CC BY NC ND

Pflanzliche Proteinzutaten

Im Spannungsfeld zwischen Techno-Funktionalität, Sensorik, Humanernährung und Nachhaltigkeit

Ute Schweiggert-Weisz, Susanne Gola, Andrea Bauer, Christina Diekmann, Sarah Egert, Philipp Brandt, Simon Früh, Andreas Detzel

Abstract

Die Arbeiten rund um pflanzliche Proteine stecken in den Kinderschuhen und so ist noch nicht allumfassend geklärt, wie sich die Herstellungsprozesse auf die chemische Zusammensetzung (nutritive und potenziell „antinutritive“ Inhaltsstoffe), die technofunktionellen und die sensorischen Eigenschaften von Pflanzenproteinzutaten auswirken, welchen Einfluss der unterschiedliche Aufarbeitungsgrad auf die ernährungsphysiologische Qualität hat und ob die Pflanzenproteinzutaten tatsächlich nachhaltiger sind als die herkömmlichen tierischen Proteine. Diesen Fragestellungen widmen sich drei Projekte des Innovationsraums NewFoodSystems: „Nachhaltige Proteinzutaten“, „AlProPlant“ und „Pr:Ins – Ganzheitliche Bewertung“, welche im Rahmen dieses Artikels beleuchtet werden.

Zitierweise
Schweiggert-Weisz U, Gola S, Bauer A, Diekmann C, Egert S, Brandt P, Früh S, Detzel A: Plant protein ingredients. Between techno-functionality, sensory properties, human nutrition and sustainability. Ernahrungs Umschau 2025; 72(5): 88–98.

Open access
The English version of this article is available online: DOI: 10.4455/eu.2025.019

Peer-Review-Verfahren
Manuskript (Übersicht) eingereicht: 16.10.2024; Überarbeitung angenommen: 18.12.2024

Prof. Dr. Ute Schweiggert-Weisz[1, 2]
Dr. Susanne Gola[2]
Prof. Dr. Andrea Bauer[3]
Dr. Christina Diekmann[4], Prof. Dr. Sarah Egert[4]
Philipp Brandt[5], Simon Früh[5], Andreas Detzel[5]
[1] Technische Universität München, School of Life Sciences, Professur Plant Proteins and Nutrition, Freising
[2] Fraunhofer Institut für Verfahrenstechnik und Verpackung (IVV), Freising
[3] Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Fakultät Life Sciences, Professur Sensorik und Produktentwicklung, Hamburg
[4] Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Institut für Ernährungs- und Lebensmittelwissenschaften, Professur Ernährungsphysiologie, Bonn
[5] Institut für Energie- und Umweltforschung gGmbH (ifeu), Heidelberg, Deutschland

Einleitung

Eine nachhaltige Versorgung der wachsenden Weltbevölkerung mit qualitativ hochwertigen Lebensmitteln erfordert eine deutliche Steigerung der Nahrungsmittelproduktion. Dabei wird sich der Wettbewerb um verfügbare Anbauflächen weiter verschärfen, weshalb es neuer flächenschonender Produktionskonzepte bedarf. Aufgrund des hohen Ressourcen- und Flächenverbrauchs, insbesondere bei der Produktion tierischer Erzeugnisse, wird zunehmend nach alternativen Proteinquellen gesucht. Pflanzenproteine könnten eine derartige Alternative darstellen [1], wenn sie in ihren technofunktionellen und sensorischen Eigenschaften, ihrer ernährungsphysiologischen Qualität sowie in ihrer Nachhaltigkeitsbewertung mit tierischen Proteinen mindestens vergleichbar, wenn nicht sogar besser sind [2].

Bei der Diskussion um pflanzliche Proteine und daraus hergestellten sogenannten Alternativprodukten muss zunächst definiert werden, was genau unter der Begrifflichkeit „Pflanzenproteine“ verstanden wird. Pflanzliche Proteine sind prinzipiell Proteine, die aus pflanzlichen Quellen stammen. Allerdings werden in der Lebensmittelindustrie keine reinen Proteine eingesetzt, sondern Proteinzutaten, die sich in ihren Proteingehalten deutlich unterscheiden und damit einhergehend auch in der Konzentration an Begleitsubstanzen. Proteinzutaten werden je nach Proteingehalt in Mehle (weniger als 50 %), Konzentrate (50–80 %) und Isolate (über 80 %) unterteilt. Eine exakte Definition gibt es bislang nur für Sojaproteinzutaten [3]. Die Unterschiede im Proteingehalt werden durch ihre jeweiligen Herstellungsverfahren mit bedingt. So stellen Mehle die geringste Verarbeitungsstufe dar, da hier lediglich geschält und vermahlen wird. Insbesondere bei fettreichen Rohstoffen wie Soja und Lupine kann noch ein Entölungsschritt erfolgen [4]. Bei Proteinkonzentraten wird der Proteingehalt durch Vermahlung und Windsichtung oder durch Abreicherung von Begleitstoffen mittels Extraktion weiter erhöht. Die Herstellung von Proteinisolaten beinhaltet die stärkste Aufarbeitungsstufe, da hier die Proteine über meist wässrig alkalische Extraktionen gelöst und anschließend über eine isoelektrische Fällung oder auch Ultrafiltration aufgereinigt werden [5]. Vorteil ist, dass Proteingehalte über 80 % erreicht werden und gleichzeitig eventuell störende Begleitsubstanzen (sensorisch/ernährungsphysiologisch) abgereichert werden können.

Die genannten Proteinzutaten unterscheiden sich nicht nur in ihrem Proteingehalt, sondern auch maßgeblich in ihren technofunktionel-

CC BY NC ND

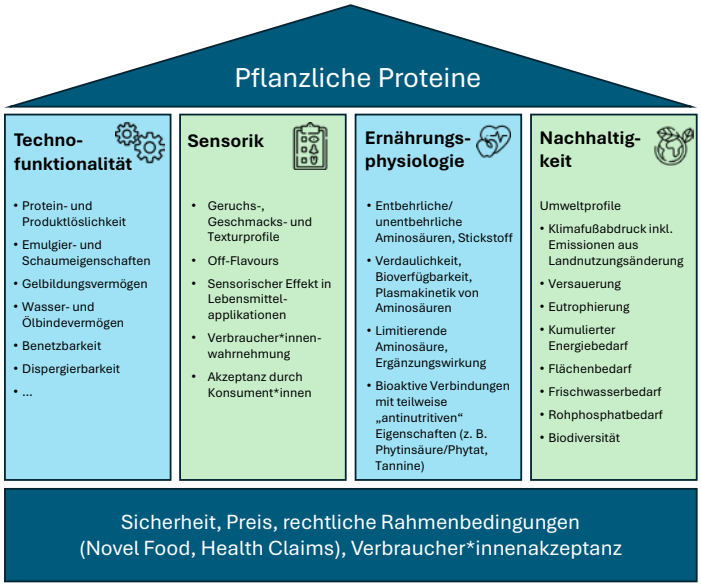

Abb. 1: **Graphical Abstract**

len und sensorischen Eigenschaften, in ihrer ernährungsphysiologischen Qualität sowie in ihrem Nachhaltigkeitsprofil (◆ Abbildung 1). Wichtig hervorzuheben sind auch die Unterschiede im Preis – beginnend mit dem geringsten Preis bei den Mehlen, über die Konzentrate bis hin zu den Isolaten, da hier in der Regel ein energieintensiver Trocknungsschritt erfolgen muss. Ein höherer Preis wird in der Lebensmittelindustrie nur akzeptiert, wenn sich dieser durch eine besonders gute Funktionalität der Zutaten rechtfertigen lässt.

Die Arbeiten rund um pflanzliche Proteine stecken in den Anfängen und so ist noch nicht allumfassend geklärt, wie sich die Herstellungsprozesse auf die chemische Zusammensetzung (nutritive und potenziell „antinutritive" Inhaltsstoffe), die technofunktionellen und die sensorischen Eigenschaften von Pflanzenproteinzutaten auswirken, welchen Einfluss der unterschiedliche Aufarbeitungsgrad auf die ernährungsphysiologische Qualität hat und ob die Pflanzenproteinzutaten tatsächlich nachhaltiger sind als die herkömmlichen tierischen Proteine, insbesondere dann, wenn die Umweltfaktoren nicht nur auf die Menge an Rohstoff/Protein, sondern auch auf die Proteinqualität bezogen werden. Diesen Fragestellungen widmen sich drei Projekte des Innovationsraums NewFoodSystems: „Nachhaltige Proteinzutaten", „AlProPlant" und „Pr:Ins – Ganzheitliche Bewertung", welche im Rahmen dieses Artikels beleuchtet werden. So ist es unser Ziel, die unterschiedlichen Aspekte rund um pflanzliche Proteine darzustellen, die in einer objektiven und ganzheitlichen Diskussion berücksichtigt werden müssen.

