

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Fakultät Life Sciences
Department Ökotrophologie

Bachelorarbeit im Studiengang Ökotrophologie

über das Thema

**Alternative Proteine:
Übersicht der verfügbaren Technologien zur Herstellung alternativer
Proteine für Milchprodukte und Bewertung der technologischen Reife**

Hamburg, 30. Mai 2024

vorgelegt von:

Anna Haas



Erstgutachterin: Prof. Dr. Katharina Riehn
Zweitgutachterin: Christina Krabbe M. Sc. Food Science

Diese Abschlussarbeit wurde im Auftrag von Agora Agrar erstellt und stellt das Arbeitspaket A.1 des Projekts „Alternative Proteine und ihr möglicher Einfluss auf dem Milchmarkt in Deutschland“ dar.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|------------|
| Inhaltsverzeichnis..... | II |
| Abbildungsverzeichnis..... | III |
| Tabellenverzeichnis..... | III |
| Zusammenfassung..... | 1 |
| Abstract..... | 1 |
| 1 Einleitung..... | 2 |
| 2 Theorie..... | 4 |
| 2.1 Proteine..... | 4 |
| 2.1.1 Struktur..... | 4 |
| 2.1.2 Funktionelle Eigenschaften in verarbeiteten Lebensmitteln..... | 5 |
| 2.2 Alternative Proteine..... | 6 |
| 2.2.1 Bedeutung für die Lebensmittelherstellung..... | 6 |
| 2.2.2 Proteine pflanzlicher Herkunft..... | 7 |
| 2.2.3 Mikrobielle Proteine..... | 8 |
| 2.2.4 Insektenproteine..... | 10 |
| 3 Methode..... | 12 |
| 3.1 Zielstellung..... | 12 |
| 3.2 Systematische Literaturrecherche..... | 12 |
| 3.3 Festlegung von Suchbegriffen und Literaturrecherche..... | 12 |
| 3.4 Sichtung und Auswahl der relevanten Literatur..... | 14 |
| 3.5 Dokumentation der Ergebnisse..... | 16 |
| 4 Technologieübersicht und Reifegradbewertung..... | 19 |
| 4.1 Alkalische und Salzextraktion..... | 19 |
| 4.2 Deep Eutectic Solvents..... | 22 |
| 4.3 Enzyme-Assisted Extraction..... | 23 |
| 4.4 High Pressure Processing / High Pressure Homogenisation..... | 25 |
| 4.5 Pulsed Electric Field..... | 28 |
| 4.6 Präzisionsfermentation..... | 29 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 4.7 | Microwave-Assisted Extraction..... | 31 |
| 4.8 | Ultrasound-assisted Extraction | 32 |
| 4.9 | Air Classification..... | 33 |
| 5 | Diskussion | 36 |
| 5.1 | Ergebnisse..... | 36 |
| 5.2 | Methode..... | 37 |
| 6 | Schlussfolgerungen..... | 38 |
| | Literaturverzeichnis..... | 39 |
| | Anhang | 43 |
| | Anhang A: Zusammenfassung bzw. weitere Ergebnisse der eingeschlossenen Literatur | 43 |
| | Anhang B: Bewertung der Extraktionstechnologien..... | 49 |
| | Eidesstaatliche Erklärung | 54 |

Abbildungsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Abbildung 1: PRISMA Flow Diagram..... | 15 |
| Abbildung 2: alkalische Extraktion / isoelektrische Fällung..... | 20 |
| Abbildung 3: Schematische Darstellung der EAE | 23 |
| Abbildung 4: HPP-Verfahren | 25 |
| Abbildung 5: Präzisionsfermentation von Pflanzenprotein..... | 30 |
| Abbildung 6: Mechanismen der Wärme- und Stoffübertragung bei der MAE | 31 |
| Abbildung 7: Schematische Darstellung der Luftklassifizierung..... | 33 |

Tabellenverzeichnis

| | |
|--|----|
| Tabelle 1: Übersicht Proteinquellen | 7 |
| Tabelle 2: Suchstrategie | 13 |
| Tabelle 3: Ein- und Ausschlusskriterien..... | 14 |
| Tabelle 4: Eingeschlossene Publikationen | 16 |

Zusammenfassung

Ein erhebliches Reduktionspotential der Treibhausgas-Emissionen entsteht durch Verringerung des Konsums und damit einhergehend der Produktion tierischer Lebensmittel. Eine Möglichkeit bieten alternative Proteine. Um qualitativ hochwertige Produkte herzustellen, ist es zunächst wichtig, zu wissen, welche Proteinextraktionstechnologien derzeit verfügbar sind und wie diese hinsichtlich ihrer Skalierbarkeit und Produktqualität zu bewerten sind.

Mittels einer Literaturrecherche wurde eine Übersicht der Technologien und die Bewertung des Reifegrades erstellt.

Aus den Ergebnissen der ermittelten Literatur ging hervor, dass es neben konventionellen Extraktionsmethoden zahlreiche innovative Verfahren zur Gewinnung von alternativen Proteinen gibt. Die neuartigen Verfahren stellen im Vergleich zu den konventionellen Technologien umweltfreundlichere Alternativen und eine wertvolle Ergänzung für den Bereich der Proteinextraktion dar. Ihre breite Anwendung bei weiterer Entwicklung kann von großem Nutzen für die Entwicklung umweltfreundlicher Produkte sein. Die meisten von ihnen befinden sich jedoch noch im Anfangsstadium der kommerziellen Anwendung. Darüber hinaus weisen Proteine, die aus verschiedenen Quellen stammen, einzigartige strukturelle Eigenschaften auf, die berücksichtigt werden müssen. Allgemeingültige Aussagen ließen sich daher nur eingeschränkt treffen.

Abstract

There is considerable potential for reducing greenhouse gas emissions by reducing consumption and thus production of animal-based foods. Alternative proteins offer one possibility. In order to produce high-quality products, it is first important to know which protein extraction technologies are currently available and how they can be assessed in terms of their scalability and product quality.

An overview of the technologies and an evaluation of these technologies was compiled by means of a literature search.

The results of the literature identified showed that, in addition to conventional extraction methods, there are numerous innovative processes for obtaining alternative proteins. Compared to conventional technologies, these novel processes represent more environmentally friendly alternatives and a valuable addition to the field of protein extraction. Their broad application with further development can be of great benefit for the development of environmentally friendly products. However, most of them are still in the early stages of commercial application. In addition, proteins from different sources have unique structural properties that need to be taken into account. Therefore, general statements can only be made to a limited extent.

1 Einleitung

Mit dem Europäischen Klimagesetz verpflichtet sich die EU, bis 2050 klimaneutral zu werden. Zu diesem Ziel müssen alle Sektoren beitragen – auch die Landwirtschaft und damit auch die Nutztierhaltung (Europäisches Parlament, 2023). Die Nutztierhaltung trägt wesentlich zu erheblichen Treibhausgasemissionen, Umweltverschmutzung, Wasserverschmutzung und dem Verlust der biologischen Vielfalt bei. Zusätzlich stellt das anhaltende Wachstum der Weltbevölkerung eine Bedrohung für die Ernährungssicherheit dar. Der Verzehr von Pflanzenproteinen hat aufgrund von Umweltbedenken, gesundheitsfördernden Aussagen, Veränderungen in der Ernährungsweise der Verbraucher, ethischen und religiösen Problemen und wirtschaftlichen Gründen viel Aufmerksamkeit erhalten (Ismail, Hwang, & Joo, 2020; López et al., 2018; van der Weele et al., 2019; Zhang et al., 2024). Dieser Trend könnte durch die Weiterentwicklung von alternativen Proteinen an Bedeutung gewinnen, abhängig davon, wie sich die Technologien, Preise und ihre Marktdurchdringung entwickeln.

Eine vielversprechende und nachhaltige Alternative zu tierischen Proteinen stellen Pflanzenproteine dar. Beispiele für pflanzliche Proteinquellen sind Getreide (Reis, Weizen und Mais) sowie Hülsenfrüchte (Erbsen, Mungbohnen, Kichererbsen, Linsen und Lupinen) und Ölsaaten (Sojabohnen, Raps und Sonnenblumen). Infolgedessen haben pflanzliche Proteine als nachhaltige Alternativen zu tierischen Proteinen an Popularität gewonnen, was zu einer verstärkten Erforschung von pflanzlichen Proteinquellen geführt hat (Wang, Miao & Sun, 2024). Insektenproteine und Algenproteine haben sich mittlerweile ebenfalls zu einem der wichtigsten Forschungsthemen entwickelt (Liang et al., 2024, Zhang, Boateng & Xu, 2024).

Agora Agrar möchte im Rahmen des Projekts „Alternative Proteine und ihr möglicher Einfluss auf den Milchmarkt in Deutschland“ eine Studie erarbeiten, die potenzielle Auswirkungen analysiert, inwiefern alternative Proteine die vorhandene und zukünftige Nutztierhaltung in Deutschland beeinflussen könnten, wenn sie die bisherigen, tierischen Proteine umfangreicher ersetzen. Der Fokus dieser Studie liegt auf dem Bereich der verarbeiteten Milchprodukte im deutschen Markt und in den wichtigsten deutschen Exportmärkten für Milchprodukte.

Die am Markt verfügbaren Milch-, Milchprodukt-, Fleisch-, Fisch- und Eialternativen werden meist aus proteinreichen Mehlen, Proteinkonzentraten und Proteinisolaten aus Pflanzen hergestellt (Bader-Mittermaier, 2022). Um qualitativ hochwertige Lebensmittel in ausreichender Menge herzustellen, werden im industriellen Maßstab Proteine durch konventionelle Verfahren wie die alkalische Extraktion gewonnen. Darüber hinaus gibt es neue Technologien zur Proteingewinnung, die bereits untersucht wurden und vergleichsweise weniger Einfluss auf die Proteinfunktionalität und die Umwelt haben. Proteine, die aus verschiedenen Quellen wie Pflanzen, Insekten, Algen, Bakterien und Pilzen stammen, weisen zudem einzigartige strukturelle Eigenschaften auf, die berücksichtigt werden

müssen. Die Erhaltung der Proteinfunktionalität und des Nährwerts bei gleichzeitiger Entfernung von Antinährstoffen und die Minimierung der Umwelt- und Gesundheitsbelastungen stellen somit eine Herausforderung dar.

Die vorliegende Bachelorarbeit beleuchtet die Gewinnungsverfahren von alternativen Proteinen. Sie stellt einen Überblick über bestimmte Extraktionstechnologien zur Herstellung alternativer Proteine und die Bewertung der technologische Reife unter Berücksichtigung der Skalierbarkeit und Produktqualität dar. Für die Erreichung der Zielstellung wurde eine systematische Literaturrecherche durchgeführt.

Im theoretischen Teil dieser Arbeit werden die Struktur und funktionelle Eigenschaften von Proteinen erläutert und Hintergrundinformationen zu alternativen Proteinen gegeben. Im zweiten Teil werden die angewandte Methode zur Erreichung der Zielstellung und die Ergebnisse der systematischen Literaturrecherche beschrieben. Die Ergebnisse der Literaturrecherche stellen die Technologieübersicht und Reifegradbewertung dar. Darauf folgt die inhaltliche und methodische Diskussion der Ergebnisse, um abschließend ein Fazit hinsichtlich der Zielstellung zu ziehen, und einen Ausblick für die weitere Forschung zu ermöglichen.

2 Theorie

2.1 Proteine

Proteine gehören neben den Kohlenhydraten und Fetten zu den Grundbausteinen der Ernährung. Diese sind in den Zellen aller Lebewesen an praktisch allen Lebensprozessen beteiligt und sind stabilisierender Teil des Organismus. Proteine sind unverzweigte, kettenförmige Moleküle, in denen mehr als 100 Aminosäurereste über Peptidbindungen untereinander verknüpft sind. Aus ernährungsphysiologischer Sicht werden Aminosäuren in essenzielle und nicht essenzielle Aminosäuren eingeteilt. Essenzielle Aminosäuren kann der Organismus nicht selbst synthetisieren. Sie müssen aus diesem Grund mit der Nahrung in ausreichenden Mengen aufgenommen werden (Vaupel & Bisalski, 2018; Hamatschek, 2021).

2.1.1 Struktur

Vaupel & Bisalski (2018) beschreiben, dass Proteine ausgehend von der Aminosäurekette einen hierarchischen Aufbau ihrer räumlichen Struktur aufweisen. Die Strukturebenen werden als Primär-, Sekundär-, Tertiär- und Quartiärstruktur bezeichnet.

Die Primärstruktur (Sequenz der einzelnen Aminosäuren einer Polypeptidkette) beschreibt die Aminosäuresequenz, jedoch nicht den räumlichen Aufbau des Proteins.

Als Sekundärstruktur wird die räumliche Struktur einer Polypeptidkette, die sich aufgrund von Wasserstoffbrückenbindungen zwischen den Peptidbindungen ausbildet, bezeichnet. Jedes Protein enthält mehrere Sekundärstrukturelemente: α -Helix, β -Faltblatt, β -Schleife und ungeordnete Strukturen („random coils“).

Die Tertiärstruktur beschreibt die dreidimensionale Faltung eines Polypeptids bzw. eines Proteins. Stabilisiert wird die Tertiärstruktur durch Wechselwirkungen der Aminosäureketten. Zu diesen gehören hydrophobische und elektrostatische (ionische) Wechselwirkungen, van-der-Waals-Wechselwirkungen, Wasserstoffbrückenbindungen und kovalente Disulfidbrücken. Durch diese Kräfte faltet sich das Protein weiter.

Die Quartiärstruktur von Proteinen beschreibt die Zusammenlagerung zu einem Proteinkomplex. Es kann eine Zusammenlagerung von unterschiedlichen Proteinen sein oder ein Verband aus zwei oder mehr Polypeptidketten. Die einzelnen Proteine sind häufig durch Wasserstoffbrücken und Salzbrücken aber auch durch kovalente Bindungen miteinander verknüpft.

Die Strukturebenen können (unter Einhaltung der Primärstruktur) durch Zerstörung der Wechselwirkungen (z.B. durch Hitze, Detergenzien, organische Lösungsmittel) denaturieren.

2.1.2 Funktionelle Eigenschaften in verarbeiteten Lebensmitteln

In verarbeiteten Lebensmitteln erfüllen Proteine eine Vielzahl technologischer Funktionen. Hier zu nennen ist eine gute Löslichkeit im sauren Milieu, die Stabilisierung von Phasengrenzflächen in Emulsionen oder schaubildende Eigenschaften (Aryee et al., 2017). Ebenso ist das Quellverhalten, die Wasser- und Fettbindung oder das Gelbildevermögen relevant (Hamatschek, 2021).

Tahari, Abdolalizadeh & Hedayati (2024) beschreiben die funktionellen Eigenschaften eines Proteins und dass diese Eigenschaften vom Aminosäureprofil, der Sequenz, der Anordnung und der Zusammensetzung des Proteins beeinflusst werden. Die strukturellen Eigenschaften der verschiedenen Proteine verleihen ihnen einzigartige funktionelle Merkmale. Daher ist es notwendig, die strukturellen Eigenschaften jedes Proteins einzeln zu bewerten:

Die Löslichkeit ist die wichtigste physikalisch-chemische Eigenschaft der Proteine, die sich entscheidend auf andere funktionelle Eigenschaften wie Gelierung, Emulgierung und Schaumbildung auswirkt. Sie ist definiert als ein thermodynamischer Index für das Gleichgewicht der Protein-Protein- und Protein-Lösungsmittel-Wechselwirkungen.

Das Wasserhaltevermögen ist definiert als die Wassermenge, die pro Gramm Protein absorbiert wird, oder die Fähigkeit des Proteins, Wasser entgegen der Schwerkraft zurückzuhalten, was sich auf die Textur, Saftigkeit und Haltbarkeit von Lebensmitteln auswirken kann.

Die Ölspeicherkapazität ist definiert als die Ölmenge, die pro Gramm Protein absorbiert wird, oder die Fähigkeit des Proteins, das Öl durch seine unpolaren (hydrophoben) Seitenketten zu binden.

Die Schaumeigenschaften sind für die Bewertung der textuellen und sensorischen Eigenschaften von Endprodukten, insbesondere von Lebensmitteln wie Schlagsahne, Eiscreme, Kuchen, Mousse, Backwaren und Getränken, von entscheidender Bedeutung. Schäume sind mit der Dispersion von Gasblasen in einer flüssigen oder festen Phase verbunden, die durch Aufschlagen, Schütteln und Gießen entstehen. Sie sind jedoch thermodynamisch instabil, da an der Grenzfläche zwischen Gas und Flüssigkeit freie Energie vorhanden ist.

Proteine können aufgrund ihres amphiphilen Charakters als Emulgatoren wirken und die Stabilität von Emulsionen verbessern, indem sie das Aufrahmen, die Koaleszenz, die Sedimentation und die Ausflockung von Tröpfchen verhindern. Die emulgierenden Eigenschaften von Proteinen hängen hauptsächlich von ihrer Fähigkeit ab, an der Öl-Wasser-Grenzfläche zu adsorbieren, die Oberflächenspannung zu verringern und dicht gepackte Filme um die dispergierten Öltröpfchen zu bilden.

Somit spielen Proteine nicht nur aus ernährungsphysiologischer Sicht eine bedeutende Rolle, sondern tragen auch aus lebensmitteltechnologischer Perspektive zum Genusswert der Lebensmittel bei.

2.2 Alternative Proteine

Der Begriff „alternative Proteine“ umfasst einerseits Substitute für konventionelle tierische Proteine und deren Ursprung, also beispielsweise von Milch, Eiern, Fleisch und daraus hergestellten Produkten. Andererseits fallen auch neue Quellen wie Pflanzen, Pilze, Insekten oder auch Einzeller unter diesen Begriff. Alternative Proteine dienen nicht nur der Erweiterung des Lebensmittelangebots, sondern auch dem Ersatz für die bisher eingesetzten pflanzlichen Rohstoffe wie Sojabohnen oder Getreide für konventionelle Futtermittelproteine (Daniel, 2021).

Alternativen Proteinen nicht tierischer Herkunft werden viele Vorteile hinsichtlich der Nachhaltigkeit zugeschrieben. Durch diese ist der Verbrauch an Agrarfläche geringer, klimaschädliche Emissionen sind geringer und die Erzeugung erfolgt unabhängig vom Klima (Daniel, 2021).

