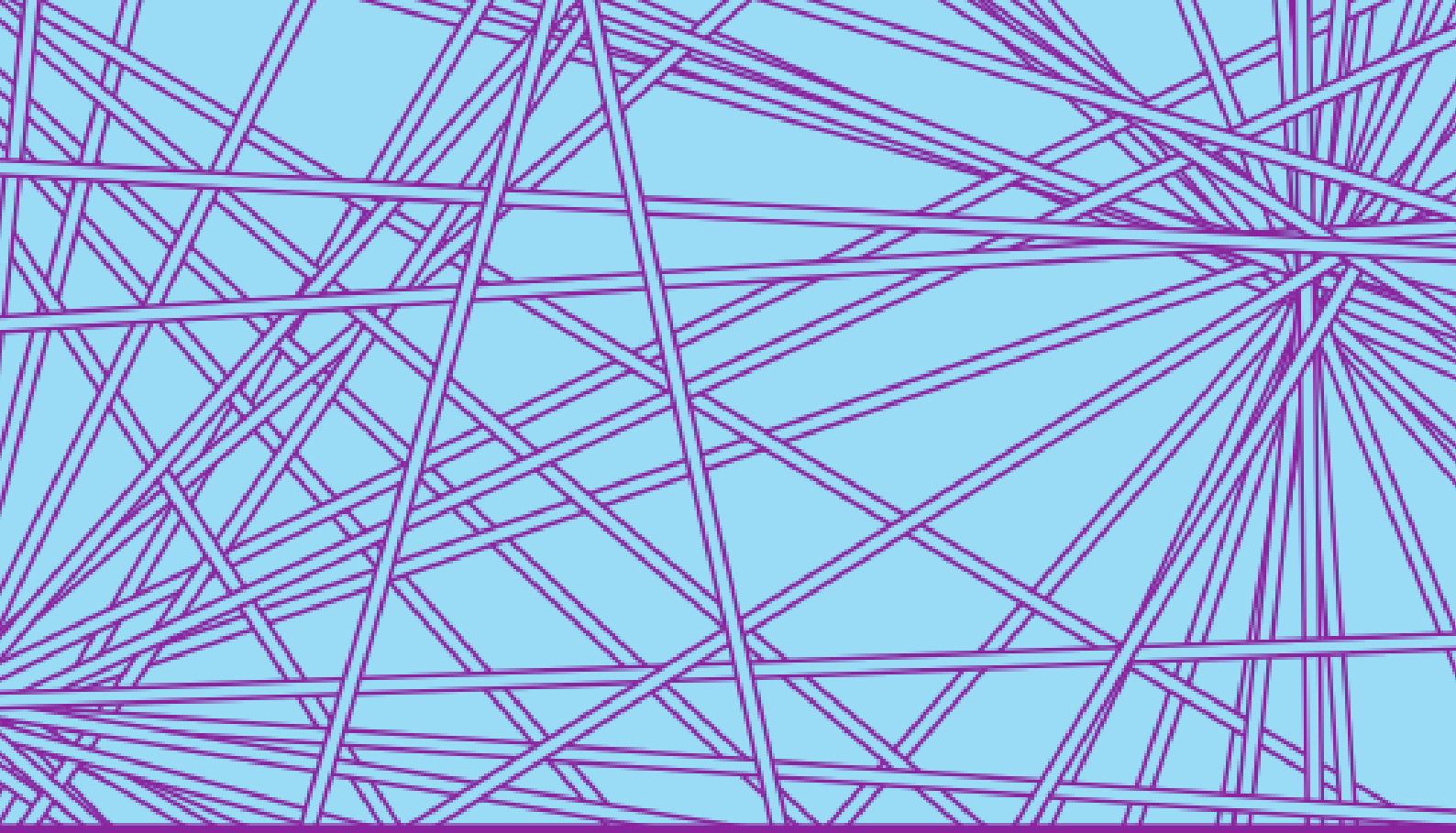


White Paper

Verarbeitung innovativer Rohstoffe

Zusammenfassung

Die Lebensmittelproduktion der Zukunft steht vor der Herausforderung, eine wachsende Bevölkerung mit hochwertigen Lebensmitteln zu versorgen und gleichzeitig Ressourcenverbrauch und Umweltbelastungen zu reduzieren. Innovative Rohstoffe können dazu einen wichtigen Beitrag leisten – von klimaresilienten Kulturpflanzen bis hin zu neuartigen aquatischen und biotechnologischen Produktionssystemen.

Dieses White Paper startet mit einem Überblick über als innovativ gesehene neue Rohmaterialien und beleuchtet exemplarisch fünf Rohmaterialien im Detail: Hülsenfrüchte, Hirse, Wasserlinsen, zellkultivierten Kakao sowie Single-Cell-Protein aus wasserstoffoxidierenden Bakterien. Sie werden hinsichtlich Produktion, Nährwert, sensorischer Eigenschaften, Umweltwirkung, regulatorischer Rahmenbedingungen und Verarbeitungsmöglichkeiten betrachtet. Dabei zeigt sich, dass die unterschiedlichen Ansätze weniger als direkte Alternativen, sondern vielmehr als komplementäre Bausteine zukünftiger Lebensmittelsysteme zu verstehen sind. Entscheidend für ihr Potenzial sind neben ökologischen und ernährungsphysiologischen Vorteilen insbesondere eine wirtschaftlich skalierbare Verarbeitung, gesellschaftliche Akzeptanz und regulatorische Umsetzbarkeit.

Impressum

Veröffentlichungsdatum: 17.09.2026

Veröffentlichungsort: www.zhaw.ch/cirvalis

Autorenschaft: ZHAW, Institut für Lebensmittel- und Getränkeinnovation, Forschungsgruppe Lebensmitteltechnologie, Projektteam Cirvalis

Kontakt: knowledge-hub@zhaw.ch

Finanzierung: Wir danken der Seedling Foundation für die Finanzierung des Projektes Cirvalis.

Disclaimer: Alle Inhalte wurden mit grösstmöglicher Sorgfalt erstellt. KI-gestützte Werkzeuge wurden im Rahmen dieser Arbeit unterstützend zur Literaturrecherche und zur Erstellung grafischer Darstellungen eingesetzt. Sämtliche KI-gestützt erarbeiteten Inhalte wurden eigenständig anhand wissenschaftlicher Quellen auf ihre Richtigkeit und Plausibilität überprüft und bei Bedarf überarbeitet. Texte, Abbildungen und Daten unterliegen dem Urheberrecht. Die Verwendung oder Vervielfältigung ist nur mit Quellenangabe gestattet. Wo nicht anders genannt, steht dieses Werk unter der Lizenz Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International, CC BY-SA 4.0



Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung 2
1. Innovative Rohstoffe 5
1.1. Was macht Rohstoffe innovativ? 5
1.2. Welche innovativen Rohstoffe gibt es 6
2. Steckbrief 9
2.1. Hülsenfrüchte 9
2.1.1 Produktion 9
2.1.2 Nährwert 9
2.1.3 Sensorisches Profil 10
2.1.4 Umweltbelastung 10
2.1.4 Regulatorische Aspekte 10
2.2. Hirse 11
2.2.1. Produktion 11
2.2.2 Nährwert 11
2.2.3 Sensorisches Profil 12
2.2.4 Umweltbelastung 12
2.2.5 Regulatorische Aspekte 13
2.3 Wasserlinsen 13
2.3.1 Produktion 13
2.3.2 Nährwert 14
2.3.3 Sensorisches Profil 14
2.3.4 Umweltbelastung 14
2.3.5 Regulatorische Aspekte 15
2.4 Zellkultivierter Kakao 15
2.4.1 Produktion 15
2.4.2 Nährwert 15
2.4.3 Sensorisches Profil 16
2.4.4 Umweltbelastung 16
2.4.5 Regulatorische Aspekte 16
2.5 Single cell Protein (SCP) aus Wasserstoff-oxidierenden Bakterien 17
2.5.1 Produktion 17
2.5.2 Nährwert 17
2.5.3 Sensorisches Profil 18

2.5.4 Umweltbelastung 18
2.5.5 Regulatorische Aspekte 18
3 Verarbeitungsansätze 19
3.3 Hülsenfrüchte 19
3.4 Hirse 19
3.5 Wasserlinsen 20
3.6 Zellkultivierter Kakao 20
3.7 Single-cell-protein aus Wasserstoff-oxidierenden Bakterien 21
4 Innovative Rohmaterialien im Vergleich 22
4.1 Gesamtbewertung 22
5 Literaturliste 24

1. Innovative Rohstoffe

1.1. Was macht Rohstoffe innovativ?

Innovative Lebensmittelrohmaterialien sind für dieses White Paper als Ressourcen definiert, die zur Lebensmittelproduktion eingesetzt werden können und durch verbesserte Nachhaltigkeit bezüglich CO_2 Emissionen, Wasserbedarf, Wasserverschmutzung und/oder Bodennutzung zur Transformation zukünftiger Ernährungssysteme beitragen. Hierbei sind insbesondere alternative Produktionsmethoden im Wasser oder Reaktor statt auf Ackerflächen, Ackerpflanzen mit einer höheren Resilienz (z.B. Resistenz gegenüber Dürre), Produkte mit herausragender ernährungsphysiologischer Qualität sowie Nebenströme im Fokus. Die Kriterien zur Beurteilung der Innovativität und Nachhaltigkeit von Rohmaterialien sind in Abb. 1 zusammengefasst.

Abb. 1: Kriterien zur Beurteilung der Innovativität und Nachhaltigkeit von Rohmaterialien.



Innovative Rohstoffe werden dann zukunftsfähig, wenn sie gleichzeitig folgende Kriterien erfüllen (Abb. 2):

- ökologisch nachhaltig,
- ökonomisch skalierbar,
- ernährungsphysiologisch sinnvoll,
- gesellschaftlich akzeptiert, und
- regulatorisch umsetzbar.

Abb. 2: Kriterien zur Bemessung der Zukunftsfähigkeit von innovativen Rohstoffen.



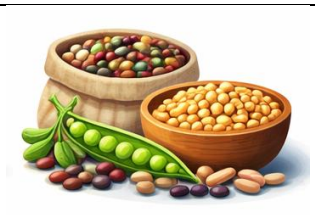
Die Lebensmittelproduktion der Zukunft steht vor der Herausforderung, eine wachsende Bevölkerung mit hochwertigen Lebensmitteln zu versorgen und gleichzeitig Ressourcenverbrauch und Umweltbelastungen zu reduzieren. Innovative Rohmaterialien können hierzu auf sehr unterschiedliche Weise beitragen. Innovation bedeutet dabei nicht zwingend, dass ein Rohmaterial neu ist. Auch etablierte Kulturpflanzen können aufgrund ihrer besonderen Eigenschaften für zukünftige Ernährungssysteme an Bedeutung gewinnen. Gleichzeitig eröffnen neue Produktionsverfahren Möglichkeiten, Lebensmittelrohstoffe zunehmend unabhängig von klassischen landwirtschaftlichen Flächen und klimatischen Bedingungen herzustellen.