Pflanzliche Proteine aus Sicht der Lebensmitteltechnologie

Für die Herstellung von Proteinzutaten stehen verschiedene proteinreiche Rohstoffe zur Verfügung. Zu den wirtschaftlich bedeutendsten zählen Hülsenfrüchte, Ölsaaten, Getreide und Nüsse [6].

Unter Berücksichtigung der vielen Möglichkeiten der verfahrenstechnischen Aufarbeitung wird ersichtlich, dass eine Vielzahl an Proteinzutaten zur Verfügung steht, die sich alle in ihren individuellen Eigenschaften unterscheiden können. Für die Bewertung chemischer Parameter wie dem Proteingehalt stehen standardisierte Methoden zur Verfügung. Für die technofunktionellen Eigenschaften, z. B. die Eignung als Emulgator, sind in Herstellerspezifikationen oder wissenschaftlicher Literatur jedoch meist keine oder nicht standardisierte Angaben zu finden. So wird Lebensmittelherstellern die Auswahl des „richtigen" Proteins erschwert.

Aus diesem Grund wurde im Rahmen des NewFoodSystems-Projekts „Nachhaltige Proteinzutaten" eine Vielzahl kommerzieller Proteinzutaten umfassend auf verschiedene, für die Lebensmittelherstellung wichtige, Kenngrößen mit einheitlichen, standardisierten Methoden untersucht und diese in Form einer Datenbank katalogisiert. Alle Zutaten wurden auf ihre chemische Zusammensetzung (Trockensubstanzgehalt, Proteingehalt, Fettgehalt, Aschegehalt, Aminosäurezusammensetzung), ihre physikalisch-chemischen und technofunktionellen Eigenschaften (Protein-, Produktlöslichkeit, Wasserbinde-, Ölbindevermögen, Emulgierkapazität, Schaumeigenschaften, Partikelgrößenverteilung, Benetzbarkeit, Dispergierbarkeit) sowie ihre sensorischen Eigenschaften untersucht. Ein Teil der Daten wurde bereits veröffentlicht [7]. Die wesentlichen Ergebnisse sollen hier nochmals kurz zusammengefasst und in den Kontext zur Sensorik, Nachhaltigkeit und Gesundheit gebracht werden.

Chemische Zusammensetzung von Proteinzutaten

Der Proteingehalt der untersuchten Zutaten variierte zwischen 35,8 und 99,6 g/100 g Trockensubstanz (◆ Abbildung 2). Diese Werte wurden mit einem Stickstoff-zu-Protein-Umrechnungsfaktor von 6,25 berechnet, was der rechtlichen Regelung entspricht (Verordnung [EU] Nr. 1169/2011, Anhang I), jedoch den tatsächlichen Proteingehalt tendenziell überschätzt.

Die Unterschiede in den Proteingehalten der aus fettreichen Rohstoffen gewonnenen Zutaten (Soja, Lein und Sonnenblume) lassen sich durch die direkte Verwendung des Presskuchens oder durch zusätzliche Verarbeitungsschritte wie Nachentölung oder wässrig-ethanolische Extraktion erklären, die

CC BY NC ND

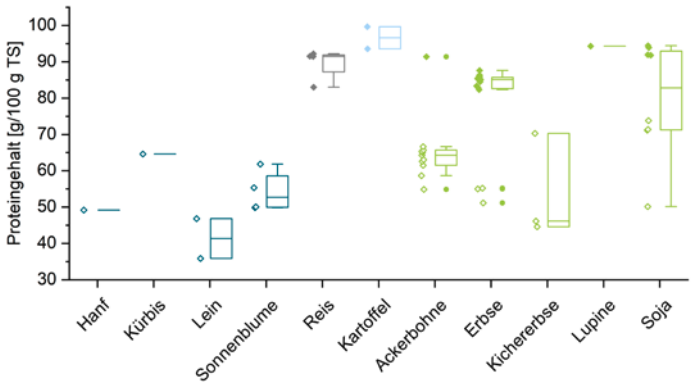

Abb. 2: **Proteingehalt pflanzlicher Proteinzutaten** (n = 53)
Die Datenpunkte auf der linken Seite der Boxplots zeigen die Mittelwerte der einzelnen Zutaten.
leere Symbole: proteinreiche Mehle und Konzentrate; gefüllte Symbole: Proteinisolate
dunkelblau: Ölsaaten; grau: Reis; hellblau: Kartoffel; grün: Körnerleguminosen
TS: Trockensubstanz [7]

den Proteingehalt erhöhen [8, 9]. Die Proteingehalte von proteinreichen Mehlen und Konzentraten aus Ackerbohne, Erbse sowie von zwei Kichererbsenzutaten deuten auf eine Herstellung durch Trockenfraktionierung hin [10]. Trockenfraktionierung umfasst Feinstvermahlen und anschließendes Windsichten zur Trennung von Stärkekörnern und Proteinpartikeln [11]. Die Ausbeute und die Proteinanreicherung im Konzentrat sind rohstoffabhängig, wobei insbesondere die Größe der Stärkekörner das Potenzial der Rohstoffe für die Trockenfraktionierung bestimmt. Ackerbohnen eignen sich aufgrund ihrer großen Stärkekörner besonders gut für dieses Verfahren [4]. Auch Proteinisolate (◆ Abbildung 2, gefüllte Symbole) aus Ackerbohne, Erbse, Lupine, Soja, Reis und Kartoffel wurden untersucht. Diese werden durch nasstechnische Verfahren gewonnen, wobei Unterschiede im Proteingehalt auf Unterschiede in der Rohstoffzusammensetzung und Prozessauslegung hinweisen [5, 12].

Proteinlöslichkeit und technofunktionelle Eigenschaften

Die **Proteinlöslichkeit von Proteinzutaten** (◆ Tabelle 1) wird zum einen durch die Proteinfraktionen beeinflusst, welche in den Rohstoffen natürlicherweise vorkommen, zum anderen durch die Aufarbeitung der Rohstoffe. Besonders niedrige Proteinlöslichkeiten wurden für Zutaten aus den Ölsaaten Hanf, Kürbis, Lein und Sonnenblume sowie für einige Sojazutaten beobachtet. Die Hauptproteinfraktionen dieser Zutaten stellen Globuline dar, die im nativen Zustand eine hohe Löslichkeit im neutralen und alkalischen pH-Bereich zeigen. Die beobachtete niedrige Löslichkeit dieser Zutaten (untersucht bei pH 7) deutet daher darauf hin, dass die Verarbeitung zu einer Denaturierung der Proteine und damit zu einer Verringerung der Löslichkeit geführt hat [13]. Dies kann z. B. durch thermische Einflüsse (z. B. bei der Ölgewinnung oder Extraktion) oder durch den Einfluss von Lösemitteln verursacht werden. Auffällig war zudem die hohe Varianz der mittels Trockenfraktionierung hergestellten Zutaten (Erbse, Ackerbohne, Kichererbse). So fanden sich u. a. innerhalb der Ackerbohnenkonzentrate Zutaten mit einer niedrigen bis sehr hohen Löslichkeit. Da die Prozessschritte der Trockenfraktionierung als schonend beschrieben werden, deuten die Ergebnisse darauf hin, dass Nachbehandlungen der Zutaten (z. B. thermische Entbitterung) die Löslichkeit der Proteine negativ beeinflusst haben [14]. Die höchste Löslichkeit wurde für Ackerbohnenisolat und Kartoffelproteinisolat beobachtet, was auf schonende Prozessführung hinweist. Die niedrigste Löslichkeit wurde für Reisproteinisolat beobachtet, was wahrscheinlich auf den hohen Glutelingehalt zurückzuführen ist, der für seine geringe Wasserlöslichkeit bekannt ist [15].

Zu den technofunktionellen Eigenschaften zählen u. a. die **Emulgiereigenschaften, Schäumungseigenschaften und gelbildenden Eigenschaften** pflanzlicher Zutaten. Die technofunktionellen Eigenschaften pflanzlicher Lebensmittelzutaten sind vielfältig und bieten zahlreiche Vorteile für die Lebensmittelverarbeitung. Ihre Fähigkeit Gele zu bilden, Emulsionen und Schäume zu erzeugen und zu stabilisieren, spielt eine wesentliche Rolle bei der Texturierung und Strukturierung von Lebensmitteln [16].

Die **Emulgierkapazität** beschreibt die Menge an Öl, die eine Proteinzutat emulgieren kann, bevor die Emulsion bricht. Diese wurde mittels Titration und Leitfähigkeitsbestimmung ermittelt [17]. Auffällig niedrige Werte wurden insbesondere für Zutaten aus Ölsaaten, Reis und Soja beobachtet. Dies könnte mit der geringen Proteinlöslichkeit dieser Zutaten in Zusammenhang stehen. Um Öl zu emulgieren, müssen sich die Proteine an die Grenzfläche zwischen Öl und Wasser anlagern und diese stabilisieren [18]. Die höchsten Werte wurden für Kartoffel-, Ackerbohnen- und Erbsenzutaten gefunden, wobei auch diese nicht an die hohe Emulgierkapazität mancher tierischen Proteine, z. B. Molkenprotein, heranreichten.

