimastabilität knüpft an die im Theorieteil (siehe Kapitel 2.2) erläuterte Relevanz der Umweltbedingungen an. Weil Abweichungen hier direkt Ertrag und Qualität beeinflussen, wurde Klimastabilität als zentrales Kriterium gewählt (Cotter, 2014; Stamets, 2011). Erreicht wird dies über das technische Setup des Betriebs. Wie komplex die dafür gewählten Lösungen sind, wird im nächsten Kriterium behandelt.
	technischer Anspruch	Technischer Anspruch meint hier vor allem das erforderliche Fach- und Erfahrungswissen, um eine Lösung zu integrieren, sicher in Betrieb zu nehmen und bei Störungen reagieren zu können. Abgeleitet aus Breiing & Knosala (1997, S. 18), umfasst das Kriterium wichtige technische Anforderungen: sichere und zuverlässige Funktion, einfache und sichere Nutzung im Betrieb.
	Aufwand und Energiebedarf	Das Kriterium Aufwand und Energiebedarf bündelt die drei Einzelkriterien Kosten und Aufwand, Energieeffizienz und Wartungsaufwand zu einer passenden Bewertungsgröße (vgl. Breiing & Knosala (1997), Bedeutungsprofile). Aufwand umfasst einmalige Investitionen sowie Bedien- und Wartungsaufwände. Energiebedarf ordnet den Verbrauch der relevanten Komponenten ein. So lassen sich Lösungen vergleichbar machen und betriebliche Prioritäten klar darstellen.

	Fehleranfälligkeit	Fehleranfälligkeit ist an die Terminologie der Instandhaltung angelehnt, genauer an die Ausfallrate (DIN EN 13306, 2018). Da keine Messdaten erhoben wurden, wird das Kriterium über selbst berichtete Störungshäufigkeit, ungeplante Stillstände und Interventionsbedarf erfasst und eingeordnet.
--	---------------------------	--

3.3.1 Bewertungsschlüssel ausgewählter Kriterien

Hier wird der Bewertungsschlüssel dargestellt, mit dem ausgewählte Kriterien in den Interviews vergleichbar gemacht werden. Die Einstufungen sind bewusst verbal gehalten und spiegeln den von den Befragten empfundenen Stellenwert wider (Bortz & Döring, 2016, S. 176f). Eingesetzt wurden sie nur dort, wo die Aussagen eine klare Gewichtung erkennen ließen. Zusätzlich wurden zwei aus den Interviews induktiv entstandene Folgekriterien der Kriterien Reinigungsaufwand und Energieeffizienz/Isolationsqualität mit aufgenommen: Umbauaufwand und Kosten-Nutzen-Einschätzung.

Tabelle 6 Bewertungsschlüssel

Skala	Ausprägung/Einstufung	Einsatz in dieser Arbeit
Prioritätsskala	zentrale Priorität, hoch, mittel	Anpassungsfähigkeit (Kapitel 4.2.1)
Intensitätsskala	gering, mittel, hoch	Umbauaufwand (Kapitel 4.2.1), Aufwand (Kapitel 4.2.2), techn. Anspruch (Kapitel 4.2.3)
Kosten-Nutzen-Profil	sehr günstig, günstig, ausreichend	Kosten-Nutzen-Einschätzung (Kapitel 4.2.1)

4 Ergebnisse und Diskussion

In diesem Kapitel werden die Erkenntnisse der Experteninterviews dargestellt und eingeordnet. Zunächst erfolgt ein Überblick über wichtige Eckdaten der besuchten Betriebe (Kapitel 4.1) und eine kurze Zusammenfassung der Kompetenzen und Wissensbeschaffung (Kapitel 4.1.1) der Befragten. Des Weiteren werden die Ergebnisse der Interviews anhand den Themenblöcken und den dazugehörigen Kriterien abgebildet (Kapitel 4.2). Abschließend werden die Ergebnisse im gleichen Kapitel direkt diskutiert (Kapitel 4.2).

4.1 Betriebsprofile

Hier werden wichtige Eckdaten der interviewten Betriebe tabellarisch zusammengefasst (Vermarktungswege, Ertrag pro Woche, Personalumfang und Arbeitszeiten, Umfang der Tätigkeit).

Dadurch lassen sich die im folgenden Darstellungsteil der Ergebnisse beschriebenen Lösungen, Bewertungen und Prioritäten besser einordnen. Die Profile dienen als Grundlage für die Interpretation der Erkenntnisse und bereiten die anschließende Diskussion vor.

Tabelle 7 Betriebsprofile

	Magdeburger Pilzmanufaktur (DV)	Pilzmanufaktur Steinbiß (NSt)	Paradiespilze (EB)	Ana's Pilzfarm (AOB)	Gourmet Pilze Stephan (FS)
Vermarktungswege	Gastronomie, Hofverkauf, Wochenmarkt	Gastronomie, Hofverkauf, Wochenmarkt	Gastronomie, Hofverkauf, Wochenmarkt	Messen, Hofverkauf, Märkte, Onlineshop	gehobene Gastronomie
Ertrag pro Woche	zwischen 1 und 1,5t (je nach Jahreszeit)	ca. 15kg	ca. 20kg	ca. 35-45kg	ca. 10-15kg
Personalumfang und Arbeitszeiten	1x Vollzeit 80h (DV) 1x Vollzeit 60h 1x Vollzeit 40h 3x Teilzeit 20h	2x Teilzeit 25h	1x Teilzeit 20h (EB)	1x Vollzeit 45h (AOB)	1x Teilzeit 10-15h (FS)
Umfang der Tätigkeit	Haupterwerb	Nebenerwerb	Nebenerwerb	Nebenerwerb	Nebenerwerb

4.1.1 Kompetenzen und Wissensbeschaffung

Zu den in Voraussetzungen (siehe 2. Forschungsfrage „Voraussetzungen“) gehört neben betrieblichen Rahmenbedingungen auch das mitgebrachte bzw. selbst erarbeitete Wissen der Befragten über Pilzzucht. Im Einstiegsgespräch der Interviews wurden die im Folgenden beschriebenen Informationen gesammelt und nun dargestellt.

Da eine staatlich anerkannte Ausbildung zur Pilzzucht nicht existiert und vergleichbare Angebote fehlen, wurde das benötigte Wissen maßgeblich außerinstitutionell aufgebaut. Das bestätigen die Befragten: Vor allem digitale Quellen wie Internetforen, Websites, Facebook oder Youtube werden zur Wissensbeschaffung genutzt. Aber auch einschlägige Literatur (u.a. Paul Stamets) und Workshops durch Pilzvereine werden genutzt. Die Befragten beschreiben einen stark selbstgesteuerten Lernweg. Von einer Idee und gezielten Recherche über praktische Erfahrungen der Community bis hin zur eigenen Umsetzung. Nils Steinbiß fasst es gut zusammen: „[...] wie passt das zu meiner Farm? Also kann ich das überhaupt so realisieren? Und habe ich dafür die Gegebenheiten? [...].“ (NSt, Pos. 92) An anderer Stelle wird betont, dass die meisten Verfahren bewährte, teils jahrzehntealte Methoden in angepasster Form sind und man müsse „[...] das Rad nicht neu erfinden.“ (NSt, Pos. 64) Zugleich wird deutlich, dass ein gewisses Maß an Erfahrungswissen unverzichtbar ist. Ohne hobbymäßige

Vorerfahrung und erste Kleinstversuche wäre die Gründung eines Betriebes riskant. Insgesamt prägt diese Form der Wissensbeschaffung die Wahl und Einführung der jeweiligen betrieblichen Lösungen, mit ihren individuellen Stärken und Schwächen.

4.2 Ergebnisse und Diskussion - Darstellung nach Kriterien

Im Folgenden werden die Erkenntnisse aus den Interviews systematisch anhand der Kriterien dargestellt und im betriebsübergreifenden Vergleich diskutiert. Am Ende jedes Kriteriums fassen die Tabellen 8-13 die zuvor in Textform ausgearbeiteten Kriterienbewertungen kompakt zusammen (gemäß Bewertungsschlüssel in Tab. 6) und machen den Betriebsvergleich auf einen Blick nachvollziehbar.

4.2.1 Räumlichkeiten

In diesem Themenblock steht die konkrete Ausgestaltung der Betriebsumgebung im Mittelpunkt. Es wird untersucht, wie die Betriebe mit der vorhandenen Infrastruktur an ihrer Lokalität umgegangen sind und welche Umbau- bzw. Anpassungsmaßnahmen erforderlich waren, um eine Pilzzucht zu realisieren. Die folgenden Abschnitte sind entlang der im Vorfeld definierten Kriterien (siehe Kapitel 3.3) für diesen Themenblock strukturiert: Anpassungsfähigkeit (mit Querschnittaspekt Flexibilität), Reinigungsaufwand sowie Energieeffizienz/Isolationsqualität.

Beschreibung der Räumlichkeiten

Die räumlichen Ausgangssituationen der untersuchten Betriebe reichen von umgenutzten Bestandsgebäuden über modulare Wechselbrückenlösungen bis hin zu räumlich integrierten Zuchtsetups in einer Gewerbeimmobilie. Im Folgenden werden die jeweiligen Standorte und ihre funktionale Gliederung beschrieben und durch Abbildungen visualisiert.

DV betreibt seinen Betrieb in einem ehemaligen Aldi-Supermarkt im Erdgeschoss (siehe Abb. 3-5).

Die große, geflieste Fläche wurde vor rund 25 Jahren gemeinsam mit einem Freund erworben und seitdem schrittweise in einzelne Räume unterteilt, die heute verschiedene Funktionsbereiche aufnehmen.

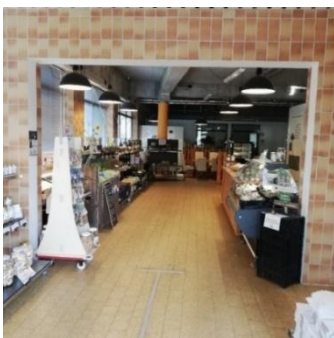


Abbildung 5 Hofladen (DV)

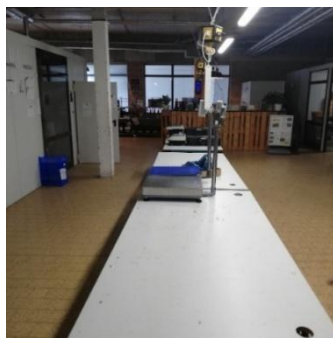


Abbildung 3 Pack- und Arbeitstisch (DV)



Abbildung 4 Produktionsbereiche (DV)

NSt nutzt zwei Wechselbrücken (34m², auf Stelzen stehend) (siehe Abb. 6) auf einer gemieteten Außenfläche. Diese wurden von seiner Frau und ihm zu einem kompakten Pilzbetrieb ausgebaut. Entstanden sind ein Arbeitsraum mit Waschmöglichkeit, ein Inkubationsraum mit Laborecke (siehe Abb. 7), sowie ein separater Fruchtungsraum.