1.2. Welche innovativen Rohstoffe gibt es

Tabelle 1 zeigt eine Vielfalt an innovativen Rohstoffen, die es bereits gibt und beschreibt kurz, wo ihr potentieller Beitrag zu einer nachhaltigeren Rohmaterialproduktion liegt.

Tab. 1: Auswahl von innovativen Rohstoffen.

Name	Visualisierung	Kurzbeschrieb
Mykoprotein		Mykoproteine sind Proteine mikrobiellen Ursprungs, welches durch Umwandlung verschiedener Rohstoffe mit *Fusarium venenatum* hergestellt wird. Quorn ist ein eingetragenes Warenzeichen für Mykoprotein [1].
Edelpilze		Edelpilze wie Kräuterseitlinge, Austernseitlinge, Shitake, etc. stammen aus dem Kulturanbau und sind im Gegensatz zu Waldpilzen praktisch frei von Schadstoffen. Ihr hoher Proteingehalt (19-35% der Trockenmasse) und die breiten Verarbeitungsmöglichkeiten macht Edelpilze zu einem spannenden Rohmaterial in einer fleischarmen Ernährung. [2,3]

Hülsenfrüchte		Hülsenfrüchte wie Erbsen, Linsen, Bohnen, Sojabohnen, Lupinen und weitere sind längliche, mit Samen gefüllte Streufrüchte (auch Hülsen genannt) der Körnerleguminosen. Auf Grund ihres hohen Proteingehaltes (approx. 21-25%) und ihrer ackerbautechnischen Eigenschaft, Stickstoff aus der Luft binden zu können, sind sie ein beliebter und als nachhaltig angesehener Eiweisslieferant. [4]
Hirse		Der Begriff Hirse ist eine Sammelbezeichnung für 10-12 Gattungen an Spelzgetreide mit kleinen Früchten. Unter den Hirsen gibt es die zwei Hauptgruppen Sorghumhirsen (kurz: Sorghum) und Millethirsen (dazu gehören Rispenshirsen, Perlhirsen, Teff u.w.). Sorghumhirsen haben grössere Körner und Hektarerträge im Vergleich zu Millethirsen.
Phytoplankton		Phytoplankton oder pflanzlicher Plankton ist eine Sammelbezeichnung für alle im Wasser frei schwebenden, photosynthetisch aktiven Mikroorganismen. Phytoplankton enthält Kieselalgen, Grünalgen, Dinoflagellaten und weitere oft einzellige Algen sowie Cyanobakterien. [5]
Mikroalgen		Mikroalgen sind meist einzellige, eukaryotische, mikroskopisch kleine Organismen, die Photosynthese betreiben und üblicherweise im Wasser leben. [6]
Makroalgen		Markoalgen sind meist marine, mehrzellige Algen aus den Gruppen der Grün-, Rot- und Braunalgen. Ihr Vegetationskörper kann als Gemüse oder Gewürz genutzt werden kann oder aus denen Polysaccharide wie Carrageen und Agar-Agar gewonnen werden kann.
Wasserlinsen / *Wolffia*		Wasserlinsen der Gattung *Wolffia* sind die kleinsten blühenden Pflanzen mit 0.5 bis 1.5mm Grösse und gehören zur Familie der Lemnaceae. Sie zeichnen sich durch ihr sehr rasches Wachstum aus (Verdoppelung der Biomasse innert 34-36 h ihr Biomasse) und enthalten 20-35% Protein in der Trockenmasse. Im Lebensmittelbereich wird meist mit *Wolffia globosa* gearbeitet.
Single-cell Protein		Single-cell Protein wird als Bezeichnung für getrocknete, essbare Biomasse auf Basis von Mikroorganismen wie Bakterien, Hefen, Schimmelpilzen und Mirkoalgen verwendet, welche im Bioreaktor gezüchtet wurden. Der Proteingehalt ist mit 40-80% der Trockenmasse sehr hoch. [7,8] Als Untergruppe können Wasserstoffoxidierende Mikroorganismen (z.B. *Cupriavidus necator*, oft Knallgasbakterien genannt) aus Wasserstoff als Energiequelle, Sauerstoff und Kohlendioxid als Kohlenstoffquelle in Gasreaktoren proteinreiche Biomasse (60-80% Protein in Trockenmasse) aufbauen.

Cellular Agriculture		Cellular Agriculture ist die Produktion von Produkten wie Fleisch, Milch und Eiern, aber auch Leder oder Fasern direkt aus Zellkulturen an Stelle von Tieren oder Pflanzen. Die Disziplin kombiniert biotechnologische und molekularbiologische Ansätze mit Strukturierungsansätzen, um Lebensmittel in einer kontrollierten, nachhaltigen Weise zu produzieren. Es wird unterschieden zwischen kultivierten Produkten, in denen kleine Mengen an tierischen der pflanzlichen Zellen in Reaktoren vervielfacht werden (bspw. Milchproteine, Eiproteine, Fleisch, Fisch, Kakao) und Precision fermentation, bei denen keine lebenden Zellen eingesetzt werden, sondern spezifische organische Moleküle mittels Mikroorganismen produziert werden. [9,10]
Insektenprotein		Insektenprotein ist Eiweiss, das aus essbaren Insekten wie Mehlwürmer, Grillen oder Heuschrecken gewonnen wird. Es enthält alle essentiellen Aminosäuren und gilt dank ressourcenschonender Produktion als nachhaltig.
Lebensmittel-nebenströme		Als Lebensmittelnebenströme (auch Nebenprodukte) werden Rohstoffe, Reststoffe oder essbare Produktströme bezeichnet, die bei der Herstellung, Verarbeitung oder Veredelung von Gütern anfallen, aber nicht das eigentliche Hauptzielprodukt darstellen.

Im Folgenden wird nur eine Auswahl der oben erwähnten Rohstoffe im Detail diskutiert:

- Hülsenfrüchte als stickstoffbindende proteinreiche Ackerpflanze
- Hirse als besonders resiliente Ackerpflanze
- Wasserlinsen
- Zellkultivierter Kakao als Vertreter der Produkte aus cellular agriculture
- Single-cell-protein aus Wasserstoff-oxidierenden Bakterien

Mit Hülsenfrüchten und Hirse werden etablierte Ackerpflanzen betrachtet, die unter anderem durch Stickstofffixierung beziehungsweise eine hohe Trockenheits- und Hitzetoleranz zu ressourcenschonenderen und klimaresilienteren Anbausystemen beitragen können. Wasserlinsen stehen für schnell wachsende aquatische Pflanzen mit hoher Flächen- und Proteineffizienz und damit für eine alternative Form der pflanzlichen Biomasseproduktion. Zellkultivierter Kakao und Single-Cell-Protein aus wasserstoffoxidierenden Bakterien repräsentieren schliesslich biotechnologische Ansätze, bei denen die Produktion teilweise oder vollständig von klassischen landwirtschaftlichen Anbauflächen entkoppelt wird.

Die Beispiele reichen somit von etablierten Kulturpflanzen bis zu neuartigen Produktionssystemen und unterscheiden sich entsprechend stark hinsichtlich technologischer Reife, Produktion und Verarbeitung, Nährwert, Umweltwirkung und regulatorischer Anforderungen. Sie sind daher nicht als direkte Alternativen zueinander zu verstehen. Vielmehr zeigen sie exemplarisch unterschiedliche Wege auf, wie Rohmaterialien zur Transformation zukünftiger Lebensmittelsysteme beitragen können. Das White Paper beleuchtet ihre jeweiligen Eigenschaften, Chancen und Herausforderungen und zeigt auf, welche Rolle die Verarbeitung dabei spielt, ihr Potenzial für die Entwicklung zukünftiger Lebensmittel nutzbar zu machen.

2. Steckbrief

2.1. Hülsenfrüchte

2.1.1 Produktion

Hülsenfrüchte (Abb. 3) werden weltweit auf allen Kontinenten angebaut. Zu den wichtigsten Produzenten gehören die Länder Indien, Kanada, China, Myanmar und Brasilien. Die globale Produktion konzentriert sich vor allem auf Trockenbohnen, Erbsen, Kichererbsen und Linsen.

Ein besonderes Merkmal von Hülsenfrüchten ist ihre Fähigkeit zur Stickstofffixierung aus der Luft durch die Symbiose mit Rhizobien-Bakterien, auch Knöllchenbakterien genannt. Dadurch reduziert sich der Bedarf an mineralischen Stickstoffdüngern, was ökonomische und ökologische Vorteil bietet.

In Fruchtfolgesystemen verbessern Hülsenfrüchte die Bodenfruchtbarkeit und können die Erträge nachfolgender Kulturen steigern. Dennoch sind ihre Erträge häufig stärker von klimatischen Bedingungen abhängig als bei Getreidearten, weshalb ihr Anbau in vielen Regionen noch begrenzt ist. [11]

Konsumiert werden die getrockneten Samen, welche in Hülsen wachsen.



Abb. 3: Gelberbse und Samen der Gelberbse (Quellen: Unsplash, Bori Balogh, Monika Grabkowska).

2.1.2 Nährwert

Hülsenfrüchte zeichnen sich durch eine hohe Nährstoffdichte aus (Abb. 4). Die genaue Zusammensetzung variiert zwischen Hülsenfrüchten. Der hohe Proteingehalt (18-40%) macht Hülsenfrüchte zu einer wichtigen Alternative zu tierischen Proteinquellen. Allerdings sind einige essentielle Aminosäuren, insbesondere Methionin, Tryptophan und Cystein, limitierend. Deshalb werden Hülsenfrüchte häufig mit Getreide kombiniert, um eine höhere Proteinqualität zu erreichen.

Weiter bestehen Hülsenfrüchte zu 60-65% aus Kohlenhydraten. Neben Stärke als grösstem Bestandteil, enthalten die Kotyledonen grössere Mengen an löslichen Nahrungsfasern, resistente Stärke und Oligosaccharide. Letztere können bei empfindlichen oder nicht an Hülsenfrüchte gewöhnte Personen zu Flatulenz führen. Der Gehalt an Vitaminen und Mineralien (u.a. Eisen, Zink, Kalzium, Magnesium) ist hoch. Darüber hinaus enthalten sie bioaktive Verbindungen wie Polyphenole.

Neben ernährungsphysiologisch wertvollen Komponenten enthalten Hülsenfrüchte auch Antinährstoffe wie Trypsininhibitor, Polyphenole, Lektine und Saponine, welche durch die Prozessierung inaktiviert werden müssen oder die Bioverfügbarkeit limitieren. [11,12]

Hülsenfrüchte sind glutenfrei und damit geeignet für Personen, die an Zöliakie leiden.

