

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Fakultät Life Sciences

Alternative Proteine:

Bewertung der ernährungsphysiologischen Proteinqualität pflanzlicher und mikrobieller Proteinquellen anhand von DIAAS und PDCAAS im Hinblick auf ihren potenziellen Beitrag zur Proteinversorgung der deutschen Allgemeinbevölkerung
-systematische Literaturrecherche mit Experteninterview-

Bachelorarbeit

Im Studiengang Ökotrophologie

Vorgelegt von:

Lisa Wollensak, 





Hamburg, am 18.08.2025

Erstgutachterin: Prof. Dr. Katharina Riehn (HAW Hamburg)

Zweitgutachterin: M. Sc. Carola Katharina Herbst (DLG Competence Center Food)

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	IV
Zusammenfassung	1
Abstract	2
1 Einleitung	3
2 Theoretischer Hintergrund	5
2.1 Veränderte Ernährungsmuster in der deutschen Bevölkerung	5
2.2 Relevanz einer „Ernährungswende“ in Deutschland	7
2.3 Definition Proteine	8
2.3.1 Relevanz der Proteine für die menschliche Gesundheit	9
2.3.2 Einteilung in unentbehrliche und entbehrliche Aminosäuren	9
2.3.3 Proteinbedarf gesunder erwachsener Frauen und Männer	10
2.4 Definition der Proteinqualität von Nahrungsproteinen	12
2.5 Bewertungsmethoden zur Ermittlung der Proteinqualität	13
2.5.1 Biologische Wertigkeit (BW)	14
2.5.2 Amino Acid Score (AAS)	14
2.5.3 Protein Digestibility Corrected Amino Acid Score (PDCAAS)	15
2.5.4 Digestible Indispensable Amino Acid Score (DIAAS)	16
2.6 Definition Alternative Proteine	18
2.6.1 Pflanzliche Proteine	20
2.6.2 Mikrobielle Proteine	22
3 Methode	25
3.1 Zielstellung	25
3.2 Auswahl der Proteinqualitätsbewertungsmethode	25
3.3 Auswahl der Proteinquellen	26
3.4 Systematische Literaturrecherche	27
3.4.1 Festlegung von Suchbegriffen	28
3.4.2 Sichtung und Auswahl der relevanten Literatur	30
3.4.3 Dokumentation der Ergebnisse	33
3.4.4 Darstellung und Interpretation der Ergebnisse	33
3.5 Experteninterview	34
4 Ergebnisse	36
4.1 Studiencharakteristik	36
4.2 Proteinqualität ausgewählter pflanzlicher Proteine anhand des DIAAS	37
4.3 Proteinqualität ausgewählter mikrobieller Proteine anhand des PDCAAS	39

4.4	Experteninterview mit Frau Scharf.....	40
5	Diskussion.....	43
5.1	Methodendiskussion	43
5.2	Ergebnisdiskussion	47
6	Schlussfolgerung.....	52
7	Literaturverzeichnis.....	54
8	Rechtsquellenverzeichnis	60
	Anhang.....	61
	Anhang A: Empfohlene Referenzproteinmuster für die Berechnung des DIAAS und PDCAAS	61
	Anhang B: PRISMA – Flow Charts nach einzelnen Proteinquellen	62
	Anhang C: Tabellarische Übersicht der Ergebnisse der pflanzlichen Proteine	67
	Anhang D: Tabellarische Übersicht der Ergebnisse der mikrobiellen Proteine	70
	Anhang E: Tabellarische Übersicht der ausgewählten tierischen Referenzproteine	71
	Anhang F: Experteninterview – Leitfaden	72
	Anhang G: Experteninterview – Codiertes Transkript.....	73
	Eidesstattliche Erklärung.....	80

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Trendanalyse des Verbrauchs von Fleisch (in kg/Kopf und Jahr) in Deutschland	5
Abbildung 2: Steigender Umsatz pflanzenbasierter Lebensmitteln nach sechs verschiedenen Kategorien in Deutschland 2022-2024 (in Mio. Euro).....	6
Abbildung 3: Die vier zentralen Ziele einer nachhaltigeren Ernährung ("Big Four")	7
Abbildung 4: Die 9 unentbehrlichen Aminosäuren	10
Abbildung 5: Erforderliche Elemente zur quantitativen Definition der Proteinqualität	12
Abbildung 6: Prinzip der limitierenden AS: Fehlt der Nahrung eine gewisse Menge an einer Aminosäure (1), reduziert sich die Verwertbarkeit der anderen Aminosäuren in der gleichen Proportion (2).....	15
Abbildung 7: Übersicht über die relevantesten alternativen Proteinquellen und ihrer Chancen.....	18
Abbildung 8: Zusammenfassendes PRISMA Flow Diagramm.....	32
Abbildung 10: Codierte Themenfelder und Anzahl verwendeter Codes in MAXQDA.....	36
Abbildung 11: (Mittlere) DIAAS-Werte (%) von Ölsaaten und Hülsenfrüchten über verschiedene Verarbeitungsgrade hinweg und im Vergleich zu tierischen Referenzproteinen	37
Abbildung 12: Ungekürzte einzelne PDCAAS-Werte (%) von Mykoproteinen und Mikroalgen im Vergleich zu tierischen Referenzproteinen.....	39

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Empfohlene Zufuhr für unentbehrliche Aminosäuren (in mg/kg Körpergewicht/Tag) für die Altersgruppe Erwachsene >18 Jahren	11
Tabelle 2: Übersicht der Vielfalt pflanzlicher Proteinquellen mit Beispielen	20
Tabelle 3: Erste Suchstrategie für den Überblick der vorhandenen Literaturdaten für pflanzliche und mikrobielle Proteine in PubMed.....	28
Tabelle 4: Angepasste Suchstrategie	29
Tabelle 5: Definition der Ein- und Ausschlusskriterien für die systematische Literatursuche.....	30
Tabelle 6: Planung des zeitlichen Rahmens für die Durchführung des Experteninterviews	35
Tabelle 8: Empfohlene Referenzproteinmuster für DIAAS Berechnungen für unentbehrliche AS (in mg/g Protein) für verschiedene Altersgruppen.....	61
Tabelle 9: Empfohlene Referenzproteinmuster für PDCAAS Berechnungen für unentbehrliche AS (in mg/g Protein) für verschiedene Altersgruppen	61
Tabelle 10: Tabellarische Übersicht der erfassten Studienergebnisse von Ölsaaten und Hülsenfrüchten, inklusive Rohstoff, Verarbeitungsgrad, DIAAS (%) (>3 Jahre), der ersten limitierenden AS, dem Studienmodell, der Proteinverdaulichkeit (%) und der Referenzen.....	67

Tabelle 11: Exceltabelle mit berechneten Mittelwerten (%), Minimum- und Maximum (%) und der Range (R) aus den dokumentierten DIAAS	69
Tabelle 12: Tabellarische Übersicht der erfassten Studienergebnisse von Mykoprotein und Mikroalgen, inklusive Rohstoff, Verarbeitungsgrad, PDCAAS (%), der ersten limitierenden AS, dem Referenzprotein, dem Studienmodell, der Proteinverdaulichkeit (%) und Referenzen.....	70
Tabelle 13: Tabellarische Übersicht der erfassten tierischen Referenzproteine unter Angabe des Rohstoffs, Verarbeitungsgrades, PDCAAS bzw. DIAAS (%), erste limitierende AS, Referenzprotein, Studienmodell, Proteinverdaulichkeit (%) und Referenzen	71

Zusammenfassung

Der deutsche Markt für alternative Proteinquellen ist in den letzten Jahren stetig gewachsen. Für eine zukunftsfähige, bedarfsdeckende Proteinversorgung aus alternativen Proteinen spielen die Balance aus ernährungsphysiologischer Qualität und technologischer Umsetzbarkeit eine wichtige Rolle.

Ziel dieser Bachelorarbeit ist die Bewertung der Proteinqualität anhand des DIAAS bzw. PDCAAS, fokussiert auf für Deutschland relevante Ölsaaten, Hülsenfrüchte, Mykoproteine sowie Mikroalgen, mittels einer systematischen Literaturrecherche. Ergänzend werden durch ein Experteninterview aus technologischer Perspektive die aktuellen Anwendungsmöglichkeiten sowie Entwicklungschancen dieser Alternativen im Hinblick auf ihre potenzielle Rolle in der Proteinversorgung der deutschen erwachsenen Allgemeinbevölkerung beleuchtet.

Soja erreicht im Mittel eine „hochwertige“ Proteinqualität ($\text{DIAAS} \geq 100$). Raps, Erbse und Kichererbse liegen im Mittel im „guten“ Bereich ($\text{DIAAS} = 75\text{-}99$). Lupine, Ackerbohne und Linse unterschreiten im Mittel den DIAAS-Cut-Off-Wert (< 75) und profitieren voraussichtlich von Proteinkombination bzw. Verarbeitung (z.B. Fermentation).

Mykoprotein (*F. venenatum*) zeigt hohe PDCAAS-Werte (99,6-101), Spirulina und Chlorella liegen in einem niedrigeren Bereich (63-84). Die Daten bei den Mikroalgen deuten darauf hin, dass ein Zellwandaufbruch die Proteinqualität weiter verbessern kann.

Technologisch zeigen Soja und Erbse derzeit die größte Anwendungsbreite, Mykoprotein ist besonders aufgrund seiner strukturgebenden Eigenschaften für hochwertigen Fleischersatz relevant. Mikroalgen weisen vielversprechende Schaum- und Emulgierereigenschaften auf, jedoch sind Lebensmittelanwendungen derzeit begrenzt.

Diese Arbeit liefert eine aktuelle Übersicht zur ernährungsphysiologischen Qualität relevanter pflanzlicher und mikrobieller Proteine und deren praktischer Einsetzbarkeit. Sie kann Produktentwicklung und Forschung bei der gezielten Auswahl geeigneter alternativer Proteine für physiologisch hochwertige Ersatzprodukte dienen und verweist auf Prioritäten (DIAAS für unterrepräsentierte Hülsenfrüchte und mikrobielle Proteine, Effekte von Verarbeitung auf die Proteinqualität) für zukünftige Studien.

Abstract

Germany's market for alternative protein sources has grown steadily in recent years. Achieving a sustainable, demand-oriented protein supply requires balancing nutritional quality with technological feasibility. This bachelor's thesis conducts a systematic literature review of protein quality measured by DIAAS and PDCAAS for oilseeds, legumes, mycoproteins, and microalgae relevant to Germany. An expert interview adds a technological perspective on current applications, development opportunities, and the potential contribution of these alternatives to protein supply in the general adult population.

Soybeans reach an average "high-quality" rating (DIAAS ≥ 100). Rapeseed, peas, and chickpeas fall in the "good" range (75–99). Lupine, faba beans, and lentils score below 75 on average and are likely to benefit from protein blending or processing (e.g., fermentation).

Mycoprotein (*F. venenatum*) shows high PDCAAS values (99.6–101), whereas spirulina and chlorella are in a lower range (63–84). For microalgae, cell-wall disruption appears to further improve protein quality.

Technologically, soy and peas currently offer the broadest applicability. Mycoprotein is especially relevant for high-quality meat analogues due to its structuring properties. Microalgae display promising foaming and emulsifying functions, but food applications are currently limited.

Overall, the paper provides an up-to-date overview of nutritional quality and practical applicability for key plant and microbial proteins. It supports product development and research by guiding the targeted selection of alternative proteins suited for physiologically high-quality substitutes. It also outlines priorities for future studies, including DIAAS data for underrepresented legumes and microbial proteins and systematic evaluation of processing effects.

1 Einleitung

Immer mehr Menschen in Deutschland ernähren sich vegan, vegetarisch und flexitarisch. Laut Ernährungsreport 2024 des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) gaben 39% der Befragten an, regelmäßig vegane oder vegetarische Alternativen zu tierischen Produkten zu konsumieren. Somit ist der deutsche Markt für alternative Proteinquellen in den letzten Jahren stetig gewachsen (BMEL, 2024). Diese Entwicklung spiegelt ein zunehmendes Bewusstsein für Nachhaltigkeit, Gesundheit und Tierwohl in der deutschen Bevölkerung wider. Resultierend wird der Konsum tierischer Produkte aufgrund von Tier- und Umweltschutz kritisiert, denn die Nutztierhaltung trägt zu einem erheblichen Teil der Treibhausgasemissionen, Wasserverschmutzung und dem Verlust der biologischen Vielfalt bei (Poore & Nemecek, 2018).

Gleichzeitig erfolgt die Deckung des Proteinbedarfs in Deutschland nach wie vor zum Großteil über tierische Produkte (Biedermann, 2019), wobei 62% der Bevölkerung täglich Milchprodukte und 23% täglich Fleischprodukte verzehren (BMEL, 2024). Nach der Deutschen Gesellschaft für Ernährung (DGE) ist „unter Berücksichtigung sowohl gesundheits- als auch umweltrelevanter Aspekte [...] eine Ernährungsweise mit einer deutlichen Reduktion tierischer Lebensmittel zu empfehlen“ (Klug et al., 2024, S. 60). Für den gesunden erwachsenen Menschen wird eine tägliche Proteinzufuhr von 0,8g Protein pro Kilogramm empfohlen. Während omnivor lebende Menschen in der Regel ihren Proteinbedarf sehr gut decken können, kann die Proteinbedarfsdeckung für Veganer*innen eine Schwierigkeit darstellen. Am Beispiel der vegan lebenden Menschen wird daher deutlich, dass die Proteinbedarfsdeckung bei gleichzeitiger Reduzierung des Verzehrs tierischer Produkte eine Herausforderung darstellen kann (Klug et al., 2024).

Verschiedene Akteure, wie der Verband für alternative Proteinquellen (BALPro), das Kompetenzzentrum für Ernährung (KErn) oder das neu gestartete Netzwerkprojekt „PIONEER“ setzen sich in Deutschland für eine Diversifikation der nationalen Proteinversorgung ein. Dabei wird der Fokus derzeit auf vier alternative Proteinquellen gelegt: pflanzliche Proteine, mikrobielle Proteine, Insektenproteine und In-Vitro-Fleisch (Biedermann, 2019; KErn & StMELF, 2022; PIONEER-Netzwerk, 2025). Laut dem Good Food Institute Europe (GFI) haben pflanzenbasierte Milch- und Fleischerersatzprodukte derzeit den größten Marktanteil in Deutschland und sind gut etabliert (GFI Europe, 2025a). Daher haben pflanzliche Proteinquellen als Ersatzbasis nach wie vor das höchste Marktpotenzial, gefolgt von den mikrobiellen Proteinen, auf denen derzeit das größte Forschungsinvestment liegt. Innovationstreiber auf diesem Gebiet in Deutschland ist beispielsweise „Infinite Roots“ (53 Millionen Euro Investition im ersten Halbjahr 2024) in Hamburg oder „Formo“ (56 Millionen im ersten Halbjahr 2024) in Berlin (GFI Europe, 2025c).

Im Bereich der pflanzlichen Proteine sind insbesondere Hülsenfrüchte (z.B. Erbse, Lupine, Ackerbohne) und Ölsaaten (z.B. Soja, Raps, Sonnenblumen) aufgrund ihres hohen Proteingehalts und des

heimischen Anbaus vielversprechende und nachhaltige Proteinquellen für Deutschland (BMEL & BLE, 2020; UFOP, 2025). Im Bereich der mikrobiellen Proteine zählen Proteine aus Pilzen (z.B. *Fusarium venenatum*), sogenannte Mykoproteine, die durch Biomassenfermentation gewonnen werden, derzeit zu einer der beliebtesten Fleischalternativen (z.B. QuornTM) (KErn & StMELF, 2022). Auch Mikroalgen gewinnen in der Forschung aufgrund ihrer vielversprechenden Aminosäurezusammensetzung, Nährwerte (z.B. Omega-3-FS) und nachhaltigen Produktion zunehmend Aufmerksamkeit für die Herstellung vegetarisch und veganer Proteinersatzprodukte (PIONEER-Netzwerk, 2025).

Innovative Proteinprodukte müssen als tatsächliche Alternative zu konventionellen tierischen Lebensmitteln einen vollständigen Nährwert haben, um die langfristigen Ziele der öffentlichen Gesundheit zu unterstützen (KErn, 2022). Entscheidend hierfür ist die Wahl der Proteinquelle, denn die physiologische Qualität eines Nahrungsproteins, definiert durch den Gehalt an unentbehrlichen Aminosäuren und die Verdaulichkeit, bestimmt maßgeblich deren Nutzen für den Organismus. Laut Empfehlungen der Ernährungs- und Landwirtschaftsorganisation der Vereinten Nationen (FAO) wird diese international als *Protein Digestibility Corrected Amino Acid Score* (PDCAAS) oder bevorzugt als *Digestible Indispensable Amino Acid Score* (DIAAS) angegeben (FAO & IAEA, 2024).

Während es einige aktuelle Übersichtsarbeiten zur Technologie oder Verbraucherakzeptanz alternativer Proteine in Deutschland gibt (Amonet et al., 2025; Haas, 2025), fehlt eine systematische Zusammenstellung der physiologischen Proteinqualität relevanter Quellen für den deutschen Markt. Vorliegende Studien, die einen DIAAS/PDCAAS-Vergleich unternommen haben, beziehen sich auf Europa insgesamt (Azizi et al., 2024) oder fokussieren nur eine Rohstoffkategorie, zum Beispiel nur Soja (van den Berg et al., 2022). Um diese Lücke zu schließen, wurde eine systematische Literaturrecherche zu zehn ausgewählten pflanzlichen und mikrobiellen Proteinquellen durchgeführt, welche durch Marktrelevanz bzw. steigendes Forschungsinteresse in Deutschland hervorstechen.

Ziel dieser Bachelorarbeit ist es zunächst, die vorliegenden DIAAS- und PDCAAS-Daten systematisch zu erfassen. Ausgehend davon soll die Frage beantwortet werden, welche der ausgewählten Proteinquellen eine „gute“ (75-99) bzw. „hochwertige“ (≥ 100) Proteinqualität erreichen und somit das physiologische Potenzial aufweisen, hochwertige tierische Proteine zu ersetzen. Ergänzend werden durch ein Experteninterview aus technologischer Perspektive die aktuellen Anwendungsmöglichkeiten sowie Entwicklungschancen dieser Alternativen im Hinblick auf ihre potenzielle Rolle in der Proteinversorgung der deutschen erwachsenen Allgemeinbevölkerung beleuchtet.

2 Theoretischer Hintergrund

Zum Verständnis der Hintergründe der Thematik, werden im folgenden Kapitel die veränderten Ernährungsmuster in der deutschen Bevölkerung und die Relevanz der Proteine für die menschliche Gesundheit genauer beschrieben. Im Zuge dessen werden die Grundlagen zur Struktur, Funktion und ernährungsphysiologischen Einteilung in entbehrliche und unentbehrliche Aminosäuren, sowie der Proteinbedarf eines gesunden erwachsenen Menschen erklärt. Darauf aufbauend werden die Schlüsselbegriffe „Proteinqualität“ und „Alternative Proteine“ definiert. Dabei werden die wichtigsten Bewertungsmethoden zur Bestimmung der physiologischen Proteinqualität und die Gruppe der pflanzlichen und mikrobiellen Proteine fokussiert und kurz vorgestellt.

2.1 Veränderte Ernährungsmuster in der deutschen Bevölkerung

Der Fleischkonsum geht laut aktuellen Verzehrstudien in Deutschland immer weiter zurück, dies zeigt beispielhaft folgende Grafik der Deutschen Gesellschaft für Ernährung (DGE) aus dem Jahr 2024:

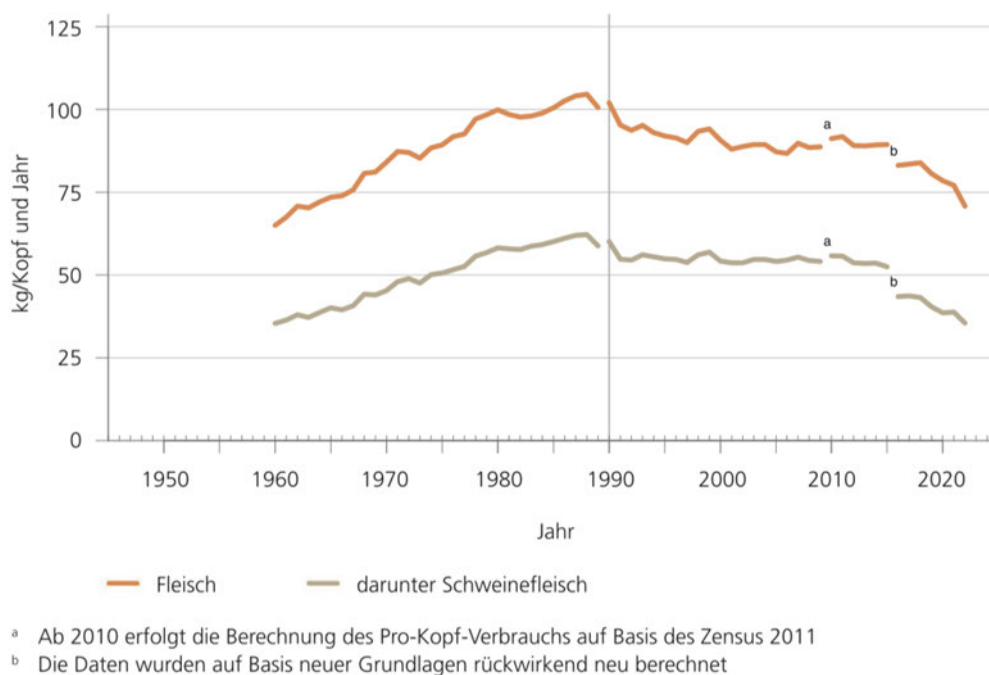


Abbildung 1: Trendanalyse des Verbrauchs von Fleisch (in kg/Kopf und Jahr) in Deutschland (DGE, 2024, S. 35)

Zu sehen ist der jährliche Fleischkonsum innerhalb Deutschlands beginnend im Jahr 1959 bis zum Jahr 2023. In den ersten Jahren bis zu den späten 80er Jahren gab es noch einen Anstieg, seit 1990 fällt der Fleischkonsum mit wenigen Ausnahmen jedoch stetig ab (DGE, 2024).

Beim Konsum weiterer tierischer Produkte ist der Ernährungstrend nicht so eindeutig. Während Frischmilchprodukte immer weniger konsumiert werden, steigt der Käse- und Eierkonsum seit Beginn der Datenerfassung 1959 insgesamt an (DGE, 2024).

Gleichzeitig ist die Nachfrage nach pflanzenbasierten Lebensmitteln in den letzten Jahren stetig gestiegen. Folgende Grafik des GFI zeigt für das Jahr 2024 in Deutschland einen Gesamtumsatz, über sechs verschiedene pflanzenbasierte Lebensmittelkategorien hinweg, von insgesamt 1,68 Milliarden Euro, dies entspricht 6,8% mehr als 2022 (GFI Europe, 2025a).

Umsatz mit pflanzenbasierten Lebensmitteln nach Kategorie in Deutschland, 2022-2024 (in Mio. Euro)

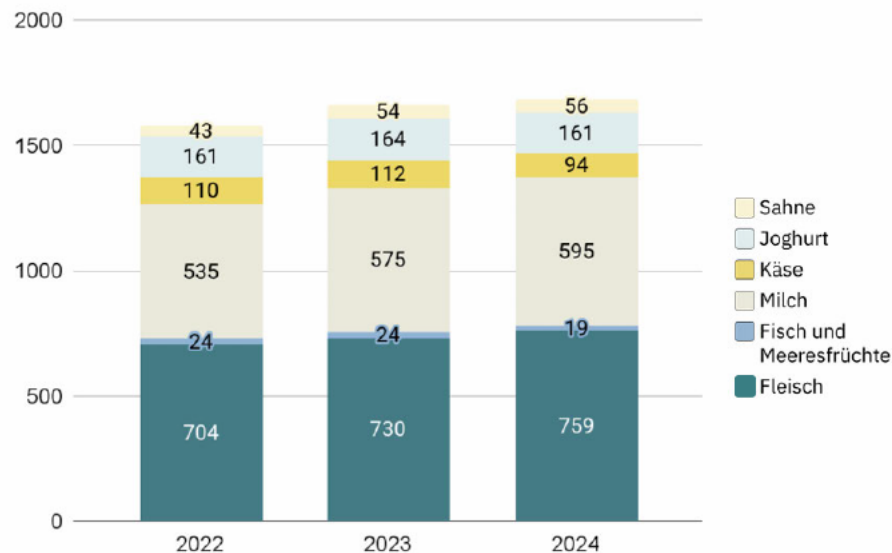


Abbildung 2: Steigender Umsatz pflanzenbasierter Lebensmittel nach sechs verschiedenen Kategorien in Deutschland 2022-2024 (in Mio. Euro) (GFI Europe, 2025a, S. 4)

Dabei ist die Umsatzstagnation zwischen 2023 und 2024 weniger auf eine nachlassende Nachfrage als vielmehr auf die zunehmenden Preissenkungen zurückzuführen. Vor allem im Fleisch- & Milcheratzbereich zeigen sich derzeit die größten Umsätze (Fleisch: 759 Mio. Euro; Milch: 595 Mio. Euro für das Jahr 2024) (GFI Europe, 2025a).

Der in Deutschland erzielte Umsatz mit Fleischersatzprodukten auf Pilz- und Algenbasis betrug laut Statista im Jahr 2017 4,8% am Gesamtumsatz mit Fleischersatzprodukten und stieg 2019 auf 7,5% an, was auch im Bereich der mikrobiellen Proteine auf einen wachsenden Markt hindeutet, wenn auch wesentlich kleiner bisher als der Markt der pflanzlichen Proteine. Das 2012 in Deutschland eingeführte QuornTM ist das bekannteste Beispiel für aus Mykoprotein (Pilzprotein) produzierte Lebensmittel (Kern, 2022).

Die erhöhte Nachfrage nach vegetarischen und veganen Produkten wird dabei primär ausgelöst durch eine wachsende Anzahl an Verbrauchern, die gar kein oder nur gelegentlich Fleisch und Wurst essen, sogenannte Flexitarier. Diese Verbrauchergruppe stützt auch hauptsächlich die sinkende Nachfrage nach Fleisch. 41% der Deutschen bezeichneten sich im Jahr 2024 als Flexitarier, 8% als Vegetarier (kein Fleisch und Fisch) und 2% als Veganer (keinerlei tierische Produkte) (BMEL, 2024).

2.2 Relevanz einer „Ernährungswende“ in Deutschland

Trotz des positiv zu bewertenden Rückgangs des Fleischkonsums fasst die DGE zusammen, dass eine „Ernährungswende“ notwendig sei, um aktuelle politische Ziele in Bezug auf Nachhaltigkeit, Tierwohl und Gesundheit zu erreichen. Die DGE übernimmt hierfür folgendes Modell des BMEL zur Nachhaltigen Ernährung (siehe Abb. 3), welches vier Dimensionen erfasst: Gesundheit, Umwelt, Tierwohl und Soziales (DGE, 2024).

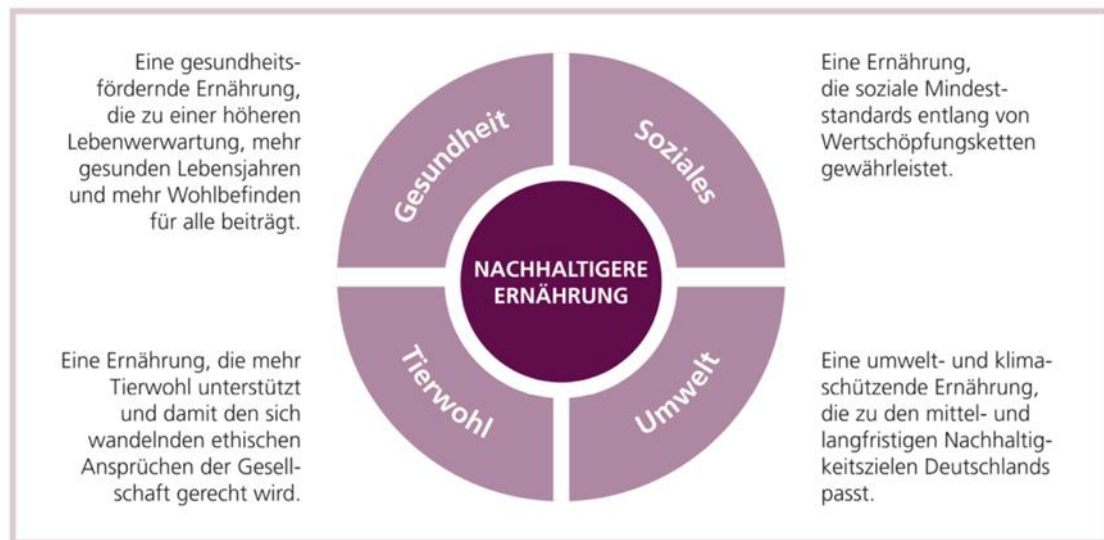


Abbildung 3: Die vier zentralen Ziele einer nachhaltigeren Ernährung ("Big Four") (DGE, 2024, S. 18; WBAE, 2020, S. I)

Die von der DGE als unabdingbar angesehene „Ernährungswende“ sieht als konkrete Empfehlungen vor, dass nicht nur der Fleischkonsum noch weiter reduziert werden muss, sondern der gesamte Konsum tierischer Lebensmittel eingeschränkt werden sollte. Besonders der Konsum von Milchprodukten und rotem Fleisch stehen im Konflikt mit den Nachhaltigkeitszielen. Als Ausnahme hiervon ist der Konsum von Eiern zu erwähnen, welche weder aus gesundheitlicher Sicht noch aus der Umweltperspektive eingeschränkt werden müsse. Der Aspekt des Tierwohls stellt allerdings auch hier ein Problem dar. Zweite Ausnahme ist der Fischkonsum. Hier geht eine Steigerung des Konsums mit deutlichen gesundheitlichen Vorteilen einher. Allerdings konnten in der Studie keine Daten in Bezug auf Überfischung und Artenschutz berücksichtigt werden. Daher kann aus dem Nachhaltigkeits- und Tierwohlaspekt trotzdem keine Empfehlung zu einer Steigerung des Fischkonsums gegeben werden (DGE, 2024).

Die angestrebte „pflanzenbasierte Ernährung“ beschreibt hierbei nicht die vollständige Vermeidung tierischer Produkte, jedoch eine wesentliche Reduktion dieser Lebensmittel. Stattdessen soll der Fokus auf pflanzliche Lebensmittel wie Obst, Gemüse, Vollkornprodukte, Bohnen, Hülsenfrüchten, Nüssen und Samen gelegt werden (Quack et al., 2023).

Nach den Daten der Nationalen Verzehrstudie II liegt die mittlere Proteinzufuhr in Deutschland in allen Altersgruppen deutlich über den Referenzwerten für eine empfohlene Zufuhr. Damit ist Deutschland kein Proteinmangelland (Max Rubner-Institut, 2008). Gemäß FAO-Statistiken wird der Großteil des Proteinbedarfs in Deutschland, trotz rückläufigem Trend im Fleischkonsum (Abb.1), jedoch immer noch über tierische Proteine gedeckt. Nur rund 35 % bis 40 % des Konsums resultiert in Deutschland aus pflanzlichen Lebensmitteln. Somit würde die derzeitige Proteinzufuhr aus rein pflanzlichen Quellen allein nicht ausreichen, um die Zufuhrempfehlungen für Protein vollständig decken zu können (Quack et al., 2023).

Um eine Verschiebung weg von tierischen Proteinen zu erleichtern, werden neben konventionellen pflanzlichen Proteinen auch die Nutzung neuer Proteinquellen als notwendig angesehen (z.B. Mykoproteine, Mikroalgen, Insekten, In-Vitro-Fleisch etc. - siehe Kap. 2.5 *Definition Alternative Proteine*). So umfasste beispielweise auch ein Entschluss des Europäischen Parlaments vom 19. Oktober 2023 zu einer „Europäischen Proteinstrategie“ (Verfahrensnummer 2023/2015 (INI)) die Erschließung nicht - pflanzlicher alternativer Proteinquellen, darunter Mikroalgen, Pilzproteine und Insekten (Europäisches Parlament, 2023).

Das Potenzial alternativer Proteine, konventionelle tierische Proteine zu ersetzen, hängt maßgeblich von ihrem ernährungsphysiologischen Beitrag zur Ernährung ab. Tierische Lebensmittel haben in der Regel einen hohen Proteingehalt und gelten im Allgemeinen als qualitativ hochwertige Proteine mit einem vollständigen essenziellen Aminosäureprofil und einer guten Verdaulichkeit für den Organismus (Azizi et al., 2024).

Angesichts des rückläufigen Trends des Konsums tierischer Produkte, wie Fleisch (Abb.1) und des steigenden Konsums alternativer Proteine (Abb.2) in Deutschland, sowie der angestrebten „Ernährungswende“ (DGE, 2024), stellt sich die Frage nach der Proteinqualität dieser Alternativen und ihrem Potenzial den menschlichen Proteinbedarf decken zu können. Besonders am Beispiel von Veganer*innen, die jegliche tierische Proteine vermeiden, wird deutlich, dass die Proteinbedarfsdeckung eine Schwierigkeit darstellen kann (Klug et al., 2024).

Vor diesem Hintergrund stellt die Substitution tierischer durch alternative Proteine eine zentrale ernährungswissenschaftliche Herausforderung dar.

2.3 Definition Proteine

Proteine (umgangssprachlich: Eiweiße) gehören mit den Kohlenhydraten und den Fetten zu den Makronährstoffen, d.h. zu den lebensnotwendigen Nährstoffen, die der Körper in größeren Mengen benötigt. Proteine bestehen aus einer langen Kette von miteinander verknüpften Einzelbausteinen, den sogenannten Aminosäuren (AS). Strukturen mit mehr als 100 Aminosäuren werden als Proteine

bezeichnet. Aminosäuren haben eine Grundstruktur aus Kohlenstoff, Wasserstoff, Sauerstoff und Stickstoff (DGE, 2021).