Abbildung 6 Eingang Wechselbrücken (NSt)



Abbildung 7 Inkubationsraum (NSt)

EB ist in zwei Räumen eines ehemaligen Universitätsbaustofflagers eingemietet. Dort wurden ein Fruchtungsraum (ca. 10m²) (siehe Abb. 8), mit kleinem Vorraum, und ein Labor (ca. 20m²) beziehungsweise Inkubationsraum (siehe Abb. 9) eingerichtet. Eine Gemeinschaftsküche und eine Werkstatt befinden sich ebenfalls im Gebäudekomplex, gehören jedoch nicht zum Pilzbetrieb.



Abbildung 8 Inkubationsraum (EB)



Abbildung 9 Blick auf Fruchtungsraum (EB)

Die Pilzfarm von AOB liegt im Untergeschoss einer Gewerbeimmobilie (ca. 250m²) und umfasst mehrere Räume, inklusive einer Garage, welche als Lager genutzt wird. Neben Büro beziehungsweise Aufenthaltsraum gibt es Bad/Toilette, ein eingerichtetes Labor, ein Arbeitsraum, ein Raum für die Kühlung der Pilze sowie einen sehr großen Raum, in dem zwei große Gewächshauszelte stehen. In einem Zelt werden Substrate durchwachsen gelassen, im anderen erfolgt die Fruchtung.



Abbildung 10 Fruchtungszelt (AOB)



Abbildung 11 Zelt mit Ultraschallverneblerbox (AOB)

FS betreibt seinen Pilzbetrieb im eigenen Wohnhaus. Die Funktionsbereiche befinden sich im Keller und umfassen einen Kühlraum (15m²), den Heizungsraum als Labor- und Inkubationsbereich (20m²) (siehe Abb. 12) sowie einen Fruchtraum (6m²) (siehe Abb.13).



Abbildung 12 Inkubationsraum (FS)



Abbildung 13 Fruchtraum (FS)

Anpassungsfähigkeit

Im umgenutzten Supermarkt von DV wurde die großflächige, rechteckige Erdgeschossfläche mit Kühlhauspaneelen ausgebaut und die Klimatechnik nach und nach integriert. Die offene Grundfläche ermöglicht einen freien, prozessorientierten Zuschnitt. Ein Vorteil besteht darin, dass DV die Räume und Technik von Beginn an selbst mit aufgebaut hat, und spätere Änderungen dadurch vergleichsweise einfach umzusetzen sind. Im Vergleich der Betriebe zeigt sich hier eine besonders hohe räumliche Anpassungsfähigkeit, da sich die geschaffenen Funktionsbereiche optimal nach Pilzzuchtbedingungen auslegen lassen (Oei, 2003; Stamets, 2011). DV beschreibt die Vorzüge seiner Räumlichkeiten wie folgt: „Das bietet natürlich schon Vorteile, anders als wenn du irgendwie ein verwinkeltes Gebäude hast, ein älteres, wo du dann immer irgendwelche Ecken und sonst was noch, drin hast und berücksichtigen musst.“ (DV, Pos. 22)

NSt Pilzzucht in Wechselbrücken zeigt eine andere Art räumlicher Anpassungsfähigkeit. Durch die Metallbeschaffenheit lassen sich die Wechselbrücken im Vergleich zu massiven Gebäudestrukturen einfach verändern. Dies macht NSt durch folgendes Zitat deutlich: „[...] wir haben unter anderem die Belüftung des Fruchtungsraums nochmal komplett neu gemacht, weil der erste Ansatz so nicht funktioniert hat. Wir werden hier auch noch weitere Umbauten vornehmen. Eine Sache ist zum Beispiel, wir werden morgen hier eine Tür noch davor bauen [...]“ (NSt, Pos. 15) Durch den modularen Aufbau bleiben Anordnung und Technik auch im laufenden Betrieb veränderbar, und bei wachsender Nachfrage lassen sich weitere Container hinzufügen oder den Pilzbetrieb an einen anderen Ort versetzen. Diese örtliche Flexibilität lässt sich hier als Querschnittaspekt von Anpassungsfähigkeit verstehen und wird von NSt mit diesem Zitat deutlich: „Wir sind halt nicht von einer Lokalität abhängig oder von einem Vermieter oder so irgendwas. Selbst wenn jetzt das hier enden würde, dann nehmen wir die halt und fahren woanders hin.“ (NSt, Pos. 25) Die Wechselbrückenlösung, verglichen mit in der Literatur beschriebenen Frachtcontainern, steht also exemplarisch für mobile, skalierbare Infrastruktur zu geringen Fixkosten (Cotter, 2014; Stamets, 2011).

Bei EB zeigt sich Anpassungsfähigkeit als aufrüstbare Nutzung der bestehenden Räumlichkeiten des Baustofflagers, wobei abseits von Isolation und Klimatechnik nur wenige Eingriffe nötig waren, sagt er. Der zentrale Vorteil liegt laut EB nicht in den Räumen selbst, sondern in der Zusammenlegung der Funktionsbereiche am selben Ort: Labor, Inkubation und Fruchtung sind räumlich nah beieinander, dadurch entfallen Wege und betriebliche Abläufe lassen sich einfacher gestalten (Oei, 2003; Stamets, 2011). Gegenüber seiner früheren, weit verteilten Lösung in einem ausgegrabenen Gewölbekeller, spart die aktuelle Lösung spürbar Zeit ein. Im Vergleich zu NSt (örtliche Flexibilität) lässt sich hier zeitliche Flexibilität als Querschnittaspekt von Anpassungsfähigkeit verstehen (UNEP, 2012).

AOB hat sich Anpassungsfähigkeit durch ein Raum-im-Raum System geschaffen. Mit Trockenbauwänden wurden zusätzlich Arbeits- und Hygienebereiche nach Bedarf abgegrenzt, die Gewächshauszelte bilden variable Klimazonen für Inkubation und Fruchtung. Diese Elemente lassen sich versetzen oder mit Technik nachrüsten, sodass ein fortlaufender Wandel möglich bleibt und geplante Änderungen ohne große Unterbrechungen umsetzbar sind. In der Logik ähnelt dies der schrittweisen Innenstrukturierung bei DV, unterscheidet sich aber durch deutlich geringere Investitionskosten (McCoy, 2016; Stamets, 2011). Aufgrund der demontierbaren Wände und mobilen Zelte ist die Lösung gut auf neue räumliche Umgebungen übertragbar und insgesamt als sehr anpassungsfähig einzuordnen.

In FS Kellerspilzzucht lag der Bedarf an Anpassungsfähigkeit vor allem im Fruchtungsraum. Die übrigen Funktionsbereiche passten aufgrund der günstigen klimatischen Kellerbedingungen bereits gut zu den Anforderungen. Beispielsweise liefert der Heizungskeller durch Abwärme passende Temperaturen für die Inkubation (Goldscheider, 2018; Stamets, 2011). Den kühleren, mit Außenluft erschlossenen Kellerabschnitt hat er für die Fruchtung gezielt umgebaut und technisch vorbereitet. FS erwähnt, dass die komplette Einrichtung in Eigenbau und mit viel planerischem Geschick entstanden ist und spätere Änderungen vergleichsweise einfach zu realisieren waren. Zugleich ist die zukünftige Anpassungsfähigkeit bezüglich Skalierung durch das geringe Platzangebot begrenzt, jedoch ist der bewusst klein gehaltene Nebenerwerbsbetrieb optimal an FS Erwartungen und Ziele angepasst. Dies unterstreicht FS mit folgendem Zitat: „Ich mache ja auch nur, für mich ist das mehr ein Hobby, wie tatsächlich gewerblich. [...] So sage ich das jetzt mal.“ (FS, Pos. 17)

Folgende Übersichtstabelle verdichtet die Interviewaussagen zur Anpassungsfähigkeit der Räumlichkeiten. Die Einstufung folgt der Prioritätsskala des Bewertungsschlüssels (siehe Tabelle 6).

Tabelle 8 Übersicht des Kriteriums Anpassungsfähigkeit

Komponente/Hülle	Ausprägung Anpassungsfähigkeit	Einstufung Anpassungsfähigkeit mittel - hoch - zentrale Priorität	Begründung der Befragten
großflächige Halle eines ehem. Supermarktes (DV)	freier Grundriss, prozessorientierter Zuschnitt	zentrale Priorität	freie Fläche erleichtert Zuschnitt und spätere Änderungen
Wechselbrücken (NSt)	räumliche Flexibilität durch Modularität und Versetzbarkeit	zentrale Priorität	Wechselbrücken schnell umstell- und erweiterbar
Gewächshauszelte in einer Gewerbeimmobilie (AOB)	einfache Umgestaltung durch Raum-im-Raum System	hoch	kostengünstige, fortlaufende Anpassungen
Bestandsräume eines ehem. Baustofflagers (EB)	zeitliche Flexibilität durch kurze Wege	hoch (zeitlich)	Zusammenlegung reduziert Wegezeiten

Kellerräume eines Wohnhauses (FS)	kluge Funktionszuordnung durch gegebenes Kellerraumklima	mittel	Fokus auf zweckmäßige Nutzung und gegebene Infrastruktur, wenig Skalierungsmöglichkeiten
--	--	---------------	--

Reinigungsaufwand und Energieeffizienz/Isolationsqualität

Im Vergleich der Betriebe zeigt sich eine durchgängige Kosten-Nutzen-Einschätzung über zwei Felder: Reinigungsaufwand der Oberflächen und energieeffiziente Um- bzw. Ausbaulösungen in Verbindung mit Isolation. Ergänzend zu den Ausprägungen der beiden Kriterien wurde eine Einstufung des jeweiligen Umbauaufwandes und der Kosten-Nutzen-Einschätzung am Ende dieses Abschnittes visualisiert (siehe Tabelle 9).

Bei DV lässt sich eine klare Kosten-Nutzen-Einschätzung ableiten. Der Ausbau mit glatten, feuchtebeständigen Oberflächen wie Fliesenboden und Kühlhauspaneelwänden senkt den laufenden Pflegebedarf deutlich, weil sich Flächen schnell und rückstandsfrei reinigen lassen, zügig abtrocknen und Keimen wenig Angriffsfläche bieten (vgl. Stamets, 2011). Das reduziert Reinigungszeiten, Mittelverbrauch und Kontaminationsrisiko, angelehnt an Grundsätze des hygienischen Designs (EHEDG, 2018; Stamets, 2011). Energetisch koppelt DV seine Befeuchtung an bestehende Kälte, indem die Zuleitungen der Feinnebelanlage durch den Kühlraum geführt werden und das Wasser vor Eintritt in den Fruchtbereich bereits abgekühlt ist. „Das Wasser, was hier rauskommt, der Nebel, der wird vorher runtergekühlt. Wir haben im Kühlraum nebenan Schläuche unter der Decke. [...] Und dann wird das Wasser da durchgeleitet, bevor es dann hier reinkommt [...].“ (DV, Pos. 153) Diese Vortemperierung entlastet die Raumkühlung, stabilisiert Temperatur und Feuchte und senkt den Strombedarf (Oei, 2003). DV ergänzt, dass sich der Umbau über viele Jahre zog und sich heute durch dauerhaft geringere Reinigungs- und Energiekosten auszahlt.