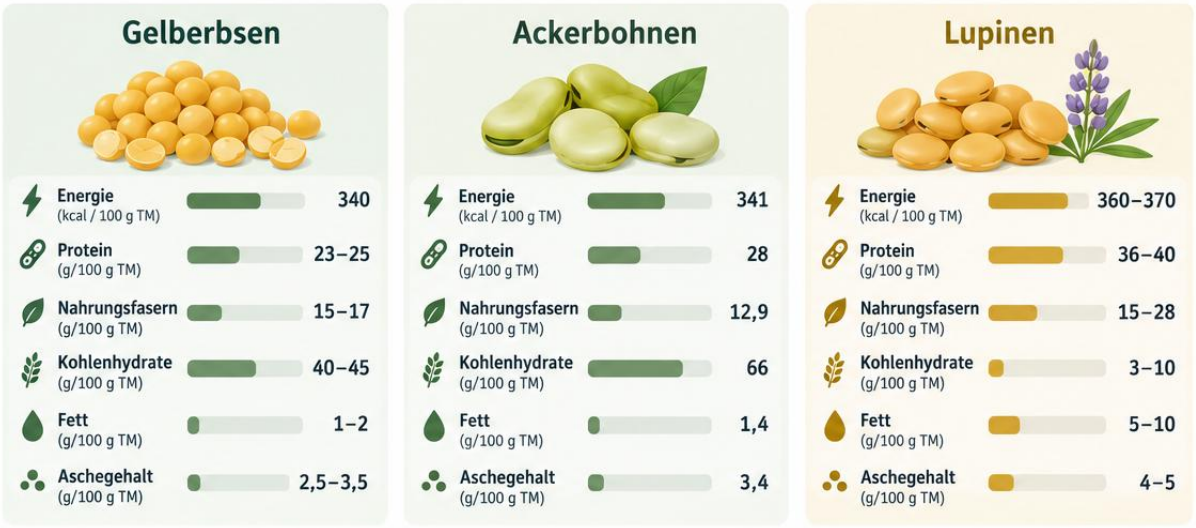


Abb. 4: Nährwertzusammensetzung von Gelberbsen, Lupinen und Ackerbohnen, Bild ChatGPT [13–15].

2.1.3 Sensorisches Profil

Typische sensorische Eigenschaften von Hülsenfrüchten umfassen nussige Noten, erdige Aromen sowie leicht bittere oder adstringierende Geschmacksnoten. Bei manchen Arten von Hülsenfrüchten treten ausgeprägte bohnige und grüne Aromen auf, welche vor allem durch Lipidoxidation sowie flüchtige Verbindungen wie Aldehyde und Alkohole verursacht werden.

Die Textur von gekochten Hülsenfrüchten unterscheidet sich je nach Sorte und kann von weich und cremig (z. B. rote Linsen), über fest und körnig (z. B. Kichererbsen) bis zu mehlig (z. B. einige Bohnenarten) reichen.

Die sensorischen Eigenschaften beeinflussen die Verbraucherakzeptanz erheblich und sind besonders relevant für die Entwicklung pflanzenbasierter Fleisch- und Milchersatzprodukte. [16,17]

2.1.4 Umweltbelastung

Hülsenfrüchte gelten als vergleichsweise umweltfreundliche Proteinquelle. Die positiven Umweltwirkungen der Pflanzen sind ihr geringerer Stickstoffdüngerbedarf durch Stickstofffixierung, die tieferen Treibhausgasemissionen und der niedrigere Wasserverbrauch im Vergleich zu tierischen Proteinen sowie die Verbesserung der Bodenqualität und dadurch die Förderung der Biodiversität in Fruchtfolgen.

Herausfordernd ist hingegen der teilweise geringere Flächenertrag, die Wetterabhängigkeit sowie Transportemissionen bei Importware. [11,18]

2.1.4 Regulatorische Aspekte

Die regulatorischen Anforderungen an Hülsenfrüchte betreffen insbesondere Lebensmittelsicherheit, Kennzeichnung und Qualitätsstandards.

Traditionelle Hülsenfrüchte gelten nicht als Novel Food. Neuartige Proteinextrakte oder fermentierte Zutaten aus Hülsenfrüchten können jedoch unter die Novel-Food-Verordnung fallen[19].

Zudem gehören Sojabohnen zu den kennzeichnungspflichtigen Allergenen in der EU. Andere Hülsenfrüchte können Kreuzreaktionen hervorrufen, sind jedoch meist nicht deklarationspflichtig.

2.2. Hirse

2.2.1. Produktion

Hirse wird hauptsächlich in trockenen und semiariden Regionen Afrikas und Asiens angebaut. Die weltweit grössten Produzenten sind Indien, Nigeria, Niger, China und Sudan. Im Vergleich zu Weizen oder Mais zeichnet sich Hirse durch eine hohe Trockenheitstoleranz und Anpassungsfähigkeit an nährstoffarme Böden aus.

Ein grosser Vorteil der Hirseproduktion ist zudem ein geringer Bedarf an Wasser und Betriebsmitteln. Viele Hirsearten können unter Bedingungen wachsen, die für andere Getreidearten ungeeignet sind. Dadurch trägt Hirse zur Ernährungssicherung in Regionen bei, die besonders von Klimawandel und Wasserknappheit betroffen sind und sind zunehmend auch für den Anbau in der Schweiz interessant. Da auch ein später Anbau von Hirse möglich ist, können Ernteausfälle in klimatisch schwierigen Jahren ausgeglichen werden.

Die Erträge sind zwar häufig niedriger als bei intensiv angebauten Getreiden, jedoch bleibt die Produktion auch unter schwierigen Umweltbedingungen vergleichsweise stabil.[20,21]

In der Schweiz wird of Rispenhirse angebaut, wovon die Körner konsumiert werden (Abb. 5).



Abb. 5: Rispenhirse (Bild: Unsplash, Yuki Ho), Hirsekörner (Bild: Unsplash, Monika Grabkowska).

2.2.2 Nährwert

Hirse besitzt eine hohe Nährstoffdichte (Abb. 6) und ist eine wertvolle Quelle für Kohlenhydrate, Ballaststoffe und Mikronährstoffe.

Ihr Proteingehalt ist mit 7-13% vergleichbar zu anderen Getreidearten, die Proteinqualität jedoch nur moderat. Limitierende Aminosäuren sind häufig Lysin und teilweise Threonin. Eine Kombination mit Hülsenfrüchten verbessert die biologische Wertigkeit deutlich.

Besonders hervorzuheben ist der hohe Gehalt an Mineralstoffen wie Eisen, Magnesium und Phosphor. Einige Hirsearten enthalten zudem relevante Mengen an antioxidativen Polyphenolen.

Im Gegensatz zu Weizen, Roggen und Gerste ist Hirse von Natur aus glutenfrei und eignet sich daher für Menschen mit Zöliakie oder Glutenunverträglichkeit. [20,21]

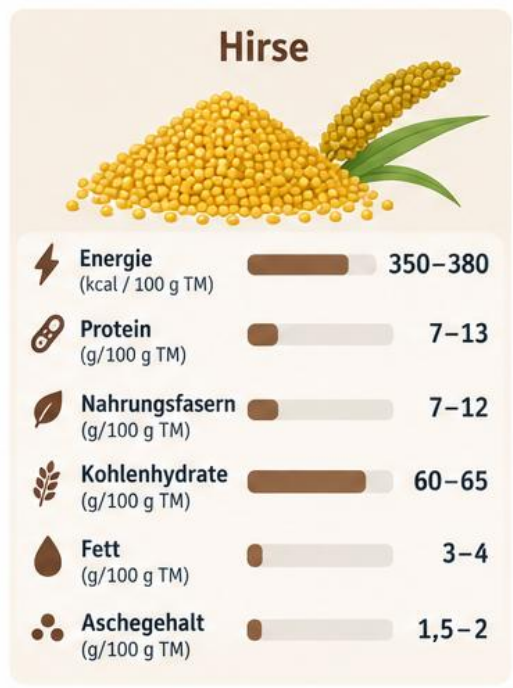


Abb. 6: Nährwertzusammensetzung von Hirse, Bild ChatGPT [21].

2.2.3 Sensorisches Profil

Die sensorischen Eigenschaften von Hirse variieren je nach Art und Verarbeitung.

Typisch ist ein nussiger Geschmack und eine dezente Süsse, bei Vollkornprodukten teilweise leicht herbe oder bittere Noten. Dunklere Hirsearten wie Fingerhirse enthalten mehr phenolische Verbindungen, die das Aroma beeinflussen können.

Die Textur ist locker und körnig nach dem Kochen, cremig in Breien und Porridge-Produkten, knusprig in gepuffter Form und leicht sandig in Vollkornprodukten. [21,22]

Aufgrund ihres milden Geschmacks eignet sich Hirse sowohl für süsse als auch für herzhafte Anwendungen.

2.2.4 Umweltbelastung

Hirse zählt zu den nachhaltigsten Getreidearten, da sie sehr viel geringeren Wasserbedarf als Reis oder Weizen aufweisen, eine gute Trockenheitsresistenz und Klimaresilienz haben und einen geringen Bedarf an Düngemitteln. Viele Hirsearten weisen eine hohe Wassernutzungseffizienz auf und können auch unter Hitze- und Trockenstress wirtschaftlich angebaut werden. Im Vergleich zu Reis entstehen deutlich geringere Methanemissionen, da Hirse nicht in überfluteten Systemen angebaut wird.

Herausfordernd sind die teilweise geringeren Hektarerträge und die begrenzten Marktabsätze ausserhalb der traditionellen Anbauregionen sowie der höhere Verarbeitungsaufwand aufgrund der kleinen Körner. [20]

2.2.5 Regulatorische Aspekte

Für Hirse gelten dieselben grundlegenden lebensmittelrechtlichen Anforderungen wie für andere Getreideprodukte:

Da Hirse natürlicherweise glutenfrei ist, können Produkte als „glutenfrei“ gekennzeichnet werden, sofern der Glutengehalt unter 20 mg/kg liegt.

Hirse eignet sich aufgrund ihres geringen Dünge- und Pflanzenschutzmittelbedarfs gut für den ökologischen Landbau und wird zunehmend in Bio-Anbausystemen eingesetzt.