2.2.1 Bedeutung für die Lebensmittelherstellung

Soja und Weizen haben sich aufgrund ihres hohen Proteingehalts bereits seit Mitte des 20. Jahrhunderts in der Praxis etabliert und sind hinsichtlich ihrer Eigenschaften wissenschaftlich umfassend untersucht. Seit einigen Jahren werden zunehmend neue pflanzliche Rohstoffe für die Herstellung funktioneller Zutaten genutzt (auch als Alternativen zu Soja und Weizen). Aufgrund des hohen Proteingehalts stellen insbesondere Leguminosen, wie Lupinen, Kichererbsen, Ackerbohnen oder Linsen, eine interessante Quelle für die Gewinnung von Proteinzutaten dar. Geeignet sind ebenfalls Ölsaaten wie Mandeln, Leinsamen, Hanfsamen oder Kürbiskerne (Tamayo Tenorio et al., 2018).

Vielversprechend erweisen sich auch industrielle Nebenströme zur Proteingewinnung. Damit lassen sich Lebensmittelüberreste und Abfälle bei der Produktion oder Verarbeitung wie zum Beispiel Prozessabwässer aus der Kartoffelproduktion, Erbsenstärke, Reiskleie oder auch Presskuchen aus der Sonnenblumen- und Rapsölgewinnung zur Gewinnung von Proteinen nutzen. Aktuell werden diese proteinreichen Nebenerzeugnisse jedoch überwiegend als Tierfutter genutzt. Als kostengünstige und besonders nachhaltige Quelle für die Herstellung funktioneller Lebensmittelzutaten rücken sie aber zunehmend in den Fokus der Industrie und der Wissenschaft (Schweiggert-Weisz et al., 2020).

Tabelle 1 stellt die große Vielfalt an Proteinquellen dar. Neben den herkömmlichen gibt auch es zahlreiche innovative Proteinquellen, die zunehmend an Bedeutung gewinnen. Zur Kategorie der alternativen Proteinquellen werden pflanzliche Quellen (Leguminosen, Getreide oder Ölsaaten), tierische Quellen (Insekten oder Zellkulturen) und weitere Proteinquellen (Mikro- und Makroalgen, Pilze, Bakterien und Hefen) gezählt.

Tabelle 1: Übersicht Proteinquellen (Darstellung nach KERN, 2022)

| Proteinquellen tierischer Herkunft | Proteinquellen pflanzlicher Herkunft | Andere alternative Proteinquellen |
|---|--|---|
| Schweine-, Rind- und Hähnchenfleisch Milch Eier Fisch | Bohnen Weizen Sojabohnen Reis Mais | In-vitro-Fleisch Mykoprotein, Hefen, Bakterien Insekten (Heuschrecke, Hausgrille, Buffalowurm, Mehlwurm) Mikroalgen, Seetang, Qualle, See- stern |

Im Folgenden werden die einzelnen Kategorien (ausgenommen Proteine tierischer Herkunft) näher beschrieben.

2.2.2 Proteine pflanzlicher Herkunft

Die bekanntesten Quellen von pflanzlichen Proteinen sind Sojabohnen und Weizen. Die ersten auf dem deutschen Markt verfügbaren pflanzlichen Alternativprodukte wurden dementsprechend auf Basis von Sojaprotein (z. B. Tofu) und Weizengluten (z. B. Seitan) hergestellt. Sojaproteine und Weizengluten nehmen nach wie vor die Hauptrolle unter den Proteinzutaten ein (KERN, 2022).

Das Sojaprotein stellt heute ein pflanzliches Protein dar, welches in großen Mengen für Lebensmittelzubereitungen zur Verfügung steht. In den Samen der Sojabohne sind etwa 40 Prozent Protein enthalten. Die Proteinfraction ist durch einen reichen Anteil an essenziellen Aminosäuren gekennzeichnet und stellt die einzige pflanzliche Proteinquelle dar, die der Qualität tierischer Eiweiße nahekommt (Heiss, 2004).

Daneben werden Körnerleguminosen wie Erbsen, Ackerbohnen, Lupinen, Kichererbsen und Linsen, Presskuchen aus Ölsaaten, Pseudogetreide, Kartoffeln, aber auch grüne Biomasse wie Blätter, Weizengras oder Luzerne als pflanzliche Proteinquellen der Zukunft beschrieben (Bader-Mittermaier, 2022).

Die derzeit auf dem Markt erhältlichen Milchersatzprodukte sind auf Basis von Soja, Süßlupine, Getreide, Nüssen oder Kokosnuss hergestellt (Siebert & Schoppe, 2020).

2.2.3 Mikrobielle Proteine

In der wissenschaftlichen Literatur werden Proteine aus Pilzen, Bakterien, Hefen und Mikroalgen zu den mikrobiellen Proteinen (auch „single cell protein“ oder Mikrobenproteine) gezählt. Die Herstellung des mikrobiellen Proteins basiert auf der jahrhundertealten Methode der Fermentation und wurde in den 1980er Jahren entwickelt und von der US-amerikanischen Lebensmittelbehörde FDA (Food and Drug Administration) als sicher eingestuft (Humpenöder et al., 2022).

2.2.3.1 Mykoproteine

Mykoproteine sind Eiweiße aus Pilzen („myco“: griechisch für „Pilz“). Bei Mykoproteinen handelt es sich einerseits um für den Menschen ungefährliche Schimmelpilze und andererseits um essbare und teilweise bereits zum Verzehr übliche Ständerpilze, die in Nährlösungen Myzel (Pilzfäden), bilden. Das als erste kommerziell verfügbare Mykoprotein, gewonnen aus *Fusarium venenatum*, welches seit 1985 in diversen Darreichungsformen als Fleischersatz dient, ist auch als Quorn bekannt (Daniel, 2021). Mykoproteine werden durch Fermentation des genannten Fadenpilzes auf einem lebensmittelgeeigneten Kohlenhydratmedium in einer temperatur- und pH-kontrollierten Umgebung hergestellt (Wood & Tavan, 2022).

Der Broschüre des Kompetenzzentrum für Ernährung (KERN, 2022) ist zu entnehmen, dass für aus Mykoprotein produzierte Lebensmittel (z. B. Quorn) Produkte aus Myzel des Schimmelpilzes *Fusarium venenatum* in Bio-Tanks hergestellt werden. Das Herstellungsverfahren erfordert Zucker und eine konstante Temperatur. Nach der Fermentation wird das Myzel meist mit Eiklar und Kartoffelextrakten versetzt, um eine fleischartige Textur zu erreichen. Nach geschmacks- und texturverbessernden Prozessen (z. B. Gefrieren) kann eine Vielzahl von fleischähnlichen Produkten hergestellt werden. Derzeit sind die klassischen Fleischersatzprodukte wie Schnitzel, Hackfleisch oder Nuggets aus Mykoprotein im Handel erhältlich. Die sensorischen Eigenschaften und das wettbewerbsfähige Nährwertprofil von Mykoproteinen haben sie zu einer der beliebtesten Fleischalternativen gemacht.

Ein Ersatz von Molkereiprodukten durch Mykoproteine bietet sich allerdings aufgrund der Textur und anderer sensorischer Eigenschaften nicht an. Bisher wurden auch keine wissenschaftlichen Untersuchungen dazu veröffentlicht.

2.2.3.2 Mikroalgen

Mikroalgen sind mikroskopisch kleine, einzellige Organismen. Zu den Mikroalgen zählen Grün- und Kieselalgen. Die bekanntesten Mikroalgen sind Chlorella und Arthrospira. Mikroalgen sind wie Bakterien entweder autotroph, das heißt, sie bilden mittels Photosynthese organische Verbindungen aus Sonnenlicht und CO₂. Andere Mikroalgen sind heterotroph und benötigen organische Verbindungen für ihr Wachstum, wobei manche auch beide Fähigkeiten haben. Insgesamt haben Mikroalgen ein hochwertiges Nährstoffprofil. Sie sind reich an Protein, enthalten Kohlenhydrate, Carotinoide, Vitamine, Mineralstoffe und lebenswichtige Fettsäuren. Im Lebensmittelbereich dienen sie bisher hauptsächlich als Zutat von Nahrungsergänzungsmitteln in Form von Pulvern, Kapseln und Tabletten. Sie kommen aber auch in Lebensmitteln wie Nudeln, Smoothies, Softdrinks, Schokolade und Eis zum Einsatz. Aus Mikroalgen werden Öle hergestellt, die reich an den Omega-3-Fettsäuren sind. Daneben werden auch Proteine aus Mikroalgen produziert (Kern, 2022). Bei der Gewinnung von Algen- oder Mikroalgenprotein besteht die Herausforderung darin, die robusten Zellwände der Algenzellen effektiv aufzubrechen, was für die Gewinnung von hochwertigem Protein unerlässlich ist (Zhang, Boateng & Xu, 2024).

2.2.3.3 Proteine aus zellulärer Landwirtschaft

Im Vergleich zu Nutztieren und Pflanzen, die eine bestimmte Zeit benötigen, bis sie aufgezogen sind bzw. geerntet werden können, verdoppeln Mikroben wie Bakterien und Hefen ihre Biomasse innerhalb von Stunden. Als zelluläre Landwirtschaft wird die Herstellung von landwirtschaftlichen Produkten wie Fleisch, Milch oder Eiern aus Zellkulturen bezeichnet (Kern, 2022).

Das bekannteste Konzept der zellulären Landwirtschaft ist das in-vitro-Fleisch, welches derzeit hauptsächlich aus Kulturen von Rind, Schwein oder Huhn gewonnen wird (Kern, 2022). Die Basistechnologie für die Zellkultivierung wurde von der biopharmazeutischen Industrie entwickelt und wird bereits seit langer Zeit für die Herstellung hochwertiger Produkte wie monoklonaler Antikörper und Impfstoffe verwendet (Wood & Tavan, 2022).

Kultiviertes Fleisch basiert demnach auf Stammzellen eines Tieres, welche aus dem Muskelgewebe gewonnen werden. Die Zellkulturen werden in einem Nährmedium in einem Behälter (Bioreaktor) vermehrt. Bei der Kultivierung durchlaufen die Zellen verschiedene Stadien und es entwickeln sich Muskeln. Über ein Trägergerüst, meist aus tierischem Kollagen, wachsen die Zellen zu einer größeren Masse zusammen. Auf diese Weise entstehen sehr dünne Fleischschichten. Die Masse ähnelt Hackfleisch. In ähnlicher Weise werden auch Fettzellen gezüchtet, die zusammen mit dem Muskelgewebe ein Erzeugnis ergeben sollen, das dem Geschmack von echtem Fleisch möglichst nahekommt (BMEL, 2024).

Wood & Tavan (2022) beschreiben, dass der Einsatz zellbasierter Systeme sich auch auf die Milch erstreckt. Wie auch bei der Herstellung von in-vitro-Fleisch, entsteht die Milch auf Basis von Stammzellen aus frischer Milch. In einer Nährflüssigkeit (Laktationsmedium) wandeln die Brustzellen die Mikronährstoffe in Milch um. Diese soll der menschlichen Muttermilch oder Kuhmilch gleichen.

Bakterien und Hefen lassen sich auch dazu bringen, tierische Proteine wie Kasein oder Molkenprotein zu produzieren. Die Möglichkeiten der Herstellung alternativer Proteine wird durch dieses Verfahren erweitert (KErn, 2022).

2.2.4 Insektenproteine

Insekten werden als wichtige Protein- und Kalorienquellen der Zukunft gesehen, denn sie enthalten viel Eiweiß, Omega-3-Fettsäuren, Kalzium, Eisen und Vitamin B12. Zudem werden Insekten als das tierische Lebensmittel gehandelt, das mit dem geringsten Ressourcenverbrauch produziert werden kann (KErn, 2022). Mit mehr als 1.900 Arten weltweit sind Insekten eine vielversprechende Eiweißalternative. Insekten sind durch einen hohen Proteingehalt, der zwischen 35 und 61 Prozent liegt, und einem hohen Maß an Einheitlichkeit in der Aminosäure- und Mineralstoffzusammensetzung, gekennzeichnet (Liang et al., 2024).

Da Insekten in der EU als „neuartige Lebensmittel“ (Novel Food) gelten, sind sie in der VO (EU) 2015/2283 geregelt. Demnach ist für jede Art eine gesonderte Zulassung erforderlich und ihre Aufzucht wird nur mit definierten und charakterisierten Futtermitteln genehmigt. Zu Beginn 2021 wurde von der EFSA das getrocknete Mehl des gelben Mehlwurmkäfers zugelassen; allerdings dürfen aufgrund einer Übergangsregelung (Durchführungsverordnung (EU) 2017/2469, Art. 8 Abs. 5) und bis zu einer endgültigen Entscheidung auch einige andere Spezies vermarktet werden (Daniel, 2021).

Insekten bringen viele Vorteile mit sich, denn sie sind zu rund 80 Prozent verzehrbar (Rinder nur zu 40 Prozent, Schweine zu 55 Prozent), enthalten mehr Kilokalorien je Gramm als das Fleisch von Rind, Schwein oder Geflügel, sie wachsen schnell und benötigen wenig Platz (Hamatschek, 2021).

Eine weitere Stärke der Insekten ist ihre Eignung zur Verwertung von Bio-Abfallstoffen jeder Art. Diese wird jedoch einerseits durch die sehr variable Qualität des Futters und damit auch des Ertrages an Insektenmasse und -qualität limitiert, andererseits besteht bei nicht standardisierten Futterquellen immer das Risiko des Eintrags von Kontaminanten und letztlich auch von Zoonosen in die Nahrungskette bzw. in Lebensmittel (Daniel, 2021).

Traditionellerweise werden Insekten wild gesammelt. Die Anzahl der industriellen Insektenzucht steigt jedoch weltweit. Vor allem in Kanada gibt es mehrere Produktionsanlagen, die insgesamt bis zu 250 Tonnen Insekten jährlich produzieren können. Aber auch in Europa gibt es industrielle Farmen

für Insekten (z. B. Mehlwurmfarm in Frankreich). Auch in Deutschland erhöhen sich die Investitionen in die industrielle Produktion seit der Zulassung von ersten Insekten als Lebensmittel durch die EU im Januar 2021. Weitere Zulassungsverfahren für Insekten als neuartige Lebensmittel sind anhängig. Der Markt für isolierte Proteine, die aus industriell gezüchteten Insekten für die Herstellung von Lebens- und Futtermitteln gewonnen wurden, wächst zwar, jedoch stellen neben dem Zulassungsverfahren die Herstellungskosten, die Variabilität der Rohstoffe und die Konsistenz der Endprodukte die größten Herausforderungen dar (KERN, 2022).

3 Methode

3.1 Zielstellung

Zielstellung der vorliegenden Arbeit ist die Erstellung einer Übersicht der verfügbaren Technologien zur Herstellung alternativer Proteine und der anschließenden Bewertung des Reifegrades der vorgestellten Technologien unter Berücksichtigung der Skalierbarkeit und Produktqualität.

3.2 Systematische Literaturrecherche

Zur Erreichung der Zielstellung wurde eine systematische Literaturrecherche mithilfe von vorher festgelegten Suchbegriffen in der Online-Datenbank *ScienceDirect* durchgeführt. Aus den Informationen des Titels und Abstracts wurden die Publikationen hinsichtlich ihrer Relevanz und anschließend die Volltexte auf Eignung überprüft.

Im Folgenden wird darauf eingegangen, in welche Arbeitsschritte sich die systematische Literaturrecherche der vorliegenden Arbeit gliedert, um die Nachvollziehbarkeit der Methode zu gewährleisten. Die Literaturrecherche erfolgte im Zeitraum zwischen dem 22. und 25. April 2024. Jegliche danach veröffentlichte oder auf der Datenbank ergänzte Literatur wird in dieser Arbeit nicht berücksichtigt.

Die Ergebnisse der Datenbankrecherche werden im Anschluss an die Beschreibung der Vorgehensweise in tabellarischer Form aufgezeigt.

3.3 Festlegung von Suchbegriffen und Literaturrecherche

Um eine Übersicht der Technologien zur Herstellung alternativer Proteine zu erarbeiten und daraufhin eine Reifegradbewertung dieser Technologien durchzuführen, erfolgte zunächst die Festlegung der Suchbegriffe für die Literaturrecherche. Die Bestimmung der Suchbegriffe zielte darauf ab, in der ermittelten Literatur aussagekräftige Informationen für Technologien bzw. Verfahren zur Gewinnung von alternativen Proteinen ausfindig zu machen.

Aus dem theoretischen Teil der vorliegenden Arbeit geht hervor, dass mikrobielle Proteine wie Mykoproteine hauptsächlich für Fleischersatzprodukte geeignet sind und bisher keine wissenschaftlichen Untersuchungen veröffentlicht wurden, die den Ersatz von Molkereiprodukten durch diese Proteine hinsichtlich der Textur, Inhaltsstoffen und anderer sensorischer oder ernährungsphysiologischer Eigenschaften untersucht haben. Die Literaturrecherche wurde daher auf die Gewinnungsverfahren von pflanzenbasierten Proteinen, Insektenproteinen und Algenproteinen beschränkt.

Für die Suchstrategie der vorliegenden Arbeit wurden für drei Suchanfragen Schlagworte in englischer Sprache abgeleitet. Diese Schlagworte wurden mit dem Booleschen Operator AND miteinander verknüpft. Um möglichst neueste Erkenntnisse zu Technologien zur Herstellung alternativer Proteine zu ermitteln, wurde eine Eingrenzung des Veröffentlichungsjahres und des Publikationstyps vorgenommen. Somit beschränkte sich die Suche auf Übersichtsartikel (review articles) und Forschungsartikel (research articles) in englischer Sprache mit Volltextzugang aus dem Jahr 2024. Es wurde zusätzlich eine Auswahl an den Publikationstiteln (publication title) vorgenommen.

Für die Suchanfrage für pflanzliche Proteine wurden die Fachzeitschriften *Food chemistry*, *International Journal of Biological Macromolecules*, *Trends in Food Science & Technology*, *Food Hydrocolloids*, *Food Bioscience* und *Journal of Agriculture and Food Research* gewählt.

Für die Suchanfrage für Insektenproteine wurden die Fachzeitschriften *Trends in Food Science & Technology*, *Food Chemistry*, *Food Research International* bestimmt.

Die Suchanfrage für Algenproteine erfolgte in den Fachzeitschriften *Trends in Food Science & Technology*, *Algal Research*, *Food Bioscience*.

Tabelle 2 zeigt die gewählten Suchbegriffe und die Trefferzahl (am 22.04.2024). Zu erkennen ist, dass die meisten Treffer bei der Suchanfrage nach Technologien für die Gewinnung von Pflanzenproteinen erzielt worden sind. Mit den Suchanfragen nach den Herstellungsverfahren von Insekten- und Algenproteinen sind deutlich weniger Treffer erzielt worden. Insgesamt konnten 595 Publikationen ermittelt werden.