2.3.1 Relevanz der Proteine für die menschliche Gesundheit

Protein versorgt den Körper primär mit unentbehrlichen Aminosäuren und Stickstoff für die Bildung u. a. von Zellen und Geweben, Enzymen, Hormonen, Transportproteinen und Antikörpern. Sie erfüllen somit vielfältige Aufgaben, wie z.B. die Synthese von Körpermasse (besonders während des Wachstums von Kindern und in der Schwangerschaft), die Unterstützung des Immunsystems (z.B. als Antikörper und Gerinnungsfaktoren), den Stofftransport (z.B. Sauerstofftransport durch Hämoglobin), die Synthese von Strukturproteinen (z.B. Keratin) für Haut, Haare oder Nägel oder als Träger der Erbinformation (z.B. Desoxyribonukleinsäure (DNS)). Proteine können auch zur Energiebereitstellung herangezogen werden, wobei 1 g Protein 4kcal (17kJ) liefert. Im Vergleich zu den Energieträgern Fette und Kohlenhydrate, spielen sie diesbezüglich jedoch eine untergeordnete Rolle, da die Ausscheidung der Abbauprodukte der Proteine (Stickstoffverbindungen) mit einem relativ hohen Energieaufwand verbunden ist (Elmadfa & Leitzmann, 2023, S. 222 f.).

Bei einem bestehenden Proteinmangel, reduziert der Körper zunächst die Stickstoffausscheidung und versorgt sich selbst, indem er körpereigenes Protein aus der Muskulatur abbaut. Dieser Muskelabbau führt zu einer Abnahme der Muskelfunktion und geht mit einem erhöhten Risiko für Frakturen und Gebrechlichkeit, insbesondere bei älteren Menschen, einher. Hält der Proteinmangel länger an und reichen die bereitgestellten Aminosäuren durch den Muskelabbau nicht mehr aus, können Stoffwechsel- und weitere Organfunktionen beeinträchtigt werden (DGE, 2021).

Proteine sind somit unersetzbare, lebensnotwendige Nahrungsbestandteile. Aus ernährungsphysiologischer Sicht werden Aminosäuren in unentbehrliche (essenzielle) und entbehrliche (nicht-essenzielle) Aminosäuren eingeteilt. Die unentbehrlichen Aminosäuren kann der Körper selbst nicht herstellen und sind unersetzlich, weshalb sie täglich mit der Nahrung aufgenommen werden müssen (Elmadfa & Leitzmann, 2023, S. 219).

2.3.2 Einteilung in unentbehrliche und entbehrliche Aminosäuren

„Im menschlichen Körper werden 20 verschiedene Aminosäuren zum Aufbau von Proteinen benötigt, diese werden als proteinogen bezeichnet. Neun der proteinogenen Aminosäuren können im menschlichen Organismus nicht neu aufgebaut werden, sie werden daher als unentbehrlich (früher: essenziell) bezeichnet“ (DGE, 2021). Werden diese unentbehrlichen Aminosäuren nicht regelmäßig zugeführt kann es zu Mangelerscheinungen kommen. Abb. 4 zeigt die für den Menschen neun unentbehrlichen Aminosäuren, die täglich mit der Nahrung zugeführt werden sollten:

Isoleucin Leucin Lysin Methionin ^a + Cystein ^{**} Phenylalanin ^b + Tyrosin ^{**} Threonin Tryptophan Valin Histidin [*]
[*] nach DGE nur für Säuglinge unentbehrlich, nach WHO/FAO/UNU auch für Kinder, Jug. & Erw. ^{**} bedingt-essenzielle AS ^a für die Synthese von Cystein benötigt ^b für die Synthese von Tyrosin benötigt

Abbildung 4: Die 9 unentbehrlichen Aminosäuren (eigene Darst., modifiziert nach (Elmadfa & Leitzmann, 2023, S. 221))

„Die übrigen elf der proteinogenen Aminosäuren können unter normalen Bedingungen und bei ausreichenden Mengen an Stickstoff im Stoffwechsel selbst aufgebaut werden. Sie gelten als entbehrliche (früher: nicht-essenzielle) Aminosäuren“. Dazu zählen Alanin, Arginin, Asparagin, Asparaginsäure, Cystein, Glutamin, Glutaminsäure, Glycin, Prolin, Serin und Tyrosin (DGE, 2021).

Bis heute ist die genaue Abgrenzung von unentbehrlichen AS und entbehrlichen AS unscharf, da der menschliche Körper einige AS aus anderen AS umwandeln kann. Beispielhaft hierfür sind Cystein und Tyrosin, die aus den unentbehrlichen Aminosäuren Methionin bzw. Phenylalanin aufgebaut werden können. Bei einem Mangel dieser AS werden Cystein und Tyrosin ebenfalls unentbehrlich. Weitere Beispiele sind Arginin und Glutamin (Matissek & Hahn, 2023, S. 58). Unklar ist auch die Einteilung von Histidin, das zwar für den Säugling als unentbehrliche AS gilt, jedoch beim erwachsenen Menschen als unentbehrliche AS umstritten wird, unter anderem weil der Körper einen größeren Pool verfügt, sodass auch bei histidinfreier Kost Mangelerscheinungen erst spät auftreten (FAO & WHO, 2007; Matissek & Hahn, 2023, S. 303 f.). So zählt die DGE Histidin zu den entbehrlichen AS (DGE, 2021), während die World Health Organisation (WHO) Histidin für die erwachsene Zielgruppe in ihre Bedarfsempfehlungen für unentbehrliche AS miteinschließt. Somit wird auch bei der Berechnung des PDCAAS bzw. DIAAS nach FAO/WHO Standard Histidin mitberücksichtigt. Dennoch weist die WHO in ihrer aktuellen Stellungnahme zu Histidin daraufhin: „Bis heute ist die Unentbehrlichkeit von Histidin bei gesunden Erwachsenen noch nicht geklärt“ (FAO & WHO, 2007, S. 147).

2.3.3 Proteinbedarf gesunder erwachsener Frauen und Männer

Die Deutsche Gesellschaft für Ernährung (DGE) gibt für die erwachsene gesunde Allgemeinbevölkerung von 19 bis 65 Jahren eine empfohlene Zufuhr von 0,8 g/kg Körpergewicht pro Tag an. Das heißt 97,5% der Bevölkerung haben ihren Bedarf bei 0,8 g gedeckt. Unter Annahme des Normalgewichts (BMI = 22 kg/m²) ergibt sich für eine gesunde erwachsene Frau im Alter von 19 bis 65 Jahren ein durchschnittliches Gewicht von 58,2-60,5 kg. Daraus lässt sich eine empfohlene Proteinzufuhr

von 47-48 g/Tag ableiten. Für den gesunden Mann in derselben Altersspanne wird ein durchschnittliches Gewicht von 68,7-70,8 kg als Referenz verwendet, woraus sich eine empfohlene Proteinzufuhr von 55-57 g/Tag ableiten lässt (DGE, 2017).

Für Erwachsene ab 65 Jahren wird für die Proteinzufuhr die körperliche Funktionalität und der Funktionserhalt mitberücksichtigt. Es ist jedoch kein genauer Bedarfswert verfügbar. Durch die Studienlage lässt sich aber ein Schätzwert für eine angemessene Proteinzufuhr von 1,0 g/kg Körpergewicht pro Tag angeben. Auch für Schwangere und Stillende ergibt sich, durch die Gewebeneubildung bzw. Milchbildung, ein erhöhter Proteinbedarf von 0,9-1,2 g/kg Körpergewicht pro Tag (DGE, 2017).

Etwa ein Drittel der empfohlenen täglichen Proteinzufuhr sollten die unentbehrlichen AS darstellen. Der physiologische Bedarf für Protein richtet sich nämlich streng genommen nach dem Bedarf für die neun unentbehrlichen Aminosäuren und das Element Stickstoff. In den aktualisierten D-A-CH Referenzwerten von 2017 wird aus diesem Grund ergänzend der durchschnittliche Bedarf an unentbehrlichen Aminosäuren in mg/kg Körpergewicht pro Tag angegeben. Dabei werden die von der World Health Organisation (WHO) veröffentlichten Werte zum Bedarf an unentbehrlichen Aminosäuren für Säuglinge, Kinder, Jugendliche und Erwachsene (Tab. 1) übernommen (DGE, 2021):

Tabelle 1: Empfohlene Zufuhr für unentbehrliche Aminosäuren (in mg/kg Körpergewicht/Tag) für die Altersgruppe Erwachsene >18 Jahren, eigene Darstellung, Daten aus (FAO & WHO, 2007, S. 150)

Altersgruppe	Alter	His	Ile	Leu	Lys	SAA*	AAA**	Thr	Trp	Val	Gesamt
	(Jahre)										
Erwachsene (inkl. Ältere Menschen und Schwangere)	>18	10	20	39	30	15	25	15	4	26	184

*schwefelhaltige AS (Met + Cys); **aromatische AS (Phe + Tyr)

Wie Tabelle 1 zeigt, ergeben sich für die erwachsene Zielgruppe ab 18 Jahren vor allem für die unentbehrlichen AS Leucin (39 mg/kg KG/Tag), Lysin (30 mg/kg KG/Tag), Valin (26 mg/kg KG/Tag) und die aromatischen AS, Phenylalanin und Tyrosin (25 mg/kg KG/Tag) relativ hohe Bedarfswerte. Für Tryptophan ergibt sich mit 4 mg/kg Körpergewicht pro Tag der geringste Bedarf. Nach der FAO, gibt es derzeit keine Evidenz, dass dieser unentbehrliche Aminosäurebedarf bei älteren Menschen oder während der Schwangerschaft und Stillzeit anders ist (FAO & IAEA, 2024).

Hinsichtlich der tolerierbaren Gesamtaufnahmemenge gibt es keine Angaben zum „Upper Level“, da die verfügbaren Daten über die Zusammenhänge zwischen Proteinzufuhr und Gesundheit derzeit nicht ausreichen. Eine Proteinzufuhr in doppelter Höhe des Referenzwerts, wird für Erwachsene von der Europäischen Behörde für Lebensmittelsicherheit (EFSA) als sicher angesehen, das entspricht

einem Wert von etwa 2 g/kg Körpergewicht. Bei einer deutlich höheren Proteinzufuhr in drei- bis vierfacher Höhe des Referenzwertes über einen längeren Zeitraum sind unerwünschte Symptome nicht ausgeschlossen (DGE, 2021).

Die Referenzwerte für die Proteinzufuhr gelten allgemein für die Aufnahme von qualitativ hochwertigem Protein (DGE, 2021).

2.4 Definition der Proteinqualität von Nahrungsproteinen

Zur Erreichung der Deckung des Proteinbedarfs spielt nicht nur die Quantität der aufgenommenen Nahrungsproteine eine Rolle, sondern auch die Qualität. Die Qualität eines Nahrungsproteins bestimmt, wie gut der Körper es in eigene, spezifische Proteine umwandeln kann. Bei ausreichender Energiezufuhr kommt es somit nicht darauf an, wie viel Protein man zu sich nimmt. Wichtiger ist es, wie gut der Körper das aufgenommene Protein nutzen kann. Dies hängt von mehreren Faktoren ab:

1. Der Aminosäurezusammensetzung des Nahrungsproteins
2. der Verdaulichkeit der unentbehrlichen Aminosäuren und
3. dem menschlichen Bedarf an unentbehrlichen Aminosäuren, der sich je nach Altersgruppe unterscheidet (Adhikari et al., 2022; Elmadfa & Leitzmann, 2023, S. 232).

Diese drei Faktoren bestimmen somit maßgeblich die ernährungsphysiologische Proteinqualität von Nahrungsproteinen, wie in Abb. 5 dargestellt:

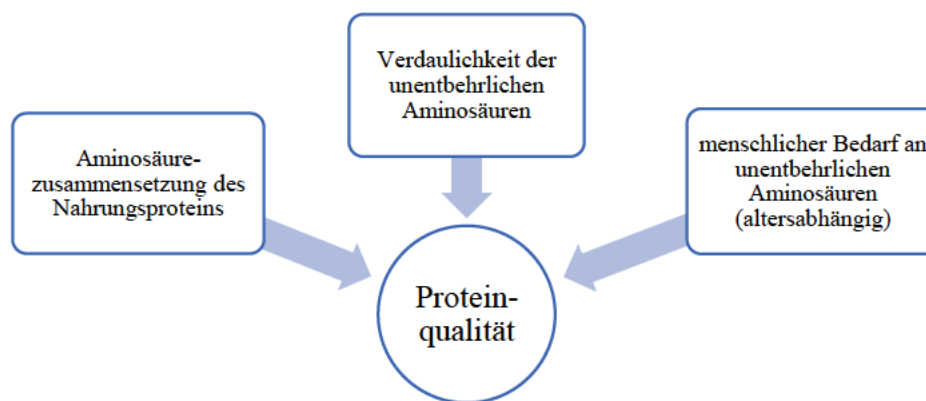


Abbildung 5: Erforderliche Elemente zur quantitativen Definition der Proteinqualität, eigene Darstellung (modifiziert nach (Adhikari et al., 2022, S. 6))

Unter der Aminosäurezusammensetzung des Nahrungsproteins versteht man den prozentualen Gehalt der einzelnen Aminosäuren. Wie bereits beschrieben, bestehen Proteine aus mindestens 100 verketteten Aminosäuren. Besonders der Gehalt und die prozentuale Verteilung an unentbehrlichen Aminosäuren ist relevant für die Gesamtqualität des Proteins. Vereinfacht gesagt bedeutet das, je mehr unentbehrliche Aminosäuren ein Protein enthält, desto besser die Qualität (DGE, 2021).

Unter der Verdaulichkeit des Nahrungsproteins versteht man, wie gut das Protein vom menschlichen Organismus verwertet werden kann. Dies ist der zweite entscheidende Faktor zur Bewertung der Proteinqualität, denn auch wenn ein Protein eine nahezu perfekte Aminosäurezusammensetzung hat, bringt dies nichts, wenn der Körper das Protein nicht verdauen kann (Adhikari et al., 2022).

Um die Verdaulichkeit von AS aus Proteinen korrekt zu bestimmen, muss zwischen nicht aufgenommenen Nahrungsbestandteilen und körpereigenen AS-Verlusten, z.B. aus Verdauungsenzymen, Schleim oder abgestoßenen Darmzellen, unterschieden werden. Diese sogenannten *endogenen Verluste* gehören zum natürlichen Stoffwechsel und müssen berücksichtigt werden, um die Verdaulichkeit tatsächlich aufgenommenen Nahrungsproteins realistisch zu erfassen. Dabei unterscheidet man in der Regel zwischen zwei Formen der Verdaulichkeit (Hodgkinson, 2024):

1. **Scheinbare Verdaulichkeit** (*Apparent Digestibility - AD*): misst den Unterschied zwischen aufgenommener und gemessener Aminosäuremenge (je nach Methode im Ileum bzw. Ende des Dünndarms oder Fäzes), ohne Berücksichtigung der endogenen Verluste
2. **Wahre Verdaulichkeit** (*True Digestibility - TD*) oder **standardisierte Verdaulichkeit** (*Standardized Digestibility - SD*): korrigiert die AD um die endogenen Verluste, wobei es sich bei der TD um einen gemessenen Wert und bei der SD um einen vorher festgelegten standardisierten Wert handelt

Die Anwendung der scheinbaren Verdaulichkeit führt zu einer Unterschätzung der tatsächlich verdauten AS. Die wahre Verdaulichkeit bzw. standardisierte Verdaulichkeit werden somit in der Ermittlung der Proteinqualität vorgezogen (siehe Kap. 2.5.3 *PDCAAS* und 2.5.4 *DIAAS*) (FAO & IAEA, 2024).

Der dritte maßgebliche Faktor zur Bestimmung der Proteinqualität ist der menschliche Bedarf an unentbehrlichen AS. Wie bereits beschrieben ist dieser maßgeblich von der Altersgruppe abhängig, wobei zwischen Säuglingen, Kindern, Jugendlichen und Erwachsenen (inkl. Schwangere und Ältere) unterschieden wird (DGE, 2021; FAO & IAEA, 2024). Auf Grundlage dieser Bedarfszahlen wurden „ideale“ Referenzproteine erstellt, die basierend auf einer hundertprozentigen Verdaulichkeit, alle erforderlichen unentbehrlichen AS (pro g Protein) für die entsprechende Altersgruppe liefern (FAO, 2013).

2.5 Bewertungsmethoden zur Ermittlung der Proteinqualität

Zur Ermittlung der Proteinqualität wurden und werden verschiedene Methoden wie chemische, biologische und chemisch-biologische Parameter verwendet. So war es in der Vergangenheit gängig, Verfahren, die auf der Stickstoffbilanz (z.B. Biologische Wertigkeit (BW), Netto Protein Utilisation (NPU)), der Gewichtszunahme im Tierversuch (z.B. Protein Efficiency Ratio (PER)) oder dem Aminosäureprofil allein (Amino Acid Score oder Chemical Score) basierten, zu nutzen. In der deutschen Literatur findet man häufig nur den Begriff der Biologischen Wertigkeit (BW), die Werte wurden

jedoch oft mit verschiedenen Verfahren ermittelt und wiesen somit eine große Spannweite auf (Bie-salski et al., 2020, S. 140). Im Folgenden werden die wichtigsten Methoden und Begriffe kurz erklärt.

2.5.1 Biologische Wertigkeit (BW)

Die klassische Definition der Biologischen Wertigkeit geht zurück auf den Anfang des letzten Jahr-hunderts. Sie definiert, wie effizient ein aufgenommenes Protein für den Aufbau von körpereigenem Protein genutzt werden kann, genauer gesagt, wie viel Gramm Körperprotein durch 100g resorbiertes Nahrungsprotein ersetzt bzw. gebildet werden können. Sie wird als Verhältnis von im Körper zurück-gehaltenem (retiniertem) zu aufgenommenem (absorbiertem) Stickstoff berechnet:

$$BW = \frac{\text{retinierter Stickstoff}}{\text{absorbierter Stickstoff}} \times 100$$

(Elmadfa & Leitzmann, 2023, S. 235; FAO & WHO, 2007)

Um die BW zu messen, werden die Probanden zunächst proteinfrei ernährt, um die Basis-Stick-stoffverluste zu bestimmen, dann wird schrittweise die Eiweißzufuhr erhöht. Gleichzeitig wird die Stickstoffbalance bestimmt und ermittelt, mit welcher minimalen Proteinmenge ein Stickstoffgleich-gewicht erreicht wird. Hühner-Volleiprotein wurde dabei willkürlich als Referenzprotein ausgewählt und bekam den Wert 100, mit dem alle anderen Proteine verglichen werden. Bei einem Wert unter 100 verbleiben somit im Vergleich zum Eiprotein bei Aufnahme der gleichen Proteinmenge weniger Aminosäuren im Körper und die Proteinverwertung ist somit schlechter. Liegt der Wert der BW eines Nahrungsproteins über 100, kann es besser vom Körper verwertet werden. Es ist jedoch wichtig zu beachten, dass der Wert von 100 willkürlich gewählt wurde und die tatsächliche Menge an körperei-genem Eiweiß, die aus Volleiprotein hergestellt werden kann, in der Realität geringer ist und nicht einer 100% Umsetzung entspricht. Die BW ist somit keine absolute Prozentzahl für die Umsetzung des Nahrungseiweißes im Körper, sondern eine relative Prozentzahl, meist mit Vollei als Referenz-protein (Arndt & Albers, 2001, S. 63 ff.).

2.5.2 Amino Acid Score (AAS)

Als weitere Grundlage für die Biologische Wertigkeit wird der Gehalt an unentbehrlichen AS heran-gezogen, das sogenannte Prinzip der limitierenden (begrenzenden) unentbehrlichen Aminosäure. Diese unentbehrliche Aminosäure weicht am stärksten vom Referenzprotein (ideales AS-Muster) ab und reduziert dementsprechend die Verfügbarkeit der anderen Aminosäuren für die Proteinsynthese, wie in folgender Abbildung mit Lysin beispielhaft dargestellt:

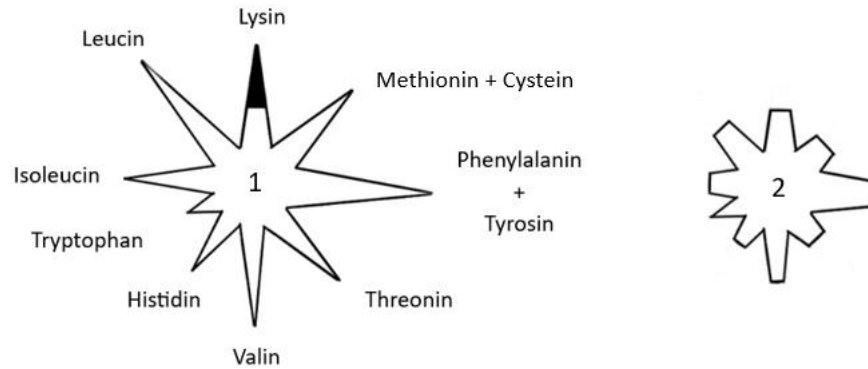


Abbildung 6: Prinzip der limitierenden AS: Fehlt der Nahrung eine gewisse Menge an einer Aminosäure (1), reduziert sich die Verwertbarkeit der anderen Aminosäuren in der gleichen Proportion (2), eigene Darstellung, modifiziert nach (Arndt & Albers, 2001, S. 6)

Man berechnet demnach zunächst den Anteil der einzelnen unentbehrlichen AS im Testprotein und setzt diese ins Verhältnis zum Anteil der entsprechenden AS eines Referenzproteins (häufig Eiprotein). Der hierbei ermittelte kleinste Wert wird als *Amino Acid Score (AAS)* oder auch *Chemical Score (CS)* bezeichnet:

$$AAS = \frac{\text{mg der limitierenden Aminosäure in 1g Testprotein}}{\text{mg derselben Aminosäure in 1g Referenzprotein}}$$

(Elmadfa & Leitzmann, 2023, S. 235; FAO & WHO, 2007)

Wie man anhand der Formel erkennen kann, berücksichtigt der AAS jedoch nicht die Verdaulichkeit des Proteins. Die Einführung der klassischen BW und des AAS fand Anfang bzw. Mitte des letzten Jahrhunderts statt, dies zeigt bereits, dass in der Zwischenzeit zahlreiche neue Erkenntnisse gewonnen und genauere Methoden gefunden wurden, um die Qualität eines Nahrungsproteins zu bestimmen.

2.5.3 Protein Digestibility Corrected Amino Acid Score (PDCAAS)

Der sogenannte *Protein Digestibility Corrected Amino Acid Score (PDCAAS)* ist eine weit verbreitete Methode zur Bestimmung der Proteinqualität, welcher aufgrund der Mängel der Aussagekraft der Biologischen Wertigkeit von der FAO und der WHO entwickelt und in einem Expertenbericht im Jahr 1991 veröffentlicht wurde. Er gilt als international anerkannte Methode zur Bestimmung der Qualität eines Nahrungsproteins. Er berücksichtigt neben dem Gehalt der Aminosäuren des Nahrungsproteins auch die Proteinverdaulichkeit (zu Deutsch: „um die Verdaulichkeit korrigierte Aminosäurebewertung“)(Biesalski et al., 2020, S. 140; FAO & WHO, 1991).

Die Formel des PDCAAS ergibt sich dabei aus der Multiplikation zweier bereits beschriebener Faktoren: 1. Dem kleinsten ermittelten *Amino Acid Score (AAS)*, was der ersten limitierenden Aminosäure entspricht, und 2. der *wahren Proteinverdaulichkeit (TD)*:

$$PDCAAS = AAS \times TD$$

bzw.

$$PDCAAS (\%) = \frac{\text{mg der limitierenden Aminosäure in 1g Testprotein}}{\text{mg derselben Aminosäure in 1g Referenzprotein}} \times \text{wahre fäkale Verdaulichkeit TP\%}$$

$TP = \text{Testprotein}$

(Adhikari et al., 2022; Elmadfa & Leitzmann, 2023, S. 235)

Die TD beschreibt hierbei die *wahre fäkale Verdaulichkeit* des gesamten Proteins (entweder aller enthaltenen Aminosäuren oder des Gesamtstickstoffs), indem man die Differenz zwischen der aufgenommenen und der im Kot ausgeschiedenen Menge berechnet. Somit wird die Proteinverdaulichkeit über den gesamten Verdauungstrakt, einschließlich des Dickdarms, betrachtet. Traditionell wird diese am Tiermodell der Ratte bestimmt (Hodgkinson, 2024).

Als Referenzprotein wird in der Regel das von der WHO und FAO empfohlene Referenzproteinmuster für Vorschulkinder (2-5 Jahre) verwendet (FAO & WHO, 2007).

Der höchste erreichbare PDCAAS Wert ist 1 bzw. 100 Prozent. Ein PDCAAS-Wert < 100 Prozent zeigt an, dass mindestens eine Aminosäure limitierend ist, während ein Wert ≥ 100 Prozent bedeutet, dass es keine limitierende Aminosäure im Nahrungsprotein gibt und das Nahrungsprotein somit alle unentbehrlichen Aminosäuren in ausreichender Menge und in einem optimalen Verhältnis liefert. Werte, die die 100 Prozent überschreiten, werden auf 100 gekürzt, mit der Begründung, dass die Aufnahme von Aminosäuren, die über den menschlichen Bedarf hinausgehen, keinen zusätzlichen Nutzen haben (FAO, 2013).

2.5.4 Digestible Indispensable Amino Acid Score (DIAAS)

Der *Digestible Indispensable Amino Acid Score* (DIAAS) gilt derzeit als präziseste Methode zur Bestimmung der Proteinqualität. Er stellt eine Weiterentwicklung des PDCAAS dar und wurde von der FAO im Jahr 2013 als neuer Standard empfohlen (Adhikari et al., 2022; FAO, 2013):

$$DIAAS = AAS \times TID$$

bzw.

$$DIAAS (\%) = \frac{\text{mg der limitierenden Aminosäure in 1g Testprotein}}{\text{mg derselben Aminosäure in 1g Referenzprotein}} \times \text{wahre ileale Verdaulichkeit } IAA_{lim}\%$$

$IAA_{lim} = \text{limitierende unentbehrliche AS}$

Der DIAAS berechnet sich vom Prinzip wie der PDCAAS. Vergleicht man die beiden Formeln miteinander ergeben sich jedoch zwei wesentliche Unterschiede (Adhikari et al., 2022):

1. Die Verdaulichkeit in der DIAAS - Methode wird nicht auf *fäkaler*, sondern *ilealer* Basis bestimmt

2. Die Verdaulichkeit in der DIAAS - Methode wird auf der Ebene der *einzelnen unentbehrlichen Aminosäuren (IAA)* und nicht des *Gesamtproteins (alle AS oder Gesamtstickstoff)* bestimmt

Die *wahre ileale Verdaulichkeit (TID)* beschreibt die gemessene Verdaulichkeit am Ende des Dünndarms, auch als terminales Ileum bezeichnet. Studien an Schweinen und Ileostomie Patient*innen haben gezeigt, dass die Resorption der für den Proteinstoffwechsel verwertbaren Aminosäuren dort endet. Alles, was danach im Dickdarm geschieht (z.B. mikrobielle Umbauprozesse), trägt nicht mehr zur Versorgung des Körpers bei, sondern verfälscht die Bilanz. Aus diesem Grund wird die Verdaulichkeit auf ilealer Ebene bevorzugt (Hodgkinson, 2024). In DIAAS-Studien ist es gängig statt der wahren Verdaulichkeit (TID) auch die standardisierte Form (SID) anzuwenden. Wie zu Beginn des Kapitels 2.4 beschrieben, berücksichtigen beide Formen die endogenen Verluste und werden deshalb der scheinbaren Verdaulichkeit (AID) vorgezogen (FAO & IAEA, 2024).

Hinsichtlich des zweiten Punktes weist die FAO darauf hin, dass die Verdaulichkeit jeder einzelnen unentbehrlichen AS berücksichtigt werden sollte, da pauschale Stickstoffverdaulichkeitswerte des gesamten Proteins, wie beim PDCAAS, einzelne Aminosäuren systematisch unter- oder überschätzen können (FAO, 2013).

Die ileale Verdaulichkeit der einzelnen AS sollte dabei vorzugsweise beim Menschen bestimmt werden, wenn dies nicht möglich ist, bei wachsenden Schweinen oder wachsenden Ratten (FAO, 2013). Mittlerweile gelten die ilealen Verdaulichkeitsstudien an wachsenden Schweinen als validiertes Modell und zahlreiche Studien nutzen diese, um Aminosäureverdaulichkeitswerte von Lebensmitteln, wie sie vom Menschen verzehrt werden, zu ermitteln (Moughan & Lim, 2024).

Eine weitere Unterscheidung zum PDCAAS ist, dass der DIAAS auf aktualisierten Referenzproteinmustern basiert. Im Zuge dessen werden nun drei verschiedene Altersgruppen für die Allgemeinbevölkerung betrachtet: 1. Säuglinge (bis zu 6 Monaten), 2. Kleinkinder (6 Monate-3 Jahre) und 3. Kinder, Jugendliche und Erwachsene (>3 Jahre)(FAO, 2013). Die genauen Proteinreferenzwerte nach Alterskategorie sind in Anhang A zu finden.

Da der DIAAS diese weiteren Punkte berücksichtigt, wird angenommen, dass er präzise vorhersagen kann, wie viel der zuerst limitierenden AS einer Proteinquelle und damit auch die Menge der insgesamt verwertbaren AS von einer bestimmten Referenzpopulation tatsächlich aufgenommen werden kann (Moughan & Lim, 2024).

Wie der PDCAAS wird der DIAAS meist als Prozentwert angegeben. Ein DIAAS-Wert von ≥ 100 Prozent zeigt an, dass die Proteinquelle den unentbehrlichen Aminosäurebedarf für eine bestimmte Referenzpopulation vollständig erfüllt. DIAAS-Werte können auch Werte über 100 Prozent annehmen, da sie im Gegensatz zum PDCAAS nicht gekürzt werden. Somit werden zusätzliche unentbehrliche AS in hochwertigen Proteinquellen mitberücksichtigt und das Potenzial, Proteine von

geringerer Qualität ergänzen zu können, kann kenntlich gemacht werden. Im Zuge dessen wird der DIAAS auch für die Berechnung von Proteinmischungen empfohlen. Der FAO-Bericht empfiehlt zudem, Proteine nach ihrem DIAAS-Wert in drei Qualitätsstufen zu unterteilen (FAO, 2013):

- < 75: keine Qualitätsangabe
- 75-99: gute Proteinquelle
- ≥ 100 : hochwertige/ausgezeichnete Proteinquelle

Für regulatorische Zwecke wird typischerweise das Referenzprotein für Kleinkinder (6 Monate-3 Jahre) verwendet. Der DIAAS soll in Zukunft den über lange Zeit genutzten PDCAAS als Index der verdaulichen, unentbehrlichen AS ablösen (FAO, 2013; FAO & IAEA, 2024).

2.6 Definition Alternative Proteine

Der Begriff „alternative Proteine“ umfasst verschiedene innovative Ansätze zur Erweiterung des Lebensmittelangebots und Diversifizierung der Proteinversorgung (durch Nachhaltigkeitsziele und Gesundheitsaspekte). Eine allgemein akzeptierte Definition für alternative Proteinquellen gibt es derzeit nicht. Einerseits werden unter dem Begriff Ersatzprodukte für konventionelle tierische Proteine und deren Ursprung, z.B. von Milch, Eiern, Fleisch und daraus hergestellten Produkten verstanden. Andererseits gehören auch neue Quellen, die gängige pflanzliche Rohstoffe wie etwa Sojabohnen oder Getreide ersetzen. Dazu zählen Pflanzen, Pilze, Insekten, Bakterien oder Einzeller (Daniel, 2021).