2.3 Wasserlinsen

2.3.1 Produktion

Wolffia oder Wasserlinsen wachsen in stehenden oder langsam fliessenden Gewässern (Abb. 7) und zeichnen sich durch eine sehr hohe Wachstumsrate aus (Verdoppelung der Biomasse in 1-3 Tagen) [23], welche auf eine hohe Kapazität zur Photosynthese und eine effiziente Nährstoffaufnahme zurückzuführen sind. Die Proteinausbeute pro Fläche ist etwa dreimal so hoch wie für Soja [24]. Wasserlinsen sind anpassungsfähig, können zwischen photoautotrophem, mixotrophen und heteretrophem Wachstum hin- und herwechseln und können in Seen, Teichen, Mooren und Abwassersystemen wachsen[25]. Aus nährstoffdichtem Abwasser können sie 82-98% des Stickstoffes und des Phosphors entfernen. Da *Wolffia* jedoch auch für den Menschen kritische Komponenten aufnehmen und akkumulieren kann (z.B .Schwermetalle), ist für Konsumzwecke auf nicht kontaminiertes Wasser zu achten respektive die Qualität kritisch zu prüfen [24,26]. Studien zeigen, dass beim Anbau in frischem Wasser die resultierenden Belastungen im Produkt deutlich unter den Grenzwerten der EFSA sowie des Codex Alimentarius liegen [27]. Zudem generieren *Wolffia* beim Wachstum Sauerstoff und sind so gesamthaft betrachtet geeignet, um zirkuläre Systeme voranzutreiben. Ihre kompakte Morphologie und das rasche Wachstum machen *Wolffia* zu idealen Pflanzen, um auch in kontrollierter Umgebung angebaut zu werden[28][29]. *Wolffia* können sowohl in offenen Teichsystemen als auch in geschlossenen kontrollierten Aquakultursystemen kultiviert werden. Letztere Anbauweise erleichtert die Kontrolle der Wasserqualität, der Nährstoffzufuhr und vermindert Kontaminationen. Da der Anbau lange Zeit nicht aktiv betrieben wurde, sondern *Wolffia* aus natürlichen Quellen gewonnen wurde, sind die Anbaumethoden noch wenig standardisiert sowie die Pflanzen noch wenig durch Züchtung optimiert [24]. Im Lebensmittelbereich ist insbesondere *Wolffia globosa* beschrieben.

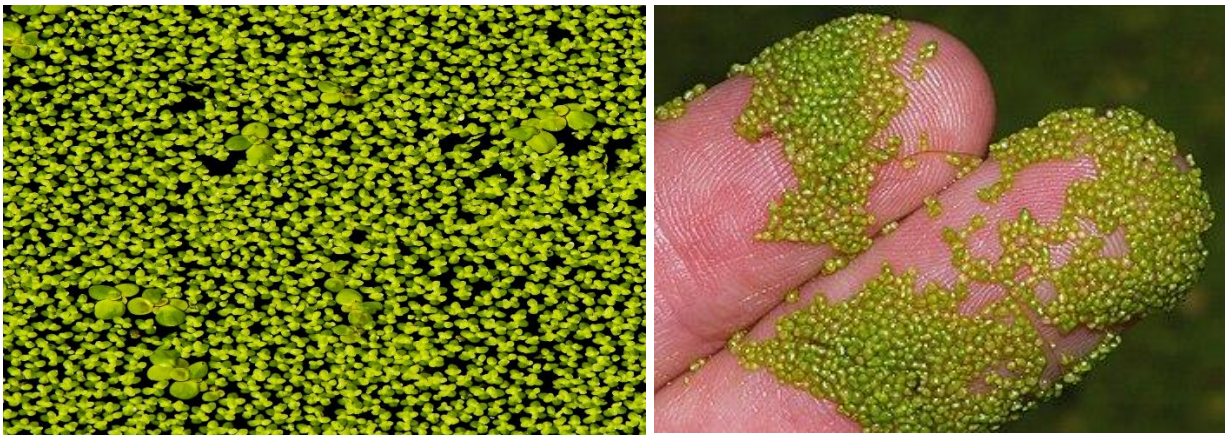


Abb. 7: Wasserlinsen (Bild links: Unsplash, Lukas van Oordt, Bild rechts: Christian Fischer, CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=10720772).

2.3.2 Nährwert

Wasserlinsen enthalten grosse Mengen an Protein (30-45% der Trockenmasse), ein komplettes Aminosäurenprofil mit allen essentiellen Aminosäuren, hohe Mengen an Nahrungsfasern (20-30% der Trockenmasse) sowie signifikante Mengen an Stärke (10-20% der Trockenmasse) (Abb. 8). Der Fettgehalt ist tief bis mittel mit 1-9% der Trockenmasse mit einem hohen Anteil an mehrfach ungesättigten Fettsäuren [30] sowie einem ausgezeichneten n-6/n-3 Verhältnis tiefer als 1 [24]. Der Vitamin- (A, C, E, B-Komplex) und Spurenelement- (u.a. Eisen, Kalzium, Magnesium, Zink und Selen) sowie Polyphenolgehalt sind hoch. Die genaue Zusammensetzung hängt stark von der Spezies und den Anbaubedingungen wie Wasserqualität, Lichtintensität, Nährstoffversorgung und Produktionssystem ab [31]. Im Gegensatz zu Spirulina enthalten Wolffia globosa keine Cyanotoxine [29].



Abb. 8: Nährwertzusammensetzung von Wasserlinsen, Bild ChatGPT [32,33].

2.3.3 Sensorisches Profil

Wolffia hat ein mildes, pflanzliches bis leicht grasiges Aroma. Die Farbe ist intensiv grün aufgrund des hohen Chlorophyllgehaltes. In höheren Konzentrationen können bittere und algige Noten auftreten sowie adstringierende Eigenschaften [34]. Die Akzeptanz hängt von der Verarbeitung und Dosierung ab.

2.3.4 Umweltbelastung

Wolffia gilt als sehr ressourceneffiziente Proteinquelle, da sie auf wenig Fläche und mit geringem Wasserverbrauch wachsen können, kaum Pestizide oder Herbizide eingesetzt werden müssen [35,36], sie schnell CO2 binden und nährstoffreiche Abwässer nutzen können. Umweltbelastungen entstehen jedoch durch energieintensive Verarbeitungsschritte wie Trocknung [37].

2.3.5 Regulatorische Aspekte

In der EU fallen Wasserlinsen unter das Novel Food Gesetz [27], wobei eine Konsummenge von 6.5g/kg Körpergewicht und Tag als Dosis ohne negativen Effekt (NOAEL) bestimmt wurde. Kritische Aspekte sind die potentielle Allergenität sowie der Anstieg der Manganaufnahme bei regelmässigem Konsum. Mangan ist jedoch kein Problem, wenn die Wasserlinsen in kontrollierter Umgebung (kontrolliertes Gewässer oder Aquakultur) angebaut wurden. Für eine Vermarktung müssen Sicherheitsbewertungen bezüglich Toxizität, mikrobiologischer Sicherheit, Allergenen und Kontaminanten durchgeführt werden [38].

In den USA haben Wasserlinsen GRAS Status für spezifische Produkte[39] (5% Dosierung in z.B. Backmischungen, Getränken, Frühstückszerealien u.a.) und in Ländern mit traditionellem Konsum von Wasserlinsen liegt der Fokus auf die Einhaltung von nationalen Sicherheitsstandards [40].

2.4 Zellkultivierter Kakao

2.4.1 Produktion

Die Herstellung von zellkultiviertem Kakao basiert auf pflanzlichen Zellkultursystemen. Folgende Prozessschritte sind nötig für die Produktion:

- Entnahme von Pflanzenmaterial
- Gewinnung von Gewebeproben aus Kakaofrüchten, Blättern oder Embryonen
- Isolierung geeigneter Pflanzenzellen
- Induktion von Kalluskulturen
- Pflanzenzellen werden auf Nährmedien kultiviert
- Bildung eines undifferenzierten Zellgewebes (Kallus)
- Suspensionskultivierung
- Überführung der Zellen in flüssige Kulturmedien
- Vermehrung in Schüttelkolben oder Bioreaktoren
- Bioreaktorproduktion
- Steuerung von Temperatur, Sauerstoffversorgung, pH-Wert und Nährstoffzufuhr
- Produktion von Biomasse und sekundären Pflanzenstoffen
- Ernte und Verarbeitung
- Abtrennung der Zellen vom Kulturmedium
- Trocknung, Fermentation oder Weiterverarbeitung zu Kakaomasse, Pulver oder Schokoladenzutaten

Die grössten Vorteile dieser Art der Kakaoproduktion sind die Unabhängigkeit von tropischen Anbauregionen, die Reduktion klimatischer Risiken, die ganzjährige Produktion, die im Optimalfall gleichbleibende Qualität und die reduzierte Anfälligkeit für Pflanzenkrankheiten.
Herausfordernd sind die hohen Produktionskosten und die Skalierung sowie die Optimierung von Aroma- und Geschmack. [41,42]

2.4.2 Nährwert

Da die Zellen direkt von der Kakaopflanze stammen, können viele der charakteristischen Inhaltsstoffe von Kakao auch in zellkultivierten Produkten vorkommen. Die wichtigsten Inhaltsstoffe sind dabei: Polyphenole, Flavanole, Ballaststoffe, Theobromin, Mineralstoffe und Vorstufen der Kakaobutterbestandteile.

Durch gezielte Steuerung der Kultivierungsbedingungen können bestimmte Inhaltsstoffe möglicherweise erhöht oder reduziert werden. Es besteht das Potential, die Nährstoffprofile zu standardisieren und funktionelle Inhaltsstoffe gezielt anzureichern. Zudem ist es möglich, unerwünschte Stoffe wie Schwermetalle zu verhindern oder massiv zu reduzieren. [43]

Da sich viele Produkte noch in der Entwicklungsphase befinden, liegen bislang nur begrenzte veröffentlichte Daten zum exakten Nährwert kommerzieller Produkte vor.

2.4.3 Sensorisches Profil

Das sensorische Profil stellt eine der grössten Herausforderungen bei der Entwicklung zellkultivierten Kakaos dar.

Typische Kakaoaromen entstehen normalerweise durch:

- Fermentation der Kakaobohnen
- Trocknung
- Röstung
- Maillard-Reaktionen

Zellkultivierte Kakaozellen enthalten zwar viele Vorläuferstoffe, die charakteristischen Schokoladenaromen müssen jedoch häufig durch zusätzliche Verarbeitungsschritte entwickelt werden. Dabei ist die Reproduktion komplexer Aromaprofile hochwertiger Kakaosorten herausfordernd.

Weiter ist die Textur der resultierenden Schokolade etwas weniger kremig[44].

2.4.4 Umweltbelastung

Cellular Agriculture wird häufig als nachhaltige Alternative zur konventionellen Landwirtschaft betrachtet.

Potenzielle Umweltvorteile sind dabei einerseits der verringerte Flächenbedarf, der oft mit dem Schutz tropischer Regenwälder und der Verhinderung von Entwaldung zusammenhängt, der geringere Wasserverbrauch und die Unabhängigkeit von Ernteausfällen.