Tabelle 2: Suchstrategietabelle für die systematische Literaturrecherche

| Suchanfrage Nr. | Schlagwörter und Boolesche Operatoren | Treffer |
|-----------------|--|---------|
| 1 | trends in technology AND extraction AND plant protein AND alternative AND food | 454 |
| 2 | trends in technology AND extraction AND insect protein AND food | 76 |
| 3 | trends in technology AND extraction AND algae protein AND food | 65 |

3.4 Sichtung und Auswahl der relevanten Literatur

Die aufgrund der Datenbankrecherche ermittelten Publikationen wurden gesichtet und es erfolgte die Auswahl relevanter Publikationen mithilfe der in Tabelle 3 dargestellten der Zielstellung angepassten Ein- und Ausschlusskriterien.

Als Einschlusskriterien wurden neben der Sprache, Publikationstyp, Begrenzung der Jahreszahl und Verfügbarkeit des Volltextes thematisch relevante Kriterien festgelegt. Relevant waren demnach aufgezeigte Verfahren zur Gewinnung alternativer Proteine und die Bewertung der beschriebenen Technologien. Außerdem relevant und als Einschlusskriterium festgelegt sind die funktionellen Eigenschaften und Qualität der untersuchten Proteine.

Als Ausschlusskriterien wurden thematisch irrelevante Inhalte der jeweiligen Publikationen festgelegt.

Tabelle 3: Definierte Ein- und Ausschlusskriterien zur Sichtung und Auswahl relevanter Literatur

| Einschlusskriterien | Ausschlusskriterien |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> • Englischsprachige Publikationen • Übersichtsartikel, Forschungsartikel • Begrenzung der Jahreszahl, 2024 • Verfügbarkeit des Volltextes • Verfahren zur Gewinnung alternativer Proteine • Bewertung der Technologien • Funktionelle Eigenschaften und Qualität von alternativen Proteinen | <ul style="list-style-type: none"> • Fleisch- bzw. Fischalternativen (z.B. in-vitro) • Technologien, die nicht auf alternative Proteine zutreffen • Andere Makro- und Mikronährstoffe • Ernährungsphysiologische und gesundheitsbezogene Fragestellungen |

Die Sichtung und Auswahl der Publikationen richteten sich nach der Zielstellung der vorliegenden Arbeit. Die Erstellung der Übersicht erfolgte wie oben beschrieben anhand der Analyse der ermittelten Publikationen aus der Datenbankrecherche. Die Bewertung des technologischen Reifegrades erfolgte ebenfalls anhand dieser Publikationen.

Das folgende PRISMA Flow Diagram (Abb. 1) visualisiert den Verlauf der Literatursuche und zeigt auf, mit welcher Begründung Artikel für nicht relevant eingestuft und demnach ausgeschlossen wurden.

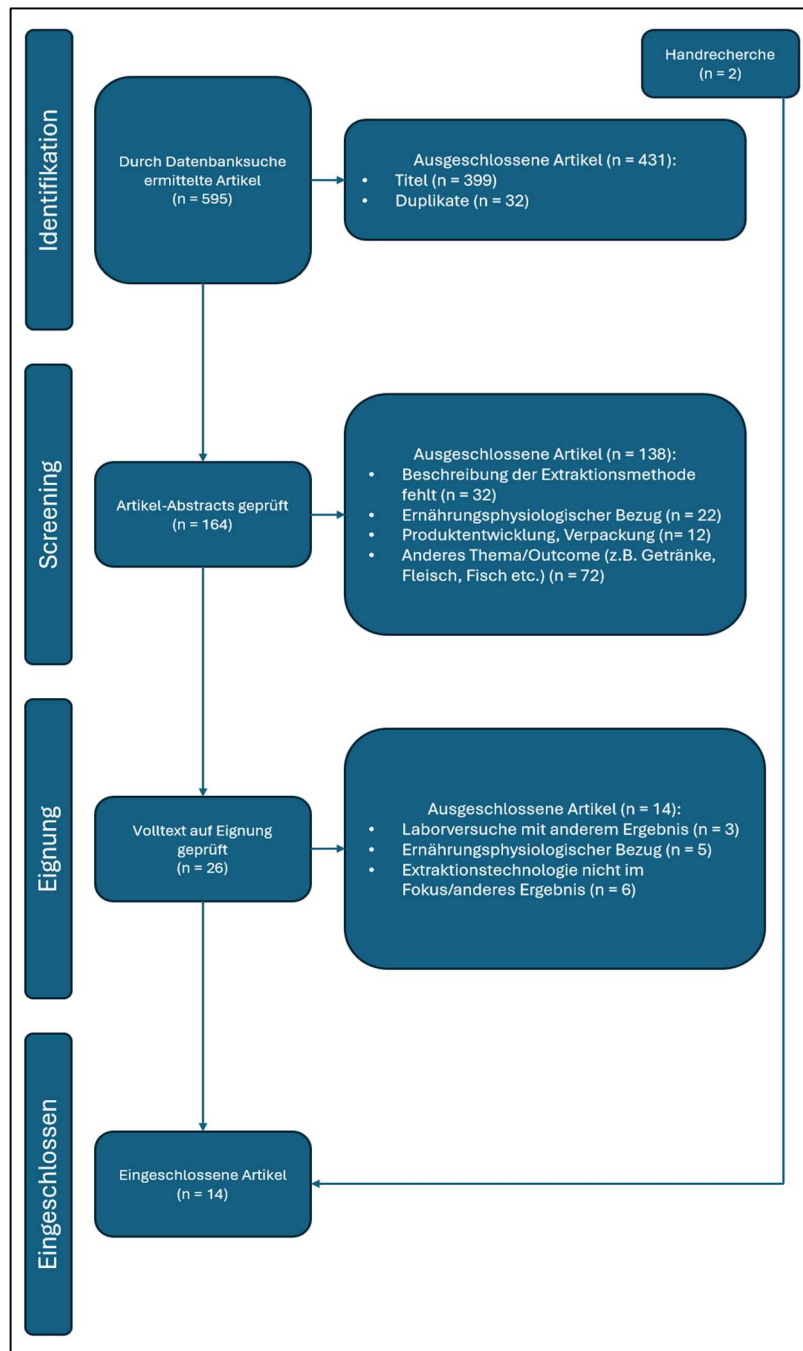


Abbildung 1: PRISMA Flow Diagram

Durch die einzelnen Suchanfragen, die in Tabelle 2 aufgelistet sind, konnten $n = 595$ Resultate ermittelt werden. Alle der Resultate waren englischsprachige Artikel.

Von den $n = 595$ Treffern der Datenbankrecherche konnten im ersten Schritt, der Analyse des Titels, $n = 399$ Artikel für die Erreichung der Zielstellung als ungeeignet eingestuft werden. Das Entfernen von $n = 32$ Duplikaten reduzierte die Anzahl der Publikationen auf $n = 164$.

Nach dem Abstract-Screening konnten weitere n = 138 nicht relevante Publikationen ausgeschlossen werden, sodass noch n = 26 Publikationen auf Eignung durch Lesen des Volltextes zur Prüfung vorlagen. Nach der letzten Prüfung konnten n = 14 Publikationen, die für das Erreichen der Zielstellung nicht von Relevanz waren, ausgeschlossen werden. Zusätzlich wurden n = 2 Publikationen aus der Handrecherche eingeschlossen.

Zusammenfassend konnten aufgrund der beschriebenen systematischen Datenbankrecherche für die Beantwortung der Fragestellung n = 14 geeignete Publikationen ermittelt werden.

3.5 Dokumentation der Ergebnisse

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Erstellung einer Übersicht der verfügbaren Technologien zur Herstellung alternativer Proteine und die anschließende Bewertung der technologischen Reife.

Tabelle 4 stellt eine zusammenfassende Übersicht der Publikationen dar, die in die Literaturrecherche und für das Erreichen der Zielstellung eingeschlossen wurden. Es wurden folgende Parameter tabellarisch festgehalten:

- Allgemeine Angaben (Autor, Jahr, Titel)
- Beschriebene Protein-Extraktionstechnologien

Zusätzlich sind im Anhang A die Publikationen kurz zusammengefasst bzw. weitere Ergebnisse aufgeführt und als Übersicht in tabellarischer Form dargestellt.

Tabelle 4: In die Literaturrecherche eingeschlossenen Publikationen

| Autor (Jahr) | Titel | Extraktionstechnologien (Auswahl) |
|-------------------------|---|--|
| Tarahi et al. (2024) | Mung bean protein isolate: Extraction, structure, physicochemical properties, modifications, and food applications | Alkalische Extraktion Salzextraktion Air Classification |
| Zhang et al. (2024) | Structural, extraction and safety aspects of novel alternative proteins from different sources | Alkalische Extraktion Enzymatische Methoden Ultrasound Microwave PEF High-Pressure-Methoden |

| | | |
|-------------------------|--|---|
| Hadidi et al. (2024) | Amaranth proteins: From extraction to application as nanoparticle-based delivery systems for bioactive compounds | Alkalische Extraktion Beschallung |
| Hadidi et al. (2024) | Oilseed meal proteins : From novel extraction methods to nanocarriers of bioactive compounds | Alkalische Extraktion Ultrasound-Assisted Extraction Enzyme-Assisted Extraction High Pressure Processing |
| Zheng et al. (2024) | Rice proteins : A review of their extraction, modification techniques and applications | Alkalische Extraktion Enzymatische Extraktion Physikalische Extraktion |
| Wang, Miao & Sun (2024) | Modifying structural and techno-functional properties of quinoa proteins through extraction techniques and modification methods | Alkalische Extraktion Physikalische Extraktion |
| Hewage et al. (2024) | Improved protein extraction technology using deep eutectic solvent system for producing high purity fava bean protein isolates at mild conditions | DES |
| Alasi et al. (2024) | Exploring recent developments in novel technologies and AI integration for plant-based protein functionality: A review | High Pressure Processing Pulsed Electric Field Präzisionsfermentation Ultrasound |
| Zafar et al. (2024) | Unraveling the nutritional, biofunctional, and sustainable food application of edible crickets : A comprehensive review | Enzyme-Assisted Extraction Alkalische Extraktion Microwave Beschallung |
| Liang et al. (2024) | Recent advances in edible insect processing technologies | Alkalische Extraktion Ultrasound-Assisted Extraction |

| | | |
|--|---|---|
| Zheng et al. (2024) | Recent advances of ultrasound-assisted technology on aquatic protein processing: Extraction, modification, and freezing/thawing-induced oxidation | Ultrasound-Assisted Extraction |
| Zhang, Boateng & Xu (2024) | Novel marine proteins as a global protein supply and human nutrition: Extraction, bioactivities, potential applications, safety assessment, and deodorization technologies | Alkalische Extraktion Ultrasound-Assisted Extraction Microwave-Assisted Extraction Enzyme-Assisted Extraction Pulsed Electric Field High Pressure Processing |
| Wood & Tavan (2022) | A review of the alternative protein industry | Präzisionsfermentation |
| Hernández-Álvarez, Mondor & Nosworthy (2023) | Green Protein Processing Technologies from Plants. Novel Extraction and Purification Methods for Product Development | Alkalische Extraktion Enzyme-Assisted Extraction High Pressure Processing / High Pressure Homogenisation Microwave-Assisted Extraction Air Classification |

Die Mehrzahl der Publikationen (n = 8) thematisieren Extraktionsmethoden für pflanzliche Proteine, jeweils 2 Publikationen beziehen sich auf die Gewinnung von Insektenproteinen, Algenproteinen und von Proteinen aus diversen alternativen Proteinquellen.

Basierend auf den oben genannten Publikationen wurde im nächsten Kapitel eine Technologieübersicht und die Reifegradbewertung erstellt.

4 Technologieübersicht und Reifegradbewertung

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der systematischen Literaturrecherche aufgezeigt und ein Überblick über eine Auswahl bestimmter Extraktionstechnologien gegeben. Es sind sowohl konventionelle als auch neuartige Technologien zur Extraktion und Isolierung von Pflanzen-, Insekten- und Algenproteinen aufgeführt, die Auswirkungen der Extraktionstechnologie auf die molekularen Strukturen und funktionellen Eigenschaften der Pflanzenproteine werden hervorgehoben und sofern entsprechende Daten verfügbar werden die Lebensmittelanwendungen der extrahierten Eiweißbestandteile veranschaulicht. Die Bewertung der technologischen Reife der vorgestellten Technologien erfolgt unter Berücksichtigung von Skalierbarkeit und Produktqualität. Im Anhang B werden die Ergebnisse dieses Kapitels als Übersicht in tabellarischer Form dargestellt.

4.1 Alkalische und Salzextraktion

Die in den ermittelten Publikationen häufigste aufgezeigte Extraktionsmethode ist die alkalische Extraktionsmethode. Sie ist derzeit auch die gängigste aller Proteinextraktionsmethoden. Diese Extraktionsmethode basiert auf der Ausfällung von Proteinen am isoelektrischen Punkt, wodurch sich hochreine Proteine gewinnen lassen.

Bevor die Proteinextraktion durchgeführt werden kann, wird das Ausgangsprodukt zu Mehl vermahlen und mit einem organischen Lösungsmittel entfettet (Hadidi et al., 2024). Das entfettete Mehl (Pulver) wird in einem Medium aufgelöst, das nicht dem pH-Wert des isoelektrischen Punkts entspricht, um unlösliche Verunreinigungen zu entfernen. Anschließend werden die Proteine in einem Medium mit einem pH-Wert nahe dem isoelektrischen Punkt des Proteins ausgefällt, wobei lösliche Verunreinigungen entfernt werden. Das ausgefällte Protein, das Wasser enthält, wird getrocknet, um das Proteinisolat zu erhalten (Zhang et al., 2024).

Abbildung 2 veranschaulicht das generelle Verfahren der alkalischen Extraktion mit Ausfällung am isoelektrischen Punkt.

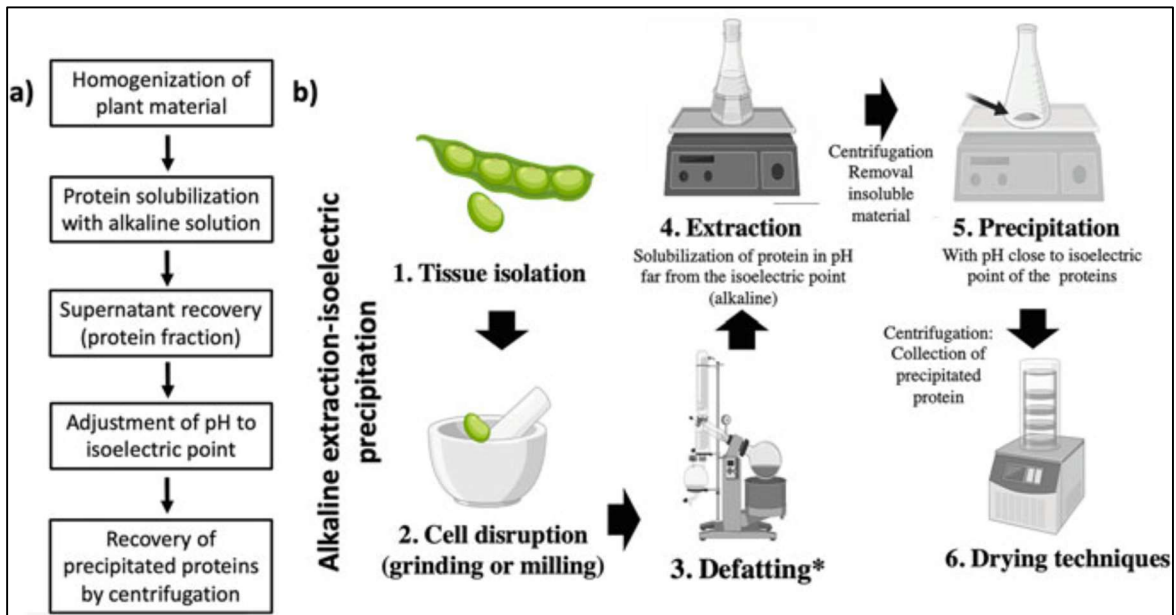


Abbildung 2: alkalische Extraktion / isoelektrische Fällung (Quelle: Hernández-Álvarez, Mondor & Nosworthy, 2023, S.6)

Je nach Proteinquelle kann der pH-Wert, der bei der alkalischen Extraktion und der Fällung am isoelektrischen Punkt verwendet wird, unterschiedlich sein. Pflanzliche Proteine haben eine hohe Löslichkeit bei einem pH-Wert zwischen 8 und 11. Bei der alkalischen Extraktion von Insektenproteinen sollte der pH-Wert so hoch wie möglich sein. Proteine bestimmter Mikroalgenarten haben die beste Löslichkeit bei einem pH-Wert von 11. Die isoelektrische Ausfällung von pflanzlichen Proteinen erfolgt bei niedrigem pH-Wert zwischen 4 und 5. Der isoelektrische Punkt von Insektenproteinen liegt im Allgemeinen zwischen pH 4 und 5. Die Extraktion von Algenproteinen wird vorzugsweise bei einem pH-Wert von 3 bis 5 durchgeführt (Tahari, Abdolalizadeh & Hedayati, 2024).

Laut Hadidi et al. (2024) reagieren Proteine aus Ölsaaten empfindlich auf den pH-Wert, und die Verwendung starker Chemikalien führt in der Regel zu einer teilweisen Hydrolyse und Denaturierung. Die funktionellen Eigenschaften von Proteinisolaten, z. B. Löslichkeit, Gelierung, Emulgierung und Viskosität, werden ebenfalls vom pH-Wert beeinflusst. Bei einem pH-Wert von über 12 kommt es zu einer irreversiblen Denaturierung, die zu einer Verringerung des Nährwerts führt.

Die alkalische Extraktion von Reisprotein ist im Vergleich zu anderen Methoden vorteilhaft für die Zusammensetzung des Proteins, die geringere Oberflächenhydrophobie, die höhere Löslichkeit und die geringere Wärmeverformung. Auf diese Weise können zum Beispiel mehr als 80 Prozent des alkalilöslichen Proteins im Reisprotein in einer alkalischen Lösung aufgelöst werden. Der Extraktionsprozess hat jedoch einige Nachteile, wie z. B. eine große Menge an alkalischer Lösung, ein hohes Fest-Flüssig-Verhältnis und eine hohe Konzentration der alkalischen Lösung. Dies fördert den Verlust essenzieller Aminosäuren und verringert die Effizienz des gesamten Proteins (Zheng et al., 2024).