NSt hat seine Wechselbrücken gezielt umgebaut, um möglichst viel Energie zu sparen. Sie sind vollständig mit etwa zehn Zentimetern PUR gedämmt, wodurch Wärmeverluste sinken und weniger aktive Klimatisierung nötig ist (Stamets, 2011). Dass PUR gewöhnlich teuer ist, wurde durch den Einkauf gebrauchter Dämmplatten über Kleinanzeigen kompensiert. Innen sorgen PVC-Böden und Folien an den Wänden dafür, dass Feuchtigkeit nicht in die Struktur eindringt und Flächen schnell gereinigt werden können (McCoy, 2016). Als Reinigungsmittel nutzt er Essigwasser, das zur angestrebten Biozertifizierung passt, günstig ist und zuverlässig wirkt (Bioland-Richtlinien, 2025). In Summe entsteht ein Aufbau mit niedrigen Betriebskosten durch geringen Energie- und Reinigungsbedarf.

EB verfolgt in gemieteten Bestandsräumen das gleiche Prinzip der gezielten Aufrüstung: Isolierung dort, wo sie wirklich notwendig ist, und eine klare Hygieneroutine. Der Labor- und Inkubationsbereich ist mit dicken XPS-Platten (dt. Hartschaum-Platten) gedämmt, um Temperaturverluste zu begrenzen. Für die

Hygiene setzt er auf isopropanolbasierte Reinigungsmittel und eine häufig betriebene Sterilbank, wodurch Oberflächen und Luft gering belastet bleiben (Bioland-Richtlinien, 2025; Reindl & Friedl, 2024). Im Fruchtungsraum nutzt er einen Kalkanstrich, dessen basisches Milieu der Schimmelbildung entgegenwirkt (McCoy, 2016). Der Schwerpunkt liegt weniger auf tiefen baulichen Eingriffen, sondern auf einer klugen Kombination einfacher Maßnahmen, die Reinigungszeiten reduzieren und die betrieblichen Abläufe sicherstellen.

Das Raum-im-Raum System von AOB verschiebt den Fokus auf Flächenmanagement. Die Gewächshauszelte im großen Produktionsraum reduzieren die tatsächlich zu reinigenden Zonen auf klar begrenzte Innenflächen. Putz- und Desinfektionsarbeiten konzentrieren sich damit auf Decke, Wände und Boden der Zelte sowie auf Edelstahltische, was den Pflegeaufwand überschaubar hält. Dies macht sie mit folgendem Zitat deutlich: „[...] was schmutzig ist oder desinfiziert werden muss, betrifft ja die Innenräume praktisch, der Gewächshauszelte. Das heißt, das ist das, wo ich Decke, Wände und Boden regelmäßig reinige oder auch desinfiziere. Ansonsten habe ich Edelstahl-Arbeitstische, wo sich am ehesten noch Verschmutzung oder auch Reinigung abspielt [...].“ (AOB, Pos. 79) Im Winter regelt AOB die Temperaturen in den Gewächshauszelten über die Gebäudeheizung. Dabei wird auch der umliegende große Raum mitgeheizt, was für die Pilze nicht erforderlich ist. In heißen Sommerwochen spricht AOB von Problemen, die Temperatur niedrig zu halten, daher ist eine Klimaanlage geplant. Insgesamt sorgen geringe Anfangsinvestitionen, gezielte Nachrüstungen und niedrige laufende Reinigungsaufwände für eine ausgeglichene Kosten-Nutzen-Einschätzung.

FS nutzt die Klimavorteile des Kellers als natürliche Isolation. Für die Hygiene setzt er auf glatte, abwischbare Wände mit Harzfarbe sowie auf ein reinigbares Befeuchter-Rohrsystem, das sich schnell demontieren und mit einfachen Mitteln säubern lässt. Ein austauschbarer Vorfilter hält zudem die Abluftventilatoren sauber. Die Investition in einen industriellen Feinvernebler fiel anfangs höher aus, senkt aber langfristig den Pflegebedarf und stabilisiert die Luftfeuchtigkeit im Raum. Das Ergebnis ist ein kompakter Betrieb mit moderatem Energieeinsatz und kalkulierbarem Reinigungsaufwand.

Folgende Übersichtstabelle fasst die Ausprägungen der Kriterien Reinigungsaufwand und Energieeffizienz/Isolationsqualität zusammen, ergänzt Umbauaufwand sowie Kosten-Nutzen-Einschätzung gemäß dem in Tabelle 6 beschriebenen Schema.

Tabelle 9 Übersicht der Kriterien Reinigungsaufwand und Energieeffizienz/Isolationsqualität

Komponenten	Ausprägung Reinigungsaufwand	Ausprägung Energieeffizienz/Isola tionsqualität	Umbau- aufwand gering - mittel - hoch	Kosten- Nutzen- Einschätzung sehr günstig - günstig - ausreichend	Begründung der Befragten
Fliesenboden, Kühlhauspaneelwände, Nebelwasserleitungen im Kühlraum (DV)	glatte, feuchtebeständige Oberflächen	Vorkühlung entlastet die Raumkühlung	mittel bis hoch (über Jahre)	sehr günstig	Schnelle Reinigung, geringe Keimlast, geringerer Strombedarf und stabiles Klima
PVC-Böden und folierte Wände, PUR-Dämmung (NST)	glatte, feuchtebeständige Oberflächen	reduzierter Wärmeverlust	mittel	günstig	Schnelle Reinigung bei moderaten Kosten (Essigwasser), niedriger Energiebedarf
Sterilbankluft und Wände mit Kalkanstrich, XPS- Dämmung (EB)	saubere Luft und Oberflächen, keimabweisende Wirkung von Kalk	reduzierter Wärmeverlust	gering bis mittel	günstig	wenig Reinigungsaufwand durch stabile Bedingungen, niedriger Energiebedarf
Gewächshaus- zelte, Edelstahlische, Gebäudeheizung (AOB)	Flächenreduktion bezüglich Reinigung, glatte Oberflächen	effektive Klimaführung durch Heizung (Ausnahme: Hitzeextreme!)	gering	günstig - ausreichend	überschaubarer Reinigungsaufwand, niedrige Einstiegskosten, Nachrüstung Klimaanlage vorgesehen
Harzbeschichtung an Wänden, demontierbares Befeuchter-Rohrsystem, Nutzung natürlicher Klimabedingungen verschiedener Kellerräume (FS)	Glatte, feuchtebeständige Oberflächen, ganzheitliche Reinigungsmöglichkeiten	reduzierte aktive Klimaführung	mittel	günstig	planbare, vollständige Reinigung durch demontierbare Komponenten, niedriger Energiebedarf durch passive Quellen (Heizungsraum)

4.2.2 Substrat

In diesem Themenblock stehen Substrate und deren Herstellung als produktionsbestimmender Schritt im Vordergrund. Es wird untersucht, unter welchen Bedingungen die Lösungen entstehen und eingeführt werden und wie die Betriebe deren Nutzen bewerten. Die Abschnitte sind entlang der Kriterien Anpassungsfähigkeit, Erprobbarkeit, Aufwand, Effizienz und Ressourcen strukturiert.

Anpassungsfähigkeit und Erprobbarkeit

DV nennt zwei wesentliche Vorteile, wenn es um die Herstellung von Substraten geht. Einerseits kann er die Menge der Produktion besser an der Nachfrage ausrichten, statt große Chargen fertiger Blöcke vorab verkaufen zu müssen. Andererseits können weniger verfügbare Arten ins Sortiment aufgenommen werden, die als besonders exklusiv gelten. Zudem erfolgt die Substratentwicklung im kleinen Maßstab, bevor Mischungen übernommen werden: „[...] wir werden eigene Substrate testen und entwickeln, mit Sorten, die wir so auf dem Markt nicht kriegen [...]“ (DV, Pos. 38) Was dafür wichtig ist und wie man arbeiten muss, macht DV mit folgendem Zitat deutlich: „[...] ,wenn das mit dem selbst hergestellten Substrat erstmal gut klappt, wenn man die Erfahrung hat und einigermaßen fehlerfrei arbeiten kann, dann ist es auf jeden Fall [...] von Vorteil.“ (DV, Pos. 52) Das Gespräch zeigt, dass

Eigenfertigung viel Erfahrung und erhebliche Arbeitszeit erfordert, was als Nachteil mitgedacht werden sollte.

NSt verfolgt einen auf die Betriebsgröße ausgerichteten Entwicklungsweg: Substratzusammensetzungen und Behandlungsmethode (insbesondere Pasteurisierung) werden Schritt für Schritt getestet, bis sie zur vergleichsweise kleinen Arbeitsfläche und angestrebten Budgetstruktur passen. Auch in der Literatur wird diese Vorgehensweise empfohlen, nachdem sich kostenintensive Substratbehandlungsmethoden für große, einheitliche Substratmengen lohnen (McCoy, 2016; Oei, 2003). Angepasst auf Maßstab und Rahmenbedingungen untermauert folgendes Zitat die betriebliche Vision von NSt: „[...] also, wenn wir dann quasi rausgefunden haben, welches Substrat für welchen Pilz richtig gut funktioniert, kriegen wir gute, große Pilze oder wie auch immer [...] das ist ja im Endeffekt, der Grundsatz [...] und wie effektiv es ist, [...] ist der entscheidende Punkt. Und man muss das Substratthema auch immer im Kontext der Farm sehen. Also wir haben hier eine ganz kleine Farm, ich glaub, vier Quadratmeter Arbeitsfläche da vorne in dem Raum.“ (NSt, Pos. 60-61)

AOB unterscheidet in ihrer Substratbehandlungsmethode zwischen nährstoffreicheren Holz-/Kleie-Mischungen, die steril gemacht werden, und Strohsubstraten für Seitlinge, die unsteril bleiben (pasteurisiert oder kalkbehandelt). Die Zuordnung beruht auf praktischen Tests, wie sie selbst beschreibt: „Und, ich habe so ein paar Versuche gemacht und geschaut, ob das einen Vorteil bringt, wenn ich das Substrat für die Seitlinge auch autoklaviere und bin dann dageblieben, das unsteril zu machen. Das [...] funktioniert wunderbar.“ (AOB, Pos. 127) Das Ergebnis ist eine Kombination aus Stabilität und Ressourcenschonung, die sich im Betrieb gut anpassen lässt.