Die **Schaumaktivität** wurde nach Aufschlagen mittels Rührmaschine aus dem Verhältnis von Schaumvolumen zum Volumen der geschäumten Proteinsuspension ermittelt. Viele pflanzliche Zutaten zeigten eine sehr niedrige Schaumaktivität. Auch für die Bildung von Schäumen müssen Proteine an die Grenzfläche migrieren (Wasser – Luft). Daher könnte die niedrige Proteinlöslichkeit einiger Zutaten eine Erklärung für deren niedrige Schaumaktivität darstellen [19]. Auch können nicht-Proteinbestandteile die Schaumeigenschaften beeinflussen. So wirken sich Fette und Lipide häufig negativ auf die Schaumbildung aus [20]. Diese können in den Zutaten als Restbestandteile nach mechanischer Entölung (Ölsaaten, Soja) enthalten sein oder sich während des Isolationsprozesses anreichern (z. B. Erbsenprotein-

isolate). Begleitstoffe, die sich positiv auf die Schaumbildung auswirken, sind z. B. Saponine (Seifenstoffe), die u. a. in Ackerbohnen vorkommen [21, 22]. Ackerbohnen- und Kartoffelzutaten zeigten die höchsten Schaumaktivitäten.

Ein Gel ist ein dreidimensionales Netzwerk, das Flüssigkeiten in einer festen oder halbfesten Struktur einschließt. Die Gelbildung erfolgt durch die Vernetzung von Proteinmolekülen. Die hitzeinduzierte **Gelbildung** wurde anhand der minimalen Gelbildungskonzentration bestimmt, wobei das Fließverhalten der Probe nach Erhitzung visuell bewertet wird [23]. Während tierische Proteine wie Gelatine und Kasein für ihre hervorragenden Gelierungsfähigkeiten bekannt sind, neigen pflanzliche Proteine aufgrund ihrer Struktur und Zusammensetzung oft zu einer geringeren Gelbildung. Auffällig war die hohe Gelbildung des Kartoffelproteins, das sich daher einzeln oder in Kombination zur Herstellung gelbasierter Lebensmittel eignen könnte.

Sensorische Eigenschaften von Proteinzutaten

Obwohl sich Wissenschaft und Industrie schon seit geraumer Zeit mit dem Ersatz tierischer Proteine durch pflanzliche Proteine beschäftigen und bereits zahlreiche Alternativprodukte im Lebensmitteleinzelhandel erhältlich sind [24], ist die einfache Substitution tierischer Proteine nicht nur aus technofunktionellen, sondern auch aus sensorischen Gesichtspunkten nach wie vor eine Herausforderung. Lebensmittel mit Proteinen aus alternativen Quellen weichen oftmals vom gewohnten sensorischen Profil ab, was zu verminderter Akzeptanz bei den Verbraucher*innen führen kann [25, 26]. So zeigten Nicolás Saraco und Blaxland [27] für auf dem britischen Markt kommerziell erhältliche, milchfreie Käsealternativen, dass bspw. die untersuchten Proben nach Art eines italienischen Hartkäses u. a. durch animalische, modrige und brühige Aromen, einen hefigen, kartonartigen und teilweise an Zwiebeln und Knoblauch erinnernden Geschmack sowie eine trockenere, körnige und grießige Textur und ein öliges Mundgefühl vom tierischen Original abwichen. Eine befragte Prüfgruppe stufte keine der Proben als „akzeptabel" ein [27]. Darüber hinaus weisen pflanzliche Proteine oftmals „bohnige", „grüne" oder „grasige" Noten [28, 29] und/oder bittere und adstringierende Geschmackseindrücke [30–33] auf, die ebenfalls in Alternativprodukten nachteilig wahrgenommen werden können. Negative Geruchseigenschaften rühren von flüchtigen organischen Verbindungen unterschiedlicher Substanzklassen wie Alkohole, Aldehyde, Ketone, Furane und Methoxypyrazine mit typischen Verbindungen wie 1-Hexanol („grasig", „grün"), 1-Nonanol („Erbse", „vegetativ", „fettig", „grün", „waxig"), Hexanal („grün/vegetativ", „grasig", „Erbse"), Heptanal („grün", „grünes Gemüse") oder 3-Isopropyl-2-Methoxypyrazin („erbsenschotenartig", „grüne Paprika", „erdig") [28, 29, 34]. Diese Verbindungen entstehen entweder durch Biosynthese innerhalb der Pflanze oder während der Verarbeitung und Lagerung durch enzymatische und nicht-enzymatische Oxidationsprozesse [34]. Bittere und adstringierende Geschmackseindrücke werden von nicht-flüchtigen organischen Verbindungen hervorgerufen wie Saponinen und Polyphenolen [34]. Strategien zur Reduzierung negativer Geruchs- und Geschmackseindrücke umfassen verschiedene Extraktionsprozesse zur Abtrennung unerwünschter Substanzen, physikalische, enzymatische oder chemische Modifikation der Proteinstruktur, Keimungsprozesse, Fermentationsprozesse, (hydro)thermische Prozesse, Filtration sowie Züchtung [30, 34, 35].

In einer im März 2024 durchgeführten Online-Befragung mit 3000 Teilnehmenden im Alter zwischen 18 und 80 Jahren gaben 85 % der Befragten an, dass für sie der Geschmack das wichtigste Kaufkriterium für Lebensmittel und Getränke sei [36]. Daher ist es nicht nur wichtig, pflanzliche Proteine aufgrund ihres technofunktionellen Potenzials für die Entwicklung neuartiger Lebens-

		n	Proteinzutat	Protein-löslichkeit	Emulgier-kapazität	Schaum-aktivität	Gelbildung
Ölsaaten	Hanf	1	Mehl				
	Kürbis	1	Konzentrat				
	Lein	2	Mehl				
	Sonnenblume	4	Mehl, Konzentrat				
Getreide	Reis	4	Isolat				
Knollen	Kartoffel	2	Isolat				
Körnerleguminosen	Ackerbohne	11	Konzentrat, Isolat				
	Erbse	16	Konzentrat, Isolat				
	Kichererbse	3	Mehl, Konzentrat				
	Lupine	1	Isolat				
	Soja	8	Konzentrat, Isolat				

Erläuterung zu Tab. 1:

	Protein-löslichkeit	Emulgier-kapazität	Schaum-aktivität	Minimale Gelbildungs-konzentration
	[%]	[mL/1 g]	[%]	[%]
	< 10	< 125	< 100	> 20
	10–25	125–250	100–500	17–20
	25–50	250–500	500–750	13–17
	50–70	500–700	750–1500	8–13
	70–100	700–1000	> 1500	< 8

Tab. 1: **Proteinlöslichkeit, Emulgierkapazität, Schaumaktivität und Gelbildung pflanzlicher Zutaten** (n = 53)
rot: sehr niedrig; orange: niedrig; gelb: mittel; hellgrün: hoch; dunkelgrün: sehr hoch [7]

CC BY NC ND

mittel auszuwählen, sondern auch basierend auf ihren sensorischen Eigenschaften. Aus diesem Grund wurden im Rahmen des Projekts „Nachhaltige Proteinzutaten" auch die sensorischen Eigenschaften der Proteinzutaten in wässriger Suspension (2 % *w/w*) untersucht. Aufgrund der Vielzahl an Zutaten und unterschiedlicher botanischer Herkünfte wie auch der großen Anzahl möglicher sensorischer Attribute stellte die Wahl der Methode zur Bestimmung des sensorischen Profils eine besondere Herausforderung dar. Die *Rate-All-That-Apply* (RATA)-Methodik [37] wurde mit einem speziell gescreenten und probenspezifisch trainierten Prüfendenpanel durchgeführt, um diesen Herausforderungen zu begegnen. Zunächst wurde mithilfe des Prüfendenpanels ein umfassendes Attribute-Lexikon entwickelt, das 76 Attribute zur sensorischen Charakterisierung der Proteinzutaten samt Referenzsubstanzen und Attributdefinitionen zu den sensorischen Modalitäten Geschmack, Geruch und Textur enthält. Die Prüfpersonen wurden schließlich im Rahmen der RATA-Methodik nach dem Riechen bzw. Verkosten der jeweiligen Probe aufgefordert, aus dem Attribute-Lexikon zutreffende Merkmaleigenschaften mittels Multiple-Choice-Verfahren auszuwählen und diese im Anschluss auf einer 5-Punkt-Intervallskala von 1 „sehr schwach ausgeprägt" bis 5 „sehr stark ausgeprägt" einzustufen.