Auch Temperatur und Zeit können die Proteinausbeute beeinflussen. Ein Temperaturanstieg wirkt sich negativ auf die Proteinextraktion aus, während eine verlängerte Extraktionszeit die Proteinausbeute erhöht (Wang, Miao & Sun, 2024).

Laut Liang et al. (2024) ist die alkalische Extraktion ebenfalls die gängigste Methode für Insekten. Insekten müssen vor der Proteinextraktion gekocht, getrocknet, gemahlen und anderweitig behandelt werden, um die Kontaktzeit zwischen dem Protein und dem Lösungsmittel zu verlängern. Während dieses Prozesses könnte jedoch der Proteingehalt oder die Verdaulichkeit negativ beeinflusst werden. Bei Insekten mit hohem Fettgehalt ist zusätzlich eine Entfettung vor der Proteinextraktion erforderlich, die die Auswirkungen großer Fettmengen auf die Proteinextraktion abmildert und den Fettgehalt stärker verringern könnte als die Proteinextraktion allein.

Wang, Miao & Sun (2024) erörtern eine weitere gängige Methode, die Salzextraktion. Die Extraktion erfolgt auf Wasserbasis, bei der Salze (NaCl) verwendet werden. Genauer beschreiben Tahari, Abdolalizadeh & Hedayati (2024) den Prozess der Salzextraktion. Dieser basiert auf dem Phänomen des Einsalzens und Aussalzens von Proteinen bei der gewünschten Ionenstärke unter Verwendung einer geeigneten Salzlösung. Bei der Salzextraktion wird die Salzlösung zur Auflösung der Proteine verwendet und es wird eine Mischung aus Globulinen und Albuminen extrahiert (im Gegensatz zu den herkömmlichen Methoden, bei denen hauptsächlich Globuline extrahiert werden). Außerdem kann die Salzextraktion in Fällen, in denen die Entfaltung der Proteine aus den Proteinen nicht erwünscht ist, bevorzugt werden.

Zheng et al. (2024) führen aus, dass die Salzextraktion eine wirksame Methode ist, um die natürliche Konformation (die räumliche Anordnung der Atome) von Proteinen zu erhalten. Jedoch führt diese zu einer geringen Proteinausbeute und -reinheit.

Konventionelle Extraktionsverfahren wie die alkalische und Salzextraktion sind aufgrund der Einfachheit, der Verfügbarkeit der benötigten Materialien und der hohen Ausbeute immer noch die gängigsten Methoden zur Extraktion von Proteinen (Tahari, Abdolalizadeh & Hedayati, 2024). Die alkalische Extraktionsmethode gilt als eine sehr effiziente Technik zur Gewinnung von Proteinen pflanzlichen Ursprungs und zur Veränderung ihrer Struktur und Funktion (Hadidi et al., 2024).

Jedoch sind die vorgestellten Methoden zugleich sehr energieintensiv, zeitaufwändig und nicht umweltfreundlich, da organische Lösungsmittel verwendet werden. Extreme Alkalibedingungen können sich auch auf das Eiweiß auswirken, indem sie die Verdaulichkeit herabsetzen, die Aminosäuren Cystein und Lysin schädigen und toxische Substanzen wie Lysin-Alanin produzieren (Cruz-Solis et al, 2023) und sie in der Regel große Mengen an Wasser erfordern. So legen Zhang et al. (2024) dar, dass bei der Extraktion von Lupinenprotein über 80 kg Wasser pro Kilogramm Proteinisolierung benötigt werden und berichten, dass chemische Reagenzien den natürlichen Zustand des Proteins während des Extraktionsprozesses zerstören können. Bezogen auf Proteine aus Ölsaaten, bringt die

alkalische Extraktionsmethode einige Nachteile mit sich wie die geringe Effizienz der Ölextraktion, das Vorhandensein chemischer Verunreinigungen und eine verminderte Proteinfunktionalität (Hadidi et al., 2024).

Die Salzextraktion bringt ebenso wie die alkalische Extraktion einige der oben genannten Nachteile mit sich und führt außerdem zu einem höheren Salzgehalt und einer geringeren Proteinreinheit im Endprodukt (Zhang et al., 2024; Zheng et al., 2024).

4.2 Deep Eutectic Solvents

Hewage et al. (2024) beschreiben eine neuere Technologie zur Extraktion von alternativen Proteinen, Deep Eutectic Solvents (DES, deutsch: niedrig schmelzende eutektische Lösungsmittel). Diese sind eine neue Klasse von Lösungsmitteln, die durch die Vermischung zweier Feststoffe entstehen. Durch die Wechselwirkungen der beiden Ausgangsstoffe auf molekularer Ebene (Wasserstoffbrückenbindung) wird eine Schmelzpunktniedrigung erzielt und es entsteht durch das Vermischen aus den Feststoffen eine Flüssigkeit.

Den Autoren nach rücken DES in jüngster Zeit als vielversprechende alternative („grüne“) Extraktionsmittel aufgrund ihrer geringeren Toxizität, ihrer Umweltfreundlichkeit, ihrer biologischen Abbaubarkeit und ihrer niedrigen Kosten in den Fokus. Die Anwendung von DES bei der Extraktion von Pflanzenproteinen als vielversprechendes nachhaltiges Lösungsmittel für die Proteinextraktion gewinnt zunehmend an Interesse. Jedoch verglichen mit der alkalischen Extraktion sind der Proteingehalt und die Extraktionsausbeute gering. Die Proteinextraktion mit DES hängt von mehreren Faktoren ab, wie z.B. der Art des Rohmaterials, dem Verhältnis von Flüssigkeit zu Feststoff, der Art des DES-Systems und seinen physiochemischen Eigenschaften, dem molaren Verhältnis, der Extraktionstemperatur, dem pH-Wert und der Zeit.

Hewage et al. (2024) haben aufgezeigt, dass die Auswirkungen der DES-Extraktion auf die Proteindenaturierung geringer waren, was darauf hindeutet, dass sie bessere funktionelle Eigenschaften in Lebensmittelsystemen aufweisen könnte. Insgesamt stellt die Proteinextraktion auf Basis von DES als umweltfreundlicher Ansatz eine vielversprechende Technik dar, die möglicherweise als Alternative zur herkömmlichen alkalischen Extraktionsmethode eingesetzt werden könnte. Vor der industriellen Anwendung für neue Proteinzutaten müssen jedoch weitere Studien zur funktionellen Leistung, potenziellen Toxizität und Restbelastung durchgeführt werden.

4.3 Enzyme-Assisted Extraction

Enzymbasierte Techniken ermöglichen durch den Einsatz spezifischer Enzyme die Proteinextraktion aus Pflanzen, indem sie die Hauptbestandteile der Pflanzenzellwand, wie Zellulose, Hemizellulosen und Pektin, abbauen. Je nach Pflanzenart können die Strukturen der Zellwand variieren. Die Wirksamkeit der Enzyme-Assisted Extraction (EAE) hängt von verschiedenen Faktoren ab, unter anderem von der Konzentration bzw. dem Typ des Enzyms, dem pH-Wert der Lösung, der Temperatur, der Reaktionszeit und der Partikelgröße (Oberfläche) des Pflanzenmaterials (Hadidi et al., 2024).

Um die Zellwände von Pflanzengewebe aufzulösen und die Freisetzung von Proteinen zu erleichtern, werden in der Lebensmittelindustrie häufig Carbohydrasen und Pektinasen verwendet. Daher müssen lebensmitteltaugliche Carbohydrase-Zubereitungen sorgfältig auf der Grundlage der Kenntnis der Zellwandkomponenten der jeweiligen Pflanzenart ausgewählt werden. Bei EAE-Verfahren wird die pflanzliche Zellwand unter Verwendung einer spezifischen Carbohydrase oder einer Kombination von Carbohydrasen hydrolysiert. Darüber hinaus kann EAE in bestimmten Fällen Hydrolyseprozesse unter Verwendung einer Kombination von Carbohydrasen und Proteasen beinhalten (Kleekayai et al, 2023).

Der schematische Verlauf der EAE wird in Abbildung 3 veranschaulicht:

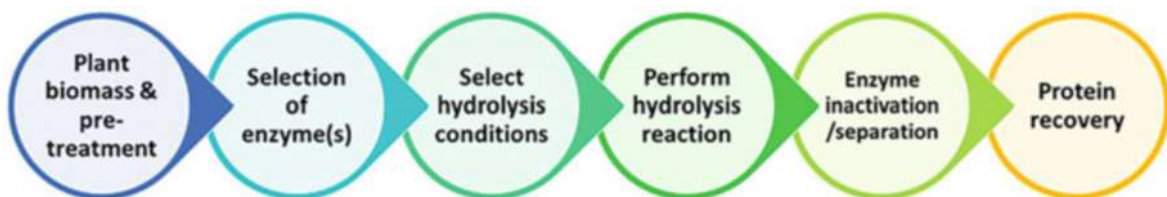


Abbildung 3: Schematische Darstellung der EAE (Quelle: Hernández-Álvarez, Mondor & Nosworthy, 2023, S.134)

Hadidi et al. (2024) beschreiben, dass das Verfahren der enzymunterstützten Pflanzenproteinextraktion die Auswahl der Enzympräparation(en), die Optimierung der Hydrolysebedingungen und der Durchführung der Hydrolysereaktion unter ausgewählten Parametern, die Beendigung der Reaktion durch Inaktivierung des Enzyms (oder durch seine Abtrennung) und schließlich die Gewinnung der proteinhaltigen Fraktionen umfasst. Die Rückgewinnung der Proteine nach der EAE kann im Allgemeinen durch Verfahren wie isoelektrische Fällung, Aussalzen (z. B. mit Ammoniumsulfat) und Membranverarbeitung erfolgen. Der Hydrolyseprozess selbst kann mit einem einzigen Enzympräparat oder einer Kombination aus mehreren Enzympräparaten durchgeführt werden. Darüber hinaus kann das EAE-Verfahren als einzelner Batch-Prozess oder als kontinuierlicher Prozess unter Verwendung eines Enzymmembran-Bioreaktors betrieben werden. Der letztgenannte Ansatz bietet Vorteile gegenüber einem Chargenbetrieb, da er die Enzymrückgewinnung und die Anreicherung der proteinhaltigen Fraktion(en) in einem einzigen Arbeitsgang ermöglicht. Die Wiederverwendung des verwendeten Enzyms bzw. der verwendeten Enzyme wird als entscheidender Vorteil anerkannt, der dazu

beiträgt, die Kosten zu minimieren und das Verfahren für Anwendungen im kommerziellen Maßstab praktikabler zu machen.

Die Autoren führen weiter aus, dass es mit dem EAE-Ansatz möglich ist, vorteilhafte Ergebnisse in Bezug auf die Verbesserung der technofunktionellen Eigenschaften zu erzielen, wie z. B. verbesserte Löslichkeit, Gelier- und Emulgierereigenschaften sowie Wasser- und Ölbindungsvermögen der extrahierten Proteine bzw. Peptide. Es gibt aber auch einige Herausforderungen, die mit der Anwendung von EAE-Ansätzen zur Gewinnung von Pflanzenproteinen verbunden sind. Eine derartige Herausforderung könnte damit zusammenhängen, dass die Enzymaktivität des extrahierten Eiweißstoffs inaktiviert bzw. entfernt werden muss, um eine weitere Enzymaktivität zu minimieren, wenn das extrahierte Protein in formulierte Lebensmittel mit einer Vielzahl anderer Inhaltsstoffe aufgenommen wird. Die Übertragung der Enzymaktivität aus dem EAE-Verfahren kann sich auf die Haltbarkeit des Inhaltsstoffs selbst und auf formulierte Lebensmittel, die den Inhaltsstoff enthalten, auswirken. Außerdem verursacht die Verwendung von Enzymen zusätzliche Kosten für das Extraktionsverfahren, die im Vergleich zu herkömmlichen Verfahren zur Proteinextraktion möglicherweise nicht kosteneffizient sind.

Sie fügen weiter an, dass die Zusammensetzung der Zellwand und der zellulären Polysaccharide bzw. Proteine zwischen den verschiedenen Pflanzenspezies erheblich variiert und daher eine sorgfältige Auswahl spezifischer Enzyme für jede Pflanzenquelle erforderlich ist. Darüber hinaus können Rohenzympräparate Nebenaktivitäten enthalten, die die Eigenschaften der extrahierten Proteine verändern können, und es kann zu Unstimmigkeiten zwischen den einzelnen Chargen in Bezug auf die Enzymaktivitäten kommen.

Als abschließende Bewertung geben die Autoren an, dass die EAE von Proteinen mit einer längeren Verarbeitungszeit, höheren Betriebskosten und einem hohen Energieverbrauch verbunden ist. Sie ist außerdem durch eine irreversible Störung der Kohlenhydrat-Protein-Matrix gekennzeichnet und erfordert eine sorgfältige Optimierung der Prozessparameter, z. B. pH-Wert und Temperatur. Dennoch gilt sie als schonendere Extraktionsmethode mit geringerem ökologischem Fußabdruck im Vergleich zu säure- und alkaligestützten Extraktionsverfahren. Darüber hinaus zeichnen sich die auf diese Weise gewonnenen Produkte durch eine höhere Qualität aus, sind gut konserviert und für den menschlichen Verzehr besser geeignet.

Mit der EAE-Technologie lässt sich auch Insektenprotein gewinnen (Zafar et al., 2024). Zhang, Boateng & Xu (2024) bringen an, dass in der Algenmatrix komplexe Polysaccharide wie Alginate, Carrageen und Uronsäuren enthalten sind. Dadurch stellen diese Verbindungen eine widerstandsfähige physikalische Barriere dar, die die Extraktion von Proteinen erschwert. Es wurden Enzyme eingesetzt, um die Effizienz der Extraktion zu erhöhen, insbesondere Polysaccharasen wie Arabase, Cellulase und β -Glucanase. Trotz dieser Herausforderungen schließen die Autoren, dass der

enzymatische Abbau von Zellwandpolymeren sich als attraktivere Alternative zu mechanischen und chemischen Abbaumethoden erwiesen hat.

Zhang et al. (2024) äußern trotz der erwiesenen Effizienz der enzymatischen Extraktion jedoch Bedenken hinsichtlich der hohen Kosten der Enzyme und der begrenzten Extraktionsbedingungen, die für großtechnische Anwendungen eine wirtschaftliche Herausforderung darstellen.

Zusammenfassend kann die EAE-Technologie als mild, ungiftig und umweltfreundlich bezeichnet werden, da im Vergleich zu chemischen und physikalischen Extraktionsverfahren relativ wenig chemische Abfälle anfallen. Die Extraktion kann in kürzerer Zeit durchgeführt werden, wobei eine ähnlich hohe Ausbeute an Proteinen erzielt werden kann (Kleekayai et al., 2023).

4.4 High Pressure Processing / High Pressure Homogenisation

High Pressure Processing (HPP) ist laut Alasi et al. (2024) eine innovative nichtthermische Technologie, bei der unter kontrollierten Temperatur- und Zeitbedingungen hydrostatische Drucke von bis zu 1000 MPa auf ein Lebensmittelprodukt ausgeübt werden. HPP kann bei Temperaturen von unter 0 °C bis über 100 °C eingesetzt werden, um adiabatische Wärmeeffekte abzuschwächen. Diese Druckbehandlung verändert das das Volumen des Lebensmittelmaterials mit dem Ergebnis einer verbesserten Textur.

HPP modifiziert Proteinmoleküle durch Aufbrechen, Entfaltung, Denaturierung und Aggregation und verbessert so ihre strukturellen Eigenschaften (siehe Abbildung 4).

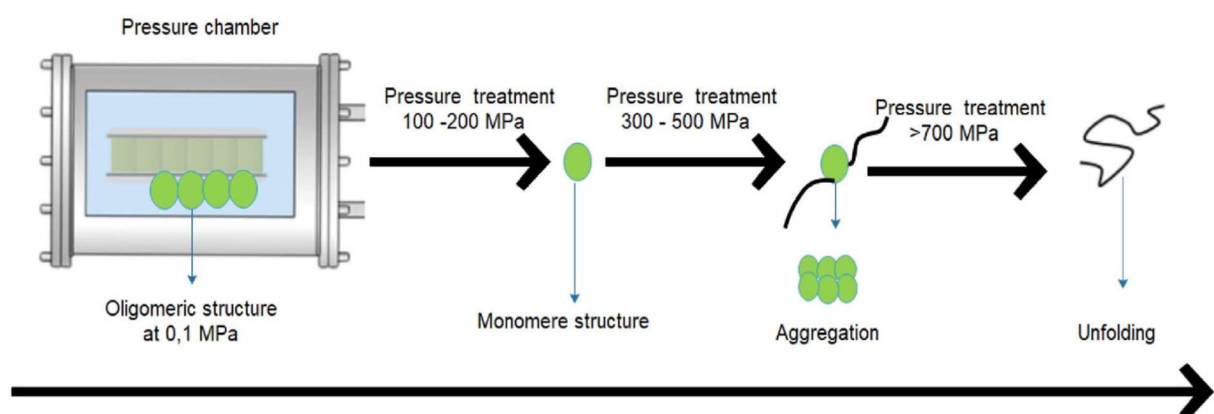


Abbildung 4: HPP-Verfahren (Quelle: Alasi et al., 2024)

Zhang, Boateng & Xu (2024) beschreiben, dass HPP die Wasserstoffbrückenbindungen destabilisieren und die elektrostatischen Wechselwirkungen zwischen Proteinen stören kann. Diese Effekte

führen zur Denaturierung, Konformationsänderung, Aggregation oder Gelierung von Proteinen. Darüber hinaus hat sich gezeigt, dass HPP die Sekundär-, Tertiär- und Quartärstrukturen von Proteinen beeinflusst. Diese strukturellen Veränderungen legen hydrophobe Gruppen frei, die zuvor in den inneren Regionen des Proteins verborgen waren. Infolgedessen wird die Hydrophobizität der Proteinoberflächen verbessert, was zu einer besseren Verdaulichkeit des Proteins führt. Der Druckbereich, in dem HPP angewandt wird, ist variabel und reicht von 100 bis 600 MPa. Am unteren Ende dieses Bereichs, d. h. bei 100 MPa, kann es zu einer teilweisen Denaturierung von Proteinen kommen. Umgekehrt können höhere Drücke von mehr als 300 MPa zum Proteinabbau und zum Zusammenbruch der Gel-Netzwerkstruktur führen. Darüber hinaus können Drücke von mehr als 400 MPa zu einer Verringerung der Proteinhydrophobie führen, während das Erreichen von 500 MPa die Bildung von Aggregaten und Proteinausfällungen zur Folge haben kann.