Tabelle 10 verdichtet die zuvor in Textform beschriebenen Ausprägungen der Kriterien Anpassungsfähigkeit und Erprobbarkeit im Kontext der Substrate und macht den Vergleich der Betriebe übersichtlich nachvollziehbar.

Tabelle 10 Übersicht der Kriterien Anpassungsfähigkeit und Erprobbarkeit

Komponente	Ausprägung Anpassungsfähigkeit	Ausprägung Erprobbarkeit	Begründung der Befragten
Eigenfertigung der Substrate (DV)	flexible Mengensteuerung, erweitertes Sortiment	Testen der Substratmischungen im kleinen Maßstab möglich	Mengen lassen sich eng an die Nachfrage koppeln, Exklusive Pilzarten können angeboten werden, benötigt aber viel Erfahrung und ist arbeitsintensiv
Eigenfertigung der Substrate (NSt)	stetige Optimierung der Prozesse und Rezepturen im Kontext der Betriebsgröße und Budget		Gute Erträge bei überschaubarem Aufwand/Investition, benötigt hohes Maß an Experimentierfreudigkeit und ist zeitintensiv
Eigenfertigung der Substrate, Methodendifferenzierung (AOB)	Verfahren nach Rezeptur und Pilzart wählbar	Testen der Rezepturen in Abhängigkeit der Verträglichkeit der Pilzart	Zuordnung der Verfahren zu den Substratmischungen/Pilzarten senkt Energie- und Geräteeinsatz dort, wo es sicher möglich ist

Aufwand, Effizienz und Ressourcen

DV legt großen Wert auf steriles Arbeiten und investierte kürzlich in eine neue Sterilbank. Die daraus resultierende Effizienz macht er an folgender Aussage deutlich: „[...]am Ende ist das auch eine Kostenfrage. Die Sterilbank war wahrscheinlich ein bisschen teurer, aber langfristig rentiert die sich wahrscheinlich, weil sie einfach eine gute hygienische Arbeit macht.“ (DV, Pos. 49) Die Anschaffung stellt eine hohe Anfangsinvestition dar, senkt aber langfristig den Aufwand, weil unter sterilen Bedingungen beimpft werden kann und Verluste durch Kontaminationen seltener werden (Cotter, 2014; McCoy, 2016; Stamets, 2011). Darüber hinaus erwähnt DV im Interview, dass die Kosten für die Grundstoffe bei Eigenproduktion im Vergleich zu fertig bezogenen Substratblöcken sinken. Diese Aussage ist allerdings nur dann stimmig, wenn passende Grund- bzw. Rohstoffe überhaupt regional oder gut verfügbar sind. Letztendlich soll laut DV die Kombination aus Steriltechnik und Eigenfertigung die laufenden Stückkosten für Substratmischungen drücken.

Wie im vorigen Kapitel angesprochen, richtet NSt seine Methode und Technik konsequent am Maßstab eines kleinen Betriebes aus. Die Entscheidung, Pasteurisierung als Standard einzuführen, ist nicht nur technisch begründet, sondern auch finanziell. Eigenbau- oder *Re-Use*-Lösungen sollen dafür sorgen, dass Investitionskosten überschaubar bleiben. Die Pasteurisierung ersetzt die energieintensivere Sterilisation, was den Energiebedarf pro Charge klein hält und damit laufende Kosten reduziert (Grimm et al., 2024; McCoy, 2016; Stamets, 2011). Effizienz entsteht zusätzlich über Eigenbau: Der vorhandene Pasteurisateur basiert auf einfachen, gut isolierten Komponenten und ein größerer Pasteurisateur aus einem gebrauchten Brauereitank⁶ ist in Arbeit (siehe Abb. 15), um Kapazität und Wärmerückhalt zu erhöhen. Zugleich sind Herstellung, Lebensdauer und ggfs. Entsorgung der verwendeten Materialien mitzudenken. Die Herangehensweise, Dinge selbst zu bauen, ist stark am Maßstab kleiner Betriebe und an regionaler Beschaffung von Mitteln ausgerichtet, mit der Folge, dass Zeitaufwand ggfs. höher, die



Abbildung 14 Pasteurisatorbox (NSt)



Abbildung 15 Brauereipasteurisateur (NSt)

Betriebskosten jedoch geringer ausfallen (Cotter, 2014, S. 65f). Insgesamt ist der Betrieb regional ausgerichtet, weshalb auch Zukaufsubstrate mit langen Transportwegen konzeptionell ausscheiden.

⁶ Zum Zeitpunkt des Interviews (28.07.25) war der neue Brauereitank-Pasteurisateur noch in Arbeit. Abbildung 15 zeigt diesen in fertigem Zustand zum 16.09.2025.

Diese Herangehensweise kann als besonders arbeits- und zeitintensiv angesehen werden, sich aber bezüglich Vermarktung durchaus lohnen (Crosby, 2021). NSt hat klare Argumente für sein Handeln: „Unser Konzept ist sehr regional angelegt, wir wollen, dass die Sachen von hier kommen, für den Leipziger- und Umlandmarkt. Und deswegen passt es rein vom Konzept her schon nicht zu uns, Sachen zu bestellen, die viele Kilometer hinter sich haben. Und von daher, es ist schon teuer, was wir machen. Wenn wir unsere eigene Arbeitszeit da reinrechnen, ist die Substratherstellung schon teuer, aber sie ist halt einfach von hier.“ (NSt, Pos. 101)

EB setzt ebenfalls auf kosteneffiziente Technik mit kurzer Amortisationszeit. Zwei einfach aufgebaute, isolierte Pasteurisatoren aus gut erhältlichen Komponenten sind schnell herzustellen und günstig in der Anschaffung. Nach Aussage von EB ist die Herstellung mit geringem Zeitaufwand realisierbar: „Ja, aus einer Tonne, Heizstab und ein Controller. Und ganz gut isoliert. Ja, das ist ein Vorteil, dass das günstig ist und super simpel zu bauen. [...] ein Vormittag und dann ist es fertig. (EB, Pos. 112) Zum Beimpfen der Substrate legt er großen Wert auf Sterilität und investierte in eine professionelle Sterilbank, wodurch er Effizienz durch reduzierte Kontaminationsverluste erzielt.



Abbildung 16 Pasteurisatoren (EB)

AOBs substratabhängige Methodendifferenzierung weist ebenfalls Ausprägungen von Anpassungsfähigkeit und Erprobbarkeit auf. An dieser Stelle ist dieselbe Komponente vor allem aus Effizienz- und Kostensicht relevant. Die Verfahren werden nach Wirtschaftlichkeit und Prozesssicherheit im Kontext der Betriebsgröße ausgewählt (Oei, 2003). Dadurch sinken Energiekosten dort, wo es prozesssicher möglich ist, während aufwendigere Verfahren bei kontaminationsanfälligeren Mischungen eingesetzt werden (Grimm et al., 2024; Stamets, 2011). Dem erhöhten Kontaminationsrisiko einer Pasteurisierung entgegenet AOB wiederum mit folgender Maßnahme: „[...] man kann auch das wiederum nochmal ein bisschen in die richtige Richtung steuern, wenn man einfach den Brutanteil erhöht.“ (AOB, Pos. 135)

FS teilt die Einschätzung von AOB, dass die Wahl der Substratbehandlungsmethode von der Pilzart abhängt. Für seinen Kellerbetrieb setzt er aus Gründen der Effizienz jedoch ausschließlich auf Sterilisation und verzichtet bewusst auf einen Methodenmix. So bleiben die Abläufe einheitlich, das Kontaminationsrisiko gering und die Erträge bei seinen Kulturen verlässlich. Technisch nutzt er mehrere Schnellkochtöpfe auf Induktionsplatten, welche in Anschaffung und Handhabung einfach und für

seinen Maßstab ausreichend sind. Der höhere Energieeinsatz pro Charge gegenüber pasteurisierenden Verfahren ist für ihn vertretbar, weil die stabile Prozessführung und klare Routinen den Betrieb insgesamt effizient halten. Einen Teil seiner Substratroutine verdeutlicht er mit diesem Zitat: „[...] ich falte die Tüten, tue die in den Schnellkochtopf, stelle den an. Und dann drei Stunden später sind die sterilisiert. Dann lasse ich sie abkühlen. Abends hole ich sie raus, beimpfe und schweiße die Tüten zu. Ich habe also fast keine Arbeit damit. (FS, Pos. 68)



Abbildung 17 Beimpfungsplatz (FS)



Abbildung 18 Schnellkochtöpfe (FS)

Tabelle 11 bündelt Aspekte der Kriterien Aufwand, Effizienz und Ressourcen bezüglich der Substratstrategie. Die Einstufung folgt der im Bewertungsschlüssel (siehe Kapitel 3.3.1) definierten Skala.

Tabelle 11 Übersicht der Kriterien Aufwand, Effizienz und Ressourcen

Komponente	Einstufung Aufwand gering - mittel - hoch	Ausprägung Effizienz	Ausprägung Ressourcen (Rohstoffe)	Begründung der Befragten
Sterilbank, Rohstoffe (DV)	Anfangsinvestition hoch (Sterilbank)	laufend geringere Verluste und weniger Nacharbeit	Eigenanfertigung der Substrate senkt Rohstoffkosten	Sterile Arbeit senkt Kontaminationen, Eigenanfertigung (hier bzgl. Rohstoffe) senkt zusätzlich Kosten (vgl. Zukauf)
Pasteurisierung als Standard, Fokus auf Eigenbauten (Nst)	Investitionskosten gering bis mittel (Eigenbau-pasteurisatoren)	geringer Energieverbrauch im kleinen Maßstab (skalierbar über größeren Brauereitank)	Regionales Ressourcenkonzept (Verkaufsargument)	Pasteurisierung reduziert Energie pro Charge und bleibt farmgerecht, Eigenbau spart Kapital, kostet aber mehr Zeit
Pasteurisierung als Standard, Fokus auf Eigenbauten (EB)	Investitionskosten gering	geringer Energieverbrauch, einfache Herstellung und Handhabung		einfacher Aufbau kombiniert mit energieeffizienter Isolation sorgt für eine günstige Amortisation
Methoden-Differenzierung (AOB)	Investitionskosten gering bis mittel	selektiver Einsatz energieintensiver Methoden nur da, wo es nötig ist		Differenzierte Methodenwahl senkt Energie- und Geräteeinsatz, Erträge bleiben stabil

Sterilisation als Standard (FS)	Investitionskosten mittel (Kochtöpfe und Induktionsplatten)	laufend höherer Energiebedarf pro Charge, aber wenig Zusatzaufwand im kleinen Maßstab		einheitliche Sterilroutine minimiert das Kontaminationsrisiko und entlastet die Prozessführung, planbare und gute Erträge
--	--	---	--	---

4.2.3 Fruchtung

In diesem Themenblock steht die Fruchtung als wichtiger Abschnitt der Produktion im Mittelpunkt. Analysiert wird, wie die Betriebe ein stabiles Klima herstellen, welche technischen Setups sie dafür einsetzen und warum sie sich jeweils dafür entschieden haben. Zudem wird betrachtet, wie häufig Eingriffe nötig sind, welche Wartungs- und Bedienaufwände entstehen und ob bestimmte Lösungen erfahrungsgemäß zu Problemen oder Ausfällen führen. Die folgenden Abschnitte sind entlang der Kriterien Klimastabilität, technischer Anspruch, Aufwand und Energiebedarf, Fehleranfälligkeit strukturiert.