Alternative Proteine sind im Allgemeinen umweltfreundlicher herzustellen als konventionelle tierische Lebensmittel und ermöglichen eine verbesserte Ökobilanz in der Land- und Wassernutzung sowie der Treibhausgasemission (Kern, 2022). Folgende Abbildung des 15. DGE-Ernährungsberichtes aus dem Jahr 2024 zeigt die aktuell für Deutschland relevanten alternativen Proteinquellen und ihre wichtigsten Chancen bezogen auf die Aspekte Gesundheit, Nachhaltigkeit und Tierschutz:

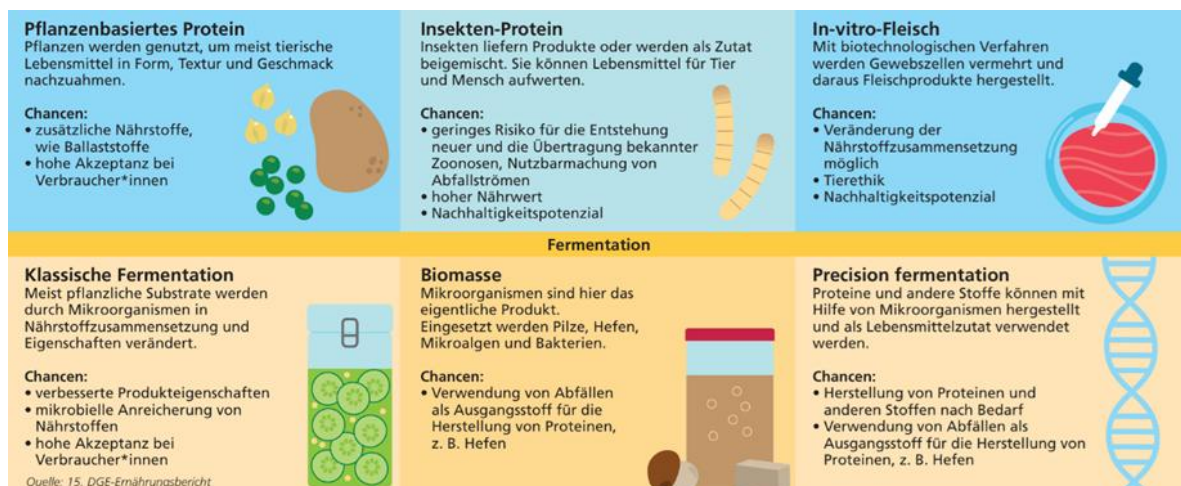


Abbildung 7: Übersicht über die relevantesten alternativen Proteinquellen und ihrer Chancen (DGE, 2024, S. 331)

Wie aus Abb. 7 hervorgeht, handelt es sich um vier Hauptkategorien:

1. **Pflanzenbasierte Proteine** bezeichnen sowohl traditionell verzehrte Pflanzen als auch Pflanzenarten oder -teile, die früher nicht in der Humanernährung verwendet wurden. Die daraus hergestellten Produkte beinhalten meist viele Zutaten und werden tierischen Lebensmitteln in Form, Textur und Geschmack nachempfunden.
2. **Insekten-Proteine** haben in tropischen Regionen von Afrika, Asien und Lateinamerika eine lange kulturelle Tradition. In der EU sind bisher 4 Insekten als neuartige Lebensmittelzutat zugelassen: der gelbe Mehlwurm, die Wanderheuschrecke, die Hausgrille und der Buffalowurm.
3. **In-Vitro-Fleisch** (Labor-Fleisch) wird im Labor aus Zellkulturen, hauptsächlich von Rind, Schwein oder Huhn gewonnen. Die Herstellung ist jedoch noch nicht für große Mengen bereit und eine Marktzulassung in der EU und Deutschland dauert wahrscheinlich noch Jahre.
4. **Fermentierte Proteine** umfassen drei Arten der Fermentation. Die *klassische Fermentation* nutzt Mikroorganismen, um Rohstoffe in Geschmack, Textur oder ernährungsphysiologischen Eigenschaften aufzuwerten (z.B. Sojabohnen zu Tempeh). Die *Biomasse-Fermentation* nutzt Pilze, Hefen, Bakterien und Mikroalgen selbst als Hauptteil der Produkte (z.B. Quorn™). Die *Präzisionsfermentation* dagegen nutzt die Produkte (Proteine oder andere Moleküle), die mithilfe gentechnisch angepasster Mikroorganismen gezielt hergestellt werden können (z.B. Häm-Protein von Impossible Foods) (DGE, 2024; KERN, 2022).

Einige dieser alternativen Proteinquellen fallen in die Kategorie der „neuartigen Lebensmittel“ (Novel Foods). Diese Produktgruppe umfasst laut dem Lebensmittelrecht der EU alle Nahrungsmittel, die vor Inkrafttreten der Novel-Food-Verordnung (1997) innerhalb der EU nicht in nennenswertem Umfang zum Verzehr angeboten oder vom Menschen konsumiert wurden (VO (EU) 2015/2283). Hierzu zählen z.B. Lebensmittel und Lebensmittelbestandteile, die aus bestimmten Arten von Insekten, Mikroorganismen, Pilzmyzel oder Algen bestehen oder aus diesen isoliert wurden. Zudem fallen in diesen Bereich auch Produkte aus neu entwickelten technischen Verfahren, wie z.B. Kunstfleisch oder mikrobiell erzeugte Kaseine der Präzisionsfermentation (Art. 3 Abs. 2 VO (EU) 2015/2283).

In dieser Arbeit liegt der Fokus auf pflanzlichen und mikrobiellen Proteinquellen der Biomassenfermentation, da diese Gruppen derzeit und laut Prognosen für die nächsten zehn Jahre die größte Marktrelevanz in Deutschland besitzen werden. In anderen Bereichen ist die Produktion noch nicht skaliert und die meisten Produkte und Proteinquellen sind noch nicht zugelassen (GFI Europe, 2023, 2025c).

Zudem können pflanzliche und mikrobielle Proteinquellen Einsatz in veganen und vegetarischen Ersatzprodukten finden, was vor dem Hintergrund der hohen Verbraucherakzeptanz (siehe Abb. 7) und steigenden Nachfrage nach diesen Produkten (siehe Kap. 2.1), die Relevanz dieser Proteine vor alternativen tierischen Proteinen (Insekten und In-Vitro-Fleisch) aufzeigt.

Auch aus gesundheitlicher Sicht werden derzeit besonders die pflanzlichen und mikrobiellen Proteine der Biomassenfermentation hervorgehoben, da diese, neben einem hohen Proteingehalt, zusätzliche Nährstoffe wie Ballaststoffe (siehe Abb. 7), Vitamin D oder Omega-3-FS, die in der deutschen Allgemeinbevölkerung auch als kritische Nährstoffe gelten, liefern können. Insekten weisen zwar einen hohen Proteingehalt auf, jedoch auch einen hohen Fettgehalt (bis zu 50%) und können Kreuzallergien auslösen. Für In-Vitro-Fleisch, das konventionellem Fleisch sehr ähnlich sein soll, liegen noch keine belastbaren gesundheitlichen Bewertungen vor (DGE, 2024).

Im Folgenden letzten Abschnitt des theoretischen Hintergrundes werden somit die ausgewählten Gruppen der pflanzlichen Proteine und mikrobiellen Proteine kurz beschrieben. Dabei werden die wichtigsten Proteinquellen, die im nächsten Teil der Arbeit auf ihre Proteinqualität hin untersucht werden sollen, herausgearbeitet.

2.6.1 Pflanzliche Proteine

Als pflanzliche Proteinquellen werden nach DGE die Hülsenfrüchte (*Leguminosen*), Ölsaaten, Getreide sowie Pseudogetreide, sowie Blätter und Algen gewertet. Die bekanntesten Quellen von pflanzlichen Proteinen sind Soja und Weizengluten, aus welchen auch die ersten auf dem deutschen Markt verfügbaren pflanzlichen Alternativprodukte hergestellt wurden. Diese nehmen nach wie vor die Hauptrolle unter den Proteinzutaten ein. Aufgrund von Allergenpotential und ökologischen Bedenken, rücken jedoch auch weitere Proteinquellen in den Fokus, wie in folgender Tabelle beispielhaft dargestellt (DGE, 2024):

Tabelle 2: Übersicht der Vielfalt pflanzlicher Proteinquellen mit Beispielen, eigene Darst. mod. nach (DGE, 2024, S. 303)

Gruppe pflanzlicher Proteinquellen	Beispiele
Nüsse und Ölsaaten	Soja, Erdnüsse, Rapssamen, Sesamsamen, Sonnenblumenkerne, Leinsamen, Hanfsamen, Baumwollsaamen
Hülsenfrüchte (Leguminosen)	Bohnen, Kichererbsen, Linsen, Erbsen, Lupinen
Getreide und Pseudogetreide	Weizen, Mais, Hafer, Reis, Gerste, Sorghum, Amaranth
Blatt	Tabak, Gräser, Zuckerrohr, Klee, Zuckerrübe, Moringa, Wasserlinse
Algen	Mikroalgen (auch zu den mikrobiellen Proteinen gezählt, siehe Kap. 2.6.2), Makroalgen (besonders Rotalgen)

Wie die Tabelle 2 zeigt, rücken neben traditionell konsumierten pflanzlichen Proteinquellen wie Hülsenfrüchten und Getreide auch zunehmend neuartige pflanzliche Proteine zum Beispiel aus grüner Biomasse wie Gräser, Klee und Wasserlinse oder mariner Biomasse wie Makroalgen in den Fokus der Forschung für zukünftige Proteinquellen (DGE, 2024).

Derzeit stellen insbesondere regionale Hülsenfrüchte (z.B. Erbse, Lupine, Ackerbohne) und Ölsaaten (z.B. Soja, Raps, Sonnenblumen) aufgrund ihres vergleichsweise hohen Proteingehalts und des heimischen Anbaus vielversprechende und nachhaltige Proteinquellen für Deutschland dar (BLE, 2024; UFOP, 2025). Relevant sind diese auch vor dem Hintergrund der Eiweißpflanzenstrategie, nach der der Anbau von Hülsenfrüchten gezielt politisch gefördert werden soll, um die Importabhängigkeit von anderen Ländern zu reduzieren und die eigenen regionalen Wertschöpfungsketten zu stärken (BMEL & BLE, 2020).

Hülsenfrüchte, auch als Leguminosen bzw. Körnerleguminosen bezeichnet, sind die trockenen Samen von Pflanzen aus der Familie der Schmetterlingsblütler. Die häufig als Hülsenfrucht eingestufte Sojabohne, wird nach FAO aufgrund ihres hohen Fettgehalts (ca. 20% i.Tr.) jedoch zu den Ölsaaten gezählt (Pfeuffer et al., 2019). Den Anbau betreffend sind mengenmäßig, die Erbse, die Ackerbohne, die Süßlupine und die Sojabohne, die wichtigsten Vertreter in Deutschland. Linsen und Kichererbsen sind bisher Nischenkulturen (BLE, 2024). Hülsenfrüchte erreichen durchschnittliche Proteingehalte zwischen 20-35% in der Trockenmasse (i.Tr.), wobei Soja mit circa 40% i.Tr. den höchsten Proteingehalt erreicht. Der Proteingehalt in Getreide (10-15% i.Tr.) ist im Vergleich dazu wesentlich geringer (Erbersdobler et al., 2017).

Im Bereich der Ölsaaten werden die Proteine aus den Ölpresskuchen, den Nebenprodukten der Ölerstellung, gewonnen. Auch diese weisen einen hohen Proteingehalt auf (z.B. Hanf: 25 %, Raps: 20-25%, Kürbiskerne: 36 % (i.Tr.)). Während Ölsaatenproteine aus z.B. Sonnenblumenkernen und Hanfsamen zunehmend in der Lebensmittelherstellung (z.B. Fleischanaloga) genutzt werden, finden Proteine aus der Rapspflanze derzeit noch keine Anwendung (Kotecka-Majchrzak et al., 2020). Es gibt jedoch aktuelle Forschung, z.B. eine randomisierte klinische Studie (RCT) der Martin-Luther-Universität Halle Wittenberg, die darauf hinweist, dass Raps grundsätzlich eine sehr gute Alternative zu Soja für die menschliche Ernährung, mit ähnlicher Aminosäurezusammensetzung und sogar geringfügig vorteilhafteren Effekten auf den Stoffwechsel (z.B. Insulinantwort, Sättigungsgefühl), darstellen kann (Volk et al., 2020).

Pflanzenbasierte Ersatzprodukte

Wie bereits beschrieben, ist Deutschland der größte Markt für pflanzenbasierte Ersatzprodukte innerhalb der EU, wobei Milch- und Fleischersatzprodukte den größten Anteil am Umsatz ausmachen (GFI Europe, 2025a). Die aktuell am Markt verfügbaren Milch- und Fleischersatzprodukte werden

meist aus proteinreichen Mehlen, Proteinkonzentraten oder Proteinisolaten, die aus den pflanzlichen Rohstoffen gewonnen werden, hergestellt. Milchersatzprodukte basieren hauptsächlich auf Hafer, Mandel, Soja, Reis und Kokos. Pflanzenbasierte Fleischalternativen bestehen in der Regel aus Sojaprotein, Weizengluten und derzeit verstärkt auch aus Erbsenprotein (DGE, 2024).

Nach wie vor bestehen Herausforderungen bei der Verbesserung von Geschmack und Textur, insbesondere bei pflanzlichen Joghurt- und Käsealternativen. Fleischersatzprodukte sind technisch komplex aufgebaut: sie enthalten neben pflanzlichem Protein auch weitere Zutaten wie Wasser, Salz und verschiedene Zusatzstoffe und werden meist als ultraverarbeitete Lebensmittel (ultra processed foods (UPF)) eingeordnet. Auch ihre Nährstoffzusammensetzung ist häufig noch nicht optimal, insbesondere im Hinblick auf die Versorgung mit unentbehrlichen Aminosäuren und Mikronährstoffen (z.B. Magnesium, Vitamin B₁₂). Derzeitige Produkte können zwar ähnliche Proteingehalte zu konventionell tierischen Produkten erreichen (v.a. Fleischanaloga), jedoch kann man nicht automatisch von einer gleichen Proteinqualität ausgehen. Die Art der pflanzlichen Proteinquelle, Kombinationen mit anderen Quellen und die Art der Verarbeitung können diese stark beeinflussen. Pflanzliche Proteine enthalten sogenannte antinutritive Faktoren (z.B. Trypsininhibitoren, Phytate, Lektine), die die Proteinqualität mindern können, durch verschiedene Verarbeitungsprozesse (z.B. Kochen, Schälen, Fermentation) können diese jedoch reduziert werden (DGE, 2024; KERN, 2022).

2.6.2 Mikrobielle Proteine

„In der wissenschaftlichen Literatur werden Proteine aus filamentösen Pilzen, Bakterien, Hefen und Mikroalgen zu den mikrobiellen Proteinen (auch „single cell protein“ (SCP) oder Mikrobenproteine) gezählt“ (KERN, 2022, S. 17). Die Herstellung des mikrobiellen Proteins, die in den 1980er Jahren entwickelt wurde, basiert auf der jahrhundertealten Methode der Fermentation und wurde von der US-amerikanischen Lebensmittelbehörde FDA (Food and Drug Administration) als sicher eingestuft (KERN & StMELF, 2022). Ein wesentlicher Vorteil mikrobieller Proteine liegt im schnellen Wachstum im Vergleich zu Nutztieren und Pflanzen, so verdoppeln sie unter optimalen Bedingungen ihre Biomasse innerhalb weniger Stunden. Zudem unterliegen sie keinen saisonalen Schwankungen, wie es bei pflanzlichen Proteinen der Fall sein kann (Cedeno et al., 2025). Bisher wurden nur wenige mikrobielle Spezies für die Verwendung in Lebensmitteln kommerzialisiert (GFI Europe, 2025b).

Mykoproteine

Proteine aus Pilzen werden als Mykoproteine bezeichnet. Die Bezeichnung leitet sich aus dem griechischen Wort „myco“ für „Pilz“ ab. Es handelt sich zum einen um für den Menschen ungefährliche Schimmelpilze und zum anderen um essbare und teilweise schon verzehrübliche Ständerpilze, die in Nährlösungen Pilzfäden, genannt Myzel, bilden (KERN, 2022).

Pilze sind heterotrophe Organismen, was bedeutet, dass sie eine Kohlenstoffquelle zum Wachsen benötigen, aber kein Licht. Das Herstellungsverfahren erfordert Zucker und eine konstante

Temperatur. Zur Herstellung von Mykoproteinbiomasse können verschiedene Nährmedien (Substrate) verwendet werden, z.B. Glucose-Sirup aus Weizen oder auch Abfallprodukte aus der Agrar- und Lebensmittelindustrie, wie z.B. Nebenprodukte aus der Soja- oder Erbsenverarbeitung, Treberschrot aus der Bierherstellung oder Fruchtschalenabfälle (z.B. Apfelschalen). Die Art des Substrats, des Fermentationsprozesses und des verwendeten Pilzmikroorganismus können die Ausbeute und die Zusammensetzung des Myzels z.B. bezüglich des Protein- oder Ballaststoffgehalts stark beeinflussen (Majumder et al., 2024).

QuornTM, eine international vertriebene Marke, ist das bekannteste Beispiel für Lebensmittel, die aus Mykoprotein hergestellt werden. Dieses Produkt wurde 1985 in England eingeführt und kam 2012 nach Deutschland. QuornTM-Mykoprotein enthält etwa 15 Gramm Protein pro 100 Gramm, ist fettarm und reich an Ballaststoffen (ca. 6 g pro 100g). Es handelt sich um vegane oder vegetarische Produkte, wobei meist noch weitere Zutaten wie Kartoffelprotein oder Eiklar für eine bessere Textur enthalten sind (KERN, 2022). Das Mikronährstoffprofil kann für Folsäure, Calcium, Phosphor, Cholin, Magnesium und Zink als gut eingestuft werden (DGE, 2024).

Die QuornTM-Produkte werden in Biotanks aus dem Myzel des Schimmelpilzes *Fusarium venenatum* hergestellt. Dieser Pilzstamm kann Proteine produzieren, die bis zu 45 % seines Trockengewichts ausmachen. Über sein Nährwertprofil hinaus wurde *Fusarium Venenatum* mit gesundheitlichen Vorteilen, wie einem erhöhten Sättigungsgefühl aufgrund seines hohen Ballaststoffgehalts und einer cholesterinsenkenden Wirkung, in Verbindung gebracht (Cedeno et al., 2025; Majumder et al., 2024).

ABUNDATM ist ein weiteres Beispiel für Mykoprotein, welches auch aus dem Schimmelpilz *Fusarium venenatum* hergestellt und seit 2015 in den Niederlanden produziert wird. Derzeit wird es hauptsächlich als Zutat an Lebensmittelhersteller verkauft. Durch Kooperationen mit Marken wie „The Vegetarian Butcher“ (Unilever), die auch auf dem deutschen Markt vertreten sind, wird derzeit an Fleischalternativen mit Mykoprotein gearbeitet (ENOUGH B.V., 2025). Auch im Rahmen des europäischen EIT-Food-Forschungsprojektes FUNGITIME (2020-2022) wurden verschiedene Produktformate mit diesem Mykoprotein im Milch-, Fisch- und Snickersatzbereich entwickelt (Frauenhofer IVV, 2020).

In anderen Ländern, wie den USA, gibt es mittlerweile auch andere Pilzstämme mit kommerzieller Bedeutung (z.B. *Neurospora crassa* von „The Better Meat Co.“), in der EU ist bisher nur *Fusarium Venenatum* als filamentöser Pilzstamm zugelassen (not novel) und kommerziell verfügbar (Cedeno et al., 2025).

Ein wesentlicher Vorteil zu pflanzlichen Proteinen liegt in der faserigen Textur, die der von Fleisch ähnelt und dem neutralen Geschmack von Mykoprotein. Im Vergleich zu Hefeproteinen bietet es überlegene Geschmacks- und Verarbeitungseigenschaften mit einem breiteren Spektrum an

Produktentwicklungsmöglichkeiten. Ein großer Nachteil sind die hohen Produktionskosten (Xian et al., 2025).

Mikroalgen

Mikroalgen sind mikroskopisch kleine, einzellige Organismen. Zu den Mikroalgen zählen Grün- und Kieselalgen. Die bekanntesten Mikroalgen sind Chlorella und Spirulina (*Arthrospira sp.*), wobei es sich bei *Arthrospira* streng genommen um ein Cyanobakterium handelt. Mikroalgen sind wie Bakterien entweder autotroph, das heißt, sie bilden mittels Photosynthese organische Verbindungen aus Sonnenlicht und CO₂. Andere Mikroalgen sind heterotroph, sie benötigen organische Verbindungen für ihr Wachstum, wobei manche auch beide Fähigkeiten haben (Kern, 2022). Die Anbaubedingungen müssen dabei an die spezifische Mikroalgenart angepasst werden, um ideale Wachstumsbedingungen zu schaffen (Cedeno et al., 2025). Sie werden entweder in geschlossenen Photobioreaktoren und Fermentern oder in offenen Systemen, sogenannten offenen Teichen kultiviert (DGE, 2024).

Gründe für das gestiegene Interesse an Mikroalgen in der menschlichen Ernährung sind vor allem ihr hochwertiges Nährstoffprofil. Sie sind reich an Protein (Spirulina: >60%, Chlorella: 50-60% i.Tr.), unentbehrlichen AS, Vitaminen, Antioxidantien, Mineralstoffen und lebenswichtigen Fettsäuren (Omega-3-Fettsäuren)(Cedeno et al., 2025).

Getrocknete Spirulina und Chlorella-Biomasse dient bisher in Lebensmittelanwendungen hauptsächlich als Zutat von Nahrungsergänzungsmitteln in Form von Pulvern, Kapseln und Tabletten. Sie kommen aber auch in Lebensmitteln wie Nudeln, Smoothies, Softdrinks, Schokolade, Eis und Käseersatz zum Einsatz (Kern, 2022). Aktuelle Forschungsprojekte nutzen Mikroalgen-Biomasse auch als primäre Proteinquelle im Produkt wie z.B. die Entwicklung und Produktion eines veganen Fischersatzes (Mamy) der Koralo GmbH (PIONEER-Netzwerk, 2025). Daneben werden Mikroalgenproteine als Lebensmittelzutaten mit vielversprechenden schäumenden, verdickenden und gelierenden Eigenschaften gesehen (Guo et al., 2024).

Bisher werden nur sehr wenige der über 200.000 Mikroalgenspezies in Lebensmitteln eingesetzt. Der Grund hierfür sind unter anderem die hohen Produktionskosten und die Novel-Food Verordnung (DGE, 2024). Aktuell sind 16 Mikroalgen-Spezies für Lebensmittel bzw. Supplemente autorisiert und als „not novel“ im EU-Novel-Food-Katalog gelistet. Im Bereich der derzeit auf dem Markt relevantesten Mikroalgen Spirulina und Chlorella gehören hierzu die Arten *Arthrospira platensis* und *Spirulina major*, sowie *Chlorella luteoviridis*, *Chlorella pyrenoidosa*, *Chlorella vulgaris* und *Chlorella sorokiniana*. Die Zulassung gilt für die ganze getrocknete Biomasseform (EABA, European algae biomass association, 2024; European Commission, 2025). Auch die grüne Farbe und der fischige Geschmack stellen derzeit Herausforderungen für eine breite Anwendung in Lebensmittelanwendungen dar (Kern, 2022).

Bakterien und Hefen

Auch Bakterien oder Hefen (wie z.B. *Saccharomyces cerevisiae*, bzw. Back – oder Bierhefe) liefern proteinreiche Biomasse mit einem durchschnittlichen Gehalt von 40-60 % des Trockengewichts. Auch diese mikrobiellen Proteine können unter der Nutzung von landwirtschaftlichen, forstwirtschaftlichen und industriellen Abfällen produziert werden und stellen somit eine vielversprechende nachhaltige Alternative dar (Cedeno et al., 2025; DGE, 2024).

Neuartige Bakterien sind jedoch derzeit in der EU nicht als Lebensmittelzutat zugelassen und werden bisher vorrangig in Tierfutter angewendet (KErn, 2022). Hefeprotein (*Saccharomyces cerevisiae*) ist dagegen in der EU zugelassen und als „not novel“ eingestuft (European Commission, 2025). Es wird als Nahrungsergänzungsmittel und Hilfsstoff in Ersatzprodukten (z.B. als Geschmacksverstärker, Vitaminträger und emulgierende Stabilisatoren) gesehen, jedoch nicht als primäre Proteinquelle (Cedeno et al., 2025; Ma et al., 2023).

3 Methode

3.1 Zielstellung

Ziel dieser Bachelorarbeit die Bewertung der Proteinqualität anhand des DIAAS bzw. PDCAAS, fokussiert auf für Deutschland relevante pflanzliche und mikrobielle Proteine, mittels einer systematischen Literaturrecherche. Dabei soll die Frage beantwortet werden, welche der ausgewählten Proteinquellen eine „gute“ (75-99) bzw. „hochwertige“ (≥ 100) Proteinqualität erreichen und somit das physiologische Potenzial aufweisen, hochwertige tierische Proteine zu ersetzen. Ergänzend werden durch ein Experteninterview aus technologischer Perspektive die aktuellen Anwendungsmöglichkeiten sowie Entwicklungschancen dieser Alternativen im Hinblick auf ihre potenzielle Rolle in der Proteinversorgung der deutschen erwachsenen Allgemeinbevölkerung beleuchtet.

Die vorliegende Arbeit verbindet somit inhaltlich zwei Aspekte, die Ernährungsphysiologie und die Lebensmitteltechnologie, als auch methodisch, indem quantitative und qualitative Daten erhoben werden („Mixed-Method-Ansatz“).

3.2 Auswahl der Proteinqualitätsbewertungsmethode

Die Auswahl der Proteinqualitätsbewertungsmethode richtet sich nach dem international anerkannten Standard und aktuell empfohlenen Methode nach FAO, um die Proteinqualität von Nahrungsproteinen zu bestimmen (FAO, 2013). Demnach gilt der DIAAS als derzeit präzisester Wert, um die physiologische Qualität der Proteine anhand der Aminosäurezusammensetzung und Verdaulichkeit, bezogen auf den Bedarf einer bestimmten Referenzpopulation, zu bewerten und wird dem PDCAAS entsprechend vorgezogen. In erster Linie hängt die Wahl, ob DIAAS oder PDCAAS für die Bewertung der pflanzlichen und mikrobiellen herangezogen werden, jedoch von der Datenlage ab (siehe Kap. 3.4.1).

Für die Auswahl des Referenzproteins wird der Proteinbedarf der gesunden erwachsenen Allgemeinbevölkerung berücksichtigt. Die FAO schlägt für die Bewertung der Proteinqualität für die allgemeine kindliche, jugendliche und erwachsene Bevölkerung (>3 Jahre) ein spezifisches Referenzprotein vor, das die Bedarfsdeckung in diesen Altersgruppen widerspiegelt (siehe Anhang A) (FAO, 2013). Dieses basiert auf dem Proteinbedarf für Kinder im Alter von 3-10 Jahren (FAO & WHO, 2007). Da dieses Referenzprotein jedoch eine Weiterentwicklung im Zuge der Einführung des DIAAS darstellt, nutzen ältere PDCAAS Studien meist das davor empfohlene Referenzprotein für Vorschulkinder im Alter von 2-5 Jahren (siehe Anhang A) (FAO & WHO, 1991). Bei mangelnder Datenlage wird auch dieses Referenzprotein miteinbezogen, um dennoch eine Einschätzung zur Proteinqualität zu ermöglichen.

3.3 Auswahl der Proteinquellen

Wie bereits im theoretischen Hintergrund beschrieben, liegt der Fokus auf pflanzlichen und mikrobiellen Proteinquellen der Biomassenfermentation, da diese Gruppen derzeit und laut Prognosen für die nächsten zehn Jahre die größte Marktrelevanz in Deutschland besitzen werden. In anderen Bereichen ist die Produktion noch nicht skaliert und die meisten Produkte und Proteinquellen sind noch nicht zugelassen (GFI Europe, 2023, 2025c). Zudem können pflanzliche und mikrobielle Proteinquellen Einsatz in veganen und vegetarischen Ersatzprodukten finden, was vor dem Hintergrund der hohen Verbraucherakzeptanz und steigenden Nachfrage nach diesen Produkten, die Relevanz dieser Proteine vor alternativen tierischen Proteinen (Insekten und In-Vitro-Fleisch) aufzeigt (vgl. Kap.2.6).

Wie im theoretischen Hintergrund dargestellt, ist die Vielfalt an pflanzlichen und mikrobiellen Proteinquellen groß. Für eine weitere Eingrenzung wurden im Rahmen des theoretischen Hintergrunds die wichtigsten Vertreter dieser Gruppen herausgearbeitet. Dabei wurden folgende Aspekte hervorgehoben bzw. berücksichtigt: 1. ein hoher Proteingehalt der Rohstoffe, 2. ihre gesundheitlichen Vorteile, 3. ihr Vorkommen bzw. ihr Potenzial für Proteinersatzprodukte auf dem deutschen Markt und 4. ihre rechtliche Zulassung als Lebensmittelzutat durch die Novel-Food-Verordnung.

Unter Berücksichtigung dieser Aspekte wurden aus dem Bereich der pflanzlichen Proteine die Hülsenfrüchte und Ölsaaten ausgewählt. Sie haben im Vergleich zu anderen pflanzlichen Rohstoffen die höchsten Proteingehalte, werden bereits in großen Mengen produziert, sind regional verfügbar und weisen eine breite Anwendung in pflanzenbasierten Milch- und Fleischersatzprodukten auf. Andere pflanzliche Proteinquellen wie die Getreide weisen einen wesentlich niedrigeren Proteingehalt auf (Erbersdobler et al., 2017), werden wie die Makroalgen und Pseudogetreide in wesentlich geringerem Umfang produziert (Kern, 2022) oder gelten als neuartig wie die Gräser und werden gerade erst für die Eignung zur menschlichen Ernährung untersucht oder sind noch nicht als Lebensmittelzutat in der EU zugelassen (DGE, 2024).

Für die Literaturrecherche werden somit folgende pflanzliche Proteinquellen vorausgewählt:

- Ölsaaten: Soja, Sonnenblumenkerne, Hanfsamen, Rapssamen
- Hülsenfrüchte: Erbsen, Lupinen, Ackerbohnen, Linsen, Kichererbsen

Aus der Gruppe der mikrobiellen Proteine wird zum einen das Mykoprotein aus dem Fadenpilz *Fusarium venenatum* und zum anderen die Mikroalgen der Spirulina- und Chlorella-Spezies aufgrund ihrer Bekanntheit und Marktrelevanz (GFI Europe, 2023; KErn, 2022), rechtlichen Zulassung als Lebensmittel in der EU („not novel“) (European Commission, 2025) sowie ihrem Potenzial als primäre Proteinquelle in Ersatzprodukten (Cedeno et al., 2025), ausgewählt. Hefeproteine (auch zu den Pilzproteinen gehörend) sind zwar interessant, werden jedoch aufgrund der geringeren Anwendungsbreite als filamentöse Pilze nicht weiter betrachtet (Xian et al., 2025). Bakterielle Proteine werden nicht betrachtet, da diese noch nicht zugelassen sind und kaum in Lebensmitteln, sondern vermehrt als Tierfutter, angewendet werden (Cedeno et al., 2025; KErn, 2022).

Neben den genannten Kriterien ist vor allem die Datenverfügbarkeit an DIAAS und PDCAAS für die letztendliche Auswahl der einzelnen Proteinquellen das entscheidende Kriterium (siehe Kap. 3.4.1).

Aus dem Bereich der konventionell tierischen Proteine, mit denen die ausgewählten pflanzlichen und mikrobiellen Proteine vergleichend eingeordnet werden sollen, wird jeweils ein Referenzprotein aus der Fleisch- Milch- und Eikategorie ausgewählt.

3.4 Systematische Literaturrecherche

Zur Erreichung der Zielstellung wurde eine systematische Literaturrecherche in der Online-Datenbank *PubMed* im Zeitraum Mai bis Juni 2025 durchgeführt und ausgewertet. Die Datenbank von PubMed umfasst zum derzeitigen Stand (Juni 2025) 38 Millionen Literaturangaben zu Fachliteratur aus der Biomedizin und Gesundheitswissenschaften. Die Datenbank wurde vom National Center for Biotechnology Information (NCBI) der USA entwickelt (National Library of Medicine, 2025).

Aufgrund der geringen Datenverfügbarkeit bei manchen Proteinquellen wurde die Recherche auf die wissenschaftliche Datenbank *ScienceDirect* ausgeweitet. Zusätzlich wurden veröffentlichte Berichte der FAO zur Proteinqualität miteinbezogen.

Auf Grundlage von Titel und Abstract wurden die Publikationen zunächst auf ihre Relevanz geprüft, bevor die entsprechenden Volltexte hinsichtlich ihrer Eignung für die Fragestellung bewertet wurden. Im Folgenden wird das Vorgehen der systematischen Literaturrecherche in einzelne Arbeitsschritte gegliedert dargestellt, um die Nachvollziehbarkeit des Auswahlprozesses zu gewährleisten.

3.4.1 Festlegung von Suchbegriffen

Zunächst wurde eine erste Recherche in PubMed mit vier verschiedenen Suchanfragen, bestehend aus den Schlüsselbegriffen für die ausgewählten Proteinquellen (Exposure) und den Proteinqualitätswert (Outcome) durchgeführt, um sich einen Überblick über die vorhandenen Daten zu verschaffen. Dafür wurden zunächst passende englische Begriffe und Synonyme für die gewählten pflanzlichen und mikrobiellen Proteine und Operatoren (AND/OR) gewählt. Tabelle 3 zeigt die erzielten Treffer, wobei keine zeitlichen Filter angewendet wurden:

Tabelle 3: Erste Suchstrategie für den Überblick der vorhandenen Literaturdaten für pflanzliche und mikrobielle Proteine in PubMed, eigene Darstellung

Suchanfrage	Exposure (Proteinquelle)	Outcome (DIAAS/PDCAAS)	Treffer
1)	(plant protein OR oilseed OR grain legumes OR legumes)	AND (digestible indispensable amino acid score OR diaas) AND ileal digestibility	34
2)	(plant protein OR oilseed OR grain legumes OR legumes)	AND (protein digestibility corrected amino acid score OR pdcaas)	138
3)	(microbial protein OR mycoprotein OR microalgae OR fungi)	AND (digestible indispensable amino acid score OR diaas) AND ileal digestibility	9
4)	(microbial protein OR mycoprotein OR microalgae OR fungi)	AND (protein digestibility corrected amino acid score OR pdcaas)	17

Wie in Tabelle 3 dargestellt, lässt sich erkennen, dass die pflanzlichen Proteine (Treffer insgesamt: 172) wesentlich besser erforscht sind als die mikrobiellen Proteine (Treffer insgesamt: 26). Vor allem ist zu erkennen, dass in beiden Bereichen die PDCAAS stärker vertreten sind als die DIAAS. Der Grund hierfür ist, dass der DIAAS noch nicht so lange etabliert ist wie der PDCAAS, welcher lange als Goldstandard galt und zudem einfacher anhand der fäkalen Verdaulichkeit zu erfassen ist (Adhikari et al., 2022).

Zum PDCAAS liegen somit insgesamt mehr Daten vor, die jedoch als physiologisch ungenauere Werte gelten (FAO, 2013) und zum Teil auf Studien beruhen, die schon länger zurückliegen. Da das Ziel der vorliegenden Arbeit jedoch ist, die Proteinqualität mit der möglichst genauesten Methode zu bewerten und dabei den Stand der aktuellen Forschung zu berücksichtigen, werden in erster Linie DIAAS und bei Datenknappheit, PDCAAS zur Bewertung der Proteinqualität berücksichtigt.