Herausfordernd sind Stand heute noch der hohe Energiebedarf für Bioreaktoren, die Abhängigkeit der Umweltbilanz vom Strommix des Herstelllandes, der Bedarf an sterilen Produktionsbedingungen und die noch begrenzten Daten aus grosstechnischen Anlagen. Aktuelle Lebenszyklusanalysen von zellkultivierten Produkten wurden tierische Lebensmittel durchgeführt und zeigen auf, dass die tatsächliche Nachhaltigkeit von Zellkulturen stark von der zukünftigen industriellen Umsetzung abhängt [45].

2.4.5 Regulatorische Aspekte

Da zellkultivierter Kakao mit innovativen Biotechnologien hergestellt wird, unterliegt er besonderen regulatorischen Anforderungen.

In der EU und der Schweiz gilt zellkultivierter Kakao als Novel Food [19].

Die regulatorischen Rahmenbedingungen für Cellular-Agriculture-Produkte entwickeln sich weltweit dynamisch. Unterschiede bestehen insbesondere zwischen der EU, den USA und Singapur.

2.5 Single cell Protein (SCP) aus Wasserstoff-oxidierenden Bakterien

2.5.1 Produktion

Die Herstellung von SCP aus wasserstoffoxidierenden Bakterien erfolgt in geschlossenen Bioreaktoren. Wasserstoff wird meist durch Elektrolyse von Wasser unter Verwendung erneuerbarer Energien erzeugt. Die Bakterien nutzen anschliessend Wasserstoff als Energiequelle, Sauerstoff als Elektronenakzeptor, Kohlendioxid als Kohlenstoffquelle, Ammonium oder Nitrat als Stickstoffquelle [46].

Typischerweise verwendete Mikroorganismen sind *Cupriavidus necator, Xanthobacter autotrophicus und Hydrogenophaga pseudoflava.*

Die Fermentation erfolgt unter sterilen Bedingungen in kontinuierlichen oder halbkontinuierlichen Prozessen. Dadurch kann Protein ganzjährig und unabhängig von den klimatischen Bedingungen bei sehr geringem Flächenbedarf (0.18 – 0.26 m^2 bei Verwendung von Solarstrom, 0.04 m^2/kg Protein/Jahr bei Verwendung von Windenergie [47]) unter Nutzung von CO_2 als Rohstoff hergestellt werden.

Herausforderungen bestehen insbesondere bei der sicheren Handhabung von Wasserstoff, den hohen Investitionskosten für Elektrolyseure und Bioreaktoren sowie der Energieeffizienz des Gesamtsystems.

Nach dem Wachstum werden die Zellen geerntet, konzentriert, getrocknet und zu Proteinpulvern verarbeitet.

Solar Foods aus Finnland produziert das Protein Solein aus CO_2 [48], Wasserstoff und erneuerbarem Strom.

2.5.2 Nährwert

Das Nährwertprofil von SCP hängt von verschiedenen Aspekten ab wie der Art der verwendeten Mikroorganismen, dem Substrat, den Fermentationsparametern sowie dem Downstream Processing. Beispielsweise kann der Proteingehalt gemäss einer vergleichenden Studie von Ayele et al. [49] von 35-70% variieren (Abb. 9).

SCP hergestellt mittels Wasserstoff oxidierenden Bakterien besitzt einen sehr hohen Proteingehalt von ca. 60-75% bezogen auf die Trockenmasse, Solar Foods berichtet sogar von Proteingehalten bis 80% [48]. Das Protein enthält alle essentiellen Aminosäuren vergleichbar zu tierischen Proteinen[50]. Kritisch ist der oft hohe Gehalt an Nukleinsäuren, die durch die Verarbeitung reduziert werden müssen [49]. Es enthält im Vergleich zu Erbsenproteinisolat einen höheren Nahrungsfaser- und tieferen Fettgehalt.

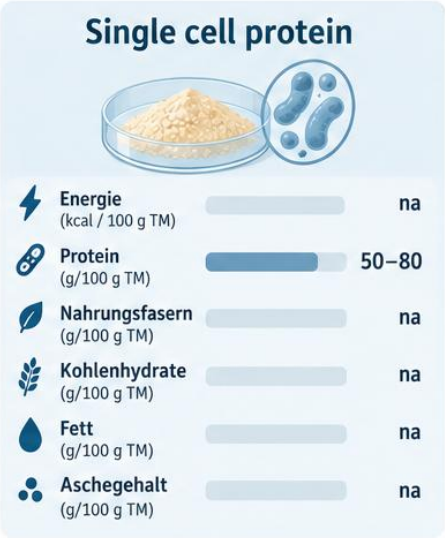


Abb. 9: Nährwertzusammensetzung von Einzellerprotein aus wasserstoffoxidierenden Bakterien, Bild ChatGPT [48,51,52].

2.5.3 Sensorisches Profil

Das sensorische Profil des geernteten Proteins wird als mild, leicht hefig, nussig und umamiartig beschrieben und hat eine gelbliche bis hellbraune Farbe. Sensorisch kritisch ist die feine Pulverstruktur, die ein trockenes Mundgefühl verursachen kann[48].

2.5.4 Umweltbelastung

SCP aus wasserstoffoxidierenden Bakterien zählt zu den ressourceneffizientesten bekannten Proteinproduktionssystemen.

Vorteile gegenüber konventioneller Landwirtschaft sind der extrem geringe Landverbrauch (Flächennutzung bis zu 90-99% tiefer als für Soja- oder Rindfleischproduktion), der sehr geringe Wasserbedarf, dass keine Pestizide eingesetzt werden muss, dass ganzjährig produziert werden kann und die Nutzung von CO2 als Kohlenstoffquelle. Letzteres ist insofern besonders interessant, als industrielle CO2 Ströme direkt als Rohstoff eingesetzt werden und so der Kohlenstoffkreislauf geschlossen werden kann.

Die Umweltbilanz hängt dabei massgeblich von der Herkunft des Stromes ab, wobei erneuerbare Energien bedeutende geringere Treibhausgasemissionen verursachen und fossiler Strom die Klimabilanz verschlechtert. Hauptverursacher des hohen Energiebedarfs im Prozess ist die Elektrolyse zur Wasserstoffproduktion [53].

2.5.5 Regulatorische Aspekte

In der Schweiz und der Europäischen Union fallen SCP-Produkte für den menschlichen Verzehr in der Regel unter die Novel-Food-Verordnung. Für eine Zulassung müssen Nachweise erbracht werden zu Lebensmittelsicherheit, mikrobiologischer Reinheit, Toxikologie, Allergenität sowie Nährwert. Besonders im Fokus steht dabei der Nukleinsäuregehalt, eine mögliche Kontamination mit Endotoxinen sowie Produktionsrückstände. Mehrere Unternehmen arbeiten an Zulassungen für den europäischen Markt.

3 Verarbeitungsansätze

3.3 Hülsenfrüchte

Die Verarbeitung von Hülsenfrüchten dient der Verbesserung von Verdaulichkeit, Geschmack, Funktionalität und Haltbarkeit.

Konventionellerweise werden ganze (mit oder ohne Schale) oder halbierte Hülsenfrüchte eingeweicht und gekocht, um antinutritive Faktoren zu reduzieren und die Verdaulichkeit zu verbessern. Eine Keimung oder eine gezielte Fermentation können helfen, um den Geschmack und das Aroma zu verbessern sowie Oligosaccharide zu reduzieren und gleichzeitig die Bioverfügbarkeit von Mineralstoffen und den Abbau antinutritiver Substanzen wie Phytinsäure, Tannine und Trypsininhibitoren zu fördern.

Oft werden Hülsenfrüchte auch gemahlen, um aus den Hülsenfruchtmehlen Produkte wie Backwaren oder Falafel herzustellen. Seit einigen Jahren wird zudem vermehrt eine trockene oder nasse Fraktionierung der Hülsenfrüchte in proteinreiche Pulver als Haupt- und stärke- und faserreiche Pulver als Nebenstrom genutzt. Die resultierende Proteinkonzentrate oder -isolate werden für die Herstellung von im Extruder texturierten Fleischersatzprodukten verwendet.[54,55]

Neben dem klassischen Verkauf von ganzen oder halbierten Hülsenfrüchten, wurde in der Schweiz die Verarbeitungskette in den letzten Jahren weiter ausgebaut sowie das Produktangebot diversifiziert. Grand Moulin SA baute 2023 die erste Trockenextraktionsanlage von Proteinen aus Hülsenfrüchten auf [56]. Damit wurde die Wertschöpfungskette in der Schweiz geschlossen und erstmals eine vollständig lokale Verarbeitung von Hülsenfrüchten in der Schweiz ermöglicht. Zudem werden Hülsenfrüchte in Aktionswochen und Wettbewerben vorgestellt (bspw. Aktionswoche des Ernährungsforums Zürich https://bohneaufdiebuehne.ch/) oder Hülsenfrucht-Challenge des Vereins Schweizer Hülsenfrüchte https://schweizerhuelsenfruechte-challenge.ch/home), um sie der Bevölkerung wieder näher zu bringen.

Auf Endproduktseite stellen verschiedene Schweizer Firmen trockene und nasse Fleischersatzprodukte aus Hülsenfrüchten her wie z.B. Planted AG oder Protaneo sowie fermentierte Produkte aus ganzen Hülsenfrüchten (z.B. Yumame) oder aus Nebenströmen von Hülsenfrüchten (z.B. Luya). Neben Fleischalternativen sind Hülsenfrüchte ebenfalls als Rohmaterialien für die Herstellung von veganen Joghurts, Cream Cheese, Eiskrem und salzigen Dips wie Hummus im Trend (z.B. Fabas).

3.4 Hirse

Die Verarbeitung von Hirse ist vielfältig und dient der Verbesserung von Verdaulichkeit, Funktionalität und sensorischer Qualität.

Konventionelle Verfahren umfassen das Reinigen und Schälen zur Entfernung der äusseren Spelzen und der Verbesserung von Textur und Akzeptanz. Teilweise wird die Hirse zu Hirsemehl vermahlen für den Einsatz in Backwaren, Frühstücksprodukten und Teigwaren oder eine Extrusion zur Herstellung von Snacks und Frühstückszerealien.

Traditionellerweise wird Hirse oft fermentiert, um das Aroma und die Nährstoffverfügbarkeit zu verbessern.

Für die Herstellung von knusprigen und aromaintensiven Produkten wird Hirse teilweise gepufft und geröstet.