Klimastabilität und technischer Anspruch

DV beschreibt, dass er viele der Klimaparameter händisch reguliert, durch einfache Drehregler. Dieser Ansatz erfordert regelmäßige Aufmerksamkeit, bietet aber mehr Kontrolle über die Technik. Lediglich die Rohrheizung ist automatisiert und springt an, sobald die Temperatur unter einen kritischen Wert sinkt. Um die Zuluft zu reinigen, wählt DV Filter mittlerer Klasse (F7 bis F10). Passende Luftfeuchtigkeiten erzielt er über einen industriellen Feinvernebler (siehe Abb. 19), dessen Wasser im Kühlraum vortemperiert wird. Laut DV zerstäubt die Feinvernebelung das Wasser in sehr kleine Partikel und bewirkt eine besonders geringe Oberflächenbenetzung der Fruchtkörper. Dadurch werden Kontaminationen reduziert (Ochowiak et al., 2022).



Abbildung 19 Wasserschläuche zur Vortemperierung (DV)



Abbildung 20 Feinvernebler (DV)

Anders als DV und FS nutzt NSt einen Ultraschallvernebler für die nötige Luftfeuchtigkeit. Dieser liegt in einer Kiste, welche halb mit Wasser gefüllt ist (Siehe Abb. 22). Einen Nachteil sieht NSt in der Tatsache, dass der Vernebler alle zwei bis drei Tage manuell mit 1–2 Litern Wasser nachgefüllt werden muss und es daher es bei Abwesenheit eine Vertretung braucht (eine Automatisierung ist in Planung). Parallel zum Vernebler läuft dann ein Lüfter, der den Nebel in den Fruchtungsraum befördert. Bezüglich der Frischluftzufuhr hebt NSt seinen Arbeitsraum hervor, welchen er als *Pre-Conditioning-Room*⁷ nutzt. Dieser Raum ist mit einer Klimaanlage und einer Infrarotheizung versehen. Diese Lösung kombiniert Frischluft- mit Temperaturregelung und ist weniger von Außentemperaturen abhängig.



Abbildung 21 Ultraschallverneblerbox (NSt)



Abbildung 22 Ultraschallverneblerköpfe (NSt)

EB hält die Klimastabilität vor allem durch eine saisonale Sortenwahl. Wie das zu verstehen ist, beschreibt er so: „Also für die Fruchtung bin ich sehr außenklimaabhängig. Denn ich will keine Klimaanlage benutzen. [...], statt im Winter Sommerpilze zu haben und im Sommer Winterpilz, züchte ich einfach die Stämme, die gerade gut wachsen. Und deswegen brauche ich keine Klimaanlage.“ (EB, Pos. 164) Gleichzeitig sinkt die Sortenflexibilität und es kann schlechter auf diverse vom Markt nachgefragte Sorten reagiert werden. Die Zuluft wird über einen Verdunstungskühler befeuchtet. CO²-Werte erfasst ein Sensor und schaltet bei Überschreitung eines Grenzwerts automatisch die Lüftung ein. Das Licht läuft im 12-Stunden-Rhythmus über einen *Smart-Switch*. Bezüglich des technischen Anspruchs seines Fruchtungssetups erklärt er, dass er einfache Technik einsetzt, da seine Farm klein ist. Seine Entscheidungen begründet er prägnant: „[...] wenn es nicht nötig ist, etwas kompliziert zu machen, würde ich es vermeiden [...]“ (EB, Pos. 184)

⁷ Der Begriff *Pre-Conditioning-Room* wird häufig im Kontext von Überdrucksystemen (siehe Kapitel 2.3.3) genannt. Der Raum dient dazu, Luftfeuchtigkeit und/oder Temperatur der Zuluft einzustellen, bevor diese in die Fruchträume transportiert wird (Stamets, 2011, S. 486f).

Wie schon im Themenbereich der Räumlichkeiten erwähnt, regelt AOB die Temperatur im Innenraum der Zelte über die Gebäudeheizung. Das funktioniert bei kalten Temperaturen gut, im Sommer muss sie sich mit dem Abdunkeln der Fenster aushelfen und hat vor, sich bald eine Klimaanlage zu installieren. Ihre Lösung für Luftfeuchtigkeit und Frischluft ähnelt der von NSt. Eine Kombination aus Ultraschallvernebler und Unterdrucksystem, beides sensorgesteuert. NSt hingegen bevorzugt ein Überdrucksystem. Das manuelle Nachfüllen der Kiste mit Wasser wird zwar als Nachteil benannt, ist im Alltag jedoch unerheblich, weil AOB täglich zum Ernten vor Ort ist und den Vorgang mit erledigt. Für die Verneblerbox des größeren Zeltes (siehe Abb. 23) hat sie sich schon eine Lösung einfallen lassen, die sie wie folgt beschreibt: „[...] ich habe mir so eine



Abbildung 23 Ultraschallverneblerbox mit Schwimmerventil (AOB)

Wassertonne hingestellt, wo dann über ein Schwimmerventil aus der Tonne Wasser nachfließt, wenn die Kiste irgendwann so wenig Wasser drin hat.“ (AOB. Pos. 264) Lichtverhältnisse regelt sie über einfache Zeitschaltuhren. Bezüglich des technischen Anspruches ihres Setups erwähnt sie eine zentral programmierbare Steuerung auf Basis eines kleinen Einplatinenrechners, der Parameter wie z.B. Temperatur und Luftfeuchte regeln sollte. Diese Klimasteuerungsvariante erwies sich im Alltag jedoch als fehleranfällig und wartungsintensiv, weshalb Sie aktuell wieder einfache Einzelregler benutzt.

FS hat durch seine Kellerräume (siehe 4.2.1 Räumlichkeiten) von Natur aus eine günstige Ausgangslage bezüglich Temperaturen und arbeitet auch ohne Klimaanlage. Um die Luftfeuchtigkeit zu regulieren, nutzt er, wie auch DV, einen industriellen Feinvernebler. Dadurch lässt sich eine optimale, hohe relative Luftfeuchtigkeit erreichen. Durch ein Fensterloch im Keller wird die Luft zuerst in den Kellervorraum gezogen und anschließend mit der befeuchteten Luft des Verneblers durchmischt. Somit entsteht eine Art Vortemperierung der Luft, die in den Fruchtungsraum geleitet wird und das Luftsystem ist nicht mehr so abhängig von passenden Außentemperaturen (Stamets, 2011). Die nötigen Ventilatoren steuert er über einfache Drehzahlregler. Zur Automatisierung der Klimaparameter im Kontext des technischen Anspruches betont auch FS die Vorteile niedriger Technisierung: „[...] ich persönlich bin der Meinung, je weniger technischen Aufwand, desto unanfälliger ist das ganze System. Ein Ventilator, und mein Abluftventilator läuft jetzt seit zwei Jahren auf einer konstanten Geschwindigkeit.“ (FS, Pos. 31)



Abbildung 24 Feinvernebler (FS)

Anknüpfend an die textliche Analyse dieses Kapitels fasst Tabelle 12 die Kriterien Klimastabilität und technischer Anspruch zusammen und visualisiert den Vergleich der Betriebe in einer übersichtlichen Darstellung.

Tabelle 12 Übersicht der Kriterien Klimastabilität und technischer Anspruch

Komponenten	Ausprägung Klimastabilität	Einstufung technischer Anspruch gering - mittel - hoch	Begründung der Befragten
Rohrheizung, Feinvernebler mit Vortemperierung, Drehzahlregler (DV)	Temperatursteuerung automatisiert, Luftfeuchte vortemperiert durch Kühlraum	gering bis mittel - Kombination aus Automatisierung und manueller Steuerung	Technikkombination erlaubt einfache und beherrschbare Klimaführung, benötigt aber regelmäßige Aufmerksamkeit
Vortemperierung durch Klimaanlage/ Infrarotheizung, Ultraschallvernebler (NSt)	unabhängig(er) ggü. Außentemperaturen, geringere Temperatursprünge durch Vortemperierung	mittel - viel Automatisierung, stellenweise manuell (Nachfüllen des Befeuchtungswassers)	Technikkombination erlaubt einfache und praktikable Klimaführung, benötigt gelegentliche Aufmerksamkeit (Vollautomatisierung geplant)
keine aktive Temperaturregelung, Verdunstungskühler, Fokus auf Automatisierung (EB)	Abhängigkeit saisonaler Außentemperaturen, übrige Parameter automatisiert, sensorgesteuert und per Fernzugriff regulierbar	mittel - Kombination aus automatisierten Schaltlösungen und <i>Smart-Switch</i>	Konzept: saisonale Sortenwahl statt Klimaanlage, Klimaführung benötigt wenig Aufmerksamkeit durch praktische Automatisierung
Gebäudeheizung, Ultraschallvernebler, sensorgesteuerte Einzelregler (AOB)	verlässliche Temperatursteuerung über Gebäudeheizung	gering bis mittel - automatisierte und sensorgesteuerte Einzeltechnik (statt Zentralsteuerung über Einplatinenrechner)	Technikkombination erlaubt einfache und praktikable Klimaführung mit Ausnahme bei Hitzeextremen
Kellerräume, Feinvernebler, Lüfter mit Drehzahlreglern (FS)	Konstante Temperaturen, gleichmäßige hohe Luftfeuchtigkeit mit Vortemperierung	gering bis mittel - Kombination aus Automatisierung und manueller Steuerung	Technikkombination und passive Standortvorteile schaffen optimale Klimaführung, vergleichsweise wenig Aufmerksamkeit nötig

Aufwand und Energiebedarf

DV hält seine Investitionskosten in Technik vor allem durch Eigenbau und Eigenmontage niedrig. Die Anschaffungen fallen dadurch günstiger aus und der laufende Wartungsaufwand durch externe Techniker ist geringer. „[...] der größte Vorteil sind die Kosten. Wir haben wesentlich weniger Kosten durch das Selbstgebaute und ein weiterer Vorteil ist, man kann relativ schnell etwas ersetzen oder nachjustieren.“ (DV, Pos. 66). Wie im vorigen Kapitel erwähnt, setzt DV bewusst auf Filter mittlerer Klasse. Diese sind preiswerter, verursachen geringere Druckverluste und reduzieren damit den Energiebedarf der Ventilatoren, sind aber nicht so wirkungsvoll wie ein HEPA-System (Oei, 2003; Stamets, 2011).