Bezüglich ihrer sensorischen Eigenschaften ließen sich die untersuchten Proteinzutaten in ihre verschiedenen botanischen Herkunftsgruppen einordnen. Insbesondere die Reis- und Kartoffelpräparate, aber auch die Sojapräparate setzten sich in der Gesamtbetrachtung in ihren sensorischen Profilen deutlich von den übrigen Herkunftsgruppen ab. Während sich die Reisproteine eher durch einen holzigen, fäkalischen Geruch sowie in der Nase und am Gaumen durch erdige, animalische, muffige und an Stroh erinnernde Noten auszeichneten, grenzten sich davon die Kartoffelpräparate eher durch einen säuerlichen, schimmligen und an Kartoffel erinnernden Geruch sowie einen salzigen, sauren und adstringierenden Geschmack ab. Für die Sojapräparate waren dagegen zusammenfassend eher ein säuerlicher, an Soja erinnernder Geruch charakteristisch sowie am Gaumen an Soja erinnernde Noten, zusammen mit einem röstigen, getreidigen Geschmack. Bei der Betrachtung der einzelnen Proteinzutaten gleicher botanischer Herkunft im Detail zeigten sich, ähnlich wie bei den Untersuchungen zur Technofunktionalität, sensorische Unterschiede, die ebenfalls auf unterschiedliche Herstellungsprozesse und Prozessparameter zurückzuführen sind. Exemplarisch sind in ◆ Abbildung 3 die Profile zweier Ackerbohnenkonzentrate dargestellt, die sich vor allem geschmacklich, aber auch geruchlich deutlich unterscheiden.

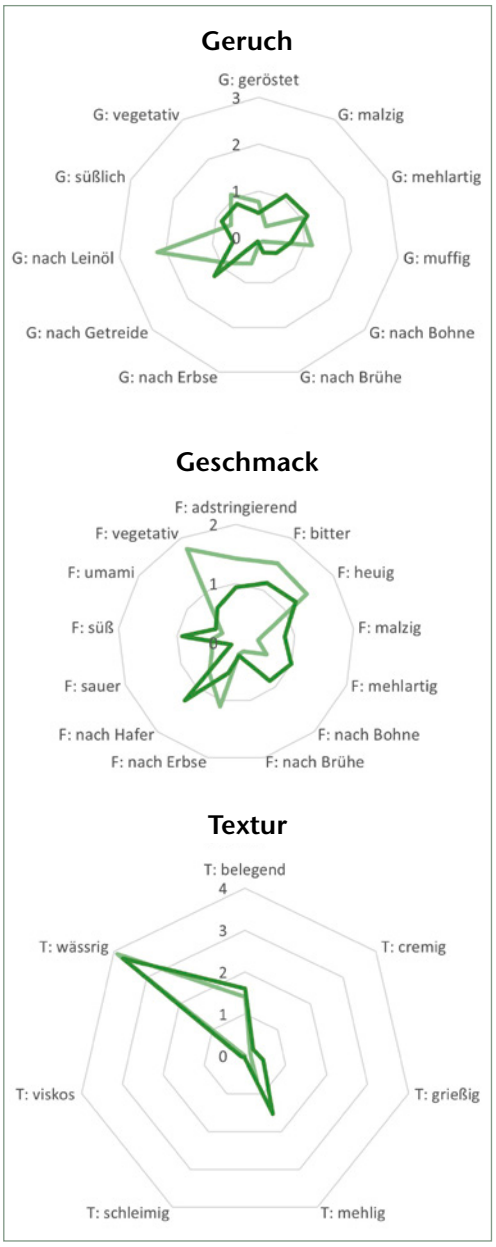

Abb. 3: **Sensorische Profile zweier Ackerbohnenkonzentrate**
Erfasst durch 11 gescreente und probenspezifisch trainierte Prüfende mittels *Rate-All-That-Apply*-Methodik

Pflanzliche Proteine aus Sicht der Ernährungsphysiologie und Humanernährung

Maßgeblich für die ernährungsphysiologische Bewertung eines Nahrungsproteins bzw. proteinreichen Lebensmittels sind der Gehalt an Protein bzw. Stickstoff und Energie, an unentbehrlichen Aminosäuren, das Verhältnis von unentbehrlichen zu entbehrlichen Aminosäuren sowie der Gehalt an weiteren wertgebenden essenziellen Inhaltsstoffen (z. B. Vitamine, Mineralstoffe) und Begleitstoffen (z. B. Phytat, Purinstickstoff). Die Proteinqualität eines Lebensmittels bzw. einer Zutat wird maßgeblich bestimmt durch den Gehalt an unentbehrlichen Aminosäuren, die Verdaulichkeit des Proteins und die „Bioverfügbarkeit" der freigesetzten Aminosäuren (in Humanstudien häufig auf Basis der „plasma appearance" von Aminosäuren nach Proteinverzehr bestimmt). Die über den Tag zugeführten Proteine sollten den durchschnittlichen Bedarf an unentbehrlichen Aminosäuren decken [38]. Je höher die Proteinqualität eines Lebensmittels ist, umso geringer ist die notwendige Menge, die zugeführt werden muss, um den physiologischen

CC BY NC ND

Bedarf zu decken. Bei einem omnivoren, energiebedarfsadaptierten Ernährungsmuster, das aus einer abwechslungsreichen, vielfältigen Lebensmittelauswahl besteht und den Referenzwert für die Proteinzufuhr erreicht, ist die Proteinqualität praktisch ohne Bedeutung für die tägliche Ernährung. Im Rahmen restriktiver Ernährungsformen wie bspw. der veganen Ernährung kann Protein (bzw. einzelne unentbehrliche Aminosäuren) jedoch zu einem sog. „potenziell kritischen Nährstoff" werden. Dies gilt insbesondere in sensiblen Lebensphasen, die mit einem erhöhten Bedarf an Energie, Protein und unentbehrlichen Aminosäuren einhergehen (z. B. während des Wachstums von Säuglingen/Kindern) [39, 40].

Tierische Proteinquellen wie Fleisch, Fisch, Eier und Milchprodukte (z. B. Käse) weisen in der Regel einen höheren absoluten Proteingehalt auf als pflanzliche Proteinlieferanten. Zu letzteren zählen insbesondere Hülsenfrüchte, Getreide/Brot, ausgewählte Ölsaaten und Nüsse. Darüber hinaus sind die Proteinqualität und die Aminosäuredichte (Gehalt an unentbehrlichen Aminosäuren bezogen auf den Energiehalt des Lebensmittels [g/100 kcal]) tierischer Lebensmittel in der Regel höher als bei pflanzlichen Lebensmitteln [41]. Im Vergleich zu tierischen Proteinquellen enthalten Nahrungsproteine pflanzlichen Ursprungs zudem oft nicht alle unentbehrlichen Aminosäuren. So ist z. B. die Aminosäure Lysin in Getreideprodukten limitierend, wohingegen in Hülsenfrüchten die schwefelhaltige Aminosäure Methionin eine der limitierenden Aminosäuren darstellt, wie sich auch bei der chemischen Analyse der oben benannten Proteinzutaten zeigte [7]. Da Getreideprodukte die Aminosäure Methionin in ausreichender Menge enthalten und Hülsenfrüchte eine gute Lysinquelle darstellen, kann durch die Kombination von Hülsenfrüchten und Getreide die limitierende Aminosäure der jeweils anderen Proteinquelle ausgeglichen werden, sodass eine deutlich höhere und mit dem tierischen Protein vergleichbare Proteinqualität erzielt werden kann [42, 43].

Pflanzliche Proteine weisen häufig eine geringere Verdaulichkeit auf als tierische Proteine. Hierzu trägt bei, dass pflanzliche Zellen im Unterschied zu tierischen von einer Zellwand umgeben sind, sodass die Proteasen im Gastrointestinaltrakt schlechtere Angriffsmöglichkeiten auf die enthaltenen Proteine haben. Gleichzeitig beeinflussen auch unterschiedliche Primärstrukturen der Proteine, Quervernetzung von Proteinen über Disulfidbrücken sowie der Denaturierungsgrad infolge der Lebensmittelverarbeitung/-zubereitung den Zugang der Proteasen und damit die Verdauungsgeschwindigkeit [38]. Weiterhin können auch die in pflanzlichen Nahrungsmitteln enthaltenen sekundären Pflanzenstoffe (z. B. Proteaseinhibitoren, Phytate, Lektine) die Absorption der Aminosäuren, aber auch die Absorption von Mikronährstoffen (z. B. Eisen, Zink), einschränken und so deren Verfügbarkeit senken. Aufgrund des starken Einflusses der Phytatzufuhr auf die Zinkabsorption hat die Deutsche Gesellschaft für Ernährung die Referenzwerte für die Zinkzufuhr für Erwachsene in Abhängigkeit von der Phytatzufuhr (niedrig, mäßig, hoch) angegeben [44]. Sekundäre Pflanzenstoffe können aufgrund des Prozessierens auch in den Proteinzutaten angereichert werden, weshalb es einer umfassenden chemischen Analyse der Proteinzutaten bedarf, um diese im Hinblick auf ihre Relevanz als Phytatquelle bewerten zu können.

