

Impulse für die Ernährung von morgen – Forschung und Perspektiven aus NewFoodSystems



ERNÄHRUNGS UMSCHAU

vielfältig. fundiert. praxisrelevant.

Vorteile

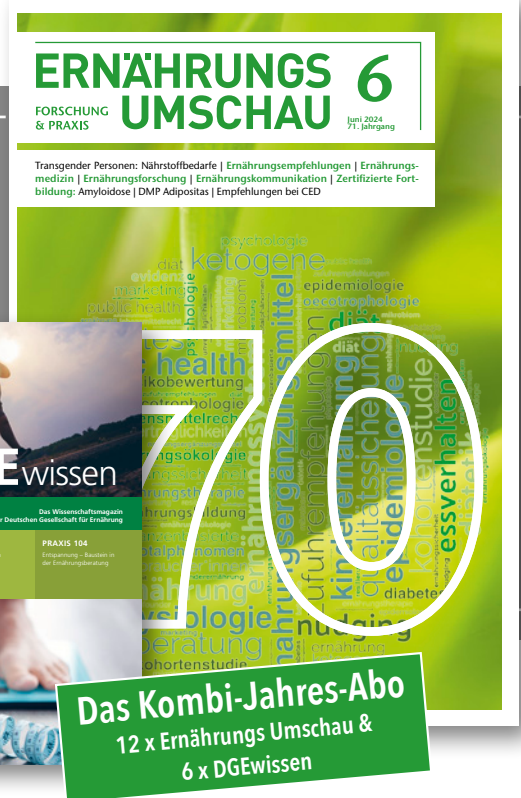
- MONATLICH TOPINFORMIERT IN BERUF UND PRAXIS
- FORTBILDUNGSBONUS: ZERTIFIZIERTE FORTBILDUNGEN (DGE, VDD, VDOE, VFED & RAL GEK UND SEIT 2025 AUCH E-ZERT) 6-MAL JÄHRLICH
- TAGUNGSBERICHTE UND KOMMENTARE ZU TRENDTHEMEN
- INTERNET: KOSTENLOSE SCHALTUNG VON STELLENGESUCHEN

ZUSÄTZLICH:

- VOLLZUGRIFF AUF WWW.ERNAEHRUNGS-UMSCHAU.DE
- NUTZUNG DES GESAMTEN ONLINE-HEFTARCHIVS AB 2001

Inhalte

- **Aktuell:** Erkenntnisse aus Ernährungswissenschaft & -praxis
- **Wissenschaft und Forschung:** Begutachtete Originalarbeiten und Übersichten (Peer Review)
- **Special:** Ein aktueller Themenschwerpunkt in jeder Ausgabe
- **Zertifizierte Fortbildung:** anerkannte Fortbildung für Ernährungsberater DGE, VDOE, VDD, VFED, RAL GEK, 2 CME-Punkte für Ernährungsmediziner
- **Mitteilungen:** Kurzmeldungen der Deutschen Gesellschaft für Ernährung e.V. und aus den Berufsverbänden
- **Im Fokus:** Topthemen in der Diskussion
- **Service:** Termine, Veranstaltungen und Kongressberichte
- **Ernährungspraxis & Diätetik:** Beratung, Umsetzung, Hintergründe



Sichern Sie sich jetzt Ihren Wissensvorsprung in Beruf und Praxis

Abonnieren Sie:



- ☐ 12 Ausgaben der **ERNÄHRUNGS UMSCHAU**
- ☐ das **Kombi-Jahres-Abo ERNÄHRUNGS UMSCHAU/DGEwissen**
- ☐ 12 Ausgaben der **ERNÄHRUNGS UMSCHAU** zum ermäßigten Preis für Auszubildende und Student*innen
- ☐ das **Kombi-Jahres-Abo ERNÄHRUNGS UMSCHAU/DGEwissen** zum ermäßigten Preis für Auszubildende und Student*innen

Mit einem Abonnement der ERNÄHRUNGS UMSCHAU profitieren Sie monatlich von aktuellen und wissenschaftlich recherchierten Beiträgen rund um Ernährung, Forschung und Praxis. Außerdem haben Sie vollen Zugriff auf unser gesamtes Archiv, das bis zum Jahr 2001 zurückreicht.

Unsere Datenschutzhinweise zum Umgang mit personenbezogenen Daten finden Sie unter: <https://www.ernaehrungs-umschau.de/information/datenschutz/>



Prof. Dr. Sabine Kulling

NewFoodSystems – Zukunft der Ernährung gemeinsam gestalten



Prof. Dr. Ute Weisz

Wie ernähren wir eine wachsende Weltbevölkerung nachhaltig, gesund und zugleich wirtschaftlich tragfähig? Schon heute konkurrieren Nahrungsmittelproduktion, Tierhaltung, Energiepflanzenanbau und Naturschutz um dieselben Flächen. Diese Flächenkonkurrenz macht deutlich: Forschungsergebnisse müssen in praktikable Lösungen übersetzt werden, die Politik, Wirtschaft und Gesellschaft gleichermaßen einbeziehen. Damit wissenschaftliche Erkenntnisse aus der Forschung auch Anwendung finden, müssen sie den Weg aus den Laboren in die Praxis finden.



Prof. Dr. Hannelore Daniel

Genau hier setzt der vom Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt geförderte Innovationsraum NewFoodSystems an. Er vereint Partner aus Lebensmittelforschung und -industrie mit dem Ziel, bioökonomische Innovationen für die Ernährungs- und Lebensmittelsysteme der Zukunft anzustoßen. Dabei geht es nicht nur darum, neue Technologien zu entwickeln, sondern diese auch in konkrete Anwendungen zu überführen. Dieser Transfergedanke ist von Beginn an Kern des Innovationsraums.



Dr. Leonie Fink

Er vernetzt starke Partner, bündelt Kompetenzen und fördert die enge Zusammenarbeit von Forschung und Anwendung. So entsteht eine Plattform, die langfristige Impulse für die Transformation der Ernährungs- und Lebensmittelsysteme setzt.

Die Transformation unserer Ernährungs- und Lebensmittelsysteme ist eine interdisziplinäre und langfristige Gemeinschaftsaufgabe. Sie gelingt nur, wenn wir Wissen teilen, Ideen entwickeln und Erfahrungen austauschen – und daraus gemeinsames Handeln entsteht. Dabei ist klar: Die Überbrückung der verschiedenen Wissenschaftskulturen braucht gegenseitiges Vertrauen und Wertschätzung. Ebenso braucht es den Mut, neue Wege zu gehen, innovative Strukturen zu etablieren und geeignete Rahmenbedingungen zu schaffen, damit aus Erkenntnissen tatsächlich Veränderung wird. Der Innovationsraum NewFoodSystems leistet hierzu einen wichtigen Beitrag und kann nach unserer Überzeugung zugleich als Blaupause für künftige Strukturen, etwa Food Systems Research Hubs¹, dienen.



Dr.-Ing. Lara Eitzbach

Mit diesem Sonderheft möchten wir Ihnen einen Einblick in die Vielfalt der Forschungs- und Entwicklungsprojekte von NewFoodSystems geben. Neun Beiträge stellen neue Ansätze, Produkte und Prozesse vor – von alternativen Proteinquellen über innovative Produktions- und Anbauverfahren bis hin zu Fragen der Akzeptanz und Markteinführung neuartiger Lebensmittel. Zwei übergeordnete Artikel ordnen den Innovationsraum selbst sowie das Thema Novel Food in einen größeren Kontext ein.



Janina Horn

Wir laden Sie herzlich ein, diese Vielfalt zu entdecken – und gemeinsam mit uns die Ernährung von morgen zu gestalten.

Das Koordinationsteam NewFoodSystems
Max Rubner-Institut, TU München

Gefördert durch:



¹ Wissenschaftsrat: Perspektiven der Agrar-, Lebensmittel- und Ernährungswissenschaften. Köln. 2024. DOI: 10.57674/txjy-7n56.

Inhalt



Editorial

1

NewFoodSystems

Der Innovationsraum NewFoodSystems und die Transformation unserer Ernährungs- und Lebensmittelsysteme

Leonie Fink et al.

DOI: 10.4455/eu.2024.032

Zur Rechtskonformität neuartiger Lebensmittel

Hannelore Daniel et al.

DOI: 10.4455/eu.2025.049

Innovationsfeld „Herstellung und Applikation neuer Lebens- und Futtermittelzutaten“

Pflanzliche Proteinzutaten

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

Ute Schweiggert-Weisz et al.

DOI: 10.4455/eu.2025.019

Essbare Filme auf Basis von Pflanzen- proteinen für sensorisch verbesserte Wurstersatzprodukte

Verena Schmidt et al.

DOI: 10.4455/eu.2025.059

Innovationsfeld „Controlled Environment Cultivation“

Technologie und Prozesse für kultiviertes Fleisch

Grundlagen, Herausforderungen und Perspektiven

Marie-Luise Schlieker et al.

DOI: 10.4455/eu.2025.025

13



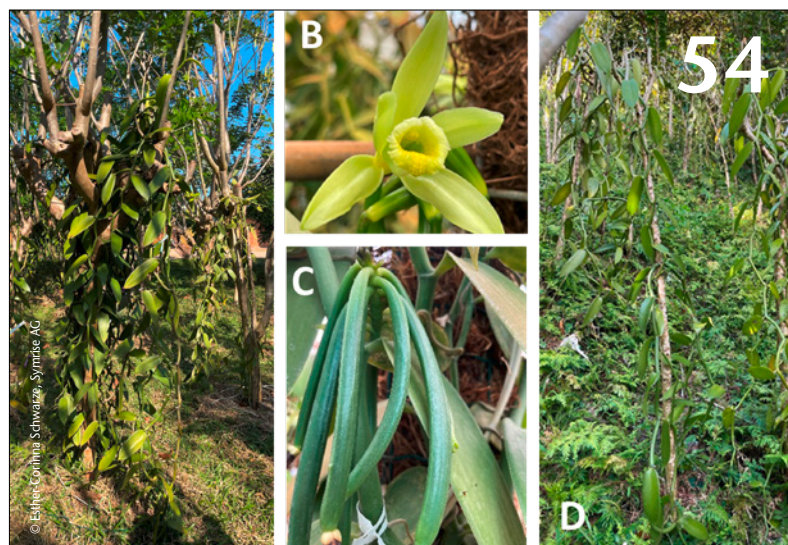
38



48



Bildnachweis: Alle Abbildungen stammen von den Autor*innen, der ERNÄHRUNGS UMSCHAU bzw. den bei den Abbildungen angegebenen Quellen, soweit nicht nachstehend angegeben. Für weitere Informationen wenden Sie sich ggf. an die Redaktion.



Innovationsfeld „Controlled Environment Cultivation“

48 Produktion von Aroma- und Gewürzpflanzen im Indoor-Farming

Melinda Sattler et al.

DOI: 10.4455/eu.2025.043

54 Die faszinierende Welt der Vanille

Herkunft, wirtschaftliche Bedeutung und Strategie für die nachhaltige Kultivierung

Sebastian T. Soukup et al.

DOI: 10.4455/eu.2025.057

60 Modulare Produktion und Verwertung frischer Mikroalgen

Ein Bioraffinerie-Ansatz für *Spirulina*

Felix Krujatz et al.

DOI: 10.4455/eu.2025.060



Innovationsfeld „Ressourcen-effizientes Energie- und Stoffstrommanagement, Systemintegration“

70 Larvenmehl der Schwarzen Soldatenfliege (*Hermetia illucens*) eignet sich für die Fütterung der Weißbeingarnele (*Penaeus vannamei*) unter Praxisbedingungen in einer modernen Kreislaufanlage

Timo Stadlander et al.

DOI: 10.4455/eu.2025.034

79 Pilzmyzel als Nahrungsmittel

Wann kommt die Novel-Food-Zulassung?

Pia Bergmann et al.

DOI: 10.4455/eu.2025.040



Übergeordnete Projekte

85 Insekten als nachhaltige Proteinquelle Potenziale und Herausforderungen

Benedikt Jahnke et al.

DOI: 10.4455/eu.2025.058

94 Impressum

Der Innovationsraum NewFoodSystems und die Transformation unserer Ernährungs- und Lebensmittelsysteme

Leonie Fink, Diana Bunzel, Janina Horn, Lara Etzbach, Hannelore Daniel, Ute Schweiggert-Weisz, Sabine E. Kulling

Klimawandel, wachsende Bevölkerungszahlen und die Auswirkungen anthropogener Umweltbelastungen stellen die Lebensmittelproduktion für die globale Gemeinschaft vor große Herausforderungen. Gemeinsam gilt es, neue Wege zu gehen und Lösungen für eine Transformation unserer Ernährungs- und Lebensmittelsysteme zu erarbeiten. Der Innovationsraum NewFoodSystems will hierzu einen Beitrag leisten und arbeitet an neuen Ansätzen für die Ernährung von morgen.

Einleitung

Wie nie zuvor stehen unsere Lebensmittel- und Ernährungssysteme vor einem fundamentalen Wandel sowohl in ihren sächlichen und technologischen Dimensionen als auch im Wertekanon der Menschen. Globale Krisen wie Kriege, Klimawandel, Biodiversitätsverlust, die Reduktion agrarischer Landflächen, die Erschöpfung fossiler Rohstoffe und zuletzt die COVID-19-Pandemie offenbaren die Vulnerabilität unserer globalisierten Ernährungs- und Lebensmittelsysteme. Die Versorgung der wachsenden Weltgemeinschaft mit Lebensmitteln steht damit vor immer größer werdenden Herausforderungen. Dadurch entsteht der Ruf nach nachhaltigeren Ernährungs- und Lebensmittelsystemen, die gleichermaßen gesundheitsförderlicher, ethisch verantwortungsvoller, alltagsadäquater, sozial gerechter, wirtschaftlich tragfähiger und resilientere sind [1]. Die geforderte Transformation hin zu nachhaltigeren und resilienteren Ernährungs- und Lebensmittelsystemen erfordert eine gemeinsame Anstrengung und das Zusammenspiel unterschiedlichster Akteure und Akteurinnen.

Letztlich ist ein verändertes Ernährungsverhalten der Konsumentinnen und Konsumenten erforderlich, ebenso wie die Nutzung neuer Rohstoffquellen und Technologien in der Genese, Be- und Verarbeitung sowie Distribution der Lebensmittel.

Für die deutsche Ernährungsindustrie mit einem Umsatz von ca. 218,5 Mrd. € und rund 637 000 Beschäftigten [2] stehen damit fundamentale Veränderungen an. Forschung und Entwicklung für Produkt- und Prozessinnovationen spielen dabei eine immer größer werdende Rolle, um die Branche auch international wettbewerbs- und zukunftsfähig aufzustellen [3]. Allerdings zeigt sich bei den Ausgaben für Innovationen in den letzten Jahren eher ein Rückgang: Die Innovationsintensität (Anteil der Innovationsaufwendungen aller Unternehmen am Branchengesamtumsatz) liegt mit 1 % auf einem niedrigen Niveau [4]. Besondere Hürden sind unzureichendes Eigen- und Fremdkapital sowie der fehlende Zugang zu staatlichen Zu-

schüssen und Fördermitteln. Einen forschungspolitischen Rahmen bildet hier u. a. die Bioökonomiestrategie der Bundesregierung und damit einhergehende Förderprogramme für große thematisch ausgerichtete Verbundvorhaben oder Forschungscluster [3]. Für die Transformation im Sinne einer nachhaltigeren Entwicklung sind diese durch die Politik getragenen Maßnahmen von großer Bedeutung [5].

Die Bioökonomie stellt dabei ein prioritäres und interdisziplinäres Themenfeld dar, um die Transformation der Ernährungs- und Lebensmittelsysteme durch Innovationen voranzutreiben.

Bioökonomie umfasst nach dem Verständnis der Bundesregierung „die Erzeugung, Erschließung und Nutzung biologischer Ressourcen, Prozesse und Systeme, um Produkte, Verfahren und Dienstleistungen in allen wirtschaftlichen Sektoren für ein zukunftsfähiges Wirtschaftssystem bereitzustellen“. Bioökonomische Innovationen basieren darauf, biologisches Wissen mit technologischen Lösungen zu vereinen und sich dabei die natürlichen Eigenschaften biogener Rohstoffe zunutze zu machen [6].

Es ist evident, dass für das Gelingen des Transformationsprozesses das Zusammenwirken von Wissenschaft, Wirtschaft und Gesellschaft essenziell ist. Hierzu versucht der Innovationsraum „NewFoodSystems – Neue Lebensmittelsysteme“ Strukturen zu schaffen, um innovative und konzeptionell neue Lösungen zur Nutzung neuer Rohstoffe für Lebens- und Futtermittel sowie deren flächenschonenden Produktionsverfahren weiterzuentwickeln.



Der Innovationsraum NewFoodSystems

Der Innovationsraum NewFoodSystems repräsentiert eines von insgesamt vier Konsortien im Programm „Innovationsräume Bioökonomie“, die im Rahmen der „Nationalen Forschungsstrategie BioÖkonomie 2030“ vom Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt gefördert werden.

Der Auftrag an die Innovationsräume ist die Entwicklung einer Innovationskultur, die kreative Forschungs- und Entwicklungsarbeit zwischen Unternehmen und wissenschaftlichen Einrichtungen im Feld der Bioökonomie befördert. Das grundsätzlich Neue am Förderkonzept ist, dass eine Förderung von bis zu 20 Mio. € auf Basis eines Konzepts bewilligt wurde. In der Laufzeit obliegt die Initiierung und fachliche Begutachtung der einzelnen Forschungs- und Entwicklungsprojekte wie auch die Ausgestaltung der Koordinations- und Netzwerkaktivitäten und der Öffentlichkeitsarbeit den Innovationsräumen selbst. Als Bedingung für die vollumfängliche Freisetzung der Fördermittel ist seitens des Fördermittelegers allerdings eine signifikante finanzielle Beteiligung der Wirtschaft gefordert. Dabei setzt 1 € privat eingebrachter Mittel jeweils 1,50 € Fördermittel frei.

Die Grundidee des Innovationsraums NewFoodSystems ist es von Beginn an gewesen, interessierte Akteure und Akteurinnen aus der Lebensmittel- und Ernährungsforschung und der Lebensmittel-

wirtschaft zusammenzubringen, um gemeinsam bioökonomische Innovationen anzustoßen und Forschungsergebnisse umfassender als bisher zu nutzen.

Der Innovationsraum hat das übergeordnete Ziel, neue Ansätze für die Ernährung von morgen zu finden und verfolgt dabei die Mission, als kontinuierlicher Inkubator für die Exploration, Entwicklung und Evaluation neuer und neuartiger, qualitativ hochwertiger und umweltschonender Produktionssysteme für Lebensmittel und Futtermittel im offenen Dialog mit der Gesellschaft zu agieren. Dafür werden Partnerschaften gesucht, die die Entwicklung von Prozessen, Produkten oder Dienstleistungen innerhalb unserer Lebensmittelsysteme adressieren und in Forschungs- und Entwicklungsprojekten umsetzen. So entstehen Public-Private-Partnerships, die sich mit ihren Expertisen und an Verwertungszielen orientiert ergänzen. Damit verbunden ist der Anspruch, dass alle neuen Verfahren oder Produkte eine ganzheitliche Bewertung erfahren, welche die Qualität und Sicherheit, Verbraucherakzeptanz, Marktfähigkeit, Wirtschaftlichkeit, ökologische Nachhaltigkeit sowie den jeweiligen Rechtsrahmen berücksichtigt. Der Innovationsraum begleitet somit als Pate die Entwicklung neuer Produkte und Verfahren zur erfolgreichen Überführung in die Märkte und in den (Ernährungs-)Alltag der Menschen.

Der Innovationsraum wird vom Max Rubner-Institut (MRI) zusammen mit der Technischen Universität München koordiniert und zeichnet sich durch seinen interdisziplinären Charakter aus. Dem einzigartigen Konsortium haben sich bereits mehr als 70 Partner aus Wissenschaft (Universitäten, Hochschulen, Fraunhofer-Institute, Leibniz-Institute und Bundesforschungsinstitute) und Wirtschaft (Start-ups, KMU, Mittelstand und Großunternehmen) angeschlossen, die nahezu alle Kompetenzbereiche und Facetten von Ernährungs- und Lebensmittelsystemen abdecken (♦ Abbildung 1). Diese reichen vom Anbau und der Erzeugung von Rohstoffen über die Konzeption und den Bau von Anlagen, der Herstellung und Verarbeitung von Zutaten für Lebens- und Futtermittel sowie deren Applikation bis hin zum Handel. Zudem werden in NewFoodSystems fachübergreifende Expertisen zur



Abb. 1: Das Konsortium des Innovationsraums NewFoodSystems, Stand Juli 2024

ganzheitlichen Bewertung neuer Lebensmittelsysteme zusammengeführt. Diese umfassen naturwissenschaftliche, ökologische, ökonomische, sozio-ökonomische, kulturwissenschaftliche und juristische Aspekte. NewFoodSystems ist im Dezember 2019 gestartet und hat sich zwischenzeitlich als ein vitaler Forschungsverbund etabliert, der sich kontinuierlich weiterentwickelt, indem neue Partner aufgenommen und fortlaufend Ideen zu innovativen Forschungs- und Entwicklungsvorhaben generiert werden.

Die Forschungsthemen im Innovationsraum

Die thematische Ausrichtung des Innovationsraums ist durch die drei Innovationsfelder „Controlled Environment Cultivation“, „Herstellung und Applikation neuer Lebens- und Futtermittelzutaten“ und „Ressourceneffizientes Energie- und Stoffstrommanagement, Systemintegration“ definiert (♦ Abbildung 2). Die verschiedenen Forschungs- und Entwicklungsprojekte von NewFoodSystems sind dabei sowohl in einem Innovationsfeld als auch feldübergreifend verortet (♦ Tabelle 1).

Im Zentrum von **Innovationsfeld I** (Controlled Environment Cultivation) steht die Kultivierung von Organismen wie Pflanzen, Pilzen, Mikroalgen und Insekten in geschlossenen und kontrollierbaren Systemen. Diese Art der Erzeugung kann Bestandteil flächen- und ressourcenschonender Konzepte sein, in denen unabhängig von nicht-steuerbaren Umwelteinflüssen lokal, ganzjährig und in konstanter Qualität produziert werden kann. Mit dem Ziel, den Konsum an tierischen Lebensmitteln deutlich zu senken und den Verzehr an nachhaltigen Alternativen zu steigern, wurde das **Innovationsfeld II** (Herstellung und Applikation neuer Lebens- und Futtermittelzutaten) etabliert. Der Schwerpunkt liegt hier auf der Herstellung, Weiterverarbeitung und Charakterisierung von alternativen Proteinen und weiteren funktionalen Zutaten sowie deren Einsatz in Lebens- und Futtermitteln. Im **Innovationsfeld III** (Res-

sourceneffizientes Energie- und Stoffstrommanagement, Systemintegration) wird unter anderem durch die Kombination verschiedener Anbausysteme für beispielsweise Pflanzen, Mikroalgen, Insekten und Aquakulturen eine besonders effiziente Stoffstromnutzung und im Idealfall eine CO₂-neutrale Produktion angestrebt. Von Bedeutung ist hier auch die effiziente Verwertung von Nebenströmen aus der Lebensmittelverarbeitung.

Unter dem Dach von NewFoodSystems konnten bisher 18 Forschungs- und Entwicklungsvorhaben als Verbundprojekte initiiert werden, die sich innerhalb dieser Innovationsfelder mit Themen wie Indoor-Kultivierung von Stärke-, Kräuter- und Aromapflanzen, alternativen Proteinen und ihren Rohstoffquellen, Mikroalgen, Insekten, kultiviertem Fleisch und Pilzen befassen. Zwei weitere Projekte des Deutschen Museums Nürnberg – Das Zukunftsmuseum dienen der Kommunikation und Interaktion mit der breiten Öffentlichkeit und insbesondere Schulklassen. Einzelne Vorhaben und ihr Themengebiet werden in den nachfolgenden Beiträgen dieser Sonderpublikation detaillierter dargestellt.

Ganzheitliche Bewertung als Wegbereiter neuer Produkte und Verfahren in den Markt

Die ganzheitliche Bewertung der Verfahren und Produkte ist ein tragendes Element des Innovationsraums. Viele der neuen Technologien, Rohstoffe und Produkte unterliegen vor der Markteinführung in Europa einer Zulassung nach der Verordnung für Neuartige Lebensmittel (Novel Food 2015/2283). Neben der Unbedenklichkeit von Technologie und Produkt stehen jedoch auch Verbraucherakzeptanz, Qualität und Wirtschaftlichkeit als Bewertungskriterien im Fokus der begleitenden Forschung. Bei neuartigen Produkten – z. B. Insekten im Lebensmittelbereich – ist die Verbraucherakzeptanz eine wesentliche Determinante für die Marktfähigkeit und den Markterfolg. Gleiches gilt für *in vitro* erzeugte Fleischwaren. Eine zentrale Hürde ist hier weiterhin, dass eine Verkostung, z. B. im Rahmen der Verbraucherakzeptanzforschung, bei manchen Produkten nicht ohne weiteres möglich ist, da sie ohne eine Zulassung als Novel Food nicht verkehrsfähig sind und daher selbst für eine Verkostung eine Ausnahmegenehmigung notwendig ist. Besonderes Augenmerk

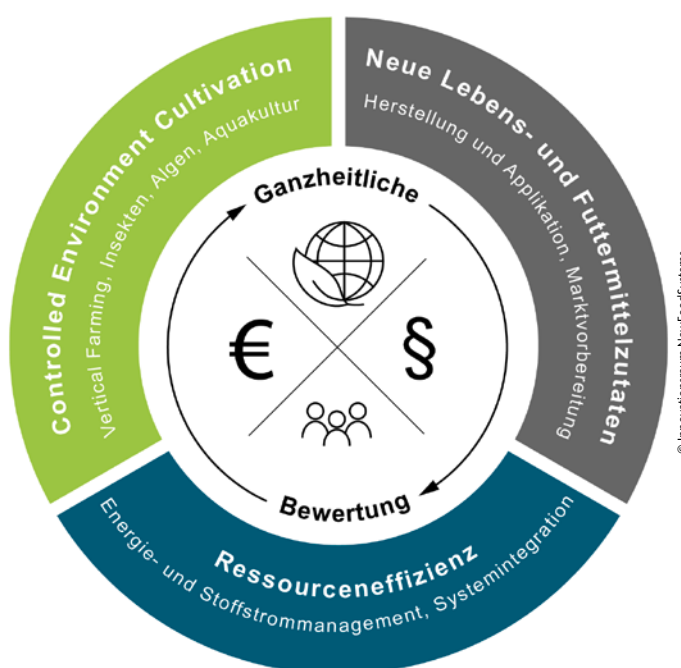
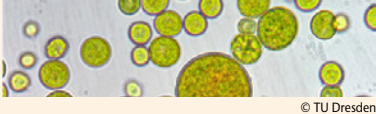
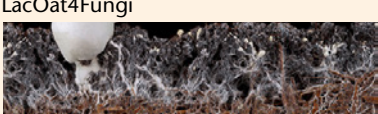


Abb. 2: Die Innovationsfelder des Innovationsraums NewFoodSystems

Projekt	Inhalt ^a	Zuordnung ^b	
Proteinschichten  © Kalle GmbH	Entwicklung proteinbasierter Schichtsysteme für essbare Verpackungskonzepte in der Lebensmittelindustrie		
Hemp4Food  © Signature Products GmbH	Ganzheitliche Nutzung von Hanfsamen für die Gewinnung hochwertiger und hochfunktioneller Proteinzutaten und funktioneller Nebenströme		
Nachhaltige Proteinzutaten  © Innovationsraum NewFoodSystems/Janosch Gruschczyk	Erforschung und Entwicklung nachhaltiger Proteinalternativen für die Anwendung in Lebens- und Futtermitteln		
AIProPlant  © Volker Lannert/Universität Bonn	Ernährungsphysiologische Evaluierung pflanzlicher Proteine und Proteinzutaten im Rahmen von Ernährungsinterventionsstudien		
BCFF  © Symrise AG	Nutzung der biokatalytischen Eigenschaften von Lebensmittelrohstoffen für die Herstellung von Aroma- und Geschmacksstoffen		
PERFEG-MEAT  © Prof. Dr. Marius Henkel/TUM	Optimierung der Ressourceneffizienz von pflanzlichen Fleischalternativen mit verbesserten Wachstumsfaktoren für kultiviertes Fleisch		
In4Food  © Innovationsraum NewFoodSystems/Janosch Gruschczyk	Controlled-Environment-Produktion und Verarbeitung von hochqualitativen pflanzlichen Rohstoffen zur Verwendung in Lebensmitteln		
ALGAE-MODULE 4.0  © Innovationsraum NewFoodSystems/Janosch Gruschczyk	Verfahrensentwicklung zum Aufbau einer modularen Produktionsanlage für algenbasierte Lebensmittel		
IKARUS  © Pixabay.com/manseok_Kim	Innovative Kultursystementwicklungen und Produktverarbeitung für eine klimaautarke und urbane Sicherung der Lebensmittelproduktion		
ENABLE  © TU Dresden	Entwicklung algenbasierter bioaktiver Lebensmittel auf Basis von Mikroalgen		

HELP  © Pixabay.com/manfredrichter	Entwicklung von Blaulicht und UV-Belichtungsstrategien für geschlossene Kultursysteme zur Induktion von pflanzlichen sekundären Inhaltsstoffen und Reduktion von Krankheitserregern		
SustainVanil  © Innovationsraum NewFoodSystems/Janosch Gruschczyk	Steigerung und Stabilisierung des Ertragspotenzials von Vanille durch innovative Anbautechniken und -systeme (+ Vorprojekt)		
FoxyVanil  © iStock.com/luamduan	<i>Fusarium-oxysporum</i> -Infektion bei Vanille: Einfluss auf Pflanzenstoffwechselwege und Eigenschaften pathogen-toleranter Genotypen		
reKult4Food  © Innovationsraum NewFoodSystems/Janosch Gruschczyk	Nachhaltige und resiliente Kultivierung von Insekten für den innovativen Einsatz in der Futter- und Lebensmittelherstellung		
Grassessentials  © Pixabay.com/Holger Langmaier	Biotechnologische Gewinnung natürlicher Aromen aus Gräsern/kommunalem Grünschnitt		
LacOat4Fungi  © Adobe Stock/575704741	Produktion von proteinreichen Myzelien aus Basidiomycota unter der Verwertung von Mutterlauge aus der Lactoseherstellung und Haferokara (Nebenströme der Hafermilchproduktion)		
Pr:Ins – Ganzheitliche Bewertung  © Innovationsraum NewFoodSystems/Janosch Gruschczyk	Ganzheitliche Bewertung von alternativen Proteinquellen unter der besonderen Berücksichtigung von Insekten		
Ernährungsinnovationen  © Shutterstock.com/Viktor Kochetkov	Vermittlung und gesellschaftliche Akzeptanz von Ernährungsinnovationen		
EDiBLE  © Innovationsraum NewFoodSystems/Janosch Gruschczyk	Entwicklung von Dialogangeboten zur Bioökonomie in Lebensmittelsystemen		

Tab. 1: Forschungs- und Entwicklungsprojekte innerhalb des Innovationsraums

^a weitere Infos zu den Projekten unter → einfügen www.newfoodsystems.de/projekte

^b Legende für die Farbcodierung:

Innovationsfeld I: Controlled Environment Cultivation

Innovationsfeld II: Herstellung und Applikation neuer Lebens- und Futtermittelzutaten

Innovationsfeld III: Ressourceneffizientes Energie- und Stoffstrommanagement, Systemintegration

übergeordnete Projekte

erhalten vor allem auch die ökologischen Nachhaltigkeitsaspekte. Um die Umweltverträglichkeit zu bewerten, bietet sich beispielsweise eine Lebenszyklusanalyse (*Life Cycle Assessment*, LCA) an.

In dieser systematischen Analyse werden alle potenziellen Umweltwirkungen (Energie- und Stoffströme) von Produkten während des ge-

samten Lebenswegs erfasst und bewertet. Hier zeigt sich jedoch, dass es für viele der neuen und neuartigen Rohmaterialien und Produkte kaum belastbare Kenngrößen gibt, die eine valide Auslobung ihrer Umweltverträglichkeit erlaubt. Ein Ziel im Innovationsraum ist es deshalb, zumindest für den Bereich der alternativen Proteine eine bessere Datengrundlage und ein erweitertes Verständnis für die Komplexität der Kalkulationen zu schaffen.