NSt steuert den Energiebedarf vor allem über einfache Technik und pragmatische Temperaturziele. In warmen Perioden wird die Solltemperatur nicht zu niedrig gewählt, damit die Klimaanlage nicht zu viel Strom braucht. Auch die Luftbefeuchtung ist bewusst energieeffizient ausgelegt. Ein kleiner Lüfter unter 100 Watt und ein Ultraschallvernebler im zweistelligen Wattbereich, welcher „[...] höchstens alle

Stunde mal anspringt.“ (NSt, Pos. 168) Nach NSt Einschätzung ist das elektrische Heizen der Infrarotheizung grundsätzlich kostenrelevant, in den gut gedämmten Wechselbrücken arbeitet diese Lösung jedoch effizient und hält den Aufwand überschaubar.

Im vorigen Abschnitt erklärt EB, dass er seine Technik unkompliziert hält, da seine Farm eher klein. Die Vorteile in Bezug auf Kosten ergänzt er im gleichen Satz: „[...] weil kompliziert bringt immer entweder höhere Kosten, oder du verlierst ein bisschen Flexibilität [...].“ (EB, Pos. 184) Auch der bewusste Verzicht auf eine Klimaanlage ist nicht nur von konzeptioneller Bedeutung, sondern wird von EB auch darin begründet, dass er Energie sparen will.

Auch AOB betont die niedrigen Kosten der Low-Tech-Systeme. Stellvertretend für alle Interviewpartner*innen beschreibt sie ihr Setup wie folgt: „[...] das ist kostennutzenmäßig die naheliegendste oder effizienteste Lösung [...].“ (AOB, Pos. 272) Ihrer Meinung nach wäre der nächstgrößere Schritt eine Einplatinenrechner-Lösung (z.B. *Raspberry Pi*), um die Klimaparameter effizienter zu steuern. Dies sei aber noch sehr teuer und „[...] nice to have, aber [...] nicht überlebenswichtig.“ (AOB, Pos. 237)

Bezüglich des Aufwandes und Energiebedarf nennt FS sein Feinvernebelungssystem (siehe Abb. 24), welches sich durch höhere Investitions- und Energiekosten kennzeichnet. Dies kann als Nachteil angesehen werden, jedoch bestätigt auch DV, dass sich solch eine Maschine langfristig lohnt, da es sehr zuverlässig läuft und kaum gewartet werden muss. Sonstige Aufwände seiner Technik beschreibt er als gering und überschaubar.

Folgende Übersichtstabelle komprimiert die zuvor beschriebenen Ergebnisse zu den Kriterien Aufwand und Energiebedarf der Fruchtungstechnik und macht den Betriebsvergleich auf einen Blick erfassbar.

Tabelle 13 Übersicht der Kriterien Aufwand und Energiebedarf

Komponenten	Ausprägung Aufwand Investition, Bedienung, Wartung	Ausprägung Energiebedarf	Begründung der Befragten
Feinvernebler, Eigenbau/Montage, Filtersystem mittlere Klasse (DV)	Höhere Anfangsinvestitionen, Aber: Anschaffungen günstiger durch Eigenbau, geringer externer Wartungsaufwand	erhöhter Energiebedarf (vgl. Ultraschall), geringere Ventilatorleistung durch niedrigere Druckverluste	Kostenreduktion, schnelle Nachjustierung/Ersetzbarkeit, Balance aus Filterleistung und Energiekosten
Ultraschallvernebler mit kleinem Lüfter, Infrarotheizung (NSt)	geringe Investitionskosten durch einfache Eigenbauteile	Sehr niedriger Energiebedarf, Klimaanlage durch Sollwert limitiert, Heizung effizient (durch Dämmung)	Einfache, flexible Lösung mit kontrollierbaren Kosten, Temperaturziele pragmatisch gesetzt, um Stromkosten zu senken
Low-Tech-Setup, ohne Klimaanlage (EB)	geringe Investitionskosten und geringer Bedien- und Wartungsaufwand	niedriger Energiebedarf (keine AC)	Komplexität vermeiden, Kosten senken und Flexibilität erhalten

Low-Tech-Setup (AOB)	Geringe Investitionskosten, zentrale Steuerung „nice to have“ aber nicht notwendig	niedriger Energiebedarf, Spitzen ggfs. im Winter (Gebäudeheizung)	Bezüglich Kostennutzen die naheliegendste Lösung, spätere Auf- bzw. Nachrüstung denkbar, derzeit nicht priorisiert
Feinvernebler, einfache Ventilatorsteuerung (FS)	Höhere Anfangsinvestition, geringer laufender Wartungsaufwand (robuste Komponenten)	erhöhter Energiebedarf (vgl. Ultraschall)	Zuverlässigkeit und geringe Ausfallquote im Vordergrund, langfristig effizient

Fehleranfälligkeit

NSt erzählt, dass er zu Beginn des Ausbaus seiner Pilzfarm mit einer fehlerhaften Stromversorgung zu kämpfen hatte, was dazu führte, dass seine Pilze eine gewisse Zeit keine Frischluft und Feuchtigkeit abbekamen. Der Grund lag in einer zu dünnen und langen Drahtverkabelung zu seinen Wechselbrücken über ca. 200m. Er betont, dass er es so schnell wie möglich ausgetauscht hat, denn Strom ist für die Klimastabilität der Pilzfarm essenziell.

EB spricht über fehlerhafte Temperatursensoren seiner Pasteurisatoren. Das Resultat war eine Charge kontaminierter Substrate, da die Temperatur im Prozess der Pasteurisation nicht konstant gehalten werden konnte. Er sagt aber auch, dass „[...] das fast nie passiert, vielleicht einmal in zwei Jahren (EB, Pos. 202). Auch AOB betont Probleme mit Sensoren. Einmal hatte der Feuchtigkeitssensor ihres Fruchtungszeltes eine Störung, was zu einer Überflutung des Zeltbodens führte. Das kostet Zeit und Energie, „[...] wobei das für die Pilze auch jetzt weniger schlimm ist, aber es ist halt ärgerlich. [...] also die Pilze halten das schon ganz gut ein paar Stunden aus, wenn es mal zu nass ist.“ (AOB, Pos. 261) Solche Erfahrungen unterstreichen die Bedeutung verlässlicher Sensorik für eine stabile Klimaführung in der Pilzproduktion. Eine Anforderung, die auch in der wissenschaftlichen Literatur als technologische Herausforderung beschrieben wird (Santos et al., 2023).

FS erwähnt eine besondere Ausprägung im Kontext von Fehleranfälligkeit, die Redundanz. Alle für Ernte und Prozessablauf kritischen Geräte besitzt er in doppelter Ausführung. Im Ernstfall kann und will er nicht auf eine womöglich wochenlange Lieferung eines Ersatzgerätes warten.

4.3 Methodische Reflexion

Im Folgenden wird das methodische Vorgehen reflektiert und die Vergleichbarkeit der Ergebnisse eingeordnet.

Eine direkte Vergleichbarkeit der Ergebnisse wird dadurch erschwert, dass die untersuchten Betriebe in wesentlichen Punkten stark voneinander abweichen. Insbesondere im Betriebsalter, der Betriebsgröße sowie im Grad der Technisierung. Während DV auf über 25 Jahre praktischer Erfahrung

zurückblicken kann und eine große, baulich ausgereifte Pilzzucht betreibt, befinden sich NSt und AOB noch in den ersten Betriebsjahren ihrer deutlich kompakteren Strukturen. Auch die jeweiligen Produktionsmengen und vermarkteten Sortimente sind nur eingeschränkt miteinander vergleichbar. Diese betriebspezifischen Voraussetzungen beeinflussen Bewertung technischer Lösungen maßgeblich und erklären teilweise abweichende Strategien im Umgang mit Raum, Substraten oder Fruchtungstechnik.

Gegensätzlich ist zu sagen, dass die Auswahl der Betriebe bewusst heterogen erfolgte, um ein möglichst breites Spektrum an Lösungsansätzen sichtbar zu machen. Dadurch konnten vielfältige Einblicke in unterschiedliche Betriebsmodelle und Strategien gewonnen werden. Letztendlich machen die Fallunterschiede deutlich, wie wichtig es ist, technische und organisatorische Lösungen immer vor dem Hintergrund betrieblicher Ziele, Ressourcen und Entwicklungsperspektiven zu betrachten. Zudem wäre eine quantitative Erhebung denkbar, die die Aussagen der Interviews mit messbaren Leistungsindikatoren verbindet. Durch solche methodische Weiterentwicklung kann die Aussagekraft der Schlussfolgerungen gestärkt werden.

5 Schlussfolgerung

5.1 Bewertung der Ergebnisse

In der Auswertung zeigt sich, dass die Strategien für eine erfolgreiche Pilzproduktion in engem Zusammenhang mit ihren Voraussetzungen stehen (Infrastruktur, Kompetenzen, betriebliche Rahmenbedingungen etc.), weshalb die Forschungsfragen hier gemeinsam beantwortet werden. Das Kapitel integriert daher Ergebnisinterpretation und theoretische Einordnung (*Low-Tech*, innovative Merkmale) entlang der Themenblöcke.

Zur Orientierung sind die Forschungsfragen hier nochmals aufgeführt:

1. Welche innovativen und praxisnahen Strategien, von der Substratherstellung über die Raumgestaltung bis hin zur Fruchtungstechnik, entwickeln und nutzen kleine und mittlere Edelpilzbetriebe, um mit einfachen Mitteln und vorhandener Infrastruktur wirtschaftlich erfolgreich zu produzieren?
2. Unter welchen Voraussetzungen werden in den Betrieben unterschiedliche technische Lösungen (z.B. Low-Tech oder No-Tech Ansätze) entwickelt und eingeführt, und wie bewerten die Betreiber*innen deren Stärken und Schwächen?

Die Interpretation der Interviews zeigt, dass die besuchten Betriebe eine Reihe an Gestaltungsprinzipien nutzen, die zu einer wirtschaftlich erfolgreichen Produktion führen. Sie arbeiten mit vorhandener Bausubstanz, setzen auf einfache Technik und entwickeln schrittweise Anpassungen,

die den Arbeitsaufwand verringern, Kosten eingrenzen und dadurch eine wirtschaftliche Produktion ermöglichen. Im Kern sind es häufig pragmatische Lösungen aus dem Betriebsalltag, die sich an *Low-Tech*-Prinzipien (siehe Kapitel 2.4.2) orientieren oder Merkmalen der Innovationstheorie (siehe Kapitel 2.4.1) folgen.