Auch bei Algen bricht HPP die Struktur der Zellwand effektiv auf und löst sie auf. Durch das Aufbrechen der Zellwand wird die Zugänglichkeit der Enzyme zu Substraten wie Zellulose verbessert, was zur Freisetzung von Proteinen führt (Zhang, Boateng & Xu, 2024).

Alasi et al. (2024) schlussfolgern, dass HPP großes Potenzial für die Veränderung von Lebensmittelstrukturen, insbesondere bei Makromolekülen wie Proteinen, durch druckinduzierte Denaturierung gezeigt hat. Dieser Prozess modifiziert die Proteinfunktionalität und verbessert Eigenschaften wie Löslichkeit, Wasserrückhalt, Emulgierung, Schaumbildung und Gelbildung. Weiter führen die Autoren aus, dass die Auswirkungen von HPP auf andere funktionelle Eigenschaften wie Emulsionsbildung und Schaumbildung jedoch variieren können, wobei Verbesserungen, Verringerungen oder keine Veränderungen beobachtet werden können. Diese Variabilität hängt von Faktoren wie dem Proteintyp, den Lösungsbedingungen und den Verarbeitungsparametern, einschließlich des angewandten Drucks, ab. Bei einem Druck von über 200 MPa werden die Sekundär- und Tertiärstrukturen der Pflanzenproteine durch Proteindenaturierung und Aggregation erheblich verändert. Die Autoren fassen zusammen, dass die Hochdruckverarbeitung bedeutende Verbesserungen für pflanzliche Proteine bietet, wie z. B. verbesserte funktionelle Eigenschaften und eine erhöhte Verdaulichkeit bei gleichzeitiger Reduzierung von Allergenität und antinutritiven Faktoren. Allerdings ist es wichtig, die Wechselwirkung dieser Proteine mit Tensiden und ihr Adsorptionsverhalten weiter zu untersuchen, um die gewünschte Funktionalität, wie z. B. emulgierende und schäumende Eigenschaften für bestimmte Anwendungen, zu erreichen.

Hadidi et al. (2024) merken an, dass die Auswirkungen von HPP auf die Proteineigenschaften nicht allgemeingültig sind, da sie stark von den spezifischen Merkmalen des Proteins, wie z. B. seiner Art und Konzentration, sowie von externen Faktoren, z. B. pH-Wert, Ionenstärke und dem Vorhandensein von Co-Soluten, beeinflusst werden. Außerdem können die Auswirkungen von HPP je nach den spezifischen Bedingungen, unter denen es angewendet wird, variieren.

Ebenso berichten Zhang, Boateng & Xu (2024) über die Wirksamkeit des Verfahrens, das stark von den spezifischen Eigenschaften des Enzyms sowie der Zellstruktur und dem Zellgehalt der Algenarten abhängt. Außerdem sind weitere Forschungsarbeiten erforderlich, um die Durchführbarkeit und Wirksamkeit von HPP als gezielten Ansatz für die Extraktion mariner Proteine zu bewerten.

Die Hochdruckhomogenisierung (HPH) ist ein weiteres Hochdruckverfahren, bei dem eine Flüssigkeit mit einem Druck von 50 bis 200 MPa durch einen engen Spalt gedrückt wird. Dieser Prozess führt zu einer starken Scherung und Turbulenz, die zum Bruch, zur Denaturierung und zur Aggregation von Proteinmolekülen führt (Wang, Miao & Sun, 2024). Diese Technologie wird in der Lebensmittelverarbeitung immer beliebter, da sie die funktionellen Eigenschaften von Pflanzenproteinen verbessern kann. HPH führt nämlich zu einer einheitlichen Partikelgrößenverteilung und verbessert die Funktionalität der Pflanzenproteine. Eine kleinere Partikelgröße, die durch HPH erreicht wird, erhöht die Löslichkeit und verbessert die Emulgier- und Schaumbildungseigenschaften, z. B. bei Haselnuss- und Linsenproteinen, die unter 100 MPa Druck behandelt wurden, zu sehen ist (Alasi et al., 2024).

Wang, Miao & Sun (2024) haben die Auswirkung von HPH auf die Struktur von Quinoaprotein untersucht und weisen darauf hin, dass die Anwendung der HPH-Technologie zur Entfaltung von Quinoa-Proteinen und zu einer Erhöhung der Hydrophobizität führen kann. Die Oberflächenhydrophobie von Proteinen nimmt mit zunehmendem Druck zu. Eine HPH-Behandlung kann die Sekundärstruktur der Quinoa-Proteine verändern. Die HPH-Behandlung (30 - 150 MPa) erhöhte das β -Faltblatt und reduzierte die α -Helix und β -Schleife der Quinoa-Proteine. Darüber hinaus kann sie die techno-funktionellen Eigenschaften der Quinoa-Proteine verbessern. Die Quinoa-Proteine weisen durch die HPH-Behandlung eine höhere Löslichkeit, eine bessere Emulgier- und Schaumbildungsfähigkeit und stärkere Gelieigenschaften auf, was auf der Entfaltung und der Verringerung der Partikelgröße der Proteine beruht.

Die Hochdruckhomogenisierung ist eine praktikable und effiziente Methode zur Proteinmodifizierung, die die Vorteile hat, wirtschaftlich, umweltfreundlich, sicher, wiederholbar und skalierbar zu sein (Zheng et al., 2024).

Durch den hohen Energie- und Kostenbedarf der vorgestellten HPP-Technologien ist ihr Einsatz auf Produkte mit hoher Wertschöpfung beschränkt. Die kommerzielle Anwendung von HPH befindet sich noch in der Entwicklung und aufgrund der technischen Herausforderungen sind weitere wichtige Entwicklungen erforderlich, um Systeme im industriellen Maßstab zu entwickeln. Im Vergleich zur konventionellen Extraktion sind Technologien wie HPP bzw. HPH sehr vielversprechend, da sie die Extraktion von Proteinen verbessern können, indem sie den Einsatz von Lösungsmitteln und die Extraktionszeit verringern und den Einsatz von Wärme vermeiden, aber auch die Qualität des

Proteinextrakts verbessert. Somit stellen die vorgestellten Technologien umweltfreundliche Alternativen im Vergleich zur konventionellen Extraktion dar (Marciniak & Doyen, 2023).

4.5 Pulsed Electric Field

Bei der Pulsed Electric Field-Technologie (PEF) handelt es sich um eine elektrische Kurzzeitbehandlung. Dabei werden kurze elektrische Impulse mit hohen Amplituden (von 100 bis 300 V/cm bis 10 - 50 kV/cm) mit einer Dauer von einigen Nanosekunden bis zu einigen Millisekunden eingesetzt, um strukturelle Veränderungen in der Proteinmatrix zu bewirken. PEF induziert den Zusammenbruch von Zellmembranen und erleichtert die Kaltdiffusion von intrazellulärem Material. Als nicht-thermische Behandlung wird PEF häufig für die Proteinextraktion eingesetzt, da sie unerwünschte Veränderungen in biologischen Materialien minimiert (Hadidi et al., 2024).

Während der PEF-Behandlung interagiert das elektrische Feld mit den polaren Gruppen der Proteine, absorbiert Energie und erzeugt freie Radikale. Diese freien Radikale beeinflussen die Wechselwirkungen innerhalb der Proteinmoleküle, einschließlich hydrophober und elektrostatischer Wechselwirkungen, Disulfidbrücken, Wasserstoffbrücken, Salzbrücken und Van-der-Waals-Kräfte, um ein stabilisiertes Proteinsystem zu bilden. Darüber hinaus können PEF-Behandlungen die Ladung von Proteinen verändern, indem sie ihre ionischen Wechselwirkungen modifizieren. Das erzeugte starke elektrische Feld an den Zellmembranen bewirkt die Erleichterung der Proteinextraktion. Darüber hinaus führt PEF zu Veränderungen der sekundären und tertiären Proteinstrukturen, während nicht-kovalente Bindungen aufgebrochen werden, was die Funktionalität der Proteine verbessert. Die PEF-Technologie kann entweder schwere Zellschäden verursachen oder durch die vorübergehende Permeabilisierung von Zellmembranen und die elektrophoretische Bewegung geladener Substanzen zwischen Zellkompartimenten subletalen Stress auslösen. Dies macht die PEF zu einem wertvollen Instrument für die selektive Rückgewinnung wertvoller Verbindungen, ohne das behandelte Material zu beeinträchtigen, und vereinfacht die anschließenden Trennungs- und Reinigungsverfahren (Alasi et al., 2024).

Die Anwendung von PEF als Vorbehandlungsmethode für die Proteinextraktion kann die Menge an organischen Lösungsmitteln, die Zeit und die Temperatur, die für den Prozess erforderlich sind, erheblich reduzieren. Die Proteinextraktion kann bei 40 °C innerhalb der ersten 20 Minuten des Prozesses erreicht werden, was das Potenzial dieser Technik für die industrielle Nutzung unterstreicht. Bei optimalen Werten für die elektrische Feldstärke (4 kV/cm) und die Pulsbreite (120 µs) kann die PEF herkömmliche alkalische Extraktionsmethoden deutlich übertreffen. Studien zufolge führte diese zu einem Anstieg der Proteinausbeute um 10,58 Prozent (Hadidi, et al., 2024).

Auch Zheng et al. (2024) unterbreiten, dass ein elektrisches Feld eine Polarisierung der Proteine bewirken und die Tertiärstruktur der Proteine durch Beeinflussung der hydrophoben Wechselwirkungen stören, die Streckung der Proteinmoleküle fördern und dadurch Eigenschaften wie Löslichkeit und Schaumbildung verbessern kann.

Alasi et al. (2024) haben gezeigt, dass die PEF-Behandlung von Mandelmilch sich auf ihre physikalischen, chemischen und physikochemischen Eigenschaften auswirkte, indem sie die Partikelgröße verringerte und die Emulsionsstabilität erhöhte. Die Auswirkungen der PEF auf die funktionellen Eigenschaften hängen jedoch vom Proteintyp ab. Niedrige Stromstärken (<10 kV/cm) haben nur minimale Auswirkungen auf Proteine.

Zhang, Boateng & Xu (2024) legen dar, dass die Anwendung der PEF-Technik die Geschwindigkeit und Ausbeute der Proteinextraktion erhöht und gleichzeitig die Qualität des extrahierten marinen Proteins bewahrt. Außerdem waren die emulgierenden Eigenschaften bei PEF-extrahiertem Protein höher als bei enzymatischem. Darüber hinaus kann PEF die Schaumbildung und die Viskosität der extrahierten Proteine potenziell verringern. Sie beschreiben die Methode als deutlich schneller (niedrigste Extraktionszeit) als konventionelle Methoden. Allerdings besitzen Mikroalgenarten eine Zellwand, die widerstandsfähiger ist, die eine geringere Ausbeute der Proteinextraktion herbeiführt.

Die Autoren erläutern, dass die Integration der PEF mit anderen Technologien zur Gewinnung von Meeresproteinen sich noch im Anfangsstadium befindet und schlussfolgern, dass weitere Untersuchungen erforderlich sind, um eine umfassende industrielle Nutzung (Wirksamkeit und Kosteneffizienz) zu bestätigen. Darüber hinaus sind weitere Forschungen erforderlich, um die günstigsten Parameter für dieses Verfahren zu ermitteln, um die Menge und die Qualität der gewonnenen Proteine zu optimieren.

4.6 Präzisionsfermentation

Die drei wichtigsten Fermentationsverfahren, die üblicherweise für pflanzliche Produkte eingesetzt werden, sind die Präzisionsfermentation, die traditionelle Fermentation und die Biomassefermentation. Unter ihnen sticht die Präzisionsfermentation (PF) als bedeutender Trend in der Lebensmittelindustrie hervor. Bei der Präzisionsfermentation werden Mikroorganismen mit Methoden der synthetischen Biologie so programmiert, dass sie zu Zellfabriken werden und funktionelle Inhaltsstoffe für den Lebensmittelsektor produzieren. Die Auswahl des rekombinanten Wirtsmikroorganismus und die Entwicklung spezifischer Stämme haben das Potenzial, Mikroben zu entwickeln, die in der Lage sind, die gewünschten Moleküle in ausreichender Menge zu exprimieren und zu produzieren. Dazu müssen geeignete Fermentationsbedingungen verwendet werden, um die Produktionseffizienz zu maximieren. Mikrobielle Wirte werden bevorzugt, da sie sich leicht genetisch manipulieren lassen

und mit standardisierten Fermentationsanlagen kompatibel sind. Im Hinblick auf Lebensmittelanwendungen werden Mikroorganismen bevorzugt, die allgemein als sicher oder nicht schädlich gelten. Bei der Entwicklung spezifischer Stämme werden häufig gutartige Bakterien, Hefen oder Fadenpilze verwendet (Alasi et al., 2024). Veranschaulicht wird der Ablauf einer Präzisionsfermentation in Abbildung 5.

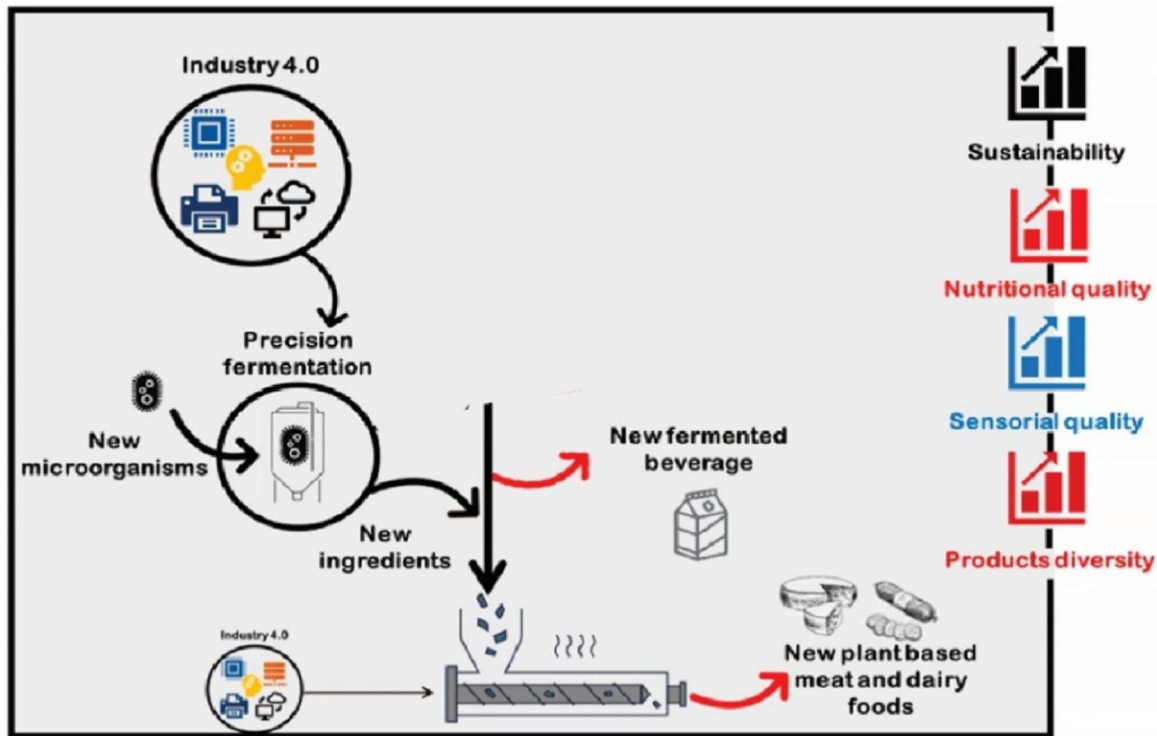


Abbildung 5: Präzisionsfermentation von Pflanzenprotein (Quelle: Alasi et al., 2024)

Die aus den Mikroorganismen produzierten Proteine wie Chymosin (Rennin), β -Lactoglobulin oder Casein lassen sich für die Produktion von Alternativprodukten für Käse, Eiscreme, Joghurt oder Milch nutzen. Eine Herausforderung besteht jedoch hinsichtlich der Kosten für die Herstellung der rekombinanten Proteine. (Wood & Tavan, 2022).

Dennoch ist die Präzisionsfermentation eine vielversprechende Technik zur Herstellung von Zielproteinen, die denen aus der traditionellen Landwirtschaft sehr ähnlich sind. Die PF bietet Herstellern von Fleisch- und Milchprodukten auf pflanzlicher Basis mehr Möglichkeiten zur Herstellung von Produkten, die die sensorischen Eigenschaften von traditionellen Fleisch- und Milchprodukten imitieren (Alasi et al., 2024)

4.7 Microwave-Assisted Extraction

Die Microwave-Assisted Extraction (MAE) macht sich polare Substanzen in den Zellen zunutze, um Mikrowellenenergie zu absorbieren, was zu einem schnellen Temperaturanstieg führt. Infolgedessen verdampft das Wasser in den Zellen, was zu einem Anstieg des Innendrucks führt. Diese abrupte Druckänderung wirkt sich auf die Zellmembran und die Zellwand aus und reißt sie auf, wodurch die extrahierten Substanzen aus dem System gelöst werden (Zhang, Boateng & Xu, 2024).

Peñas, Hernandez-Ledesma & Martinez-Villaluenga (2023) beschreiben eine Reihe von Schritten, die während der MAE stattfinden (siehe Abbildung 6): Auf das Eindringen des Lösungsmittels in die feste Matrix folgt der Abbau der Wechselwirkung der gelösten Stoffe mit der Probenmatrix. Daraufhin findet die Solubilisierung der gelösten Stoffe aus der Probenmatrix in das Lösungsmittel und die interne Diffusion des Extrakts durch die Probenmatrix statt. Nach der externen Diffusion des Extrakts aus der Matrix in den Feststoff folgt die Trennung und Entladung von Extrakt und Feststoff. Somit bricht in der Pflanzenmatrix, die einer Mikrowellenbestrahlung ausgesetzt ist, die Dipolrotation die Wasserstoffbrückenbindungen auf, während die Ionenwanderung das Eindringen des Lösungsmittels in die Matrix und die Solubilisierung des intrazellulären Materials in das Lösungsmittelmedium begünstigt. Die Pflanzenmatrix enthält Wasser (polares Lösungsmittel), weshalb die Mikrowellenenergie schnell absorbiert wird, was zu einer internen Überhitzung führt, die sich in einer schnellen Verdampfung, einem hohen intrazellulären Druck und einer zellulären Zerstörung in der Pflanzenmatrix fortsetzt.