Die bisherigen Erfahrungen in NewFoodSystems zeigen, dass dieser ganzheitliche Bewertungsansatz zwar insgesamt eine hohe Beachtung und Zustimmung findet, in der Praxis aber meist schwer zu realisieren ist. Dies ist unter anderem auch dem zugrundeliegenden Förderkonzept geschuldet, das bei den einzelnen Vorhaben einen entsprechend hohen Eigenanteil der beteiligten Unternehmen zur Freisetzung von Fördermitteln voraussetzt. Mit diesen Mitteln werden dann in erster Linie die Forschungsinstitute und Hochschulen, aber auch der Förderanteil der Unternehmen innerhalb der Projekte finanziert. Daher gilt im Innovationsraum prinzipiell, dass jedes Projekt mit ausreichend Eigenleistung der Wirtschaftsunternehmen gegenfinanziert sein muss. Dies gelingt dann, wenn attraktive Projekte definiert werden, die sich zum Teil in äußerst kompetitiven Themenfeldern bewegen. Gleichzeitig muss eine zeitnahe Verwertung der Projektergebnisse im Auge behalten werden, ohne den vorwettbewerblichen Bereich zu verlassen. Aspekte der ganzheitlichen Bewertung und die Möglichkeit ihrer Berücksichtigung passen häufig nur eingeschränkt in den eng gesteckten finanziellen Rahmen.

Der Spagat zwischen Innovation und öffentlichem Verwaltungswesen

Das Ziel der Fördermaßnahme „Innovationsräume Bioökonomie“ ist es, Innovationen anzustoßen, welche als Bausteine eines gesamtgesellschaftlichen Wandlungsprozesses im Sinne der Bioökonomie fungieren [7].

Innovation findet vorwiegend an den Grenzen von Disziplinen statt.

Um das Innovationspotenzial, das durch die Zusammenarbeit von Akteuerinnen und Akteuren aus verschiedenen Fachdisziplinen – sowohl aus der Wissenschaft als auch aus der Wirtschaft –

entsteht, effektiv zu nutzen und dynamisch weiterzuentwickeln, ist eine agile Managementstruktur erforderlich.

Der Innovationsraum NewFoodSystems wurde von Vertreterinnen und Vertretern unterschiedlicher Fachdisziplinen ins Leben gerufen. Er wird durch die mannigfaltigen komplementären Expertisen getragen sowie durch nationale und internationale Kooperationen und Netzwerke gestützt. Eine Steuerungs- und Managementstruktur mit dem Koordinationsbüro und einem Kernteam als zentrale Einheit übernimmt alle koordinativen und administrativen Aufgaben. Das Koordinationsbüro fungiert als Kontaktstelle für den Projektträger, die Partner*innen, potenzielle neue Partner*innen und externe Anfragen. Auch die Öffentlichkeitsarbeit, die einen hohen Stellenwert besitzt, um die Themen in die Gesellschaft zu tragen, wird von hier aus initiiert, organisiert und begleitet. Der Lenkungsausschuss, in dem auch die Projektkoordinatorinnen und Projektkoordinatoren der laufenden Verbünde vertreten sind, fungiert im Innovationsraum als Entscheidungsgremium. Er entscheidet über die Aufnahme neuer Partner*innen, die Einreichung von Projektanträgen beim Projektträger auf Basis der vom Koordinationsbüro extern eingeholten Gutachten sowie die strategische Ausrichtung des Innovationsraums. Beraten wird der Lenkungsausschuss dabei von einem Innovationsrat, der Impulse für neue Themen sowie für den Ausbau und die Fortschreibung des Innovationsraums setzt.

Die Administration des Innovationsraums ist darüber hinaus mit umfangreichen Berichts- und Dokumentationspflichten verbunden. Zu Beginn der Laufzeit stellte die Ausarbeitung eines Konsortialvertrags, der den rechtlichen Rahmen für alle Partner*innen definiert, eine erste Herausforderung dar. Auch die juristischen Aspekte im Zusammenhang mit dem Schutz von IP- und Verwertungsrechten erfordern bei großen Konsortien Zeit und besondere Sorgfalt. Bürokratisierte Verwaltungsabläufe mit zum Teil hohem zeitlichen Vorlauf bei Beschaffungen und der Vergabe von Dienstleistungen behindern oftmals die notwendige Agilität und Flexibilität als wichtige Determinanten von Innovationen [8]. Wenn marktreife Lösungen aus Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten den zeitnahen Transfer in die Anwendung und die Akzeptanz in der Gesellschaft finden sollen, erfordert dies einen sehr viel größeren operativen Spielraum solcher Verbünde. Diesen gilt es zu adressieren.

Den Wandel gestalten – Beiträge zur gemeinsamen Transformation

Eine Transformation unserer Ernährungs- und Lebensmittelsysteme kann nur gemeinsam im Schulterschluss zwischen Wissenschaft, Wirtschaft und Gesellschaft gelingen. Hierzu möchte der Innovationsraum seinen Beitrag leisten. Übergeordnetes Ziel ist dabei das Schaffen von gesellschaftlicher Akzeptanz für neue bzw. neuartige Produktionsverfahren und Produkte, um die Bioökonomie „über den Teller“ an die Menschen zu bringen (♦ Abbildung 3).

Die wissenschaftlichen Ergebnisse aus den einzelnen Forschungs- und Entwicklungsprojekten werden in nationalen und internationalen Fachzeitschriften publiziert und auf Veranstaltungen und

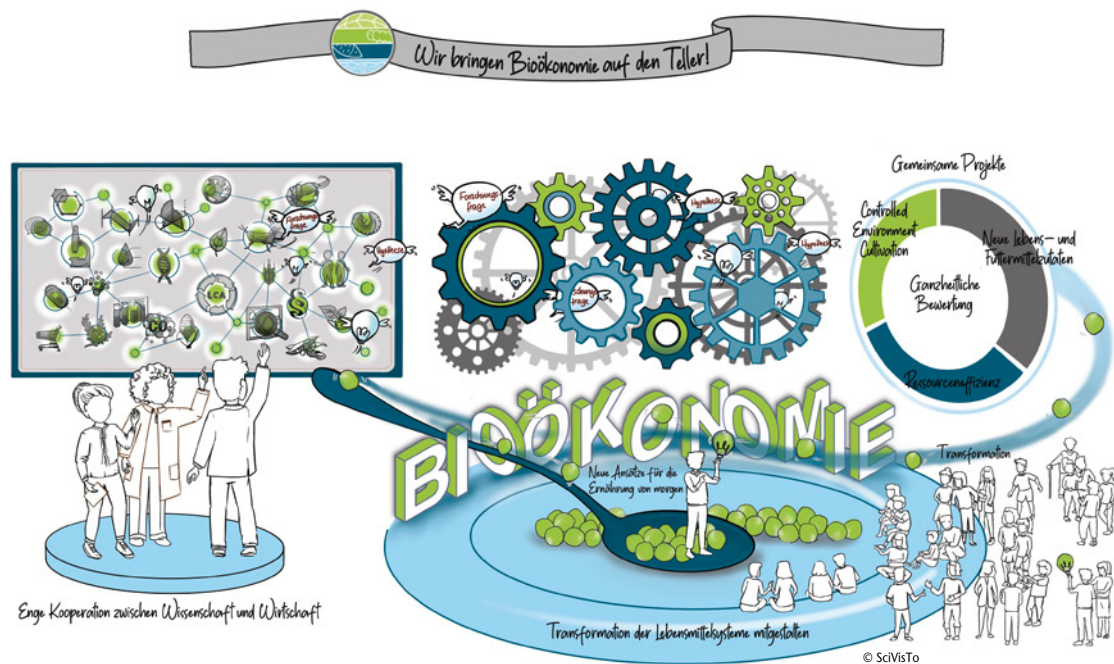


Abb. 3: Strategische Visualisierung des Innovationsraums NewFoodSystems

Kongressen präsentiert. In ihrer Beteiligung haben Forschungseinrichtungen und Hochschulen den Nutzen einer Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses mit Bachelor- und Masterarbeiten, Dissertationen und der weiteren wissenschaftlichen Qualifizierung von Postdoktoranden. Zudem hat der Innovationsraum im Oktober 2025 eine wissenschaftliche Konferenz mit dem Titel „Towards New Food Systems – Lebensmittelsysteme neu gedacht“ veranstaltet.

Der Transfer in die Praxis wird mit Unterstützung der Koordination des Innovationsraums bereits zu einem frühen Zeitpunkt projektbegleitend initiiert, um die Forschungsergebnisse möglichst effizient in die Verwertung zu überführen.

In diesem Rahmen werden Webinare zum Beispiel zu Patentierungsmöglichkeiten, dem Anforderungsprofil für eine Novel-Food-Zulassung oder den regulatorischen Anforderungen des Nagoya¹-Protokolls angeboten. Dem Transfer in die Praxis dient auch die initiierte Workshop-Reihe „Zukunft is(s)t jetzt“, die federführend vom Koordinationsbüro konzipiert und zusammen mit der FH Münster im food lab muenster durchgeführt wurde. Ein Ziel der Workshop-Reihe ist es, neue Lebensmittel und Lebensmittelzutaten in den Ernährungsalltag der Menschen zu bringen, indem Expertinnen und Experten des Lebensmittelhandwerks und des Kochens als Multiplikatorinnen und Multiplikatoren die Transformationsprozesse „auf den Teller bringen“. Jeder Workshop hat dabei ein anderes Schwerpunktthema (z. B. Hülsenfrüchte und pflanzliche Proteine, Mikro- und Makroalgen). In den 2-tägigen Workshops wurde den Teilnehmerinnen und Teilnehmern dabei die Möglichkeit geboten, sich intensiv mit den Lebensmit-

teln und Lebensmittelzutaten auseinanderzusetzen, ihre technologischen Eigenschaften kennenzulernen, verschiedene Rezepturen zu verkosten und sich anschließend eigenständig oder in Teams an neuen Rezepturen auszuprobieren. In begleitenden Vorträgen wurden wissenschaftsbasierte Informationen zu den Rohstoffen und Zutaten von den jeweiligen Partner*innen im Innovationsraum zur Verfügung gestellt.

Trotz aktueller Foodtrends, die eine Offenheit für neue Lebensmittel suggerieren, stehen Verbraucherinnen und Verbraucher in Deutschland neuen Technologien zur Lebensmittelproduktion oft skeptisch gegenüber.

NewFoodSystems sucht daher gezielt den Dialog mit der Gesellschaft, um Akzeptanzbarrieren abzubauen. Unterstützt von seinem lebendigen Netzwerk konnte NewFoodSystems im

¹ „Das Nagoya-Protokoll setzt einen internationalen Rechtsrahmen für nationale Regelungen betreffend den Zugang zu genetischen Ressourcen, die Aufteilung der sich aus deren Nutzung ergebenden Vorteile und für die Kontrolle der Einhaltung solcher Regelungen.“ (Quelle: www.bmuv.de/themen/naturschutz/biologische-vielfalt-international/nagoya-protokoll)

Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit bereits zahlreiche Veranstaltungsformate realisieren, sich an Veranstaltungen anderer beteiligen und Wissen über innovative Ernährungssysteme und Projektergebnisse verbreiten. Als bisher größte Unternehmung mit dem Ziel, die breite Öffentlichkeit über die Themen des Innovationsraums zu informieren, ist die Beteiligung an der Bundesgartenschau 2023 in Mannheim (14.04.–08.10.2023) mit einer großen Standfläche und wechselnden Schaufenstern in die Praxis und die Forschung zu nennen.

Neben diversen Veranstaltungen, der eigenen Website und Social Media (Instagram und LinkedIn) ist die Kooperation mit dem Deutschen Museum Nürnberg besonders hervorzuheben. Hier konnten mit den beiden Projekten als begleitende Maßnahmen zur Wissenschaftskommunikation, der Medienstation „Vertical Farming“, der Interaktionsstation „Aufgetischt“ und des Workshops „Was essen wir morgen?“ sowie dem erfolgreichen NewFoodSystems Day in 2022 verschiedene Dialogformate entwickelt und durchgeführt werden. Ein weiterer NewFoodSystems Day fand am 28.09.2024 statt und eine Sonderausstellung zu den Themen von NewFoodSystems kann seit Juli 2025 bis Anfang März 2026 im Deutschen Museum in Nürnberg besucht werden.

Ausblick

Wissenschaft und Wirtschaft haben sich in NewFoodSystems zusammengefunden und entwickeln in 18 Forschungs- und Entwicklungsprojekten neue Ansätze für die Lebensmittel von morgen. Einige dieser Projekte sind bereits abgeschlossen, während andere noch laufen. Begleitet wird dies durch zwei Projekte zur Ernährungskommunikation und dem Koordinationsvorhaben. Insbesondere der interdisziplinäre Austausch auf fachlicher Ebene und der Zugriff auf das Know-how aus unterschiedlichen Branchen machen die Zusammenarbeit in den einzelnen Forschungs- und Entwicklungsprojekten von NewFoodSystems besonders wertvoll und bergen entsprechendes Potenzial für bioökonomische Innovationen. NewFoodSystems versteht sich als ein vitaler Inkubator für Neues, versucht Innovationshürden zu identifizieren und zu adressieren und Lösungen an den Schnittstellen von Ernährungs- und Lebensmittelwissenschaften zu generieren. Dabei soll gleichermaßen auch der wissenschaftliche wie unternehmerische Nachwuchs gefördert werden.

Die Mission von NewFoodSystems, den Dialog mit der Gesellschaft „über den Teller“ zu suchen und Offenheit für die Bioökonomie zu schaffen ist eine große Herausforderung.

Eine Transformation erfordert die Akzeptanz für Neues und dies ist im Sektor Lebensmittel- und Ernährung besonders anspruchsvoll; ist er doch von gegenläufigen Interessen und konsolidierten Weltansichten geprägt.

In der Hoffnung, dass Wissenschaft zu gesellschaftlich getragenen Veränderungen beitragen kann, liefert der Innovationsraum mit all seinen Partner*innen seinen Beitrag und dies mit großem Engagement und in großer Verantwortung aller Beteiligten.

Das von NewFoodSystems entwickelte Konzept zielt auf einen langfristigen Innovationsraum ab, der auch über die Förderphase (01.12.2019–31.12.2025) hinaus als Impulsgeber und Mitgestalter der Transformation unserer Ernährungssysteme wirken soll. Nach Ablauf der Fördermaßnahme wird eine neue rechtliche Struktur notwendig sein, um bewährte Strukturen und das geschaffene Netzwerk soweit wie möglich aufrechtzuerhalten sowie neue Fördermöglichkeiten zu nutzen und weitere Projekte zu initiieren.

Im kürzlich erschienenen Bericht des Wissenschaftsrats zu Perspektiven der Agrar-, Lebensmittel- und Ernährungswissenschaften wird zur Bewältigung der notwendigen Transformation der Agrar- und Ernährungssysteme als nationale Strukturinnovation die Einrichtung mehrerer *Food Systems Research Hubs* empfohlen [9]. Mit dem Innovationsraum NewFoodSystems existiert bereits vieles von dem, was der Wissenschaftsrat hierzu beschreibt, nämlich ein „bundesweiter Zusammenschluss starker Akteurinnen und Akteure“, die „ihre jeweiligen Kompetenzen sowie Infrastrukturen unter einem konzeptionellen Dach mit gemeinsamer Governance ein(bringen)“, um „das Feld in Zukunft themenbezogen unter einer systemischen Perspektive (zu) integrieren“ und dem notwendigen Transformationsbedarf Rechnung zu tragen [9]. Der Innovationsraum NewFoodSystems steht hierzu bereit.

Würdigung des Beitrags von Kolleginnen und Kollegen als Mitgestalter*innen des Innovationsraums

Ein Innovationsraum wie dieser, dessen Konzeptphase bereits 2017 begann, lebt vom offenen Austausch von Ideen, konstruktiven Diskursen und Impulsen von außen. Die Autorinnen bedanken sich hier ausdrücklich bei allen, die NewFoodSystems über die Jahre begleitet haben, insbesondere bei den Mitgliedern des Lenkungsausschusses und Innovationsrats. Ein besonderer Dank gilt Prof. Peter Eisner (Fraunhofer IVV) als Mitinitiator des Innovationsraums sowie Prof. Ulrich Hamm, Prof. Gunther Hirschfelder, Dr. Alexis Katechakis und Dr. Gerhard Schmidt für ihre

Treue und wohlwollende Begleitung, den kritischen Blick und die wertvollen Ratschläge und Impulse. Dem Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR) und dem Projektträger Jülich danken wir für die gute Zusammenarbeit.

Förderung

Diese Arbeit geht aus dem „Innovationsraum NewFoodSystems“ (Projekte „Koordination und Management 2.0“ und „Verwertung und Management“) hervor und wird vom Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR) im Rahmen der Fördermaßnahme „Innovationsräume Bioökonomie“ als Teil der Nationalen Forschungsstrategie „BioÖkonomie 2030“ gefördert. Förderkennzeichen: 031B1367 und 031B1364.



Dr. Leonie Fink¹

Dr. Diana Bunzel^{1*}

Janina Horn²

Dr. Lara Etzbach²

Prof. Dr. Hannelore Daniel²

Prof. Dr. Ute Schweiggert-Weisz²

Prof. Dr. Sabine E. Kulling¹

¹ Max Rubner-Institut (MRI)

Institut für Sicherheit und Qualität bei Obst und Gemüse, Karlsruhe, Deutschland

² Technische Universität München

School of Life Sciences, Freising, Deutschland

* aktuell: Landwirtschaftliche Untersuchungs- und Forschungsanstalt Speyer, Speyer, Deutschland

Angaben zu Interessenkonflikten und zum Einsatz von KI

Die Autorinnen erklären, dass keine Interessenkonflikte bestehen und bei der Erstellung des Manuskripts keine KI-Anwendungen eingesetzt wurden.

Zitierweise

Fink L, Bunzel D, Horn J, Etzbach L, Daniel H, Schweiggert-Weisz U, Kulling SE: Der Innovationsraum NewFoodSystems und die Transformation unserer Ernährungs- und Lebensmittelsysteme. *Ernährungs Umschau* 2024; 71(9): M521–9. DOI: 10.4455/eu.2024.032

Literatur

1. Umweltbundesamt (UBA): Bausteine für die Transformation zu einem nachhaltigen Ernährungssystem. Berlin: Umweltbundesamt 2023. www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/2023-10-18_stern-ap6_broschuere_final_bf.pdf (last accessed on 29 July 2024).
2. Bundesvereinigung der Deutschen Ernährungsindustrie e. V. (BVE): BVE-Jahresbericht 2023. Berlin: BVE 2023. www.bve-online.de/presse/infothek/publikationen-jahresbericht/bve-jahresbericht-ernaehrungsindustrie-2023 (last accessed on 29 July 2024).
3. Bundesvereinigung der Deutschen Ernährungsindustrie e. V. (BVE): Innovationsreport der Ernährungsindustrie 2020. Innovationsentwicklungen und forschungspolitische Prioritäten. Berlin: BVE 2020. www.bve-online.de/download/bve-innovationsreport-2020 (last accessed on 29 July 2024).
4. Rammer C, Schubert T: Dokumentation zur Innovationserhebung 2023. Ergebnisse zu sozialen Innovationen, Umweltinnovationen, Energienutzung und Innovationshemmnissen. Mannheim: ZEW-Dokumentation Nr. 24-01 (2024). <https://ftp.zew.de/pub/zew-docs/docus/dokumentation2401.pdf> (last accessed on 29 July 2024).
5. Bioökonomierat: Bioökonomie nachhaltig umsetzen! Erste Handlungsempfehlungen des Bioökonomierats zur Umsetzung der Nationalen Bioökonomiestrategie. Berlin: BÖR 2023. www.bioekonomierat.de/media/pdf/arbeitspapiere/2023-06-07_boer_erste_Handlungsempfehlungen_Bioekonomie_nachhaltig_umsetzen_Langfassung.pdf?m=1702479108& (last accessed on 29 July 2024).
6. Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF): Nationale Bioökonomiestrategie. Berlin: Bundesministerium für Bildung und Forschung 2020. www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/Broschueren/nationale-bioekonomiestrategie-langfassung.pdf?__blob=publicationFile&v=5 (last accessed on 29 July 2024).
7. Bundesministerium für Bildung und Forschung. Bekanntmachung: Richtlinie zur Fördermaßnahme "Innovationsräume Bioökonomie" im Rahmen der "Nationalen Forschungsstrategie BioÖkonomie 2030". Bundesanzeiger vom 21.09.2016. www.bmbf.de/foerderungen/bekanntmachung-1250.html (last accessed on 29 July 2024).
8. Kussel G, Pavleka S, Schmidt CM: Innovationssystem Deutschland – Effizienz und Agilität der öffentlichen Verwaltung erhöhen. München: acatech STUDIE 2024.
9. Wissenschaftsrat (2024): Perspektiven der Agrar-, Lebensmittel- und Ernährungswissenschaften; Köln. DOI: 10.57674/txyj-7n56.



Zur Rechtskonformität neuartiger Lebensmittel

Hannelore Daniel, Christian Ballke und Sabine E. Kulling für das NewFoodSystems-Konsortium

Die Novel-Food-Verordnung regelt seit über 25 Jahren das Inverkehrbringen neuartiger Lebensmittel in Europa. Besonders neue Technologien erfordern eine umfassende Sicherheitsbewertung. Das aufwendige und langwierige Zulassungsverfahren stellt für innovative, meist junge Unternehmen eine große Hürde dar. Europa steht damit vor dem Zielkonflikt, Innovation zu fördern und gleichzeitig Sicherheit zu gewährleisten. Der Beitrag bietet eine genauere Betrachtung einzelner Zulassungsbeispiele.

Einleitung

Der Rechtsrahmen der Novel-Food-Verordnung (NFV) regelt in Europa in kontinuierlicher Anpassung seit mehr als 25 Jahren das Inverkehrbringen neuartiger Lebensmittel. Als neuartig gilt dabei ALLES, was bis zum Stichtag 15. Mai 1997 in Europa *nicht* in nennenswerter Menge verzehrt wurde und unter bestimmte Fallgruppen gefasst wird. Dies betrifft gleichermaßen die eingesetzten Rohstoffe als auch neue Verfahren zur Herstellung der Lebensmittel [1]. In der evolutionären Anpassung

der Verordnung haben sich dabei verschiedene Kategorien von neuartigen Produkten und Herstellungsverfahren herausgebildet (♦ Kasten).

Insbesondere die in den letzten Jahren sich etablierenden neuen Technologien für die Erzeugung von Rohstoffen durch die sog. Präzisionsfermentation oder durch *in-vitro*-Ansätze zur Erzeugung von Alternativprodukten zu Fleisch, Milch oder Fisch bedingen in ihrem disruptiven Charakter eine umfassende Bewertung der Unbedenklichkeit sowohl von Technologien als auch der Produkte. Die damit verbundenen Anforderungen und neuen Fragen stellen für die antragstellenden Unternehmen – häufig junge, forschungsgetriebene Start-ups – eine enorme Hürde dar. Die An-

tragsverfahren verlangen eine umfassende Dokumentation und erweisen sich in der Praxis meist als sehr langwierig. Vielfach schreckt dies die Unternehmen ab und veranlasst sie mitunter, in Weltregionen zu wechseln, die keine Zulassungsverfahren kennen oder diese zügiger und vielleicht auch mit mehr Mut zum Neuen ermöglichen.

Europa steht daher vor der Herausforderung, einerseits mit seinem bürokratischen Rahmen die Unbedenklichkeit neuartiger Produkte sicherzustellen, aber auch offen sein zu müssen für Innovationen im Sektor, insbesondere wenn sie auch ihren Ursprung in Europa haben.

Im globalen Wettbewerb darf der europäische Rechtsrahmen nicht zum Innovationshemmnis werden und durch recht langwierige Prozesszeiten den Unternehmen den zeitigen Markteintritt unmöglich machen. Eine Zulassung als Novel Food seitens der europäischen Behörde könnte jedoch auch als ein Zertifikat verstanden werden, gilt das Verfahren doch als besonders anspruchsvoll.

In seiner ausgeprägten europäischen Esskultur mit einer Vielzahl von traditionellen Produkten mit geschützten Herkunftsbezeichnungen ergibt sich ein weiter Raum von Dissonanzen. Ausdruck dessen sind etwa politische Forderungen, bestimmte neuartige Produktkategorien (Beispiel *in-vitro*-Fleisch) *a priori* zu verbieten. Gleichzeitig werden Forderungen laut, auch international mehr Harmonisierung in den Zulassungsverfahren und den Bewertungskriterien zu erreichen.

Im Folgenden soll anhand ausgewählter Beispiele dargestellt werden, welche Anforderungen ein Zulassungsantrag gemäß NFV stellt und welcher Zeitrahmen damit verbunden sein kann.

Die Novel-Food-Verordnung: Genese, Verfahren und Zulassungsformalitäten

Ihren Ursprung hat die NFV in der Zeit, als die ersten gentechnisch veränderten Organismen (GVO) – wie die in den USA und UK eingeführte „Flavr-Savr-Tomate“ – die Märkte erreichten. Aufgrund der erheblichen Vorbehalte oder einer grundsätzlichen Ablehnung von GVO in etlichen EU-Mitgliedstaaten wurde ein

Kategorien von neuartigen Lebensmitteln oder Ingredienzien, die unter die Novel-Food-Verordnung fallen

- neue Produktionsverfahren
- neue oder modifizierte Struktur/Molekülstruktur
- Mikroorganismen, Pilze, Algen
- aus Pflanzen oder deren Teilen
- aus Tieren oder deren Teilen
- Zell-/Gewebeulturen von Tieren, Pflanzen, Pilzen, Algen
- gestaltete Nanopartikel
- Mineralien oder aus Mineralien

gemeinschaftlicher Rechtsrahmen für das Inverkehrbringen solcher Produkte geschaffen. Von Beginn an war der Anwendungsbereich der Verordnung jedoch weiter gefasst als nur auf GVO. Er umfasste u. a. auch exotische Lebensmittel, die zum Stichtag noch nicht in nennenswertem Umfang innerhalb der EU verzehrt wurden. Ebenso sollten neue Technologien – etwa die Hochdruckbehandlung – berücksichtigt werden, sofern sie die Struktur oder Sicherheit eines Lebensmittels wesentlich veränderten.

Die ursprüngliche Fassung der Verordnung trat 1997 als (EG) Nr. 258/97 in Kraft. Seither wurde sie mehrfach überarbeitet und liegt heute in der aktualisierten Fassung als Verordnung (EU) 2015/2283 vor, die seit dem 1. Januar 2018 anwendbar ist. Eingeleitet wird das Zulassungsverfahren im Normalfall mit einem Antrag durch Einreichung eines Dossiers mit sämtlichen zulassungsrelevanten Informationen bei der Europäischen Kommission. Diese umfassen die Zusammensetzung, den Herstellungsprozess, die vorgesehene Verwendung des neuartigen Lebensmittels ebenso wie toxikologische Studien und eine ernährungsphysiologische Bewertung (♦ Kasten).

Nach einer formalen Prüfung des Antrags leitet die Europäische Kommission den Antrag unverzüglich an die Mitgliedstaaten weiter und veröffentlicht eine Zusammenfassung im Internet [2].

Wenn die Europäische Kommission ein Gutachten der Europäischen Behörde für Lebensmittelsicherheit (European Food Safety Authority, EFSA) in Parma für erforderlich hält (was meistens der Fall ist), leitet sie ihr den Antrag innerhalb eines Monats nach Bestätigung der Gültigkeit weiter. Die EFSA wiederum soll ihr Gutachten binnen neun Monaten erstellen. Dabei prüft sie unter Einbeziehung von externen Expertinnen und Experten des sog. NDA-Panels (Panel on Nutrition, Novel Foods and Food Allergens) insbesondere die Sicherheit des neuartigen Lebensmittels, aber auch, ob das neuartige Lebensmittel, wenn dieses ein anderes Lebensmittel ersetzen soll, für die Verbraucherin bzw. den Verbraucher in Bezug auf die Ernährung nachteilig wäre.

Für ihre wissenschaftliche Stellungnahme hat die EFSA einen Zeitrahmen von neun Monaten. Nach Erhalt des Gutachtens der EFSA soll die Europäische Kommission innerhalb von sieben Monaten einen Rechtsakt zur Zulassung des neuartigen Lebensmittels vorlegen. Damit die Zulassung Realität wird, muss der Vorschlag von den Mitgliedstaaten verabschiedet werden, dies allerdings ohne konkrete Frist.

Nahezu alle Fristen der NFV können verlängert werden. Wenn bspw. von den Antragstellenden zusätzliche Informationen angefordert werden, verlängert sich die Neun-Monats-Frist für die Bewertung durch die EFSA entsprechend. Auch die Frist zur Vorlage eines Vorschlags für die Zulassung kann „angemessen“ verlängert werden. Bei Zusammentreffen mehrerer dieser „Clock Stops“ kann sich das Zulassungsverfahren erheblich über den gesetzlich vorgesehenen Zeitrahmen hinausziehen. Das Verfahren, das im Vergleich mit Zulassungsverfahren in anderen Ländern ohnehin nicht als schnell gilt, kann den Markteintritt somit beträchtlich verzögern.

Zugelassene neuartige Lebensmittel werden in die Unionsliste im Anhang der Verordnung (EU) 2017/2479 aufgenommen und dort einschließlich ihrer Verwendungsbedingungen und jeweiliger Spezifikation aufgelistet [3]. Das neuartige Lebensmittel darf sodann grundsätzlich jede bzw. jeder Wirtschaftsbeteiligte vertreiben oder verwenden. Eine wichtige Einschränkung erfährt das Prinzip der freien Verwendbarkeit durch den Datenschutz: Wenn die Zulassung auf der Grundlage von eigentumsrechtlich geschützten Daten basiert (ohne welche die Europäische Kommission und die EFSA die Zulassung nicht hätten vornehmen können), dürfen die Antragstellenden von der Zulassung zunächst für fünf Jahre exklusiv Gebrauch machen. Sie erhalten also ein (zeitlich beschränktes) Monopol.

Insgesamt weist das gesamte Zulassungsverfahren ein hohes Maß an Transparenz auf. Lediglich bestimmte, etwa aus Gründen des Wettbewerbs als vertraulich deklarierte Daten werden nicht öffentlich zugänglich gemacht. Hervorzuheben ist auch, dass die Kennzeichnung des Produkts klar und verständlich sein muss, insbesondere wenn bestimmte Inhaltsstoffe – etwa potenzielle Allergene wie Nüsse oder insektenbasierte Zutaten – gesundheitlich nachteilige Wirkungen für einzelne Verbrauchergruppen haben können.

Fallbeispiele

Neue pflanzliche Proteinquellen

Unter den vielen neuartigen Ansätzen der Lebensmittelerzeugung haben sich v. a. die Substitute tierischer Produkte wie Milch, Käse sowie Wurst und Fleischwaren – vereinzelt aber auch Fischprodukte – auf der Grundlage pflanzlicher Proteine bereits in den Märkten

etabliert. Hierzu verwenden die Hersteller Mehle, Konzentrate oder Isolate aus unterschiedlichsten Quellen wie Leguminosen, diverse Getreidespezies, verschiedenste Nüsse oder auch Kartoffeln (■ ■ ■ s. hierzu auch „Pflanzliche Proteinzutaten. Im Spannungsfeld zwischen Techno-Funktionalität, Sensorik, Humanernährung und Nachhaltigkeit“ in diesem Heft ab S. 21). Diese pflanzlichen Ausgangsmaterialien gelten in der Regel als etabliert und unterliegen daher nicht der NFV. Dennoch kann es selbst hier im Einzelfall zur Kategorisierung als „neuartig“ kommen. Letzteres war der Fall bei einer Proteinzubereitung aus Mungbohnen. Zwar gilt die Mungbohne (*Vigna radiata*) selbst in Europa nicht als neuartig, aber der von einem US-amerikanischen Anbieter von Ei-Ersatzprodukten entwickelte Prozess der Proteinextraktion wurde als neuartig klassifiziert [4].

Neben den klassischen Proteinquellen werden auch zunehmend bisher kaum genutzte Pflanzenvarietäten als neue Rohstoffquellen exploriert. Dazu zählt z. B. Hanf, dessen Fasern bereits Verwendung finden und dessen Protein somit als Ressource bereitsteht. Ähnliches gilt auch für die Proteine von Ölsaaten wie diverse Rapsarten oder Sonnenblumen. Hier kann im Einzelfall eine Prüfung nach NFV notwendig werden, da die Pflanzen je nach Sorte unerwünschte Begleitstoffe enthalten können.