Räumlichkeiten

Sichtbar wird dies zunächst in der Anpassung und modularen Gestaltung von Räumen. Vor allem Wechselbrücken (NSt), oder wie in der Literatur beschriebene Frachtcontainer, stehen exemplarisch für mobile, skalierbare Infrastruktur, welche sich schnell nach- und umrüsten lässt (Cotter, 2014; Stamets, 2011). Raum-im-Raum Konzepte durch Folienkonstruktionen oder Gewächshauszelten (AOB) erzeugen auf einfache Art und Weise variable Klimazonen bei niedrigen Investitionskosten (McCoy, 2016). Auch die räumliche Zusammenlegung der Funktionsbereiche (EB) oder die Nutzung gegebener Klimabedingungen in Kellerräumen (FS) wirkt als organisatorisches, bzw. effizienzorientiertes *Low-Tech*-Merkmal. Weiterhin agieren eingesetzte Materialien aus branchenfremden Kontexten als *Low-Tech*-Bausteine. Kühlhauspaneelwände (DV), PVC-Böden (NSt) oder harzbeschichtete Wände (FS) sind nicht speziell für die Pilzzucht entwickelt, erfüllen aber die Anforderungen bezüglich Hygiene und Reinigungsaufwand. Zugleich zeigen die genannten Lösungen klar erkennbare Grenzen auf. Beispielsweise führen große Räume (DV) oder Raum-im-Raum Systeme (AOB) in sommerlichen Extremtemperaturen zu Problemen der Klimastabilität. Auch Wechselbrücken (NSt) bieten zwar hohe Mobilität, aber begrenzten Raum. Ebenso bieten Kellerräume (FS) wenig Raum für Skalierung. Insgesamt ergibt sich, bezüglich der Räumlichkeiten, ein Kompromiss aus Flexibilität, Klimastabilität und Anpassungsfähigkeit (Skalierbarkeit), der betriebsindividuell mitgedacht werden sollte.

Substrate

Auch der Umgang mit Substraten zeigt innovative Merkmale und *Low-Tech*-Aspekte. Besonders deutlich wird dies an der Wahl einfacher, gut erprobbarer Verfahren und am selektiven Einsatz komplexerer Methoden. Pasteurisierung ist dabei als energie- und investitionsarme Behandlungsmethode hervorzuheben (Goldscheider, 2018; McCoy, 2016). Die Wiederverwendung von Materialien (NSt, EB), um in Eigenbau Pasteurisatoren zu bauen, widerspiegelt die nachhaltige und ressourcenschonende Sichtweise der *Low-Tech*-Bewegung. Speziell der umgenutzte Brauereitank (NSt) weist innovative Merkmale (z.B. Neuheitsgrad) auf könnte im Kontext einer Vermarktung für Edelpilzbetriebe sogar zu einer Innovation übergehen. Auch die saisonale Sortenauswahl (EB, AOB) und dazugehörige, differenzierte Behandlungsverfahren sind als nachhaltig (*Low-Tech*) einzuordnen, da Energie eingespart wird. Insgesamt kann durch die Eigenanfertigung von Substraten generell, besser auf Marktsituationen reagiert werden, etwa durch Menge oder Sorten (innovatives Merkmal,

Anpassungsfähigkeit). Insgesamt stellen die genannten Komponenten *Low-Tech* als Kombination aus Zugänglichkeit und Nachhaltigkeit dar, ergänzt um innovative Merkmale, wie Erprobbarkeit und Anpassungsfähigkeit.

Fruchtung

Bezüglich der Klimaparameter, und dessen Erreichen durch ausgewählte Technik, tragen folgende Punkte zur Beantwortung der Forschungsfragen bei. Es zeigt sich ein Muster selektiver Technikauswahl. Dort, wo es einen direkten Nutzen bringt, wird einfache Technik eingesetzt. Hier ist die Nutzung von Ultraschallverneblern, im Vergleich zu industriellen Feinverneblern, zu nennen (NSt, AOB). Diese sind kostengünstig und zweckmäßig (*Low-Tech*). Auch im Zusammenhang mit Ultraschallverneblern ist die Schwimmerventil-Lösung als betriebsinterne Neuerung hervorzuheben (innovatives Merkmal, Aufwand). Ein weiterer *Low-Tech*-Aspekt stellt der bewusste Verzicht auf aktive Kühlung durch eine Klimaanlage dar (EB), wodurch energieaufwendige Klimasteuerung umgangen wird. Hier ist auch die Nutzung vorhandener Gebäudestrukturen im Kontext von Klimasteuerung zu nennen (FS). Darüber hinaus zeigt sich auch in der Wahl der Heizsysteme ein *Low-Tech*-Charakter. In gut isolierten Wechselbrücken reicht eine Infrarotheizung zur Grundwärme aus (NSt). Abschließend ergibt sich im Bereich der Fruchtungstechnik ein selektives und zweckorientiertes Muster. *Low-Tech* wird hier nicht als Verzicht verstanden, sondern als strategische Auswahl einfach gehaltener, effizienter Lösungen, die zugleich Gestaltungsspielräume für betriebsindividuelle Innovationen eröffnen.

Die vorliegende Arbeit zeigt, dass die befragten Edelpilzbetriebe unter Einsatz einfacher Technik und begrenzter Ressourcen dennoch, und möglicherweise gerade deshalb, wirtschaftlich erfolgreich arbeiten können. Durch den Einsatz von *Low-Tech*-Lösungen in Verbindung mit Kreativität und Eigenbau gelingt es ihnen, die notwendigen Klimabedingungen für die Pilzzucht zu schaffen und einen stabilen Produktionsprozess zu erzeugen. Zugleich wird deutlich, dass viele der eingesetzten Lösungen nicht eigens neu entwickelt, sondern aus öffentlich zugänglichem Wissen (siehe Kapitel 4.1.1) übernommen und betrieblich angepasst wurden. Innovation zeigt sich dabei weniger in technischer Neuerung, sondern im geschickten Transfer, der passgenauen Anwendung und pragmatischen Weiterentwicklung bestehender Ansätze.

5.2 Ausblick für Politik und Forschung

Die wachsende Bedeutung der Edelpilzzucht in Deutschland, etwa im Hinblick auf regionale Produktion und Diversifizierung landwirtschaftlicher Betriebe, weist darauf hin, dass Betriebe dieser Art eine sinnvolle Ergänzung zu klassischen Produktionszweigen darstellen können. Statistische Daten zeigen etwa, dass die Pilzanbaufläche bislang rückläufig ist, gleichzeitig aber Nischensorten zunehmen (Statistisches Bundesamt, 2025). Ein Indiz für Wandel und Anpassung in der Branche. Zugleich betont

der aktuelle Rahmen der Gemeinsamen Agrarpolitik (GAP) der EU, dass kleine und mittlere Betriebe stärker berücksichtigt werden sollen (GAP, 2025). Vor diesem Hintergrund können die hier identifizierten Strategien als Teil einer nachhaltigen, dezentralen Landwirtschaft verstanden werden, die Ressourceneffizienz, regionale Wertschöpfung und Innovationsfähigkeit verbindet. Damit leistet die Arbeit nicht nur einen betrieblichen Beitrag, sondern zeigt auch Potenziale für eine modernere Agrarstruktur auf.

Auf politischer Ebene ergeben sich diverse Handlungsmöglichkeiten. Beispielsweise könnten Förderprogramme gezielt *Low-Tech*-Ansätze unterstützen, insbesondere bei kleinen und mittleren Betrieben, die nicht über große Investitionsmittel verfügen. Im Sinne der GAP-Zielsetzungen wäre eine Ausweitung von Zuschüssen oder Beratungsprogrammen denkbar, die gezielt technik- und betriebsspezifische Anpassungen im Rahmen einer Diversifizierung ermöglichen. Weiterhin sollte der Austausch von Erfahrungswissen (z. B. über Netzwerke oder Demonstrationsbetriebe) ausdrücklich neben der reinen Ausschöpfung von Subventionen gefördert werden, da viele Kleinbetriebe formale Beratungsangebote vor allem für Förderanträge nutzen und seltener für produktions- oder innovationsbezogene Beratung (Sutherland et al., 2017).

Für die Forschung bietet sich an, die hier qualitativen Befunde durch quantitative Untersuchungen zu ergänzen. Es könnte systematisch untersucht werden, wie welche *Low-Tech*-Lösungen die Wirtschaftlichkeit (Ertrag, Kostenstruktur) oder Umweltwirkung (Energieverbrauch, Substratrecycling) beeinflussen. Längerfristige Studien zur Verbreitung solcher Strategien in unterschiedlichen Regionen könnten ebenfalls Aufschluss darüber geben, wie allgemein übertragbar die in dieser Arbeit festgestellten Lösungen sind.