Um antinutritive Inhaltsstoffe wie Phytinsäure, Tannine und Polyphenole zu reduzieren, welche beispielsweise die Mineralstoffaufnahme beeinträchtigen, kann Hirse fermentiert, gekeimt oder thermisch behandelt werden. [22,57]

In der Schweiz und dem nahen Ausland sind Hirseprodukt einerseits als leicht verarbeitete Lebensmittel in Form von Goldhirse (ganze Körner), Hirseflocken oder Hirsegriess zu finden, andererseits oft als Zutaten in glutenfreien Produkten wie Backwaren (z.B. Pepilou's) oder als Anrührbrei für Babys. Der Einsatz von Hirse ist in weiteren Backwaren möglich, sowie in Getränken. Siroha et al. [58] berichten in diesen Anwendungen jedoch über spürbare sensorische Einbussen im Vergleich zu Weizen, während der Einsatz in Teigwaren sogar bei rein Hirse basierten Teigwaren zu sensorisch attraktiven Produkten führen kann [59]. Pasta aus Hirse-Getreidemischungen sowie reine Hirsepasta sind ebenfalls kommerziell erhältlich (z.B. Rapunzel Hirseteigwaren mit 10% Hirseanteil, Werz Hirsenudeln).

3.5 Wasserlinsen

Die Verarbeitung von *Wolffia* konzentriert sich vor allem auf Trocknung, Proteinextraktion, Pulverherstellung und Funktionalisierung von Lebensmitteln [24,37,60]. Dabei beeinflusst die Verarbeitung insbesondere die Farbe, die Proteinstabilität, die Antioxidantien, den Geschmack und die Löslichkeit. Prinzipiell sind schonende Verfahren bezüglich Qualität besser, dafür kostenintensiver.

Wasserlinsen werden teilweise frisch konsumiert (z.B. als Salat), können jedoch durch schonende Trocknung (z.B. Vakuumtrocknung, Solartrocknung, etc.) haltbar gemacht werden. Nicht optimierte Trocknung kann die Qualität des Produktes stark beeinflussen, insbesondere die Farbe. Untersuchungen haben gezeigt, dass insbesondere das Enzym Polyphenol Peroxidase rasch inaktiviert werden muss und eine Zugabe von Salzlösung den Erhalt der Chlorophyllstruktur stabilisieren kann [61].

Lebensmittelsicherheit ist auch bezüglich mikrobiologischen Belastungen ein wichtiges Thema für *Wolffia*. Studien zeigen, dass durch einem Waschen nach der Ernte, einer hygienischen Trocknung oder Pasteurisation die mikrobielle Belastung effektiv reduziert werden kann ohne Einbusse im Nährwert [62,63].

Wolffia werden oft als Tierfutter für Fische und Geflügel eingesetzt [29] und so indirekt in die menschliche Nahrungskette gebracht. In asiatischen Ländern werden Wasserlinsen traditionellerweise zu Salat, Omeletts oder Gemüsecurry verarbeitet. In den letzten Jahren wird insbesondere *Wolffia globosa* für die Herstellung von funktionellen Lebensmitteln [64]und Getränken untersucht [24]. Dabei hat sich eine Hochdruckbehandlung zur Stabilisierung als vorteilhaft erwiesen, um die grüne Farbe der Getränke zu erhalten[65].

Auch der Einsatz in high protein und high fiber snacks wird als vielversprechend gewertet. On-Nom et al. [66] zeigten, dass gepuffte Snacks bestehend aus Reis- und Tapiocamehl plus 26% gefriergetrocknetes *W. globosa* Pulver eine grüne Farbe aufwiesen und im Vergleich zu Referenzsnacks ohne *Wolffia* eine nahezu vergleichbare Akzeptanz aufwiesen. Die Anwendung von *Wolffia globosa* Pulver in Breadsticks bei einer Dosierung von 5-10% ein verbessertes Nährwertprofil bei gleichzeitig bleibender Akzeptanz [67]. In Fleischersatzprodukten kann Wolffia anstelle von konventionellen Pflanzenproteinen wie Erbsenprotein eingesetzt werden. Die resultierenden Produkte von grüner Farbe verfügen über eine ansprechende Textur [68].

Da Wasserlinsen als novel food klassifiziert sind, sind zurzeit in der Schweiz keine Produkte im Handel erhältlich.

3.6 Zellkultivierter Kakao

Die Weiterverarbeitung ist entscheidend für die Entwicklung marktfähiger Produkte.

Sie beinhaltet eine Trocknung nach teilweise vorgängiger Fermentation zur Bildung typsicher Kakaoaromen oder Vorstufen davon sowie eine Röstung, um schokoladentypische Geschmacksprofile durch eine Maillardreaktion zu bilden.

Verschiedene Schweizer Firmen und Startups forschen aktiv an der Produktion von zellkultiviertem Kakao und dessen Nutzung zur Herstellung von Schokolade (z.B. FoodBrewer https://www.foodbrewer.com/, Barry Callebaut https://www.foodingredientsfirst.com/news/barry-callebaut-cocoa-cell-culture.html, The Cultured Hub & Bühler AG https://www.buhlergroup.com/global/en/media/media-releases/the-cultured-hub.html).

Da zellkultivierter Kakao als novel food klassifiziert ist, sind in der Schweiz noch keine Produkte im Handel verfügbar.

3.7 Single-cell-protein aus Wasserstoff-oxidierenden Bakterien

Nach der Fermentation wird die Biomasse typischerweise ‘geerntet’ und durch folgende Schritte verarbeitet:

1. Zellernte: durch Filtration oder Zentrifugation werden die Zellen vom Wasser abgetrennt [69]
2. Zellaufschluss oder enzymatische Behandlung
3. Reduktion des Nukleinsäuregehalts durch beispielsweise chemische Extraktion, Wärme- oder Enzymbehandlung [70]
4. Trocknung (oft mittels Sprühtrocknung, Gefriertrocknung)
5. Pulverisierung

Zur Verbesserung der funktionellen Eigenschaften werden häufig Verfahren eingesetzt, die die Löslichkeit und Emulgierfähigkeit verbessern, den Geschmack mildern und die Textur optimieren. Zudem wird die Strukturierung zu Lebensmitteln mittels Extrusion für Fleischalternativen sowie die Kombination mit pflanzlichen Proteinen untersucht. Caliskan et al. [50] verglich die technofunktionellen Eigenschaften von solein Protein mit Erbsenproteinisolat und setzten es erfolgreich in der Herstellung von veganem Joghurt ein. Während single cell portein aus Wasserstoff-oxidierenden Bakterien in den USA bereits als Proteinpulver für Sportler käuflich ist, ist die Marktzulassung in der Schweiz noch ausstehend.

4 Innovative Rohmaterialien im Vergleich

Die in diesem White Paper betrachteten Rohmaterialien unterscheiden sich deutlich hinsichtlich ihrer technologischen Reife, ihrer Anforderungen an die Produktion und Verarbeitung sowie ihrer ökologischen und ernährungsphysiologischen Eigenschaften. Ein direkter Vergleich ist daher nur bedingt anhand einzelner Kennzahlen möglich. Vielmehr müssen verschiedene Aspekte gemeinsam betrachtet werden, um Chancen und Herausforderungen der Rohmaterialien für zukünftige Lebensmittelsysteme einzuordnen.

Hülsenfrüchte und Hirse sind bereits etablierte landwirtschaftliche Kulturen und verfügen über bestehende Anbau-, Verarbeitungs- und Wertschöpfungsstrukturen. Ihre Innovation liegt insbesondere in ihrem Potenzial für ressourcenschonendere und klimaresilientere Ernährungssysteme. Hülsenfrüchte bieten aufgrund ihres hohen Proteingehalts und ihrer Fähigkeit zur Stickstofffixierung besondere Vorteile, während Hirse durch ihren vergleichsweise geringen Wasserbedarf sowie ihre hohe Trockenheits- und Hitzetoleranz interessant ist.

Wasserlinsen nehmen eine Zwischenstellung zwischen etablierten Kulturpflanzen und neuartigen Produktionssystemen ein. Sie zeichnen sich durch schnelles Wachstum, einen hohen Proteingehalt und eine hohe Flächeneffizienz aus. Gleichzeitig bestehen Herausforderungen hinsichtlich kontrollierter Anbaubedingungen, standardisierter Produktionsverfahren und der regulatorischen Zulassung.

Zellkultivierter Kakao und Single-Cell-Protein aus wasserstoffoxidierenden Bakterien lösen die Produktion teilweise oder vollständig von klassischen landwirtschaftlichen Anbauflächen. Dadurch ergeben sich potenziell deutliche Vorteile hinsichtlich Flächenbedarf, Standortunabhängigkeit und ganzjähriger Produktion. Gleichzeitig befinden sich diese Ansätze technologisch und wirtschaftlich noch in einer früheren Entwicklungsphase. Insbesondere Skalierung, Energiebedarf, Produktionskosten und regulatorische Zulassung sind für eine breite Anwendung entscheidend.

4.1 Gesamtbewertung

Der Vergleich (Tab. 2) zeigt, dass es nicht den einen optimalen innovativen Rohstoff gibt. Die jeweiligen Stärken hängen stark vom angestrebten Einsatzgebiet und von den Rahmenbedingungen der Produktion ab. Etablierte Rohmaterialien wie Hülsenfrüchte und Hirse können kurzfristig einen Beitrag zu nachhaltigeren Lebensmittelsystemen leisten, da Anbau und Verarbeitung bereits etabliert sind. Wasserlinsen bieten zusätzliche Möglichkeiten für eine besonders flächeneffiziente Produktion, benötigen jedoch kontrollierte Produktionsbedingungen und weitere Standardisierung.

Biotechnologisch produzierte Rohmaterialien weisen langfristig ein besonders grosses Potenzial zur Entkopplung der Lebensmittelproduktion von landwirtschaftlicher Fläche und klimatischen Bedingungen auf. Dieses Potenzial kann jedoch nur ausgeschöpft werden, wenn die Verfahren energieeffizient und wirtschaftlich skalierbar umgesetzt werden können. Bei Single-Cell-Protein spielt insbesondere die Herkunft der eingesetzten Energie eine zentrale Rolle für die Umweltbilanz. Bei zellkultiviertem Kakao kommen die Reproduktion des charakteristischen Aromaprofils und die Entwicklung geeigneter Verarbeitungsverfahren als weitere Herausforderungen hinzu.

Damit ergänzen sich die untersuchten Rohmaterialien eher, als dass sie unmittelbar miteinander konkurrieren. Für zukünftige Lebensmittelsysteme dürfte deshalb eine Kombination verschiedener Ansätze relevant sein: klimaresiliente und proteinreiche Ackerpflanzen, neue aquatische Kulturen sowie biotechnologische Produktionsverfahren können jeweils dort eingesetzt werden, wo ihre spezifischen Eigenschaften den grössten Mehrwert bieten.

Tabelle 2: Benchmarking der verschiedenen Rohmaterialien, erstellt aus den in diesem Whitepaper zusammengefassten Literaturdaten.