Somit werden für die weitere Recherche der pflanzlichen Proteine aufgrund der Datenverfügbarkeit die DIAAS und für die mikrobiellen Proteine die PDCAAS gewählt. Damit ist die Vergleichbarkeit

untereinander zwar nur eingeschränkt möglich, aber die Bewertung der Proteinqualität ist präziser und der aktuelle Stand der Forschung kann besser dargestellt werden. Da tierische Proteinquellen gut untersucht sind und sowohl PDCAAS- als auch DIAAS-Werte vorliegen (Adhikari et al., 2022), können sie weiterhin als Referenz herangezogen und mit pflanzlichen und mikrobiellen Proteine verglichen werden.

Als weitere Änderung der Suchstrategie wurde entschieden, für jede einzelne ausgewählte Proteinquelle eine eigene Suchanfrage zu machen, um die Anzahl relevanter Treffer zu erhöhen und das Risiko, ein relevantes Ergebnis auszuschließen, zu reduzieren. Wird die Proteinquelle nur mit dem allgemeinen Überbegriff im Suchstring genannt (wie bei Tab. 3), ist es möglich, dass relevante Studien, die lediglich spezifische Unterbegriffe im Titel und Abstract nutzen, nicht erfasst werden. Außerdem ist die Recherche und Auswahl der Studien übersichtlicher, wenn sie für jede Proteinquelle einzeln durchgeführt wird. Somit wurde folgende Suchstrategie gewählt und durchgeführt:

Tabelle 4: Angepasste Suchstrategie, eigene Darstellung

Suchanfrage	Exposure (Proteinquelle)	Outcome (DIAAS/PDCAAS)
1)	(plant protein)	AND (digestible indispensable amino acid score OR diaas) AND ileal digestibility
2)	(microbial protein)	AND (protein digestibility corrected amino acid score OR pdcaas)

Als „plant protein“ wurden folgende Begriffe und Synonyme eingesetzt: soy, pea, lupin, fava bean/faba bean/vicia faba/broad bean, lentil, chickpea, rapeseed, sunflower seed, hemp seed.

Als „microbial protein“ wurden die Begriffe „microalgae/chlorella/spirulina, mycprotein/filamentous fungi/fusarium venenatum/quorn“ genutzt.

Für die Recherche der tierischen Proteine, die als Referenzwerte zur vergleichenden Einordnung der Proteinqualität der pflanzlichen und mikrobiellen Proteine genutzt werden sollen, wird in erster Linie auf veröffentlichte Berichte der FAO und daraus hervorgehende Referenzen, zurückgegriffen. Ergänzend werden aktuelle Forschungsartikel von *PubMed* herangezogen. Dabei wird für drei verschiedene tierische Proteine aus den Kategorien Fleisch, Milch und Ei jeweils ein DIAAS bzw. ein PDCAAS als Referenz- und Vergleichswert ausgewählt.

3.4.2 Sichtung und Auswahl der relevanten Literatur

Die gefundenen Artikel in *PubMed* wurden anhand der Titel und Abstracts auf ihre Eignung überprüft. Nach dem Titel-Abstract-Screening wurden die Volltexte dieser Artikel untersucht. Bei gefundenen Übersichtsartikeln wurden die Referenzlisten gesichtet, um weitere relevante Interventionsstudien ausfindig zu machen.

Für folgende pflanzliche und mikrobielle Proteine konnten anhand der Recherche in *PubMed* und Referenzlisten nicht genügend bzw. keine relevanten Treffer erzielt werden: Sonnenblumenkerne, Hanfsamen, Lupine, Linse, Kichererbse und Mykoprotein. Aus diesem Grund wurde die Recherche auf die wissenschaftliche Datenbank *ScienceDirect* ausgeweitet. Hierbei wurden dieselben Suchanfragen gestellt und die jeweils ersten 30 Ergebnisse nach Titel und Abstract gescreent. Im Zuge dessen konnten für Lupine, Linse, Kichererbse und Mykoprotein weitere Ergebnisse herausgefiltert werden. Sonnenblumenkerne und Hanfsamen mussten jedoch aufgrund der mangelnden Datenlage von der vorliegenden Arbeit ausgeschlossen werden.

Die daraus ermittelten Publikationen wurden gemäß Tab. 5 anhand folgender Ein- und Ausschlusskriterien ausgewählt:

Tabelle 5: Definition der Ein- und Ausschlusskriterien für die systematische Literaturauswahl, eigene Darstellung

Kriterien	Einschlusskriterien	Ausschlusskriterien
Thematische Aspekte	DIAAS/PDCAAS-Werte gemäß FAO-Standard; DIAAS/PDCAAS auf Basis des Referenzproteins für Erwachsene >3 Jahre, wenn nicht anders verfügbar auch 2-5 Jahre (bei PDCAAS) inkl. Review-Mittelwerte bei transparenter Methodik	Studien mit anderen Proteinqualitätsparameter (z.B. NPU, PER) oder nur Verdaulichkeitsmessung oder keine Werte für Referenzprotein >3 Jahre berechnet; Ergebnisse, die sich nicht auf den menschlichen Proteinbedarf beziehen (z.B. Futtermittel für Mast oder Haustiere); Nicht relevante Proteinquelle (z.B. andere Spezies oder Art; tropische Sorten)
Sprache	Deutsch, Englisch	Andere Sprachen
Verfügbarkeit	Verfügbarkeit des Volltextes	Kein Volltext verfügbar
Publikationstyp	Vorzugsweise peer-reviewed Forschungsartikel oder quantitative systematische Reviews mit transparenter Methodik	Quantitative Reviews ohne transparente Methodik

Studiendesign	Mensch, Schwein, Ratte	Studiendesign: In -Vitro Modelle (z.B. INFOGEST), Hahn - Modell
Untersuchungsebene	Die Proteinquelle wurde isoliert und gezielt untersucht	Die gesuchte Proteinquelle wurde nicht isoliert oder gezielt untersucht (z.B. Mischmehle)
Jahr der Veröffentlichung	Je nach Datenlage; wenn möglich nicht älter als 10 Jahre	Studien, älter als 10 Jahre (es sei denn, relevante Studie und mangelnde Datenverfügbarkeit)

Als Einschlusskriterien wurden die Sprache, die Verfügbarkeit des Volltextes, der Publikationstyp, das Studiendesign, die Untersuchungsebene der Proteinquelle, das Jahr der Veröffentlichung und thematisch relevante Kriterien festgelegt. Thematisch relevant waren demnach quantitative Daten in Form von DIAAS bzw. PDCAAS-Werten, die gemäß FAO-Standard berechnet wurden. Da der DIAAS häufig auf alle drei Referenzproteine angewendet wird (0-0,5 J.; 0,5-3 J.; >3 J.), wird in diesem Fall nur der Wert für das Referenzprotein über 3 Jahre und nicht die Werte anderer Altersgruppen berücksichtigt. Beim PDCAAS wird, wie bereits erläutert, auch das Referenzprotein 2-5 Jahre berücksichtigt (siehe Kap.3.2). Ein weiteres Kriterium war der Publikationstyp. Dabei wurden in erster Linie Artikel der Primärforschung gefiltert. Bei transparenter Methodik wurden zudem berechnete Mittelwerte aus Artikeln der Sekundärforschung (quantitative Übersichtsartikel) miteinbezogen. Dabei wurde jedoch darauf geachtet, dass die einbezogenen Studien sich nicht doppeln und in dem Mittelwert nicht schon enthalten sind. Des Weiteren wurden Studien berücksichtigt, die die Verdaulichkeit am Menschen, Schwein oder der Ratte gemessen haben und die Proteinquelle dabei gezielt und isoliert untersucht haben. Als Zeitrahmen wurde ein Filter mit 10 Jahren gesetzt, wobei dieser bei Datenknappheit ausgeweitet wurde, falls dadurch relevante Ergebnisse erzielt werden konnten.

Als Ausschlusskriterien galten Studien mit anderem thematischem Schwerpunkt wie anderen Qualitätsparametern (z.B. nur Verdaulichkeitsmessung), anderen Referenzproteinen (z.B. nicht relevante Altersgruppe; nicht auf den menschlichen Proteinbedarf bezogen) und nicht relevante Proteinquellen (z.B. filamentöse Pilze eines anderen Stammes; Hülsenfrüchte tropischer Sorten). Des Weiteren wurden Studien ohne Volltextzugang und anderen Studiendesigns wie In-Vitro-Modelle oder Modelle für die Hühnermast ausgeschlossen. In-Vivo-Studien sind aussagekräftiger und Modelle für die Hühnermast gelten nicht als auf den Menschen übertragbar (FAO, 2013). Außerdem wurde die Studie ausgeschlossen, wenn die Proteinquelle nur in Kombination mit anderen Proteinquellen getestet wurde (z.B. Mischprodukte).

Da für jede Proteinquelle eine einzelne Suchanfrage gestellt wurde, wurde auch für jede Proteinquelle entsprechend ein eigenes PRISMA Flow Diagramm erstellt (siehe Anhang B).

Zur besseren Übersicht werden im Folgenden (Abb. 8) die Ergebnisse der 9 PRISMA Flow Diagramme und die Ergebnisse der Handrecherche zu den tierischen Referenzproteinen zu einem Flow Diagramm zusammengefasst:

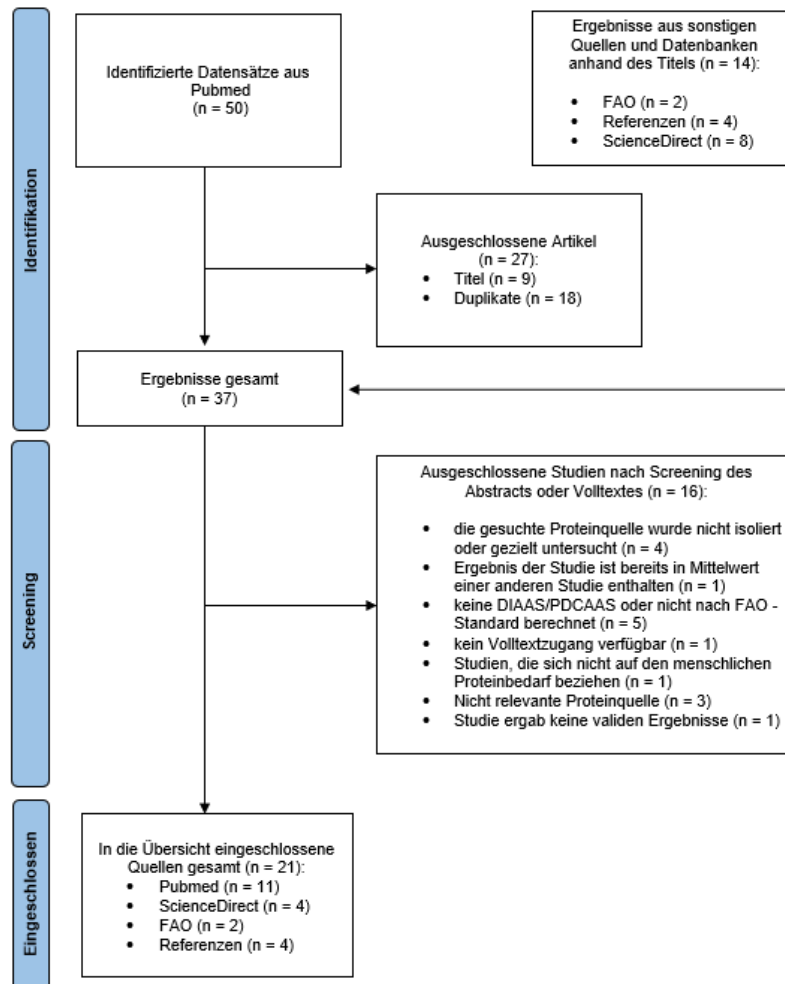


Abbildung 8: Zusammenfassendes PRISMA Flow Diagramm, eigene Darstellung

Durch die einzelnen Suchanfragen in *PubMed* konnten insgesamt $n = 50$ Artikel ermittelt werden. Alle Artikel waren in englischer Sprache. Von den $n = 50$ Artikeln konnten im ersten Schritt der Identifikation $n = 27$ Artikel anhand des Titels als ungeeignet für die Zielstellung der Arbeit oder als bereits in die Arbeit eingeschlossen oder ausgeschlossen (= Duplikat) eingestuft werden. Somit ergeben sich zunächst $n = 23$ Treffer aus der *PubMed*-Recherche. Zusätzlich wurden $n = 14$ Artikel aus anderen Quellen (FAO-Berichten, Referenzlisten) oder der Datenbank *ScienceDirect* ermittelt, so dass sich insgesamt $n = 37$ Treffer ergeben.

Im zweiten Teil, des Screenings, wurden insgesamt $n = 16$ Artikel anhand des Abstracts oder Volltextes durch die in der Abbildung aufgelisteten Gründe ausgeschlossen werden.

Insgesamt konnten anhand der beschriebenen systematischen Literaturrecherche $n = 21$ Artikel eingeschlossen werden. Davon $n = 17$ Artikel für die ausgewählten pflanzlichen und mikrobiellen Proteine und $n = 4$ Artikel für die tierischen Referenzwerte.

3.4.3 Dokumentation der Ergebnisse

Zur Beantwortung der Forschungsfrage wurden die relevanten Parameter zur Beurteilung der Proteinqualität pflanzlicher und mikrobieller Proteinquellen erhoben und zunächst tabellarisch in Excel dokumentiert. Im Fokus stehen die DIAAS- und PDCAAS-Werte der recherchierten Proteinquellen. Folgende Daten wurden, soweit verfügbar, von jeder Studie erfasst, um die Herkunft der Werte und die Vergleichbarkeit der Ergebnisse transparent zu machen:

- untersuchte Proteinquelle
- Verarbeitungsgrad
- Proteinqualitätsbewertung (DIAAS oder PDCAAS in %)
- Studienmodell
- Autoren/Jahr der Veröffentlichung

Zudem wurden Informationen zur *ersten limitierenden Aminosäure* (IAA_{lim}) und deren *wahren ilealen bzw. fäkalen Proteinverdaulichkeit* (in %) dokumentiert. Diese Angaben stehen zwar nicht im Fokus der Arbeit, sind jedoch für eine genauere Betrachtung der Ergebnisse interessant.

So können Informationen zur Art der Verdaulichkeitsmessung (ileal/fäkal), zum Studienmodell (Mensch/Schwein/Ratte) und zum Verarbeitungsgrad (gekocht, isoliert, konzentriert etc.) auch bei der methodischen Einordnung und Interpretation der Ergebnisse in der Diskussion herangezogen werden.

3.4.4 Darstellung und Interpretation der Ergebnisse

Die relevanten Studienergebnisse (wie in Kap. 3.4.3 aufgelistet) für die ausgewählten pflanzlichen, mikrobiellen und tierischen Proteine sind in den Tabellen im Anhang C, D und E dargestellt.

Für einen übersichtlicheren Vergleich werden im Ergebnisteil die tabellarischen Ergebnisse graphisch in Säulendiagrammen dargestellt. Dabei werden bei zwei oder mehr Proteinqualitätswerten pro Proteinquelle Mittelwerte (MW) gebildet und durch Angaben zur Spannweite ($Range\ R = Maximum - Minimum$) ergänzt, um die Variabilität aufzuzeigen. In die Berechnung der Mittelwerte fließen auch bereits erfasste MW aus der eingeschlossenen quantitativen Übersichtsstudie (Herreman et al., 2020) mit ein. Diese MW werden zur weiteren Berechnung als $n = 1$ behandelt, da lediglich der MW und nicht die Gesamtanzahl der zugrundeliegenden Einzeldaten zur Berechnung des neuen MW genutzt wurde. Dieses Vorgehen wurde gewählt, um möglichst viele Daten in die vorliegende Arbeit miteinbeziehen zu können und einen aussagekräftigeren MW bilden zu können.

Die graphische Darstellung begrenzt sich dabei auf die wesentlichen Ergebnisse, das heißt die Art der Proteinquelle und den Proteinqualitätswert (PDCAAS/DIAAS). Anhand dessen und durch ergänzende Informationen der Tabellen im Anhang (C, D und E) werden die gefundenen DIAAS und PDCAAS für jede Proteinquelle beschreibend in Textform zusammengefasst.

Um die Forschungsfrage zu beantworten, erfolgt somit eine deskriptive Darstellung der Ergebnisse. Dabei wird beschrieben, welche der ausgewählten pflanzlichen und mikrobiellen Proteine die Cut-Off-Werte (im Mittel) für eine „hochwertige“ (≥ 100) bzw. „gute“ (75-99) Proteinquelle, und somit die Proteinqualität von tierischen Referenzproteinen, erreichen.

Auch wenn dieser Cut-Off-Wert ursprünglich für den DIAAS entwickelt wurde, erscheint seine Anwendung auch für den PDCAAS im Rahmen dieser Arbeit als sinnvoll, da er eine grobe qualitative Einordnung der Proteinqualität ermöglicht. Jedoch ist diese Kategorisierung beim PDCAAS aufgrund der methodischen Unterschiede zum DIAAS nicht direkt mit der Aussagekraft der DIAAS-Kategorisierung gleichzusetzen (Details siehe Kap. 5.1 *Methodendiskussion*).

Aufgrund der heterogenen Studienlage (d.h. Anzahl der Studien pro Proteinquelle, Studienmodelle und Verarbeitungsgrade) kann keine weiterführende hypothesenprüfende statistische Auswertung vorgenommen werden.

3.5 Experteninterview

Ziel des Experteninterviews ist es, die Ergebnisse der Literaturrecherche aus Sicht der Lebensmitteltechnologie in einen praktischen Kontext einzuordnen. Dabei sollen aktuelle und zukünftige Anwendungsmöglichkeiten der Proteinquellen erfragt sowie bestehende technologische Herausforderungen identifiziert werden. Das Experteninterview ergänzt somit die recherchierten Ergebnisse der ernährungsphysiologischen Qualität um technologische Qualitätsaspekte.

Die Expertin wurde von der Zweitbetreuerin dieser Arbeit vorgeschlagen. Die Expertin, Frau Scharf, ist Lebensmitteltechnologin und Projektleiterin des „New Feed & Food“-Ausschusses der DLG und beschäftigt sich daher intensiv auf dem Themengebiet der alternativen Proteine. Die Kontaktaufnahme erfolgte per E-Mail.

Zur Vorbereitung auf das Interview wurde ein Leitfaden erstellt, welcher der Expertin vor dem Interview ebenfalls per E-Mail zugeschickt wurde (siehe Anhang F). Dabei handelt es sich um einen semistrukturierten Leitfaden, der eine flexible Beantwortung und Reihenfolge der Fragen erlaubt. Die Durchführung des Interviews wurde für den 6. Juni 2025 um 17 Uhr über die Online-Meeting-Plattform „Microsoft Teams“ vereinbart. Diese Form des Interviews, Face-to-Face, ermöglicht eine lockere persönliche Atmosphäre und die Interviewende kann auf die Antworten flexibel reagieren und leicht Rückfragen stellen. Für den zeitlichen Rahmen wurde die Dauer großzügig geschätzt und insgesamt circa 45 Minuten eingeplant, wie es in Tabelle 6 dargestellt ist:

Tabelle 6: Planung des zeitlichen Rahmens für die Durchführung des Experteninterviews, eigene Darstellung

Abschnitt/Frage	Zeit (Minuten)	Anmerkungen
1. Begrüßung und kurze Vorstellung der Interviewenden und der Expertin	5	kurze Einführung durch die Interviewende in das Thema der Bachelorarbeit und die Zielstellung des Interviews
2.- 3. aktuell relevanteste Proteinquellen und ihre Anwendungsmöglichkeiten	10-15	ggf. Nachfragen zu spezifischen Proteinquellen stellen, besonders relevant für Forschungsfrage
4. Kriterien der Rohstoffauswahl und Proteinqualität	5	allgemeiner halten
5.-6. Technologische Herausforderungen	8-10	ggf. spezifischer nachfragen zu einzelnen Proteinquellen, besonders relevant für Forschungsfrage
7. Zukunft des Marktes „Alternative Proteine“	5	möglichst kompakt halten
8. Offene Abschlussfragen und Verabschiedung	5	aufgekommene/offengebliebene Fragen, zusätzliche Ergänzungen, Bedanken

Das Interview wurde mithilfe der WhatsApp-Sprachnachrichtfunktion eines Smartphones mitgeschnitten. Zusätzlich wurde das Interview unter der Zustimmung der Expertin mit der Aufzeichnungsfunktion von Teams aufgenommen. Das von Teams automatisch erstellte Transkript konnte anschließend heruntergeladen werden. Anhand beider Aufzeichnungsmethoden wurde anschließend ein vereinfachtes Transkript erstellt, das heißt es wurde wörtlich und nicht lautsprachlich transkribiert. Satzabbrüche, Stottern, Wortdoppelungen sowie Grammatikfehler wurden zugunsten der Lesbarkeit ausgelassen, da lediglich der Inhalt des Interviews von Interesse für die Forschungsfrage ist. Die Auswertung des Interviews erfolgte systematisch und wurde anhand folgender Kategorien farblich codiert:

- Blau: Aktuelle Anwendungsmöglichkeiten der Proteinquelle in der Lebensmittelherstellung
- Rot: Wahrgenommene (technologische) Herausforderungen
- Grün: Hinweise auf aktuelle Forschung zur verbesserten Nutzung der Proteinquelle oder Maßnahmen zur Steigerung der technologischen Proteinqualität
- Gelb: Meinung zur Entwicklung des Marktes für Alternative Proteine

Die Codierung erfolgte mithilfe der Testversion des Programms „MAXQDA“ (Abb.10).

Codes	40
Anwendungsmöglichkeiten	9
Herausforderungen	17
aktuelle Forschung	7
Trends und Marktentwicklung	7

Abbildung 9: Codierte Themenfelder und Anzahl verwendeter Codes in MAXQDA, eigene Darstellung

Das vollständige codierte Transkript ist im Anhang G zu finden. Die wichtigsten Ergebnisse des Interviews werden im folgenden Ergebnisteil nach codierten Kategorien zusammengefasst.

4 Ergebnisse

4.1 Studiencharakteristik

Für die vorliegende Arbeit wurden insgesamt 17 Studien eingeschlossen, die DIAAS- oder PDCAAS-Werte für die ausgewählten pflanzlichen und mikrobiellen Proteinquellen berichten. Aufgrund der heterogenen Studienlage wird die Proteinqualität der Hülsenfrüchte und Ölsaaten anhand des DIAAS und die der mikrobiellen Proteine anhand des PDCAAS dargestellt.

Für die ausgewählten Hülsenfrüchte und Ölsaaten wurden insgesamt 13 Artikel aus dem Publikationszeitraum 2016 bis 2025 berücksichtigt, während für die ausgewählten Mikroalgen und das Mykoprotein 4 Artikel aus dem Zeitraum 2010 bis 2025 einbezogen wurden. Dabei wurden insgesamt 37 DIAAS und PDCAAS Werte dokumentiert, davon 29 Werte aus Studien mit eigener Verdaulichkeitsmessung (Primärforschung) und 8 Werte aus Studien mit berechneten (Mittel-)Werten aus bereits veröffentlichten Daten zur Aminosäurezusammensetzung und Verdaulichkeit in der Literatur oder Datenbanken (Sekundärforschung).

Die meisten DIAAS Werte stammen von Raps ($n = 9$), Erbse ($n = 6$) und Soja ($n = 5$), während die meisten PDCAAS Werte für Chlorella ($n = 4$) berichtet wurden. Bei den pflanzlichen Proteinen wurden die meisten DIAAS Werte in Studien an Schweinen ($n = 27$) ermittelt, deutlich weniger an Menschen ($n = 2$) oder Ratten ($n = 1$). Bei den mikrobiellen Proteinen stammen die meisten PDCAAS Werte aus Rattenstudien ($n = 6$), nur ein Wert basiert auf einer Humanstudie (siehe Anhang C u. D).

Die tierischen Referenzwerte ($n = 6$) basieren auf Angaben aus FAO-Berichten und wurden durch aktuelle Forschungsarbeiten ergänzt (siehe Anhang E). Hierbei wurde jeweils nur ein repräsentativer Wert pro Proteinquelle zur groben Einordnung gewählt. Der Fokus der Ergebnisse liegt auf den pflanzlichen und mikrobiellen Proteinen.

Die eingeschlossenen DIAAS und PDCAAS Werte für die ausgewählten Proteinquellen werden im Folgenden grafisch dargestellt und deskriptiv zusammengefasst. Eine tabellarische Übersicht ist im Anhang C, D und E zu finden. Zur besseren Lesbarkeit wird auf die Prozentangaben bei den DIAAS- und PDCAAS-Werten in den folgenden Abschnitten verzichtet.

4.2 Proteinqualität ausgewählter pflanzlicher Proteine anhand des DIAAS

In folgendem Säulendiagramm (Abb. 10) sind die (mittleren) DIAAS-Werte in Prozent von den Ölsaaten Soja und Raps, sowie den Hülsenfrüchten Kichererbse, Erbse, Lupine, Ackerbohne und Linse dargestellt. Zur vergleichenden Einordnung der Qualität dienen die tierischen Referenzproteine von Milchpulver, Ei und Rindfleisch. Alle erfassten Werte basieren dabei auf der ilealen Verdaulichkeit und dem Referenzprotein für ältere Kinder, Jugendliche und Erwachsene (>3 Jahre)(FAO, 2013). Wie dem Diagramm zu entnehmen ist, weist die erfasste Datenanzahl n zwischen den Proteinquellen eine große Variabilität auf, wobei für Raps ($n = 9$) die meisten und für Kichererbse ($n = 1$) die wenigsten Daten ermittelt wurden. Ab einer Datenanzahl von $n = 2$ sind die DIAAS Werte als Mittelwert (MW) und die Variabilität als Spannweite ($Range R = Max - Min$) angegeben. Die Daten basieren auf den Referenzen und Berechnungen in Anhang C und E.

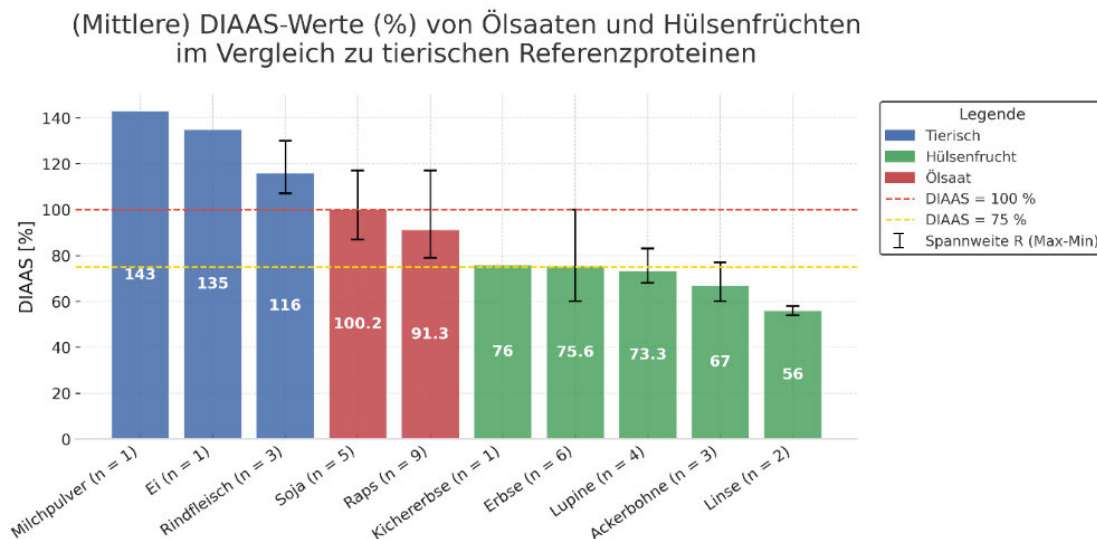


Abbildung 10: (Mittlere) DIAAS-Werte (%) von Ölsaaten und Hülsenfrüchten (Quellen: Anhang C) über verschiedene Verarbeitungsgrade hinweg und im Vergleich zu tierischen Referenzproteinen (Quellen: Anhang E), basierend auf dem Referenzprotein für ältere Kinder, Jugendliche und Erwachsene > 3 Jahre (FAO, 2013), Fehlerbalken repräsentieren die Spannweite R (Max-Min), eigene Darstellung

Wie im Diagramm zu sehen, erreichen die tierischen Referenzproteine (blau) DIAAS Werte von 143 (Milchpulver, $n = 1$), 135 (Ei, $n = 1$) und 116 (Rindfleisch, $n = 3$). Bei den Ölsaaten (rot) erreicht Soja einen mittleren DIAAS von 100,2 ($n = 5$), während Raps einen mittleren DIAAS von 91,3 ($n = 8$) erreicht. Bei den Hülsenfrüchten (grün) zeigen Erbsen einen mittleren DIAAS von 75,6 ($n = 6$), Lupinen 73,3 ($n = 4$), Ackerbohnen 67,0 ($n = 3$) und Linsen 56,0 ($n = 2$). Für die Kichererbse liegt nur ein einzelner DIAAS Wert von 76 ($n = 1$) vor. Im Vergleich zeigen die tierischen Proteine somit die höchsten DIAAS. Die beiden Ölsaaten erreichen im Mittel insgesamt höhere DIAAS als die fünf Hülsenfrüchte.

Die Spannweite der erfassten DIAAS Werte liegt bei Soja in einem Bereich von 87-117 ($R = 30$) und bei Raps in einem Bereich von 79-117 ($R = 38$). Unter den Daten zu den Hülsenfrüchten zeigen sich

Spannweiten im Bereich von 60-100 ($R = 40$) bei Erbsen, 60-77 ($R = 17$) bei Ackerbohnen, 68-83 ($R = 15$) bei Lupinen und 54-58 ($R = 4$) bei Linsen. Im Vergleich zeigen Erbse, Raps und Soja somit die größte Variabilität der einzelnen DIAAS-Werte.

Die dargestellten Cut-Off-Linien (rot bzw. gelb) orientieren sich an den empfohlenen Kategorien der FAO zur Einordnung der Proteinqualität. Dabei markiert ein DIAAS von 100 die Grenze zur vollständigen Bedarfsdeckung der unentbehrlichen Aminosäuren („hochwertige“ Proteinquelle), die gelbe Cut-Off-Linie markiert den Bereich (75-99) für eine „gute“ Proteinquelle. Darunter lässt sich keine Aussage über die Proteinqualität treffen (FAO, 2013).

Durch die Cut-Off-Linien ist zu erkennen, dass die drei tierischen Referenzproteine den Wert von 100 übersteigen. Die mittleren DIAAS Werte der zwei Ölsaaten übersteigen die 75, wobei Soja auch die 100 erreicht (Raps = 91,3; Soja = 100,2). Dabei liegen die Maximum-Werte beider Proteinquellen über einem DIAAS Wert von 100 ($\text{Max}_{\text{Soja}} = 117$, $\text{Max}_{\text{Raps}} = 117$) und die Minimum-Werte über einem DIAAS Wert von 75 ($\text{Min}_{\text{Soja}} = 87$, $\text{Min}_{\text{Raps}} = 79$).

Unter den Hülsenfrüchten übersteigen Kichererbsen (76) und Erbsen (75,6) knapp die DIAAS-Cut-Off-Linie von 75. Die mittleren DIAAS Werte von Lupine (73,3), Ackerbohne (67,0) und Linse (56,0) zeigen sich dagegen unterhalb der Cut-Off-Linie von 75. Dabei liegt der Maximum-Wert der Erbse bei 100 und der Minimum-Wert unter 75. Die Maximal-Werte von Lupine (83) und Ackerbohne (58) übersteigen die Cut-Off-Linie von 75, die der Linse dagegen nicht.

Aus der Tabelle im Anhang C ist zu erkennen, dass die Verarbeitungsgrade der erfassten Proteinquellen variieren. Diese umfassen Isolate, Konzentrate, Mehle, Ölpresskuchen, die gekochte, rohe oder Dampf-pelletierte Form, extrahierte Proteinfractionen bis hin zu fertigen Produkten (Tofu, Sojamilch). Einige davon sind zudem unterschiedlich nachbehandelt, z.B. durch Wärme, Schälen oder Pürieren. Die Ergebnisse von Soja, Raps, Erbse und Lupine decken dabei mehrere Verarbeitungsstufen ab (inklusive Isolate, Konzentrate und Mehle), während Ackerbohne, Linse und Kichererbse entweder gekocht, roh oder dampf-pelletiert untersucht wurden.

Die ersten limitierenden Aminosäuren der Ölsaaten für Kinder, Jugendliche und Erwachsene (>3 Jahre) sind hierbei die schwefelhaltigen AS (Met + Cys) ($n = 3$), Lysin ($n = 2$), Leucin ($n = 3$) und Isoleucin ($n = 1$). Im Bereich der Hülsenfrüchte sind die schwefelhaltigen AS (Met + Cys) am häufigsten zuerst limitierend ($n = 9$), zudem Valin ($n = 3$), Tryptophan ($n = 2$), Histidin ($n = 1$), Leucin ($n = 1$) und Lysin ($n = 1$) (siehe Anhang C).

4.3 Proteinqualität ausgewählter mikrobieller Proteine anhand des PDCAAS

Das folgende Säulendiagramm (Abb. 11) stellt die Ergebnisse der eingeschlossenen Studien zur Proteinqualität von Mykoproteinen und Mikroalgen anhand des PDCAAS in Prozent dar. Aufgrund der geringen Anzahl der Studien ($n = 4$) und PDCAAS ($n = 7$) konnten keine Mittelwerte berechnet werden. Die Ergebnisse werden somit als Einzelwerte präsentiert. Zum Vergleich dienen die tierischen PDCAAS-Werte von Milch, Ei und Rindfleisch. Die Referenzen der Daten des Diagramms sind zudem in den Tabellen in Anhang D und E ersichtlich.

Die PDCAAS der tierischen Proteinquellen und Mykoprotein (99,6%) basieren dabei auf dem Referenzprotein von Vorschulkindern (2-5 Jahre). Mykoprotein (101%) und die Werte der Mikroalgen basieren auf dem Referenzprotein für ältere Kinder, Jugendliche und Erwachsene (>3 Jahre) (siehe Anhang A).