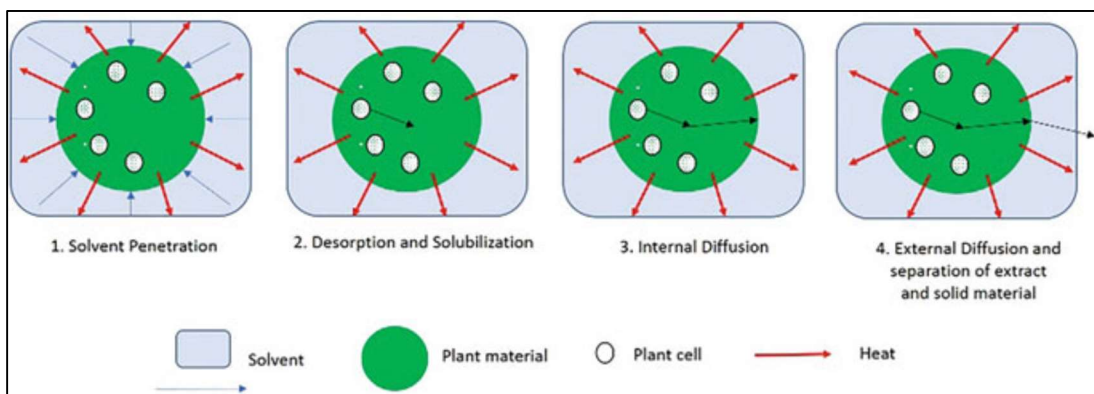


Abbildung 6: Mechanismen der Wärme- und Stoffübertragung bei der MAE ((Quelle: Hernández-Álvarez, Mondor & Nosworthy, 2023, S.213)

Die MAE bietet sich sowohl für die Extraktion von Pflanzen- als auch Insektenproteinen an (Zhang et al., 2024; Zafar et al., 2024). Auch stellt sie eine vielversprechende Technologie zur Extraktion

von Proteinen aus marinen Quellen, einschließlich Grünalgen, Braunalgen und Mikroalgen, dar (Zhang, Boateng & Xu, 2024).

Sie hat im Vergleich zur konventionellen Extraktion große Vorteile, wie z. B. eine höhere Extraktionsausbeute, eine kürzere Extraktionszeit und eine Reduzierung des Energieverbrauchs und des Lösungsmittelverbrauchs. Die höhere Effizienz der MAE im Vergleich zu konventionellen Extraktionsmethoden ist das Ergebnis der synergetischen Wirkung von Wärme- und Stoffübertragung, die in dieselbe Richtung erfolgen. Außerdem wird die Wärme volumetrisch innerhalb der festen Matrix abgeführt (Peñas, Hernandez-Ledesma & Martinez-Villaluenga, 2023).

Zhang, Boateng & Xu (2024) äußern, dass die MAE bedeutende Vorteile wie eine kurze Extraktionsdauer, minimalen Energieverbrauch, Kosteneffizienz und hohe Effizienz bietet. Allerdings erzeugt die Mikrowellenbehandlung erhebliche thermische Energie, die zum Abbau wärmeempfindlicher bioaktiver Verbindungen führen kann. Daher ist es unerlässlich, die Temperaturparameter während des Extraktionsprozesses genau zu kontrollieren.

4.8 Ultrasound-assisted Extraction

Bei der Ultraschall-Technologie werden Schallwellen mit einer Frequenz von 20 kHz eingesetzt, um eine Kavitation auszulösen, damit die Porosität der Matrix durch die Bildung von Mikrorissen und Kanälen erhöht und so das Eindringen von Lösungsmitteln verbessert wird (Hadidi et al., 2024).

Die Ultraschalltechnologie hat als neuartiger Ansatz das Potenzial, die Struktur und die funktionellen Eigenschaften zu beeinflussen und gleichzeitig die ökologische Nachhaltigkeit zu fördern. Hochintensiver Ultraschall ist eine schnelle, kostengünstige Technologie zur Veränderung der strukturellen und funktionellen Eigenschaften globulärer Proteine (Alasi et al., 2024). Auch Zheng et al. (2024) legen dar, dass die Ultrasound-Assisted Extraction (UAE) eine Verbesserung der Extraktionseffizienz und der Qualität der alternativen Proteine ermöglicht.

Liang et al. (2024) stellen heraus, dass die UAE die Helligkeit des extrahierten Insektenproteins verbessert, die Löslichkeit des Proteins erhöht und die antioxidative Aktivität des Extrakts verbessert. Diese Ergebnisse weisen auf den potenziellen Einsatz von Ultraschall und anderen physikalischen Methoden zur Verbesserung der Proteinextraktion aus essbaren Insekten hin.

Die Anwendung von Ultraschall in Extraktionsprozessen bietet laut Hadidi et al. (2024) mehrere Vorteile, z. B. effizienteres Mischen, schnelle Energieübertragung, selektive Extraktion, geringere thermische Gradienten und Extraktionstemperaturen, kleinere Anlagen, schnelleres Ansprechen auf die Extraktionssteuerung, schnellere Inbetriebnahme und höhere Produktion. Dennoch kann es auch zu Veränderungen der Proteinstruktur und der funktionellen Eigenschaften führen. Die Verwendung

von Hochleistungsbeschallung und längerer Beschallung kann zur Denaturierung von Proteinen und zu einer Abnahme der Emulgier- und Schaumbildungsfähigkeit führen. Es hat sich außerdem gezeigt, dass die Wirksamkeit der UAE maximiert und ihre nachteiligen Auswirkungen minimiert werden, wenn sie mit anderen Techniken kombiniert werden.

4.9 Air Classification

Bei der Luftklassifizierung handelt es sich um ein Mahlverfahren, das die leichte Fraktion (Protein) des Feinmehls von der schweren Fraktion (Stärke) trennt. Bei dieser Methode werden ganze oder geschälte Samen zu feinem Mehl gemahlen und das Mehl anschließend in einem spiralförmigen Luftstrom klassiert, um die Stärke vom Eiweiß zu trennen, was mehrmals wiederholt werden kann (Tahari, Abdolalizadeh & Hedayati, 2024).

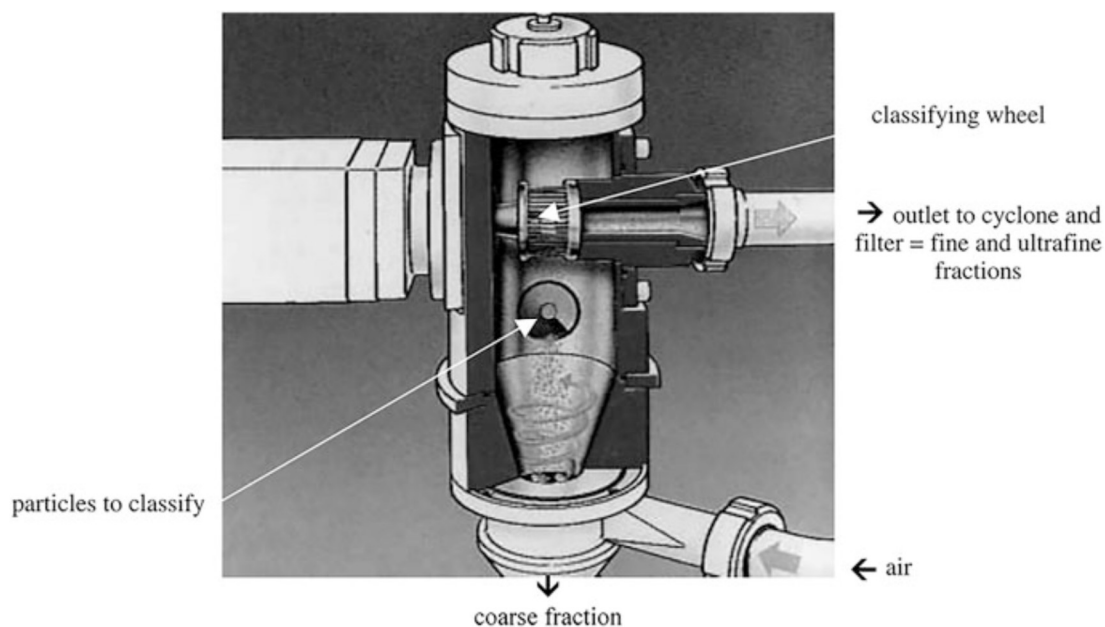


Abbildung 7: Schematische Darstellung der Luftklassifizierung (Quelle: Hernández-Álvarez, Mondor & Nosworthy, 2023, S.34)

Tabtabaei et al. (2023) beschreiben, dass zunächst kleine Proteinpartikel durch Trockenmahlen physikalisch von großen Stärkekörnern oder anderen Nicht-Stärke-Polysacchariden und Fasern getrennt werden. Anschließend wird die proteinreiche Fraktion (leichte Feinfraktion) von den stärke- oder faserreichen Fraktionen (schwere Grobfraktion) in einem zirkulierenden Luftstrom anhand der Größe und Dichte der Partikel getrennt (siehe Abbildung 7).

Die Autoren erläutern, dass luftklassifizierte proteinangereicherte (feine) Fraktionen ihre native Biofunktionalität während des Trockenmahls und der Luftklassifizierung bewahren können und nachweislich einen höheren Stickstofflöslichkeitsindex (NSI), bessere Emulgier-, Gelier- und

Schaumeigenschaften als Mehl und luftklassifizierte stärkereiche (grobe) Fraktionen, aber auch als Proteinisolate und -konzentrate, die durch Nassfraktionierung gewonnen werden, besitzen.

Weiter führen Tabtabaei et al. (2023) aus, dass einer der Hauptvorteile der Luftklassifizierung als Trockenfraktionierungsverfahren der fehlende Zusatz von Lösungsmitteln und chemischen Reagenzien ist, wie er bei herkömmlichen Nassfraktionierungsverfahren üblich ist. Bei der Trockenfraktionierung bleiben die natürliche Struktur und Funktionalität der Bestandteile erhalten. Gleichzeitig haben die durch Luftklassifizierung gewonnenen proteinreichen Fraktionen eine bessere Aufschlagbarkeit, Schaumstabilität und Emulgierung gezeigt. Diese Eigenschaften können somit für die weitere Verarbeitung genutzt werden, z. B. zur Optimierung des Nährwerts, der Textur, der Zugänglichkeit und der Konservierungsfähigkeit. Da es sich bei der Luftklassifizierung um ein trockenes Fraktionierungsverfahren handelt, fallen keine Abwässer an, die weiter behandelt und entsorgt werden müssen. Ebenfalls ist dadurch das Risiko mikrobieller Verunreinigungen geringer als bei Nassfraktionierungsverfahren. Die Luftklassifizierung ist darüber hinaus im Vergleich zu herkömmlichen Nassfraktionierungsverfahren sehr viel energieeffizienter.

Sie sprechen allerdings auch einige Nachteile und Einschränkungen für die Luftklassifizierung im Vergleich zu herkömmlichen Nassverfahren an. Die Reinheit der Proteine ist bei der Luftklassifizierung im Durchschnitt geringer als bei der Nassfraktionierung, da einige feine und grobe Partikel aufgrund zufälliger physikalischer Faktoren wie Luftturbulenzen und Kollisionen zwischen den Partikeln in die falsche Fraktion gelangen können. Der Erfolg der Luftklassifizierung zur Herstellung von Proteinkonzentraten hängt in hohem Maße von der erfolgreichen Entflechtung der pflanzlichen Zellbestandteile durch die Vermahlung ab, was bedeutet, dass die Art der Vermahlung und die Betriebsbedingungen die Effizienz des Luftklassifizierungsprozesses beeinflussen können. Die Luftklassifizierung könnte auch nicht in der Lage sein, verschiedene Partikel (stärke-, protein- und faserreiche Fraktionen) ähnlicher Größe und Dichte zu trennen. Darüber hinaus kann der hohe Fettgehalt einiger Rohstoffe die Trockenverarbeitung behindern, da die Partikel schlechter dispergierbar sind oder das Material an den Mahl- oder Fraktionieranlagen haftet. Daher müssen fettreiches Material vor dem Mahlen und der Windsichtung entfettet werden. Somit müssen bei fettreichem Material die Vorverarbeitungs- und Entfettungsschritte, die Wartung, z. B. die regelmäßige Reinigung, und die damit verbundenen Kosten berücksichtigt werden. Es ist auch wichtig zu beachten, dass die Vorbehandlung kostspieliger sein und zur Verlängerung der Betriebszeit führen kann. Die Effizienz des Vermahlungsprozesses, d. h. der Entflechtung von Eiweiß- und Stärkekörpern, sowie des Luftklassifizierungsprozesses hängt ebenfalls vom Feuchtigkeitsgehalt ab. Im Allgemeinen wird ein niedriger Feuchtigkeitsgehalt bevorzugt. Ein hoher Feuchtigkeitsgehalt wirkt sich ebenfalls negativ auf die Effizienz des Fraktionierungsprozesses aus, da die stärke-, faser- und proteinreichen Partikel zusammenklumpen. Zusätzlich können sich die Proteinkörper während des Vorweichens auflösen, was die Effizienz der Windsichtung durch Verringerung der Partikeldichte verringert.

Tahari, Abdolalizadeh & Hedayati (2024) befürworten, physikalische Isolierungsmethoden, wie die Luftklassifizierung, aufgrund ihrer geringeren wirtschaftlichen und gesundheitlichen Bedenken den chemischen oder enzymatischen Methoden vorzuziehen. Die Luftklassifizierungsmethode benötigt weniger Wasser und Energie als die herkömmlichen Extraktionsverfahren, ohne dass sich die Proteinstruktur und -funktionalität nachteilig verändert. Allerdings ist diese Methode noch nicht für die Herstellung hochreiner Proteinisolate geeignet.

Ebenfalls bestätigen Zhang et al. (2024), dass bei der Trockenextraktion fast kein Wasser verbraucht wird und der natürliche Zustand der gewonnenen Proteine erhalten bleibt, so dass sie als nachhaltige Methode der Proteinextraktion angesehen werden kann. Allerdings ist der mit der Trockenextraktionsmethode gewonnene Proteingehalt im Vergleich zu den Nassextraktionsmethoden gering und beträgt maximal 60 Prozent. Der niedrige Proteingehalt des mit dieser Methode gewonnenen Produkts ist hauptsächlich auf das Verfahren zurückzuführen, d. h. auf das Mahlen und die Windsichtung, bei dem das Prinzip angewandt wird, dass die Proteinpartikel nicht die gleiche Größe wie die anderen Bestandteile haben, um das Protein abzutrennen. Außerdem ist das Trockenextraktionsverfahren durch die Komplexität der Zusammensetzung der verschiedenen pflanzlichen Quellen und die derzeitigen Mahl- und Klassifizierungsverfahren begrenzt. Dennoch ist die Trockenextraktion aufgrund ihrer geringen Kosten und der potenziellen Energieeinsparungen vielversprechend für die industrielle Nutzung, obwohl sie durch den geringeren Reinheitsgrad des Proteinprodukts eingeschränkt ist.

5 Diskussion

Als Reaktion auf den wachsenden Trend zu Fleischersatzprodukten, tierischen Milchalternativen und anderen alternativen Lebensmitteln ist die Lebensmittelindustrie auf der Suche nach sowohl hochwertigen alternativen Proteinen und neuen Technologien zur Gewinnung dieser Produkte. Die vorliegende Literaturrecherche verdeutlicht das starke Interesse an der Forschung zur Herstellung der dafür notwendigen alternativen Proteine.

5.1 Ergebnisse

Methoden wie die alkalische/isoelektrische Fällung und die Luftklassifizierung sind gut etabliert und durch ihre Eignung zur Aufreinigung von Proteinen charakterisiert. Aufgrund der steigenden Nachfrage nach alternativen Proteinen wird auch an der Entwicklung und Optimierung von umweltfreundlicheren Methoden zur Proteinextraktion gearbeitet. Zu den neueren Verfahren gehören unter anderem Hochdruckverfahren, enzymunterstützte Extraktion, mikrowellenunterstützte Extraktion und ultraschallunterstützte Extraktion. Mit diesen Methoden können (hochreine) Proteine mit signifikanten Ausbeuten extrahiert werden.

Bei der Extraktion eines bestimmten Proteins müssen jedoch verschiedene Faktoren berücksichtigt werden, wie z. B. die Proteinquelle, die Endanwendung und die Eigenschaften des resultierenden Proteinextrakts, einschließlich der Proteinreinheit und der spezifischen funktionellen Eigenschaften. Neben der Erzielung einer hohen Proteinextraktionsbeute spielen ebenfalls die Minimierung der Reinigungsschritte und die damit verbundenen Kosten eine Rolle. Darüber hinaus spielt die Struktur von Proteinen eine entscheidende Rolle. Proteine, die aus verschiedenen Quellen wie Pflanzen, Insekten, Algen, Bakterien und Pilzen stammen, weisen einzigartige strukturelle Eigenschaften auf, die berücksichtigt werden müssen. Die Erhaltung der Proteinfunktionalität und des Nährwerts bei gleichzeitiger Entfernung von Antinährstoffen und die Minimierung der Umwelt- und Gesundheitsbelastungen stellen eine Herausforderung dar.

Insgesamt deuten die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit darauf hin, dass die vorgestellten innovativen Methoden eine wertvolle Ergänzung für den Bereich der Pflanzenproteinextraktion darstellen und dass ihre breite Anwendung bei weiterer Entwicklung von großem Nutzen für die Entwicklung umweltfreundlicher Produkte sein wird. Dennoch befinden sich die meisten von ihnen noch in der Anfangsphase der kommerziellen Anwendung.

Die meisten der in der Literatur vorgestellten Beispiele und Ergebnisse beruhen auf Experimenten im Labormaßstab. Obwohl einige Autoren behaupten, dass sich die vorgeschlagenen Verfahren

effektiv vergrößern lassen, ist es schwierig, die Kosteneffizienz und wirtschaftliche Lebensfähigkeit des Gesamtverfahrens allein auf der Grundlage von Laborexperimenten zu bestimmen.

5.2 Methode

Der durchgeführten systematischen Literaturrecherche lag ein methodisches Vorgehen zugrunde. Aus Handrecherche und mithilfe der wissenschaftlichen Datenbank, *ScienceDirect*, sind Publikationen ermittelt worden, die zur Erreichung der Zielstellung herangezogen werden konnten.