Ein weiterer Aspekt, der bei der ernährungsphysiologischen Bewertung pflanzlicher Proteinzutaten berücksichtigt werden sollte, ist der Puringehalt im Endprodukt. Körnerleguminosen wie Soja, Erbsen, Linsen oder Lupinen enthalten relevante Mengen an Purinen. Ein hoher Verzehr dieser Lebensmittel ist assoziiert mit einer erhöhten Serumkonzentration von Harnsäure, dem Endprodukt des Purinstoffwechsels, das durch den Abbau von DNA, RNA und ATP entsteht [45, 46]. Hyperurikämie ist ein unabhängiger Risikofaktor für die Entstehung der Gicht [47]. Die akuten und chronischen Effekte von pflanzlichen Proteinzutaten auf den Purinstoffwechsel und die Harnsäurekonzentration wurden bislang nicht systematisch untersucht, ebenso wie der Einfluss der Verarbeitung von Körnerleguminosen und einzelner Prozessschritte (z. B. Proteinextraktion, Fällung) auf den Puringehalt im Endprodukt.

Ebenfalls ungeklärt ist bislang, inwieweit ein akuter und/oder regelmäßiger Verzehr von pflanzlichen Proteinzutaten mit einem allergenen Potenzial einhergeht. Es wurde gezeigt, dass insbesondere eine vegane Ernährung mit einem hohen Anteil an pflanzlichen Proteinlieferanten (z. B. Leguminosen, Nüsse) mit einem erhöhten Risiko für Lebensmittelallergien assoziiert ist [48].

Inwiefern unterschiedliche pflanzliche Proteinzutaten verschiedener Verarbeitungsgrade zur adäquaten Proteinversorgung des Menschen beitragen können und wie diese sich physiologisch verhalten (z. B. Verdaulichkeit, Absorptionsgeschwindigkeit, Interaktion mit anderen Nährstoffen, biofunktionelle Effekte), ist bisher nicht hinreichend untersucht. Das NewFoodSystems-Projekt „AlProPlant" *(Alternative Proteins of Plant Origin)* nimmt sich diesem Thema an und untersucht im Rahmen einer kontrollierten Ernährungsstudie die Verfügbarkeit (u. a. Plasmaprofile einzelner Aminosäuren) und die Akzeptanz/Verträglichkeit pflanzlicher Proteinzutaten unterschiedlichen Verarbeitungsgrads am Beispiel des Erbsenproteins bei stoffwechselgesunden Frauen und Männern. Eine weitere Humanstudie dieses Forschungsvorhabens wird die physiologischen und biofunktionellen Wirkungen verschiedener pflanzlicher Proteine im Kontext „ganzheitlicher Mahlzeiten" untersuchen und mit denen des tierischen Proteins vergleichen. Relevante Zielparameter neben der Aminosäure-Plasmakinetik sind z. B. Parameter des Lipid- und Glucosestoffwechsels, die Harnsäurekonzentration sowie hunger- und sättigungsassoziierte Parameter.

CC BY NC ND

Pflanzliche Proteine aus Sicht der ökologischen Nachhaltigkeitsbewertung

Umweltfußabdruck

Im Rahmen des NewFoodSystems-Projekts „Pr:Ins – Ganzheitliche Bewertung von alternativen Proteinquellen unter besonderer Berücksichtigung von Insekten“ werden in einem Arbeitspaket Umweltfußabdrücke in Form von Nachhaltigkeitssteckbriefen für die in der Proteindatenbank hinterlegten Proteinzutaten erarbeitet. Hierbei werden eine Reihe von Umweltkennzahlen berechnet, die sich zum einen an den sogenannten Wirkungskategorien aus der Ökobilanzierung [49–51] und zum anderen an den für die Einhaltung der planetaren Grenzen wichtigen Umweltprozessen [52–54] orientieren. Mit Blick auf diejenigen Umweltprobleme, zu denen Landwirtschaft und Lebensmittelerzeugung insgesamt relativ stark beitragen, wurden für die Nachhaltigkeitssteckbriefe folgende Umweltkennzahlen ausgewählt: Klimawandel, übermäßiger Eintrag von Nährstoffen in Gewässer und Böden u. a. durch die Ausbringung von Stickstoffdünger, Versauerung, Frischwasserinanspruchnahme, landwirtschaftliche Flächeninanspruchnahme sowie Rohphosphatverbrauch durch die Ausbringung von Phosphatdünger. Aus Gründen der Vereinfachung einerseits und der umweltpolitischen Bedeutung andererseits soll aber der Fokus der weiteren Ausführungen auf dem Klimawandel bzw. dem Klimafußabdruck der Proteinzutaten liegen.

Die Methode der Wahl zur Ermittlung der Umweltfußabdrücke eines Produktsystems ist die Ökobilanzierung. Dabei werden alle Prozessschritte zur Herstellung der Proteinzutaten, vom landwirtschaftlichen Anbau bis hin zum fertigen Produkt, bilanziert. Auch Vorprozesse wie die Herstellung von Düngemitteln und Prozesschemikalien müssen miterfasst werden. ◆ Abbildung 4 zeigt am Beispiel eines Ackerbohnenproteinisolats die einzelnen Prozessschritte, die im Zuge einer Ökobilanz zu betrachten sind.

Für jeden einzelnen Prozessschritt werden Prozessdaten benötigt, die mittels einer Software zur Bilanzierung des Gesamtsystems „Herstellung Ackerbohnenproteinisolat“ verknüpft werden. Die Prozessdaten beruhen auf sogenannten Input- und Outputdaten, wobei auf der Inputseite der Energie- und Ressourceneinsatz quantifiziert werden, während auf der Outputseite die Haupt- und Koppelprodukte sowie Abwasser und Emissionen in Luft, Wasser und Böden erfasst werden.

Durch Verrechnung aller Input- und Outputdaten erhält man die Sachbilanzergebnisse, die wiederum mit Charakterisierungsfaktoren verrechnet werden, um die Umweltwirkungen zu berechnen. So lassen sich beispielsweise klimarelevante Emissionen wie CO_2 oder Methan über die Umrechnung in CO_2-Äquivalente (CO_2e) in der Umweltwirkungskategorie „Klimawandel“ zusammenfassen [55].

Datenbedarf

Gerade bei innovativen Produkten wie den pflanzlichen Proteinzutaten für die menschliche Ernährung sind die benötigten Prozessdaten nur sehr eingeschränkt öffentlich verfügbar, insbesondere wenn eine feingliedrige Unterscheidung der Aufarbeitungsprozesse, wie in ◆ Abbildung 4 dargestellt, für eine Vielzahl an pflanzlichen Proteinrohstoffen und unterschiedlich prozessierten Proteinzutaten angestrebt wird. Daher mussten im Projekt Pr:Ins neue Wege zur Generierung von entsprechenden Datensätzen gefunden werden. Vorrangig wurde dabei auf öffentlich verfügbare Maschinenkennblätter zurückgegriffen, die zunächst in ein schlüssiges Stoffstrommodell überführt wurden. Im nächsten Schritt wurden die so erzeugten Datenmodelle mit Expert*innen aus dem Bereich der Lebensmitteltechnik validiert und bei Bedarf nachjustiert.

Trotz des hier beschriebenen generischen Charakters können rohstoffspezifische Unterschiede der verschiedenen in der Datenbank

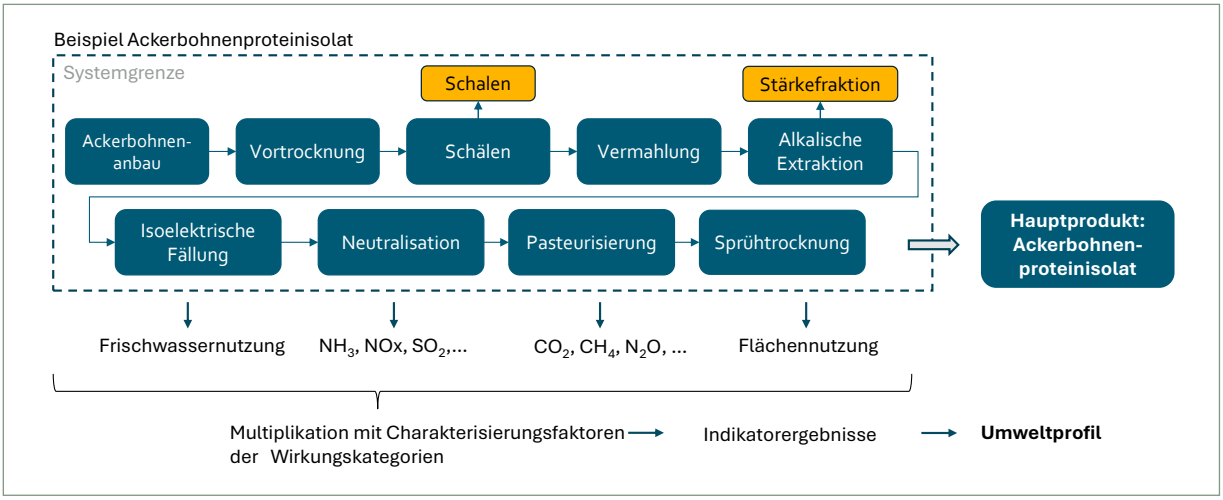

Abb. 4: **Vom Prozess zum Umweltprofil – Beispielhafte Darstellung anhand des Herstellungsprozesses von Ackerbohnenproteinisolat** (eigene Darstellung)

hinterlegten Proteinzutaten bei der Erstellung der Ökobilanzmodule berücksichtigt werden. So führen bspw. Abweichungen im Schalen-, Öl- oder auch im Stärkeanteil ebenfalls zu entsprechenden Anpassungen in den Sachbilanzdaten, die sich wiederum auf die Umweltergebnisse auswirken.