Rohmaterial	Hülsenfrüchte	Hirse	Wasserlinsen / Wolffia	Zellkultivierter Kakao	Single-cell protein
Flächenbedarf	Mittel	Mittel	Sehr niedrig	Potentiell sehr niedrig	Sehr niedrig
Wasserbedarf	Niedrig-mittel	Niedrig	Niedrig (je nach Produktionsart)	Potentiell niedrig	Sehr niedrig
Ernährungs-physiologisches Potential	Hoch	Mittel	Hoch	Noch unklar	Sehr hoch
Technologische und wirtschaftliche Skalierbarkeit	Hoch	Hoch	Mittel	Niedrig-mittel	Mittel
Regulatorische Hürde	Niedrig	Niedrig	Mittel-hoch	Hoch	hoch
Zentrale Stärken	Proteinreich, Stickstoff-fixierung, etablierte Wertschöpfung	Trockenheits- und Hitzeresistenz, geringer Betriebsmittel-bedarf	Sehr schnelles Wachstum, hohe Protein- und Flächenausbeute	Unabhängigkeit von tropischen Anbaugebieten und klimatischen Risiken	Sehr hoher Proteingehalt und Produktion unabhängig von Ackerflächen
Zentrale Heraus-forderung	Antinutritive Stoffe, teilweise limitierende Aminosäuren, sensorische Heraus-forderungen	Moderate Proteinqualität, teilweise geringe Hektarerträge	Kontrollierte Kultivierung und Lebensmittel-sicherheit	Kosten, Skalierung, Reproduktion Kakaoaroma	Energiebedarf, Produktionskosten und Novel-Food-Zulassung

5 Literaturliste

1. Hashempour-Baltork, F., Khosravi-Darani, K., Hosseini, H., Farshi, P., & Reihani, S. F. S. (2020). Mycoproteins as safe meat substitutes. *Journal of Cleaner Production*, *253*, 119958. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.119958
2. Moon, B., & Lo, Y. m. (2014). Conventional and Novel Applications of Edible Mushrooms in Today's Food Industry. *Journal of Food Processing and Preservation*, *38*(5), 2146–2153. https://doi.org/10.1111/jfpp.12185
3. Valverde, M. E., Hernández-Pérez, T., & Paredes-López, O. (2015). Edible mushrooms: Improving human health and promoting quality life. *International Journal of Microbiology*, *2015*, 376387. https://doi.org/10.1155/2015/376387
4. Singh, N. (2017). Pulses: An overview. *Journal of Food Science and Technology*, *54*(4), 853–857. https://doi.org/10.1007/s13197-017-2537-4
5. *Phytoplankton*. (o. J.). Abgerufen 20. Mai 2026, von https://www.spektrum.de/lexikon/geowissenschaften/phytoplankton/12277
6. Thoré, E. S. J., Muylaert, K., Bertram, M. G., & Brodin, T. (2023). Microalgae. *Current Biology*, *33*(3), R91–R95. https://doi.org/10.1016/j.cub.2022.12.032
7. *Single Cell Protein—An overview | ScienceDirect Topics*. (o. J.). Abgerufen 20. Mai 2026, von https://www.sciencedirect.com/topics/agricultural-and-biological-sciences/single-cell-protein
8. Matassa, S., Boon, N., Pikaar, I., & Verstraete, W. (2016). Microbial protein: Future sustainable food supply route with low environmental footprint. *Microbial Biotechnology*, *9*(5), 568–575. https://doi.org/10.1111/1751-7915.12369
9. Eibl, R., Senn, Y., Gubser, G., Jossen, V., Bos, C. van den, & Eibl, D. (2021). Cellular Agriculture: Opportunities and Challenges. *Annual Review of Food Science and Technology*, *12*(Volume 12, 2021), 51–73. https://doi.org/10.1146/annurev-food-063020-123940
10. Gordon, E. B., Choi, I., Amanipour, A., Hu, Y., Nikkhah, A., Koysuren, B., Jones, C., Nitin, N., Ovissipour, R., Buehler, M. J., Blackstone, N. T., & Kaplan, D. L. (2025). Biomaterials in cellular agriculture and plant-based foods for the future. *Nature Reviews Materials*, *10*(7), 500–518. https://doi.org/10.1038/s41578-025-00800-7
11. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (Hrsg.). (2016). *Pulses: Nutritious seeds for a sustainable future*. FAO.
12. Mudryj, A. N., Yu, N., & Aukema, H. M. (2014). Nutritional and health benefits of pulses. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism = Physiologie Appliquee, Nutrition Et Metabolisme*, *39*(11), 1197–1204. https://doi.org/10.1139/apnm-2013-0557
13. Martineau-Côté, D., Achouri, A., Karboune, S., & L'Hocine, L. (2022). Faba Bean: An Untapped Source of Quality Plant Proteins and Bioactives. *Nutrients*, *14*(8), 1541. https://doi.org/10.3390/nu14081541
14. *Lupinen: So gesund ist der pflanzliche Eiweißlieferant*. (2023, Juli 14). https://www.aok.de/pk/magazin/ernaehrung/gesunde-ernaehrung/lupinen-so-gesund-ist-der-pflanzliche-eiweisslieferant/
15. *Gelberbse | Future Foods | WWF Schweiz*. (o. J.). Abgerufen 20. Mai 2026, von https://www.wwf.ch/de/futurefoods/gelberbse
16. Asif, M., Rooney, L. W., Ali, R., & Riaz, M. N. (2013). Application and Opportunities of Pulses in Food System: A Review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, *53*(11), 1168–1179. https://doi.org/10.1080/10408398.2011.574804
17. Roland, W. S. U., Pouvreau, L., Curran, J., van de Velde, F., & de Kok, P. M. T. (2017). Flavor Aspects of Pulse Ingredients. *Cereal Chemistry*, *94*(1), 58–65. https://doi.org/10.1094/CCHEM-06-16-0161-FI
18. 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.aaq0216
19. *SR 817.022.2—Verordnung des EDI vom 16. Dezember 2016 über neuartige Lebensmittel | Fedlex*. (o. J.). Abgerufen 13. August 2026, von https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/2017/159/de
20. FAO. (2024). *International Year of Millets 2023: Final Report*. FAO. https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/cd2103en
21. Saleh, A. S. M., Zhang, Q., Chen, J., & Shen, Q. (2013). Millet Grains: Nutritional Quality, Processing, and Potential Health Benefits. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, *12*(3), 281–295. https://doi.org/10.1111/1541-4337.12012
22. Gluten-free foods and beverages from millets. (2008). In *Gluten-Free Cereal Products and Beverages* (S. 119–V). Academic Press. https://doi.org/10.1016/B978-012373739-7.50008-3

23. *Effect of Light, Aeration and Nutrient Concentration on Wolffia (Wolffia globosa (Roxb.) Hartog & Plas) Growth*. (o. J.). https://doi.org/10.3923/ajps.2022.559.564
24. Venkatachalam, K., Phongthai, S., Puttha, R., Wongsa, J., & Charoenphun, N. (2026). Wolffia globosa as an Emerging Plant-Based Protein Source for Functional and Nutraceuticals. *Foods*, *15*(3). https://doi.org/10.3390/foods15030543
25. Mehrabian, A., & Nasab, F. K. (2021). Distribution Patterns, Diversity Centers, and Priorities for Conservation of Aquatic Plants in Iran. In L. A. Jawad (Hrsg.), *Southern Iraq's Marshes: Their Environment and Conservation* (S. 233–249). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-66238-7_13
26. van der Spiegel, M., Noordam, M. Y., & van der Fels-Klerx, H. J. (2013). Safety of Novel Protein Sources (Insects, Microalgae, Seaweed, Duckweed, and Rapeseed) and Legislative Aspects for Their Application in Food and Feed Production. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, *12*(6), 662–678. https://doi.org/10.1111/1541-4337.12032
27. EFSA Panel on Nutrition, F. A. (NDA), Novel Foods, Turck, D., Bohn, T., Castenmiller, J., De Henauw, S., Hirsch-Ernst, K. I., Maciuk, A., Mangelsdorf, I., McArdle, H. J., Naska, A., Pelaez, C., Pentieva, K., Siani, A., Thies, F., Tsabouri, S., Vinceti, M., Cubadda, F., Frenzel, T., Heinonen, M., … Knutsen, H. K. (2021). Safety of Wolffia globosa powder as a Novel food pursuant to Regulation (EU) 2015/2283. *EFSA Journal*, *19*(12), e06938. https://doi.org/10.2903/j.efsa.2021.6938
28. Romano, L. E., van Loon, J. J. W. A., Vincent-Bonnieu, S., & Aronne, G. (2024). Wolffia globosa, a novel crop species for protein production in space agriculture. *Scientific Reports*, *14*(1), 27979. https://doi.org/10.1038/s41598-024-79109-4
29. Saranya, S., Lourdu Lincy, L., Thamanna, L., Dhayanithi, S., & Chellapandi, P. (2025). *Wolffia:* A sustainable aquatic crop for future food systems and space agriculture. *Trends in Food Science & Technology*, *161*, 105069. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2025.105069
30. *Protein and Lipid Composition of Duckweeds (Landoltia punctata and Wolffia arrhiza) Grown in a Controlled Cultivation System*. (o. J.). https://doi.org/10.3923/ajps.2022.637.642
31. Masavang, S., Winckler, P., Tira-umphon, A., & Phahom, T. (2022). New insights into moisture sorption characteristics, nutritional composition, and antioxidant and morphological properties of dried duckweed [Wolffia arrhiza (L.) Wimm]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *102*(5), 2135–2143. https://doi.org/10.1002/jsfa.11555
32. Appenroth, K.-J., Sree, K. S., Bog, M., Ecker, J., Seeliger, C., Böhm, V., Lorkowski, S., Sommer, K., Vetter, W., Tolzin-Banasch, K., Kirmse, R., Leiterer, M., Dawczynski, C., Liebisch, G., & Jahreis, G. (2018). Nutritional Value of the Duckweed Species of the Genus Wolffia (Lemnaceae) as Human Food. *Frontiers in Chemistry*, *6*. https://doi.org/10.3389/fchem.2018.00483
33. Miltko, R., Majewska, M. P., Wojtak, W., Białek, M., Kowalik, B., & Czauderna, M. (2024). Comparing the chemical composition of lesser duckweed(*Lemna minor* L.) grown in natural and laboratory settings. *Journal of Animal and Feed Sciences*, *33*(3), 357–367. https://doi.org/10.22358/jafs/189963/2024
34. Sheik, T. (2025, November 20). Effects of Dried Wolffia Powder on the Quality of Corn Milk Beverage Mixed with Dried Wolffia Powder. *Current Research in Nutrition and Food Science Journal*. https://www.foodandnutritionjournal.org/volume13number3/effects-of-dried-wolffia-powder-on-the-quality-of-corn-milk-beverage/
35. Ofoedu, C. E., Bozkurt, H., & Mortimer, J. C. (2025). Towards sustainable food security: Exploring the potential of duckweed (Lemnaceae) in diversifying food systems. *Trends in Food Science & Technology*, *161*, 105073. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2025.105073
36. Wibuloutai, J., Prathumchai, N., Sutticharoen, S., Thunyasirinon, C., & Sutticharoen, S. (2026). Evaluating the environmental sustainability of Wolffia globosa as a future food: A water footprint perspective on production systems. *Journal of Ecological Engineering*, *27*(7), 273–279.
37. Ahmad, T., Esposito, F., Rauf, M. A., Inam-ur-Raheem, M., Cirillo, T., & Aadil, R. M. (2025). A Review on Recent Processing and Bioprocessing Developments in Alternative Proteins: Sources, Modification Methods, Economic Feasibility, and Future Challenges. *Food and Bioprocess Technology*, *19*(2), 54. https://doi.org/10.1007/s11947-025-04129-5
38. Malila, Y., Owolabi, I. O., Chotanaphuti, T., Sakdibhornssup, N., Elliott, C. T., Visessanguan, W., Karoonuthaisiri, N., & Petchkongkaew, A. (2024). Current challenges of alternative proteins as future foods. *Npj Science of Food*, *8*(1), 53. https://doi.org/10.1038/s41538-024-00291-w
39. *GRAS Notices*. (o. J.). Abgerufen 28. Mai 2026, von https://hfpappexternal.fda.gov/scripts/fdcc/index.cfm?set=GRASNotices&id=984
40. Kaplan, A., Zelicha, H., Tsaban, G., Yaskolka Meir, A., Rinott, E., Kovsan, J., Novack, L., Thiery, J., Ceglarek, U., Burkhardt, R., Willenberg, A., Tirosh, A., Cabantchik, I., Stampfer, M. J., & Shai, I. (2019).