Anhand der ausgewählten Suchergebnisse wurden die Hintergrundinformationen erarbeitet, jedoch kann nicht ausgeschlossen werden, dass weitere Suchbegriffe oder andere Suchstrategien eine größere Anzahl an relevanten Suchergebnissen erbracht hätten.

Aufgrund des vorgegebenen Zeit- und Ressourcenrahmens war es notwendig, die anfangs sehr hohe Trefferquote zu minimieren und hinsichtlich des Veröffentlichungszeitraumes Einschränkungen vorzunehmen. Somit wurden alle wissenschaftlichen Veröffentlichungen aus den Jahren vor 2024 nicht in die Literaturrecherche aufgenommen. Lediglich zwei der zur Zielerreichung genutzten Veröffentlichungen (Handrecherche) stammen aus den Jahren 2022 und 2023. Somit liegt es nahe, dass viele Publikationen mit inhaltlicher Relevanz nicht ermittelt wurden.

Die inhaltliche Sichtung der Literatur zeigte, dass sich die meisten der Publikationen für unterschiedliche und meist auf eine bestimmte Proteinquelle konzentrieren, beispielsweise zur Untersuchung von bestimmten Proteinen wie Reis- oder Amaranthproteine, und somit sehr spezifische Aspekte berücksichtigen. Allgemeingültige Aussagen ließen sich daher nur eingeschränkt formulieren. Aus diesem Grund dürfte damit eine Verzerrung der Ergebnisse einhergehen. Darüber hinaus konzentrieren sich die Autoren nicht primär auf Proteine, die für Milchersatzprodukte geeignet sind. Der Einsatz der untersuchten Proteine in verarbeiteten Lebensmitteln wird nur teilweise beleuchtet, sodass die Problematik entstand, klare Aussagen für Milchersatzprodukte zu formulieren.

Da keine weiteren Personen in die Bearbeitung der Zielstellung einbezogen wurden und die Festlegung der Ein- und Ausschlusskriterien sowie die Auswahl der Suchergebnisse nach subjektivem Ermessen der Autorin erfolgte, könnte es ebenfalls zu einem Ausschluss von relevanter Literatur oder zur Verzerrung der Ergebnisse gekommen sein.

6 Schlussfolgerungen

Mit der vorliegenden Arbeit konnte die Zielstellung erreicht werden und eine Auswahl an Proteinextraktionsmethoden, die zur Verfügung stehen, aufgezeigt werden. Eine Bewertung des Reifegrades der vorgestellten Technologien konnte ebenfalls durchgeführt werden. Während einige Methoden wie die alkalische/isoelektrische Fällung und die Luftklassifizierung gut etabliert sind, werden zur Befriedigung der Nachfrage nach Qualitätsproteinen bei gleichzeitiger Wahrung der ökologischen Nachhaltigkeit umweltfreundlichere Methoden zur Proteinextraktion entwickelt und optimiert. Zu diesen neueren Innovationen gehören z. B. die Hochdruckverarbeitung, die enzymunterstützte Extraktion, die mikrowellenunterstützte Extraktion und die ultraschallunterstützte Extraktion. Diese Methoden sind in der Lage, je nach Ausgangsmaterial Proteine mit erheblichen Ausbeuten zu extrahieren.

Die weitere Kommerzialisierung alternativer Proteine könnte in Zukunft vor allem auf pflanzlichen Proteinen basieren, da die Forschung an pflanzlichen Proteinen im Vergleich zu Insekten, Algen, Bakterien und Pilzen inzwischen intensiver ist und somit eine positive Grundlage für eine quantitative und qualitativ hochwertigere Entwicklung bildet.

Weitere Forschung könnte Informationen über den Nutzen neuartiger Proteine für die menschliche Gesundheit, das Potenzial für eine nachhaltige Proteinversorgung aus Proteinquellen und den Beitrag von Proteinquellen zur ökologischen Nachhaltigkeit liefern und wesentlich zur Entwicklung neuartiger alternativer Proteine beitragen und den Fortschritt auf dem Weg zu nachhaltigen Proteinzielen beschleunigen.

Welche Proteinprodukte sich auf Dauer durchsetzen und welche Rohwaren verstärkt von der Lebensmittelindustrie nachgefragt werden, hängt von den physikalisch-chemischen Eigenschaften der Proteine ab: Ob sie gut löslich sind, ob sie Gele bilden, aber auch von ihrem Geschmack und ihrer Farbe, ihrer Verfügbarkeit sowie vom Preis.

Literaturverzeichnis

- Alasi, S.O., Sanusi, M.S., Sunmonu, M.O., Odewole, M.M., & Adepoju, A.L. (2024). Exploring recent developments in novel technologies and AI integration for plant-based protein functionality: A review. *Journal of Agriculture and Food Research*, 15. doi:10.1016/j.jafr.2024.101036
- Aryee, A.N.A., Agyei, D., & Udenigwe, C.C. (2017). Impact of processing on the chemistry and functionality of food proteins. In R. Yada (Hrsg.), *Proteins in Food Processing* (S. 27-45). Cambridge: Woodhead Publishing.
- Bader-Mittermaier, S. (2022). Pflanzliche Proteinzutaten. Gewinnung, Eigenschaften und ernährungsphysiologische Bewertung. *Ernährungs Umschau*, 69(8), S. M444–53. doi:10.4455/eu.2022.026
- Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (1. März 2024). *Alternative Lebensmittel zu Fleischwaren und Milcherzeugnissen*. Abgerufen am 3. Mai 2024 von <https://www.bmel.de/DE/themen/verbraucherschutz/lebensmittelsicherheit/spezielle-lebensmittel/alternative-lebensmittel-fleisch-milch.html>
- Cruz-Solis, I., Ibarra-Herrera, C.C., del Refugio Rocha-Pizaña, M., & Luna-Vital, D. (2023). Alkaline Extraction–Isoelectric Precipitation of Plant Proteins. In A. Hernández-Álvarez, M. Mondor, & M. Nosworthy (Hrsg.), *Green Protein Processing Technologies from Plants. Novel Extraction and Purification Methods for Product Development* (S. 1-29). Cham: Imprint: Springer. doi:10.1007/978-3-031-16968-7
- Daniel, H. (2021). Wie alternativlos sind alternative Proteine? *Ernährungs Umschau*, 68(5), M 288–91.
- Europäisches Parlament (12. April 2023). *Was versteht man unter Klimaneutralität und wie kann diese bis 2050 erreicht werden?* Abgerufen am 30. März 2024 von <https://www.europarl.europa.eu/topics/de/article/20190926STO62270/was-versteht-man-unter-klimaneutralitat#:~:text=Mithilfe%20des%20Gr%C3%BCnen%20Deals%20soll,Rat%20im%20Jahr%202021%20rechtsverbindlich.>
- Hadidi, M., Aghababaei, F., Mahfouzi, M., Zhang, W., & McClements, D.J. (2024). Amaranth proteins: From extraction to application as nanoparticle-based delivery systems for bioactive compounds. *Food Chemistry*, 439. doi:10.1016/j.foodchem.2023.138164

- Hadidi, M., Tan, C., Assadpour, E., & Jafari, S.M. (2024). Oilseed meal proteins: From novel extraction methods to nanocarriers of bioactive compounds. *Food Chemistry*, 438. doi:10.1016/j.foodchem.2023.137971
- Hamatschek, J. (2021). *Lebensmitteltechnologie*, 2. Auflage. Stuttgart: Eugen Ulmer Verlag.
- Hernández-Álvarez, A.J., Mondor, M., & Nosworthy, M.G. (2023). *Green Protein Processing Technologies from Plants. Novel Extraction and Purification Methods for Product Development*. Cham: Imprint: Springer. doi:10.1007/978-3-031-16968-7
- Hewage, A., Olatunde, O.O., Nimalaratne, C., House, J.D., Aluko, R.E., & Bandara, N. (2024). Improved protein extraction technology using deep eutectic solvent system for producing high purity fava bean protein isolates at mild conditions. *Food Hydrocolloids*, 147. doi:10.1016/j.foodhyd.2023.109283
- Humpenöder, F., Bodirsky, B.L., Weindl, I., Lotze-Campen, H., Linder, T., & Popp, A. (2022). Projected environmental benefits of replacing beef with microbial protein. *Nature*, 605, 90-96. doi:10.1038/s41586-022-04629-w
- Ismail, I., Hwang, Y.H., & Joo, S.T. (2020). Meat analog as future food: a review. *Journal Of Animal Science and Technology*, 62(2), 111-120. doi:10.5187/jast.2020.62.2.111
- Kleekayai, T., Khalesi, M., Amigo-Benavent, M., Cermeño, M., Harnedy-Rothwell, P., & FitzGerald, R.J. (2023). Enzyme-Assisted Extraction of Plant Proteins. In A. Hernández-Álvarez, M. Mondor, & M. Nosworthy (Hrsg.), *Green Protein Processing Technologies from Plants. Novel Extraction and Purification Methods for Product Development* (S. 131-178). Cham: Imprint: Springer. doi:10.1007/978-3-031-16968-7
- Kompetenzzentrum für Ernährung - KErn (Hrsg), (Januar 2022). *Zukunft Ernährung: Alternative Proteinquellen. Literaturstudie zum aktuellen Forschungsstand*. .
- Liang, Z., Zhu, Y., Leonard, W., & Fang, Z. (2024). Recent advances in edible insect processing technologies. *Food Research International*, 182. doi:10.1016/j.foodres.2024.114137
- López, D.N., Galante, M., Robson, M., Boeris, V., & Spelzini, D. (2018). Amaranth, quinoa and chia protein isolates: Physicochemical and structural properties. *International Journal of Biological Macromolecules*, 109, 152-159. doi:10.1016/j.ijbiomac.2017.12.080
- Marciniak, A., & Doyen, A. (2023). High Pressure for Plant Protein Extraction. In A. Hernández-Álvarez, M. Mondor, & M. Nosworthy (Hrsg.), *Green Protein Processing Technologies from Plants. Novel Extraction and Purification Methods for Product Development* (S. 179-192). Cham: Imprint: Springer. doi:10.1007/978-3-031-16968-7

- Peñas, E., Hernandez-Ledesma, B., & Martinez-Villaluenga, C. (2023). Microwave-Assisted Extraction of Plant Proteins. In A. Hernández-Álvarez, M. Mondor, & M. Nosworthy (Hrsg.), *Green Protein Processing Technologies from Plants. Novel Extraction and Purification Methods for Product Development* (S. 211-236). Cham: Imprint: Springer. doi:10.1007/978-3-031-16968-7
- Schweiggert-Weisz, U., Eisner, P., Bader-Mittermaier, S., & Osen, R. (2020). Food proteins from plants and fungi. *Current Opinion in Food Science*, 32, 156-162. doi:10.1016/j.cofs.2020.08.003
- Siebert, S., & Schoppe, T. (2020). Vegane Ernährung in der Beratungspraxis. In H. Englert, & S. Siebert (Hrsg.), *Vegane Ernährung, 2. Auflage* (S. 247-250). Bern: Haupt Verlag.
- Tabtabaei, S., Kuspangaliyeva, B., Legge, R.L., & Rajabzadeh, A.R. (2023). Air Classification of Plant Proteins. In A. Hernández-Álvarez, M. Mondor, & M. Nosworthy (Hrsg.), *Green Protein Processing Technologies from Plants. Novel Extraction and Purification Methods for Product Development* (S. 31-60). Cham: Imprint: Springer. doi:10.1007/978-3-031-16968-7
- Tamayo Tenorioa, A., Kyriakopoulou, K.E., Suarez-Garcia, E., van den Berg, C., & van der Goot, A. (2018). Understanding differences in protein fractionation from conventional crops, and herbaceous and aquatic biomass - Consequences for industrial use. *Trends in Food Science & Technology*, 71, 235-245. doi:10.1016/j.tifs.2017.11.010
- Tarahi, M., Abdolizadeh, L., & Hedayati, S. (2024). Mung bean protein isolate: Extraction, structure, physicochemical properties, modifications, and food applications. *Food Chemistry*, 444. doi:10.1016/j.foodchem.2024.138626
- van der Weele, C., Feindt, P., van der Goot, A.J., van Mierlo, B., & van Boekel, M. (2019). Meat alternatives: an integrative comparison. *Trends in Food Science & Technology*, 88, 505-512. doi:10.1016/j.tifs.2019.04.018
- Vaupel, P., & Bisalski, H.K. (2018). *Proteine*. In: Biesalski H.K., Bischoff S.C, Pirlich M. et al. (Hrsg.). *Ernährungsmedizin. Nach dem Curriculum Ernährungsmedizin der Bundesärztekammer*. Stuttgart, New York: Georg Thieme Verlag.
- Wang, S., Miao, S., & Sun, D.W. (2024). Modifying structural and techno-functional properties of quinoa proteins through extraction techniques and modification methods. *Trends in Food Science & Technology*, 143. doi:10.1016/j.tifs.2023.104285
- Wood, P., & Tavan, M. (2022). A review of the alternative protein industry. *Current Opinion in Food Science*, 47. doi:10.1016/j.cofs.2022.100869

- Zafar, A., Shaheen, M., Bin Tahir, A., Gomes da Silva, A.P., Manzoor, H.Y., & Zia, S. (2024). Unraveling the nutritional, biofunctional, and sustainable food application of edible crickets: A comprehensive review. *Trends in Food Science & Technology*, 143. doi:10.1016/j.tifs.2023.104254
- Zhang, W., Boateng, I.D., & Xu, J. (2024). Novel marine proteins as a global protein supply and human nutrition: Extraction, bioactivities, potential applications, safety assessment, and deodorization technologies. *Trends in Food Science & Technology*, 143. doi:10.1016/j.tifs.2023.104283
- Zhang, X., Zhang, T., Zhao, Y., Jiang, L., & Sui, X. (2024). Structural, extraction and safety aspects of novel alternative proteins from different sources. *Food Chemistry*, 436. doi:10.1016/j.foodchem.2023.137712
- Zheng, L., San, Y., Xing, Y., & Regenstein, J.M. (2024). Rice proteins: A review of their extraction, modification techniques and applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, 268. doi:10.1016/j.ijbiomac.2024.131705
- Zheng, X., Zou, B., Zhang, J., Cai, W., Na, X., Du, M., Zhu, B., Wu, C. (2024). Recent advances of ultrasound-assisted technology on aquatic protein processing: Extraction, modification, and freezing/thawing-induced oxidation. *Trends in Food Science & Technology*, 144. doi:10.1016/j.tifs.2023.104309
- Ziegelitz, R. (2004). Proteinreiche Sojaerzeugnisse. In R. Heiss (Hrsg.), *Lebensmitteltechnologie. Biotechnologische, chemische, mechanische und thermische Verfahren der Lebensmittelverarbeitung*. 6. vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage (S. 303-310). Hamburg: Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.

Anhang

Anhang A: Zusammenfassung bzw. weitere Ergebnisse der eingeschlossenen Literatur

| Zusammenfassung bzw. weitere Ergebnisse | |
|---|--|
| Autor (Jahr) | Titel |
| Tarahi et al. (2024) | Mung bean protein isolate: Extraction, structure, physicochemical properties, modifications, and food applications |
| | <ul style="list-style-type: none"> - Überblick über die Extraktionsmethoden, das Aminosäureprofil, die Struktur, die physikochemischen Eigenschaften, die Modifikationen und die Lebensmittelanwendungen von Mungbohnenproteinisolat (MBPI) - Mungbohnenansamen haben einen hohen Proteingehalt (20-32%) - Aufgrund techno-funktionellen Eigenschaften von MBPI, wie Filmbildung, Wasserhaltevermögen, Löslichkeit, Schaumfähigkeit und Emulgierung, hat es in den letzten Jahren großes Interesse für Lebensmittelanwendungen erweckt - Durch Wasser- und Ölbindekapazität sowie schäumende, emulgierende und thermische Eigenschaften als nachhaltige Zutat ist der Einsatz in einer Vielzahl von Lebensmitteln, wie z. B. Fleisch- und Wurstwaren, Pudding, Schlagsahne, Eiscreme, Getränken und Backwaren, möglich |
| Zhang et al. (2024) | Structural, extraction and safety aspects of novel alternative proteins from different sources |
| | <ul style="list-style-type: none"> - Allgemeiner Überblick über vielversprechende neue alternative Proteine und Extraktionsmethoden für diese Proteine - neuartige alternative Proteine haben einen ausgezeichneten Nährwert, die Forschung über ihre Struktur befindet sich noch in einem frühen Stadium, insbesondere bei Insekten, Algen, Bakterien und Pilzen - Informationen über neuartige alternative Proteine sind sehr verstreut, frühere Berichte konzentrieren sich in der Regel auf eine bestimmte Proteinquelle - Struktur von Proteinen spielt eine entscheidende Rolle bei der Bestimmung ihrer Funktionalität, Bioaktivität und Sicherheit, die Kenntnisse und Studien über die strukturellen Eigenschaften von alternativen Proteinen derzeit unzureichend, insbesondere bei Proteinen, die aus Insekten, Algen, Bakterien und Pilzen gewonnen werden |

| | | |
|----------------------|--|---|
| Hadidi et al. (2024) | <p>Amaranth proteins: From extraction to application as nanoparticle-based delivery systems for bioactive compounds</p> | <ul style="list-style-type: none"> - Überblick über die Zusammensetzung und die techno-funktionellen Eigenschaften von Amaranth-Protein, einschließlich seiner Löslichkeit, Emulgierung, Gelierung, Schaumbildung und Bindungseigenschaften - Gesamtproteingehalt schwankt zwischen etwa 13 % und 16 %, Qualität der Proteine ist mit der von tierischen Proteinen vergleichbar, ausgewogene Aminosäurezusammensetzung - Pflanzliche Eiweißbestandteile enthalten häufig antinutritive Faktoren - Amaranth-Proteine in der Lebensmittelindustrie sehr vielversprechend und bieten sich für Anwendungen in pflanzliche Fleischalternativen, Backwaren, Frühstückscerealien, Nahrungsergänzungsmittel, Säuglingsnahrung, Snackprodukten an - Amaranth ist eine widerstandsfähige Pflanze, die unter verschiedenen klimatischen Bedingungen bei minimalem Wasserbedarf gedeiht - Der Anbau führt im Vergleich zur traditionellen Viehzucht in der Regel zu geringeren Treibhausgasemissionen - Amaranth-Protein findet Anwendung in Produkten mit cremiger Textur wie Amaranth-Milch, -Joghurt und -Käse - Geschmack und Textur können eine Herausforderung darstellen, vor allem, wenn die sensorischen Eigenschaften von Fleisch- oder Milchprodukten imitiert werden sollen |
| Hadidi et al. (2024) | <p>Oilseed meal proteins: From novel extraction methods to nanocarriers of bioactive compounds</p> | <ul style="list-style-type: none"> - Gewinnung wertvoller Proteine aus nachhaltigen Quellen, insbesondere aus Nebenprodukten der ölverarbeitenden Industrie, unter Einsatz neuer Technologien - Ölsaatenmehle werden weltweit im Überfluss produziert - Ölsaatenmehle, die als Nebenprodukt bei der Ölgewinnung aus Ölsaaten anfallen, weisen einen Proteingehalt von 15 - 50 % auf (Ölpflanzen wie Sojabohnen, Raps, Baumwollsaamen, Sonnenblumenkerne und Erdnüsse) - Herausforderungen bei der nachhaltigen Nutzung von Ölsaatenmehlproteinen, z. B. Probleme mit der Frische, dem Vorhandensein von Antinährstoffen, Allergenität und der Akzeptanz neuartiger Lebensmittel durch die Verbraucher |