Klimafußabdruck

Der anhand der Datensätze ermittelte Klimafußabdruck von Proteinzutaten aus der Ackerbohne ist in ◆ Abbildung 5 dargestellt. Für den landwirtschaftlichen Anbau und die Aufbereitung wurde für die Berechnung angenommen, dass diese in Deutschland angesiedelt sind.
Die Balkendiagramme zeigen auf der Y-Achse die Intensität des Klimafußabdrucks der auf der X-Achse abgebildeten Proteinzutaten in den drei Aufarbeitungsformen Mehl (M), Konzentrat (C) und Isolat (I). Für das Konzentrat und Isolat gibt es jeweils ein Balkenpaar, unterschieden nach AE für „ökonomische Allokation" und AM für „trockenmassebasierte Allokation". Der Begriff Allokation bezieht sich auf den Schlüssel bzw. den Faktor, mit dem die Umweltlasten zwischen dem Hauptprodukt und den Nebenprodukten (z. B. dem Hauptprodukt Ackerbohnenproteinisolat und dem Nebenprodukt Stärke) aufgeteilt werden. Vereinfacht gesagt wird bei der trockenmassebasierten Allokation jeder Masseeinheit, seien es Neben- oder Hauptprodukte, die gleiche Umweltlast zugeordnet, während bei der ökonomischen Allokation die Masse noch mit dem jeweiligen ökonomischen Wert des jeweiligen Neben- oder Hauptprodukts multipliziert wird. Da das Isolat den höchsten ökonomischen Wert hat, sind die Umweltlasten des Isolats folgerichtig rechnerisch deutlich höher als bei der massebasierten Allokation.

Unabhängig von der Allokationsmethode ist der Klimafußabdruck beim Isolat insgesamt deutlich höher als beim Mehl oder dem Konzentrat, da die Aufarbeitungsprozesse stark zu Buche schlagen. Bestimmte Einzelprozesse, z. B. die besonders energieintensive Sprühtrocknung, haben dabei einen enormen Einfluss auf den Energiebedarf und damit die Umweltwirkungen, die aus der Herstellung der Proteinpräparate resultieren. Vergleichbare Beobachtungen finden sich auch in der Literatur [56–58].
Generell gilt, dass die aus der Verarbeitung resultierenden Umweltlasten bei Proteinmehlen und trockenfraktionierten Proteinkonzentraten geringer sind als bei Proteinisolaten. Weiter wirkt sich der Einsatz der Agrarrohstoffe wesentlich auf das Ergebnis aus, da dieser mit zunehmender Aufkonzentrierung des Proteins bezogen auf die gleiche Menge Endprodukt an Proteinzutat zunimmt.
Während der Transport des Agrarrohstoffs vom Acker zur Verarbeitung im vorliegenden Fall einen relativ geringen Anteil am Klimafußabdruck der Proteinzutaten hat, kommt ein nennenswerter Beitrag aus dem hier mit „dLUC" bezeichneten Balkenabschnitt. Dieser berücksichtigt klimawirksame Emissionen, die bei der Umwandlung kohlenstoffreicher Böden (Urwald, Moore) zu Agrarflächen entstehen. Er wird ermittelt durch Multiplikation des Agrarflächenbedarfs einer Proteinzutat mit einem länder- und feldfruchtspezifischen Aufschlagfaktor. Je nach Herleitungsmethode und Datenquelle können die Zahlenwerte voneinander abweichen. Der Balkenabschnitt ist daher abgesetzt in einem gestreiften Muster dargestellt.

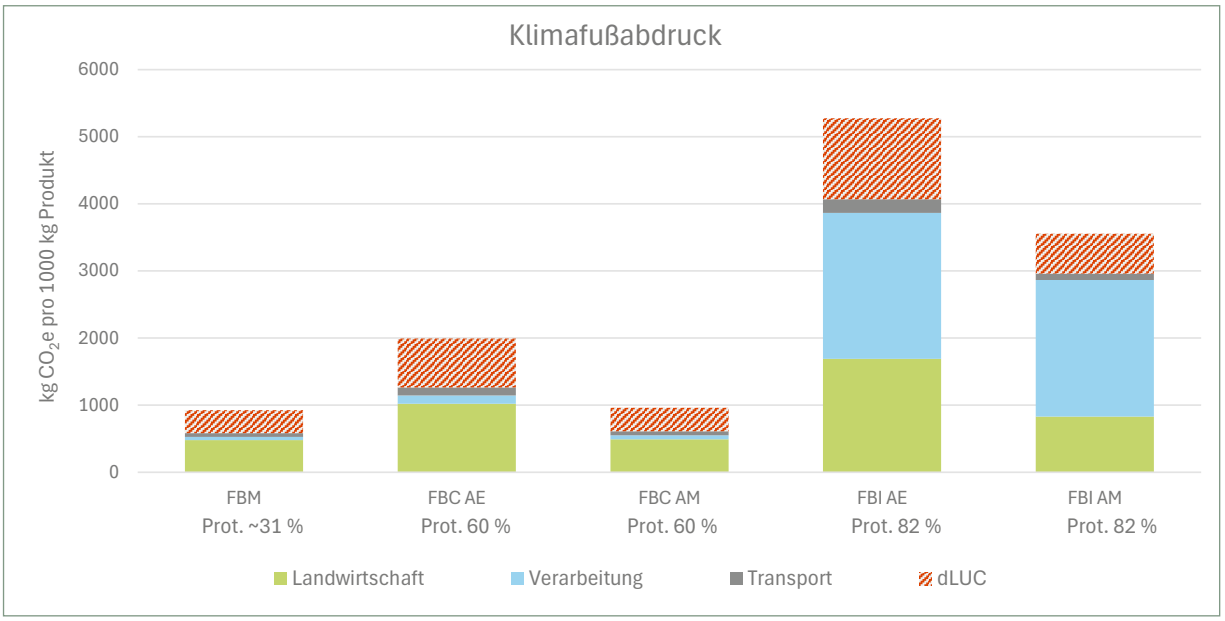

Abb. 5: **Klimafußabdruck von Ackerbohnenproteinzutaten**
AE: ökonomische Allokation; AM: Allokation nach Trockenmasse; dLUC: *direct Land Use Change*, kennzeichnet in der Grafik Treibhausgasemissionen in Verbindung mit direkten Landnutzungsänderungen; FBC: Ackerbohnenproteinkonzentrat; FBI: Ackerbohnenproteinisolat; FBM: Ackerbohnenmehl; Prot.: Proteingehalt im Produkt (Frischmasse)

CC BY NC ND

Abschließende Bemerkungen

Pflanzliche Proteine und die daraus hergestellten Alternativen zu tierischen Erzeugnissen sind in den letzten 5–6 Jahren stark in den Fokus von Wissenschaft und Wirtschaft gerückt. Ob derartige Produkte ein möglicher Weg hin zu einer nachhaltigeren Ernährung sein können oder ob deren Verarbeitungsgrad ein potenzielles gesundheitliches Risiko darstellt, wird derzeit in der Lebensmittel- und Ernährungscommunity äußerst kontrovers diskutiert.

Aus Sicht der Lebensmitteltechnologie müssen proteinreiche Rohstoffe in der Regel verarbeitet werden, um Proteinzutaten mit maßgeschneiderten Eigenschaften herzustellen, die dann im Endprodukt bestimmte Funktionen übernehmen können. Je geringer die Aufarbeitung (Mehl), desto stärker treten die arttypischen Geruchs- und Geschmackseigenschaften der Rohstoffe hervor, welche in bestimmten Endprodukten, z. B. Milchproduktalternativen, störend wirken können. Auch können Begleitsubstanzen wie ein zu hoher Stärkegehalt die Textur in pflanzlichen Drinks negativ beeinflussen. Dies erfordert eine Reduktion der Begleitsubstanzen und eine Anreicherung des Proteins durch entsprechende Prozesse. Diese Prozessierung beeinflusst nicht nur die technofunktionellen und sensorischen Eigenschaften der Zutaten, sondern auch deren Preis und Umweltfußabdruck.

Ferner sollte die Zusammenarbeit zwischen den Agrar- und Lebensmittelwissenschaften verstärkt werden, da vielfach noch nicht klar ist, welche Rohstoffe und welche Varietäten sich am besten eignen, um Proteinzutaten mit guten technofunktionellen Eigenschaften und neutralem Geschmack herzustellen. Zudem bleibt offen, ob es notwendig ist, ganz neue Varietäten zu entwickeln, die an die klimatischen Bedingungen angepasst sind und gleichzeitig die Anforderungen der Lebensmittelindustrie erfüllen.