Obwohl die PDCAAS normalerweise bei einem Wert von 100% gekappt werden, sind die folgenden Werte in ungekürzter Form dargestellt, um höherwertige Proteinquellen kenntlich zu machen. Zur Veranschaulichung einer guten (75-99) bzw. vollständigen (≥ 100) Bedarfsdeckung mit unentbehrlichen AS werden wie zuvor beim DIAAS eine gelbe bzw. rote Cut-Off-Linie dargestellt.

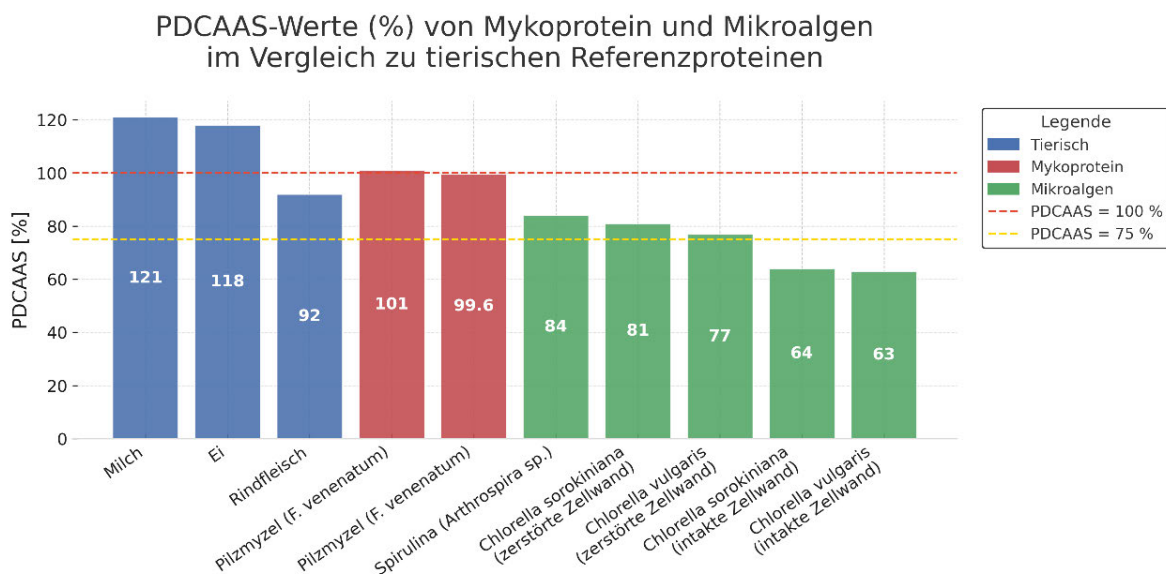


Abbildung 11: Ungekürzte einzelne PDCAAS-Werte (%) von Mykoproteinen und Mikroalgen (Quellen: Anhang D) im Vergleich zu tierischen Referenzproteinen (Quellen: Anhang E), basierend auf dem Referenzprotein für ältere Kinder, Jugendliche und Erwachsene (>3 Jahre) (FAO, 2013) bzw. Vorschulkind (2-5 Jahre) (FAO & WHO, 1991), eigene Darstellung

Die tierischen Proteine Milch (121) und Ei (118) zeigen die höchsten PDCAAS-Werte, gefolgt von Rindfleisch mit 92. Innerhalb der mikrobiellen Proteine erreicht das Mykoprotein aus dem Pilzmyzel von *Fusarium venenatum* Werte von 99,6 bzw. 101 und somit höhere Werte als Rindfleisch, jedoch niedriger als Milch und Ei. Die PDCAAS-Werte für Mikroalgen ($R = 63$ -84) sind im Vergleich insgesamt geringer, wobei nur drei von fünf Mikroalgen einen Qualitätswert von 75 übersteigen.

Der PDCAAS von 99,6% wurde aus einer klinischen Studie aus dem Jahr 2010 an weiblichen Ileostomie-Patientinnen ermittelt, wobei eine wahre ileale Verdaulichkeit (TID) von 86% festgestellt wurde. Die Autoren sehen darin eine Bestätigung der hohen Proteinqualität von Mykoprotein. Dabei konnten keine Effekte der Verarbeitung durch Dämpfen, Backen, Frittieren oder Mikrowellen auf die Proteinverdaulichkeit festgestellt werden (Edwards & Cummings, 2010). Eine zweite Studie hat anhand von bestehender Literaturdaten zur Proteinverdaulichkeit von Mykoprotein (TPD fäkal = 78% (Miller & Dwyer, 2001)) und unter Verwendung des aktuellen Referenzwertes für Erwachsene (FAO, 2013) einen PDCAAS von 101 für Mykoprotein aus *Fusarium venenatum* berechnet, was dem ermittelten Wert von Edwards & Cummings sehr nahekommt (Wanders et al., 2025).

Im Bereich der Mikroalgen zeigt Spirulina (*Arthrospira sp.*) mit 84 den höchsten PDCAAS-Wert (Tessier et al., 2021), während die PDCAAS-Werte der verschiedenen Chlorella-Arten zwischen 81 (*Chlorella sorokiniana*, zerstörte Zellwand) und 63 (*Chlorella vulgaris*, intakte Zellwand) liegen (Wang et al., 2020). Dabei ließ sich in der Studie von Wang et al. eine signifikante Steigerung der Proteinverdaulichkeit durch den mechanischen Aufbruch der Zellwände von Chlorella erreichen. Die PDCAAS Werte stiegen somit, wie im Diagramm dargestellt, um circa 24 % bei beiden Chlorella-Arten an und *Chlorella sorokiniana* (81) erreicht einen vergleichbaren Wert wie Spirulina (84). Auch Tessier et al. untersuchten einen Aufbruch der Zellwände bei Spirulina, jedoch konnte durch die eingesetzte Methode (Ultraschallbehandlung) keine Verbesserung der Proteinqualität erreicht werden. Die Autoren weisen darauf hin, dass die Aminosäurezusammensetzung von Spirulina zwar ausgewogen ist (AAS 0,98), was jedoch nicht ausreicht, um die geringere Verdaulichkeit auszugleichen (Tessier et al., 2021). Die Proteinqualität der Mikroalgen wurde dabei in beiden Studien an der ganzen Mikroalgenzelle, basierend auf der Verdaulichkeit von Ratten, getestet.

Die ersten limitierenden Aminosäuren im Bereich der mikrobiellen Proteine für Kinder, Jugendliche und Erwachsene (>3 Jahre) für Mikroalgen sind hierbei Histidin (n = 2), Isoleucin (n = 2) und die schwefelhaltigen AS (n = 1), während Mykoprotein aus *Fusarium venenatum* nicht bzw. nur sehr gering durch die schwefelhaltigen AS limitiert ist (siehe Anhang D).

4.4 Experteninterview mit Frau Scharf

Ziel des Interviews war der Einblick in die Praxis der aktuellen Herstellung alternativer Proteine und Proteinprodukte. Es dient dazu herauszufinden, welche alternativen Proteinquellen unter Berücksichtigung der technologischen Nutzbarkeit das größte Potenzial haben, den Proteinbedarf der deutschen Bevölkerung nachhaltig zu decken. Dazu wurde Frau Inka Scharf, Lebensmitteltechnologin des DLG-Fachzentrums für Lebensmittel und Projektleiterin des „New Feed & Food“-Ausschusses befragt. Dieser Teil der Arbeit erhebt jedoch keinen Anspruch auf Vollständigkeit und kann mit nur einem durchgeführten Interview nur eine Sichtweise aus der Praxis wiedergeben. Das vollständige

Transkript des Interviews mit Codierung ist im Anhang G zu finden. Im Folgenden wird das Interview strukturell nach den codierten Kategorien zusammengefasst.

Aktuelle Anwendungen alternativer Proteinquellen in der Lebensmittelherstellung:

Bei den pflanzlichen Proteinen sind die Fleisch- und Milchersatzprodukte die beiden Hauptanwendungsgebiete. Im Fleischbereich sind es laut Expertin vor allem die Erbse, Ackerbohne, Soja und Weizen bzw. Seitan, die verwendet werden, während bei Alternativen zu Milch und Milchprodukten, wie Joghurt- oder Käseersatz, vor allem Soja, Mandel und Cashew verwendet werden. Vor allem Soja und Erbse hätten ein großes Anwendungsspektrum aufgrund ihrer vielfältigen technofunktionellen Eigenschaften. Aber auch andere Hülsenfrüchte wie Lupine, Ackerbohne oder Kichererbse hätten gute Eigenschaften und das Potenzial, künftig noch stärker genutzt zu werden.

Bei den mikrobiellen Proteinen ist vor allem der Fleisch- und Wurstbereich vertreten, wobei die Expertin das Mykoprotein, insbesondere Quorn™, als derzeit bedeutendste Anwendung mit der größten Marktrelevanz herausstellte. Darüber hinaus gibt es erste interessante Anwendungen im Frischkäse- und Käsebereich, beispielsweise durch das Koji-Protein. Mikroalgen werden laut Expertin zwar schon intensiv produziert, bislang aber hauptsächlich in Nahrungsergänzungsmitteln und nicht direkt in Lebensmitteln eingesetzt. Sie erwähnte jedoch erste erfolgreiche Anwendungsversuche von Spirulina in Käse- und Eisersatz, insbesondere aufgrund der schaubildenden und -stabilisierenden Eigenschaften der Mikroalge. Auch im Fischersatzbereich wären Mikroalgen geschmacklich von Interesse und vorstellbar.

Aus Ihrer Praxiserfahrung heraus stellte Sie fest, dass grundsätzlich für alle Produktkategorien Anwendungsmöglichkeiten bestünden – „die Ausnahmen bestätigen die Regel“. Ausschlaggebend für den erfolgreichen Einsatz seien die technofunktionellen Eigenschaften sowie die Kombinierbarkeit der Proteinbestandteile.

Aktuelle Herausforderungen und Forschungsschwerpunkte:

Bei der Rohstoffauswahl für die Produkte stehen nach der Erfahrung der Expertin grundsätzlich sensorische und technofunktionelle Eigenschaften an erster Stelle, denn das Produkt soll dem Original in Geschmack und Konsistenz möglichst nahekommen. Die ernährungsphysiologische Qualität spiele im Vergleich oft eine geringere Rolle. Um hochwertigere Produkte herstellen und Zusatzstoffe reduzieren zu können, müssten die Eigenschaften pflanzlicher Proteine erst technofunktionell aufgewertet werden:

„Es hat aber wie gesagt noch technische Hindernisse, um einfach Geschmack und vor allen Dingen Konsistenz zu erreichen. Und es ist einfach auch so, dass manche Produkte einfach bearbeitet werden müssen, damit sie überhaupt verdaulich sind. Also die antinutritiven Stoffe in den Pflanzen, die

einfach durch eine Bearbeitung erst abgebaut oder verdaulich gemacht werden müssen [...] und da verspricht man sich auch viel von der Fermentation.“

#00:28:58# (Experteninterview Transkript, S. 6)

Forschung dahingehend gibt es beispielsweise im Bereich der Käsealternativen. Hülsenfrucht-Proteine aus z.B. Soja könne man derzeit nicht einsetzen, da sie die Festigkeit und Strukturbildung, die für die käseartige Konsistenz notwendig sind, nicht erreichen. Derzeitige Produkte werden somit nur auf Basis von Fett und Stärke nachgebildet. Es gibt jedoch Bestrebungen mithilfe einer zusätzlichen Fermentation, diese Hürde zu überwinden und sogar die Käsereifung nachzustellen. Als Beispiel nannte die Expertin einen kürzlich auf einer Fachtagung vorgestellten Camembert auf Lupinenbasis.

Eine weitere (nicht-technologische) Herausforderung besteht bei der Nutzbarkeit regional angebauter Hülsenfrüchte. Laut Expertin werden die derzeit genutzten Mehle, Konzentrate und Isolate größtenteils aus anderen Ländern, wie China oder Kanada, importiert und stammen nicht oder nur zu kleinem Anteil aus regional angebauten Pflanzen. Grund dafür seien die noch unzureichend ausgebauten Lieferketten- und Qualitäten. Um regionale Leguminosen attraktiver für Landwirte und nutzbarer für die Lebensmittelindustrie zu machen, müssten diese erst angepasst werden. Die DLG arbeite jedoch daran, dieses Bewusstsein zu stärken. Bei der Nutzbarkeit von Proteinen aus Nebenströmen, wie Ölpressekuchen aus Raps oder Sonnenblumenkernen, sei die unterschiedliche Qualität der Ölpressekuchen noch ein Problem.

Bei den Mikroalgen hat die Expertin festgestellt, dass es oft die grüne Farbe ist, die die Verbraucherakzeptanz behindert. Neben technologischen Herausforderungen gibt es auch noch rechtliche und wirtschaftliche Hürden, die eine Rolle spielen. Bei den mikrobiellen Proteinen ist vor allem die rechtliche Zulassung ein großes Hindernis. Dies gilt zum Beispiel für speziell nachgebildete Proteine aus der Präzisionsfermentation, wie Kaseine oder Beta-Lacto-Globuline, aber auch einige neuartige Mykoproteine und die daraus gewonnene Biomasse:

„Es sind wenige, die zugelassen sind und das verhindert eigentlich das „Upscaling“, also dass das in eine Produktionsreife geht, wo diese Proteine auch entsprechend kostengünstig angeboten werden können [...] es sind auch wirtschaftliche Hürden, die da vorliegen und wo auch viele Start-Ups, die mit großem Enthusiasmus herangehen, dann letztendlich scheitern.“

#00:20:31# - #00:21:58# (Experteninterview Transkript, S. 5)

Trends & Marktentwicklung

Bezogen auf die langfristige Entwicklung des Marktes für alternative Proteine, wird sich laut Expertenmeinung der Markt insgesamt weiter festigen, insbesondere die Strategie der pflanzenbasierten Proteinquellen wird weiter wachsen. Dabei lässt sich die technofunktionelle Aufwertung durch die Fermentation hervorheben, wodurch der Trend zu „Clean-Label-Produkten“ angestrebt wird.

Daneben gibt es auch den Trend der Nutzung von Nebenströmen der Lebensmittelindustrie, die im Sinne der Kreislaufwirtschaft eine Rolle spielen, jedoch mengenmäßig nicht den Hauptanteil zur Herstellung alternativer Produkte spielen werden. Des Weiteren hebt die Expertin die Weiterentwicklung der Mykoproteine hervor, die vielversprechende Nährstoffpotentiale (z.B. Vitamin B12, D) mitbringen und mit pflanzlichen Proteinen kombiniert werden können. Ein wichtiger Trend sind dahingehend die hybriden Produkte:

„Oder pflanzliche Proteine und Mykoproteine können miteinander kombiniert werden, sprich die hybriden Produkte werden einfach noch interessanter werden. Dass die guten Seiten von diesen Quellen miteinander kombiniert werden, um dann ein hochwertiges Produkt zu erzielen. Das ist, meines Erachtens, der Trend und wo auch interessante Forschung ist.“

#00:31:31# (Experteninterview Transkript, S. 7)

Andere alternative Proteine, wie mikrobielle Proteine aus der Präzisionsfermentation, Makroalgen oder zelluläres Fleisch bzw. zellulärer Fisch, seien zwar vielversprechend, befinden sich jedoch noch in der Entwicklung oder müssen erst noch regulatorische Hindernisse überwinden.

5 Diskussion

Im Folgenden Abschnitt wird anhand der Ergebnisse erläutert, welche der untersuchten Proteinquellen eine „gute“ (75-99) bzw. „hochwertige“ Qualität (≥ 100) anhand des DIAAS bzw. PDCAAS aufweisen und somit aus ernährungsphysiologischer Sicht besonders geeignet sind, um hochwertige tierische Proteine zu ersetzen. Zusätzlich wird anhand der Ergebnisse des Experteninterviews deren Relevanz für die praktische Anwendung und potenzielle Rolle in der Proteinversorgung der deutschen erwachsenen Allgemeinbevölkerung diskutiert. Hierzu müssen ebenfalls aufgetretene Limitationen erwähnt werden, um die Ergebnisse kritisch einordnen zu können.

5.1 Methodendiskussion

Diese Arbeit verknüpft eine systematische Literaturrecherche zu DIAAS und PDCAAS mit einem ergänzenden Experteninterview und schafft damit eine praxisnahe Grundlage.

Thematische Grenzen

Der inhaltliche Fokus der Arbeit lag auf der physiologischen Proteinqualität, d. h. der Aminosäurezusammensetzung und -verdaulichkeit anhand des DIAAS bzw. PDCAAS. Es ist wichtig zu beachten, dass diese Methoden zur Bewertung der Proteinqualität nur eine allgemeine Einschätzung liefern und nicht alle Aspekte der ernährungsphysiologischen Qualität von Proteinen berücksichtigen können. Andere Nährstoffe der Proteinquellen, spezifische Gehalte an antinutritiven Faktoren (ANF) oder gesundheitliche Effekte wie mögliche Risiken oder Allergenpotenzial wurden zum Teil angeschnitten, jedoch nicht tiefergehender thematisiert.

Um den thematischen Umfang einzuschränken, wurden die zu betrachtenden Proteinquellen methodisch nach vorher festgelegten Kriterien ausgewählt. Die Auswahl der relevantesten Proteinquellen erfolgte anhand der berichteten Hintergrundinformationen, der vorhandenen Datenlage und dem subjektiven Ermessen der Autorin. Somit könnte es zu einem Ausschluss von anderen ebenfalls relevanten Proteinquellen für Deutschland gekommen sein. Hefeproteine und Makroalgen wurden in diesem Zuge als weniger relevant und die Datenlage als zu heterogen für einen Vergleich eingeschätzt und somit von der Arbeit ausgeschlossen. Auch Hanf- und Sonnenblumenprotein schieden mangels vergleichbarer Daten aus, was die Auswahl und Bewertung der relevantesten Proteinquellen teilweise auf besser erforschte Proteinquellen verschiebt (Selektions-Bias).

Wahl und Vergleichbarkeit der Proteinqualitätsmethoden

Zur Bewertung der Proteinqualität der ausgewählten Proteinquellen wurden die derzeit meist genutzten und aktuell von der FAO empfohlenen Bewertungsgrößen des DIAAS und PDCAAS verwendet, wobei der DIAAS derzeit als die genaueste Methode gilt, um die Proteinqualität eines Nahrungsproteins zu ermitteln (FAO, 2013).

Wie im theoretischen Hintergrund beschrieben, ist der PDCAAS im Vergleich zum DIAAS ungenauer, da dieser auf der fäkalen Verdaulichkeit des gesamten Rohproteins und meist am Modell der Ratte basiert (Hodgkinson, 2024). Der umfangreiche mikrobielle Stoffwechsel im Blind- und Dickdarm führt zu einer verfälschten Schätzung der AS anhand des Stuhls. Studien haben gezeigt, dass der PDCAAS die Proteinqualität (v.a. pflanzlicher Proteine) im Vergleich zum DIAAS häufig überschätzt (Adhikari et al., 2022). Zudem ist die Verdaulichkeit von Ratten nicht direkt auf den Menschen übertragbar, während das Schweinmodell als ein auf den Menschen übertragbares Modell hinsichtlich der Verdaulichkeit angesehen wird (Hodgkinson et al., 2022).

Die Proteinqualitätswerte der betrachteten mikrobiellen Proteine sind somit im Vergleich zu den pflanzlichen Proteinen bezüglich der Evidenzstärke als schwächer einzustufen. Ausnahme hiervon besteht für die Humanstudie für Mykoprotein (Edwards & Cummings, 2010), da diese als einzige unter den erfassten PDCAAS Studien auf der ilealen Verdaulichkeit beruht (siehe Anhang D).

Aufgrund der physiologisch präziseren Einschätzung der Proteinqualität und der Datenverfügbarkeit wurde der DIAAS für die pflanzlichen Proteine gewählt. Die aktuelle Datenlage für das Mykoprotein und die Mikroalgen ließ nur einen Vergleich auf PDCAAS Basis zu. Die Verwendung beider Methoden konnte die physiologische Relevanz erhöhen, begrenzt aber die direkte Vergleichbarkeit zwischen den pflanzlichen und den mikrobiellen Proteinquellen. Aus diesem Grund kann eine Kategorisierung, wie sie für den DIAAS empfohlen wird („gut“ 75-99; „hochwertig“ ≥ 100) nur mit Einschränkung auf den PDCAAS übertragen werden und sollte nicht als strikt äquivalent, sondern eher als orientierend verstanden werden.

Suchstrategie

Die erste übersichtsschaffende Suchstrategie wurde durch einzelne Suchanfragen pro Proteinquelle ersetzt, um die Trefferanzahl erhöhen zu können. Dafür wurden bei einzelnen Proteinquellen mehrere Synonyme, Unterbegriffe und wissenschaftliche Bezeichnungen benutzt. Es ist jedoch nicht auszuschließen, dass andere relevante Bezeichnungen nicht erfasst und auf Treffer getestet wurden. Die meisten Daten stammen aus *PubMed*, ergänzt um *ScienceDirect* und FAO-Berichte. Andere relevante Ernährungs- oder Lebensmitteljournalen außerhalb dieser Datenbank könnten unterrepräsentiert sein. Zudem konnten jegliche nach Juni 2025 publizierte relevante Artikel nicht mehr erfasst werden. Zudem konnten manche relevante Suchergebnisse aufgrund der Nicht-Verfügbarkeit des Volltextes nicht berücksichtigt werden. Des Weiteren wurden nur die gesuchten Proteinquellen in die Darstellung der Ergebnisse miteinbezogen, d.h. einige der genannten Studien haben noch weitere Proteinquellen neben der gesuchten Proteinquelle untersucht, welche aufgrund der Abweichung von der Zielfragestellung oder nicht erfüllten Ein- und Ausschlusskriterien nicht in die Arbeit miteinbezogen wurden. Aus den genannten Gründen erhebt die systematische Literaturrecherche keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

Auch wenn in den Einschlusskriterien formuliert wurde, dass in erster Linie nur nach Studien, die vor maximal 10 Jahren veröffentlicht wurden, wurde dieser Filter aufgrund des Datenmangels für die systematische Recherche der Mykoproteine aufgeweicht, um die Trefferzahl erhöhen zu können.

Studienlage und -qualität

Die pflanzlichen Proteine sind schon länger etabliert und im Allgemeinen besser erforscht im Vergleich zu den mikrobiellen Proteinen, bei denen es sich um ein sehr junges Forschungsfeld handelt. Eine heterogene Studienlage war somit nach der ersten übersichtsverschaffenden Suchstrategie zu erwarten (Pflanzliche Proteine: Treffer $n = 172$; Mikrobielle Proteine: $n = 26$).

Die Evidenz der Ergebnisse ist für die betrachteten Ölsaaten und Hülsenfrüchte durch die größere Anzahl einbezogener Studien ($n = 13$) und Einzelwerte ($n = 30$) belastbarer als für das Mykoprotein (*F. venenatum*) und die Mikroalgen (Studien $n = 4$, Einzelwerte $n = 7$).

Bei den mikrobiellen Proteinen gibt es kaum aktuelle In-Vivo-Studien zu PDCAAS und, soweit die Autorin feststellen konnte, keine aktuellen In-Vivo-Daten zur ilealen Verdaulichkeit und DIAAS. Die Ergebnisse der mikrobiellen Proteine sind somit im Wesentlichen durch die geringere Datenverfügbarkeit und den methodisch schwächeren PDCAAS limitiert. Jedoch bestehen auch unter den pflanzlichen Proteinen Datenlücken. Während es einige In-Vivo-Studien zum DIAAS auf ilealer Basis bei Raps ($n = 9$), Erbse ($n = 6$) und Soja ($n = 5$) gibt, ist die Datenlage bei den restlichen Hülsenfrüchten eher dünn und die Aussagekraft der berechneten Mittelwerte geringer einzuschätzen (Details siehe Kap. 5.2 *Ergebnisdiskussion*).

Die heterogenen Studienmodelle (Mensch/Schwein/Ratte) und Verarbeitungsstufen (z.B. Isolate/Konzentrate vs. ganze Samen oder ganze Mikrobenzelle; nachbehandelt vs. roh) beeinflussen zudem die Verdaulichkeit und damit die Proteinqualitätswerte. Für Proteine mit dünner Datenlage ist diese Variabilität an untersuchten Verarbeitungsformen sehr begrenzt. Dies kann die Genauigkeit der berechneten Mittelwerte bzw. deren Übertragbarkeit auf die Proteinquelle im Allgemeinen (Generalisierbarkeit) stark einschränken (Details siehe Kap. 5.2 *Ergebnisdiskussion*).

Aus den genannten Gründen sind die Einordnungen in die Kategorien „gut“ bzw. „hochwertig“ nicht als starre Rangliste zu verstehen, sondern lediglich als Widerspiegelung des aktuellen Forschungsstandes bzw. der erfassten Daten anhand der systematischen Literaturrecherche, welche, wie bereits beschrieben, keinen Anspruch auf Vollständigkeit erhebt.

Experteninterview

Die Durchführung des Experteninterviews war insofern begrenzt, als dass nur eine Expertin für das Interview ausgewählt und befragt wurde und somit nur ein Einblick in die Praxis und kein vollständiges tiefergehendes Bild möglich war. Das Interview ist daher eher ein Zusatzblick und nicht verallgemeinerbar. Da die Zielfragestellung mithilfe des Interviews jedoch erreicht und eine Einordnung der Ergebnisse der Literaturrecherche in einen praktischen Kontext möglich war, wird dies als ausreichend angesehen.

Die Fragen wurden möglichst offen gestellt, ohne spezifische Nennung der in der Arbeit fokussierten Proteinquellen, um der Expertin zunächst Raum zum Antworten zu lassen und die relevanten Proteinquellen aus Ihrer Sicht als Lebensmitteltechnologin und Projektleiterin in diesem Bereich besprechen zu können. Um dennoch den nötigen Bezug zum thematischen Fokus dieser Arbeit zu schaffen, konzentrierten sich die spontanen Nachfragen auf die in dieser Arbeit behandelten Proteinquellen (Leguminosen, Ölsaaten, Mykoproteine, Mikroalgen).

Die ausgewählte Expertin hatte ein umfangreiches Wissen auf dem Gebiet und konnte nahezu alle Fragen entsprechend beantworten. Nur bei einzelnen Themen, wie Anwendungen im Eiersatzbereich (#00:10:53#) und spontanen Nachfragen, z.B. nach spezifischen Forschungsprojekten im Bereich Hülsenfrüchte und Käseersatz (#00:16:05#) oder weiteren technologischen Verarbeitungsmöglichkeiten neben der Fermentation (#00:30:12#), verwies die Expertin auf ihr begrenztes Wissen und gab stattdessen Tipps für weitere Anlaufstellen oder Experten auf diesem Gebiet. Der zeitlich geplante Rahmen von maximal 45 Minuten konnte mit circa 36 Minuten sehr gut eingehalten werden und es war ausreichend Zeit für ergänzende Nachfragen.

Für spezifischere und tiefergehende Fragen in Bezug auf die einzelnen Proteinquellen, ihrer funktionellen Eigenschaften und Anwendungen, wären weitere Experteninterviews mit Fachleuten direkt aus den Forschungs- und Produktentwicklungsabteilungen der entsprechenden Unternehmen

und Start-Ups nötig gewesen. Dies wäre zwar sehr interessant gewesen, wurde aber aus begrenzter Zeit- und Ressourcenverfügbarkeit als nur schwer umsetzbar angesehen. Zudem liegt der Fokus der Arbeit auf der ernährungsphysiologischen Bewertung.

5.2 Ergebnisdiskussion

Ölsaaten

Insgesamt lässt sich festhalten, dass die beiden untersuchten Ölsaaten, Soja und Raps, zwar nicht die gleichen DIAAS wie die tierischen Referenzproteine (Milchpulver, Ei und Rindfleisch) erreichen, jedoch im Mittel einen DIAAS im Bereich der Kategorie für eine „gute“ (75-99) (Raps $MW = 91,3$) bzw. „hochwertige“ (≥ 100) Proteinquelle (Soja $MW = 100,2$) erreichen. Ihre Einzelwerte variieren dabei in ähnlichen Bereich von 87-117 (Soja) und 79-117 (Raps). Somit fallen ihre Spannweiten R jeweils in beide Kategorien („gut“ und „hochwertig“).

Die Ergebnisse deuten somit darauf hin, dass Soja als alleinige Proteinquelle im Mittel über verschiedene Verarbeitungsstufen hinweg, den Proteinbedarf an unentbehrlichen AS für die gesunde erwachsene Allgemeinbevölkerung (Referenzprotein >3 Jahre) decken kann. Dieses Ergebnis bestätigt somit den bisherigen Forschungsstand, nach dem Soja als ausgezeichnete Proteinquelle unter den Pflanzlichen gilt (DGE, 2024). Auch aus technologischer Sicht bringt Soja, nach wie vor, unter den pflanzlichen Proteinen die vielfältigsten technologischen Anwendungen vor allem in Milch- und Fleischersatz mit, wie aus dem Experteninterview hervorgeht (#00:03:51#, #00:10:53#).

Zu beachten ist jedoch, dass die DIAAS-Werte im Endprodukt je nach Verarbeitung und Rezeptur variieren können, auch wenn Soja allgemein einen hohen DIAAS aufweist und somit als hochwertige Proteinquelle eingestuft werden kann. So spielt unter anderem die Lebensmittel-Matrix eine wichtige Rolle bei der Verdaulichkeit des Proteins (DGE, 2024). So führen beispielsweise die Autoren der eingeschlossenen DIAAS Studie zu Sojaprodukten (Anhang C) den signifikanten Unterschied der Proteinqualität zwischen Sojamilch (117) und Tofu (97) in erster Linie auf die unterschiedliche Struktur des Lebensmittels zurück, wodurch sich eine geringere Verdaulichkeit für Tofu ergibt (Reynaud et al., 2021).

Für Rapsprotein ($MW = 91,3$), lässt sich ableiten, dass im Mittel über verschiedene Verarbeitungsstufen hinweg, der Proteinbedarf für die gesunde erwachsene Allgemeinbevölkerung (Referenzprotein >3 Jahre) als alleinige Proteinquelle nur begrenzt erfüllt werden kann. Als limitierende AS wurden hierbei Lysin ($n = 2$), Leucin ($n = 3$) und Isoleucin ($n = 1$) berichtet. Diese AS müssten für eine vollständige Bedarfsdeckung ergänzt werden. Dennoch kann Raps im Mittel als potenziell „gute“ Proteinquelle eingestuft werden. Unter den hier betrachteten pflanzlichen Proteinquellen erreicht Raps im Vergleich nach Soja die höchste Proteinqualität anhand des DIAAS. Zwar leisten Rapsproteine derzeit noch keinen Beitrag zur Proteinversorgung in der menschlichen Ernährung (Kotecka-

Majchrzak et al., 2020), die Ergebnisse dieser Arbeit weisen jedoch auf das vorhandene ernährungsphysiologische Potential ($\text{DIAAS}_{MW} = 91,3$) hin.

Dieses Ergebnis deckt sich mit der bereits erwähnten RCT der Martin-Luther-Universität, die Raps abschließend als „sehr gute Alternative zu Soja“ einstufen, da sich im Vergleich zu Soja vergleichbare, leicht positivere Effekte auf den Stoffwechsel (z.B. Insulinantwort, Sättigungsgefühl) nach dem Konsum von Rapsprotein gezeigt haben (Volk et al., 2020).

Auch die im theoretischen Hintergrund aufgeführten Vorteile der heimischen bzw. regionalen Verfügbarkeit und der Nutzung von Restströmen aus der Ölherstellung machen Rapsproteine aus nachhaltiger Sicht relevant (UFOP, 2025). Nach befragter Expertin seien aus technologischer Sicht jedoch derzeit die gleichbleibende Qualität der Ölpresskuchen solcher Nebenströme noch eine Herausforderung (#00:34:55#).

Hülsenfrüchte

Insgesamt lässt sich feststellen, dass die betrachteten Hülsenfrüchte Erbse, Kichererbse, Lupine, Ackerbohne und Linse im Mittel einen DIAAS im Bereich von 56 (Linse)-75,6 (Erbse) erreichen. Der einzige berichtete Wert für Kichererbse erreicht dabei den höchsten DIAAS (76).

Die Ergebnisse lassen somit zunächst erkennen, dass die Hülsenfrüchte im Allgemeinen schlechter abschneiden als die beiden Ölsaaten Raps und Soja ($MW_{Raps} = 91,3$; $MW_{Soja} = 100,2$). Nur zwei von fünf Hülsenfrüchten erreichen einen DIAAS über 75 und fallen somit in die Kategorie für eine „gute“ Proteinquelle (Kichererbse = 76; Erbse = 75,6).

Von den berechneten MW lässt sich demnach ableiten, dass die betrachteten Hülsenfrüchte als alleinige Proteinquelle nicht ausreichen, um den Proteinbedarf an unentbehrlichen AS für die gesunde erwachsene Allgemeinbevölkerung (Referenzprotein >3 Jahre) decken zu können und in mindestens einer unentbehrlichen AS limitierend sind. Die am häufigsten limitierenden AS waren hierbei die schwefelhaltigen AS ($n = 9$). Wie bereits beschrieben, kann eine Anreicherung mit den limitierenden AS oder eine Kombination von Proteinquellen mit sich ergänzenden AS-Profilen die Proteinqualität steigern. Eine geeignete Kombination für Hülsenfrüchte (arm an Met + Cys, reich an Lysin) sind demnach z.B. Getreide (reich an Met + Cys, arm an Lysin)(DGE, 2024).

Betrachtet man hingegen die Spannweite aller eingeschlossenen Einzelwerte, lässt sich eine große Variabilität von 54 (Min_{Linse})-100 (Max_{Erbse}) feststellen. Dabei fallen einige Einzelwerte in den „guten“ Bereich ($\text{Max}_{Lupine} = 83$; $\text{Max}_{Ackerbohne} = 77$) bzw. sogar in den „hochwertigen“ Bereich ($\text{Max}_{Erbse} = 100$). So kann wärmebehandeltes Erbsenisolat in einer Humanstudie mit einem DIAAS von 100 ($= \text{Max}_{Erbse}$) den Proteinbedarf für die Referenzpopulation >3 Jahre vollständig decken (Guillin et al., 2022).