Neben den klassischen Proteinquellen werden auch zunehmend bisher kaum genutzte Pflanzenvarietäten, z. B. Hanf, als neue Rohstoffquellen exploriert.

Einen angrenzenden Bereich stellen Mikro- und Makroalgen dar, die als effiziente Produktionssysteme für Biomasse gelten. Aufgrund ihres hohen Wachstumsvermögens, der vergleichsweise einfachen Kultivierung und guten Skalierbarkeit bieten sie attraktive Ansätze für die dezentrale Produktion mit technisch gut automatisierbarer Prozesssteuerung. Derzeit gelten in der EU etwa 60 Algenarten als nicht neuartig in der Verwendung als Lebensmittel oder Nahrungsergänzungsmittel, darunter 38 Makroalgen (16 Braunalgen, 20 Rotalgen, 2 Grünalgen) und 22 Mikroalgen-Spezies. Einige davon werden bereits zur Produktion von Protein für Spezialitäten eingesetzt, andere werden als Quelle von biofunktionellen Komponenten (Carotinoide, omega-3-Fettsäuren, β-Glucane) genutzt. Naturgemäß bringen die Algen jedoch ob des Chlorophyllgehalts eine dominante Farbe in die Produkte sowie diskreten Geschmack (v. a. wenn getrocknet eingesetzt); beides begrenzt den Einsatz in vielen Produktkategorien oder verteuert



Wissenschaftlicher Name	Zugelassene Komponenten; zugelassen für	EU-Zulassung als Novel Food seit
MAKROALGEN		
<i>Fucus vesiculosus</i> (Blasentang)	Fucoidinextrakt; Lebensmittel einschließlich NEM	2018
<i>Undaria pinnatifida</i> (Wakame)	Fucoidinextrakt; Lebensmittel einschließlich NEM	2018
<i>Ecklonia cava</i>	Phlorotannine; NEM	2018
MIKROALGEN		
<i>Euglena gracilis</i>	β-Glucan; spezifizierte Lebensmittelkategorien (Getreideriegel, NEM)	2024
<i>Haematococcus lacustris</i> (= <i>H. pluvialis</i>)	astaxanthinreiches Oleoresin; Verwendung in NEM	2009
<i>Odontella aurita</i>	Gesamtalge; spezifizierte Lebensmittelkategorien	2009
<i>Schizochytrium</i> sp.	DHA- und EPA-reiches Öl bzw. DHA-reiches Öl; spezifizierte Lebensmittelkategorien	2009
<i>Ulkenia</i> sp.	DHA-reiches Algenöl; spezifizierte Lebensmittelkategorien (Backwaren, Getreideriegel, nichtalkoholische Getränke)	2009
<i>Tetraselmis chuii</i>	getrocknete Gesamtalge; spezifizierte Lebensmittelkategorien (NEM, Soßen, Spezi­alsalze, Würzmittel)	2021

Tab. 1: Novel-Food-Zulassungen in der EU im Bereich Makro- und Mikroalgen
Eine Zulassung kann für die Gesamtalge oder einzelne Komponenten für Lebensmittel und Nahrungsergänzungsmittel (NEM) allgemein oder ausschließlich für spezifizierte Lebensmittelkategorien erfolgen.
DHA: Docosahexaensäure; EPA: Eicosapentaensäure

die Rohware drastisch, wenn Farbe und Geschmack durch Verarbeitungsschritte eliminiert werden sollen. Inzwischen sind sechs weitere Mikroalgen oder Komponenten daraus als Novel Food bewertet (♦ Tabelle 1) und haben für spezifizierte Lebensmittelkategorien eine EU-Zulassung. Dabei ist zu beachten, dass Extrakte oder Komponenten aus Algen, die *per se* nicht als neuartig eingestuft wurden, eine Zulassung als Novel Food benötigen können.

Insekten

In großer öffentlicher Wahrnehmung stehen die Insekten als neuartige Lebensmittel. Daraus gewonnene Mehle und Auszüge finden inzwischen in geringem Umfang Einsatz in konventionellen Produkten, etwa in Backwaren, Nudeln, Snacks oder Proteinriegeln. Für jede Spezies ist jedoch eine eigene Zulassung nach NFV erforderlich. Derzeit sind vier verschiedene Arten in der EU zugelassen: der gelbe Mehlwurm (*Tenebrio molitor*), die Hausgrille (*Acheta domestica*), die Wanderheuschrecke (*Locusta migratoria*) und der Buffalowurm (*Alphitobius diaperinus*). Das Zulassungsverfahren für die Schwarze Soldatenfliege (*Hermetia illucens*) läuft seit 2018, was auf Nachforderungen und komplexe Bewertungsfragen hindeutet (■ s. hierzu auch „Larvenmehl der Schwarzen Soldatenfliege [*Hermetia illucens*] eignet sich für die Fütterung der Weißbein-

garnele [*Penaeus vannamei*] unter Praxisbedingungen in einer modernen Kreislaufanlage“ in diesem Heft ab S. 70). Die Verwendung von Insekten wird oftmals mit deren besonderer Effizienz in der Umwandlung des Futters in Lebendmasse begründet, weshalb sie auch als besonders nachhaltig gelten. Dies trifft aber nicht *a priori* für alle Insektenspezies zu; so ist der gelbe Mehlwurm z. B. weniger effizient als Hühner oder Lachs [5, 6]. Ein weiterer Aspekt ist die Futtermittelregulierung: Insekten dürfen in der EU ausschließlich mit gesetzlich zugelassenen Futtermitteln gefüttert werden, darunter auch bestimmte pflanzliche Nebenströme. Allerdings stehen diese Ressourcen häufig in direkter Konkurrenz zur Nutzung bei anderen Nutztieren. Nur bei wenigen Futtermitteln erweist sich der Insekteneinsatz bislang als ökologisch oder ökonomisch klar vorteilhaft, was die potenzielle Nachhaltigkeit einschränkt.

Fermentationsprodukte

Als neuartig zu klassifizieren sind Proteine aus bisher nicht in der Lebensmittelerzeugung genutzten Produktionsorganismen. Ein Beispiel hierfür ist das Solein, eine Proteinzubereitung aus einem chemolithotrophen Bakterium, das CO₂ fixiert, um daraus Biomasse zu erzeugen. Solein wurde bereits im September 2022 in Singapur zugelassen und hat seit September 2024 einen selbstbestätigten GRAS-Status (*Generally Recognised As Safe*) in den USA. In der EU wurde 2021 ein Zulassungsantrag eingereicht. Auch



in Japan und Großbritannien befindet sich das Proteinpulver zurzeit noch im Zulassungsprozess. Ähnliche Ansätze werden auch mit anderen Produktionsorganismen verfolgt, deren Umweltbilanz durch die biologische CO₂-Fixierung besonders günstig ausfallen soll [7]. Nicht sehr scharf abzutrennen davon sind die fermentativen Prozesse, die Rohstoffe und Protein durch Kultivierung von Pilzmyzel auf Nebenströmen oder sonst kaum verwertbaren Rohstoffquellen erzeugen (■ s. hierzu auch „Pilzmyzel als Nahrungsmittel. Wann kommt die Novel-Food-Zulassung?“ in diesem Heft ab S. 79). Die enorme Vielfalt der Pilze bietet ein breites Spektrum von Ansätzen, die nahezu verzehrfähige Darreichungen des Myzels erzeugen und dabei zugleich durch die Fermentation spezifische Geschmacksqualitäten generieren. Zwar sind die Fruchtkörper vieler Varietäten als Speisepilze etabliert, doch schließt dies nicht die Verwendung und den Verzehr des Myzels mit ein. Hier besteht zurzeit noch keine Klarheit der lebensmittelrechtlichen Einordnung. Es zeichnet sich jedoch ab, dass Pilzmyzel in der EU grundsätzlich als neuartig eingestuft wird. Ein Beispiel ist die Einstufung eines mit dem Myzel des Shiitake-Pilzes (*Lentinula edodes*) fermentierten Erbsen- und Reisproteins als neuartig [8].



Nahezu verzehrfähige Darreichungen des Pilzmyzels können erzeugt und dabei zugleich durch die Fermentation spezifische Geschmacksqualitäten generiert werden.

Als klassische Fermentationsorganismen mit EU-Zulassung gelten *Fusarium venenatum* und *Aspergillus oryzae*, die gegenwärtig für die Herstellung von Lebensmitteln – v. a. zum Ersatz von Milch und Milchprodukten aber auch von Fleisch – neue Anwendungen finden. Ein Beispiel hierfür ist das „Koji-Protein“, das in neuen Frischkäsevarianten ausgelobt wird, die sich bereits in deutschen Supermärkten finden. Wie in der traditionellen japanischen Koji-Fermentation können hierfür unterschiedliche

Substrate wie Reis, Soja oder Getreide und deren Mischungen genutzt werden. Bei Anwendung zur Fermentation von Nebenströmen mögen sich neue Fragen zur Produktsicherheit ergeben, etwa durch Kontaminanten, die in die Fermentation eingetragen werden können. In solchen Fällen kann unter Umständen eine gesonderte Sicherheitsbewertung oder eine zusätzliche Zulassung im Rahmen der Novel-Food-Verordnung erforderlich sein.

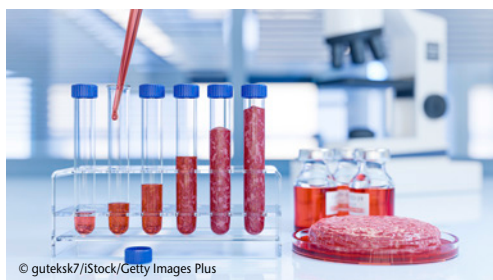
Präzisionsfermentation

Bereits der Begriff „Fermentation“ lässt einen großen Interpretationsspielraum zu, mit dem Zusatz „Präzision“ wird dieser noch erweitert. Präzisionsfermentation ist dabei noch diffuser; könnte man darunter doch jeden Fermentationsprozess verstehen, der mittels definierter Bakterien- oder Hefespezies ein standardisiertes Produkt (wie Bier oder Joghurt) generiert. In der Szene der Entrepreneur*innen bzw. Entrepreneurinnen und Biotechnolog*innen steht er dagegen auch oft für den Einsatz gentechnologisch veränderter Produktionsorganismen, die gezielt einen oder mehrere Rohstoffe im Bioreaktor erzeugen können. Dabei kann es sich um die Produktion klassischer tierischer Proteine handeln wie Kuhmilch-Caseine, Lactoglobuline, Lactalbumine, Ovalbumine ebenso wie um Süßproteine (z. B. Brazzein) oder Hämoglobin-Analoga wie das „Leg-Hämoglobin“ aus der Sojabohne. Letzteres wird in transgenen Zellen von *Komagataella phaffii* produziert und ersetzt in pflanzlichen Substituten von Fleisch und Fleischwaren das tierische Hämoglobin und vermittelt den veganen Produkten die Anmutung von Fleisch in Färbung und Geschmack. Seit 2018 bzw. 2019 ist Leg-Hämoglobin durch eine GRAS-Notifizierung und einen „No Questions Letter“ der U.S. Food and Drug Administration (FDA) in den USA zugelassen und darf als Farbstoffzusatz in rohen pflanzlichen Fleischprodukten verwendet werden [9, 10]. In der EU wurde der Zulassungsantrag im Oktober 2019 gestellt. Die EFSA hat im Juni 2024 eine erste wissenschaftliche Bewertung als neuartiger Zusatzstoff abgeschlossen und den Verzehr als unbedenklich eingestuft [11]. Die zusätzlich notwendige gentechnikrechtliche Zulassung steht jedoch noch aus.

Präzisionsfermentation ist somit ein neuer Begriff für klassische Biotechnologie bzw. angewandte Gentechnik. Im Zulassungsverfahren gemäß der NFV werden dabei sowohl die Produkte als auch die Produktionsorganismen bzw. das Herstellungsverfahren gesondert hinsichtlich ihrer Unbedenklichkeit bewertet. In einigen Ländern mit liberaleren regulatorischen Rahmenbedingungen werden dagegen ausschließlich die Endprodukte bewertet. Wenn diese substanzuell äquivalent zu einem konventionellen Produkt sind, kann die Zulassung erteilt werden. Dieses Vorgehen bedeutet häufig ein deutlich schnelleres Zulassungsverfahren und veranlasst junge Unternehmen, deren Geschäftsmodell auf Präzisionsfermentation basiert, in diesen Ländern den schnelleren Marktzugang zu suchen.

Zellkulturen

Auch die Produktion von Fleisch oder Fisch in Zellkulturen findet eine breite öffentliche Wahrnehmung mit zum Teil sehr kontroverser Einschätzung (■ s. hierzu auch „Technologie und Prozesse für kultiviertes Fleisch. Grundlagen, Herausforderungen und Perspektiven“ in diesem Heft ab S. 38). In einigen europäischen



Die Produktion von Fleisch oder Fisch in Zellkulturen findet eine breite öffentliche Wahrnehmung mit zum Teil sehr kontroverser Einschätzung.

Ländern und selbst in mehreren US-Bundesstaaten gibt es Bemühungen, *in vitro* erzeugtes Fleisch zu verbieten. Umgekehrt finden sich in der Branche bereits rund 180 junge Unternehmen und geschätzte 3 Milliarden US-Dollar an Risikokapital privater Anleger (→ <https://gfi.org/investment/>). Öffentliche Mittel fließen in die Forschung zu den *in-vitro*-Techniken zur Produktion tierischer Produkte (u. a. auch für Milch, Leder, Honig) dagegen nur wenige und auch nur in wenigen Ländern. Erwähnenswert ist auch, dass pflanzliche Zell- oder Gewebekulturen geeignet sind, Ersatzprodukte *in vitro* zu erzeugen, etwa für die Gewinnung von Kakao-Flavanolen oder eines Kakao-Surrogats [12].

Die dazu notwendigen Technologien befinden sich meist noch im Entwicklungsstadium. Hier zeigt sich oft, dass es außerordentlich anspruchsvoll ist, aus dem Labormaßstab in die großtechnische Produktion zu kommen. Markteintritte sind schon vielfach und seit Jahren angekündigt worden; haben aber bis heute nicht in nennenswertem Umfang stattgefunden.

Bei den tierischen Produkten aus der Zellkultur wird insbesondere das Tierwohl ausgelobt, da lediglich Biopsiematerial entnommen wird und keine Tötung notwendig ist. Es gibt auch Überlegungen, pluripotente Stammzellen aus einer Zellkultursammlung zu verwenden, die meist immortalisiert sind und damit auch keine Zellentnahme durch Biopsie aus einem Tier notwendig machen würde [13]. Die Hürden für solche Ansätze sind aber noch um ein Vielfaches höher als die gegenwärtig verfolgten Kulturansätze. Neben Tierwohl werden bei *in-vitro*-Fleisch auch Nachhaltigkeitsaspekte, etwa geringere Emissionen klimarelevanter Gase (*Greenhouse Gas Emissions*, GHG), hervorgehoben. Für Letztere beruhen die Daten bisher nur auf Modellrechnungen, da noch keine großtechnische Produktion existiert. Dabei

wird zunehmend deutlich, dass die potenziellen Umweltvorteile solcher Verfahren in Bezug auf GHG-Emissionen nur dann realisierbar sind, wenn sie mit erneuerbaren Energien betrieben werden [14, 15].

Identität/Herkunft

Quelle (Nomenklatur)

Organ oder Gewebe (Ursprung)

Zelltyp/Zelltypen

Art der Kultur

genutzte Substrate (Ursprung)

bei Stammzellen (Ursprung, Labor, Sammlung)

Charakterisierung

Art & Umfang von Begleitsubstanzen (bspw. Antibiotika)

Nährstoffprofile

biologische Gefahrstoffe (Viren, Pathogene u. a.)

Art und Spektrum von Analyten der Qualitätskontrolle

Produktionsprozess

Zellkultur (Art, ggf. Immortalisation u. a.)

Rohstoffe/Materialien (Anlagen, Kulturmedien, Substrate, Wachstumsfaktoren/Hormone, ggf. Antibiotika oder Ersatzstoffe)

Hygieneparameter

Ernährungsinformationen

Rolle des Produkts in der Diät (Art & Umfang der Nutzung)

Vergleich zu konventionellem Produkt (Äquivalenz)

Qualität & Quantität der Makro- und Mikronährstoffe

mögliche Allergene

Abb. 1: Kriterienkatalog – vorzulegen bei der Beantragung eines neuartigen Lebensmittels nach Novel-Food-Verordnung – am Beispiel von *in-vitro*-Fleisch (aus den Unterlagen der EFSA zusammengestellt)

EFSA: European Food Safety Authority

Für die Anwendung von Zellkulturtechniken im Lebensmittelsektor verlangt die NFV der EU von den Antragstellenden ein umfangreiches Dossier, das alle Aspekte der Produktion – vom eingesetzten Organismus über den Prozess bis hin zum Endprodukt – detailliert beschreibt (♦ Abbildung 1). Hier kommt eine besonders anspruchsvolle Bewertung zum Tragen, die auch die genetische Stabilität der Zellen, potenzielle virale Kontaminationen aber auch die Zusammensetzung des Endprodukts einschließlich möglicher toxikologisch bedenklicher Stoffe umfasst.

Zwar lässt sich die Zusammensetzung des *in vitro* generierten Fleisches durch Veränderungen im Nährmedium oder der Verwendung von Muskel- und Fettgewebezellen gezielt beeinflussen und somit ggf. günstiger gestalten als bei konventionellen Produkten; aber auch dazu liegen bislang kaum Befunde vor. Eine besondere Herausforderung bilden dann die Produkte, bei denen die tierischen Zellen auf Trägermaterialien (sog. *Scaffolds*) aufgebracht werden, um besondere Textureigenschaften und Anmutungen, z. B. die eines Steaks, zu erreichen. *Scaffolds* können aus ganz verschie-

denen Quellen stammen und somit auch aus sehr unterschiedlichen Materialien bestehen und werden in jedem Fall wohl ein fallbezogenes („case by case“) Zulassungsverfahren erfordern [16].

In der EU ist bislang lediglich ein Zulassungsantrag für ein *in vitro* generiertes Produkt gemäß NFV eingereicht worden [17]. Hierbei handelt es sich um ein Ersatzprodukt für *Foie Gras* (Leber von speziell gemästeten Enten und Gänsen), das aus einer Zellkultur von Hepatozyten und Fibroblasten stammt (gewonnen aus der Pekingente *Anas platyrhynchos*) und aus einem Trägermaterial besteht. Der Antragsteller, ein französisches Unternehmen, hat zeitgleich Zulassungsanträge in weiteren Ländern wie Singapur, den USA, Großbritannien und der Schweiz eingereicht.

Zusammenfassung

Die NFV regelt in Europa das Inverkehrbringen von Lebensmitteln und/oder Zutaten, die aus neuartigen Quellen und/oder mit neuartigen Technologien gewonnen werden. Sie hat einen anspruchsvollen Katalog von Kriterien, die von den Antragstellenden vorzulegen sind. Die Beurteilung der Unbedenklichkeit des neuartigen Produkts erfordert einen Konsultationsprozess, der unter Umständen einige Jahre in Anspruch nimmt und eine Vielzahl von Experten und Expertinnen einbezieht. Die NFV sichert somit mit höchstem wissenschaftlichen Anspruchsniveau und mit hoher Transparenz die Unbedenklichkeit der Lebensmittel und gilt auch international als Garant dafür. Eine Zulassung unter NFV ist meist ein aufwendiger und zum Teil zeitraubender Prozess, der im Vergleich mit Zulassungsverfahren in anderen Ländern als nachteilig gesehen werden kann, der aber nach einer Zulassung einen Marktzugang in gleich 27 Ländern mit rund 700 Mio. Konsumenten und Konsumentinnen ermöglicht.

Förderung

Diese Arbeit geht aus dem „Innovationsraum NewFoodSystems“ (Projekte „Koordination und Management 2.0“ und „Verwertung und Management“) hervor und wird vom Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR) im Rahmen der Fördermaßnahme „Innovationsräume Bioökonomie“ als Teil der Nationalen Forschungsstrategie „Bioökonomie 2030“ gefördert. Förderkennzeichen: 031B1367 und 031B1364.



Prof. Dr. em. Hannelore Daniel¹

Christian Ballke, LL.M.²

Prof. Dr. Sabine E. Kulling³

¹ Düwellstr. 16, 85354 Freising
ehemals Technische Universität München

² Meisterernst Rechtsanwälte PartG mbB
Herzog-Heinrich-Str. 1, 80336 München

³ Institut für Sicherheit und Qualität von Obst und Gemüse, Max Rubner-Institut,
Bundesforschungsinstitut für Ernährung und Lebensmittel, Haid-und-Neu-Str. 9,
76131 Karlsruhe

Angaben zu Interessenkonflikten und zum Einsatz von KI

Die Autorinnen und der Autor erklären, dass keine Interessenkonflikte bestehen und bei der Erstellung des Manuskripts keine KI-Anwendungen eingesetzt wurden.

Zitierweise

Daniel H, Ballke C, Kulling SE für das NewFoodSystems-Konsortium: Zur Rechtskonformität neuartiger Lebensmittel. *Ernährungs Umschau* 2025; 72(11): M670–7.
DOI: 10.4455/eu.2025.049

Literatur

1. Verordnung (EU) 2015/2283 über neuartige Lebensmittel, konsolidierte Fassung vom 27.03.2021. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX:02015R2283-20210327> (last accessed on 11 July 2025).
2. European Commission: Summary of applications and notifications. https://food.ec.europa.eu/food-safety/novel-food/authorisations/summary-applications-and-notifications_en (last accessed on 11 July 2025).
3. Durchführungsverordnung (EU) 2017/2470 der Kommission vom 20. Dezember 2017 zur Erstellung der Unionsliste der neuartigen Lebensmittel gemäß der Verordnung (EU) 2015/2283 des Europäischen Parlaments und des Rates über neuartige Lebensmittel.
4. Europäische Kommission: Durchführungsverordnung (EU) 2022/673 der Kommission vom 22. April 2022 zur Genehmigung des Inverkehrbringens von Mungbohnenprotein (*Vigna radiata*) als neuartiges Lebensmittel gemäß der Verordnung (EU) 2015/2283 des Europäischen Parlaments und des Rates und zur Änderung der Durchführungsverordnung (EU) 2017/2470. *Amtsblatt der Europäischen Union*, L 122, 25.4.2022, S. 27–30. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX:32022R0673> (last accessed on 11 July 2025).

5. Onincx DG, van Broekhoven S, van Huis A, van Loon JJ: Feed conversion, survival and development, and composition of four insect species on diets composed of food by-products. *PLoS One* 2015; 10(12): e0144601. DOI: 10.1371/journal.pone.0144601. Erratum in: *PLoS One* 2019; 14(10): e0222043. DOI: 10.1371/journal.pone.0222043.
6. Fry JP, Mailloux NA, Love DC, Milli MC and Cao L: Feed conversion efficiency in aquaculture: Do we measure it correctly? *Environmental Research Letters*. 2018; 13(2). DOI: 10.1088/1748-9326/aaa273.
7. Lebensmittel Praxis: Essen der Zukunft. Wie finnische Unternehmen CO₂ zu Protein machen. 2025. <https://lebensmittelpraxis.de/sortiment/41638-essen-der-zukunft-wie-finnische-unternehmen-co2-zu-protein-machen.html> (last accessed on 11 July 2025).
8. Europäische Kommission: Durchführungsverordnung (EU) 2023/6 der Kommission vom 3. Januar 2023 zur Genehmigung des Inverkehrbringens von mit Myzelien von *Lentinula edodes* (Shiitake-Pilz) fermentiertem Erbsen- und Reisprotein als neuartiges Lebensmittel und zur Änderung der Durchführungsverordnung (EU) 2017/2470. *Amtsblatt der Europäischen Union*, L 2, 4.1.2023, S. 16–20. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX:32023R0006> (last accessed on 11 July 2025).
9. U.S. Food and Drug Administration (FDA): GRAS Notice No. GRN 000737. 2018. www.fda.gov/media/116243/download (last accessed on 11 July 2025).
10. U.S. Food and Drug Administration (FDA). Listing of color additives exempt from certification; soy leghemoglobin. *Federal Register* 2019; 84(148): 37573–6. www.federalregister.gov/documents/2019/08/01/2019-16374/listing-of-color-additives-exempt-from-certification-soy-leghemoglobin (last accessed on 11 July 2025).
11. EFSA GMO Panel (EFSA Panel on Genetically Modified Organisms); Naegeli H, Bresson JL, Dalmay T, Dewhurst IC, Epstein MM, Firbank LG, Veromann E: Assessment of soy leghemoglobin produced from genetically modified *Komagataella phaffii* as a novel food pursuant to Regulation (EC) No 1829/2003. *EFSA Journal* 2024; 22(3): 9060. DOI: 10.2903/j.efsa.2024.9060.
12. Gubser G, Vollenweider S, Eibl D, Eibl R: Food ingredients and food made with plant cell and tissue cultures: State-of-the art and future trends. *Eng Life Sci* 2021; 21(3–4): 87–98. DOI: 10.1002/elsc.202000077.
13. Jara TC, Park K, Vahmani P, et al: Stem cell-based strategies and challenges for production of cultivated meat. *Nat Food* 2023; 4: 841–53. DOI: 10.1038/s43016-023-00857-z.
14. Post MJ, Levenberg S, Kaplan DL, et al: Scientific, sustainability and regulatory challenges of cultured meat. *Nature Food* 2020; 1: 403–15.
15. Risner D, Negulescu P, Kim Y, Nguyen C, Siegel JP, Spang ES: Environmental impacts of cultured meat: A cradle-to-gate life-cycle assessment. *ACS Food Sci Technol* 2025; 5: 61–74. DOI: 10.1021/acsfodscitech.4c00281.
16. Mariano E Jr, Lee DY, Lee J, et al.: A review on the characterization of edible scaffolds for cultured meat: Physical, chemical, biocompatibility, and food safety evaluation methods. *Food Chem* 2025; 469: 142493. DOI: 10.1016/j.foodchem.2024.142493.
17. Suprême SAS (Gourmey): Application for the authorisation of Duck cells from cell culture as a novel food in under Regulation (EU) 2015/2283. Public summary. 2024. https://food.ec.europa.eu/document/download/45e22e48-b72b-4cbf-9ab6-5aac3debdcb_en?filename=novel-food_sum_ongoing-not_2024-22222.pdf (last accessed on 11 July 2025).

Zusätzliche Literaturquelle zu Algen

European Algae Biomass Association (EABA): *Algae as Novel Food in Europe*. VERSION 2.0 – APRIL 2021. 2021. www.algae-novel-food.com/output/algae-novel-food/download.pdf (last accessed on 11 July 2025).

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



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

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“, „AIProPlant“ 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. Ernährungs 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 Gola²

Prof. Dr. Andrea Bauer³

Dr. Christina Diekmann⁴, Prof. Dr. Sarah Egert⁴

Philipp Brandt⁵, Simon Früh⁵, Andreas Detzel⁵

¹ Technische Universität München, School of Life Sciences, Professur Plant Proteins and Nutrition, Freising

² Fraunhofer Institut für Verfahrenstechnik und Verpackung (IVV), Freising

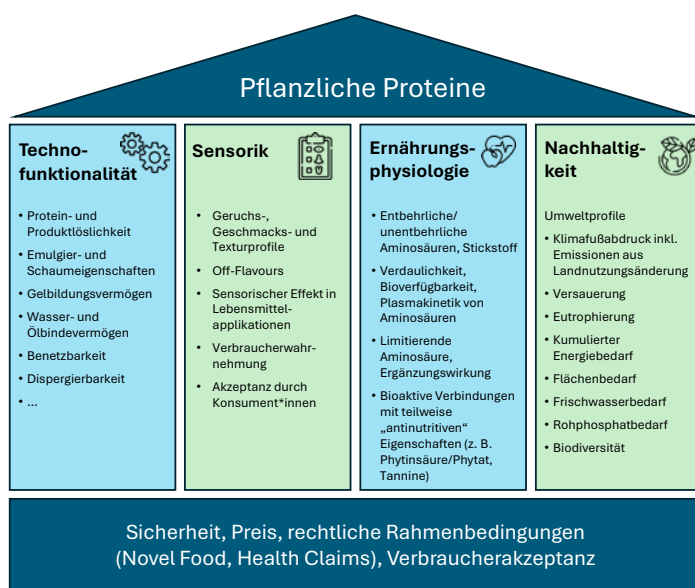
³ Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Fakultät Life Sciences, Professur Sensorik und Produktentwicklung, Hamburg

⁴ Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Institut für Ernährungs- und Lebensmittelwissenschaften, Professur Ernährungsphysiologie, Bonn

⁵ Institut für Energie- und Umweltforschung gGmbH (ifeu), Heidelberg, Deutschland

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 technofunktionellen und sensorischen Eigenschaften, in ihrer ernäh-



Icons made by Freepik from www.flaticon.com

Abb. 1: Graphical Abstract

rungsphysiologischen 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 verfahrens-

technischen 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 den Proteingehalt erhöhen [8, 9]. Die Proteingehalte von proteinreichen Mehlen und Konzentraten

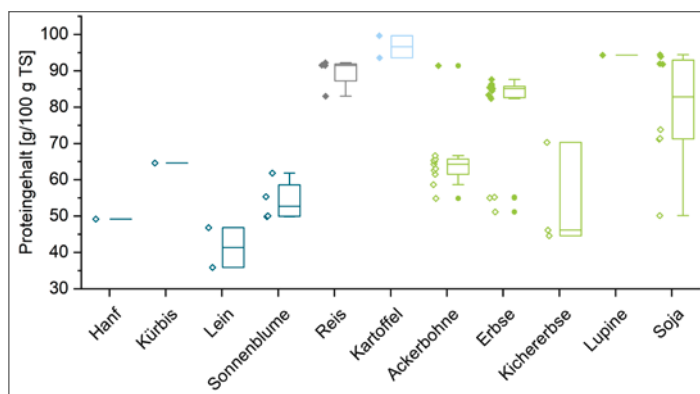


Abb. 2: Proteingehalt pflanzlicher Proteinzutaten (n = 53)
 Die Datenpunkte auf der linken Seite der Boxplots zeigen die Mittelwerte der einzelnen Zutaten.
 leere Symbole: proteinreiche Mehle und Konzentrate; gefüllte Symbole: Proteinisolate
 dunkelblau: Ölsaaten; grau: Reis; hellblau: Kartoffel; grün: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

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 Proteinfractionen 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 Hauptproteinfractionen 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, Kichererbsen). 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, heranreichen.

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. Erbsenproteinisolate). 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 gelbakter 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 griesige 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 „bohnlige“, „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

	n	Proteinzutat	Proteinlöslichkeit	Emulgierkapazität	Schaumaktivität	Gelbildung
Ölsaaten	1	Mehl				
	1	Konzentrat				
	2	Mehl				
	4	Mehl, Konzentrat				
Getreide	4	Isolat				
Knollen	2	Isolat				
Körnerleguminosen	11	Konzentrat, Isolat				
	16	Konzentrat, Isolat				
	3	Mehl, Konzentrat				
	1	Isolat				
	8	Konzentrat, Isolat				

Erläuterung zu Tab. 1:

Proteinlöslichkeit	Emulgierkapazität	Schaumaktivität	Minimale Gelbildungskonzentration
[%]	[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]

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 Lebensmittel 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, schimmigen 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.

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

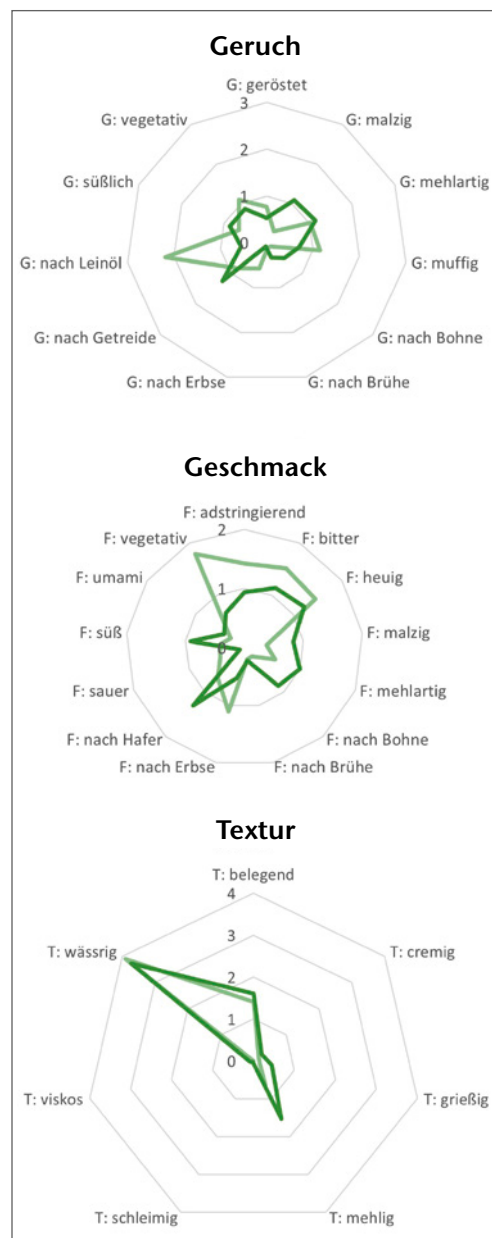


Abb. 3: Sensorische Profile zweier Ackerbohnenkonzentrate
Erfasst durch 11 gescreente und probenspezifisch trainierte Prüfende mittels *Rate-All-That-Apply*-Methodik

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 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 Energiegehalt 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.