Aus Sicht der Ernährungsphysiologie und Humanernährung ist es wichtig zu beachten, dass bei einem vollständigen Austausch tierischer Lebensmittel durch pflanzliche Alternativen wie es bspw. im Kontext eines veganen Ernährungsmusters praktiziert wird eine ausreichende Versorgung mit einigen essenziellen Nährstoffen nicht oder nur schwer möglich ist. Der kritischste Nährstoff ist Vitamin B_{12}. Weitere potenziell kritische Nährstoffe sind Protein bzw. unentbehrliche Aminosäuren, Calcium, Eisen, Jod und Zink. Pflanzliche Alternativprodukte können hier einen Beitrag zum Versorgungsstatus leisten, wenn sie günstig zusammengesetzt (ggf. angereichert) sind (z. B. calciumangereicherter Soja-Drink). Zu den langfristigen Effekten auf Versorgungsstatus, Risiko- und Gesundheitsparameter (einschließlich Verbraucher*innenakzeptanz) lassen sich derzeit jedoch keine validen Aussagen ableiten, da belastbare Daten aus Humanstudien fehlen. Darüber hinaus sollte bei der Bewertung eines pflanzlichen Alternativprodukts die gesamte Lebensmittelauswahl aus den verschiedenen Lebensmittelgruppen einfließen. Der Markt an pflanzlichen Proteinen bzw. daraus hergestellten Lebensmitteln ist äußerst vielfältig. Die Mehrzahl dieser Produkte ist bislang nicht in etablierte Nährstoffdatenbanken (z. B. Bundeslebensmittelschlüssel) eingegangen, sodass die Auswertungen von Ernährungserhebungen in Interventions- und Beobachtungsstudien mit Unsicherheiten behaftet sind, insbesondere in Bezug auf die Schätzung der Zufuhr unentbehrlicher Aminosäuren und essenzieller Mikronährstoffe. Dies erschwert die ernährungsphysiologische Bewertung des Beitrags pflanzlicher Proteinzutaten bzw. daraus hergestellter Produkte in der Humanernährung.

Aus Sicht der ökologischen Nachhaltigkeitsbewertung zeigt sich, dass der Klimafußabdruck der Proteinzutaten – und das gilt im Prinzip auch für den gesamten Umweltfußabdruck – mit zunehmender Proteinanreicherung zunimmt. Der Sprung vom Konzentrat zum Isolat ist dabei besonders groß. Geht man davon aus, dass der ökonomische Wert einer Zutat mit zunehmendem Proteingehalt je Masseeinheit ansteigt, und berücksichtigt man diese Gegebenheit bei der rechnerischen Zuordnung der Umweltwirkungen (Stichwort: ökonomische Allokation), wird dieser Unterschied noch deutlicher und sichtbarer, auch zwischen Mehl und Konzentrat.

Andererseits haben die Analysen der Proteinzutaten gezeigt, dass die Proteinfunktionalität (Technofunktionalität und Sensorik) im Zuge der Proteinanreicherung zielgerichteter auf die Anforderungen aus der Produktanwendung angepasst werden kann. Für die Herstellung von proteinreichen Lebensmitteln wird daher wahrscheinlich auch zukünftig verstärkt auf Proteinkonzentrate und -isolate zurückgegriffen werden. Es wäre daher wichtig, die damit verbundenen spezifischen Umweltlasten zu reduzieren. Dies könnte bspw. durch eine hochwertige Nutzung der Nebenströme erreicht werden, indem diese statt in der Tierfütterung in der Lebensmittelherstellung eingesetzt werden. Ein weiterer Faktor wäre eine verbesserte Energieeffizienz bei energieintensiven Verfahrensschritten, z. B. der Sprühtrocknung. Generell sollte aber auch die Herstellung bzw. Entwicklung von attraktiven Lebensmitteln aus nur gering verarbeiteten Proteinzutaten nicht aus dem Blick geraten, da hier naturgemäß nur wenige Nebenprodukte anfallen und die ökologischen Lasten am geringsten sind.

Die in diesem Beitrag gewählte interdisziplinäre Betrachtung verdeutlicht das Spannungsfeld, die Chancen und die Herausforderungen bei der Entwicklung von pflanzlichen Proteinzutaten und daraus hergestellten Lebensmitteln. Zusammenfassend bieten pflanzliche Proteine ein enormes Potenzial, erfordern jedoch weiterhin umfassende Forschung und Entwicklung. Die erfolgreiche Integration von Technofunktionalität, sensorischen Eigenschaften, ernährungsphysiologischer Qualität und Nachhaltigkeit ist entscheidend, um den wachsenden Anforderungen der Verbraucher*innen und den globalen Herausforderungen gerecht zu werden. Darüber hinaus können die sogenannten Alternativprodukte einen wesentlichen Beitrag zur Förderung und Umsetzung eines stärker pflanzenproteinbetonten Ernährungsmusters leisten.

CC BY NC ND

Förderung
Beitrag im Rahmen der Publikationsreihe des Innovationsraums NewFoodSystems – Fördermaßnahme „Innovationsräume Bioökonomie“ im Rahmen der „Nationalen Forschungsstrategie BioÖkonomie 2030“ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF).

NewFoodSystems
Neue Lebensmittelsysteme

Gefördert vom
Bundesministerium für Bildung und Forschung
Fördermaßnahme Innovationsräume Bioökonomie

Danksagung
Die Autor*innen danken dem BMBF-Innovationsraum NewFoodSystems für die Förderung der Vorhaben Nachhaltige Proteinzutaten (FKZ: 031B0956A, 031B0956P, 031B0956Q), AlProPlant (FKZ: 031B1366) und Ganzheitliche Bewertung (FKZ: B3101236H) sowie allen Kooperationspartner*innen, die in die Projekte integriert waren und maßgeblich zum Erfolg der Projekte beigetragen haben.
Mehr Informationen unter → www.newfoodsystems.de

Angaben zu Interessenkonflikten und zum Einsatz von KI
Die Autor*innen erklären, dass kein Interessenkonflikt besteht und bei der Erstellung des Manuskripts keine KI-Anwendungen eingesetzt wurden.