Diese große Variabilität ist vermutlich in erster Linie auf die unterschiedlichen Verarbeitungsformen der eingeschlossenen Hülsenfrüchte zurückzuführen, da die erfassten Studien zum großen Teil auf dem gleichen Modell am Schwein beruhen (Schwein n = 13, Mensch n = 2, Ratte n = 1). Die Verarbeitungsformen variieren dagegen stark und sind, wie bereits beschrieben, unterschiedlich breit untersucht bei den einzelnen Hülsenfrüchten. Während Erbse und Lupine mehrere Verarbeitungsstufen abdecken (z.B. Isolate, Konzentrate, Mehle, extrudiert) und zudem teilweise nachbehandelt sind (z.B. wärmebehandeltes Erbsenisolat), sind die anderen Hülsenfrüchte lediglich entweder gekocht (Linse/Ackerbohne), roh oder Dampf-pelletiert (Linse) oder auch in nicht berichteter Form (Ackerbohne) untersucht worden (Anhang C). Wie im theoretischen Hintergrund beschrieben, enthalten pflanzliche Proteine oft eine dicke Zellwandstruktur und antinutritive Faktoren (ANF), wie Phytate oder Trypsininhibitoren, die die Verdaulichkeit und Absorption vermindern können. Verschiedene Verarbeitungsprozesse (wie z.B. Kochen oder Schälen) oder Prozesse zur Steigerung der Reinheit der Proteinfraktionen (z.B. in Form von Isolaten, Konzentraten, Mehlen) können die Gehalte an diesen ANF mindern und somit auch den DIAAS beeinflussen (DGE, 2024).

Vor diesem Hintergrund ist nicht auszuschließen, dass die Hülsenfrüchte mit kleiner Datenbasis und insgesamt bisher wenig untersuchten Verarbeitungsformen (wie Lupine, Linse, Ackerbohne, Kichererbse) durch zukünftige Forschung an Proteinisolaten oder -konzentraten sowie einer angepassten technologischen Verarbeitung nicht auch höhere Proteinqualitätswerte erreichen können.

Ergänzend dazu beleuchtet das Experteninterview die vielversprechende Möglichkeit der technofunktionellen und ernährungsphysiologischen Aufwertung durch eine zusätzliche Fermentation der pflanzlichen Proteine. Durch diese könne man zum einen struktur-, konsistenz- und geschmacksgebende Eigenschaften anpassen und zum anderen die physiologische Qualität, d.h. die Verdaulichkeit, durch einen Abbau von antinutritiven Faktoren verbessern. Sie verringert zudem die Notwendigkeit, Zusatzstoffe zuzusetzen (#00:27:57#). Derzeitige Forschung liegt laut Expertin beispielsweise in der Entwicklung von Käsealternativen auf Hülsenfruchtbasis (#00:13:55#-#00:15:12#). Aus technologischer Sicht könnten dabei neben Soja und Erbse, auch andere Hülsenfrüchte (z.B. Ackerbohne, Kichererbse, Lupine) noch mehr genutzt werden, da diese ebenfalls gute technofunktionelle Eigenschaften mitbringen (#00:08:32#-#00:10:53#). Dieses Potential könnte durch den Ausbau regionaler Lieferketten (#00:08:55#) und den verstärkten Anbau solcher heimischer Eiweißpflanzen noch verstärkt werden (BMEL & BLE, 2020).

Somit lässt sich aus ernährungsphysiologischer und technologischer Sicht schlussfolgern, dass pflanzliche Proteine (wie Hülsenfrucht- oder Ölsaatenproteine), vor allem in Form von (neuen) Proteinkombinationen und daraus hergestellten Produkten mit angepassten Verarbeitungsmethoden, das Potenzial für qualitativ hochwertige Ersatzprodukte haben und in Zukunft einen wesentlichen Beitrag zur Proteinversorgung der deutschen Allgemeinbevölkerung leisten könnten.

Mykoproteine

Aus den bisher verfügbaren PDCAAS Werten aus der Literatur für Mykoprotein aus dem Fadenpilz *Fusarium venenatum* (n = 2) lässt sich eine „hochwertige“ Proteinqualität (99,6-101) ableiten. Mykoprotein ist somit neben Soja die einzige der hier betrachteten alternativen Proteinquellen, die einen Proteinqualitätswert von 100, wenn auch PDCAAS und keine DIAAS, erreichen kann und somit den tierischen Referenzproteinen (PDCAAS = 92-121) am nächsten kommt.

Die erfassten Ergebnisse sind durch das Alter und die geringe Probandenzahl (n = 5) der Humanstudie (Edwards & Cummings, 2010), sowie der Tatsache, dass die aktuellere Studie (Wanders et al., 2025) lediglich vorhandene Verdaulichkeitsdaten von Ratten zur Berechnung nutzt und keine eigene Verdaulichkeitsstudie durchführt, in ihrer Qualität eingeschränkt. Die Humanstudie ist trotz ihres Alters in ihrer Evidenz höher einzustufen als die aktuelle Studie, da die ileale Verdaulichkeit als genauerer Wert gilt und diese zudem am Menschen ermittelt wurde.

Obwohl die Studie von *Edwards & Cummings* schon älter als 10 Jahre ist, wird sie in mehreren aktuellen Übersichtsarbeiten (peer-reviewed) zur Proteinqualität von Mykoproteinen zitiert (Azizi et al., 2024; Cheriaparambil & Grossmann, 2025; Majumder et al., 2024). Dies und die Tatsache, dass es sich um eine klinische Studie am Menschen mit ilealem Verdaulichkeitswert handelt, weisen auf die Qualität der Studie hin. Auch die Marke Quorn™ bezieht sich auf ihrer Webseite zur Aussage der guten Proteinqualität auf diese Studie (Marlow Foods, 2025). Dies verweist gleichzeitig aber auch auf einen bestehenden Mangel an neuen aktuelleren Studien, die die bestehenden PDCAAS Werte belegen. Die einzige weitere identifizierte Studie zu PDCAAS und Mykoprotein, eine aktuelle chilenische In-Vitro Studie (Landeta-Salgado et al., 2025), die jedoch die Einschlusskriterien nicht erfüllte und deshalb nicht in die Ergebnisse miteinbezogen wurde, berichtet über ein neuartiges Mykoprotein, das durch Fermentation der Braunalge *Durvillea spp.* mit filamentösen Pilzstämmen gewonnen wurde und einen PDCAAS von 89 erreichte. Obwohl dieser Wert unter den in der vorliegenden Arbeit ermittelten Werten für traditionelles Mykoprotein aus *F. venenatum* (99,6 bzw. 101) liegt, weist er dennoch auf eine hohe Proteinqualität von Mykoproteinen im Allgemeinen hin.

Aufgrund der geringen Studienlage und methodischer Schwächen des PDCAAS sollten die vorhandenen Ergebnisse durch weitere In-Vivo-Studien, bestenfalls zur ilealen Verdaulichkeit validiert werden. Dennoch weisen die bestehenden PDCAAS darauf hin, dass Mykoprotein (*F. venenatum*) als alleinige Proteinquelle den Proteinbedarf an unentbehrlichen AS für die gesunde erwachsene Allgemeinbevölkerung (Referenzprotein >3 Jahre bzw. 2-5 Jahre) vollständig decken kann und somit keine limitierende AS aufweist.

Mykoprotein gilt laut Hintergrundrecherche und Experteninterview als eine der wichtigsten mikrobiellen Proteinquellen für Deutschland (KErn, 2022)(#00:03:51#). Es bietet wertvolle Nährstoffe (z.B. Vitamin B₁₂, D), gute Kombinationsmöglichkeiten mit pflanzlichen Proteinen („hybride“

Produkte) sowie technofunktionelle Vorteile, insbesondere strukturgebende geschmacksneutrale Eigenschaften, die es für vor allem für Fleisch- und Wurst, und teilweise Milchproduktealternativen geeignet macht (#00:23:45#, #00:31:31#)(Cedeno et al., 2025; Majumder et al., 2024).

Aus ernährungsphysiologischer und technologischer Sicht könnten Mykoproteine und daraus hergestellte Produkte somit in Zukunft eine wesentliche Rolle in der Proteinversorgung der deutschen Allgemeinbevölkerung spielen.

Wesentliche Hürden für eine weitere Kommerzialisierung sind die bereits genannten regulatorischen Hürden für andere Pilzstämme und daraus hergestellte Produkte sowie wirtschaftliche Hürden (z.B. Preis, Upscaling der Produktion) (#00:05:28#, #00:20:31#, #00:21:58#)(Cedeno et al., 2025).

Mikroalgen

Die vorliegenden Ergebnisse zu Mikroalgen zeigen, dass die Proteinqualität anhand des PDCAAS insgesamt niedriger als die der tierischen Referenzproteine (92-121) und des Mykoproteins (99,6-101) einzuschätzen ist. Sie liegen mit einer Spannweite von 63-84 in einem ähnlichen, sogar etwas höheren Qualitätsbereich als die hier betrachteten Hülsenfrüchte (56 (Linse)-76 (Kichererbse)), auch wenn PDCAAS und DIAAS nicht direkt vergleichbar sind. Insgesamt übersteigen nur drei von fünf Mikroalgenwerte einen Proteinqualitätswert von 75 und können als potenziell „gute“ Proteinquelle angesehen werden. Dabei handelt es sich um Spirulina (84) und die beiden Chlorella-Arten mit behandelter Zellwand (*Chlorella sorokiniana* = 81; *Chlorella vulgaris* = 77).

Von der beobachteten Spannweite (63-84) lässt sich somit (wie bei den Hülsenfrüchten) ableiten, dass die Biomassen der ganzen Mikroalgenzelle von Chlorella oder Spirulina nicht ausreichen, um den Proteinbedarf an unentbehrlichen AS für die gesunde erwachsene Allgemeinbevölkerung (Referenzprotein >3 Jahre) als alleinige Proteinquelle komplett decken zu können und in mindestens einer unentbehrlichen AS limitierend sind (His (n = 2); Ile (n = 2); SAA (n = 1)).

Die Proteinqualität scheint dabei stark abhängig von der Mikroalgenart und der Verarbeitung zu sein. Somit führte ein Zellwandaufbruch bei den Chlorella-Arten zu einer signifikanten Verbesserung der Proteinverdaulichkeit (Wang et al., 2020), während bei Spirulina kein solcher Effekt festgestellt werden konnte (Tessier et al., 2021). Vor dem Hintergrund, dass es sich bei Spirulina (Cyanobakterium) und Chlorella (Grünalge) um unterschiedliche Mikroalgenarten mit jeweils unterschiedlichen Zellwandstrukturen handelt (Kern, 2022), deutet dieses Ergebnis daraufhin, dass die Zellwände von Spirulina weniger widerstandsfähig sind als die von den Chlorella-Arten und somit für den Menschen leichter zu verdauen. Diese Interpretation kann durch eine aktuelle Übersichtsarbeit bestätigt werden (Williamson et al., 2024). Die Autoren verweisen dabei auf die genauen Unterschiede der Zellwände (Spirulina = dünne Peptidoglykanschicht und äußere Zellmembran; Chlorella = robuste Zellulosezellwand), wodurch bei Chlorella die Notwendigkeit einer mechanischen, chemischen oder

enzymatischen Vorbehandlung der Zellen vor dem Konsum besteht, um Proteine verfügbar zu machen, während Spirulina-Protein auch in unverarbeiteter Form für den Körper verfügbar ist.

Anhand dieser Ergebnisse erscheint somit Spirulina (PDCAAS 84; bessere Verdaulichkeit der Zellwand ohne aufwendige Aufschlussverfahren) unter den hier betrachteten Mikroalgen am geeignetsten für die menschliche Ernährung und mögliche Lebensmittelanwendungen zu sein.

Die Antworten der Expertin, auf die Frage nach den Anwendungsmöglichkeiten, unterstützen den aktuellen Stand der Forschung, dass sich für Mikroalgenbiomasse derzeit noch keine gesicherten Aussagen treffen lassen, da diese noch zu wenig Anwendung (bisher hauptsächlich in NEM) finden (#00:05:28#)(Guo et al., 2024; KErn, 2022). Sie erwähnte jedoch erste erfolgreiche Anwendungsversuche von Spirulina in Käse- und Eisersatz, insbesondere aufgrund der schaumbildenden und -stabilisierenden sowie emulgierenden Eigenschaften der Mikroalge. Ein wesentliches Hindernis sind jedoch die grüne Farbe und der Geschmack, weshalb vor allem der Fischersatzbereich geeignet wäre (#00:25:07#)(Guo et al., 2024). Ein aktuelles Beispiel hierfür ist das genannte Forschungsprojekt „Mamy“ der Koralo GmbH zu einem veganen Fischersatz aus Mikroalgenbiomasse (PIONEER-Netzwerk, 2025).

Vor dem Hintergrund, dass Mikroalgen neben einem hohen Proteingehalt, auch andere wichtige Nährstoffe mit gesundheitlichen Vorteilen wie Vitamine (B₁₂, Folsäure), Mineralstoffe und lebenswichtige Fettsäuren (Omega-3-Fettsäuren) enthalten (DGE, 2024), weisen Mikroalgen abgesehen von der Proteinversorgung auch das Potenzial auf, zu einer verbesserten (Mikro-)Nährstoffversorgung der deutschen erwachsenen Allgemeinbevölkerung beizutragen. Das enthaltene Vitamin B₁₂ und die Omega-3-Fettsäuren, die bei einer rein pflanzlichen Ernährung kritische Nährstoffe darstellen (Klug et al., 2024), machen sie insbesondere auch für die vegan lebende Bevölkerungsgruppe als alternative Proteinquelle relevant.

6 Schlussfolgerung

Die vorliegende Arbeit konnte die Zielstellung, eine Bewertung der physiologischen Proteinqualität von 10 ausgewählten pflanzlichen und mikrobiellen Proteinquellen anhand des DIAAS beziehungsweise PDCAAS, ergänzt durch deren technologisches Anwendungspotenzial, erreichen.

Aus den erfassten DIAAS (Referenzprotein >3 J.) lässt sich für die gesunde erwachsene Allgemeinbevölkerung für Soja im Mittel eine „hochwertige“ Proteinqualität (≥ 100) feststellen. Raps, Erbse und Kichererbse fallen in die Kategorie einer „guten“ Proteinquelle (75-99), während die mittleren DIAAS für Lupine, Ackerbohne und Linse keine Qualitätsaussage zulassen (<75). Letztere müssen für eine vollständige Bedarfsdeckung an unentbehrlichen AS durch sich ergänzende Proteinkombinationen oder angepasste Verarbeitungsmethoden (z.B. einer Fermentation) in ihrer Aminosäurezusammensetzung und Verdaulichkeit gesteigert werden. Aufgrund der heterogenen Studienlage sollte

zukünftige Forschung gezielt Proteinisolate und -konzentrate von Hülsenfrüchten mit bisher kleiner Datenbasis (wie z.B. Lupine, Linse, Ackerbohne, Kichererbse) untersuchen und die Auswirkungen angepasster technologischer Verarbeitungsmethoden auf die Proteinqualität evaluieren.

Aus den erfassten PDCAAS (Referenzprotein >3 J. bzw. 2-5 J.) lässt sich für die gesunde erwachsene Allgemeinbevölkerung für Mykoprotein aus *F. venenatum* (99,6-101) eine „hochwertige“ Proteinqualität (≥ 100) ableiten, während die Mikroalgen *Spirulina* (*Arthrospira* sp.) und *Chlorella* (*C. vulgaris*, *C. sorokiniana*) insgesamt niedrigere Proteinqualitätswerte (63-84) zeigen. Die Daten bei den Mikroalgen deuten darauf hin, dass ein Zellwandaufbruch die Proteinqualität weiter verbessern kann. Angesichts der geringen Studienlage und der methodischen Einschränkungen des PDCAAS sollten diese Befunde jedoch durch weitere In-Vivo-Studien, idealerweise zur ilealen Verdaulichkeit und DIAAS, validiert werden.

Aus technologischer Sicht weisen Soja und Erbse derzeit die größte Anwendungsbreite auf, aber auch weitere Hülsenfrüchte (Lupine, Ackerbohne, Linse, Kichererbse) sowie Ölsaatenproteine aus Nebenströmen (z.B. Rapsprotein) haben das technologische Potenzial in Zukunft stärker für die menschliche Ernährung genutzt zu werden. Unter den mikrobiellen Proteinen zeigen Mykoproteine aktuell das größte Anwendungspotential, insbesondere für Fleischersatz. Mikroalgen weisen vielversprechende Schaum- und Emulgierereigenschaften auf, jedoch sind aktuelle Anwendungen begrenzt, sodass noch keine gesicherte Aussage möglich ist.

Die vorliegenden Ergebnisse der Literaturrecherche und des Experteninterviews zeigen, dass es sich lohnt, die hier betrachteten pflanzlichen und mikrobiellen Proteine als alternative Proteinquellen für Deutschland weiterzuverfolgen. Nach wie vor können pflanzliche Proteine, aufgrund des weiter fortgeschrittenen Forschungs- und Entwicklungsstands sowie rechtlicher Vorteile, voraussichtlich den größten Beitrag zur Proteinversorgung der erwachsenen Allgemeinbevölkerung in Deutschland unter den alternativen Proteinquellen leisten.

Um in Zukunft eine gesundheitsförderliche und bedarfsdeckende Proteinversorgung alternativ zu konventionell tierischen Proteinen sicherzustellen, muss ein Gleichgewicht zwischen nachhaltigen, technologischen, sensorischen und ernährungsphysiologischen Qualitätsaspekten bei der Auswahl geeigneter alternativer Proteine berücksichtigt werden.

Die Ergebnisse dieser Arbeit können Fachleuten aus der Produktentwicklung bei der Beurteilung pflanzlicher und mikrobieller Proteine hinsichtlich ihrer Eignung als Ersatzbasis für ernährungsphysiologisch hochwertige Produkte dienen. Des Weiteren können Sie im Rahmen des Vernetzungsprojektes „PIONEER – Das Netzwerk für alternative Proteinquellen in der Humanernährung“ der Deutschen Landwirtschaftsgesellschaft (DLG), der Hochschule für Angewandte Wissenschaften (HAW) und der Food-Processing Initiative (FPI) als datenbasierte Übersicht und Argumentationsgrundlage für zukünftige Forschungsarbeiten und Kooperationen im Netzwerk dienen.

7 Literaturverzeichnis

- Adhikari, S., Schop, M., de Boer, I. J. M., & Huppertz, T. (2022). Protein Quality in Perspective: A Review of Protein Quality Metrics and Their Applications. *Nutrients*, 14(5).
<https://doi.org/10.3390/nu14050947>
- Amoneit, M., Gellrich, L., & Weckowska, D. M. (2025). Consumer Acceptance of Alternative Proteins: Exploring Determinants of the Consumer Willingness to Buy in Germany. *Foods*, 14(14). <https://doi.org/10.3390/foods14142427>
- Arndt, K., & Albers, T. (2001). *Handbuch Protein und Aminosäuren* (1. Aufl). Arnsberg: Novagetrics.
- Azizi, R., Baggio, A., Capuano, E., & Pellegrini, N. (2024). Protein transition: Focus on protein quality in sustainable alternative sources. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 3401-3421. <https://doi.org/10.1080/10408398.2024.2365339>
- Bailey, H. M., Fanelli, N. S., & Stein, H. H. (2023). Effect of heat treatment on protein quality of rapeseed protein isolate compared with non-heated rapeseed isolate, soy and whey protein isolates, and rice and pea protein concentrates. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 103(14), 7251–7259. <https://doi.org/10.1002/jsfa.12809>
- Bailey, H. M., Mathai, J. K., Berg, E. P., & Stein, H. H. (2020). Most meat products have digestible indispensable amino acid scores that are greater than 100, but processing may increase or reduce protein quality. *British Journal of Nutrition*, 124(1), 14–22.
<https://doi.org/10.1017/S0007114520000641>
- Biedermann, S. (2019). *Positionspapier: Alternative Proteinquellen für die Human- und Tierernährung in der Bundesrepublik Deutschland*. Verband für Alternative Proteinquellen e.V. (BALPro) (Hrsg.). Hannover.
- Biesalski, H. K., Grimm, P., & Nowitzki-Grimm, S. (2020). *Taschenatlas Ernährung* (8., vollständig überarbeitete Auflage). Stuttgart: Thieme.
- BLE. Bundesanstalt für Landwirtschaft & Ernährung. (2024, September 25). *Alternative Proteine aus heimischen Hülsenfrüchten für die Humanernährung*. Bundesinformationszentrum Landwirtschaft. <https://www.praxis-agrar.de/pflanze/ackerbau/kulturpflanzenvielfalt-und-fruchtfolge/alternative-proteine-aus-heimischen-huelsenfruechten-fuer-die-humanernaehrung>
- BMEL. Bundesministerium für Ernährung & Landwirtschaft. (2024). *Deutschland, wie es isst. Der BMEL-Ernährungsreport 2024*.
- BMEL, & BLE. (2020). *Ackerbohne, Erbse & Co. Die Eiweißpflanzenstrategie des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft zur Förderung des Leguminosenanbaus in Deutschland*.

- Burgos-Díaz, C., Opazo-Navarrete, M., Wandersleben, T., Soto-Añual, M., Barahona, T., & Bustamante, M. (2019). Chemical and Nutritional Evaluation of Protein-Rich Ingredients Obtained through a Technological Process from Yellow Lupin Seeds (*Lupinus luteus*). *Plant Foods for Human Nutrition*, 74(4), 508–517. <https://doi.org/10.1007/s11130-019-00768-0>
- Cargo-Froom, C. L., Tansil, F., Columbus, D. A., Marinangeli, C. P. F., Kiarie, E. G., & Shoveller, A. K. (2023). Determination of standardized ileal digestibility of crude protein and amino acids and digestible indispensable amino acid score of faba beans, lentils, and yellow peas fed to growing pigs. *Canadian Journal of Animal Science*, 103(3), 273–281. <https://doi.org/10.1139/cjas-2023-0022>
- Cedeno, F. R. P., Olubiyo, O. J., & Ferreira, S. (2025). From microbial proteins to cultivated meat for alternative meat-like products: A review on sustainable fermentation approaches. *Journal of Biological Engineering*, 19(1), 44. <https://doi.org/10.1186/s13036-025-00509-9>
- Cheriaparambil, R., & Grossmann, L. (2025). Properties and Cultivation of *Fusarium* spp. To Produce Mycoprotein as an Alternative Protein Source. *Sustainable Food Proteins*, 3(1). <https://doi.org/10.1002/sfp2.70002>
- Daniel, H. (2021). Wie alternativlos sind alternative Proteine? *Ernährungs Umschau*, 68(5), M288–M291.
- DGE. (2017). *Referenzwert: Protein*. <http://www.dge.de/wissenschaft/referenzwerte/protein/>
- DGE. (2021, Januar). *Ausgewählte Fragen und Antworten zu Protein und unentbehrliche Aminosäuren*. <http://www.dge.de/gesunde-ernaehrung/faq/ausgewaelhte-fragen-und-antworten-zu-protein-und-unentbehrlichen-aminosaehren/>
- DGE. Deutsche Gesellschaft für Ernährung. (2024). 15. *DGE-Ernährungsbericht*. Bonn.
- EABA. European Algae Biomass Association. (2024, Februar 6). *EU Novel Food State-of-the-art: 10 years later*. <https://www.eaba-association.org/en/resources>
- Edwards, D. G., & Cummings, J. H. (2010). The protein quality of mycoprotein. *Proceedings of the Nutrition Society*, 69(OCE4), E331. <https://doi.org/10.1017/S0029665110001400>
- Elmadfa, I., & Leitzmann, C. (2023). *Ernährung des Menschen* (7. Auflage). Stuttgart: utb GmbH.
- ENOUGH. (2025). *ENOUGH - delicious, nutritious, sustainable. Home*. <https://www.enough-food.com>
- Erbersdobler, H. F., Barth, C. A., & Jahreis, G. (2017). Körnerleguminosen in der Humanernährung. Nährstoffgehalt und Proteinqualität von Hülsenfrüchten. *Ernährungs Umschau*, 64(9), 134–139. <https://doi.org/10.4455/eu.2017.034>
- Europäisches Parlament. (2023). P9_TA(2023)0375. *European protein strategy. European Parliament resolution of 19 October 2023 European protein strategy (2023/2015(INI))*.

- European Commission. (2025, Juni 1). *Food and Feed Information Portal Database, EU Novel Food status Catalogue*. <https://ec.europa.eu/food/food-feed-portal/screen/novel-food-catalogue/search>
- Fanelli, N. S., Martins, J. C. F. R., & Stein, H. H. (2024). The digestible indispensable amino acid score (DIAAS) in eggs and egg-containing breakfast meals is greater than in toast breads or hash browns served without eggs. *Journal of Nutritional Science*, 13. <https://doi.org/10.1017/jns.2024.71>
- FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2013). *Dietary protein quality evaluation in human nutrition: Report of an FAO Expert Consultation*. FAO Food and Nutrition Paper 92. Rome.
- FAO, & IAEA. (2024). *Development of a protein database and the way forward for reviewing protein requirements. Report of a joint FAO/IAEA technical meeting in Vienna, 10–13 October 2022*. <https://doi.org/10.4060/cd1021en>
- FAO & WHO. (1991). *Protein Quality Evaluation. Report of Joint FAO/WHO Expert Consultation, Bethesda (USA), 4-8 Dec 1989*. FAO Food and Nutrition Paper, 51. Rome.
- FAO, & WHO. (2007). *Protein and Amino Acid Requirements in Human Nutrition: Report of a Joint WHO/FAO/UNU Expert Consultation*. World Health Organization Technical Report Series, 935. Geneva.
- Fraunhofer IVV. Institut für Verfahrenstechnik und Verpackung. (2020). *Mykoprotein als nachhaltige und gesunde Lebensmittelzutat. Forschungsprojekt FUNGITIME*. <https://www.ivv.fraunhofer.de/de/lebensmittel/pflanzliche-proteine/fungitime.html>
- GFI Europe. (2023). *Alternative Proteine in Deutschland: Report zu aktuellen Entwicklungen rund um nachhaltige Proteinquellen auf Basis von Pflanzen, Zellkultivierung und Fermentation*. State of the Industry Report Deutschland 2022.
- GFI Europe. (2025a). *2022—2024: Entwicklung des Marktes für pflanzenbasierte Lebensmittel im deutschen Einzelhandel. Fleisch, Fisch und Meeresfrüchte, Milch und Milchgetränke, Käse, Joghurt und Sahne*.
- GFI Europe. (2025b). *The science of fermentation*. <https://gfi.org/science/the-science-of-fermentation/>
- GFI Europe. (2025c, April 30). *Investitionen in alternative Proteine ziehen in Europa wieder an, allerdings braucht es auch neue Finanzierungsmodelle*. <https://gfieurope.org/de/blog/investitionen-in-alternative-proteine-ziehen-in-europa-wieder-an-allerdings-braucht-es-auch-neue-finanzierungsmodelle/>
- Guillin, F. M., Gaudichon, C., Guérin-Deremaux, L., Lefranc-Millot, C., Airinei, G., Khodorova, N., Benamouzig, R., Pomport, P.-H., Martin, J., & Calvez, J. (2022). Real ileal amino acid digestibility of pea protein compared to casein in healthy humans: A randomized trial. *The*

- American Journal of Clinical Nutrition*, 115(2), 353–363.
<https://doi.org/10.1093/ajcn/nqab354>
- Guo, X., Wang, Q., Wu, Y., Liu, X., & Gong, Z. (2024). Comprehensive insights into microalgae proteins: Nutritional profiles and innovative applications as sustainable alternative proteins in health and food sciences. *Food Hydrocolloids*, 154.
<https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2024.110112>
- Haas, A. (2025). *Alternative Proteine: Übersicht der verfügbaren Technologien zur Herstellung alternativer Proteine für Milchprodukte und Bewertung der technologischen Reife (Bachelorarbeit)*. <https://hdl.handle.net/20.500.12738/17279>
- Han, F., Moughan, P. J., Li, J., & Pang, S. (2020). Digestible Indispensable Amino Acid Scores (DIAAS) of Six Cooked Chinese Pulses. *Nutrients*, 12(12).
<https://doi.org/10.3390/nu12123831>
- Herreman, L., Nommensen, P., Pennings, B., & Laus, M. C. (2020). Comprehensive overview of the quality of plant- And animal-sourced proteins based on the digestible indispensable amino acid score. *Food Science & Nutrition*, 8(10), 5379–5391.
<https://doi.org/10.1002/fsn3.1809>
- Hodgkinson, S. M. (2024). Protein and amino acid digestibility: Definitions and conventional oro-ileal determination in humans. *Frontiers in Nutrition*, 11.
<https://doi.org/10.3389/fnut.2024.1407604>
- Hodgkinson, S. M., Stroebinger, N., van der Wielen, N., Mensink, M., Montoya, C., Hendriks, W. H., de Vries, S., Stein, H. H., & Moughan, P. J. (2022). Comparison of True Ileal Amino Acid Digestibility between Adult Humans and Growing Pigs. *The Journal of Nutrition*, 152(7), 1635–1646. <https://doi.org/10.1093/jn/nxac077>
- Itkonen, S. T., Calvez, J., Airinei, G., Chapelais, M., Khodorova, N., Sahaka, M., Benamouzig, R., Stoddard, F. L., Simojoki, A., Pajari, A.-M., & Gaudichon, C. (2024). True Ileal Amino Acid Digestibility and Protein Quality of 15N-Labeled Faba Bean in Healthy Humans. *The Journal of Nutrition*, 154(4), 1165–1174. <https://doi.org/10.1016/j.tjnut.2024.01.030>
- Kapel, R., Niquet-Léridon, C., Tessier, F., Messin, J.-L., Buffière, C., Hafnaoui, N., Migné, C., Houinsou-Houssou, B., Riaublanc, A., Solé, V., & Rémond, D. (2025). True ileal amino acid digestibility and digestible amino acid scores (DIAASs) of the cruciferin and napin fractions of rapeseed: Impact of processing. *Food Chemistry*, 474.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.143161>
- KERN. Kompetenzzentrum für Ernährung. (2022, Januar). *Zukunft Ernährung. Alternative Proteinquellen. Literaturstudie zum aktuellen Forschungsstand*.
- KERN, & StMELF. (2022). *Fact-Sheet: Alternative Proteinquellen – Eine Bestandsaufnahme*.
<https://www.kern.bayern.de/recherche/312473/index.php>

- Klug, A., Barbaresco, J., Alexy, U., Kühn, T., Kroke, A., Lotze-Campen, H., Nöthlings, U., Richter, M., Christian, S., Schlesinger, S., Virmani, K., Conrad, J., Watzl, B., & Deutsche Gesellschaft für Ernährung e. V. (DGE). (2024). Update of the DGE position on vegan diet – position statement of the German Nutrition Society (DGE). *Ernährungs Umschau*, 71(7), 60–85. <https://doi.org/10.4455/eu.2024.22>
- Kotecka-Majchrzak, K., Sumara, A., Fornal, E., & Montowska, M. (2020). Oilseed proteins – Properties and application as a food ingredient. *Trends in Food Science & Technology*, 106, 160–170. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.10.004>
- Landeta-Salgado, C., Munizaga, J., González-Troncoso, M. P., Daza-Sanchez, A., Martínez, I., & Lienqueo, M. E. (2025). In Vitro Bioaccessibility of Edible Seaweed Proteins from the Chilean Coast and Proteins from the Novel Seaweed-Derived Mycoprotein. *Molecules*, 30(1). <https://doi.org/10.3390/molecules30010165>
- Ma, J., Sun, Y., Meng, D., Zhou, Z., Zhang, Y., & Yang, R. (2023). Yeast proteins: The novel and sustainable alternative protein in food applications. *Trends in Food Science & Technology*, 135, 190–201. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.04.003>
- Majumder, R., Miatur, S., Saha, A., & Hossain, S. (2024). Mycoprotein: Production and nutritional aspects: a review. *Sustainable Food Technology*, 2(1), 81–91. <https://doi.org/10.1039/d3fb00169e>
- Marlow Foods. (2025). *Diet & Ingredients FAQs*. Quorn. <https://www.quorn.co.uk/faqs/diet-ingredients#faqs>
- Matissek, R., & Hahn, A. (2023). *Lebensmittelchemie* (10. Aufl.). Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum.
- Max Rubner-Institut. (2008). *Ergebnisbericht, Teil 2 Nationale Verzehrsstudie II*.
- Miller, S. A., & Dwyer, J. T. (2001). Evaluating the safety and nutritional value of mycoprotein. *Food Technology (Chicago)*, 55(7), 42–47.
- Moughan, P. J., & Lim, W. X. J. (2024). Digestible indispensable amino acid score (DIAAS): 10 years on. *Frontiers in Nutrition*, 11. <https://doi.org/10.3389/fnut.2024.1389719>
- National Library of Medicine. (2025, Juli 13). *About: PubMed Overview*. PubMed. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/about/>
- Oh, J., Park, N., & Kim, B. G. (2025). Determination of Digestible Indispensable Amino Acid Scores for Plant Proteins and Skim Milk Powder Measured in Pigs. *Animals*, 15(5). <https://doi.org/10.3390/ani15050650>
- Pfeuffer, M., Erbersdobler, H. F., & Jahreis, G. (2019). *Hülsenfrüchte in der Humanernährung—Gesundheitliche Aspekte*. Union zur Förderung von Öl- und Proteinpflanzen e.V. (Hrsg.).
- PIONEER-Netzwerk. (2025). *Aktuelle Forschungsprojekte im Netzwerk PIONEER: Innovative Produkte und Verfahren für fermentierte Proteine*. Netzwerk Alternative Proteine in der Humanernährung. <https://pioneer-netzwerk.de/de/projekte>