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 miteinbezogen 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 CO₂ oder Methan über die Umrechnung in CO₂-Äquivalente (CO₂e) 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

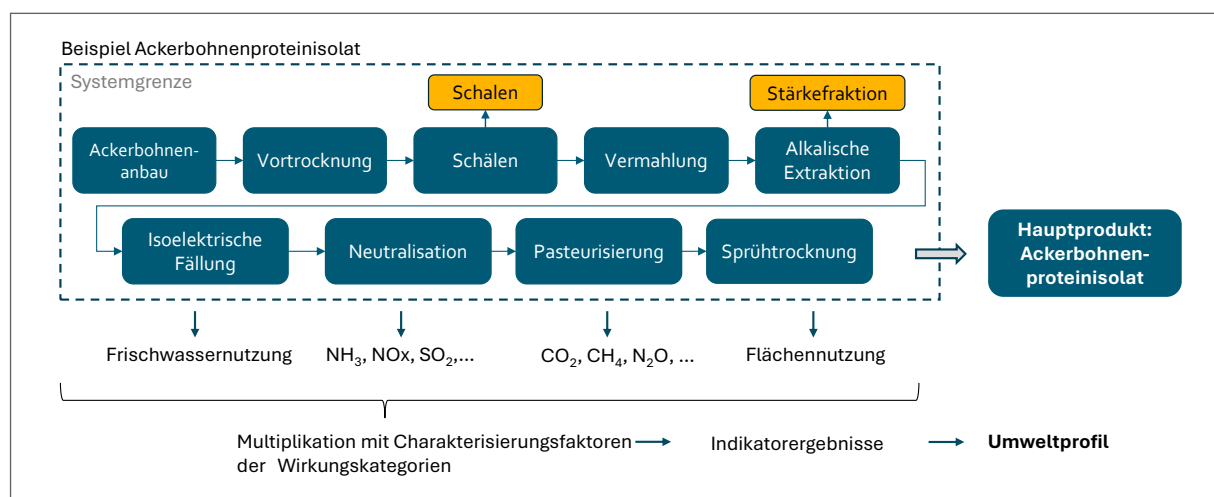


Abb. 4: Vom Prozess zum Umweltprofil – Beispielhafte Darstellung anhand des Herstellungsprozesses von Ackerbohnenproteinisolat (eigene Darstellung)





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 Masseinheit, seien es Neben- oder Hauptprodukte, die gleiche Umweltlast zugeordnet, während bei der öko-

nomischen 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 länderspezifischen und feldfruchtspezifischen Aufschlagfaktor. Je nach Herleitungsmethode und Datenquelle können die Zahlenwerte voneinander abweichen. Der Balkenabschnitt ist daher abgesetzt in einem gestreiften Muster dargestellt.

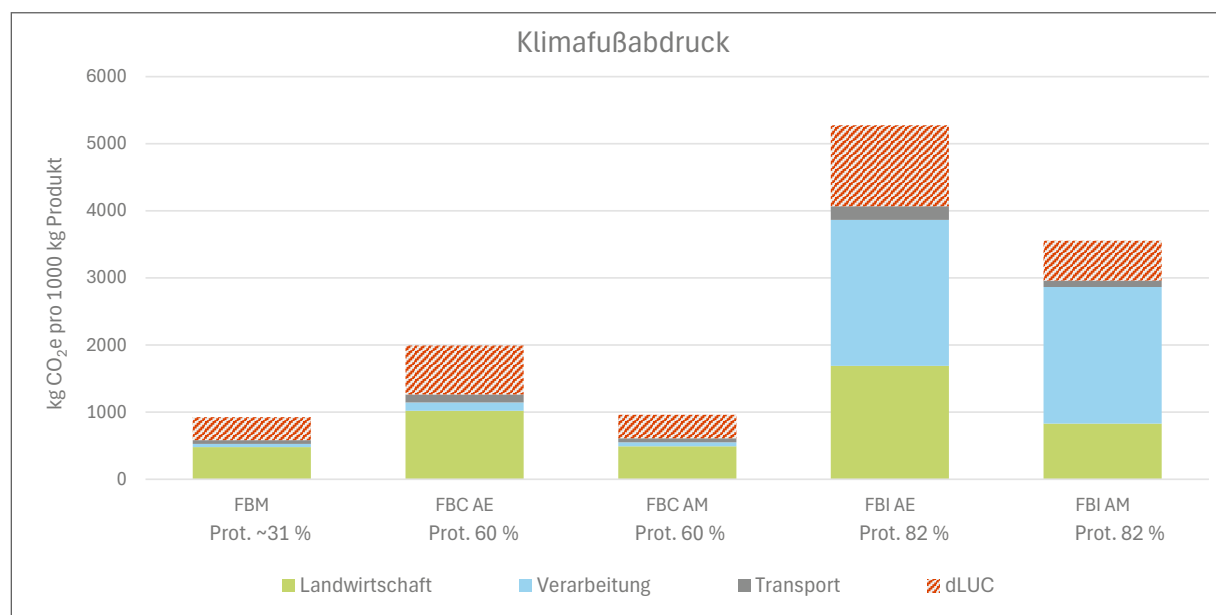


Abb. 5: Klimafußabdruck von Ackerbohnenproteinzutaten

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)

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 B₁₂. 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 Verbraucherakzeptanz) 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 Masseinheit 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 Produkthanwendung 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.





Förderung

Beitrag im Rahmen der Publikationsreihe des Innovationsraums NewFoodSystems – Fördermaßnahme „Innovationsräume Bioökonomie“ im Rahmen der „Nationalen Forschungsstrategie BioÖkonomie 2030“ des Bundesministeriums für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR).



Gefördert durch:



Danksagung

Die Autor*innen danken dem BMFTR-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 keine Interessenkonflikte bestehen und bei der Erstellung des Manuskripts keine KI-Anwendungen eingesetzt wurden.

Literatur

- 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.
- Schweiggert-Weisz U, Eitzbach L, Gola S, et al.: Opinion piece: new plant-based food products between technology and physiology. *Mol Nutr Food Res* 2024; 68(20): e2400376.
- 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.
- 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.
- 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.
- Tan M, Nawaz MA, Buckow R: Functional and food application of plant proteins – a review. *Food Reviews International* 2023; 39(5): 2428–56.
- Eitzbach 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.
- Moure A, Sineiro J, Domínguez H, Parajó JC: Functionality of oilseed protein products: A review. *Food Res Int* 2006; 39(9): 945–63.
- Guo M: Soy food products and their health benefits. In: *Functional Foods*. Elsevier 2009; 237–277.
- 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.
- Supun Fernando: Production of protein-rich pulse ingredients through dry fractionation: a review. *LWT – Food Sci Technol* 2021; 141: 110961.
- 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.
- Gao K, Rao J, Chen B: Plant protein solubility: a challenge or insurmountable obstacle. *Adv Colloid Interface Sci* 2024; 324: 103074.
- Rajpurohit B, Li Y: Overview on pulse proteins for future foods: Ingredient development and novel applications. *J Future Foods* 2023; 3(4): 340–56.
- 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.
- Schweiggert-Weisz U, Eisner P, Bader-Mittermaier S, Osen R: Food proteins from plants and fungi. *Curr Opin Food Sci* 2020; 32: 156–62.
- Sherman P: A critique of some methods proposed for evaluating the emulsifying capacity and emulsion stabilizing performance of vegetable protein. *Ital J Food Sci* 1995; 7(1): 3–10.
- 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.
- 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.
- 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.
- Góral I, Wojciechowski K: Surface activity and foaming properties of saponin-rich plants extracts. *Adv Colloid Interface Sci* 2020; 279: 102145.
- 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.
- Ma KK, Greis M, Lu J, Nolden AA, McClements DJ, Kinchla AJ: Functional performance of plant proteins. *Foods* 2022; 11(4).
- 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.
- 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).
- 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).
- Nicolás Saraco M, Blaxland J: Dairy-free imitation cheese: is further development required? *Br Food J* 2020; 122(12): 3727–40.
- 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.
- 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.

30. Meinschmidt 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. Meinschmidt 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). *Ernährungs 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). *Ernährungs 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.





Essbare Filme auf Basis von Pflanzenproteinen für sensorisch verbesserte Wurstersatzprodukte

Verena Schmidt, Paula Goderbauer, Christoph Verheyen, Birgit Menne, Christina Opaluwa

Abstract

Pflanzliche Proteine zur Herstellung von Fleischersatzprodukten haben in den vergangenen Jahren zunehmend an Bedeutung gewonnen. Fleischersatzprodukte wie vegetarische oder vegane Wurсталternativen können Verbraucher*innen jedoch häufig nicht überzeugen, da die bislang verfügbaren pflanzenbasierten Wursthüllen auf Basis von Polysacchariden kein ansprechendes Erscheinungsbild und keine überzeugende Textur bieten. Insbesondere die fehlende Knackigkeit führt zu einer geringen Akzeptanz bei den Verbraucher*innen. Dieser Herausforderung widmet sich das Projekt „Proteinschichten“ des Innovationsraums NewFoodSystems, in dem Wursthüllen und essbare Filme auf Basis verschiedener pflanzlicher Proteine entwickelt werden. Im Fokus stehen dabei der Einfluss der pflanzlichen Proteine sowie des Verarbeitungsverfahrens auf die Qualität pflanzenbasierter Wursthüllen.

Zitierweise

Schmidt V, Goderbauer P, Verheyen C, Menne B, Opaluwa C: Edible films based on plant proteins for sensory-improved sausage alternative products. *Ernährungs Umschau* 2026; 73(4): online first.

Open access

The English version of this article is available online: DOI: 10.4455/eu.2025.059

Peer-Review-Verfahren

Manuskript (Übersicht) eingereicht: 23.05.2025; Überarbeitung angenommen: 05.09.2025

Verena Schmidt¹, Paula Goderbauer¹, Dr. Christoph Verheyen¹, Christina Opaluwa¹, Dr. Birgit Menne²

¹ Fraunhofer Institut für Verfahrenstechnik und Verpackung (IVV), Freising, Deutschland

² Kalle GmbH, Wiesbaden, Deutschland

nach pflanzenbasierten Fleischersatzprodukten einher. Aus diesem Grund ist auf dem Markt inzwischen eine Bandbreite an neuartigen Produkten, z. B. pflanzlichen Würsten, zu finden. Pflanzliche Würste müssen jedoch hohen Anforderungen gerecht werden, um bei Verbraucher*innen Akzeptanz zu finden. Vor allem ein authentisches Erscheinungsbild und eine überzeugende Textur, die vergleichbar zum tierischen „Produktvorbild“ ist, sind essenziell [3]. Dabei spielt v. a. bei Bratwürsten oder Wiener Würsten die essbare Wursthülle eine wichtige Rolle.

Alternative essbare Filme in der Lebensmittelindustrie

Essbare Filme haben sich in der Lebensmittelindustrie als vielseitiges und innovatives Konzept etabliert, das in zahlreichen Anwendungsbereichen eingesetzt wird, insbesondere zur Verbesserung der Qualität und Haltbarkeit von Lebensmitteln. Als essbarer Film wird dabei eine vorgeformte, eigenständige Matriz definiert, die aus biobasierten und biologisch abbaubaren Materialien wie Proteinen (z. B. Kollagen, Molkenprotein, Casein), Polysacchariden (z. B. Alginat, Cellulose, Stärke) und/oder Lipiden (z. B. Wachse, Acylglycerol, Fettsäuren) hergestellt wird. In der Lebensmittelindustrie wirken essbare Filme als Barriere, etwa gegen Sauerstoff, Mikroorganismen und UV-Strahlung, und schützen das Produkt so vor chemischem, mikrobiellem oder physikalischem Verderb. Darüber hinaus können sie als Träger für Zusatzstoffe wie Antioxidantien, Farbstoffe oder Aromen dienen [4].

Wursthüllen auf Basis von tierischem Protein

Klassische tierische Würste besitzen meist eine essbare Hülle, entweder aus Naturdarm vom Schaf oder Schwein oder aus Kunstdarm

Einleitung

In den letzten Jahren hat sich in Deutschland ein Trend hin zu einer fleischreduzierten Ernährung abgezeichnet. Neben dem Zuwachs an vegan und vegetarisch lebenden Menschen stieg v. a. der Anteil sogenannter Flexitarier*innen. Rund jede*r Fünfte gehört heutzutage dieser Gruppe an und konsumiert hauptsächlich pflanzenbasierte Lebensmittel und nur gelegentlich oder in geringen Mengen Fleisch oder Fisch [1].

Die wandelnden individuellen und gesellschaftlichen Beweggründe für die Reduktion von Fleisch sind vielseitig und umfassen sowohl ethische, gesundheitliche als auch ökologische Aspekte [2]. Der Trend zur Fleischreduktion geht mit einer steigenden Nachfrage

auf Kollagenbasis. Kollagen, welches bei der Fleischverarbeitung als Nebenprodukt anfällt, ist das häufigste Strukturprotein im tierischen Körper und ist v. a. in Bindegewebe, Sehnen und Haut zu finden. Natives Kollagen verleiht dem tierischen Gewebe seine Elastizität und Widerstandsfähigkeit und zeichnet sich durch seine charakteristische fibrilläre, helikale Struktur aus. Kollagenbasierte Wursthüllen werden durch Extrusion hergestellt. Dabei wird natives Kollagen thermomechanisch verarbeitet und anschließend über eine Ringdüse zu einer dünnen, schlauchförmigen Hülle geformt, die einem Naturdarm ähnelt [5, 6]. Durch die thermomechanische Behandlung im Extruder denaturiert das tierische Protein, seine Struktur faltet sich auf und funktionelle Gruppen werden freigelegt. Die aufgefaltete Struktur erleichtert die Hydratisierung des tierischen Proteins, wodurch es v. a. durch Wasserstoffbrückenbindungen und hydrophobe Wechselwirkungen zu einer Gelierung und Ausbildung eines stabilen Films kommt [7]. Eine anschließende pH-Anpassung oder Salzbehandlung dient der Nachvernetzung und stärkt das dreidimensionale Proteinnetzwerk. Die Eigenschaften dieses Netzwerks bestimmen maßgeblich die Funktionalität der Wursthülle. Dazu zählen eine gute Barrierewirkung, eine geringe Löslichkeit und Quellfähigkeit sowie mechanische Festigkeit, Flexibilität und Formstabilität. Eine ausgewogene Kombination dieser Eigenschaften trägt nicht nur zur Qualität und Haltbarkeit der Würste bei, sondern verbessert auch die sensorischen Eigenschaften. So sorgt insbesondere die Wursthülle für die charakteristische Knackigkeit der Würste [6].

Wursthüllen auf Basis von Polysacchariden

Für die pflanzlichen Wurstalternativen werden in der Lebensmittelindustrie bislang v. a. Kunstdärme aus pflanzlichen Polysacchariden als Ersatz zum tierischen Kollagen verwendet. Zum einen werden nicht essbare Hüllen aus Cellulose verwendet, die bei der Herstellung von pflanzlichen Wurstalternativen als technologisches Hilfsmittel dienen. Sie verleihen der Wurstmasse während des Produktionsprozesses Form und Stabilität, werden jedoch vor dem Verzehr entfernt. Da somit beim Verzehr keine Wursthülle mehr vorhanden ist, mangelt es dem Endprodukt an einem ansprechenden Erscheinungsbild und einer überzeugenden Textur, insbesondere an der für klassische Würste typischen Knackigkeit [8].

Zum anderen werden essbare Hüllen auf Basis von Alginat, dem Salz der Alginsäure, eingesetzt. Das kohlenhydratbasierte Hydrokolloid wird aus Braunalgen gewonnen und zeichnet sich durch eine lineare Faltstruktur aus. [5]. Wursthüllen auf Basis von Alginat werden ähnlich wie Kollagenhüllen durch Extrusion hergestellt und anschließend in einem Salzbad nachvernetzt [9]. Aufgrund der strukturellen Unterschiede zum tierischen Protein bildet Alginat sein Netzwerk weniger über Wasserstoffbrückenbindungen und hydrophobe Wechselwirkungen aus, sondern mehr durch ionische Bindungen. Die in der Faltstruktur des Alginats enthaltenen negativ geladenen Carboxylgruppen ermöglichen die Einlagerung mehrwertiger Ionen, die zu einer Quervernetzung der Molekülketten führen [10, 11]. Somit weist Alginat zwar aufgrund seiner linearen Faltstruktur gute Filmbildeigenschaften auf, allerdings weisen die pflanzlichen Alginathüllen im Vergleich zu den tierischen Kollagenhüllen Defizite in der mechanischen Stabilität und Festigkeit auf, wodurch ihre Funktionalität deutlich hinter dem tierischen Produkt zurückbleibt. Zusätzlich kann es bei hoher Wasseraktivität des pflanzlichen Füllguts zu einem Aufquellen der Alginathülle kommen, was eine unerwünscht schmierige Oberfläche der Wurstalternative zur Folge haben kann [12]. Die weitere Angleichung pflanzlicher Wurstalternativen an das tierische Produktvorbild sowie eine höhere Verbraucherakzeptanz erfordern daher stabilere essbare Filme für den Einsatz als Wursthüllen.

Wursthüllen auf Basis von pflanzlichen Proteinen

Eine weitere vielversprechende Alternative zu Kollagen sind essbare Hüllen auf Basis pflanzlicher Proteine, die gegenüber polysaccharidbasierten Hüllen potenziell bessere Eigenschaften aufweisen. Pflanzliche Proteine werden durch verschiedene Aufbereitungsmethoden wie etwa die wässrig-alkalische Extraktion aus pflanzlichem Rohmaterial gewonnen [13]. Im Gegensatz zur fibrillären Struktur des nativen Kollagens und der linearen Struktur von nativem Alginat besitzen native pflanzliche Proteine in der Regel eine globuläre Struktur. Pflanzliche Proteine wie Sojaprotein, Weizen gluten oder Mais-Zein wurden zwar bereits teilweise hinsichtlich ihrer filmbildenden Eigenschaften in verschiedenen Anwendungen untersucht [14–16], allerdings gibt es bisher keine kommerzielle Wursthülle auf Basis von pflanzlichen Proteinen auf dem Markt. Pflanzliche Proteine zeigen im Vergleich zu thermoplastischen Materialien (z. B. Polyamid, Polyethylen) ein deutlich komplexeres Verhalten. Während thermoplastische Materialien bei Erwärmung formbar werden und sich nach dem Abkühlen ohne Veränderung ihrer chemischen Struktur verfestigen, müssen pflanzliche Proteine ähnlich wie Kollagen und Alginat chemisch oder physikalisch modifiziert werden, um zu Filmen verarbeitet werden zu können. Die Eigenschaften der Filme hängen dabei wesentlich von der Proteinquelle und dem Herstellungsverfahren ab [17]. Welche Anforderungen pflanzliche Proteine für die Verwendung als Wursthülle erfüllen müssen und durch welche Modifikationen sich Filme auf Basis von pflanzlichen Proteinen optimieren lassen, ist bislang kaum untersucht.





Entwicklung essbarer Filme auf Basis von pflanzlichen Proteinen

Für die Entwicklung von Wursthüllen auf Basis pflanzlicher Proteine wurden im Rahmen des Projekts verschiedene pflanzliche Proteine untersucht. In einem ersten Schritt wurden die Anforderungen an geeignete pflanzliche Proteine definiert und eine Vielzahl unterschiedlicher pflanzlicher Proteine im Hinblick auf diese Kriterien analysiert und bewertet. Auf Grundlage der Ergebnisse wurden Rezepturformulierungen mit ausgewählten pflanzlichen Proteinen entwickelt und mittels Extrusion thermomechanisch vernetzt. Eine umfassende Charakterisierung der entwickelten Filme ermöglichte schließlich einen Vergleich mit kommerziellen Kollagen- und Alginathüllen.

Anforderungen an pflanzliche Proteine

Damit pflanzliche Proteine für die Herstellung von Wursthüllen geeignet sind, müssen sie spezifische Anforderungen hinsichtlich ihrer Zusammensetzung und technofunktionellen Eigenschaften erfüllen. Die pflanzlichen Proteine sollten zum einen einen hohen Proteingehalt von über 70 % aufweisen, da ein hoher Anteil ohne störende Begleitstoffe eine stärkere Vernetzung während der Verarbeitung gewährleistet. Dies verbessert sowohl die mechanischen Eigenschaften als auch die Barriereigenschaften der Wursthülle [18, 19]. Zum anderen sollten die pflanzlichen Proteine eine ge-

ringe Löslichkeit aufweisen, um im späteren Einsatz als Wursthülle wasser- und quellstabil zu sein. Zusätzlich sollten die pflanzlichen Proteine gute gelierende und filmbildende Eigenschaften aufweisen. Im Rahmen des Projekts „Proteinschichten“ wurden bis zu zwanzig unterschiedliche, kommerziell verfügbare pflanzliche Proteine mit einem Proteingehalt von über 70 % hinsichtlich dieser Anforderungen gescreent. Die fünf vielversprechendsten pflanzlichen Proteine stammen aus Soja, Erbse, Lupine, Kartoffel und Mungobohne (♦ Tabelle 1). Die Ergebnisse zur Proteinlöslichkeit, Gelbildung und Filmbildung dieser ausgewählten pflanzlichen Proteine werden im Nachfolgenden weiter erläutert.

Proteinlöslichkeit bezeichnet die Menge an Protein, die sich bei einem bestimmten pH-Wert in Lösung befindet. Die Proteinlöslichkeit der pflanzlichen Proteine wird sowohl durch die vorliegenden Proteinfractionen in der Rohware als auch durch das gewählte Aufbereitungsverfahren der Rohware beeinflusst. Für Erbsen- und Mungobohnenprotein wurde bei neutralem pH-Wert eine besonders geringe Löslichkeit von unter 25 % festgestellt. Diese pflanzlichen Proteine enthalten mehrere Proteinfractionen, deren Hauptfractionen im nativen Zustand eigentlich eine hohe Löslichkeit aufweisen. Die beobachtete geringe Löslichkeit deutet somit auf eine partielle Denaturierung der Proteine hin, die vermutlich auf thermische Belastungen während des Aufbereitungsverfahrens zurückzuführen ist.

Die hitzeinduzierte **Gelbildung** beschreibt die Fähigkeit der pflanzlichen Proteine, unter thermischer Einwirkung ein Netzwerk auszubilden, das Flüssigkeiten in einer Matrix einschließt und so eine gelartige Struktur erzeugt. Zur Bestimmung der hitzeinduzierten Gelbildung wird die minimale Konzentration an pflanzlichem Protein ermittelt, die erforderlich ist, um bei 95 °C eine Gelstruktur auszubilden. Dabei wird das Fließverhalten der erhitzten Probe visuell beurteilt [20]. Aufgrund ihrer spezifischen Struktur und Zusammensetzung zeigen pflanzliche Proteine häufig eine geringere Gelbildungsfähigkeit auf als Kollagen oder Alginat. Als besonders positiv hat sich beim Vergleich der pflanzlichen Proteine die ausgeprägte Gelbildungsdefähigkeit des Kartoffelproteins herausgestellt (Gelbildekonzentration = 12 %).

Die Fähigkeit zur **Filmbildung** der pflanzlichen Proteine wurde anhand von Gießfilmen bewertet. Hierzu wurden Proteinlösungen auf 90 °C erhitzt, gleichmäßig auf eine Trägerfläche aufgetragen und anschließend unter

Proteinzutut	Proteinlöslichkeit	Gelbildung	Filmbildung
Soja			
Erbse			
Lupine			
Kartoffel			
Mungobohne			
Erläuterung zur Skalierung:			
	Proteinlöslichkeit	Gelbildung	Filmbildung
	[%]	[%]	[-]
	70–100	> 20	5 = inhomogen, rissig, instabil
	50–70	17–20	4
	25–50	13–17	3
	10–25	8–13	2
	< 10	< 8	1 = homogen, glatt, stabil

Tab. 1: Technofunktionelle Bewertung pflanzlicher Proteine zur Herstellung von Wursthüllen (Proteinlöslichkeit, Gelbildung und Filmbildung)

rot: sehr geringe Bewertung; orange: geringe Bewertung; gelb: mittlere Bewertung; hellgrün: hohe Bewertung; dunkelgrün: sehr hohe Bewertung

kontrollierten Bedingungen getrocknet. Die Filme wurden anschließend visuell auf Homogenität, Risse und mechanische Belastbarkeit geprüft. Während die Netzwerkbildung von Kollagen und Alginat hauptsächlich über schwächere Wasserstoffbrückenbindungen, hydrophobe und ionische Bindungen erfolgt, bilden Pflanzenproteine ein Netzwerk v. a. über stärkere Disulfidbindungen aus [17]. Die unterschiedlichen Bindungstypen und die gebildete Mikrostruktur sind maßgeblich für die Eigenschaften der Filme verantwortlich. Besonders die Proteinzutaten aus Soja, Erbse und Lupine bildeten homogene Filme ohne sichtbare Risse oder Einschlüsse.

Beim Vergleich technofunktionaler Gesamteigenschaften der Proteinzutaten aus Soja, Erbse, Lupine, Kartoffel und Mungobohne erwiesen sich insbesondere Soja, Erbse und Lupine als besonders vielversprechende Rohstoffe für Wursthüllen. Da die Filme jedoch Defizite in der mechanischen Belastbarkeit aufwiesen, war eine gezielte Optimierung der Filmeigenschaften erforderlich. Mögliche Ansätze zur Optimierung der Filmeigenschaften sind im Folgenden näher dargestellt.

Ansätze zur Optimierung der Filmeigenschaften

Zur Herstellung von Filmen mit optimierten mechanischen Eigenschaften wurden die pflanzlichen Proteine in unterschiedlichen Rezepturformulierungen mittels Extrusion thermomechanisch verarbeitet. Bei der Extrusion werden die pflanzlichen Proteine mit Wasser und anderen Zusätzen (z. B. Weichmacher, Polysaccharid) durch die gleichläufige Rotation zweier Schnecken gemischt, geschert und auf Temperaturen über 100 °C erhitzt. Durch den thermomechanischen Energieeintrag kommt es zu molekularen Änderungen der Proteinstruktur, Proteine falten sich auf und aggregieren, sodass sich ein dreidimensionales Proteinnetzwerk ausbildet. Die Proteinmatrix wird anschließend in der Düse deformiert, gekühlt und verfestigt.

Die Versuche wurden mittels eines gleichläufigen Doppelschneckenextruders mit einem Schnecken-durchmesser von 16 mm und einem Längen-/Durchmesser-Verhältnis von 40 durchgeführt. Das Extrudergehäuse besteht aus acht Gehäuseelementen, die separat geheizt oder gekühlt werden können. Die pulverförmige Formulierung, bestehend aus pflanzlichen Proteinen und Polysacchariden, wurde mittels eines gravimetrischen Dosierers in das erste Gehäuseelement gefördert und die flüssige Formulierung, bestehend aus Wasser und Weichmacher, wurde mittels Schlauchpumpe in das dritte Gehäuseelement ge-

fördert. Als Düse wurde eine Breitschlitzdüse mit einer Schlitzhöhe von 100 µm verwendet. In einem ersten Schritt wurden geeignete Rezepturformulierungen und geeignete Prozessparameter für die Herstellung homogener und stabiler Filme identifiziert. Dafür wurde eine pulverförmige Formulierung bestehend aus 60 % Protein und 40 % Polysaccharid verwendet, wobei als Protein Erbsen- und Sojaprotein und als Polysaccharid modifizierte Stärke, Alginat und Pektin getestet wurden. Bei der flüssigen Formulierung bestehend aus Wasser und Glycerol als Weichmacher wurde der Glycerolanteil zwischen 40 und 60 %, bezogen auf den Proteingehalt, variiert. Während der Extrusion wurden die maximale Gehäusetemperatur (90–130 °C), die Schneckendrehzahl (200–400 rpm) und die Trockensubstanz (40–45 %) variiert. Zur Bewertung der Filmeigenschaften wurden sowohl der Einfluss der Rezepturformulierung als auch die Prozessparameter auf Homogenität, mechanische Belastbarkeit und Wasserlöslichkeit analysiert.

Zur Beurteilung der **Homogenität** wurden die Filme mit einer Bildanalysesoftware ausgewertet. Grundlage der Bewertung war die Bestimmung der Helligkeitswerte (L-Wert), welche entlang der Film-Länge bestimmt und grafisch aufgetragen wurden (♦ Abbildung 1a). Dabei deutete ein gleichmäßiger, glatter Kurvenverlauf mit geringer Streuung des L-Werts auf einen homogenen, glatten Film hin, während ein stark schwankender Verlauf mit hoher Streuung des L-Werts auf einen inhomogenen Film hinwies. Als stärkster Einflussfaktor auf die Homogenität konnte die Proteinquelle identifiziert werden. Insbesondere die Filme auf Basis von Erbse und Alginat mit 40 % Glycerol, welche bei einer max. Gehäusetemperatur von 110 °C, einer Schneckendrehzahl von 200 rpm und einer Trockensubstanz von 40 % hergestellt wurden, wiesen eine gleichmäßige und glatte Struktur mit einer geringen Streuung des L-Werts (Interquartilsabstand = 0,19) auf. Im Gegensatz dazu wiesen die Filme auf Basis von Soja und Alginat mit 40 % Glycerol, welche bei denselben Prozessparametern hergestellt wurden, eine spinnennetzartige und inhomogene Struktur sowie eine hohe Streuung des L-Werts (Interquartilsabstand = 0,96) auf (♦ Abbildung 1b).

Die Kennwerte zur Beurteilung der **mechanischen Belastbarkeit** der Filme wurden durch Zugversuche bestimmt. Dabei wurden Filmproben mit definierter Querschnittsfläche von 150 auf 15 mm bei einer konstanten Geschwindigkeit von 100 mm/min gedehnt, bis sie entweder

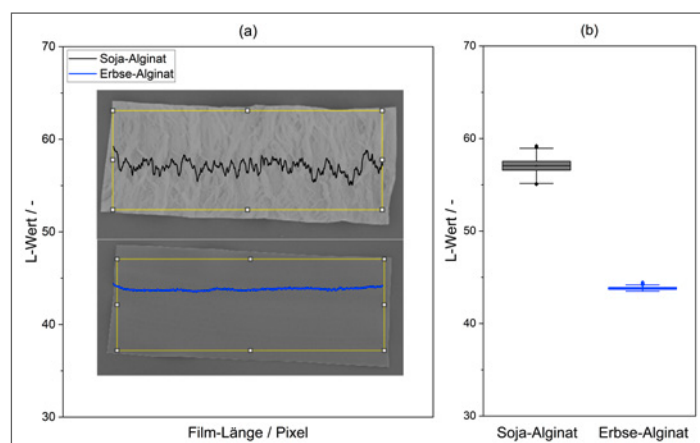


Abb. 1: Bewertung der Homogenität von Protein-Alginat-Filmen mit 40 % Glycerol durch Auftragung (a) der Helligkeitswerte (L-Werte) entlang der Film-Länge und (b) der Streuung der gemessenen Helligkeitswerte

Extrusionsparameter: max. Gehäusetemperatur = 110 °C, Schneckendrehzahl = 200 rpm, Trockensubstanz = 40 %



zerrissen oder eine vorgegebene Spannung oder Dehnung erreichten. Aus der gemessenen Kraft und der Längenänderung wurden charakteristische Kennwerte wie Zugfestigkeit, Bruchdehnung und Elastizitätsmodul (E-Modul) bestimmt. Die Zugfestigkeit entspricht der maximalen Spannung, die eine Probe aushalten kann. Die Bruchdehnung beschreibt die maximale Dehnung einer Probe bis zum Reißen, bezogen auf ihre ursprüngliche Länge. Der E-Modul gibt an, wie elastisch ein Material ist, dabei gilt: je höher der E-Modul, umso spröder das Material. Die Ergebnisse zeigen, dass die Prozesstemperatur den größten Einfluss auf die mechanische Belastbarkeit der Filme hatte. Eine Zunahme der Temperatur von 90 auf 130 °C führte bei Filmen basierend auf einer Kombination aus Erbse und Alginat mit 40 % Glycerol, welche bei einer Schneckendrehzahl von 200 rpm und einer Trockensubstanz von 40 % hergestellt wurden, zu einer signifikanten Steigerung der Zugfestigkeit von 0,5 MPa auf 3,8 MPa sowie einer deutlich signifikanten Steigerung der Bruchdehnung von 7,5 % auf 45,6 % (♦ Abbildung 2). Auch Klüver et al. [18] zeigte anhand extrudierter Sojaproteinfilme, dass eine Temperaturerhöhung zu einer stärkeren Vernetzung und somit zu einer Steigerung der Zugfestigkeit führte.