Literatur

1. *Li M, Zou L, Zhang L, et al.: Plant-based proteins: advances in their sources, digestive profiles in vitro and potential health benefits. Crit Rev Food Sci Nutr 2024: 1–21.*
2. *Schweiggert-Weisz U, Etzbach L, Gola S, et al.: Opinion piece: new plant-based food products between technology and physiology. Mol Nutr Food Res 2024; 68(20): e2400376.*
3. *Joint FAO/WHO Codex Alimentarius Commission: Codex alimentarius: Cereals, pulses, legumes and vegetable proteins: Codex general standard for soy protein products. CODEX STAN 175-1989 2007.*
4. *Schutyser M, Pelgrom P, van der Goot AJ, Boom RM: Dry fractionation for sustainable production of functional legume protein concentrates. Trends Food Sci Technol 2015; 45(2): 327–35.*
5. *Rivera J, Siliveru K, Li Y: A comprehensive review on pulse protein fractionation and extraction: processes, functionality, and food applications. Crit Rev Food Sci Nutr 2022: 1–23.*
6. *Tan M, Nawaz MA, Buckow R: Functional and food application of plant proteins – a review. Food Reviews International 2023; 39(5): 2428–56.*
7. *Etzbach L, Gola S, Küllmer F, et al.: Opportunities and challenges of plant proteins as functional ingredients for food production. Proc Natl Acad Sci U S A 2024; 121(50): e2319019121.*
8. *Moure A, Sineiro J, Domínguez H, Parajó JC: Functionality of oilseed protein products: A review. Food Res Int 2006; 39(9): 945–63.*
9. *Guo M: Soy food products and their health benefits. In: Functional Foods. Elsevier 2009; 237–277.*
10. *Pulivarthi MK, Buenavista RM, Bangar SP, et al.: Dry fractionation process operations in the production of protein concentrates: a review. Compr Rev Food Sci Food Saf 2023; 22(6): 4670–97.*
11. *Supun Fernando: Production of protein-rich pulse ingredients through dry fractionation: a review. LWT – Food Sci Technol 2021; 141: 110961.*
12. *Mondor M, Hernández-Álvarez AJ: Processing Technologies to Produce Plant Protein Concentrates and Isolates. In: Manickavasagan A, Lim L-T, Ali A (eds.): Plant protein foods. Switzerland: Springer 2022; 61–108.*
13. *Gao K, Rao J, Chen B: Plant protein solubility: a challenge or insurmountable obstacle. Adv Colloid Interface Sci 2024; 324: 103074.*
14. *Rajpurohit B, Li Y: Overview on pulse proteins for future foods: Ingredient development and novel applications. J Future Foods 2023; 3(4): 340–56.*
15. *Zhao M, Xiong W, Chen B, Zhu J, Wang L: Enhancing the solubility and foam ability of rice glutelin by heat treatment at pH12: Insight into protein structure. Food Hydrocoll 2020; 103: 105626.*
16. *Schweiggert-Weisz U, Eisner P, Bader-Mittermaier S, Osen R: Food proteins from plants and fungi. Curr Opin Food Sci 2020; 32: 156–62.*
17. *Sherman P: A critique of some methods proposed for evaluating the emulsifying capacity and emusion stabilizing performance of vegetable protein. Ital J Food Sci 1995; 7(1): 3–10.*
18. *Tsoukala A, Papalamprou E, Makri E, Doxastakis G, Braudo EE: Adsorption at the air – water interface and emulsification properties of grain legume protein derivatives from pea and broad bean. Colloids Surf B Biointerfaces 2006; 53(2): 203–8.*
19. *Shi D, Nickerson MT: Comparative evaluation of the functionality of faba bean protein isolates with major legume proteins in the market. Cereal Chem 2022; 99(6): 1246–60.*
20. *Amagliani L, Silva JV, Saffon M, Dombrowski J: On the foaming properties of plant proteins: Current status and future opportunities. Trends Food Sci Technol 2021; 118: 261–72.*
21. *Góral I, Wojciechowski K: Surface activity and foaming properties of saponin-rich plants extracts. Adv Colloid Interface Sci 2020; 279: 102145.*
22. *Cermeño M, Silva JV, Arcari M, Denkel C: Foaming properties of plant protein blends prepared using commercial faba bean and hemp protein concentrates at different faba bean/hemp protein ratios. LWT - Food Sci Technol 2024; 198: 115948.*
23. *Ma KK, Greis M, Lu J, Nolden AA, McClements DJ, Kinchla AJ: Functional performance of plant proteins. Foods 2022; 11(4).*
24. *The Good Food Institute Europe: Alternative Proteine in Deutschland: Report zu aktuellen Entwicklungen rund um nachhaltige Proteinquellen auf Basis von Pflanzen, Zellkultivierung und Fermentation. 2023.*
25. *Fiorentini M, Kinchla AJ, Nolden AA: Role of Sensory Evaluation in Consumer Acceptance of Plant-Based Meat Analogs and Meat Extenders: a Scoping Review. Foods 2020; 9(9).*
26. *Short EC, Kinchla AJ, Nolden AA: Plant-Based Cheeses: A Systematic Review of Sensory Evaluation Studies and Strategies to Increase Consumer Acceptance. Foods 2021; 10(4).*
27. *Nicolás Saraco M, Blaxland J: Dairy-free imitation cheese: is further development required? Br Food J 2020; 122(12): 3727–40.*
28. *Stephany M, Kapusi K, Bader-Mittermaier S, Schweiggert-Weisz U, Carle R: Odour-active volatiles in lupin kernel fibre preparations (Lupinus angustifolius L.): effects of thermal lipoxygenase inactivation. Eur Food Res Technol 2016; 242(7): 995–1004.*
29. *Bader S, Czerny M, Eisner P, Buettner A: Characterisation of odour-active compounds in lupin flour. J Sci Food Agric 2009; 89(14): 2421–7.*

CC BY NC ND

30. Meinlschmidt P, Schweiggert-Weisz U, Eisner P: Soy protein hydrolysates fermentation: Effect of debittering and degradation of major soy allergens. LWT – Food Sci Technol 2016; 71: 202–12.
31. Meinlschmidt P, Ueberham E, Lehmann J, Schweiggert-Weisz U, Eisner P: Immunoreactivity, sensory and physicochemical properties of fermented soy protein isolate. Food Chem 2016; 205: 229–38.
32. Hofmann T, Dawid C, Langowski H-C, Eisner P: Klärung der Ursachen des bitter-adstringierenden Fehlgeschmacks von pflanzlichen Proteinisolaten und Erarbeitung technologischer Parameter für eine Qualitätsverbesserung: Schlussbericht zu IGF-Vorhaben 18814 N 2018.
33. Jakobson K, Kaleda A, Adra K, et al.: Techno-functional and sensory characterization of commercial plant protein powders. Foods 2023; 12(14).
34. Vatansever S, Chen B, Hall C: Plant protein flavor chemistry fundamentals and techniques to mitigate undesirable flavors. Sustain Food Proteins 2024; 2(1): 33–57.
35. Lippolis A, Roland WSU, Bocova O, Pouvreau L, Trindade LM: The challenge of breeding for reduced off-flavor in faba bean ingredients. Front Plant Sci 2023; 14: 1286803.
36. IFIC: IFIC Food and Health Survey. Washington, DC (USA): The International Food Information Council (IFIC) Foundation 2024.
37. Ares G, Bruzzone F, Vidal L, et al.: Evaluation of a rating-based variant of check-all-that-apply questions: Rate-all-that-apply (RATA). Food Qual Prefer 2014; 36: 87–95.
38. Deutsche Gesellschaft für Ernährung (DGE), Österreichische Gesellschaft für Ernährung (ÖGE), Schweizerische Gesellschaft für Ernährung (SGE): Referenzwerte für die Nährstoffzufuhr: Kapitel Protein und unentbehrliche Aminosäuren. 3rd ed. 2017.
39. Richter M, Boeing H, Grünewald-Funk D, et al.: Vegan diet. Position of the German Nutrition Society (DGE). Ernahrungs Umschau 2016; 63(4): 92–102. Erratum in: 63(5): M262.
40. Klug A, Barbaresko J, Alexy U, et al.: Neubewertung der DGE-Position zu veganer Ernährung-Positionspapier der Deutschen Gesellschaft für Ernährung e. V. (DGE). Ernahrungs Umschau 2024; 71(7): 60–84.
41. Gwin JA, Carbone JW, Rodriguez NR, Pasiakos SM: Physiological limitations of protein foods ounce equivalents and the underappreciated role of essential amino acid density in healthy dietary patterns. J Nutr 2021; 151(11): 3276–83.
42. Herreman L, Nommensen P, Pennings B, Laus MC: Comprehensive overview of the quality of plant- and animal-sourced proteins based on the digestible indispensable amino acid score. Food Sci Nutr 2020; 8(10): 5379–91.
43. Langyan S, Yadava P, Khan FN, Dar ZA, Singh R, Kumar A: Sustaining protein nutrition through plant-based foods. Front Nutr 2021; 8: 772573.
44. Haase H, Ellinger S, Linseisen J, Neuhäuser-Berthold M, Richter M: Revised D-A-CH-reference values for the intake of zinc. J Trace Elem Med Biol 2020; 61: 126536.
45. Schmidt JA, Crowe FL, Appleby PN, Key TJ, Travis RC: Serum uric acid concentrations in meat eaters, fish eaters, vegetarians and vegans: a cross-sectional analysis in the EPIC-Oxford cohort. PLoS One 2013; 8(2): e56339.
46. Zhang M, Lin L, Liu H: Acute effect of soy and soy products on serum uric acid concentration among healthy Chinese men. Asia Pac J Clin Nutr 2018; 27(6): 1239–42.
47. Zhang W-Z: Uric acid en route to gout. Adv Clin Chem 2023; 116: 209–75.
48. Präger L, Simon JC, Treudler R: Food allergy – New risks through vegan diet? Overview of new allergen sources and current data on the potential risk of anaphylaxis. J Dtsch Dermatol Ges 2023; 21(11): 1308–13.
49. ISO 14040:2006-07: Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen.
50. ISO 14044:2006: Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen.
51. Detzel A, Kauertz B, Grahl B, Heinisch J: Prüfung und Aktualisierung der Ökobilanzen für Getränkeverpackungen, Kap. 5.9 Wirkungsabschätzung. Umweltbundesamt; Texte 19/2016.
52. Rockström J, Steffen W, Noone K, et al.: A safe operating space for humanity. Nature 2009; 461(7263): 472–5.
53. Steffen W, Richardson K, Rockström J, et al.: Sustainability. Planetary boundaries: guiding human development on a changing planet. Science 2015; 347(6223): 1259855.
54. Richardson K, Steffen W, Lucht W, et al.: Earth beyond six of nine planetary boundaries. Sci Adv 2023; 9(37): eadh2458.
55. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC): Climate change 2021: The physical science basis Working Group I contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 1st ed. Cambridge: Cambridge University Press 2023.
56. Berghout JA: Functionality-driven fractionation of lupin seeds. Wageningen University and Research ProQuest Dissertations & Theses 2015.
57. Lie-Piang A, Braconi N, Boom RM, van der Padt A: Less refined ingredients have lower environmental impact – a life cycle assessment of protein-rich ingredients from oil- and starch-bearing crops. J. Clean. Prod. 2021; 292: 126046.
58. Thrane M, Paulsen PV, Orcutt MW, Krieger TM: Soy Protein. In: Nadathur SR, Wanasundara JPD, Scanlin L (eds.): Sustainable Protein Sources. Elsevier 2017, 23–45.