Protein bioavailability of *Wolffia globosa* duckweed, a novel aquatic plant – A randomized controlled trial. *Clinical Nutrition*, *38*(6), 2576–2582. https://doi.org/10.1016/j.clnu.2018.12.009
41. Verpoorte, R., Contin, A., & Memelink, J. (2002). Biotechnology for the production of plant secondary metabolites. *Phytochemistry Reviews*, *1*(1), 13–25. https://doi.org/10.1023/A:1015871916833
42. Eibl, R., & Eibl, D. (2008). Design And Use Of The Wave Bioreactor For Plant Cell Culture. In S. D. Gupta & Y. Ibaraki (Hrsg.), *Plant Tissue Culture Engineering* (S. 203–227). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-3694-1_12
43. Hudson, Z. (o. J.). *Cocoa, Cultured: Inside the California Startup Growing Cacao from Cells – Peninsula Press*. Abgerufen 13. August 2026, von https://peninsulapress.com/2026/08/12/cocoa-cultured-inside-the-california-startup-growing-cacao-from-cells/
44. *What does lab-grown chocolate taste like?* 🍫. (o. J.). [Videoaufnahme]. Abgerufen 13. August 2026, von https://www.youtube.com/shorts/WFxazY3ouo8
45. Nawaz, T., Latif, R., Fahad, S., Sher, M., & Zhou, R. (2026). Next-generation cellular agriculture: Innovations, challenges, and the future of animal-based food production. *Cleaner Food Systems*, *4*, 100056. https://doi.org/10.1016/j.clfs.2026.100056
46. Pander, B., Mortimer, Z., Woods, C., McGregor, C., Dempster, A., Thomas, L., Maliepaard, J., Mansfield, R., Rowe, P., & Krabben, P. (2020). Hydrogen oxidising bacteria for production of single-cell protein and other food and feed ingredients. *Engineering Biology*, *4*(2), 21–24. https://doi.org/10.1049/enb.2020.0005
47. Sillman, J., Nygren, L., Kahiluoto, H., Ruuskanen, V., Tamminen, A., Bajamundi, C., Nappa, M., Wuokko, M., Lindh, T., Vainikka, P., Pitkänen, J.-P., & Ahola, J. (2019). Bacterial protein for food and feed generated via renewable energy and direct air capture of CO2: Can it reduce land and water use? *Global Food Security*, *22*, 25–32. https://doi.org/10.1016/j.gfs.2019.09.007
48. Science. (o. J.). *Solar Foods*. Abgerufen 29. Mai 2026, von https://solarfoods.com/science/
49. Ayele, G., Admassu, H., Mosisa, G., Desalegn, A., & Abeje, M. (2026). Nutritional, Functional, and Safety Aspects of Single-Cell Protein Produced via Microbial Fermentation From Fruit-Processing Waste: A Comprehensive Review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, *25*(3), e70464. https://doi.org/10.1111/1541-4337.70464
50. Caliskan, C., Nyhan, L., Hernández-Olivas, E., Feng, S., Zannini, E., Sozer, N., Brodkorb, A., & Arendt, E. K. (2026). Techno-functional and nutritional evaluation of Solein single-cell protein and its application in non-dairy yoghurt alternatives. *Food Research International*, *229*, 118467. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2026.118467
51. You, X., Zhang, L., Chen, L., Wang, H., Zou, H., Zhu, Z., & Zhao, G. (2026). Nutritional Value and Food Safety Assessment of Single-Cell Protein Derived from Ralstonia eutropha for Food Applications. *Foods*, *15*(10), 1813. https://doi.org/10.3390/foods15101813
52. Wang, J., Li, R., Wang, M., Wang, X., Xue, M., Xu, A., Luo, K., Fan, X., Guo, R., & Fu, S. (2026). Upgrading H2/CO2-containing waste gas to single cell protein: Tolerance and response of *Cupriavidus necator* H16 to hydrogen sulfide. *Chemical Engineering Journal*, *539*, 177207. https://doi.org/10.1016/j.cej.2026.177207
53. Järviö, N., Maljanen, N.-L., Kobayashi, Y., Ryynänen, T., & Tuomisto, H. L. (2021). An attributional life cycle assessment of microbial protein production: A case study on using hydrogen-oxidizing bacteria. *Science of The Total Environment*, *776*, 145764. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145764
54. Boye, J., Zare, F., & Pletch, A. (2010). Pulse proteins: Processing, characterization, functional properties and applications in food and feed. *Food Research International, Molecular, Functional and Processing Characteristics of Whole Pulses and Pulse Fractions and their Emerging Food and Nutraceutical Applications*, *43*(2), 414–431. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2009.09.003
55. Náthia-Neves, G., Getachew, A. T., Santana, Á. L., & Jacobsen, C. (2025). Legume Proteins in Food Products: Extraction Techniques, Functional Properties, and Current Challenges. *Foods*, *14*(9), 1626. https://doi.org/10.3390/foods14091626
56. *Pflanzenproteine swiss made*. (2023, März 22). foodaktuell.ch. https://www.foodaktuell.ch/2023/03/22/pflanzenproteine-swiss-made
57. Shahidi, F., & Chandrasekara, A. (2013). Millet grain phenolics and their role in disease risk reduction and health promotion: A review. *Journal of Functional Foods*, *5*(2), 570–581. https://doi.org/10.1016/j.jff.2013.02.004
58. Siroha, A. K., & Bangar, S. P. (2024). Millet-Based Food Products: An Overview. *Current Food Science and Technology Reports*, *2*(2), 213–220. https://doi.org/10.1007/s43555-024-00031-x
59. Schmid, T., Loschi, M., Hiltbrunner, J., & Müller, N. (2023). Assessment of the suitability of millet for the production of pasta. *Applied Food Research*, *3*(1), 100247. https://doi.org/10.1016/j.afres.2022.100247

60. Singkhum, U., & Lapsongphon, N. (2026). Production of Protein Hydrolysates From Wolffia (Wolffia globosa) Using Bromelain and Its Application to Oyster Sauce Imitation Products. *International Journal of Food Science*, *2026*(1), 7646872. https://doi.org/10.1155/ijfo/7646872
61. Ifie, I., Olatunde, S., Ogbon, O., & Umukoro, J. E. (2021). Processing techniques on phytochemical content, proximate composition, and toxic components in duckweed. *International Journal of Vegetable Science*, *27*(3), 294–302. https://doi.org/10.1080/19315260.2020.1781320
62. Nandang, S. A., Setiawan, P. B., Purnomo, E. H., Qin, S., Ketnawa, S., Wongsa, P., & Konsue, N. (2025). Comparative effects of high-pressure and thermal processing on the nutritional and functional properties of duckweed. *Food Chemistry Advances*, *9*, 101176. https://doi.org/10.1016/j.focha.2025.101176
63. On-Nom, N., Promdang, P., Inthachat, W., Kanoongon, P., Sahasakul, Y., Chupeerach, C., Suttisansanee, U., & Temviriyanukul, P. (2023). Wolffia globosa-Based Nutritious Snack Formulation with High Protein and Dietary Fiber Contents. *Foods*, *12*(14). https://doi.org/10.3390/foods12142647
64. Sirison, J., Ruangsomboon, S., Jongput, B., Aue-umneoy, D., & Tongsri, P. (2025). Cultivation of Wolffia globosa and its application in functional food development. *Scientific Reports*, *15*(1), 38255. https://doi.org/10.1038/s41598-025-22032-z
65. Chotyakul, N., Rungpichayapichet, P., Siriwongwilaichat, P., & Mahayothee, B. (2026). The effect of high-pressure processing on the quality of functional drinks from kale and Wolffia. *Journal of Food Science and Technology*. https://doi.org/10.1007/s13197-026-06723-7
66. On-Nom, N., Promdang, P., Inthachat, W., Kanoongon, P., Sahasakul, Y., Chupeerach, C., Suttisansanee, U., & Temviriyanukul, P. (2023). Wolffia globosa-Based Nutritious Snack Formulation with High Protein and Dietary Fiber Contents. *Foods*, *12*(14). https://doi.org/10.3390/foods12142647
67. Wai, M. P., Ngamukote, S., Adisakwattana, S., Joymak, W., & Suantawee, T. (2026). Nutritional enhancement and glycemic regulation of breadsticks enriched with *Wolffia globosa* powder. *Applied Food Research*, *6*(1), 101711. https://doi.org/10.1016/j.afres.2026.101711
68. Phothiset, S., Sirijariyawat, A., Prommakool, A., Onsaard, W., Aunsri, N., & Saenmuang, S. (2025). Wolffia Meat Analogues Produced by High-Moisture Extrusion: Physicochemical, Microstructure, and Textural Characteristics. *Food and Bioprocess Technology*, *19*(2), 68. https://doi.org/10.1007/s11947-025-04163-3
69. Sharif, M., Zafar, M. H., Aqib, A. I., Saeed, M., Farag, M. R., & Alagawany, M. (2021). Single cell protein: Sources, mechanism of production, nutritional value and its uses in aquaculture nutrition. *Aquaculture*, *531*, 735885. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.735885
70. Single-cell proteins: Fermentation pathways, nutritional quality and digestibility, and a techno-economic and environmental outlook for sustainable scale-up. (o. J.). *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. Abgerufen 13. August 2026, von https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10408398.2025.2598807