Zuletzt wurde die **Wasserlöslichkeit** der Filme gravimetrisch bestimmt, indem die Filme für 20 min in Wasser gelegt und der prozentuelle Anteil des gelösten Materials ermittelt wurde. Dieser Parameter ist ein entscheidender Indikator für die Eignung der Filme als Wursthüllen für Brühwürste. Dabei zeigte sich ein deutlicher Zusammenhang zwischen Wasserlöslichkeit, mechanischer Belastbarkeit, Homogenität und Zugfestigkeit: Filme mit hoher mechanischer Belastbarkeit und homogener, engmaschiger Struktur wiesen eine geringere Wasserlöslichkeit auf als inhomogene Filme mit einer niedrigen mechanischen Stabilität. Der Erbsen-Alginat-Film mit 40 % Glycerol, welcher bei einer maximalen Gehäusetemperatur von 130 °C, einer Schneckendrehzahl von 200 rpm und einer Trockensubstanz von 40 % hergestellt wurde, wies eine signifikant niedrigere Wasserlöslichkeit (4,9 %) auf als der

mechanisch instabilere Erbsen-Alginat-Film, welcher bei einer niedrigeren Gehäusetemperatur von 90 °C und sonst gleichen Prozessparametern hergestellt wurde (Wasserlöslichkeit = 9,7 %). Auch Mohammed et al. [19] zeigten anhand unterschiedlicher Proteinfilme, dass ein schwächeres und weitmaschigeres Polymernetzwerk zu einer erhöhten Filmlöslichkeit führte.

Ein Vergleich der entwickelten pflanzenbasierten Proteinfilme mit kommerziell verfügbaren Kollagen- und Alginathüllen ergab vielversprechende Ergebnisse, insbesondere in Bezug auf Homogenität und Bruchdehnung. Während die Bruchdehnung von Kollagenfilmen 15,8 % und von Alginathüllen 20,7 % betrug, konnte bei dem entwickelten Erbsen-Alginat-Film eine Bruchdehnung von 45,6 % erreicht werden (♦ Abbildung 2). Allerdings lagen die Werte für Zugfestigkeit und Wasserlöslichkeit deutlich unter denen der kommerziellen Produkte. Im Vergleich zur kommerziellen Kollagenhülle mit einer Zugfestigkeit von 63,2 MPa und zur kommerziellen Alginathülle mit einer Zugfestigkeit von 46,2 MPa wies der entwickelte Erbsen-Alginat-Film nur eine Zugfestigkeit von 3,8 MPa auf (♦ Abbildung 2). Um die Zugfestigkeit zu verbessern und die Wasserlöslichkeit zu verringern, wurden daher weitere Modifikationsansätze getestet. Ziel war es dabei, die Vernetzung der Proteine untereinander und mit den Polysacchariden gezielt zu stärken. Dies sollte durch eine Veränderung der Proteinkonformation sowie durch ionische Nachvernetzung mittels eines Salzbad erreicht werden. Dabei kamen physikochemische Verfahren wie thermomechanische Behandlung, Variation des pH-Werts und der Ionenstärke sowie enzymatische Methoden mit Proteinase und Transglutaminase zum Einsatz. Besonders die ionische Nachvernetzung in einer 5 %igen Calciumchloridlösung für eine Minute erwies sich als wirksam zur Steigerung der Zugfestigkeit, führte jedoch gleichzeitig zu einer deutlichen Abnahme der Bruchdehnung, sodass die Filme zu spröde für die Durchführung der Zugversuche waren.

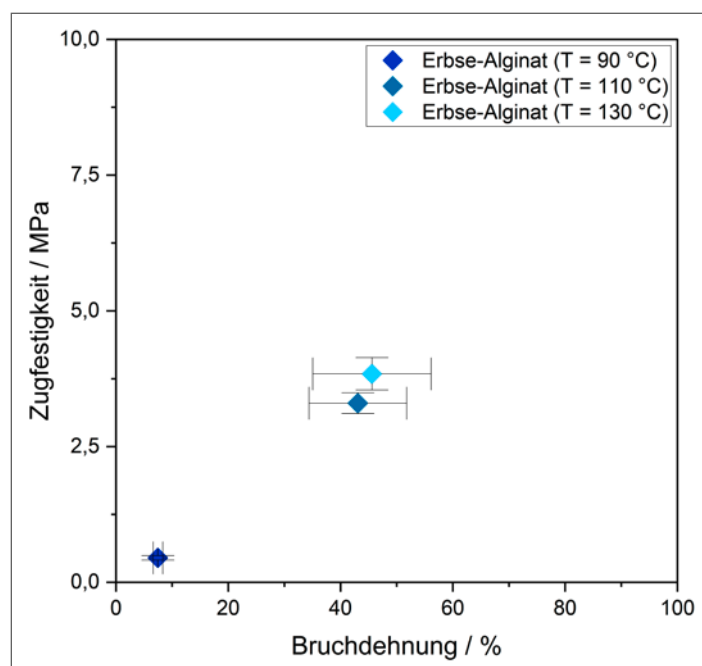


Abb. 2: Mechanische Belastbarkeit von Erbsen-Alginat-Filmen mit 40 % Glycerol bei verschiedenen Gehäusetemperaturen
Prozessparameter: Temperatur = 90–130 °C, Schneckendrehzahl = 200 rpm, Trockensubstanz = 40 %

Fazit und Ausblick

Die im Projekt gewonnenen Ergebnisse zeigen das Potenzial pflanzlicher Proteine als nachhaltige Alternative für die Herstellung von Wursthüllen. Es konnte gezeigt werden, dass sich pflanzenbasierte Proteinfilme erfolgreich mittels Extrusion herstellen lassen. Durch systematische Variation von Rezepturformulierungen und Verarbeitungsbedingungen konnten funktionelle Zusammenhänge

zwischen Zusammensetzung, Verarbeitung und resultierenden Filmeigenschaften identifiziert werden. Es zeigte sich, dass eine starke Vernetzung der pflanzlichen Proteine zwar zu einer verbesserten Zugfestigkeit führte, jedoch ging dies häufig mit einer verminderten Bruchdehnung einher. Für den praktischen Einsatz als Hüllenmaterial ist jedoch ein ausgewogenes Verhältnis dieser Eigenschaften erforderlich. Derzeit besteht daher noch weiterer Forschungsbedarf zur Optimierung der mechanischen Belastbarkeit.

Zukünftige Arbeiten sollten sich auf die gezielte Optimierung der Netzwerkstruktur konzentrieren. Mögliche Ansatzpunkte bieten u. a. die Kombination der Pflanzenproteine mit ausgewählten Polysacchariden, der Einsatz funktioneller Zusatzstoffe sowie enzymatische oder physikalisch-chemische Behandlungsverfahren. Auch alternative Verfahren zur Nachvernetzung und Trocknung könnten potenziell zur Verbesserung der Filmeigenschaften beitragen.

Die Entwicklung essbarer pflanzenbasierter Wursthüllen bietet Potenzial für eine nachhaltige und ressourcenschonende Lebensmittelproduktion. Die Projektergebnisse bilden eine Grundlage für die weitere Forschung und könnten zur Etablierung funktionaler Alternativen beitragen. Solche Hüllen verbessern nicht nur die Ökobilanz, sondern auch Textur und Produktanmutung, insbesondere durch die Nachbildung der gewünschten Knackigkeit.

Förderung

Beitrag im Rahmen der Publikationsreihe des Innovationsraums NewFoodSystems – Fördermaßnahme „Innovationsräume Bioökonomie“ im Rahmen der „Nationalen Forschungsstrategie BioÖkonomie 2030“ des Bundesministeriums für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR).



Gefördert durch:



Danksagung

Die Autoren danken dem BMFTR-Innovationsraum NewFoodSystems für die Förderung des Vorhabens Protein-schichten (FKZ: 031B1219A; 031B1219B). Mehr Informationen unter → www.newfoodsystems.de

Angaben zu Interessenkonflikten und zum Einsatz von KI

Die Autor*innen erklären, dass keine Interessenkonflikte bestehen. KI wurde zur Sprachoptimierung eingesetzt.

Literatur

1. Brandt M: Welche Ernährungsweisen sind in Deutschland verbreitet? Statista 2023. <https://de.statista.com/infografik/31258/umfrage-zu-ernaehrungsweisen-in-deutschland/> (last accessed on 18 April 2025).
2. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL): Deutschland, wie es isst – Der BMEL-Ernährungsreport 2023.
3. Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft e. V.: Akzeptanz und Käuferverhalten bei Fleischersatzprodukten. www.dlg.org/mediacenter/alle-publikationen/dlg-studien/dlg-studie-akzeptanz-und-kaeuferverhalten-bei-fleischersatzprodukten (last accessed on 18 April 2025).
4. Salgado PR, Ortiz CM, Musso YS, Di Giorgio L, Mauri AN: Edible films and coatings containing bioactives. *Curr Opin Food Sci* 2015; 5: 86–92.
5. Huber KC, Embuscado ME: *Edible films and coatings for food applications*. New York, NY: Springer New York 2009.
6. Suurs P, Barbut S: Collagen use for co-extruded sausage casings – a review. *Trends Food Sci Technol* 2020; 102: 91–101.
7. Hernandez-Izquierdo VM, Krochta JM: Thermoplastic processing of proteins for film formation – a review. *J Food Sci* 2008; 73(2): R30–9.
8. Djordjevic J, Pecanac B, Todorovic M, et al.: Fermented sausage casings. *Procedia Food Sci* 2015; 5: 69–72.
9. Grüneberg A, Neyenhuys JS, Zahel M, Kiessler B: Method for producing an alginat-based film, and alginate-based film. WO2023067161A1. 2022.
10. Zhang X, Wang X, Fan W, Liu Y, Wang Q, Weng L: Fabrication, property and application of calcium alginate fiber: A review. *Polymers* 2022; 14(15): 3227.
11. Tugce SP, Müller K, Schmid M: Alginate-based edible films and coatings for food packaging applications. *Foods* 2018; 7(10): 170.
12. Hilbig J, Hartlieb K, Herrmann K, Weiss J, Gibis M: Influence of calcium on white efflorescence formation on dry fermented sausages with co-extruded alginate casings. *Food Res Int* 2020; 131: 109012.
13. Tian X, Zhao K, Teng A, Li Y, Wang W: A rethinking of collagen as tough biomaterials in meat packaging: assembly from native to synthetic. *Crit Rev Food Sci Nutr* 2024; 64(4): 957–77.
14. Embuscado ME, Huber KC (eds.): *Edible films and coatings for food applications*. Dordrecht, Heidelberg: Springer 2009.
15. Brandenburg AH, Weller CL, Testin RF: Edible films and coatings from soy protein. *J Food Sci* 1993; 58(5): 1086–9.
16. Wang Y, Padua GW: Water sorption properties of extruded zein films. *J Agric Food Chem* 2004; 52(10): 3100–5.
17. Reddy N, Yang Y: Thermoplastic films from plant proteins. *J Appl Polym Sci* 2013; 130(2): 729–38.
18. Onwulata C, Huth P: *Whey processing, functionality and health benefits*. 1st ed., Ames, Iowa: Wiley-Blackwell 2008.
19. Schmid M, Prinz TK, Stäbler A, Sänglerlaub S: Effect of sodium sulfite, sodium dodecyl sulfate, and urea on the molecular interactions and properties of whey protein isolate-based films. *Front Chem* 2016; 4: 49.
20. Ma KK, Greis M, Lu J, Nolden AA, McClements DJ, Kinchla AJ: Functional performance of plant proteins. *Foods* 2022; 11(4): 594.



Technologie und Prozesse für kultiviertes Fleisch

Grundlagen, Herausforderungen und Perspektiven

Marie-Luise Schlieker*, Laurenz Köhne*, Katharina Julia Brenner, Carina Theresa Linnemann, Marius Henkel

Abstract

Kultiviertes Fleisch wird, ebenso wie pflanzliche und insektenbasierte Ersatzprodukte sowie Proteine und Biomasse aus Fermentationsprozessen, als eine potenziell nachhaltige Alternative zur konventionellen Fleischherzeugung betrachtet. In diesem Review wird ein Überblick über das Konzept der Produktion von kultiviertem Fleisch gegeben und erläutert, welche Bemühungen aktuell in Forschung und Entwicklung unternommen werden, um dieses als nachhaltiges und gesundes Lebensmittel zu etablieren. Der Schwerpunkt liegt auf den aktuellen (bio-)technologischen Herausforderungen, insbesondere bei der Herstellung. Um ein strukturiertes Produkt zu erzeugen, das tierischem Gewebe ähnelt, ist das Wachstum der Zellen auf geeigneten essbaren und biokompatiblen Gerüstmatrizes eine Voraussetzung. Zusätzlich zu diesem Ansatz existieren stützfreie Verfahren wie das 3D-Bioprinting. Unabhängig von der gewählten Methode ist jedoch eine Skalierung der Wachstums- und Differenzierungsprozesse entscheidend, um die Effizienz des gesamten Prozesses zu steigern. Dieser Artikel bietet eine Übersicht über den aktuellen Stand der Technik und leitet, unter Berücksichtigung von Aspekten der Nachhaltigkeit, Ansätze für zukünftige Forschungsvorhaben ab.

Zitierweise

Schlieker M-L, Köhne L, Brenner KJ, Linnemann CT, Henkel M: Technology and processes for cultivated meat. Fundamentals, challenges, and perspectives. Ernährungs Umschau 2025; 72(6): 114–21.e30–1.

Open access

The English version of this article is available online: DOI: 10.4455/eu.2025.025

Peer-Review-Verfahren

Manuskript (Übersicht) eingereicht: 04.09.2024; Überarbeitung angenommen: 09.01.2025

Marie-Luise Schlieker, M.Sc.^{1,2}

Laurenz Köhne, M.Sc.¹

Katharina Julia Brenner, M.Sc.¹

Carina Theresa Linnemann, M.Sc.¹

Prof. Dr.-Ing. Marius Henkel^{1,2}

¹ Professur für Cellular Agriculture, TUM School of Life Sciences, Technische Universität München

Gregor-Mendel-Str. 4, 85354 Freising

² Munich Institute of Integrated Materials, Energy and Process Engineering (MEP),

Technische Universität München

Lichtenbergstraße 4a, 85748 Garching

Einleitung

In der Europäischen Union verursacht die industrielle Viehzucht etwa 85 % der gesamten landwirtschaftlichen CO₂-Emissionen [1]. Im Gegensatz zur konventionellen Landwirtschaft benötigt kultiviertes Fleisch deutlich weniger landwirtschaftliche Nutzfläche, was angesichts begrenzter Ressourcen besonders wichtig ist [2]. Zudem wird der grundlegende Zielkonflikt zwischen Ernährungssicherung, Erhalt der Umwelt und Gesundheit, das sogenannte *Diet-Environment-Health*-Trilemma, adressiert: kultiviertes Fleisch hat das Potenzial, alle drei Aspekte dieses Trilemmas gleichzeitig positiv zu beeinflussen [2, 3]. Der Begriff bezeichnet in der Regel strukturiertes Gewebe, das mittels moderner Methoden der Zellkultivierung aus tierischen Zellen hergestellt werden kann. Es wird im Allgemeinen der Ansatz verfolgt, die ethischen und ökologischen Probleme der traditionellen Viehzucht zu umgehen, ohne dass Verbraucher*innen auf den Konsum von tierischen Proteinen und Fetten verzichten müssen [4]. Diese neuartige Methode bietet daher das Potenzial, die Lebensmittelindustrie grundlegend zu verändern und nachhaltigere sowie ethisch vertretbarere Alternativen zum herkömmlichen Fleischkonsum bereitzustellen. Kultiviertes Fleisch könnte somit nicht nur die Umweltauswirkungen der Viehzucht erheblich reduzieren und das Diet-Environment-Health-Trilemma adressieren, sondern auch eine Lösung für das globale Problem des Tierleids bieten. Darüber hinaus kann eine konstante und sichere Fleischproduktion gewährleistet werden, indem tierische Muskel- und Fettzellen in kontrollierten Umgebungen gezüchtet werden. Es ist zudem Gegenstand aktueller Forschungsarbeiten, ob die Herstellung weniger Ressourcen

* gemeinsame Federführung

erfordert und gleichzeitig den CO₂-Ausstoß im Vergleich zur konventionellen Tierhaltung minimieren kann.

Ernährungsphysiologische Aspekte von (kultiviertem) Fleisch

Die eigene Gesundheit zählt laut einer Umfrage zu den häufigsten Gründen, sich vegetarisch zu ernähren [5]. Zwar sinkt der durchschnittliche Verzehr von Fleischprodukten in Deutschland seit 2019 kontinuierlich, jedoch liegt dieser mit 1 kg/Woche immer noch über dem Dreifachen der Empfehlung der Deutschen Gesellschaft für Ernährung (DGE) [6]. Erst im Februar 2024 aktualisierte die DGE ihre evidenzbasierten Leitlinien. Der empfohlene Fleischkonsum wurde im Zuge dessen auf 300 g Fleisch und Wurst/Woche halbiert [7]. Laut der Nationalen Verzehrsstudie II wird in Deutschland die Zufuhr von Vitamin D, Folsäure, Jod, Eisen, Calcium sowie langkettigen mehrfach ungesättigten Fettsäuren (LC-PUFA) und Ballaststoffen häufig nicht gedeckt [8]. Eine vegetarische Ernährung ist dabei in allen Altersgruppen theoretisch bedarfsdeckend möglich [9]. Allerdings erfordert sie eine gezielte Planung, insbesondere im Hinblick auf kritische Nährstoffe wie Vitamin B₁₂, Eisen, Zink, Jod und langkettige n-3-Fettsäuren, deren Zufuhr zu überwachen ist, um Mangelzustände zu verhindern [10]. In der Praxis stellt diese Überwachung jedoch oft eine Herausforderung dar, da sowohl das Wissen als auch die praktische Umsetzung häufig fehlen. Tierische Proteine bieten eine besonders hohe Qualität, da sie ein vollständiges Aminosäuremuster aufweisen und eine hohe Bioverfügbarkeit besitzen [11]. Darüber hinaus liefern Fleischprodukte essenzielle Nährstoffe wie Eisen, Zink, Selen, Vitamin B₁₂ und weitere Vitamine in Formen, die vom menschlichen Körper effizient aufgenommen werden können, wodurch das Risiko einer Mangelernährung verringert werden kann. Die ernährungsphysiologischen Nachteile eines erhöhten Fleischkonsums sind jedoch v. a. auf den geringen Ballaststoffgehalt sowie die hohe Zufuhr an gesättigten Fettsäuren und n-6-Fettsäuren zurückzuführen [8, 12]. Zudem könnte die Entwicklung von kultiviertem Fleisch dazu beitragen, die konventionelle Massentierhaltung zu verringern, die mit einem erhöhten Risiko für Zoonosen [13] und der Entstehung von Antibiotikaresistenzen infolge eines intensiven

Antibiotikaeinsatzes [14] verbunden ist. Da die Prozesse der Produktion, Reifung und Verpackung von kultiviertem Fleisch bisher kaum untersucht sind, ist es besonders wichtig, mögliche Risiken zu minimieren. Eine sterile Durchführung dieser Schritte könnte dazu beitragen, das Risiko von Kontaminationen und gesundheitsschädlichem Fleischverderb erheblich zu reduzieren. Bei der Entwicklung von kultiviertem Fleisch kommt somit dem grundsätzlichen Konzept, die positiven ernährungsphysiologischen Aspekte von Fleisch zu erhalten und zugleich einige negative Aspekte zu umgehen bzw. zu verringern, eine besondere Bedeutung zu.

Aufbau von Fleisch

Um ein strukturiertes Produkt erzeugen zu können, das tierischem Gewebe ähnelt, ist es notwendig, die Struktur des natürlichen Muskelgewebes zu berücksichtigen. Die faserbasierte Struktur von Fleisch ist das Ergebnis einer komplexen hierarchischen Gewebestruktur, welche sich chemisch aus 75 % Wasser, 20 % Proteinen, 1–10 % Fetten und 1 % Glykogen zusammensetzt. Die wichtigste funktionelle Einheit ist die Muskelfaser, auch Myofaser oder Muskelzelle genannt, die von Bindegewebe, intramuskulärem Fett, Blutgefäßen und Nerven umgeben ist. Muskelfasern, Fett und Bindegewebe sind die Hauptdeterminanten der Muskelbeschaffenheit und -qualität. Die Muskelfasern sind in Bündeln organisiert, die als Faszikel bezeichnet werden. In diesen Bündeln befinden sich ein- bis zweitausend Myofibrillen, deren Untereinheiten Myofilamente sind. Das Myofilament besteht hauptsächlich aus Myosinkomponenten, die für die Muskelkontraktion verantwortlich sind (♦ Abbildung 1) [15].

Die Muskelzellen sind in dichtes und komplex organisiertes Bindegewebe eingebettet, der sogenannten extrazellulären Matrix (EZM). Um die Textur von kultiviertem Fleisch zu erreichen, müssen die mechanischen Eigenschaften der EZM nachgebildet werden [16].

Die Herstellung von kultiviertem Fleisch

Grundsätzlich können mögliche Verfahren zur Herstellung von kultiviertem Fleisch in vier Hauptbereiche unterteilt werden: (1) Gewinnung der Zellen, (2) Vermehrung der Zellen, (3) Differenzierung der Zellen in Skelettmuskelzellen und Fasern sowie (4) Konfektionierung und Reifung zum endgültigen Fleischprodukt (♦ Abbildung 2) [17]. Für kultiviertes Fleisch kommen verschiedene Zelltypen in Frage, wobei Muskel-, Fett- und Bindegewebszellen die wichtigste Rolle spielen. Für die Produktion von kultiviertem Fleisch müssen die Ausgangszelltypen in der Lage sein, sich selbst in ausreichender Menge zu erneuern (Proliferation) und anschließend in reife Zellen zu differenzieren, aus denen die dreidimensionale Struktur von tierischem Gewebe aufgebaut ist. Die meistgenutzte Methode zur Gewinnung der benötigten Zellen besteht darin, eine invasive Biopsie an einem lebenden Tier durchzuführen [18]. Mit einer Biopsie können sogenannte Primärzellen, bspw. Satellitenzellen (Muskelstammzellen), gewonnen werden.

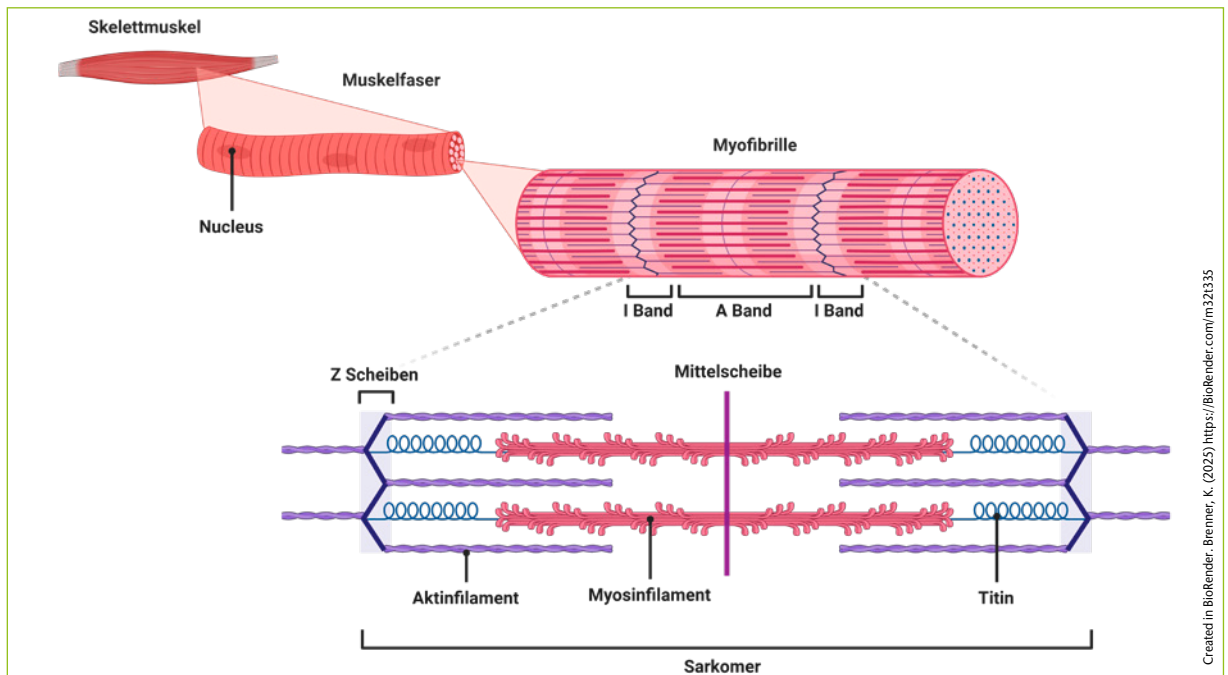


Abb. 1: Darstellung der Muskelarchitektur (eigene Darstellung)

Ein Skelettmuskel besteht insbesondere aus Muskelfasern. Diese wiederum bestehen aus Myofibrillen. In den Filamenten sind parallel angeordnete Proteinfäden aus Myosin und Aktin.

Auf diese Weise gewonnene, natürliche Zellen können nur eine begrenzte Anzahl an Teilungen vollziehen [18]. Ein Vorteil dieser Primärzellen besteht darin, dass sie direkt aus dem Gewebe isoliert und ohne den Einsatz von Zelllinien verwendet werden können. Aktuelle Forschungsarbeiten thematisieren die Erstellung geeigneter Zelllinien mit unbegrenzter Teilungsfähigkeit, sogenannter immortalisierter Zellen, um ethische Fragen der stetigen Biopsieeingriffe am lebenden Tier zu adressieren und die Prozesseffizienz durch höhere Prozesslaufzeiten positiv zu beeinflussen [19]. Eine vielversprechende, ethisch unbedenkliche Quelle für Stammzellen stellt auch Nabelschnurblut dar, dessen Gewinnung ohne Tierleid erfolgt. Dadurch können mögliche Nachteile wie genetische Veränderungen, komplexe Kulturanforderungen und eine eingeschränkte physiologische Ähnlichkeit mit natürlichen Zellen vermieden werden. Die in Nabelschnurblut überwiegend enthaltenen hämatopoetischen Stammzellen (HSCs) bilden primär Blutzellen und sind daher nicht direkt für die Produktion von Muskel- oder Fettzellen geeignet. Mesenchymale Stammzellen (MSCs) aus Nabelschnurblut hingegen könnten aufgrund ihrer Differenzierungsfähigkeit in Muskel-, Fett- und Bindegewebszellen eine potenzielle Grundlage für kultiviertes Fleisch darstellen. Die Menge an MSCs in Nabelschnurblut ist jedoch begrenzt [20], weshalb häufig andere Quellen wie induzierte pluripotente Stammzellen (iPSCs) bevorzugt werden.

Nach der Entnahme werden die gewünschten Zellen isoliert und in ein Kulturmedium überführt. Ein wichtiger Bestandteil des Mediums für effizientes Zellwachstum ist Fetales Kälberserum (FKS), welches Aminosäuren, Proteine, Wachstumsfaktoren, Hormone, Vitamine und Spurenelemente enthält [21]. Die Nutzung von FKS zum Zellwachstum hat ihren Ursprung in der medizinischen Forschung und Entwicklung. Durch die Verwendung von FKS war

es im Labor möglich, die komplexen Anforderungen der Zellen zu erfüllen und medizinische Entwicklungen, von denen wir heute profitieren, maßgeblich voranzutreiben. Dennoch ist die Nutzung von FKS weder mit den ethischen Ansprüchen von kultiviertem Fleisch vereinbar [22], noch stellt es eine brauchbare Basis für großtechnische Produktion dar. Aus diesem Grund thematisieren zahlreiche Forschungsarbeiten die Entwicklung kostengünstiger und FKS-freier Medien für die Zellkultur, oft auf Basis pflanzlicher Inhaltsstoffe [23].

Für die Vermehrung der Zellen können verschiedene Methoden genutzt werden. Die am häufigsten verwendete Technik der Kultivierung von Zellen in einzelnen Schichten (*monolayer*) wird bislang meist zu Forschungszwecken eingesetzt. Die meisten Zelltypen, einschließlich derer, die in herkömmlichem und kultiviertem Fleisch vorkommen, benötigen eine Verankerung, um zu adhären, sich zu vermehren und zu differenzieren [24].

Zweidimensionale (2D-)Monolayerkulturen ermöglichen Zellen den Zugang zu einem nährstoffreichen Kulturmedium, während sie mit benachbarten Zellen und einer starren Struktur am Boden interagieren, die eine Oberfläche für die Anheftung von Integrinen bietet [25]. Integrine sind Transmembranproteine, die eine entscheidende Rolle bei der Zell-Zell- und Zell-Matrix-Interaktion spielen. Die in Organen

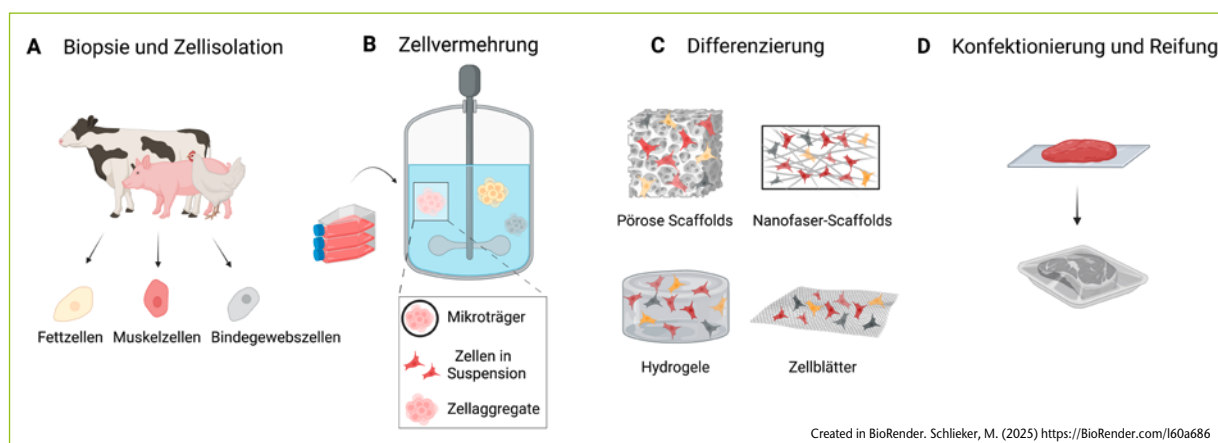


Abb. 2: Schematische Darstellung des allgemeinen Verfahrens zur Herstellung von kultiviertem Fleisch
(eigene Darstellung)

A: Isolierung von Zellen und erste Proliferation für kultiviertes Fleisch; B: großmaßstäbliche Zellexpansion; C: Differenzierung der Zellen in Skelettmuskelzellen und Fasern; D: Konfektionierung und Reifung zum endgültigen Fleischprodukt

vorhandenen Zellen benötigen jedoch nicht nur eine Verankerung für die Proliferation, sondern auch eine dreidimensionale (3D-)Matrix mit spezifischen biochemischen und mechanischen Eigenschaften. Diese Umgebung wird von der EZM gebildet, die aus verschiedenen Komponenten besteht und ein charakteristisches Organisationsmuster aufweist, das in 2D-Kulturen fehlt [24].