| | | |
|-------------------------|---|--|
| Zheng et al. (2024) | <p>Rice proteins: A review of their extraction, modification techniques and applications</p> | <ul style="list-style-type: none"> - Das aus Reiserückständen extrahierte Protein (Reiserückstandsprotein weist einen Proteingehalt von über 60 % auf, hat einen ausgewogenen Aminosäuregehalt und geringe Allergenität - Im Vergleich zu anderen pflanzlichen Proteinen (z. B. Sojaprotein, Bohnenprotein) wird Reisprotein aufgrund einer schlechten Wasserlöslichkeit derzeit kommerziell nicht in großem Umfang genutzt - Mehr Forschungen zur Entwicklung und die Anwendungen von Reisprotein bieten eine günstigere Unterstützung für die Tierhaltung, die Lebensmittelindustrie und die menschliche Ernährung und Gesundheit |
| Wang, Miao & Sun (2024) | <p>Modifying structural and techno-functional properties of quinoa proteins through extraction techniques and modification methods</p> | <ul style="list-style-type: none"> - Quinoa-Proteine gelten aufgrund der Wachstumsbedingungen und ihres Nährwerts als nachhaltige Alternativen zu tierischen Proteinen - techno-funktionellen Eigenschaften sind jedoch schlecht - Extraktionstechniken und Modifizierungsmethoden können strukturelle und physikochemische Veränderungen in Quinoa-Proteinen bewirken, die zu einer Verbesserung der techno-funktionellen Eigenschaften führen, einschließlich Löslichkeit, Emulsions- und Geliereigenschaften - Verschiedene Extraktionsmethoden haben ihre Vor- und Nachteile |
| Hewage et al. (2024) | <p>Improved protein extraction technology using deep eutectic solvent system for producing high purity fava bean protein isolates at mild conditions</p> | <ul style="list-style-type: none"> - Extraktion von Favabohnen-Proteinen unter Verwendung eines umweltfreundlichen tief eutektischen Lösungsmittels (DES) - Unter optimalen Bedingungen wurden Proteingehalt-, Proteinausbeute- und Proteinrückgewinnungsraten von 92,33 ± 2,28 %, 65,42 ± 6,53 % und 23,15 ± 2,31 % erreicht → höher als bei der alkalischen Extraktion - geringere Auswirkungen auf die Denaturierung der Proteine, was darauf hindeutet, dass sie bessere funktionelle Eigenschaften in Lebensmittelsystemen aufweisen könnte |

| | | |
|---------------------|--|--|
| Alasi et al. (2024) | Exploring recent developments in novel technologies and AI integration for plant-based protein functionality: A review | <ul style="list-style-type: none"> - Funktionalität von Proteinen beinhaltet eine komplizierte Interaktion zwischen der Konformation, Struktur, Zusammensetzung und den physikalisch-chemischen Eigenschaften des Proteins in Gegenwart anderer Nicht-Protein-Komponenten und der Matrixumgebung - HPP nutzt hohe Drucke, um die Proteinstruktur zu verändern und so die Löslichkeit und die strukturellen Eigenschaften zu verbessern, - PEF beeinflusst die Wechselwirkungen zwischen den Proteinen und so die Löslichkeit, die Schaumbildung und das Rückhaltevermögen verbessert - Bei der Präzisionsfermentation werden Mikroorganismen zur Herstellung funktioneller Inhaltsstoffe eingesetzt, die herkömmliche Proteine nachahmen |
| Zafar et al. (2024) | Unraveling the nutritional, biofunctional, and sustainable food application of edible crickets : A comprehensive review | <ul style="list-style-type: none"> - Potenzial für ressourceneffizienten Anbau und ökologische Nachhaltigkeit von essbaren Grillen, daher ein vielversprechender Weg, um sowohl die Ernährung als auch die Umweltverantwortung zu fördern - Insektenbiomasse weist einen durchschnittlichen Proteingehalt von 35-62 % auf, der höher ist als der von verschiedener pflanzlicher Biomasse, der bei Ölsaatenbiomasse zwischen 30 und 50% und bei Biomasse aus Weizen zwischen 10-12% liegt |

| | | |
|----------------------------|---|---|
| Liang et al. (2024) | Recent advances in edible insect processing technologies | <ul style="list-style-type: none"> - Auswirkungen sowohl traditioneller als auch industrieller Verarbeitungstechnologien auf den Nährwert und die Sicherheit essbarer Insekten - Darstellung des Nährwerts und der potenziellen Gefahren von essbaren Insekten - Überblick über verschiedene konventionelle Verarbeitungs- und Extraktionstechnologien wie Wärmebehandlung, Hochdruckverarbeitung und Trocknungstechnologien und Auswirkungen der verschiedenen Technologien auf die ernährungsphysiologischen Eigenschaften, die mikrobielle Sicherheit und die Verbraucherakzeptanz von essbaren Insekten wurden ebenfalls erläutert |
| Zheng et al. (2024) | Recent advances of ultrasound-assisted technology on aquatic protein processing: Extraction, modification, and freezing/thawing-induced oxidation | <ul style="list-style-type: none"> - Ultraschall kann zur Extraktion von Proteinen aus verschiedenen aquatischen Materialien verwendet werden, wobei die Vorteile in der hohen Extraktionsrate, der Chemikalienfreiheit und dem geringen Energieverbrauch liegen - Die Ultraschallbehandlung kann die molekulare Flexibilität und Mobilität von marinen Proteinen erhöhen und gleichzeitig die Partikelgröße und Oberflächenspannung deutlich verringern, → Beitrag zur Verbesserung ihrer funktionellen und ernährungsphysiologischen Eigenschaften |
| Zhang, Boateng & Xu (2024) | Novel marine proteins as a global protein supply and human nutrition: Extraction, bioactivities, potential applications, safety assessment, and deodorization technologies | <ul style="list-style-type: none"> - Übersicht von Extraktionstechniken für Meeresproteine, physikalisch-chemischen und funktionellen Eigenschaften, Bioaktivitäten, Anwendungen und Sicherheitsbewertungen - Meeresproteine haben ein enormes antioxidatives, antimikrobielles und blutdrucksenkendes Potenzial - Mit diesen Proteinen können säurehaltige Lebensmittel wie milchähnliche Produkte und proteinreiche kohlenstoffhaltige Getränke formuliert werden, die mit wesentlichen, für den Menschen nützlichen Bestandteilen angereichert sind - Die Desodorierung von Fischgeruch erfordert kombinierte Technologien |

| | | |
|--|--|---|
| Wood & Tavan (2022) | A review of the alternative protein industry | <ul style="list-style-type: none"> - Hohe Investitionen in Unternehmen im Bereich der alternativen Proteine - Hohe Erwartungen - Für Produkte, die mit tierischen Produkten konkurrieren wollen, sind die Kosten der Produkte, das Nährwertprofil und die Begründung nachhaltiger Ansprüche die größten Herausforderungen - Bei völlig neuen Produkten, die auf Insektenproteinen und kultivierten Zellen basieren, ist auch die Akzeptanz der Verbraucher ein Problem - Der Bedarf an deutlich mehr Proteinen für die Ernährung der wachsenden Weltbevölkerung wird auch in Zukunft die Hauptantriebskraft für Innovationen in der Proteinproduktion sein - aber fast das gesamte Bevölkerungswachstum wird in den Entwicklungsländern stattfinden → Der Preis der neuartigen Produkte und Probleme bei der Verteilung von Lebensmitteln werden in den Entwicklungsländern eine große Herausforderung darstellen |
| Hernández-Álvarez, Mondor & Nosworthy (2023) | Green Protein Processing Technologies from Plants. Novel Extraction and Purification Methods for Product Development | <ul style="list-style-type: none"> - Umfassender Überblick über herkömmliche und neue Verarbeitungstechnologien für die Extraktion und Reinigung von Proteinen und/oder Peptiden aus pflanzlichen Quellen mit besonderem Schwerpunkt auf der anschließenden Produktentwicklung |

Anhang B: Bewertung der Extraktionstechnologien

| Extraktion | Bewertung der Technologie | | Referenzen |
|-----------------------|---|---|--|
| Alkalische Extraktion | <ul style="list-style-type: none"> + ausgereiftes, konventionelles Verfahren + niedrige Kosten und Skalierbarkeit + derzeit gängigste Methode aufgrund der Einfachheit, Verfügbarkeit der benötigten Materialien und hohe Ausbeute + verlängerte Extraktionszeit begünstigt Proteinausbeute | <ul style="list-style-type: none"> - energieintensiv, zeitaufwändig, nicht umweltfreundlich - große Mengen an Wasser erforderlich - hoher pH-Wert kann zu Strukturveränderungen des Proteins führen - chemische Reagenzien zerstören den natürlichen Zustand des Proteins - energieintensiv, zeitaufwändig, nicht umweltfreundlich - chemische Verunreinigungen - Verlust essenzieller Aminosäuren - verminderte Proteinfunktionalität - Temperaturanstieg beeinflusst Proteinausbeute negativ | <p>Tarahi et al. (2024)</p> <p>Zhang et al. (2024)</p> <p>Hadidi et al. (2024)</p> <p>Hadidi et al. (2024)</p> <p>Zheng et al. (2024)</p> <p>Wang, Miao & Sun (2024)</p> <p>Zafar et al. (2024)</p> <p>Zhang, Boateng & Xu (2024)</p> <p>Cruz-Solis et al (2023)</p> |
| Salzextraktion | <ul style="list-style-type: none"> + konventionelles Verfahren wie die alkalische Extraktion | <ul style="list-style-type: none"> - Nachteile wie bei der alkalischen Extraktion - zusätzlich geringere Proteinausbeute - höherer Salzgehalt und geringere Proteinreinheit im Endprodukt | <p>Tarahi et al. (2024)</p> <p>Zhang et al. (2024)</p> <p>Wang, Miao & Sun (2024)</p> <p>Liang et al. (2024)</p> <p>Zheng et al. (2024)</p> |

| | | | |
|-----|--|--|---|
| DES | <ul style="list-style-type: none"> + geringere Toxizität + Umweltfreundlichkeit + biologischen Abbaubarkeit + niedrige Kosten + Auswirkungen der DES-Extraktion auf die Proteinendaturierung geringer → bessere funktionelle Eigenschaften in Lebensmittelsystemen | <ul style="list-style-type: none"> - Vor der industriellen Anwendung für neue Proteinzutaten müssen weitere Studien zur funktionellen Leistung, potenziellen Toxizität und Restbelastung durchgeführt werden. | Hewage et al. (2024) |
| EAE | <ul style="list-style-type: none"> + schonendere Extraktionsmethode mit geringerem ökologischem Fußabdruck im Vergleich zu alkalischen Extraktionsverfahren + geringer chemischer Abfall + Breites Spektrum an Enzympräparaten in Lebensmittelqualität verfügbar + Möglichkeit, hochspezifische Enzymaktivitäten zu verwenden + Anwendbar auch für Insektenproteinextraktion + Algenmatrix: enzymatische Abbau von Zellwandpolymeren als attraktivere Alternative zu mechanischen und chemischen Abbaumethoden | <ul style="list-style-type: none"> - längere Verarbeitungszeit, höhere Betriebskosten, hoher Energieverbrauch, Kosten der Enzyme - Erfordert Kenntnisse über Einzelheiten der Zellwandzusammensetzung jedes pflanzlichen Protein Ausgangsmaterials - Erfordert einen Optimierungsprozess zur Minimierung der Enzymdosierung, um eine hohe Ausbeute zu erzielen - Evtl. zusätzlicher Schritt während der Enzymaktivierung oder -abtrennung erforderlich - Schwankungen der Enzymaktivität zwischen den Chargen, die einige Nebenaktivitäten enthalten können - Algenprotein: wirtschaftliche Herausforderung für großtechnische Anwendungen | <p>Hadidi et al. (2024)</p> <p>Zafar et al. (2024)</p> <p>Zhang, Boateng & Xu (2024)</p> <p>Kleekayai et al. (2023)</p> |

| | | | |
|-----------|--|---|--|
| HPP / HPH | <ul style="list-style-type: none"> + HPH: praktikable und effiziente Methode zur Proteinmodifizierung, wirtschaftlich, umweltfreundlich, sicher, wiederholbar und skalierbar + HPP/HPH vielversprechend, da sie die Extraktion von Proteinen verbessern kann, indem sie den Einsatz von Lösungsmitteln und die Extraktionszeit verringert und den Einsatz von Wärme vermeidet, aber auch die Qualität des Proteinextrakts verbessert + Somit umweltfreundliche Alternative zur konventionellen Extraktion + Auch bei Algen bricht HPP die Struktur der Zellwand effektiv auf | <ul style="list-style-type: none"> - Energie- und Kostenbedarf schränkt Einsatz auf Produkte mit hoher Wertschöpfung ein - Aufgrund technischer Herausforderungen sind noch wichtige Entwicklungen erforderlich, um Systeme im industriellen Maßstab zu entwickeln - Auswirkungen von HPP auf die Proteineigenschaften nicht allgemeingültig | <p>Hadidi et al. (2024) Zheng et al. (2024) Wang, Miao & Sun (2024) Alasi et al. (2024) Zhang, Boateng & Xu (2024) Marciniak & Doyen (2023)</p> |
| PEF | <ul style="list-style-type: none"> + erleichtert Proteinextraktion (niedrige Extraktionszeit), minimiert unerwünschte Veränderungen des Proteins + verbessert die Funktionalität von Proteinen, wie Löslichkeit und Schaumbildung + als Vorbehandlungsmethode: Menge an organischen Lösungsmitteln, die Zeit und die Temperatur, die für den Prozess erforderlich sind, können erheblich reduziert werden + Potenzial für die industrielle Nutzung | <ul style="list-style-type: none"> - Auswirkungen der PEF-Behandlung hängt vom Proteintyp ab - widerstandsfähige Zellwand von Mikroalgen bewirkt geringere Proteinausbeute - weitere Untersuchungen notwendig, um die Wirksamkeit und Kosteneffizienz für industrielle Nutzung zu erfassen - weitere Forschung notwendig | <p>Hadidi et al. (2024) Zheng et al. (2024) Alasi et al. (2024) Zhang, Boateng & Xu (2024)</p> |

| | | | |
|-----|--|--|--|
| PF | <ul style="list-style-type: none"> + Mikroorganismen können unter geeigneten Fermentationsbedingungen Zielproteine produzieren + Mikrobielle Wirte lassen sich leicht genetisch manipulieren + produzierte Proteine lassen sich für die Produktion alternativer Milchprodukte nutzen | <ul style="list-style-type: none"> - Kosten stellen eine Herausforderung dar | Alasi et al. (2024) Wood & Tavan (2022) |
| MAE | <ul style="list-style-type: none"> + kurze Extraktionsdauer + minimaler Energieverbrauch + Kosteneffizienz + hohe Effizienz | <ul style="list-style-type: none"> - thermische Energie führt zum Abbau wärmeempfindlicher bioaktiver Verbindungen - Kontrolle der Temperaturparameter während des Extraktionsprozesses notwendig - mehr Forschung notwendig | Zhang et al. (2024) Zafar et al. (2024) Zhang, Boateng & Xu (2024) Peñas, Hernandez-Ledesma & Martinez-Villaluenga (2023) |
| UAE | <ul style="list-style-type: none"> + Schnelle, kostengünstige Technologie + Verbesserung der Extraktionseffizienz und der Qualität der alternativen Proteine + effizienteres Mischen, schnelle Energieübertragung, selektive Extraktion, geringere thermische Gradienten und Extraktionstemperaturen, kleinere Anlagen, schnellere Inbetriebnahme und höhere Produktion | <ul style="list-style-type: none"> - Veränderungen der Proteinstruktur und der funktionellen Eigenschaften möglich - Durch Kombination mit anderen Techniken, kann die Wirksamkeit der UAE maximiert und ihre nachteiligen Auswirkungen minimiert werden | Hadidi et al. (2024) Hadidi et al. (2024) Alasi et al. (2024) Zafar et al. (2024) Liang et al. (2024) Zheng et al. (2024) Zhang, Boateng & Xu (2024) |

| | | | |
|--------------------|---|--|--|
| Air Classification | <ul style="list-style-type: none"> + native Biofunktionalität der Proteine bleibt erhalten, höherer Stickstofflöslichkeitsindex, bessere Emulgier-, Gelier- und Schaumeigenschaften + fehlender Zusatz von Lösungsmitteln und chemischen Reagenzien + natürliche Struktur und Funktionalität der Bestandteile bleiben erhalten + bessere Aufschlagbarkeit, Schaumstabilität und Emulgierung + benötigt weniger Wasser, es fallen keine Abwässer an, die weiter behandelt und entsorgt werden müssen, Risiko mikrobieller Verunreinigungen geringer + benötigt weniger Energie | <ul style="list-style-type: none"> - Proteinausbeute gering - Reinheit der Proteine im Durchschnitt geringer → Herstellung hochreiner Proteinisolate nicht möglich - Art der Vermahlung und die Betriebsbedingungen können die Effizienz des Prozesses beeinflussen - Trennung verschiedener Partikel (stärke-, protein- und faserreiche Fraktionen) ähnlicher Größe und Dichte nicht möglich - Fett- und Feuchtigkeitsgehalt des Rohmaterials muss beachtet werden | <p>Tarahi et al. (2024) Zhang et al. (2024) Wang, Miao & Sun (2024) Zafar et al. (2024) Tabatabaei et al. (2023)</p> |
|--------------------|---|--|--|

Eidesstaatliche Erklärung

Ich versichere, dass ich die vorliegende Arbeit ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quelle kenntlich gemacht.

Hamburg, 30.05.2024