- Poore, J., & Nemecek, T. (2018). Reducing food's environmental impacts through producers and consumers. *Science*, 360(6392), 987–992. <https://doi.org/10.1126/science.aag0216>
- Quack, D., Wunder, S., Jägle, J., & Meier, J. (2023). *Entwicklung von politischen Handlungsansätzen für die Unterstützung stärker pflanzenbasierter Ernährungsweisen Teilbericht (AP3) des Projekts „Nachhaltiges Wirtschaften: Sozialökologische Transformation des Ernährungssystems (STErn)“*. Umweltbundesamt (Hrsg.).
- Reynaud, Y., Buffière, C., Cohade, B., Vauris, M., Liebermann, K., Hafnaoui, N., Lopez, M., Souchon, I., Dupont, D., & Rémond, D. (2021). True ileal amino acid digestibility and digestible indispensable amino acid scores (DIAASs) of plant-based protein foods. *Food Chemistry*, 338. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128020>
- Rutherford, S. M., Bains, K., & Moughan, P. J. (2012). Available lysine and digestible amino acid contents of proteinaceous foods of India. *British Journal of Nutrition*, 108(S2), 59–68. <https://doi.org/10.1017/s0007114512002280>
- Schaafsma, G. (2000). The Protein Digestibility–Corrected Amino Acid Score. *The Journal of Nutrition*, 130(7), 1865–1867. <https://doi.org/10.1093/jn/130.7.1865S>
- Shaheen, N., Islam, S., Munmun, S., Mohiduzzaman, Md., & Longvah, T. (2016). Amino acid profiles and digestible indispensable amino acid scores of proteins from the prioritized key foods in Bangladesh. *Food Chemistry*, 213, 83–89. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.06.057>
- Stroebling, N., Hodgkinson, S. M., & Moughan, P. J. (2024). Pig True Ileal Digestible Amino Acid Contents of Individual Ingredients are Additive in Mixed Meals and Allow Accurate Predictions of Digestible Indispensable Amino Acid Score Values. *The Journal of Nutrition*, 154(11), 3323–3330. <https://doi.org/10.1016/j.tjnut.2024.09.020>
- Tessier, R., Calvez, J., Airinei, G., Khodorova, N., Dauguet, S., Galet, O., Chapelais, M., Tomé, D., Benamouzig, R., & Gaudichon, C. (2023). Digestive and metabolic bioavailability in healthy humans of 15N-labeled rapeseed and flaxseed protein incorporated in biscuits. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 117(5), 896–902. <https://doi.org/10.1016/j.ajcnut.2023.02.020>
- Tessier, R., Calvez, J., Khodorova, N., & Gaudichon, C. (2021). Protein and amino acid digestibility of 15N Spirulina in rats. *European Journal of Nutrition*, 60(4), 2263–2269. <https://doi.org/10.1007/s00394-020-02368-0>
- UFOP. Union zur Förderung von Öl- und Proteinpflanzen e.V. (2025). *Raps in der Ernährung*. <https://www.ufop.de/ernaehrung/rapsoel/raps-ernaehrung/>
- van den Berg, L. A., Mes, J. J., Mensink, M., & Wanders, A. J. (2022). Protein quality of soy and the effect of processing: A quantitative review. *Frontiers in Nutrition*, 9. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.1004754>

- Volk, C., Brandsch, C., Schlegelmilch, U., Wensch-Dorendorf, M., Hirche, F., Simm, A., Gargum, O., Wiacek, C., Braun, P. G., Kopp, J. F., Schwerdtle, T., Treede, H., & Stangl, G. I. (2020). Postprandial Metabolic Response to Rapeseed Protein in Healthy Subjects. *Nutrients*, 12(8). <https://doi.org/10.3390/nu12082270>
- Wanders, A. J., Heerschop, S. N., Biesbroek, S., & Dötsch-Klerk, M. (2025). Replacing Animal Meat with Plant-Based Meat Alternatives: The Impact of Protein Quality on Protein Adequacy in the Dutch Diet. *Current Developments in Nutrition*, 9(3). <https://doi.org/10.1016/j.cdnut.2025.104562>
- Wang, Y., Tibbetts, S. M., Berrue, F., McGinn, P. J., MacQuarrie, S. P., Puttaswamy, A., Patelakis, S., Schmidt, D., Melanson, R., & MacKenzie, S. E. (2020). A Rat Study to Evaluate the Protein Quality of Three Green Microalgal Species and the Impact of Mechanical Cell Wall Disruption. *Foods*, 9(11). <https://doi.org/10.3390/foods9111531>
- WBAE. (2020). *Politik für eine nachhaltigere Ernährung: Eine integrierte Ernährungspolitik entwickeln und faire Ernährungsumgebungen gestalten. WBAE-Gutachten*. Wissenschaftlicher Beirat für Agrarpolitik, Ernährung und gesundheitlichen Verbraucherschutz beim BMEL (Hrsg.).
- Williamson, E., Ross, I. L., Wall, B. T., & Hankamer, B. (2024). Microalgae: Potential novel protein for sustainable human nutrition. *Trends in Plant Science*, 29(3), 370–382. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2023.08.006>
- Xian, Y., Yin, L., Wu, Z., Chen, D., Sun, Z., Jiang, X., & Tian, L. (2025). Characterization and preliminary safety evaluation of mycoprotein from *Fusarium compactum* MM-135. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 9. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2025.1583642>

8 Rechtsquellenverzeichnis

Verordnung (EU) 2015/2283 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 25. November 2015 über neuartige Lebensmittel, zur Änderung der Verordnung (EU) Nr. 1169/2011 des Europäischen Parlaments und des Rates und zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 258/97 des Europäischen Parlaments und des Rates und der Verordnung (EG) Nr. 1852/2001 der Kommission (Text von Bedeutung für den EWR)

Anhang

Anhang A: Empfohlene Referenzproteinmuster für die Berechnung des DIAAS und PDCAAS

Tabelle 7: Empfohlene Referenzproteinmuster für DIAAS Berechnungen für unentbehrliche AS (in mg/g Protein) für verschiedene Altersgruppen, eigene Darstellung, modifiziert nach (FAO, 2013, S. 38)

Altersgruppe	Alter (Jahre)	His	Ile	Leu	Lys	SAA*	AAA**	Thr	Trp	Val
<i>Säuglinge</i>	0 – 0,5	21	55	96	69	33	94	44	17	55
<i>Kleinkinder</i>	0,5 – 3	20	32	66	57	27	52	31	8,5	43
<i>Ältere Kinder, Jugendliche und Erwachsene</i>	>3	16	30	61	48	23	41	25	6,6	40

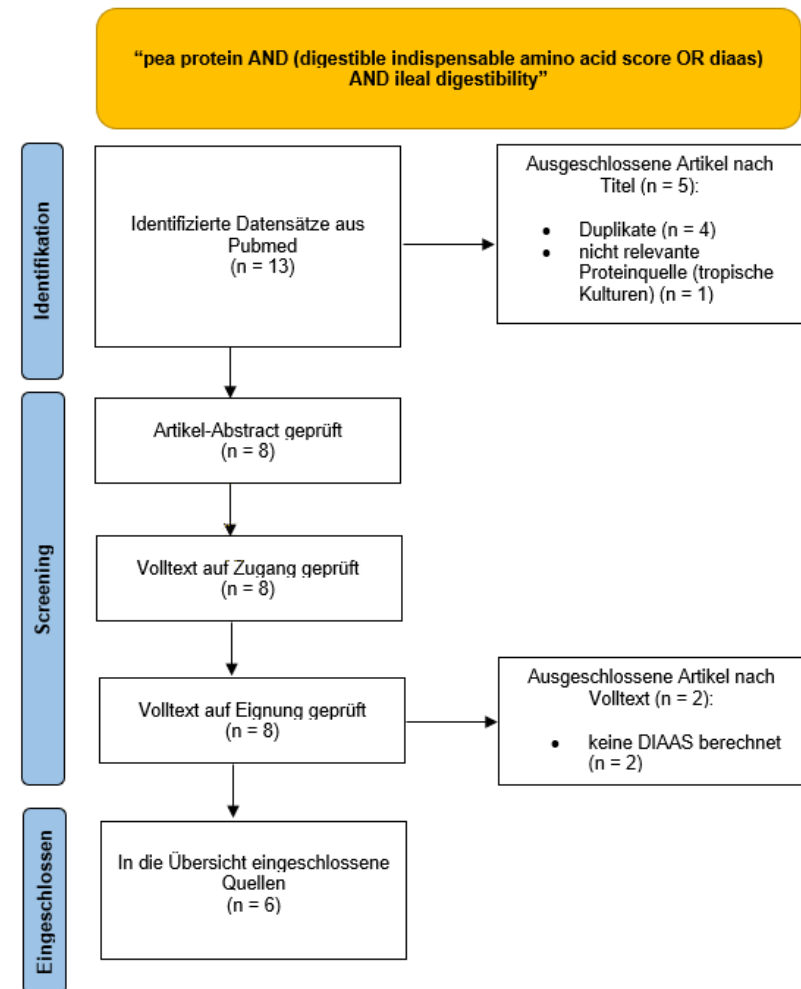
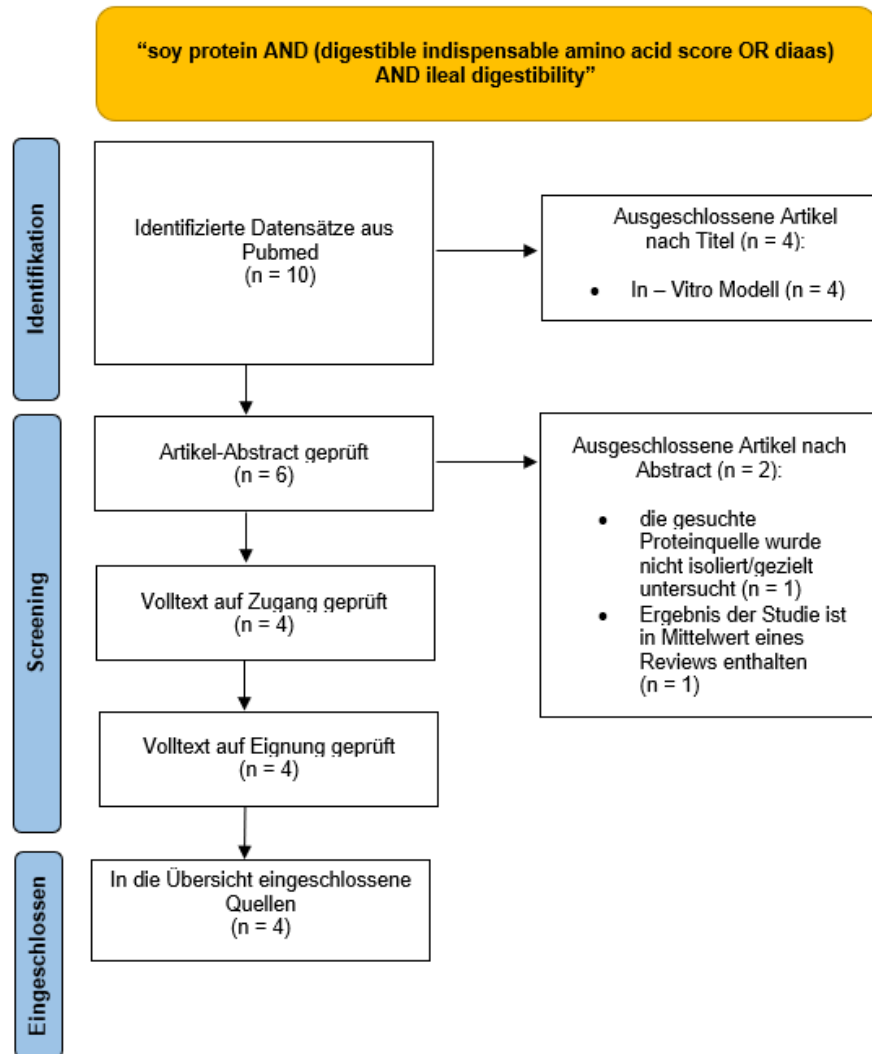
*schwefelhaltige AS (Met + Cys); **aromatische AS (Phe + Tyr)

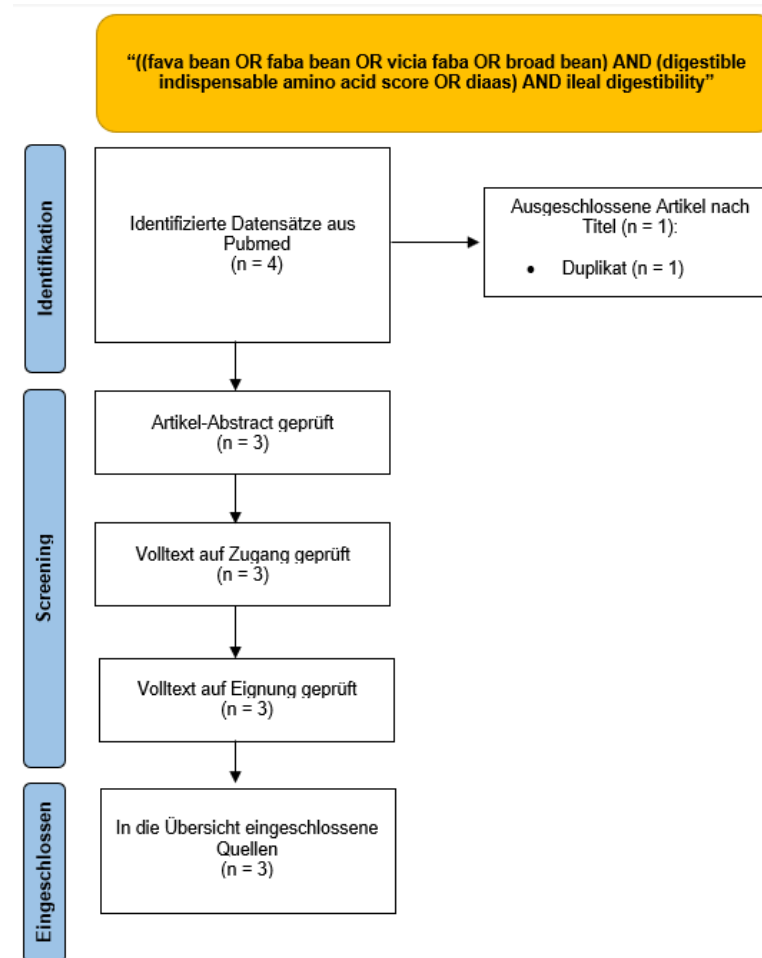
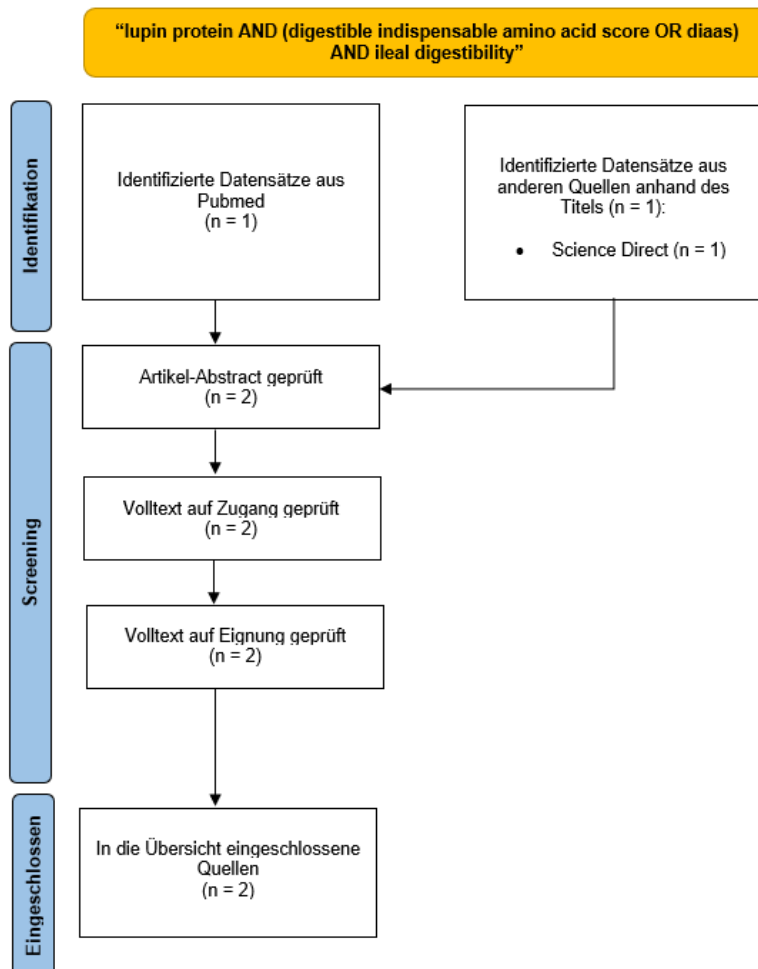
Tabelle 8: Empfohlene Referenzproteinmuster für PDCAAS Berechnungen für unentbehrliche AS (in mg/g Protein) für verschiedene Altersgruppen, eigene Darstellung modifiziert nach (FAO & WHO, 1991, S. 23)

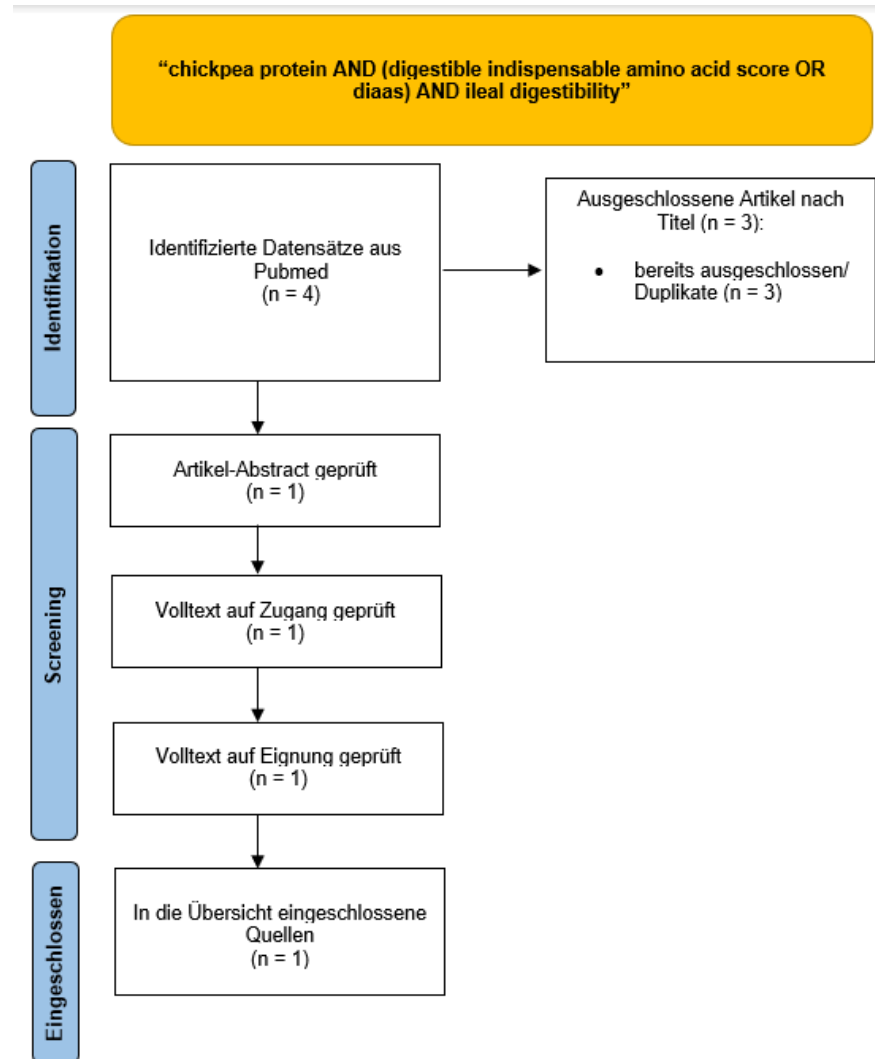
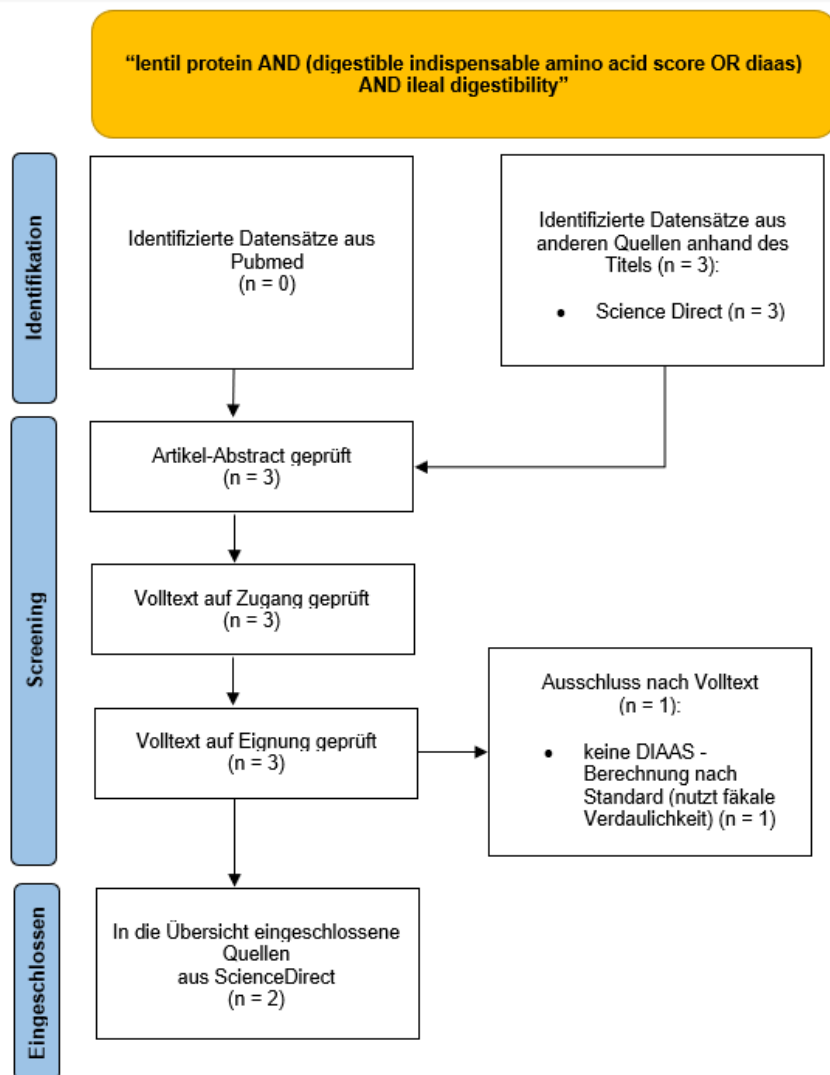
Altersgruppe	Alter (Jahre)	His	Ile	Leu	Lys	SAA*	AAA**	Thr	Trp	Val
<i>Vorschulkind</i>	2-5 Jahre	19	66	28	58	25	63	34	11	35
<i>Schulkind</i>	10-12 Jahre	19	44	28	44	22	22	28	9	25
<i>Erwachsene/r</i>		16	19	13	16	17	19	9	5	13

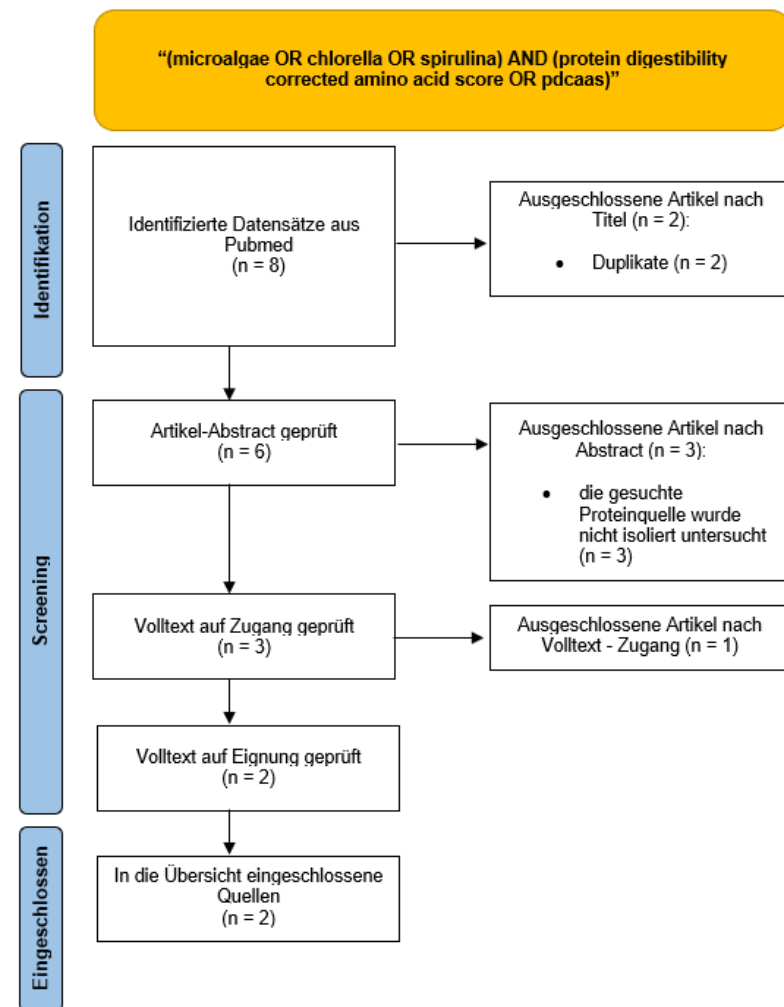
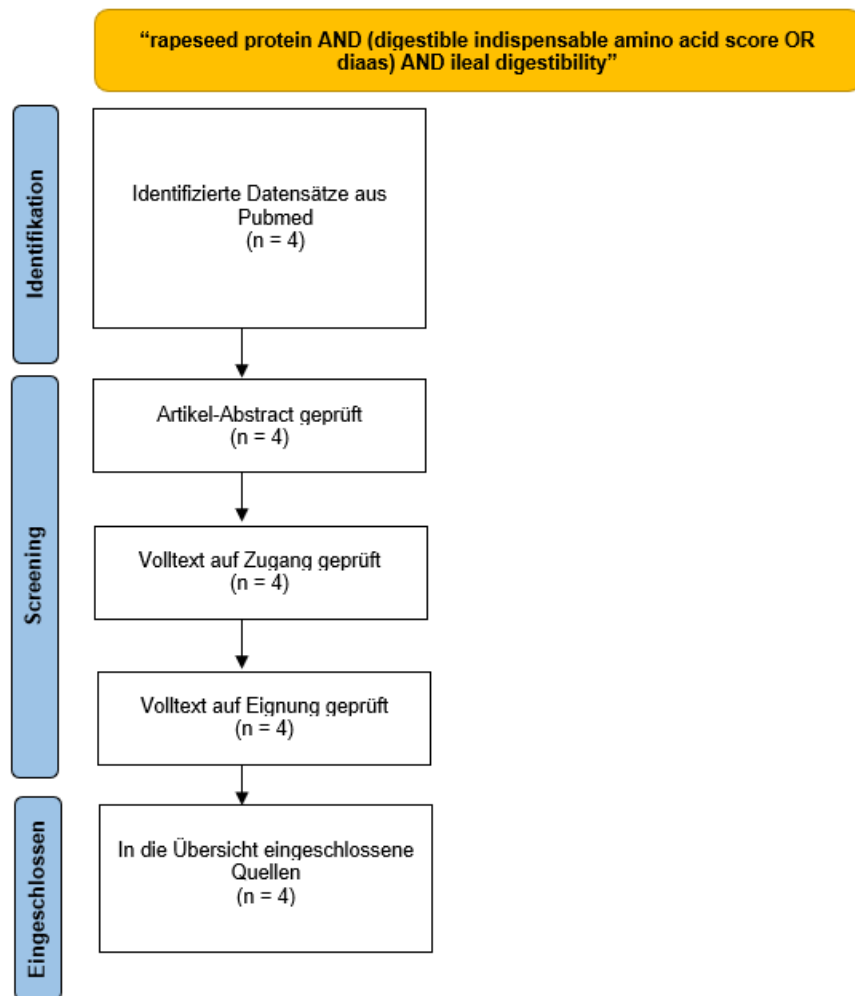
*schwefelhaltige AS (Met + Cys); **aromatische AS (Phe + Tyr)

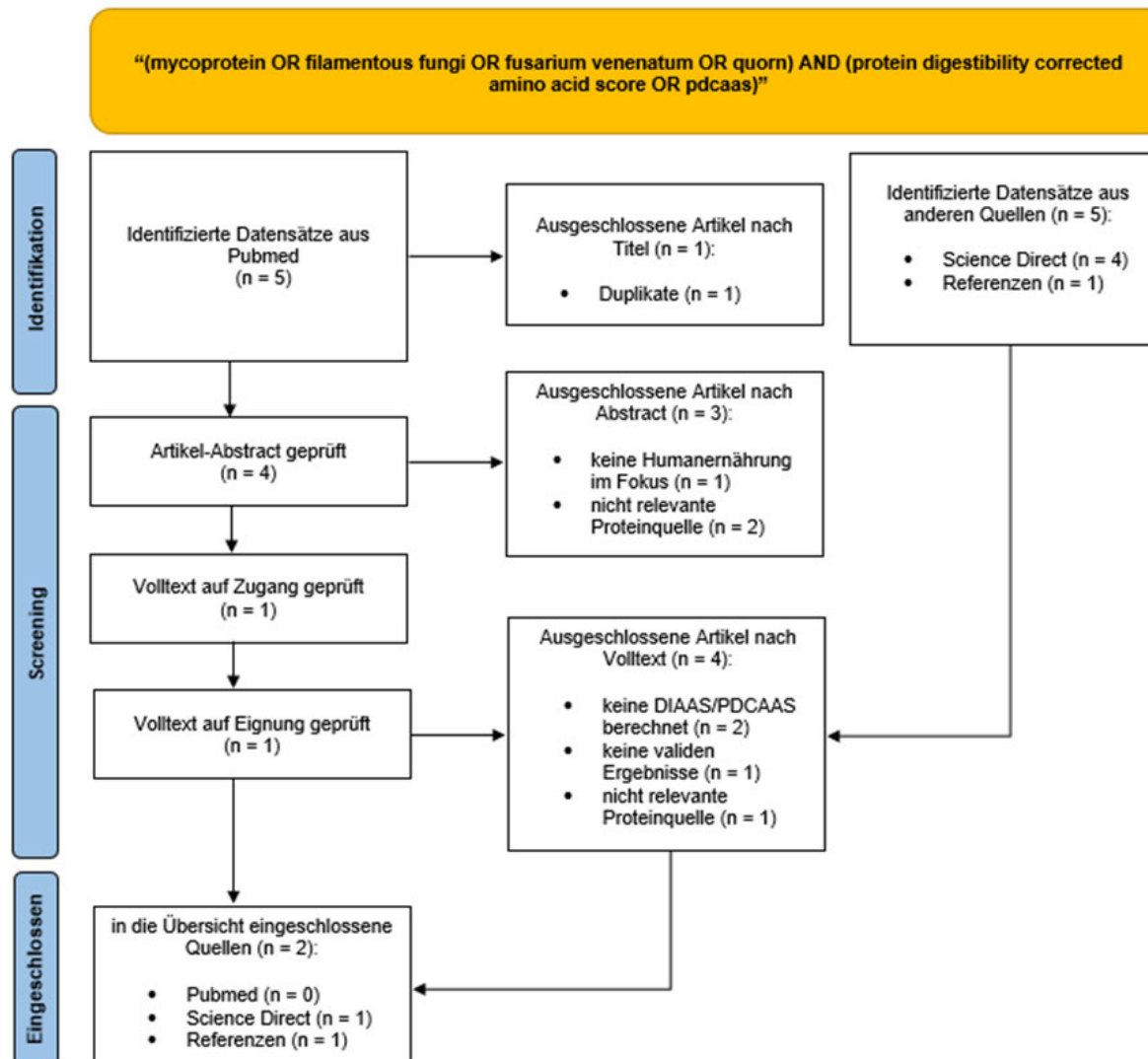
Anhang B: PRISMA – Flow Charts nach einzelnen Proteinquellen











Anhang C: Tabellarische Übersicht der Ergebnisse der pflanzlichen Proteine

Tabelle 9: Tabellarische Übersicht der erfassten Studienergebnisse von Ölsaaten und Hülsenfrüchten, inklusive Rohstoff, Verarbeitungsgrad, DIAAS (%) (>3 Jahre), der ersten limitierenden AS, dem Studienmodell, der Proteinverdaulichkeit (%) und der Referenzen, eigene Darstellung