Methoden zur Herstellung von Fleisch mit authentischer Struktur

Die Bereitstellung einer EZM-Umgebung, welche die erforderlichen Bedingungen tierischer Gewebe nachahmt, ist eine der Kernherausforderungen für die Herstellung von kultiviertem Fleisch. Die dabei verwendeten 3D-Gerüststrukturen werden als *Bioscaffolds* bezeichnet. Sie dienen der Anheftung und Vermehrung der tierischen Zellen und bieten die Möglichkeit, eine räumliche Anordnung der differenzierten Gewebestrukturen (u. a. Muskel vs. Fett) zu erzeugen [26]. Eine der größten Herausforderungen hierbei ist wiederum die Versorgung des Gewebes mit Nährstoffen und Sauerstoff. Diese Versorgung mit Nährstoffen auf Basis von Diffusion ist nur bis zu einer Tiefe von weniger als einem halben Millimeter effizient möglich [27]. In Säugetiergewebe können typischerweise Diffusionsabstände von 10–30 μm beobachtet werden. Tatsächlich ist der maximale Abstand einer Zelle zu ihrer nächsten Kapillare selten größer als 200 μm und liegt meist unter 100 μm [28]. Um eine effiziente Versorgung mit Nährstoffen während der Gewebezellkultur sicherzustellen, müssen die Scaffoldstrukturen zusätzlichen Stofftrans-

port via Konvektion (Kanäle zur Nährstoffversorgung) oder eine Vergrößerung der Oberfläche (Porosität) ermöglichen [24]. Es gibt verschiedene Arten von Scaffolds mit vielseitigen 3D-Strukturen, darunter Microcarrier, poröse Matrices, Nanofasern, Hydrogele und Zellblatttechnologie [17].

Microcarriersysteme bestehen aus kleinen kugelförmigen Perlen (Microcarrier), die eine Oberfläche für Zellanhaftung bieten, wobei die Zellen entweder Aggregate oder Zell-Microcarrier-Komplexe bilden. Somit kann ein Vielfaches der Oberfläche von 2D-Kulturen erreicht werden. Die Microcarrier werden im Kulturmedium eines Bioreaktors suspendiert, wobei gleichzeitig eine 3D-Kulturumgebung und eine 2D-Oberfläche für das Zellwachstum geboten werden. Diese Technik bietet eine große Oberfläche für das Zellwachstum und unterstützt die Differenzierung der Zellen. Die derzeit etablierten Trägermaterialien sind jedoch für den effizienten Einsatz in pharmazeutischen Produktionsprozessen optimiert und in der Regel nicht für den menschlichen Verzehr geeignet [29]. Dreidimensionale, poröse Gerüste aus Polymeren können grundsätzliche Herausforderungen bei der Herstellung von kultiviertem Fleisch vereinfachen, indem sie das Zellwachstum, die Geweberegeneration und die Bereitstellung bioaktiver Verbindungen unterstützen. Ihre hohe Porosität ermöglicht einen effizienten Nährstoff- und Sauerstofftransport, wodurch eine optimale Umgebung für die Zelladhäsion und -differenzierung geschaffen wird. Diese Gerüste ähneln der natürlichen EZM und unterstützen die Integration und Funktionalität von Zell- und Basalmembranen. Diese Gerüste unterstützen effektiv das Wachstum von tierischen Zellen und ähneln in Textur und Farbe echtem Fleisch [17]. Nanofaser-Scaffolds können ebenfalls die natürliche EZM imitieren und fördern die Zelladhäsion, -proliferation und -differenzierung. Verschiedene Ansätze, z. B. Elektrospinning, werden zur Herstellung dieser Scaffolds verwendet [17]. Trotz ihrer Vorteile stellen die Komplexität der Herstellung für die Lebensmittelproduktion und die Herausforderungen bei der Skalierung von Elektrospinningverfahren weiterhin Einschränkungen dar [30]. Hydrogele sind Polymere mit einer hohen Wasseraufnahmefähigkeit, welche mechanische Unterstützung für Zellwachstum bieten

und der natürlichen EZM ähneln. Trotz ihres Potenzials müssen Herausforderungen wie geeignete mechanische Eigenschaften, Biokompatibilität und gleichmäßige Nährstoffverteilung, insbesondere vom nährstoffreichen Medium ins Innere der Hydrogele, überwunden werden [31].

Zusätzlich zu den hier beschriebenen Technologien, welche die grundsätzlichen Vorteile von Bioscaffolds nutzen, wird in der Forschung auch die sogenannte Zellblatttechnologie untersucht. Diese kommt ohne 3D-Gerüste aus und könnte potenziell kostengünstiger und skalierbarer sein. Die Zellblatttechnologie erlaubt die Kultivierung und Ablösung von Zellen auf temperatur- oder pH-sensitiven Oberflächen durch gezielte Anpassung der Umgebungsbedingungen, wobei die Zell-Zell-Verbindungen und die EZM erhalten bleiben und eine schonende Übertragung auf Zielstrukturen ermöglicht wird [32]. Der schichtweise Aufbau ermöglicht die Kontrolle der räumlichen Verteilung von Zellen, Wachstumsfaktoren und anderen Molekülen innerhalb des Gerüsts und ahmt gleichzeitig die hierarchische Organisation nach, die in nativen Geweben zu finden ist [33]. Im Vergleich zu herkömmlichen Methoden bestehen die Herausforderungen in der Kontrolle der Gewebestruktur und -konsistenz [17].

In der Verarbeitungsphase des Endprodukts besteht ein Ziel darin, das kultivierte Gewebe in ein Produkt zu verarbeiten, das in Geschmack und Aussehen nicht von herkömmlichen Fleischprodukten zu unterscheiden ist [34]. Hier können insbesondere auch traditionelle Prozesse der Reifung von frisch geschlachtetem, rohem Fleisch zum Einsatz kommen. Durch das kontrollierte Lagern

von rohem Fleisch werden Struktur und Geschmack, u. a. mittels freigesetzter Enzyme, positiv beeinflusst. Es bleibt zu untersuchen, inwiefern und in welchem Umfang diese Prozesse für kultiviertes Fleisch umgesetzt werden können. In Zukunft könnten die erzeugten Gewebe auch weiter veredelt werden, um spezielle Produkte wie Burger, Würstchen oder Steaks herzustellen. Um eine kontrollierte Zusammensetzung zu ermöglichen, wird in verschiedenen Studien geprüft, ob Medienreste und Rückstände, bspw. Wachstumsfaktoren, noch im Herstellungsprozess entfernt werden können. Dabei spielen sowohl gesundheitliche Aspekte als auch Verbraucherakzeptanz und die Vereinfachung eines zukünftigen Zulassungsprozesses eine Rolle. [17].

Bioreaktortypen für die Herstellung von kultiviertem Fleisch

Grundsätzlich können eine Vielzahl unterschiedlicher Bioreaktoren, von denen viele bereits in der industriellen Biotechnologie verwendet werden, für die Herstellung von kultiviertem Fleisch zum Einsatz kommen (♦ Abbildung 3). Der verwendete Bioreaktortyp sowie dessen Design müssen, abhängig

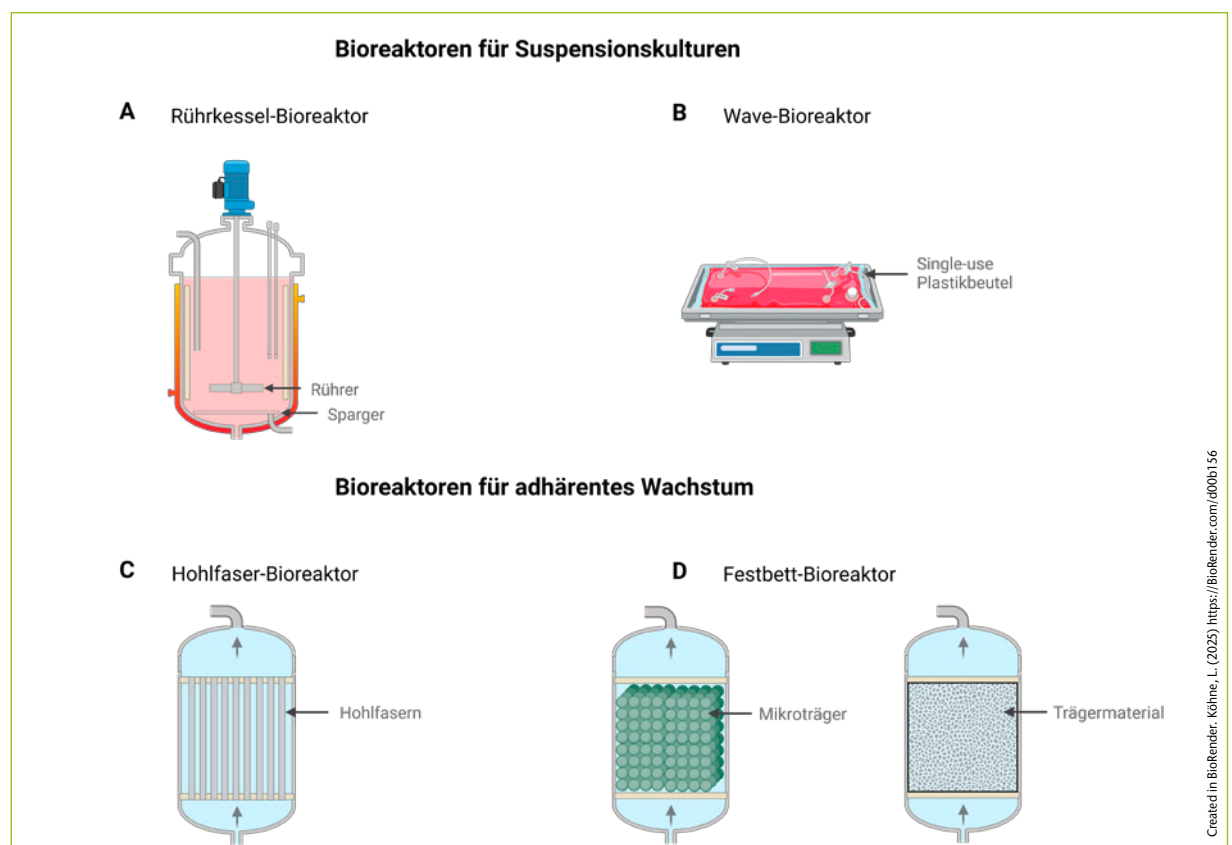


Abb. 3: Schematische Darstellung verschiedener Bioreaktorsysteme (eigene Darstellung)

A: Rührkessel-Bioreaktor; B: Wave-Bioreaktor; C: Hohlfaser-Bioreaktor; D: Festbett-Bioreaktor

von verwendeten Zellen, Bioscaffold-Materialien und geplantem Betriebsmodus, sorgfältig ausgewählt werden. Grob können die Bioreaktoren in zwei verschiedene Gruppen unter-

teilt werden. Die erste Gruppe beinhaltet Bioreaktoren, bei denen die Zellen adhärent an einer Oberfläche wachsen können, bei der anderen sind die einzelnen Zellen in Suspension und können dort u. a. Aggregate bilden. Des Weiteren können die Reaktoren auf

Rührkessel-Bioreaktoren

Der Rührkessel-Bioreaktor, im Englischen als *stirred tank reactor* (STR) bezeichnet, ist der weitverbreitetste Reaktortyp in der industriellen Biotechnologie. Hierbei handelt es sich um einen Behälter mit integriertem Rührwerk, welches für Durchmischung und Dispergierung der Gasphase in kleine Blasen im Reaktor und damit für effizienteren Sauerstofftransfer sorgt [37, 38]. Bei der Kultivierung von tierischen Zellen ist jedoch zu beachten, dass abhängig von verwendetem Rührorgan und Leistungseintrag der Scherstress für die Zellen zu hoch werden kann [39]. Mit einem Rührkesselbioreaktor kann grundsätzlich die Zellkultur in einem vergleichsweise großen Volumen durchgeführt werden. Allerdings setzt dieser Reaktortyp voraus, dass die Kultur entweder in Suspension vorliegt oder Microcarrier als Trägermaterialien zum Einsatz kommen. Daher ist der Rührkesselbioreaktor eher für unstrukturierte Produkte geeignet, also einem Prozess, der sich auf die Proliferation der Zellen fokussiert [36].

Festbett-Bioreaktoren

Bei dieser Art von Bioreaktoren wird Medium durch ein festes Trägermaterial (Festbett) gepumpt (♦ Abbildung 3), worauf Zellen immobilisiert sind [37]. Um dieses Funktionsprinzip für kultiviertes Fleisch nutzbar zu machen, müssen Trägermaterialien verwendet werden, die biokompatibel und essbar sind, oder das Trägermaterial muss von den Zellen abgetrennt werden und im Nachhinein entfernt werden können [40]. In der Regel verbleiben die fixierten Träger samt den anhaftenden Zellen an der gleichen Stelle. Dies ermöglicht in vielen Fällen eine bessere Kontrolle über die dreidimensionale Struktur, jedoch kann es dadurch zur Bildung stark ausgeprägter Diffusionsgradienten kommen [36], was eine Nährstoffversorgung erschwert.

Die hier beschriebenen charakteristischen Einschränkungen von Festbett-Reaktoren können bspw. durch die Verwendung von Wirbelschicht-Bioreaktoren größtenteils eliminiert werden, bei denen durch eine aufwärtsgerichtete Strömung das Trägermaterial in einem fluidisierten Zustand gehalten wird.

Hohlfaser-Bioreaktoren (Membran-Bioreaktoren)

Der Hohlfaser-Bioreaktor besteht typischerweise aus dünnen Hohlfasern bzw. meist zylindrischen Hohlmembranen, an denen sich die Zellen effizient

anlagern können. Die Zellen können so auf der Außenseite der Membran wachsen und sind durch die Membran von innen mit Medium versorgt [37]. Dadurch und aufgrund der geringeren Scherkräfte ist dieser Reaktortyp gut für Perfusionsprozesse geeignet. In größerem Maßstab oder bei längeren Systemen kann es jedoch zu einem Nährstoffgradienten kommen, sodass die Zellen im weiteren Verlauf des Bioreaktors je nach Prozessführung unterversorgt sein können. Auch ist zu beachten, dass die Durchmesser der Hohlmembranen einen wichtigen Einfluss auf den Reaktor haben. Bei einem größeren Durchmesser sinkt die Effizienz, da weniger Oberfläche für die Zellen zur Verfügung steht. Wird der Durchmesser jedoch kleiner, steigt der erforderliche Druck für eine effiziente Durchspülung, der die Membranen und Zellen beschädigen kann. Daher kann es für dieses System sinnvoll sein, parallelisierte Reaktoren zu verwenden („Numbering-up“), als sie in der Größe zu skalieren („Scale-up“) [41].

Wave-Bioreaktoren

Wave-Bioreaktoren werden als Einwegbioreaktoren (*single-use*-Bioreaktoren) eingesetzt. Ein großer Vorteil besteht darin, dass die Reaktoren vorsterilisiert werden und somit keine aufwendige Reinigung nach jedem Prozess notwendig ist [36]. Allerdings fallen hier größere Mengen Kunststoff an, die in der Folge ein größeres Umweltproblem darstellen. Nicht alle Einwegbioreaktoren sind Wave-Bioreaktoren. So gibt es auch Einwegrührkessel-Bioreaktoren und weitere Arten von Einwegbioreaktoren, die für die Zellkultur eingesetzt werden können [42]. Die Funktionsweise von Wave-Bioreaktoren beruht auf einer Kippbewegung, die das Medium in Bewegung versetzt und dieses durchmischt. Bei diesen *single-use*-Bioreaktoren ist jedoch eine Größenbegrenzung insbesondere hinsichtlich der entstehenden mechanischen Kräfte der Kippbewegung zu beachten. Außerdem müssen bei größeren Volumina Stützgerüste vorgesehen werden, um den Beutel vor Beschädigungen zu schützen [42, 43]. Eine Kernlimitierung beim Einsatz dieser Technologie ist der geringere Sauerstofftransfer, da dieser hierbei nur über die Oberfläche des Mediums stattfindet. Zudem ist die Durchmischung aufgrund der geringen Scherkräfte stark eingeschränkt, was jedoch für die Zellkultur meist in der Praxis aufgrund bestehender Kinetiken keinen relevanten Nachteil darstellt.

drei verschiedene Arten betrieben werden. Ein Verfahren ist das *Batch*-Verfahren, bei dem alle benötigten Komponenten im Voraus in den Reaktor gegeben werden und der Prozess nach Verbrauch der Nährstoffe im Medium beendet wird. Eine Weiterentwicklung des *Batch*-Verfahrens ist das *Fed-Batch*-Verfahren. Hier wird während der Kultivierung fortlaufend neues Medium zugegeben, ohne dass verbrauchtes Medium entfernt wird. Eine weitere Möglichkeit ist das Perfusionsverfahren, bei dem kontinuierlich Medium zugeführt, aber auch wieder abgeführt wird [35, 36]. Im Gegensatz zum *Fed-Batch*-Verfahren wird hierbei ein gleichmäßiger Austausch des verwendeten Mediums ermöglicht (verschiedene Bioreaktorsysteme siehe ♦ Kasten).

Insgesamt lassen sich Bioreaktoren, die spezifisch für die Nutzung mit Suspensionskulturen ausgelegt sind [36], von Bioreaktoren für adhärentes Wachstum abgrenzen. Erstere eignen sich insbesondere für die Herstellung von Fleischprodukten, die keine definierte Struktur erfordern, z. B. Hackfleisch, Nuggets, oder für Prozesse, bei denen die Proliferation und Differenzierung der Zellen voneinander getrennt werden können. Um jedoch auch komplexere Strukturen in kultiviertem Fleisch zu ermöglichen, kann auf Perfusionsverfahren zurückgegriffen werden. Diese sorgen meist für ein langsames, durch den Aufbau des Scaffolds limitiertes oder vorgegebenes Wachstum [44]. Ein großer Nachteil von Perfusionsverfahren ist der hohe Verbrauch an Nährmedium, der einen der größten Kostenfaktoren bei der Herstellung von kultiviertem Fleisch darstellt [41]. Um dies auch im Sinne der Nachhaltigkeit zu verbessern, sollte bei der Entwicklung von Prozessen zur effizienten Herstellung von kultiviertem Fleisch grundsätzlich die Möglichkeit des Recyclings von Medium untersucht werden [45]. Hierbei soll nicht vollständig verbrauchtes Medium wiederaufbereitet werden, d. h. fehlende Nährstoffe ergänzt und metabolische Störprodukte entfernt werden. Auch gibt es bereits Ansätze, das verbrauchte Medium für die Kultivierung anderer Organismen, z. B. Algen, zu nutzen. Die so kultivierten Algen können bspw. danach wieder Medium hinzugefügt werden, um so Nährstoffe zurückzuführen [44, 46].

Im Rahmen des NFS-Projekts „PERFEG-MEAT“ sollen zwei Strategien Anwendung finden, um die effiziente Nutzung von Wachstumsfaktoren zu ermöglichen. Wachstumsfaktoren stehen für die Erzeugung von kultiviertem Fleisch nur eingeschränkt und nicht in den erforderlichen Mengen zur Verfügung. Relevante Wachstumsfaktoren im Kontext von kultiviertem Fleisch sind bspw. IGF-1 (*insulin-like growth factor 1*) oder FGF-2 (*fibroblast growth factor 2*) [47]. Darüber hinaus ist die Herstellung naturidentischer Wachstumsfaktoren nach wie vor teuer und ihre Anwendung stellt aufgrund der kurzen Halbwertszeiten einen bedeutenden Optimierungsbedarf dar. Um diese Herausforderungen zu adressieren und dabei nicht die Zellen selbst genetisch zu modifizieren, gibt es folgende Möglichkeiten: Die erste Option für eine effizientere Nutzung der Wachstumsfaktoren ist der Einsatz von Recyclingverfahren für Perfusionsprozesse, um den hohen Bedarf an Medienbestandteilen zu reduzieren. Durch die Erhöhung der Verweilzeit des Mediums wird die Verfügbarkeit ungenutzter Nährstoffkomponenten für die Zellen verlängert. Allerdings muss ein ausgewogenes Verhältnis zwischen der längeren Nutzung des Mediums und

der Akkumulation inhibierender Stoffwechselprodukte der Zellen gefunden oder diese gezielt abgeführt werden, bspw. durch Dialyseverfahren. Der zweite Ansatz befasst sich mit der Entwicklung und Nutzung von modifizierten oder artifiziellen Wachstumsfaktoren, die aufgrund ihrer Eigenschaften effizientere Prozesse ermöglichen.

Fazit

Kultiviertes Fleisch hat großes Potenzial, konventionelle Tierproduktion zu ergänzen oder gar zu ersetzen und damit wirtschaftliche, soziale sowie ökologische Gewohnheiten zu verändern [48]. So soll in Zukunft durch kontrollierte Prozessbedingungen ein geringerer Ressourcenbedarf für die Herstellung eines alternativen Fleischprodukts ermöglicht werden. Insgesamt zeigen die bisherigen Fortschritte, dass die Grundlagen zur Etablierung von kultiviertem Fleisch gelegt wurden. Dennoch bestehen weiterhin umfangreiche Herausforderungen wie die hohen Produktionskosten und die Unklarheit, wie eine Skalierung in industriellem Maßstab erfolgen kann. Bislang ist noch kein Prozess bekannt geworden, in dem sich kultiviertes Fleisch wirtschaftlich und nachhaltig herstellen lässt. Zukünftige Entwicklungen müssen zudem den Fokus auf Nachhaltigkeit und Sicherheit des Produkts legen, da diese Faktoren eine entscheidende Rolle bei Konzeption und Auslegung industrieller Anlagen, Verbraucherakzeptanz sowie eines zukünftigen Zulassungsverfahrens in der EU spielen werden [45]. Besonderes Augenmerk sollte auf die folgenden Bereiche gelegt werden: Forschung, regulatorischer Rahmen, Verbraucheraufklärung, interdisziplinäre Ansätze und Nachhaltigkeitsindikatoren. In der biotechnologischen Forschung müssen zentrale Themen wie die Optimierung des Zellkulturmediums, des Bioreaktordesigns und der Zelllinien weiter vorangetrieben werden. Darüber hinaus ist die Schaffung eines klaren regulatorischen Rahmens innerhalb der EU essenziell, insbesondere im Hinblick auf die Verbraucherakzeptanz. Ein solcher Rahmen, der die Sicherheit des Endprodukts und die Prozesse zur Herstellung von kultiviertem Fleisch in den Fokus stellt, könnte das Vertrauen der Verbraucher*innen stärken. Gleichzeitig sollten spezifische Nachhaltigkeitskriterien definiert werden, um die Umweltauswirkungen von kultiviertem Fleisch mit bestehenden

Produktionsmethoden besser vergleichbar zu machen. Die Weiterentwicklung von kultiviertem Fleisch erfordert zudem interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen Biotechnolog*innen, Ingenieur*innen, Ökonom*innen und Gesellschaftswissenschaftler*innen, um sowohl technische als auch gesellschaftliche Herausforderungen erfolgreich zu lösen. In der heutigen Zeit liegt es in unserer Verantwortung, durch Forschung und Entwicklung im Bereich der zellulären Landwirtschaft die Zukunft tierischer Produkte mitzugestalten. Aktuelle Bemühungen zielen darauf ab, nachhaltigere und ethisch vertretbarere Alternativen zu konventionellen tierischen Produkten zu entwickeln und zu etablieren. Indem wir heute den Grundstein für innovative Ansätze legen, schaffen wir die Voraussetzungen für die Ernährung der Zukunft.

Förderung

Beitrag (Projekt PERFEG-MEAT) im Rahmen der Publikationsreihe des Innovationsraums NewFoodSystems – Fördermaßnahme „Innovationsräume Bioökonomie“ im Rahmen der „Nationalen Forschungsstrategie BioÖkonomie 2030“ des Bundesministeriums für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR). Förderkennzeichen: 031B1480A.



Danksagung

Diese Arbeit wurde vom TUM WACKER Institute for Industrial Biotechnology unterstützt. Die Autor*innen danken Dr. Carsten Bornhövd und Dr. Laura Lindenthal (Wacker Chemie AG) für die Unterstützung und die konstruktiven Diskussionen im Rahmen des Projekts „ArtMeat“ des TUM WACKER Institute for Industrial Biotechnology. Mehr Informationen unter www.newfoodsystems.de

Angaben zu Interessenkonflikten und zum Einsatz von KI
Die Autor*innen erklären, dass keine Interessenkonflikte bestehen. KI wurde zur Sprachoptimierung und für die Erstellung/Optimierung von Übersetzungen eingesetzt.

Literatur

1. Leip A, Weiss F, Wassenar T: Evaluation of the livestock sector's contribution to the EU greenhouse gas emissions (GGELS) – final report. European Commission, Joint Research Centre. 30. November 2010.
2. Tuomisto HL, Teixeira De Mattos MJ: Environmental impacts of cultured meat production. *Environ Sci Technol* 2011; 45(14): 6117–23.
3. Clark M, Hill J, Tilman D: The diet, health, and environment trilemma. *Annu Rev Environ Resour* 2018; 43: 109–34.
4. Bryant C, Barnett J: Consumer acceptance of cultured meat: a systematic review. *Meat Sci* 2018; 143: 8–17.
5. Statista: Vegetarische Ernährung: Wichtigste Gründe 2020. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1192330/umfrage/befragung-gruende-vegetarische-ernaehrung/> (last accessed on 27 May 2024).
6. Statista: Fleischkonsum in Deutschland pro Kopf bis 2023. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/36573/umfrage/pro-kopf-verbrauch-von-fleisch-in-deutschland-seit-2000/> (last accessed on 27 May 2024).
7. Deutsche Gesellschaft für Ernährung e. V. (DGE): Immer mehr Schwangere sind zu dick. Presseinformation: 28/2020. www.dge.de/presse/meldungen/2020/immer-mehr-schwangere-sind-zu-dick/ (last accessed on 27 May 2024).
8. Max Rubner-Institut (MRI) (ed.): Ergebnisbericht Teil 2 Nationale Verzehrsstudie II. 2008.
9. Dawczynski C: Potentiell kritische Nährstoffe bei vegetarischer und veganer Ernährung. Empfehlung zur bedarfsgerechten Zufuhr – Teil 1. *Ernährungs Umschau* 2024; 71(2): M90–105.
10. Phillips F: Vegetarian nutrition. *Nutr Bull* 2005; 30(2): 132–67.
11. Wu G: Amino acids: metabolism, functions, and nutrition. *Amino Acids* 2009; 37(1): 1–17.
12. Chen W, Zhang S, Hu X, Chen F, Li D: A review of healthy dietary choices for cardiovascular disease: from individual nutrients and foods to dietary patterns. *Nutrients* 2023; 15(23): 4898.
13. Muloi D, Ward MJ, Pedersen AB, Fèvre EM, Woolhouse MEJ, Van Bunnik BAD: Are food animals responsible for transfer of antimicrobial-resistant *Escherichia coli* or their resistance determinants to human populations? A systematic review. *Food-borne Pathog Dis* 2018; 15(8): 467–74.
14. Mulchandani R, Wang Y, Gilbert M, Van Boeckel TP: Global trends in antimicrobial use in food-producing animals: 2020 to 2030. *PLOS Glob Public Health* 2023; 3(2): e0001305.
15. Listrat A, et al.: How muscle structure and composition influence meat and flesh quality. *Sci World J* 2016; 2016: 3182746.
16. Ostrovidov S, et al.: Stem cell differentiation toward the myogenic lineage for muscle tissue regeneration: a focus on muscular dystrophy. *Stem Cell Rev Rep* 2015; 11(6): 866–84.
17. Fasciano S, Wheba A, Ddamulira C, Wang S: Recent advances in scaffolding biomaterials for cultivated meat. *Biomater Adv* 2024; 162: 213897.
18. Reiss J, Robertson S, Suzuki M: Cell sources for cultivated meat: applications and considerations throughout the production workflow. 2021; 22(14): 7513.
19. Soice E, Johnston J: Immortalizing cells for human consumption. *IJMS* 2021; 22(21): 11660.
20. Bieback K, Kluter H: Mesenchymal stromal cells from umbilical cord blood. *CSCR* 2007; 2(4): 310–23.
21. Messmer T, et al.: A serum-free media formulation for cultured meat production supports bovine satellite cell differentiation in the absence of serum starvation. *Nat Food* 2022; 3(1): 74–85.
22. Van Der Valk J, et al.: The humane collection of fetal bovine serum and possibilities for serum-free cell and tissue culture. *Toxicol In Vitro*, 2004; 18(1): 1–12.
23. Hubalek S, Post MJ, Moutsatsou P: Towards resource-efficient and cost-efficient cultured meat. *Curr Opin Food Sci* 2022; 47: 100885.



24. Merten O-W: Advances in cell culture: anchorage dependence. *Phil Trans R Soc B* 2015; 370(1661): 20140040.
25. Bomkamp C, Skaalure SC, Fernando GF, Ben-Arye T, Swartz EW, Specht EA: Scaffolding biomaterials for 3D cultivated meat: prospects and challenges. *Adv Sci* 2022; 9(3): 2102908.
26. Lee HJ, Yong HI, Kim M, Choi Y-S, Jo C: Status of meat alternatives and their potential role in the future meat market – a review. *Asian-Australas J Anim Sci* 2020; 33(10): 1533–43.
27. Place TL, Domann FE, Case AJ: Limitations of oxygen delivery to cells in culture: an underappreciated problem in basic and translational research. *Free Radic Biol Med* 2017; 113: 311–22.
28. Krogh A: The supply of oxygen to the tissues and the regulation of the capillary circulation. *J Physiol* 1919; 52(6): 457–74.
29. Bodiou V, Moutsatsou P, Post MJ: Microcarriers for upscaling cultured meat production. *Front Nutr* 2020; 7: 10.
30. Okutan N, Terzi P, Altay F: Affecting parameters on electrospinning process and characterization of electrospun gelatin nanofibers. *Food Hydrocolloids* 2014; 39: 19–26.
31. Lee KY, Mooney DJ: Hydrogels for tissue engineering. *Chem Rev* 2001; 101(7): 1869–80.
32. Imashiro C, Shimizu T: Fundamental technologies and recent advances of cell-sheet-based tissue engineering. *IJMS* 2021; 22(1): 425.
33. Santos ACA, et al.: Tissue engineering challenges for cultivated meat to meet the real demand of a global market. *IJMS* 2023; 24(7): 6033.
34. Hanga MP, et al.: Bioprocess development for scalable production of cultivated meat. *Biotechnol Bioeng* 2020; 117(10): 3029–39.
35. Kulus M, et al.: Bioreactors, scaffolds and microcarriers and in vitro meat production – current obstacles and potential solutions. *Front Nutr* 2023; 10: 1225233.
36. Socol CR, Molento CFM, Reis GG, Karp SG (eds.): Cultivated meat: technologies, commercialization and challenges. Cham: Springer Nature Switzerland 2024.
37. Chmiel H, Takors R, Weuster-Botz D (eds.): Bioprosesstechnik. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2018.
38. Schirmer C, Maschke RW, Pörtner R, Eibl D: An overview of drive systems and sealing types in stirred bioreactors used in biotechnological processes. *Appl Microbiol Biotechnol* 2021; 105(6): 2225–42.
39. Neunstoecklin B, Stettler M, Solacroup T, Broly H, Morbidelli M, Soos M: Determination of the maximum operating range of hydrodynamic stress in mammalian cell culture. *J Biotechnol* 2015; 194: 100–9.
40. Ng S, Kurisawa M: Integrating biomaterials and food biopolymers for cultured meat production. *Acta Biomaterialia* 2021; 124: 108–29.
41. Tuomisto HL, Allan SJ, Ellis MJ: Prospective life cycle assessment of a bioprocess design for cultured meat production in hollow fiber bioreactors. *Sci Total Environ* 2022; 851: 158051.
42. Eibl R, Jossen V, Eibl D: Einweg-Bioreaktoren: Therapeutische Antikörper. *Chemie in unserer Zeit* 2018; 52(4): 230–7.
43. Djisalov M, et al.: Cultivating multidisciplinary: manufacturing and sensing challenges in cultured meat production. *Biology* 2021; 10(3): 204.
44. David S, Tsukerman A, Safina D, Maor-Shoshani A, Lavon N, Levenberg S: Co-culture approaches for cultivated meat production. *Nat Rev Bioeng* 2023: 817–31.
45. Allan SJ, De Bank PA, Ellis MJ: Bioprocess design considerations for cultured meat production with a focus on the expansion bioreactor. *Front Sustain Food Syst* 2019; 3: 44.
46. Thyden R, et al.: Recycling spent animal cell culture media using the thermally resistant microalga *Chlorella sorokiniana*. *Syst Microbiol Biomanuf* 2024; 5: 371–84.
47. Huang T, Ko C, Paes D, Smeets E, Post M, Smith B: A review on the safety of growth factors commonly used in cultivated meat production. *Compr Rev Food Sci Food Saf* 2024; 23(3): e13350.
48. Letti LAJ, et al.: Cultivated meat: recent technological developments, current market and future challenges. *Bio-technol Res Innov* 2021; 5(1): e2021001.