IV Literaturverzeichnis

- Abrassart, C., Jarrige, F., & Bourg, D. (2020). Introduction: Low-Tech et enjeux écologiques – quels potentiels pour affronter les crises ? : La Pensée écologique, N° 5(1), 1–1.
<https://doi.org/10.3917/lpe.005.0001>
- BDC. (2025). Pilze als neue Proteinquellen – Verbraucherpresse-Artikel zeigt Möglichkeiten auf. Verbraucherpresse-Artikel. <https://der-champignon.de/pilze-als-neue-proteinquellen-verbraucherpresse-artikel-zeigt-moeglichkeiten-auf/>
- BDSG. (2018). BDSG ▷ Bundesdatenschutzgesetz als übersichtliche Seite. Datenschutz-Grundverordnung (DSGVO). <https://dsgvo-gesetz.de/bdsg/>
- Bioland-Richtlinien. (2025). Bioland e.V.
https://www.bioland.de/fileadmin/user_upload/Verband/Dokumente/Richtlinien_fuer_Erzeuger_und_Hersteller/Bioland-Richtlinien_Aktuelle_Fassung_2025-03.pdf
- BLE. (2024). Speisepilze: Von wild bis kultiviert [Pressemitteilung]. Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung.
https://www.ble.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2024/240918_Speisepilze.html
- Bortz, J., & Döring, N. (2016). Forschungsmethoden und Evaluation: Für Human- und Sozialwissenschaftler (5. Aufl). Springer.
- Breiting, A., & Knosala, R. (1997). Bewerten technischer Systeme: Theoretische und methodische Grundlagen bewertungstechnischer Entscheidungshilfen. Springer.
- Cotter, T. (2014a). Organic Mushroom Farming and Mycoremediation: Simple to Advanced and Experimental Techniques for Indoor and Outdoor Cultivation (1st ed). Chelsea Green Publishing.
- Crosby, W. (2021). Growing the Specialty Mushroom Industry in the Northeast (Research and Education Nos. LNE19-376). Sustainable Agriculture Research and Education Projects.
- Crosby, W. (2021). Starting a Speciality Mushroom Farm. www.fungially.com
- Dellsperger, C. (2024). Low-Tech, eine Bewegung für die Zukunft? [Text/html,application/pdf;text/html]. Band 43 (2024)(Heft 82).
<https://doi.org/10.5169/SEALS-1055781>
- DIN EN 13306:2018-02, Instandhaltung_ - Begriffe der Instandhaltung; Dreisprachige Fassung EN_13306:2017. (2018). DIN Media GmbH. <https://doi.org/10.31030/2641990>
- Dresing, T., & Pehl, T. (2018). Praxisbuch Interview, Transkription & Analyse: Anleitungen und Regelsysteme für qualitativ Forschende (8. Auflage). Eigenverlag.
- Ebers, H., & Forstner, B. (2020). Evaluation der Förderung von Investitionen zur Diversifizierung (FID - TM 6.4 des EPLR Hessen): Entwicklungsplan für den ländlichen Raum des Landes Hessen 2014 bis 2020 (EPLR Hessen). Johann Heinrich von Thünen-Institut.
<https://doi.org/10.3220/5LE1579684459000>
- EHEDG. (2018). Hygienic Design Principles (Basisleitlinie der European Hygienic Engineering & Design Group). (Guideline No. Third Edition). <https://www.ehedg.org/guidelines-working-groups/guidelines/guidelines/guidelines/detail/hygienic-design-principles>
- Fischer, A. (Hrsg.). (2001). Energie sparen - Kosten reduzieren: Dokumentation des 6. Deutschen Fachkongresses der Kommunalen Energiebeauftragten in Garbsen am 9./10. November 2000. Deutscher Fachkongress der Kommunalen Energiebeauftragten, Berlin. Deutsches Institut für Urbanistik.
- GAP. (2025). GAP-Fördervorschriften 2023-2027. <https://www.consilium.europa.eu/en/policies/cap-funding-rules-2023-2027/>
- Gläser, J., & Laudel, G. (2009). Experteninterviews und qualitative Inhaltsanalyse als Instrumente rekonstruierender Untersuchungen (3., überarb. Aufl). VS Verlag für Sozialwissenschaften.
- Goldscheider, S. (2018a). Speisepilze selbst anbauen: Für drinnen und draußen. BLV.
- Granig, P., & Perusch, S. (2012). Innovationsrisikomanagement im Krankenhaus: Identifikation, Bewertung und Strategien. Gabler Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-8349-6878-4>

- Grimm, D., Sonntag, E., & Rahmann, G. (2024). EVALUATION OF DIFFERENT PASTEURIZATION AND STERILIZATION METHODS FOR OYSTER MUSHROOM SUBSTRATES. *Journal of microbiology, biotechnology and food sciences*, 13(5), e10428. <https://doi.org/10.55251/jmbfs.10428>
- Häring, A. M., Blodau, S., Braun, C., Meerhoff, C., & Winkler, C. (2012). Forschung zur ökologischen Land- und Lebensmittelwirtschaft (Schriften zu den Wirtschafts- und Sozialwissenschaften der Land- und Lebensmittelwirtschaft No. 1/2112).
- HLP. (2022). Produktion von Edelpilzen in Deutschland nach Art in den Jahren 2014 bis 2021 (in Tonnen) (Statistik No. Hessische Landesfachgruppe Pilzbau). <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1337340/umfrage/erntemenge-von-edelpilzen-in-deutschland/>
- Jaisfeld, S. (2024). Pilze statt Schweine. HOFdirekt. <https://www.hofdirekt.com/meldungen/pilze-statt-schweine-2531.html>
- Kokenbrink, A. (2022). Edelpilze im Schweinestall. topagrar. <https://www.topagrar.com/perspektiven/nischen/junglandwirt-baut-edelpilze-im-alten-schweinestall-an-12811724.html>
- Krämer, N., & Englbrecht, J. (2021). Pilze selbst anbauen: In Haus und Garten. Expertenwissen zum Impfen, Pflegen, Ernten und Genießen (5th ed). Ulmer.
- Kuckartz, U. (2018). Qualitative Inhaltsanalyse. Methoden, Praxis, Computerunterstützung (4., überarbeitete Aufl). Beltz.
- Kyrdoda, Y., Balzano, M., & Marzi, G. (2023). Learn to survive crises: The role of firm resilience, innovation capabilities and environmental dynamism. *Technology in Society*, 74, 102285. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2023.102285>
- Liu, P., Zhang, Z., Wu, D., Li, W., Chen, W., & Yang, Y. (2025). The prospect of mushroom as an alterative protein: From acquisition routes to nutritional quality, biological activity, application and beyond. *Food Chemistry*, 469, 142600. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.142600>
- Marshall, E., & Nair, N. G. (2009). Make money by growing mushrooms. FAO.
- McCoy, P. (2016). Radical mycology: A treatise on seeing & working with fungi. Chthaeus Press.
- Miles, P. G., & Chang, S.-T. (2004). Mushrooms. Cultivation, Nutritional Value, Medicinal Effect, and Environmental Impact (0 Aufl.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780203492086>
- Ochowiak, M., Matuszak, M., Włodarczak, S., & Krupińska, A. (2022). Design and Testing of Apparatus for Producing Dry Fog. *Energies*, 15(24), 9296. <https://doi.org/10.3390/en15249296>
- OECD. (2008). Eco-Efficiency. OECD. <https://doi.org/10.1787/9789264040304-en>
- Oei, P. (2003a). Mushroom cultivation: Appropriate technology for mushroom growers (3rd ed). Backhuys.
- Pashaei, K. H. A., Irankhah, K., Namkhah, Z., & Sobhani, S. R. (2024). Edible mushrooms as an alternative to animal proteins for having a more sustainable diet: A review. *Journal of Health, Population and Nutrition*, 43(1), 205. <https://doi.org/10.1186/s41043-024-00701-5>
- Quaicoe, O., Asiseh, F., & Aloka, A. (2024). Enhancing Year-Round Profitability for Small-Scale Ranchers: An Economic Analysis of Integrated Cattle and Mushroom Production System. *Sustainability*, 16(13), 5320. <https://doi.org/10.3390/su16135320>
- Reindl, S., & Friedl, M. (2024). Faszination Pilzzucht: Anbaumethoden, Tipps & Rezepte. Leopold Stocker Verlag.
- Rogers, E. M. (2003). Diffusion of innovations (Fifth edition). Free Press.
- Russell, S. (2014). The essential guide to cultivating mushrooms: Simple and advanced techniques for growing shiitake, oyster, lion's mane, and maitake mushrooms at home. Storey Publishing.
- Santos, A. F., Gaspar, P. D., & De Souza, H. J. L. (2023). Eco-Efficiency in Mushroom Production: A Study on HVAC Equipment to Reduce Energy Consumption and CO2 Emissions. *Applied Sciences*, 13(10), 6129. <https://doi.org/10.3390/app13106129>
- Schmidt, W. E. (2020a). Speisepilze: Kulturverfahren für den Haupt- und Nebenerwerb (2., aktualisierte Auflage). Ulmer.

- Schmidt, W. E. (2020b). Speisepilze: Kulturverfahren für den Haupt- und Nebenerwerb (2., aktualisierte Auflage). Ulmer.
- Schuldes, B. M., & Lanceata, S. (2016). Das Pilzzucht-Buch: Werner Pieper & The Grüne Kraft. Edition Rauschkunde.
- Schumacher, E. F. (1973). Intermediate Technology. In *Small is Beautiful: Economics as if People Mattered*. <https://www.its.caltech.edu/~e105/readings/small-is-beautiful.pdf>
- Schumpeter, J. A. (2020). Kapitalismus, Sozialismus und Demokratie: Mit einer Einführung von Heinz D. Kurz (H. D. Kurz, Hrsg.; 10. erg. Aufl.). utb GmbH.
- Stamets, P. (1984). *The Mushroom Cultivator: A Practical Guide to Growing Mushrooms at Home*. Agarikon Press.
- Stamets, P. (2011). *Growing Gourmet and Medicinal Mushrooms* (3rd ed). Potter/Ten Speed/Harmony/Rodale.
- Statistisches Bundesamt. (2025). Speisepilzanbau. Statistisches Bundesamt (Destatis). <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Obst-Gemuese-Gartenbau/Tabellen/speisepilzanbau.html>
- Sutherland, L.-A., Madureira, L., Dirimanova, V., Bogusz, M., Kania, J., Vinogradnik, K., Creaney, R., Duckett, D., Koehnen, T., & Knierim, A. (2017). New knowledge networks of small-scale farmers in Europe's periphery. *Land Use Policy*, 63, 428–439. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.01.028>
- Umweltbundesamt. (2024). *Energiesparende Gebäude* [Online-Publikation des UBA].
- UNEP. (2012). *Application of the Sustainability Assessments of Technologies Methodology: Guidance Manual*. <https://www.unep.org/resources/report/application-sustainability-assessment-technologies-methodology-guidance-manual-0>
- Weber, M. (2019). Leitfaden Ressourceneffizienz. Ressourcen schonen — Effizienz steigern (No. 1. Auflage). VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH. <https://www.ressource-deutschland.de/service/publikationen/detailseite/broschuere-ressourcen-schonen-effizienz-steigern/>

V Nutzung generativer Künstlicher Intelligenz und Eigenständigkeitserklärung

Erklärung zur Nutzung von generativer Künstlicher Intelligenz

KI-Software	Einsatz
noScribe	- Erstellung einer Roh-Transkription der Interview-Audioaufnahmen
ChatGPT 4 (OpenAI)	- Suche nach Synonymen für einzelne Wörter
ChatGPT 4 (OpenAI)	- Gliederungsvorschläge für Kapitelstruktur der Arbeit
ChatGPT (OpenAI)	- Grammatik und Rechtschreibkorrektur einzelner Textabschnitte - Korrektur von Textabschnitten bezüglich inhaltlicher Dopplungen oder unvollständigen Aussagen
DeepL	- Übersetzung von englischsprachigen Literaturpassagen ins Deutsche

Eigenständigkeitserklärung

Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst, ganz oder in Teilen noch nicht als Prüfungsleistung vorgelegt und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Sämtliche Stellen der Arbeit, die benutzten Quellen im Wortlaut oder dem Sinn nach entnommen sind, habe ich durch Quellenangaben kenntlich gemacht. Ich erkläre mein Einverständnis zur Überprüfung der von mir eingereichten Arbeit auf Plagiate durch eine Anti-Plagiatsoftware. Zu diesem Zweck stelle ich eine anonymisierte elektronische Form des Dokuments in gängigem Format zur Verfügung.

Witzenhausen, den 20.10.2025

Unterschrift: 