Rohstoff-Kategorie	Rohstoff	Verarbeitungsgrad	DIAAS in % (>3 Jahre)	Erste limitierende AS (IAA _(lim))	Studienmodell	Proteinverdaulichkeit (in %) der IAA _(lim)	Referenz
Ölsaaten	Soja	Mehl, Isolat, Konzentrat (verschieden nachbehandelt)	103 ^a (n = 43)	/	Schwein	SID (n.b.)	(Herreman et al., 2020)
		Isolat	87	SAA	Schwein	SID 94*	(Oh et al., 2025)
		Isolat	97	SAA	Schwein	SID 95*	(Bailey et al., 2023)
		Tofu	97	SAA	Schwein	TID 86*	(Reynaud et al., 2021)
		Sojamilch	117	/	Schwein	TID (keine IAA _(lim) vorhanden)	
	Raps	Mehl, Presskuchen (Canola-Raps)	85 ^a (n = 26)	Lys	Schwein	SID (n.b.)	(Herreman et al., 2020)
		Mehl, Presskuchen (Raps)	79 ^a (n = 31)	Lys	Schwein	SID (n.b.)	(Herreman et al., 2020)
		Extrahierte Proteinfraction (Napin)	82 - 89 (n = 3)	Leu (n = 2), Ile	Schwein	TID 85* - 89	(Kapel et al., 2025)
		Extrahierte Proteinfraction (Cruciferin)	117	/	Schwein	TID 78*	(Kapel et al., 2025)
		Isolat	83	Leu	Schwein	SID 73	(Bailey et al., 2023)
		Isolat, wärmebehandelt	110	/	Schwein	SID (keine IAA _(lim) vorhanden)	
		Rapskonzentrat (in Keks verarbeitet)	126 ^b	/	Mensch	RID (keine IAA _(lim) vorhanden)	(Tessier et al., 2023)
Hülsenfrüchte	Lupine	n.b.	83 ^a (n = 4)	SAA	Schwein	SID (n.b.)	(Herreman et al., 2020)
		Mehl	71	Val	Schwein	SID 86	(Burgos-Díaz et al., 2019)
		Konzentrat	68	Val	Schwein		
		Isolat	71	Val	Schwein		
	Ackerbohne	Gekocht, geschält, püriert (Püree)	77 ^b	His, Trp	Mensch	TID 85*	(Itkonen et al., 2024)

	gekocht	60	Leu	Schwein	TID 96*	(Han et al., 2020)
	n.b.	64 ^a (n = 3)	SAA	Schwein	SID (n.b.)	(Herreman et al., 2020)
Erbse	Konzentrat	69	SAA	Schwein	SID 90	(Oh et al., 2025)
	Konzentrat	70	SAA	Schwein	SID 88*	(Bailey et al., 2023)
	Emulsion (isolathaltig)	60	SAA	Schwein	TID 80*	(Reynaud et al., 2021)
	Isolat	71*	SAA	Schwein	TID 89*	(Stroebling et al., 2024)
	Isolat, wärmebehandelt	100	SAA	Mensch	RID 94*	(Guillin et al., 2022)
	Mehl, Konzentrat, extrudiert	83 ^a (n = 22)	SAA	Schwein	SID (n.b.)	(Herreman et al., 2020)
Linse	roh	54	SAA	Ratte	TID 93 aus (Rutherford et al., 2012)	(Shaheen et al., 2016)
	dampf-pelletiert	58	Trp	Schwein	SID 61	(Cargo-Froom et al., 2023)
Kichererbse	gekocht	76	Lys	Schwein	TID 88*	(Han et al., 2020)

***Werte gerundet auf ganze Zahlen**

^a Mittelwert basierend auf Berechnung der Autoren der genannten Referenz

^b unter Berücksichtigung des Leguminosen-spezifischen N-zu-Proteinkonversionsfaktor 5,4

SAA = schwefelhaltige Aminosäuren (Met + Cys)

n.b. = nicht berichtet

TID/RID = True/Real Ileal Digestibility (wahre ileale Verdaulichkeit)

SID = Standardized Ileal Digestibility (standardisierte ileale Verdaulichkeit)

Tabelle 10: Exceltabelle mit berechneten Mittelwerten (%), Minimum- und Maximum (%) und der Range (R) aus den dokumentierten DIAAS (Anhang C, Tab.10), blau = tierische Proteinquellen, rot = Ölsaaten, grün = Hülsenfrüchte, eigene Darstellung

Proteinquelle	Datenanzahl n	Einzelwert (%)	Mittelwert (%)	Min (%)	Max (%)	Range (R)
Milchpulver	1	143	/	/	/	/
Ei	1	135	/	/	/	/
Rindfleisch	3	/	116	107	130	23
Soja	5	/	100,2	87	117	30
Raps	9	/	91,3	79	117	38
Kichererbse	1	76	/	/	/	/
Erbse	6	/	75,6	60	100	40
Lupine	4	/	73,3	68	83	15
Ackerbohne	3	/	67	60	77	17
Linse	2	/	56	54	58	4

Anhang D: Tabellarische Übersicht der Ergebnisse der mikrobiellen Proteine

Tabelle 11: Tabellarische Übersicht der erfassten Studienergebnisse von Mykoprotein und Mikroalgen, inklusive Rohstoff, Verarbeitungsgrad, PDCAAS (%), der ersten limitierenden AS, dem Referenzprotein, dem Studienmodell, der Proteinverdaulichkeit (%) und Referenzen, eigene Darstellung

Rohstoffkategorie	Rohstoff	Verarbeitungsgrad	PDCAAS in %	Erste limitierende AS (IAA _{lim})	Referenzprotein (in Jahren)	Studienmodell	Proteinverdaulichkeit (in %) des Rohproteins (CP)	Referenz
Mykoprotein	<i>Fusarium venenatum</i>	Myzel aus <i>Fusarium venenatum</i> (gedämpft, gebacken, frittiert)	99,6	SAA	2 - 5	Mensch (n=5)	TID 86	(Edwards & Cummings, 2010)
Mykoprotein	<i>Fusarium venenatum</i>	Myzel aus <i>Fusarium venenatum</i>	101	Leu	>3	Ratte	TPD 78 aus (Miller & Dwyer, 2001)	(Wanders et al., 2025)
Mikroalgen	<i>Chlorella vulgaris</i>	Intakte Zellwand	63	His	>3	Ratte	TPD 65*	(Wang et al., 2020)
		Zerstörte Zellwand	77	SAA	>3	Ratte	TPD 78*	
Mikroalgen	<i>Chlorella sorokiniana</i>	Intakte Zellwand	64	Ile	>3	Ratte	TPD 59*	
		Zerstörte Zellwand	81	Ile	>3	Ratte	TPD 75*	
Mikroalgen	<i>Arthrospira sp.</i> (Spirulina)	gefriergetrocknet, ultraschallbehandelt	84	His	>3	Ratte	TPD 86	(Tessier et al., 2021)

***Werte gerundet auf ganze Zahlen**
SAA = schwefelhaltige Aminosäuren (Met + Cys)
n.b. = nicht berichtet
TID = True Ileal Digestibility (wahre ileale Verdaulichkeit)
TPD = True Protein Digestibility (wahre fäkale Verdaulichkeit)

Anhang E: Tabellarische Übersicht der ausgewählten tierischen Referenzproteine

Tabelle 12: Tabellarische Übersicht der erfassten tierischen Referenzproteine unter Angabe des Rohstoffs, Verarbeitungsgrades, PDCAAS bzw. DIAAS (%), erste limitierende AS, Referenzprotein, Studienmodell, Proteinverdaulichkeit (%) und Referenzen, eigene Darstellung

Rohstoffkategorie	Rohstoff	Verarbeitungsgrad	PDCAAS in %	DIAAS in %	Erste limitierende AS	Referenzprotein (in Jahren)	Studienmodell	Proteinverdaulichkeit (in %) des Rohproteins (CP) bzw. der IAA _(lim)	Referenz
Fleisch	Rindfleisch	n.b.	92	/	n.b.	2 - 5	Ratte	TPD 98 (CP)	(FAO & WHO, 1991) (Schaafsma, 2000)
	Rindfleisch	Ribeye-Steak, gekocht bei 56°, 64°, 72°	/	107 – 130 (n = 3)	/	>3	Schwein	SID (keine IAA _(lim) vorhanden)	(Bailey et al., 2020)
Ei	Ei	n.b.	118	/	/	2 - 5	Ratte	TPD 98 (CP)	(FAO & WHO, 1991; Schaafsma, 2000)
	Ei	Gekocht	/	135	/	>3	Schwein	SID (keine IAA _(lim) vorhanden)	(Fanelli et al., 2024)
Milch	Kuhmilch	/	121	/	/	2 - 5	Ratte	TPD 95 (CP)	(FAO & WHO, 1991; Schaafsma, 2000)
	Milchpulver	/	/	143	/	>3	Schwein	TID (keine IAA _(lim) vorhanden)	(FAO, 2013)

n.b. = nicht berichtet
TID = True Ileal Digestibility (wahre ileale Verdaulichkeit)
SID = Standardized Ileal Digestibility (standardisierte ileale Verdaulichkeit)
TPD = True Protein Digestibility (wahre fäkale Verdaulichkeit)

Anhang F: Experteninterview – Leitfaden

Lisa Wollensak
Bachelorarbeit Alternative Proteine
Betreuerinnen: Frau Prof. Dr. Riehn, Frau Herbst



Interviewleitfaden

Bitte stellen Sie sich zuerst einmal vor (Name, Titel/Abschluss, Organisation, Aufgabenbereich).

1. Welche Rohstoffe sind derzeit am meisten zur Herstellung von pflanzlichen/mikrobiellen Proteinersatzprodukten vertreten?
2. Welche Rohstoffe, die auch regional verfügbar bzw. kultivierbar wären, sind Ihrer Meinung nach unterrepräsentiert oder noch nicht ausreichend genutzt in Deutschland, hätten aber das technologische Potenzial?
3. Welche Anwendungen finden die genannten Proteinquellen derzeit in pflanzlichen/mikrobiellen Proteinersatzprodukten? Welche Produktkategorien sind dabei besonders vertreten?
4. Nach welchen Kriterien, Anforderungen oder Eigenschaften, werden Rohstoffe i.d.R. für die Produktion von pflanzlichen/mikrobiellen Proteinersatzprodukten ausgewählt?
 - a. Welche Rolle spielt Ihrer Ansicht nach die ernährungsphysiologische Proteinqualität (z.B. DIAAS/PDCAAS) derzeit bei der Wahl der Rohstoffe und Verarbeitungsmethode im Verhältnis zu anderen Qualitätsaspekten, wie der technologischen oder auch sensorischen Qualität?
5. Welche technischen Hürden gibt es zu überwinden, um bisher nicht ausreichend genutzte alternative Proteinquellen, nutzbarer zu machen?
6. Welche technischen Hürden gibt es zu überwinden, um die ernährungsphysiologische Qualität der Endprodukte zu verbessern?
 - a. Proteinqualität
 - b. Ernährungswert allgemein
7. Wie sehen Sie die zukünftige Entwicklung des Marktes für alternative Proteine? Was wird sich Ihrer Meinung nach durchsetzen?
8. Haben Sie noch etwas hinzuzufügen? Habe ich Ihrer Ansicht nach wichtige Aspekte in meinen Fragen bezüglich des Themas vergessen? Wenn ja, welche?

Vielen Dank für Ihre Zeit und wertvollen Einblicke!

Anhang G: Experteninterview – Codiertes Transkript

Interviewpartner*in: Frau Inka Scharf

Datum: 6. Juni 2025 um 17 Uhr

Ort: Microsoft Teams Besprechung

00:00:00-00:36:49

I: Hallo Frau Scharf. Schön, dass wir doch noch einen Termin für das Interview gefunden haben und dass Sie sich Zeit dafür nehmen. Ich hatte Ihnen ja schon den Leitfaden im Voraus zur Orientierung geschickt...ich würde mich zuerst noch mal kurz vorstellen und die Zielstellung dieses Interviews einmal wiederholen. Ich bin Lisa, Studentin der Ökotrophologie in Hamburg und schreibe meine Bachelorarbeit über alternative Proteine, mit Schwerpunkt auf den pflanzlichen und mikrobiellen Proteinen, eben als Alternativen zu konventionellen tierischen Proteinen für die menschliche Ernährung in Deutschland. Ziel meiner Bachelorarbeit ist es im Hinblick auf die ernährungsphysiologische Proteinqualität, sprich Aminosäurezusammensetzung und Verdaulichkeit, die Proteinquellen zu vergleichen und herauszufinden, welche von diesen die potenziell Hochwertigste ist. Und um meine Ergebnisse besser einordnen zu können, in einen praktischen Kontext, soll dieses Interview nun helfen. Im Wesentlichen geht es also um die technologische Nutzbarkeit dieser Proteinquellen. Es kann ja zum Beispiel sein, dass manche Proteinquellen zwar eine gute Proteinqualität haben, aber eben nicht so gut in der Praxis genutzt werden können, also in der technologischen Herstellung. #00:00:26#

E: Gut. Sehr schön. Ich hoffe ich kann Ihnen die richtigen Antworten geben. #00:02:11#

I: Als Erstes...Stellen Sie sich gerne noch einmal vor, wer Sie sind und was Sie machen. #00:02:14#

E: Mein Name ist Inka Scharf, ich bin Lebensmitteltechnologin und arbeite bei der DLG im Fachzentrum Landwirtschaft und Lebensmittel und betreue da ganz speziell den Ausschuss für „Feed and Food“ und beschäftige mich daher mit dem Themengebiet „Alternative Proteine“ sehr intensiv. Ich habe gerade mal den Leitfaden geöffnet, zur Orientierung. #00:02:41#

I: Ja, perfekt. Dann würde ich direkt starten. Pflanzenbasierte Ersatzprodukte nehmen ja derzeit unter den alternativen Proteinen den größten Marktanteil in Deutschland an. Zum Einstieg würde ich gerne die aktuelle Situation einmal beleuchten, das heißt welche Rohstoffe werden aktuell am meisten zur Herstellung von pflanzenbasierten Ersatzprodukten verwendet? #00:03:24#

E: Ich muss gerade einmal gedanklich unterteilen in Milchersatz- und Fleischersatzprodukte. Das sind so die zwei Richtungen. Bei Milchersatz, wobei die Getränke sehr dominant sind, sind es natürlich Hafer, Soja und Mandel, die da stark den Markt beherrschen. Bei den verarbeitenden Produkten, also bei Joghurtsersatz oder Käseersatz, werden Kokos, Soja, Mandel und Cashew vor allem viel verwendet. Und wenn wir mehr in den Fleischbereich denken, sind das dann eher die Erbse, die Ackerbohne, aber

		auch natürlich auch Soja und Weizen, also Seitan. Und man darf nicht vergessen, dass es auch dieses Quorn ist, welches auch mitzubetrachten ist. Das sind so die relevanten Proteinquellen, die derzeit eingesetzt werden. #00:03:51# I: Das Quorn, darf man das zu den pflanzlichen Proteinquellen zählen, das gehört doch eigentlich zu...#00:05:10# E: ...das gehört zu den Mykoproteinen...Ich habe jetzt einfach mal die...Achso, Sie meinen rein die pflanzlichen Proteinquellen...#00:05:16# I: Nein, das passt. Ich hätte auch noch nach den mikrobiellen Proteinen gefragt, da ich beide Gruppen in meiner Bachelorarbeit anschau. Aus der Gruppe der mikrobiellen Proteine, würden Sie dann sagen, dass Mykoproteinen aktuell die relevantesten Proteine darstellen? #00:05:17#
Herausforderungen		E: Ja. Das sind die, die sich derzeit stark entwickeln aus den Mikrobiellen, denn die anderen werden gerade erst erforscht, in Pilotanlagen oder in Forschungsanlagen...die sind somit noch nicht zugelassen. Oder, was man immer so ein bisschen aus den Augen verliert, sind eigentlich auch die Algen, die auch schon intensiv produziert werden, aber noch nicht so im Einsatz sind bei Lebensmitteln...Ernährungsergänzung ja, aber nicht direkt in Lebensmitteln. #00:05:28#
Anwendungsmöglichkeiten		I: Die Mikroalgen jetzt in dem Fall, oder? #00:06:27#
Anwendungsmöglichkeiten		E: Genau die Mikroalgen. Es gibt auch Beispiele von Makroalgen, aber die sind alle so im Start-Up-Bereich. #00:06:29# I: Dann würden wir schon zur nächsten Frage übergehen. Welche Rohstoffe würden Sie sagen, sind regional, also hier in Deutschland verfügbar beziehungsweise kultivierbar, werden aber noch nicht ausreichend genutzt oder könnten mehr genutzt werden für die Herstellung von solchen Ersatzprodukten? #00:06:36#
Herausforderungen		E: Ist eine schwierige Frage. Weil, ich habe Ihnen ja gerade genannt...Erbsen werden zum Beispiel zurzeit eingesetzt, aber die Erbse kommt meist aus Kanada oder China und nicht aus regionalem Anbau. Auch das Soja, es gibt regionales Soja, was zwar eingesetzt wird, aber die Isolate oder Konzentrate, die genutzt werden, kommen nicht aus der Region und auch die Algen, die hier produziert werden in den Algenfarmen, das wird so gut wie gar nicht eingesetzt. #00:07:32# I: Wie sieht es denn aus bei den regionalen Hülsenfrüchten? Welche hätten großes Potential mehr genutzt zu werden? #00:08:19#
Trends und Marktentwicklung		E: Die Ackerbohne, die regionale Erbse, die Sojabohne. Ich weiß auch, dass Kichererbsen mittlerweile versucht werden anzubauen, die sind aber noch nicht so stark im Markt vertreten. #00:08:32#

I: Zu den Ursachen können wir vielleicht an späterer Stelle noch mal zurückkommen. Oder können Sie schon was dazu sagen, was da vielleicht Hürden sind, auch gegebenenfalls technologisch gesehen? #00:08:49#

E: Technologisch gesehen, ist das eigentlich kein Problem. Die Wertschöpfungskette stimmt nicht. Also die Landwirtschaft könnte es anbauen, aber die Verarbeitung zu den Mehlen, Konzentraten und Isolaten ist momentan regional noch nicht so gegeben. Deswegen ist die Lieferkette noch nicht durchorganisiert und die Qualitäten stimmen dadurch nicht. Aus diesem Grund wird mehr auf nicht-regionale Rohstoffe zurückgegriffen, aber ich glaube, da arbeiten viele daran, wir selber als DLG auch, um das Verständnis für diese Lieferkette zu schaffen, damit die Landwirte auch Interesse daran haben, diese Früchte anzubauen und kontinuierlich zu liefern. #00:08:55#

I: Die nächste Frage zielt auf die Anwendungsbreite der einzelnen Proteinquellen ab. Lassen sich für die genannten Proteinquellen mögliche Produktkategorien benennen, für die diese besonders in Frage kommen, Sie hatten ja eben schon die Milch - und Fleischersatzprodukte genannt. Welche Kategorien könnten sonst noch in Frage kommen, angefangen zum Beispiel mit den Hülsenfrüchten? #00:09:59#

E: Ich muss zugeben, ich tue mich ein bisschen schwer mit dieser Frage. Mit dem Eiersatzbereich habe ich mich noch nicht so intensiv beschäftigt. Aber wie ich schon gesagt habe, im Fleischbereich sind es einfach die Erbse, Ackerbohne, Weizen und Soja, die einfach stark vertreten sind und im Milchbereich Hafer, Soja und Mandel. Grundsätzlich gibt es für alles Produktmöglichkeiten. Es kommt dabei auch immer auf die Kombination an. Zum Beispiel der Hafer, der wird mittlerweile auch in Kombination mit Kokos verwendet. Zum Beispiel im Joghurtbereich werden Kombinationen gemacht, wo man vorher gedacht hat „Nein, dort wird es nicht eingesetzt“, aber auch da wird es jetzt eingesetzt. Oder die Erbse hat ein großes Spektrum, wo es eingesetzt werden kann. Soja hat auch ein großes Spektrum, weil es ein sehr gutes Aminosäurespektrum hat, was dann auch viele technofunktionelle Eigenschaften mitbringt. Die technofunktionellen Eigenschaften bestimmen grundsätzlich welche Produktkategorien in Frage kommen. Eigentlich gibt's da immer Möglichkeiten...die Ausnahmen bestätigen die Regel, sozusagen. #00:10:53#

I: Da Sie Soja erwähnen...Ich habe mich zum Beispiel auch immer gefragt, warum man aus Soja nicht Käseersatz oder so machen kann? #00:13:40#

E: Das kann ich Ihnen gerne begründen. Also bei Käse ist das Problem, dass sie die Festigkeit der Proteine, wie es das Milchprotein erreicht, mit allen anderen nicht erreichen können, und das nur mit Stärke und Fett derzeit nachgebildet wird. Es wird daran gearbeitet, dass andere pflanzliche Proteine durch eine zusätzliche Fermentation ähnliche Qualitäten erreichen und auch wie ein Käse gereift werden können. Derzeit wird das aber noch entwickelt und ist noch in den Anfangsschritten. Derzeit ist es wirklich nur, dass man Stärke einsetzt, um die Konsistenz zu erreichen und daher wird Soja an dieser Stelle nicht eingesetzt. #00:13:55#



Anwendungsmöglichkeiten

Herausforderungen

aktuelle Forschung

Herausforderungen

Herausforderungen

Herausforderungen

I: Und auch keine anderen Hülsenfrüchte? Soja wäre wahrscheinlich die erste Wahl, oder? #00:14:40#

E: Nicht unbedingt. Ich war aktuell auf einer Tagung und da wurde zum Beispiel ein Camembert vorgestellt, der aus Lupine hergestellt wird. Das ist auch noch ein „hidden champion“, die Lupine. Also das liegt einfach an der Besonderheit des Milchproteins, dass das so Mizellen und Strukturen entsprechend aufbaut, welche die Proteine auf Pflanzenbasis noch nicht nachstellen können und da wird zurzeit versucht, in die Nähe von dieser Konsistenz zu kommen. #00:15:12#

I: Gibt es da Forschungsprojekte, die Sie benennen können? #00:15:57#

E: (Schüttelt den Kopf) Ich kann Sie Ihnen nicht benennen, da diese meistens in den Firmen selbst durchgeführt werden. #00:16:05#

I: Nach welchen Eigenschaften werden derzeit die Rohstoffe für die Herstellung von Proteinersatzprodukten ausgewählt, also wird da die Ernährungsphysiologie beziehungsweise die biologische Wertigkeit der Proteine mitbeachtet oder stehen andere Qualitätskriterien mehr im Vordergrund? #00:16:43#

E: Also ich bin zwar jetzt nicht direkt aus so einem Produktionsbetrieb oder einer Entwicklungsabteilung, aber was ich festgestellt habe, sind das vor allem die technofunktionellen Eigenschaften, die da im Vordergrund stehen. Man will ja die Produkte so gestalten, dass sie erst mal an das Original herankommen. Deswegen wird es aufgrund von technofunktionellen Eigenschaften ausgewählt und so, dass Sie den Geschmack des Verbrauchers treffen. Wir hatten gerade ein Dessert auf Kokosbasis mit Pektinen geliert und das hatte 21 Gramm Zucker pro 100 Gramm. Also von Ernährungsphysiologie ist da gar nichts. Das sollte einfach dem Produkt, in dem Fall Pana-Cotta, nahekommen und es wird dann nach technofunktionellen Eigenschaften und sensorischen Eigenschaften ausgewählt. #00:17:26#

I: Wenn Sie das ranken müssten, wie würden Sie die drei genannten Qualitätskriterien, also ernährungsphysiologisch, technofunktionell und sensorisch einordnen, was wird am meisten priorisiert? #00:18:36#

E: Zuerst sensorisch, dann technofunktionell, dann ernährungsphysiologisch, obwohl die beiden ersten wahrscheinlich immer etwas hin und her schwanken. #00:19:11#

I: Wir hatten vorhin ja schon die Hürden, die die Nutzbarkeit einiger regionaler Hülsenfrüchte einschränken, besprochen. Das war ja weniger auf technologische Hürden, sondern vielmehr auf die unzureichenden Lieferketten zurückzuführen. Wie steht es um die mikrobiellen Proteine? #00:19:21#

E: Bei den mikrobiellen Proteinen ist es sehr unterschiedlich. Wenn die mikrobiellen Proteine, wie Quorn, schon zugelassen sind oder auf anderen Mikroorganismen basieren, die schon vor 1997 genutzt wurden, dann ist die rechtliche Zulassung kein Problem. Dann sind es wahrscheinlich die technischen Hürden, um die Produktion so „up zu scalen“, sodass es entsprechend preisgünstig ist und eingesetzt

Herausforderungen	werden kann. Und bei den Produkten, die jetzt neu entwickelt werden, die auf spezieller Biomasse oder Mykoproteinen basieren, die mit Pilzen, die noch nicht zugelassen sind, produziert werden, ist es eindeutig die regulatorische Hürde. Es sind wenige, die zugelassen sind und das verhindert eigentlich das „Upscaling“, also dass das in eine Produktionsreife geht, wo diese Proteine auch entsprechend kostengünstig angeboten werden können. #00:20:31#
Herausforderungen	I: Also vor allem auch wirtschaftliche Hürden? #00:21:54# E: Ja, es sind auch wirtschaftliche Hürden, die da vorliegen und wo auch viele Start-Ups, die mit großem Enthusiasmus herangehen, dann letztendlich scheitern. #00:21:58#
Anwendungsmöglichkeiten	I: Mir ist gerade aufgefallen, dass wir die mikrobiellen Proteine bei der Frage nach der Anwendungsbreite übersprungen haben. Können Sie da noch mal was dazu sagen? #00:22:10#
Herausforderungen	E: Also die Mikrobiellen sind vor allem im Bereich der Wurst. Die Mykoproteine, so habe ich sie kennengelernt, praktisch in verarbeiteter Form...auch in Fertiggerichten könnte ich es mir gut vorstellen, wie Maultaschen, wo jetzt nicht das pure Fleisch dominiert. Im Milchbereich ist es der Frischkäse, wo erste Anwendungen sind, aber auch noch nicht in dem Bereich, dass sie wirtschaftlich sind. Die anderen, also außer die Mykoproteine, sind noch nicht zugelassen und für die kann man daher noch keine genaue Beurteilung treffen. #00:22:18#
Anwendungsmöglichkeiten	I: Wissen Sie was bei den anderen mikrobiellen Proteinen gerade vorrangig erforscht wird? #00:23:28#
aktuelle Forschung	E: Im Fleischbereich und Milchbereich wird sehr intensiv an diesem Mykoprotein gearbeitet. Ich denk mal auch, dass die Mykoproteine möglicherweise im Fischbereich ein Thema sind. Im Milchbereich ist es zum Beispiel das Koji-Protein, und vor allem auch die fermentierten Beta-Lacto-Globuline und Kaseine, also die ganz speziell hergestellten Proteine. Aber das sind auch noch nicht zugelassene Proteinquellen. Im Fleischbereich wird natürlich auch ganz intensiv an zellulärem Fleisch gearbeitet. Das ist meines Erachtens auch das, woran auch beim Fisch gearbeitet wird und wo man sogar schon ein Stück weiter ist als im Fleischbereich. #00:23:45#
Herausforderungen	I: Sehen Sie denn Mikroalgen auch in Ersatzprodukten, wie Fleisch- oder Fischersatz? #00:24:53#
Anwendungsmöglichkeiten	E: Es gibt doch sogar im Milchbereich Anwendungen. Die DLG hat gerade aktuell einen Preis vergeben an eine Masterstudentin, die Käse mit Mikroalgen hergestellt hat. Das ist ein Beispiel. Aber natürlich auch gerade im Fischbereich wären Mikroalgen von Interesse, weil das letztendlich auch geschmacklich zueinander passen würde. Es gibt auch ein Eis, das aus Spirulina hergestellt wird, weil das sehr gute Eigenschaften hat zum Aufschlagen und gute technofunktionelle Eigenschaften mitbringt. Das Hindernis ist da auch einfach die Farbe und der Preis. #00:25:07#
Herausforderungen	I: Viele der aktuellen Ersatzprodukte, gerade im Fleischbereich, sind ja ultrahochverarbeitete Produkte und fallen oft in die Nova-Klasse vier und haben entsprechend viele Zusatzstoffe, um diesen Geschmack ja auch nachzuahmen. Wie bewerten Sie...#00:26:24#

Herausforderungen

E: Ich glaube nicht, dass die zu vielen Zusatzstoffe wegen des Geschmacks drinnen sind, sondern wegen der Konsistenz. #00:27:00#

I: Ok. Wie bewerten Sie dann dahingehend die Produkte, die gerade auf dem Markt sind, bezüglich des Ernährungswertes, wie könnte man technologische Maßnahmen ergreifen, um die Qualität auch zu verbessern? Gibt es da Möglichkeiten, dass zum Beispiel weniger Zusatzstoffe benötigt werden, um die gleiche Konsistenz zu erreichen? Zum Beispiel indem man schon auf die Wahl der Proteinquelle mehr Wert legt, oder was sind das so für Möglichkeiten? #00:27:05#

Herausforderungen

E: Meistens sind da viele Zutaten drin, um die Konsistenz zu treffen, aber auch den Geschmack, um einfach den „Off-flavour“ zu überdecken. Es gibt aktuell viele Entwicklungen, die dahingehen, dass man mit einer Fermentation der Proteine und der Rohstoffe versucht, diese „Off-flavour-Stoffe“ abzubauen. Das könnte natürlich dazu beitragen, dass viel weniger Zusatzstoffe notwendig sind. Es wird also versucht, diese Proteine über Fermentation so technofunktionell aufzuwerten, dass gewisse Eigenschaften erzeugt werden, um wirklich „Clean Label – Produkte“ herstellen zu können. #00:27:57#

aktuelle Forschung

I: Ist da auch der Trend, zu diesen „Clean Label“-Produkten? #00:28:53#

E: Also das wird angestrebt. Es hat aber wie gesagt noch technische Hindernisse, um einfach Geschmack und vor allen Dingen Konsistenz zu erreichen. Und es ist einfach auch so, dass manche Produkte einfach bearbeitet werden müssen, damit sie überhaupt verdaulich sind. Also die antinutritiven Stoffe in den Pflanzen, die einfach durch eine Bearbeitung erst abgebaut oder verdaulich gemacht werden müssen. #00:28:58#

I: Habe ich jetzt nicht im Leitfaden stehen, würde ich aber trotzdem einmal fragen. Welche von diesen Verarbeitungsstrategien halten Sie für am sinnvollsten, um diese antinutritiven Faktoren zu verringern, wissen Sie da mehr? #00:29:43#

E: Ich weiß nicht mehr, aber ich weiß, dass zum Beispiel die Fermentation eine Möglichkeit ist und die Frau Prof. Weiß vom TUM, die forscht gerade an diesen Themen...also an den antinutritiven Stoffen und wie diese beeinflusst werden können. #00:30:12#

I: Dann sind wir fast schon am Ende des Interviews angekommen. Zum Abschluss würde ich gerne wissen, wie Sie allgemein die Entwicklung des Marktes sehen im Bereich der alternativen Proteine. Was ist aus Ihrer Sicht, die Proteinquelle mit dem größten Potential und die, die sich langfristig durchsetzen wird? #00:30:13#

E: Es war jetzt gerade unterbrochen, aber ich antworte mal und wenn es nicht vollständig ist, dann fragen Sie noch mal. Ich glaube, dass sich der ganze Markt konsolidiert und dass die Strategie „Pflanzenbasierte Proteinquelle“ weiterwachsen wird. Bei den anderen Proteinquellen gibt es einfach noch regulatorische Hindernisse, die wiederum zu wirtschaftlichen Hindernissen führen, weil man dadurch kein Upscaling erreicht. Interessant wird sein, wie sich die Mykoproteine tatsächlich weiterentwickeln, denn die haben

Herausforderungen

Trends und Marktentwicklu

Trends und Marktentwicklu

aktuelle Forschung

Trends und Marktentwicklu

Herausforderungen

Trends und Marktentwicklu

auch interessante Nährstoffpotentiale und können zum Beispiel Vitamin B12 - und Vitamin D - Haushalte decken. Oder pflanzliche Proteine und Mykoproteine können miteinander kombiniert werden, sprich die hybriden Produkte werden einfach noch interessanter werden. Dass die guten Seiten von diesen Quellen miteinander kombiniert werden, um dann ein hochwertiges Produkt zu erzielen...das ist, glaube ich, meines Erachtens der Trend und wo auch interessante Forschung ist. Interessant fand ich diesbezüglich auch, dass zum Beispiel die „Technische Universität Berlin“ Pflanzenproteine mit zellulärem Fleisch überwachsen lässt. Also der Trend von neuen interessanten Kombinationen und dass man da noch längst nicht am Ende ist, ernährungsphysiologisch bessere Produkte zu entwickeln. Wichtig und interessant, um die pflanzlichen Proteine weiterzuentwickeln, sind vor allem die antinutritiven Bestandteile und die technofunktionellen Eigenschaften, die zu verbessern und da verspricht man sich viel von der Fermentation. #00:31:31#

I: Mir ist gerade noch eine Frage gekommen, wie schätzen Sie die Nutzbarkeit bzw. Relevanz von Produkten von Nebenströmen, wie z.B. Proteine aus Ölpresskuchen von zum Beispiel Sonnenblumenkernen oder Raps, als potenzielle alternative Proteinquelle ein? #00:34:13#

E: Da ist natürlich auch der Trend von Nebenströmen, die man nutzen möchte. Das ist auch noch eine mögliche Entwicklung, woran derzeit gearbeitet wird, um einfach die Kreislaufwirtschaft entsprechend zu fördern. Also Nebenströme sind auch noch ein ganz großes Thema, aber ich habe jetzt erst mal nur von den größeren Proteinquellen gesprochen. Die Nebenströme nutzt man zwar auch, aber eben nicht in großen Mengen, meines Erachtens. Ein Problem dabei ist, dass man kontinuierliche Qualitäten braucht und so ein Kuchen ist halt sehr unterschiedlich. Aber auch da wird die Entwicklung weitergehen. Es sind jetzt erst mal die großen ertragreichen Früchte, die genutzt werden. #00:34:55#

I: Ok, dann bedanke ich mich schon einmal, dass Sie sich Zeit für meine Fragen genommen haben. Haben Sie noch irgendetwas hinzuzufügen, irgendwelche Aspekte, die Ihnen noch einfallen und die ich nicht betrachtet habe? #00:36:17#

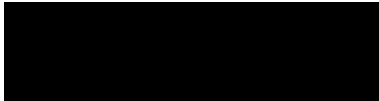
E: Ja, es ist eine herausfordernde Bachelorarbeit, also von daher...wünsche ich Ihnen viel Erfolg. Und ich hoffe, ich habe Ihnen helfen können. #00:36:39#

I: Auf jeden Fall und noch mal vielen Dank, dass Sie sich Zeit genommen haben! #00:36:49#

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit eigenständig und ohne fremde Hilfe angefertigt habe. Textpassagen, die wörtlich oder dem Sinn nach auf Publikationen oder Vorträgen anderer Autoren beruhen, sind als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit wurde bisher keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht veröffentlicht.

Hamburg, den 18.08.2025

A solid black rectangular box used to redact the signature of the author.

Lisa Wollensak (Unterschrift)