IMPACT FACTOR + DOI
ENGLISH VERSION OPEN ACCESS

Publizieren Sie in der **ERNÄHRUNGS UMSCHAU!**

Ihr wissenschaftlicher Artikel

- ... erreicht mehr als **8000*** Fachleser*innen in Deutschland, Österreich und der Schweiz.
- ... gehört zur Pflichtlektüre von Ministerien, Institutionen und Verbänden mit Ernährungsbezug.
- ... ist mit steigendem Impact Factor gelistet in Web of Science.
- ... wird in einem **gut betreuten Peer-Review-Verfahren** begutachtet.
- ... ist zusätzlich zur deutschen Printversion **online als Volltext in englischer Sprache** international frei zugänglich.

Ihre Einreichung senden Sie an:

eu-redaktion@mpm-online.de

Tel.: 06403-63772

Weitere Informationen
finden Sie in unseren
Hinweisen für Autor*innen
(konzipiert für Full und
Short Paper):



ACHTUNG:

Aktualisierte Hinweise für Autor*innen für
Einreichungen seit Januar 2024:
– Disclaimer zum Einsatz von KI
– Änderungen der Übersetzungspauschale

**ERNÄHRUNGS
UMSCHAU**
FORSCHUNG
& PRAXIS

Produktion von Aroma- und Gewürzpflanzen im Indoor-Farming

Melinda Sattler, Dominic A. Stoll, Stefan Schillberg, Simon Vogel, Silke Hillebrand, Esther-Corinna Schwarze, Jakob Ley, Sebastian T. Soukup, Diana Bunzel, Sabine E. Kulling, Melanie Huch

Abstract

Pflanzen können sowohl erwünschte als auch unerwünschte Inhaltsstoffe enthalten. Im Indoor-Farming können solche Inhaltsstoffe durch Anpassung der kontrollierten Umweltbedingungen reduziert oder angereichert werden. Im Projekt „In4Food“ innerhalb des Innovationsraums NewFoodSystems wird dies am Beispiel der Aroma- und Gewürzpflanzen Borretsch, Oregano und Parakresse untersucht.

Zitierweise

Sattler M, Stoll DA, Schillberg S, Vogel S, Hillebrand S, Schwarze E-C, Ley J, Soukup ST, Bunzel D, Kulling SE, Huch M: Production of aromatic and spice plants in indoor farming. *Ernährungs Umschau* 2025; 72(10): 174–9.

Open access

The English version of this article is available online: DOI: 10.4455/eu.2025.043

Peer-Review-Verfahren

Manuskript (Übersicht) eingereicht: 15.11.2024; Überarbeitung angenommen: 17.03.2025

Dr. Melinda Sattler¹, Dr. Dominic A. Stoll¹, Dr. Sebastian T. Soukup¹, Dr. Diana Bunzel^{1*}, Prof. Dr. Sabine E. Kulling¹, Dr. Melanie Huch¹, Prof. Dr. Stefan Schillberg², Simon Vogel²

Dr. Silke Hillebrand³, Esther-Corinna Schwarze³, Dr. Jakob Ley³

¹ Max Rubner-Institut (MRI), Institut für Sicherheit und Qualität bei Obst und Gemüse, Karlsruhe, Deutschland

² Fraunhofer Institut für Molekularbiologie und Angewandte Oekologie (IME), Aachen, Deutschland

³ Symrise AG, Holzminden, Deutschland

* aktuell: Landwirtschaftliche Untersuchungs- und Forschungsanstalt Speyer, Speyer, Deutschland

teme. Bei NFT wird lediglich die Unterseite des Wurzelbetts einer dünnen Schicht fließender Nährlösung ausgesetzt, während deren Oberseite der Luft ausgesetzt bleibt. Bei Ebbe-Flut-Systemen werden die Wurzeln in regelmäßigem Wechsel für einen bestimmten Zeitraum in eine Nährstofflösung eingetaucht, danach werden die Wurzeln durch Ablassen der Nährlösung belüftet. Ähnlich wie bei Hydroponik findet der Anbau mittels Aeroponik ebenfalls in erdelosen Systemen statt, allerdings kommen hier die Wurzeln mit der Nährstofflösung in Kontakt, indem diese mithilfe feiner Düsen zerstäubt wird [1]. Eine Variante von Indoor-Farming ist „Vertical Farming“: Hier werden Pflanzen in mehreren Ebenen übereinander angebaut und damit bei gleicher Grundfläche eine größere Anbaufläche erreicht.

Der Aufbau einer Indoor-Farming-Anlage ist mit hohen Investitionskosten verbunden, um die Systeme zur Kontrolle der Umweltbedingungen zu etablieren. Ebenfalls ist der laufende Betrieb dieser Systeme, insbesondere die künstliche Beleuchtung, mit erheblichen Energiekosten verbunden, diese können jedoch durch Nutzung erneuerbarer Energien deutlich reduziert werden [2, 3]. Die Anzucht von Pflanzen im Indoor-Farming bietet dennoch viele Vorteile: So können die Pflanzen unabhängig von Wetterbedingungen und Jahreszeiten mit gleichbleibender Qualität und mehreren Ernten pro Jahr angebaut werden. Auch der Einsatz von Pflanzenschutzmitteln kann im Indoor-Anbau deutlich reduziert werden [2].

Das Projekt „In4Food“ (*Controlled Environment-Produktion und Verarbeitung von hochqualitativen pflanzlichen Rohstoffen zur Verwendung in Lebensmitteln*) innerhalb des Innovationsraums NewFoodSystems [4] verfolgt das Ziel, wissenschaftliche Grundlagen für einen nachhaltigen und wirtschaftlichen Indoor-Anbau ausgewählter Spezialkulturen im Bereich der Aroma- und Gewürzpflanzen zu erarbeiten. Bei den ausgewählten Spezialkulturen handelt es sich um Borretsch (*Borago*

Einleitung

Heutzutage werden Pflanzen nicht nur auf dem Feld oder in klassischen Gewächshäusern angebaut, sondern zunehmend auch im sogenannten Indoor-Farming. Hierbei werden die Pflanzen unter kontrollierten Umweltbedingungen angebaut. So können Lichtregime (Tageslänge, Lichtspektrum und -intensität), Bewässerung, Temperatur, Luftfeuchtigkeit, -bewegung und -zusammensetzung, Substrat und Düngemittel umfassend kontrolliert werden. Durch Indoor-Farming ist eine automatisierte Pflanzenanzucht möglich [1]. Die Kultivierung findet in der Regel in erdfreien Bewässerungssystemen im hydroponischen Anbau (Hydroponik) statt. Derartige Systeme ermöglichen eine enorme Einsparung der Ressource Wasser. Beispiele für hydroponische Bewässerungssysteme sind die Nährstoff-Film-Technik (NFT) oder Ebbe-Flut-Sys-

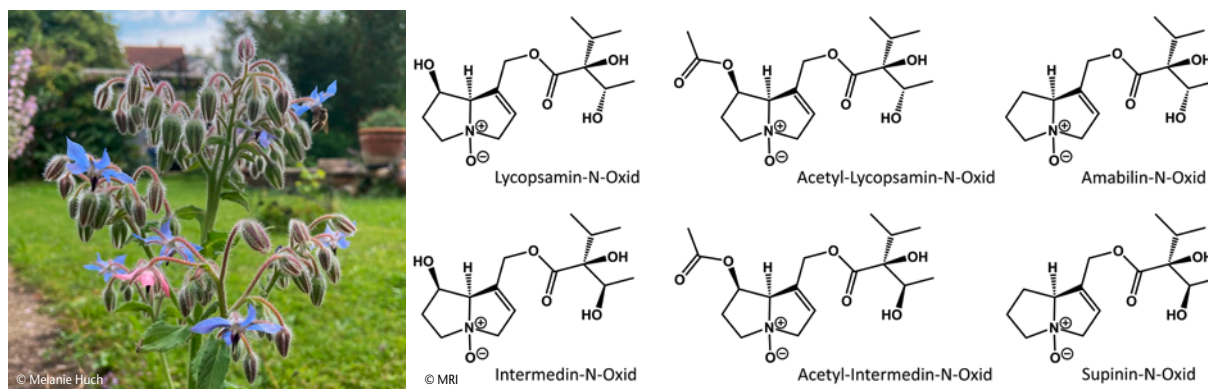


Abb. 1: Borretschpflanze im Hausgarten (links); Struktur der hauptsächlich in Borretsch vorkommenden Pyrrolizidinalkaloide, hier dargestellt in der N-Oxid-Form (rechts)

officinalis), Parakresse (*Acmella oleracea*) und Oregano (*Origanum officinalis*). Im Projekt stehen neben der Steigerung des Ertrags und des Gehalts wertgebender Inhaltsstoffe (z. B. ätherischer Ölgehalt bei Oregano und Spilanthalgehalt bei Parakresse) auch die Reduktion unerwünschter Inhaltsstoffe (Pyrrolizidinalkaloide [PA] in Borretsch) im Fokus. Weiterhin wird die Reduktion des Einsatzes mineralischer Düngemittel und die Optimierung der Indoor-Kultivierung durch Bakterien, welche z. B. einen positiven Einfluss auf das Pflanzenwachstum haben, angestrebt.

Borretsch (*Borago officinalis*)

Borretsch (♦ Abbildung 1 links), auch Gurkenkraut genannt, ist eine einjährige Pflanze, die in vielen Ländern als Küchenkraut verwendet wird: In Deutschland wird Borretsch beispielsweise als Salatzutat, in Tiefkühlkräutermischungen und insbesondere als ein Bestandteil der sieben Kräuter der „Frankfurter Grüne Soße“ (geschützte geografische Angabe, g. g. A.) verwendet [5]. Auch die Blüten von Borretsch werden aufgrund ihres sternförmigen Aussehens und der violetten Farbe zur essbaren Dekoration von Speisen verwendet. Weiterhin wird Borretsch teilweise beim traditionellen Einlegen von Essiggurken eingesetzt. Auch in Italien, Frankreich, Großbritannien und insbesondere in Spanien wird Borretsch verzehrt [6]. Allerdings besteht beim Verzehr von Borretsch ein gesundheitliches Risiko, da dieser PA enthält. PA sind sekundäre Pflanzenstoffe, die ein Pyrrolizidin-Ringsystem in der Grundstruktur aufweisen und von denen einige aufgrund ihrer spezifischen Struktur (1,2-ungesättigte PA; ♦ Abbildung 1 rechts)

lebertoxisch und kanzerogen wirken [7]. Für ausgewählte 1,2-ungesättigte PA und ihre N-Oxide hat die EU im Jahr 2020 zulässige Höchstgehalte in unterschiedlichen Lebensmitteln festgelegt. So beträgt der gesetzliche Höchstgehalt für PA (Summengehalt) in frischen Borretschblättern 750 µg/kg [8].

Methodik

Für Borretschproben wurde zunächst eine analytische Methode basierend auf Ultra-Hochleistungs-Flüssigchromatographie gekoppelt mit Tandem-Massenspektrometrie (UHPLC-MS/MS) entwickelt und validiert, die eine individuelle Quantifizierung der in Borretsch vorkommenden PA und ihrer N-Oxide ermöglicht [9]. Zudem wurde der Indoor-Anbau von Borretsch etabliert. Anschließend wurde Borretsch unter verschiedenen kontrollierten Bedingungen (z. B. unterschiedliche Lichtspektren/-intensitäten) kultiviert und die PA-Gehalte und -Profile mittels der oben genannten Methode bestimmt. Zusätzlich wurde eine Vielzahl unterschiedlicher Borretschproben aus herkömmlichem Anbau analysiert, z. B. von gewerblichen Erzeugerbetrieben, aus Hausgärten und Borretsch-Microgreens.

Ergebnisse

Erste Indoor-Anbauversuche haben gezeigt, dass sich Borretsch (blaublühend) sehr gut in solchen Systemen kultivieren lässt. Als geeignete Substrate erwiesen sich Kokosfasern oder Steinwolle. Es ist zu beachten, dass Borretsch aufgrund seines erhöhten Eisenbedarfs ausreichend mit diesem Mikronährstoff versorgt werden muss. Erste Ergebnisse zeigten, dass verschiedenen große Borretschblätter signifikant unterschiedliche PA-Gehalte aufwiesen ($n = 6$, Wilcoxon-Test, $p = 0,005$) [9]. In diesem Versuch wurden Borretschsamen in Kokoserde ausgesät und für 29 Tage unter Natriumdampflampen kultiviert (Lichtintensität: $402 \pm 29 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, 16 h Tag/8 h Nacht, Temperatur = 26 °C, relative Luftfeuchte = 65 %). Dabei hatten kleine Blätter (< 14 cm) im Mittel einen 20-fach höheren PA-Gesamtgehalt als größere Blätter (> 14 cm) derselben Pflanze [9]. In einem weiteren Versuch wurde der Einfluss unterschiedlicher Lichtspektren auf die PA-Gehalte und das Pflanzenwachstum (Blattmasse) untersucht. Dabei wurden in einem DoE-Ansatz (*Design of Experiment*-Ansatz, statistische Versuchsplanung) die Anteile an Rot, Blau und Far-Red variiert (Gesamtlichtintensität: $81 \pm 6 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) und ein Teil der Pflanzen

zusätzlich mit UV-A ($21 \pm 2 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) bestrahlt. Die Beleuchtung der Pflanzen erfolgte nach Keimung in Steinwolle mit Vermiculit für 27 Tage in einzelnen Lichtboxen (16 h Tag/8 h Nacht, Temperatur = $26^\circ\text{C}/18^\circ\text{C}$, relative Luftfeuchte = 65 %). Die verschiedenen Lichtspektren beeinflussten das Pflanzenwachstum und die Morphologie, z. B. Blattgröße und Streckenwachstum. Außerdem wiesen die Blätter der verschiedenen Lichtbehandlungen unterschiedliche PA-Gehalte auf. Die bisherigen Versuchsergebnisse lassen jedoch noch keinen eindeutigen Schluss zu, ob die PA-Gehalte direkt durch die Lichtrezepte oder durch die Pflanzenmorphologie beeinflusst werden.

Die Borretschproben aus dem herkömmlichen Anbau wiesen zum Teil hohe PA-Gehalte auf. So lag der PA-Gehalt bei einem Großteil der Blattproben aus dem gewerblichen Anbau (ca. 80 %) über dem gesetzlichen Höchstgehalt von $750 \mu\text{g/kg}$ [10]. Im Falle der Borretsch-Blattproben aus den Hausgärten waren die Gehalte von Pflanzen vor der Blüte mit denen der gewerblich Anbauenden vergleichbar und überschritten zum Großteil den gesetzlichen Höchstgehalt. Die PA-Gehalte in Blättern von Pflanzen, die bereits blühten oder geblüht hatten, waren deutlich niedriger. Die untersuchten Borretsch-Microgreens wiesen durchweg sehr hohe PA-Gehalte auf (40- bis 220-fach über dem gesetzlichen Höchstgehalt) [10].

Oregano (*Origanum vulgare*)

Oregano (♦ Abbildung 2 links) ist eine Gewürzpflanze, die entweder frisch, getrocknet oder in Form von Ölen oder Extrakten eingesetzt wird. Bekannt ist Oregano auch unter dem Begriff „Pizzagewürz“ [11]. Oregano wird insbesondere im Mittelmeerraum und in West- und Südwest-Eurasien angebaut [12]. Neben seiner Verwendung als Küchengewürz hat Oregano eine große Bedeutung für die Medizin und Kosmetik. Oreganoöl enthält die bioaktiven Monoterpenoide Carvacrol und Thymol (♦ Abbildung 2 rechts), welchen eine antimikrobielle, antioxidative und anti-karzinogene Wirkung zugesprochen wird [13]. Daher ist der Gehalt an ätherischem Öl auch eines der wichtigsten Qualitätsmerkmale von Oregano, welcher u. a. abhängig von der Varietät, dem Erntezeitpunkt und insbesondere den Anbaubedingungen stark variieren kann. Darüber hinaus konnten in landwirtschaftlich angebautem Oregano aufgrund von Verunreinigungen mit PA-bildenden Unkräutern hohe PA-Kontaminationen nachgewiesen werden [14].

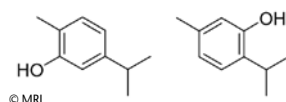
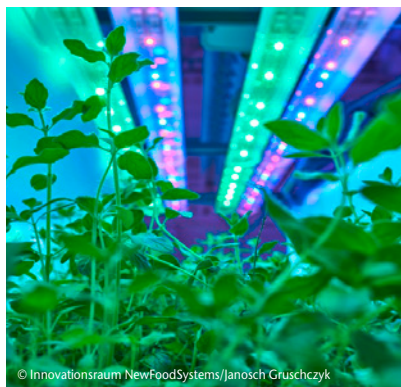


Abb. 2: Oreganopflanzen im Indoor-Anbau (links); Carvacrol (Mitte); Thymol (rechts)

Indoor-Farming bietet die vielversprechende Möglichkeit, Oregano lokal, ganzjährig und mit konstant hohen ätherischen Ölgehalten zu erzeugen. Neben diesen Aspekten verspricht das Indoor-Farming einen weiteren entscheidenden Vorteil: Es können PA-freie Qualitäten für die Herstellung von getrockneten, gerebelten oder gemahlenden Blättern zur Aromatisierung von Lebensmitteln bzw. für die Extraktion von ätherischem Öl erzeugt werden. Für die Qualität ist hierbei insbesondere ein hoher ätherischer Ölgehalt von über 1 % in der Trockenmasse wichtig. Zusätzlich ist ein hoher Biomasseertrag gewünscht, der sich in der Morphologie durch kompaktere Pflanzen mit erhöhter Blattmasse und maximierter Blütenmenge auszeichnet. Für den Einsatz in Kräuterezubereitungen steht die ausschließliche Ernte von Blütenknospen ohne Blattmaterial im Fokus.

Methodik

Die Kultivierung von Oregano erfolgte in zwei verschiedenen Indoor-Systemen mit bis zu 10 biologischen Replikaten: Im Phytotron (Klimakammer zur Pflanzenkultivierung) und in der Vertikal-Farming-Anlage OrbiPlant® (♦ Abbildung 3). Es wurden verschiedene Lichtbedingungen und Düngerzusammensetzungen getestet. Zur Beschreibung der Qualität wurden die Pflanzenmorphologie, die Frisch- und die Trockenmasse erfasst sowie der ätherische Ölgehalt mittels Wasserdampfdestillation bestimmt. Um den Einfluss verschiedener Lichtspektren auf die Biomasseentwicklung und insbesondere auf die Induktion der Blütenknospenbildung zu untersuchen, wurde ein spezielles LED-Screening-System eingesetzt, mit dem unterschiedliche Lichtspektren und -intensitäten getestet werden können. Mittels eines auf die vier Lichtspektren Blau, Grün, Rot und Infrarot ausgelegten DoE-Ansatzes wurden 24 verschiedene Lichtspektren-Zusammensetzungen bei $90 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ePPFD (effektive photosynthetische Photonenflussdichte) (18 h Tag/6 h Nacht) zur Kultivierung von Oregano getestet und die daraus resultierenden Lichtspektren bei $200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ePPFD (18 h Tag/6 h Nacht) auf ihre Wirksamkeit verifiziert. Zusätzlich wurden ungerichtete Metabolomanalysen durchgeführt.

Ergebnisse

Oregano lässt sich sowohl hydroponisch als auch aeroponisch in geschlossenen Anbausystemen kultivieren. Dabei ist zu beachten, dass die Bewässerung für diese eher an trockenere

Bedingungen angepassten Pflanzen stark reduziert werden muss. Deutliche Unterschiede konnten innerhalb des Projekts durch Kultivierung verschiedener Oreganovarietäten unter identischen Bedingungen im Phytotron bei gleicher Kultivierungsdauer beschrieben werden. Hinsichtlich des Erntegesamtgewichts und der Trockenmassen gab es zwischen den verschiedenen Oreganovarietäten Unterschiede von bis zu 50 %. Auch die Analyse des Gehalts an ätherischem Öl zeigte Unterschiede zwischen den Varietäten auf: Der ätherische Ölgehalt lag hier im Bereich von 0,7 % bei Spanischem Oregano (*Origanum virens*) bis 5,1 % bei Griechischem Oregano (*Origanum vulgare* ssp. *hirtum*) in Bezug auf die Trockenmasse. Es konnte somit gezeigt werden, dass in der Indoor-Kultivierung ausreichend hohe ätherische Ölgehalte erzeugt werden können.

Im DoE-Experiment zeigte sich, dass für die Kultivierung von Oregano eine LED-Beleuchtung mit einem hohen Blauanteil aufgrund seines positiven Einflusses auf die Blütenbiomassebildung für die Vermarktung von Kelchblättern von Vorteil ist. Soll gleichzeitig möglichst viel Biomasse von Blättern und Blüten generiert werden, zeigte der DoE-Versuch, dass Lichtbedingungen mit entsprechender Mischung der Spektralbereiche Rot, Grün und Blau eingesetzt werden sollten. Krautbiomassen von $3,7 \text{ kg m}^{-2}$ in 87 Tagen wurden durch eine energieeffiziente LED-Beleuchtung mit blau/dunkelrotem Spektrum (10 %/90 %) erreicht. Es konnte für die Kultivierung der Oreganopflanzen eine signifikante Korrelation zwischen Lichtmischung und Pflanzenentwicklung beobachtet werden. Analysen zeigten, dass bei unterschiedlichen Lichtspektren nicht nur das Wachstum beeinflusst wird, sondern auch die Zusammensetzung des Metaboloms, z. B. der ätherischen Öle, stark verändert wird.

Parakresse (*Acmella oleracea*)

Parakresse ist eine krautige Pflanzenart in der Pflanzenfamilie der Korbblütler (Asteraceae). Diese wächst etwa 30–60 cm hoch und hat gegenständige, dreieckige bis leicht herzförmige gestielte Laubblätter. Die Blütenstände sind gelb oder gelb-rötlich und 1,5–2,5 cm groß (♦ Abbildung 4 links). In tropischen Regionen blüht die Art ganzjährig, bei einer Kultur in gemäßigten Zonen beginnt die Blüte im Frühsommer. Wie viele andere *Acmella*-Wild-



Abb. 3: Förderbandbasierte OrbiPlant®-Anlage zur Anzucht von Pflanzen. Die Anlage ist hier mit diversen Salaten und Kräutern bestückt.

arten in Brasilien bevorzugt *A. oleracea* feuchte Böden und wächst entlang von Seeufern [15]. Die nicht winterharte *A. oleracea* wird lokal auch als „Toothache Plant“ oder „Jambu“ bezeichnet. Die ursprüngliche Verbreitung von *A. oleracea* ist nicht vollständig geklärt. Wahrscheinlich stammt diese Art von einer brasilianischen und/oder peruanischen *Acmella*-Art ab. Der erste Beleg einer Kultur in einem botanischen Garten stammt aus dem Jahre 1791 (*Botanic Garden on St. Vincent*) [15]. Heute ist die Art als Kulturflüchtling weltweit in tropischen und subtropischen Gebieten verbreitet. Parakresse wird als Zierpflanze kultiviert oder zu pharmakologischen Zwecken (z. B. entzündungshemmend und antimikrobiell), zur Hautpflege u. a. in Antifaltencremes (dort auch als „Bio-Botox“ beworben) sowie zu kulinarischen Zwecken aufgrund der Schärfe und des sogenannten „Tingling“-Effekts (Prickeln, Kribbeln) angebaut [16]. Als wertgebender Inhaltsstoff ist das Hauptalkamid Spilanthol enthalten (♦ Abbildung 4 rechts), welches für die kosmetische und sensorische Wirkung verantwortlich ist. In der Lebensmittelproduktion wird Parakresse zum Würzen von Speisen oder zum Maskieren von unerwünschten Geschmackswahrnehmungen in bestimmten Lebensmitteln verwendet. In der Literatur ist ein deutlich höherer Gehalt an Spilanthol in den Blüten im Vergleich zum Gehalt in den Blättern und den Stängeln beschrieben [17]. Aktuell ist ein stärkerer Anstieg an spilantholhaltigen Lebensmitteln und Kosmetikprodukten am Markt zu beobachten. Die hiermit verbundene Nachfrage führt bei den Produzenten zu der Notwendigkeit, die Herstellung von Spilanthol zu optimieren. Durch den Innovationsraum NewFoodSystems mit dem Projekt „In4Food“ kann ein direktes „Benefit Sharing“ für Verbraucher*innen und Industrie erreicht werden: Da spilantholhaltige Extrakte momentan hauptsächlich für die Herstellung von Kosmetika und medizinischen Produkten verwendet werden und die Rohstoffe

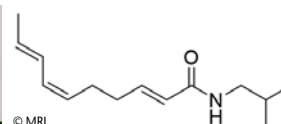
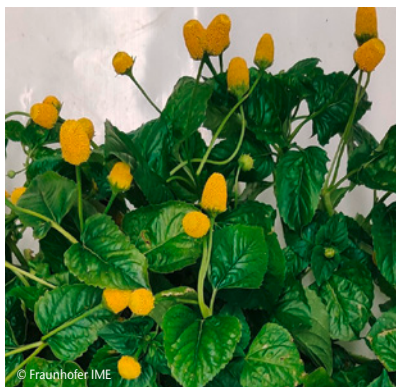


Abb. 4: Parakressepflanzen in einer Klimakammer (links); Struktur Spilanthol (rechts)

schlecht bis gar nicht verfügbar sind, ist es das Ziel, mehr Pflanzen von höherer Qualität (Spilantholgehalt) zu niedrigeren Preisen zu produzieren.

Methodik

Zur Etablierung der Indoor-Kultivierung von Parakresse wurden verschiedene hydroponische Kultursysteme wie NFT, Ebbe-Flut-System und Aeroponik in kontrollierten Klimakammern getestet. Mit dieser Kultivierung kann durch eine gezielte Kultursteuering eine deutlich höhere Qualität im Vergleich zum Freilandanbau erzielt werden. Hierzu wurden unterschiedliche Pflanzern, Substrate, Dünger und Lichtregime getestet. Des Weiteren wurden Versuche zur Erhöhung der Biomasse und Nachernteverfahren initiiert, wozu unterschiedliche Ernte- und Verarbeitungsmethoden wie die schnelle Frischwaren-Verarbeitung und die Niedrig-Energie-Trocknung eingesetzt wurden.

Ergebnisse

Mit einem hauptsächlich dunkelroten Lichtspektrum konnte die höchste Spilantholausbeute von bis zu 0,7 % in der Krautbiomasse und mehr als 2,5 % in den Blüten erzielt werden. Im Vergleich zu einem blaulastigen Lichtspektrum konnte mit einem dunkelroten Lichtspektrum zudem eine bis zu 40 % höhere Biomasse erreicht werden. Der Indoor-Anbau von Parakresse kann mit diesem reduzierten Lichtspektrum energieeffizient und preisgünstig realisiert werden. Bezüglich der Nährstoffkonzentration und -zusammensetzung konnte ein calciumhaltiger Volldünger mit einem Stickstoff/Phosphor/Kalium (NPK)-Verhältnis von 12/8/24 als optimal ermittelt werden, der ein schnelleres Wurzelwachstum und eine phänotypisch vorteilhafte buschige Wuchsform sowie den höchsten Biomassezuwachs begünstigt. Erste Versuche deuten darauf hin, dass bestimmte Mikroorganismen einen leicht positiven Effekt auf die Blütenbildung ausüben. Um die Wirtschaftlichkeit des Anbauprozesses zu ermitteln, wurde ein hochskalierter Kultivierungsversuch auf Basis des neuartigen, am Fraunhofer IME entwickelten Vertikal-Farming-Systems OrbiPlant® durchgeführt (♦ Abbildung 3). Der Energieeinsatz, vor allem für die LED-Beleuchtung und Klimatisierung, lag hier bei 41 kWh pro Gramm produziertem Spilanthol, der durch verbesserte Klimatechnik noch weiter gesenkt werden kann.

Die bereits in der Literatur beschriebenen, höheren Spilantholgehalte von ca. 2 % in den Blüten konnten mittels HPLC-Analytik bestätigt werden. Der Gehalt an wertgebendem Spilanthol ist in den Blüten um ein 5–10-faches höher als in den Blättern und Stielen der Pflanzen. Auch konnten zwischen unterschiedlichen Akzessionen teils deutliche Unterschiede im Wachstumsverhalten und der Spilantholakkumulation beobachtet werden. Weitere metabolomische Studien mit Pflanzenmaterial aus dem Indoor-Anbau mittels UHPLC-gekoppelter *Ion Mobility Separation-Quadruple Time-of-Flight-Massenspektrometrie* (UHPLC-IMS-QToF) zeigten, dass sich das Metabolom von Blättern und Blüten stark unterscheidet.

Ausblick

Die bisherigen Ergebnisse der Borretschproben aus herkömmlichem Anbau zeigen die Notwendigkeit, PA-Gehalte in Borretsch zu monitoren und idealerweise durch optimierte Anbaubedingungen oder neue Züchtungen zu reduzieren. Die Gehalte an PA in Borretsch-Microgreens in dieser Studie waren extrem hoch. Daher stellt sich die Frage, ob durch deren Verzehr eine akute und chronische Gesundheitsgefahr bzw. ein Gesundheitsrisiko gegeben sind und ob Borretsch-Microgreens überhaupt für den menschlichen Verzehr geeignet sind.

Oregano zeigte im Indoor-Anbau die erwünschten hohen Gehalte an ätherischen Ölen. Die bisherigen Versuche zeigten, dass das Lichtregime beim Indoor-Anbau eine große Auswirkung auf die Pflanzenmorphologie und deren Inhaltsstoffe hat. Die induzierte Bildung von Blüten, welche in Kräutierzubereitungen eingesetzt werden sollen, stellt weiterhin eine Herausforderung im Indoor-Anbau dar. Die Ergebnisse der Metabolomanalyse können genutzt werden, um durch eine geeignete Lichtbehandlung den Gehalt an geschmacksbestimmenden Inhaltsstoffen positiv zu beeinflussen. Dies ermöglicht einen vorteilhaften Anbau von Oregano im Hinblick auf Vermarktung und Wirtschaftlichkeit.

Aufgrund der Ergebnisse der Kultivierung von Parakresse in dieser Studie, sollte zur Gewinnung des wertgebenden Inhaltsstoffs Spilanthol der Fokus auf der Erhöhung der Blütenbiomasse je Pflanze liegen. Dies kann zum Beispiel wie im Projekt gezeigt durch ein angepasstes Licht- und Düngeregime erreicht werden.

Förderung

Beitrag im Rahmen der Publikationsreihe des Innovationsraums NewFoodSystems – Fördermaßnahme „Innovationsräume Bioökonomie“ im Rahmen der „Nationalen Forschungsstrategie BioÖkonomie 2030“ des Bundesministeriums für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR).



Danksagung

Die Autor*innen danken dem BMFTR-Innovationsraum NewFoodSystems für die Förderung des Vorhabens In4Food (FKZ: 031B0959A) sowie allen Kooperationspartner*innen, die bei diesem Projekt mitgewirkt haben und somit maßgeblich zum Erfolg von In4Food beigetragen haben. Mehr Informationen unter www.newfoodsystems.de

Angaben zu Interessenkonflikten und zum Einsatz von KI
SH ist Mitarbeiterin der Symrise AG. JL ist Mitarbeiter der Symrise AG und Inhaber öffentlicher Aktien der Symrise AG. Die weiteren Autor*innen erklären, dass keine Interessenkonflikte bestehen und bei der Erstellung des Manuskripts keine KI-Anwendungen eingesetzt wurden.

Literatur

1. Eldridge BM, Manzoni LR, Graham CA, Rodgers B, Farmer JR, Dodd AN: Getting to the roots of aeroponic indoor farming. *New Phytol* 2020; 228(4): 1183–92.
2. Debdas S, Chatterjee S, Das S, Das D, Hazra S, Shah PB: IoT edge based vertical farming. *World Conference on Communication and Computing, WCONF* 2023.
3. Morella P, Lambán MP, Royo J, Sánchez JC: Vertical farming monitoring: How does it work and how much does it cost? *Sensors (Basel)* 2023; 23: 3502.
4. Fink L, Bunzel D, Horn J, et al.: Der Innovationsraum NewFoodSystems und die Transformation unserer Ernährungs- und Lebensmittelsysteme. *Ernährungs Umschau* 2024; 71(9): M521–9.
5. Europäische Union (EU): Durchführungsverordnung (EU) 2016/326 der Kommission vom 25. Februar 2016 zur Eintragung einer Bezeichnung in das Register der geschützten Ursprungsbezeichnungen und der geschützten geografischen Angaben [Frankfurter Grüne Soße/Frankfurter Grieß Soß (g.g.A.)]. 2016.
6. Montaner C, Zufiaurre R, Movila M, Mallor C: Evaluation of borage (*Borago officinalis* L.) genotypes for nutraceutical value based on leaves fatty acids composition. *Foods* 2022; 11: 16.
7. Abdelfatah S, Naß J, Knorz C, Klauck SM, Küpper J-H, Efferth T: Pyrrolizidine alkaloids cause cell cycle and DNA damage repair defects as analyzed by transcriptomics in cytochrome P450 3A4-overexpressing HepG2 clone 9 cells. *Cell Biol Toxicol* 2022; 38: 325–45.
8. EU: Verordnung (EU) 2023/915 der Kommission vom 25. April 2023 über Höchstgehalte für bestimmte Kontaminanten in Lebensmitteln und zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 1881/2006.
9. Sattler M, Müller V, Bunzel D, Kulling SE, Soukup ST: Pyrrolizidine alkaloids in borage (*Borago officinalis*): comprehensive profiling and development of a validated LC-MS/MS method for quantification. *Talanta* 2023; 258: 124425.
10. Sattler M, Huch M, Bunzel D, Soukup ST, Kulling SE: Pyrrolizidine alkaloid contents and profiles in *Borago officinalis* leaves, flowers and microgreens: implications for safety. *Food Control* 2025; 168: 110930.
11. Sharifi-Rad M, Yilmaz YB, Antika G, et al.: Phytochemical constituents, biological activities, and health-promoting effects of the genus *Origanum*. *Phytother Res* 2021; 35: 95–121.
12. Soltani S, Shakeri A, Iranshahi M, Boozari M: A review of the phytochemistry and antimicrobial properties of *Origanum vulgare* L. and subspecies. *Iran J Pharm Res* 2021; 20: 268–85.
13. Sharifi-Rad M, Varoni EM, Iriti M, et al.: Carvacrol and human health: a comprehensive review. *Phytother Res* 2018; 32: 1675–87.
14. Kaltner F, Rychlik M, Gareis M, Gottschalk C: Occurrence and risk assessment of pyrrolizidine alkaloids in spices and culinary herbs from various geographical origins. *Toxins* 2020; 12: 155.
15. Hind N, Biggs N: 460. *Acmella Oleracea compositae*. *Curtis's Bot Mag* 2003; 20: 31–9.
16. Uthpala TGG, Navaratne SB: *Acmella oleracea* plant; identification, applications and use as an emerging food source – review. *Food Rev Int* 2020; 37: 399–414.
17. Dias AMA, Santos P, Seabra IJ, Júnior RNC, Braga MEM, de Sousa HC: *Spilanthol* from *Spilanthol* *acmella* flowers, leaves and stems obtained by selective supercritical carbon dioxide extraction. *J Supercrit Fluids* 2012; 61: 62–70.

Die faszinierende Welt der Vanille

Herkunft, wirtschaftliche Bedeutung und Strategie für die nachhaltige Kultivierung

Sebastian T. Soukup*, Esther-Corinna Schwarze*, Marvin Vahl, Falco Beer, Jakob Peter Ley, Andreas Ulbrich

Abstract

Vanille, eines der kostspieligsten und zugleich populärsten Gewürze weltweit, wird aus der Gattung *Vanilla* gewonnen und ist das einzige Lebensmittelprodukt, welches aus der Pflanzenfamilie der Orchideen bezogen wird. Die semi-epiphytische Vanilleorchidee, deren Ursprung in Mexiko liegt, bedarf eines intensiven manuellen Arbeitsaufwands im Anbau und bei der Ernte. Zusammen mit dem sich anschließenden fermentativen Reifungsprozess der Schoten führt die komplexe Vanilleerzeugung zu hohen und stark schwankenden Marktpreisen. Aber auch die vorausgehende Kultivierung stellt einen erheblichen Zeitaufwand dar, da Vanillepflanzen in der Regel erst ab einem Alter von 2–5 Jahren Blüten bilden. Der Anbau wird zudem durch phytopathogene Pilze, insbesondere *Fusarium oxysporum*, stark beeinträchtigt.

Die Projekte „SustainVanil“ und „FoxyVanil“ verfolgen das Ziel, den Vanilleanbau durch vertiefte Forschung im Bereich der Kultivierung und der Toleranz gegenüber Schaderregern nachhaltig zu optimieren. Während „SustainVanil“ in geschützten Kultursystemen die Wachstums- und Entwicklungsprozesse der Vanillepflanze detailliert untersucht, richtet „FoxyVanil“ seinen Fokus auf die Interaktion zwischen Vanillepflanze und dem Schaderreger *Fusarium oxysporum*. Beide Forschungsprojekte sollen dazu beitragen, die Erträge zu stabilisieren und somit die wirtschaftliche Basis der Anbauenden zu sichern, was zusätzlich zu einer verlässlicheren Marktversorgung mit Vanille führen könnte. Durch den Transfer der Forschungsergebnisse nach Madagaskar wird sichergestellt, dass die gewonnenen Erkenntnisse zur Verbesserung lokaler Anbaumethoden beitragen und nachhaltig in die Praxis integriert werden können.

Zitierweise

Soukup ST, Schwarze E-C, Vahl M, Beer F, Ley JP, Ulbrich A: The fascinating world of vanilla. Origin, economic significance, and strategy for sustainable cultivation. Ernährungs Umschau 2026; 73(1): online first.

Open access

The English version of this article is available online: DOI: 10.4455/eu.2025.057

Peer-Review-Verfahren

Manuskript (Übersicht) eingereicht: 25.04.2025; Überarbeitung angenommen: 05.08.2025

Dr. Sebastian T. Soukup¹, Dr. Falco Beer¹
Esther-Corinna Schwarze^{2,4}, Dr. Jakob Peter Ley²
Marvin Vahl³, Prof. Dr. Andreas Ulbrich³

¹ Max Rubner-Institut – Bundesforschungsinstitut für Ernährung und Lebensmittel, Institut für Sicherheit und Qualität bei Obst und Gemüse, Haid-und-Neu-Straße 9, 76131 Karlsruhe, Deutschland

² Symrise AG, Mühlenfeldstraße 1, 37603 Holzminde

³ Hochschule Osnabrück, Fakultät Agrarwissenschaften und Landschaftsarchitektur, Am Krümpel 31, 49082 Osnabrück, Deutschland

⁴ esther.corinna.schwarze@symrise.com

Hintergrund

Vanille ist neben Safran das teuerste und prominenteste Gewürz der Welt [1]. Es ist dagegen weniger bekannt, dass Vanille die fermentierte Frucht einer Orchidee aus der Gattung *Vanilla* ist. Einige *Vanilla*-Arten sind wirtschaftlich bedeutsame Nutzpflanzen innerhalb der Orchideenfamilie, die in der Lebensmittelproduktion Verwendung finden [2]. Die Vanillepflanze ist eine semi-epiphytische Orchidee, die ursprünglich aus Mexiko stammt und aus deren Kapsel Früchten (Schoten) die weltweit beliebte Gewürzvanille gewonnen wird [3]. Zum Wachsen benötigt die Kletterpflanze einen sogenannten Tutor (Ständer), bspw. einen Baum, an dem sie sich festhalten kann. Eine Vanillerebe wird etwa 20–50 m lang und hat runde, dunkelgrüne, fleischige Sprossachsen (Triebe), die sich nur selten verzweigen. Aus den Nodien (Knoten) bilden sich Luftwurzeln, um Wasser aufzunehmen und eine starke Haftung an einer Stützpflanze (Phorophyt) zu ermöglichen (♦ Abbildung 1). Die Blütenstände bilden sich in den Achsen der Blätter; in der Regel bildet die Pflanze 10–12 Blüten je Blütenstand. Die trompetenförmigen Blüten sind kurzlebig und öffnen sich in den frühen Morgenstunden nur für einen sehr begrenzten Zeitraum [4]. Vermehrt wird die Vanillepflanze durch Stecklinge¹. Von den insgesamt 121 bekannten Arten der Orchideen-Gattung *Vanilla* [5] werden hauptsächlich die folgenden drei kultiviert und ausschließlich deren Schoten verwendet [6]:

- *Vanilla planifolia* – Verwendung in der Lebensmittelindustrie; v. a. bekannt als Bourbon-Vanille, wenn sie auf den Bourbon-Inseln wie Madagaskar, den Komoren, La Réunion, den Seychellen, Mayotte und Mauritius angebaut und geerntet wurde

* Die Autorin und der Autor haben gleichermaßen zur Arbeit beigetragen.

¹ abgeschnittene Pflanzenteile, die in Erde oder ein anderes Medium gesteckt werden, um Wurzeln zu bilden und zu neuen, genetisch identischen Pflanzen heranzuwachsen

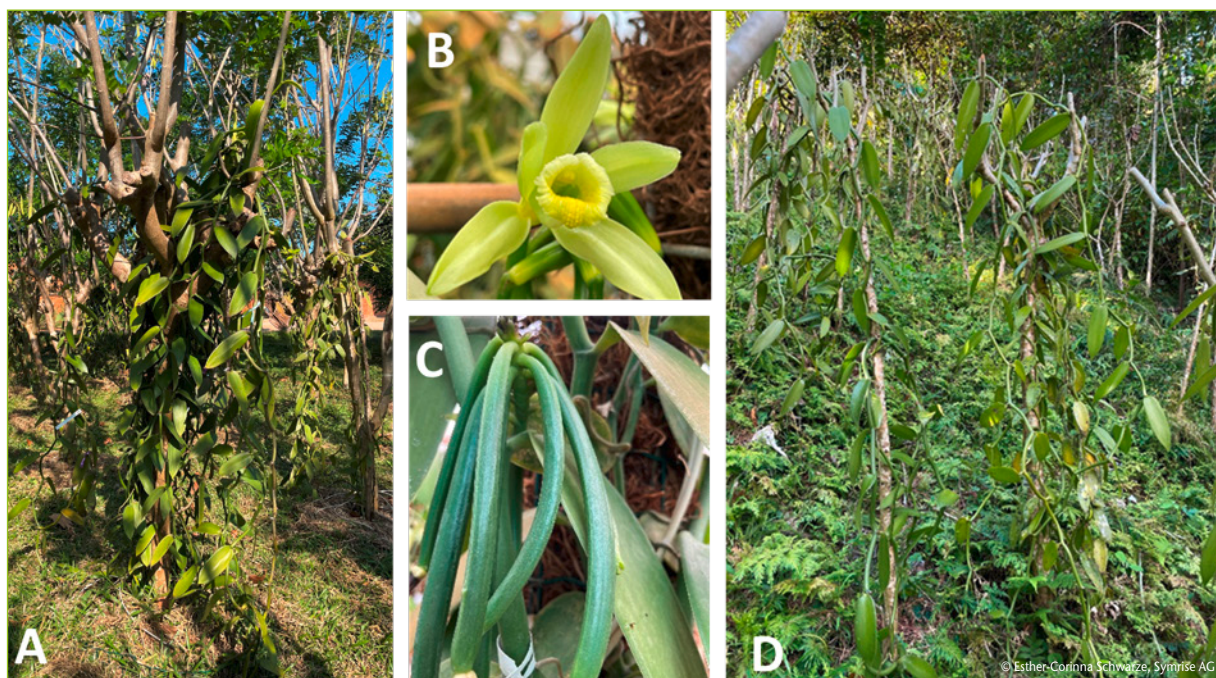


Abb. 1: *Vanilla planifolia*: Pflanze am Tutorbaum (A), Blüte (B), grüne Schoten (C); Vanilleanbau in Madagaskar (D)

- *Vanilla pompona* – Verwendung sowohl in der Lebensmittelindustrie als auch in der Duft- und Kosmetikindustrie
- *Vanilla tahitensis* – Verwendung in der Lebensmittelindustrie (hauptsächlich in Frankreich)

Um das Gewürz Vanille herzustellen, müssen die Blüten zuerst i. d. R. manuell durch den Menschen bestäubt werden. Daraus entwickeln sich dann die Kapsel Früchte, die nach 8–9 Monaten als grüne geschmacksneutrale Schoten geerntet und fermentiert werden. Erst durch die anschließende Fermentation entstehen die braun-schwarzen Gewürz-Vanilleschoten mit ihrem typischen Geschmack wie wir sie kennen. Die Fermentation startet mit einer kurzen Behandlung der Schoten in einem 60 °C heißen Wasserbad, um die Zellen aufzuschließen und enzymatische Reaktionen in den Schoten auszulösen. Als nächster Schritt folgt für 24 Stunden das sogenannte „Schwitzen“, hier werden die noch warmen Schoten in Tücher eingeschlagen und in Kisten an einem warmen Ort gelagert. In dieser Phase finden hydrolytische und oxidative Prozesse statt, in denen sich die Aromen entwickeln. Dabei bildet sich u. a. das freie Vanillin, der Hauptaromastoff. Durch eine finale wochenlange Lufttrocknung (im Schatten oder in der Sonne) werden die Vanilleschoten auf ca. 20–35 % Restfeuchtegehalt getrocknet und können anschließend in Wachspapier lange gelagert werden [7].

Das fertige Gewürz Vanille wird zur Aromatisierung zahlreicher Backwaren, Süßwaren, Milchprodukte und Getränke sowie in der Duft- und Kosmetikindustrie eingesetzt. Die fermentierten braunen Schoten können dabei direkt als Ganzes oder in pulverisierter Form verwendet werden. Des Weiteren finden aus den fermentierten Schoten gefertigte Vanilleextrakte Anwendung. Jedes Produkt hat seine eigenen organoleptischen, physikalischen und funktionellen Eigenschaften [8]. Da es sich um Naturprodukte handelt, kann die chemische Zusammensetzung von Vanilleschoten bzw. Vanilleextrakten stark variieren. Dabei kann die Zusammensetzung durch die eingesetzte Vanilleart, den geografischen Ursprung, die Wetterbedingungen, den Erntezeitpunkt und die Prozessierung beeinflusst werden [1]. In der Literatur wird berichtet [9], dass über 150 flüchtige Verbindungen in den Schoten der Art *Vanilla planifolia* nachweisbar sind. Vier Phenole gelten als Indikatoren für den typischen Geschmack und somit als Maß der Handelsqualität: Vanillin (4-Hydroxy-3-methoxybenzaldehyd), p-Hydroxybenzaldehyd, Vanillinsäure (4-Hydroxy-3-methoxybenzoesäure) und p-Hydroxybenzoesäure (♦ Abbildung 2). Des Weiteren wurden nichtflüchtige, teilweise geschmacksaktive Inhaltsstoffe gefunden [10]. Die vier genannten Phenole und weitere 400 aromaaktive Substanzen machen durchschnittlich ca. 2 % der Masse der Vanilleschote aus. Bis zu 98 % besteht die Schote aus Wasser, Fetten, Wachsen, Zucker und Cellulose [11].

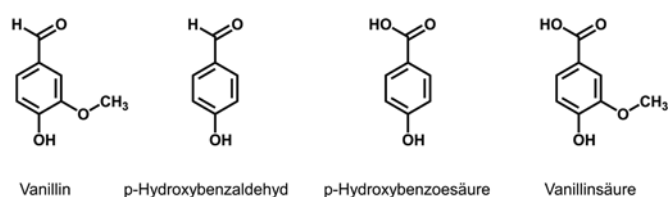


Abb. 2: Chemische Strukturformeln der Schlüsselaromakomponenten in Vanille

Die Vanilleschoten unterliegen, u. a. wegen ihres weltweit begrenzten Angebots sowie stark fluktuierender Erträge und Qualitäten, hohen Marktpreisschwankungen, die sich im hohen zwei- bis dreistelligen €/kg-Bereich bewegen [12]. Aufgrund des hohen Preises für Vanille haben viele Familien in der Sava-Region Madagaskars begonnen, Vanille anzubauen, wodurch sich ihr Lebensstandard verbessert hat [13]. Um diesen Standard zu halten, müssen die Preise stabil bleiben und die Vanille benötigt einen verlässlichen Absatzmarkt. Es wurde hierzu eine Industrieinitiative gegründet, die auf eine langfristige Stabilität bei der Versorgung mit hochwertiger, natürlicher Vanille hinarbeitet und dabei zugleich eine Produktion in einer sozial, ökologisch und ökonomisch nachhaltigen Weise gewährleisten soll [14].

Vanillepflanzen bilden das erste Mal ab einem Alter von 2–5 Jahren nach der Pflanzung Blüten aus [15]. Die mehrjährige vegetative Kultivierungsphase, also die Zeit, in der die Pflanze wächst, ohne Blüten/Früchte zu bilden und die dem ersten Ertrag vorausgeht, ist sehr kostenintensiv und birgt durch den langen Zeitraum ein hohes Risiko für erkrankungsbedingte Ausfälle oder Schädigungen durch Wetterereignisse (z. B. Zyklone). Hat die Pflanze das generative Stadium (Phase der Blüten- und Fruchtbildung) erreicht, ist die Bestäubung der nächste entscheidende Schritt für die kommerzielle Produktion von Vanille, insbesondere bei *Vanilla planifolia*. Da natürliche Bestäuber wie stachellose Bienen und Orchideenbienen nur geringe Bestäubungserfolge zeigen [16], wird die Produktion weitgehend durch manuelle Bestäubung gesichert. In Mexiko wurden natürliche Bestäubungsraten von lediglich 5 % beobachtet [17], während *Vanilla hartii* in Costa Rica durch eine nektarbasierte Strategie höhere Fruchtansätze erzielte [18]. Zudem wurde nachgewiesen, dass auch Kolibris bestimmte *Vanilla*-Arten bestäuben können, was auf eine größere Bandbreite potenzieller Bestäuber hinweist [19]. In Madagaskar fehlen natürliche Bestäuber wie Kolibris und spezielle Bienenarten, weshalb jede Blüte manuell bestäubt werden muss. Dies ist ein weiterer Aspekt, der zu den hohen Marktpreisen beiträgt. Denn die Blüten öffnen sich in einem sehr schmalen Zeitfenster von wenigen Stunden nur einmal im Jahr und in diesem bestäuben die Farmer jede einzelne Blüte von Hand. Um ein Kilogramm fertig fermentierte braune Vanilleschoten zu gewinnen, müssen rund 600 Blüten bestäubt werden [11], da nicht jede Blüte eine verwertbare Schote hervorbringt [20].

Der Anbau von Vanille konzentriert sich geografisch hauptsächlich auf tropische und subtropische Regionen in der Nähe des Äquators. Madagaskar gehört neben Indonesien und Mexiko zu den Hauptproduktionsländern von Vanille. Zusammen repräsentieren diese Länder ca. 80 % der weltweiten Vanilleproduktion. Insgesamt betrug die weltweite Produktion von Gewürzvanille im Jahr 2023 rund 6789 Tonnen. Davon entfielen 3111 Tonnen auf Madagaskar, 1833 Tonnen auf Indonesien und 508 Tonnen auf Mexiko [21].

Die etablierte Vanillekultivierung zeichnet sich durch einen hohen Anteil an kleinbäuerlichen Strukturen aus [22] und basiert hauptsächlich auf anekdotischem Wissen, das von Generation zu Generation weitergegeben wird. Das Forschungsinteresse der letzten Jahrzehnte konzentrierte sich v. a. auf die Fruchtentwicklung und auf Fruchtreifungsprozesse der geernteten Schoten. Der Anbau von Vanille in Madagaskar und in anderen Hauptanbauregio-

nen erfolgt in der Regel extensiv im Freiland in sogenannten Agroforstsystemen oder im geringeren Umfang auch in intensiveren Kultursystemen wie Schattierungshäusern [15, 18]. In den Agroforstsystemen rankt sich die Vanillepflanze an sogenannten Tutorbäumen (Stützbäumen), die zusammen unter größeren Schattenbäumen im Wald wachsen. Die Tutorbäume werden durch einen massiven Rückschnitt auf einer annehmbaren Höhe gehalten. Eine Kultivierung der Vanille an den großen Schattenbäumen anstatt an kleineren Tutorbäumen würde dazu führen, dass die Pflanzen viele Meter hoch in die Baumkronen wachsen und eine manuelle Bestäubung der Blüten sowie die Ernte der Schoten praktisch kaum möglich wären. Der Anbau im Wald hat den Vorteil, dass eine Beschattung durch die Bäume zu einem pflanzenoptimalen Mikroklima führt und eine ausreichende Nährstoffversorgung durch herabfallende Blätter der Bäume gegeben ist [13].

Die mehrjährige vegetative Kultivierung, die dem ersten Ertrag vorausgeht, wurde bislang kaum wissenschaftlich fundiert untersucht. Darüber hinaus fehlt es bislang an umfassenden Studien zu den spezifischen Pflanzenentwicklungsprozessen in Abhängigkeit der relevanten Wachstums- und Umweltfaktoren, die einen Wechsel von der vegetativen (Wachstumsphase ohne Blüten- und Fruchtbildung) in die generative (Blühphase mit anschließender Schotenbildung) Phase begünstigen bzw. überhaupt erst ermöglichen.

Ein weiterer Aspekt im Vanilleanbau ist die zunehmende Problematik von Ertragseinbußen durch das Auftreten von Schaderregern. Besonders zu nennen ist hier der phytopathogene Pilz *Fusarium oxysporum*, der eine große Herausforderung in der Vanillekultivierung darstellt [23]. Ein Befall mit *Fusarium oxysporum* kann zum Absterben der mehrjährigen Pflanzen führen, was erhebliche kommerzielle Folgen für die Anbauenden bedeuten kann [24]. Maßnahmen zur Regulierung des Schadereggers durch den Einsatz von Fungiziden sind weder nachhaltig noch umweltschonend und können zu Rückstandsproblemen im Rohstoff „Vanilleschote“ führen. Ein nachhaltiger Lösungsansatz kann die Verwendung pathogentoleranter „Vanillearten“ (fachlich korrekt Vanillegenotypen) sein sowie die Anwendung von verbesserten Kultivierungspraktiken. Beides kann dazu beitragen, die Vanilleproduktion nachhaltig und ökologisch zu sichern. Als Beitrag dazu wurden zwei Forschungsprojekte, „SustainVanil“ und „FoxyVanil“, ins-

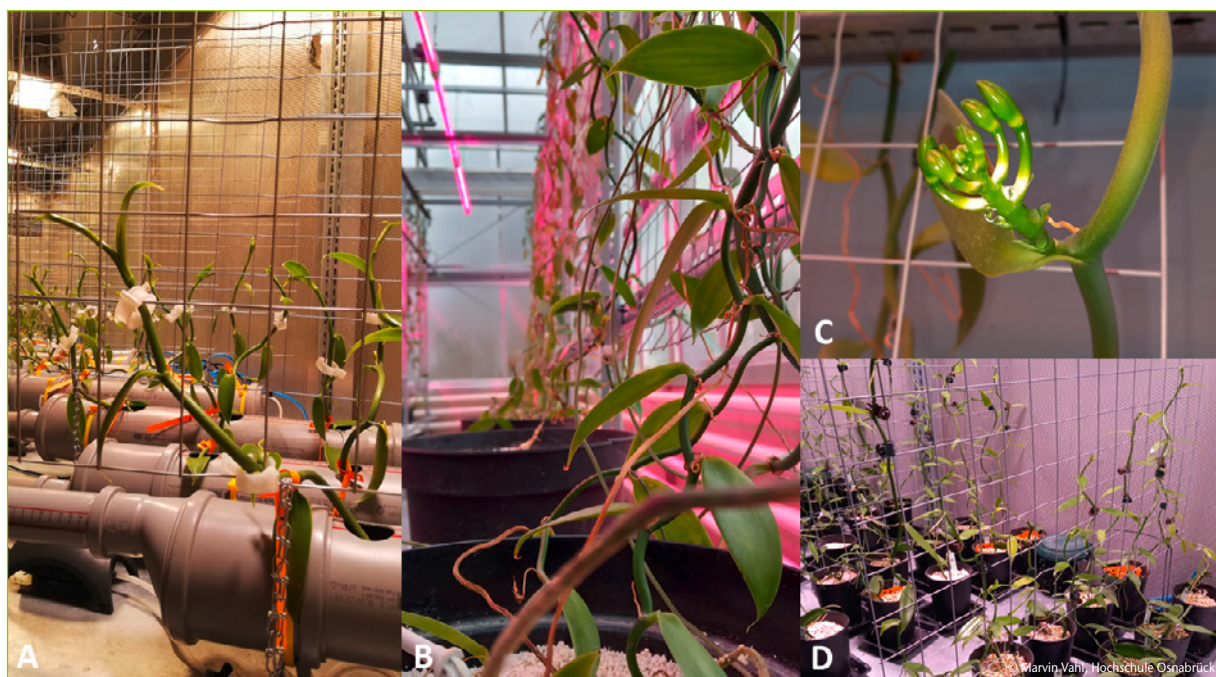


Abb. 3: Einblick in die Forschungsarbeiten im Projekt „SustainVanil“: Kultivierung von Vanillejungpflanzen in einem substratfreien hydroponischen Rohrsystem (A), hydroponische Anzucht von Vanille im Gewächshaus (B), Blüte an einem Vanilletrieb (C) und Kultivierung von Jungpflanzen in einer Klimakammer (D)

Leben gerufen, die innerhalb des Innovationsraums „NewFoodSystems – neue Lebensmittelsysteme“, welcher vom Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR) gefördert wird, verortet sind.

NewFoodSystems – SustainVanil

Im Forschungsprojekt „SustainVanil“ arbeiten Partner aus Wirtschaft und Wissenschaft zusammen, um die Entwicklung, Kultivierung und Physiologie der Vanillepflanze zu untersuchen. Ziel ist es, die Bedürfnisse für eine optimale Pflanzenentwicklung der Vanille besser zu verstehen, um mithilfe dieser Erkenntnisse die bislang etablierten Kultursysteme so zu optimieren, dass eine höhere und stabilere Produktivität erreicht werden kann.

Um dieses Ziel zu erreichen, wird im Rahmen von „SustainVanil“ die Kultivierung von Vanille in geschützten Anbausystemen wie Gewächshäusern und Klimakammern in Deutschland untersucht (♦ Abbildung 3). Unter diesen kontrollierten Bedingungen, bei denen der Einfluss von Störfaktoren reduziert ist, werden sowohl die vegetative als auch die generative Entwicklung der Vanillepflanzen erforscht. Im Mittelpunkt steht die Entschlüsselung pflanzenphysiologischer Wachstums-

und Entwicklungsprozesse in Abhängigkeit von klimatischen Bedingungen und wesentlichen Wachstumsfaktoren wie dem Nährstoffangebot.

Die Untersuchungen erfolgen systematisch im Kontext der Entwicklung innovativer Kultursysteme und der Optimierung etablierter Systeme sowie Anbautechniken. Hierbei werden grundlegende Erkenntnisse zu den Anforderungen der Vanille gewonnen, die weitgehend unabhängig von spezifischen Anbauumgebungen (z. B. Gewächshausanbau) sind und als Bausteine für eine systemübergreifende Verbesserung unterschiedlicher Kultivierungsansätze dienen. Die Untersuchungen beinhalten u. a. die systematische Anpassung von Stickstoffangebot und Lichtintensität zur Steigerung einer gesunden vegetativen Entwicklung; zwei zentrale Wachstumsparameter in jedem Kultursystem. Darüber hinaus werden für die Vanille als Kulturpflanze innovative Ansätze wie der Einsatz von hydroponischen Systemen zur Wasser- und Nährstoffversorgung erprobt (♦ Abbildung 3), eine Kultivierungsmethode, die ebenfalls unabhängig von der Anbauumgebung eingesetzt werden kann.

Ein weiterer Schwerpunkt der Forschung sind die umfangreichen Analysen des Inhaltsstoffprofils (Metabolom) der Vanillepflanzen, die eng mit den Untersuchungen zur Entwicklung und zur Pflanzengesundheit verknüpft sind. Darüber hinaus werden im Rahmen des Projekts neue biologische Pflanzenschutzmaßnahmen zur Bekämpfung von Schaderregern identifiziert und erprobt. Dabei kommen verschiedene antagonistische Mikroorganismen zum Einsatz. Ein besonderer Fokus liegt auf der Nutzung autochthoner Mikroorganismen, die direkt aus dem Mikrobiom gesunder Vanillepflanzen in Madagaskar isoliert werden. Diese sollen gezielt zur biologischen Kontrolle phytopathogener Pilze eingesetzt werden. Bei allen Untersuchungen wird der Fokus besonders auf die prak-



Abb. 4: Feldbesuche mit Wissenstransfer in Madagaskar: Vanillekultivierung in der Sava-Region Madagaskar (A), Zugang zur Vanillekultivierung durch die Reisfelder der Vanillefarmer (B), Gespräche mit den Mitarbeitenden und Farmern auf dem Weg zum Standort der Vanillekultivierung (C)

tische Anwendbarkeit der Erkenntnisse für den etablierten Anbau in der Hauptanbauregion Madagaskar gelegt.

Ein zentraler Bestandteil des Projekts ist der Informationsaustausch mit Madagaskar und die Forschungsarbeiten vor Ort. Ziel dieser Kooperation ist es, die etablierten Anbaupraktiken zu sondieren, potenzielle Verbesserungen der lokalen Landwirtschaft zu identifizieren und Feldversuche in Zusammenarbeit mit einer Forschungseinrichtung in der Sava-Region auf Madagaskar (♦ Abbildung 4) durchzuführen. Damit soll erreicht werden, dass die gewonnenen Erkenntnisse einen praktischen Nutzen für die lokal Anbauenden erzeugen.

NewFoodSystems – FoxyVanil

Ergänzend zu „SustainVanil“ finden Forschungsarbeiten in dem zweiten Projekt „FoxyVanil“ statt, die sich mit der Herausforderung von „Schaderregern“ in der Vanillekultivierung beschäftigen. In diesem Projekt soll ein besseres Verständnis der Wechselwirkung zwischen dem phytopathogenen Pilz *Fusarium oxysporum* und der Vanillepflanze erreicht werden. Zu Beginn wird das Metabolom verschiedener *Fusarium oxysporum*-toleranter und -intoleranter Vanillepflanzen-Genotypen mittels moderner chemisch-analytischer Verfahren umfassend charakterisiert und verglichen. Zusätzlich wird der Einfluss einer *Fusarium oxysporum*-Infektion auf die primären und sekundären Stoffwechselwege der Vanillepflanze untersucht. Hierfür wurden vier Genotypen als *in vitro*-Pflanzen Nagayo²-konform beschafft und in Deutschland unter *in vitro*-Bedingungen bis zum Versuchsstart weiterkultiviert. Bei den Genotypen handelt es sich neben der aktuell wirtschaftlich dominierenden *Vanilla planifolia* u. a. auch um ausgewählte Hybridsorten. In einem Infektionsversuch erfolgt die Inokulation der Pflanzen mit *Fusarium oxysporum*. Nachfolgend werden zu definierten Zeitpunkten Proben verschiedener Pflanzenorgane (u. a. Blätter und Sprossachsen) gezogen. Um das Inhaltsstoffprofil zu untersuchen, werden diese Proben mittels analytischer Verfahren vermessen, danach die gewonnenen Metabolom-Daten statistisch untersucht und die Ergebnisse abschließend wissenschaftlich interpretiert. Hierdurch sollen Mechanismen identifiziert werden, die zu den pathogentolerierenden Eigenschaften einzelner Genotypen führen. Der Erkenntnisgewinn könnte dazu beitragen, einen stabilen und nachhaltigen Va-

nilleanbau zu etablieren und den Schaderreger einzudämmen. Auf Madagaskar sollen die Forschungsergebnisse aus „FoxyVanil“ als Grundlage für zukünftige praxisnahe Forschungsarbeiten genutzt werden.

Zusammenfassende Ziele der vorgestellten Forschungsvorhaben

Die Forschungsarbeiten beider Förderprojekte können einen Beitrag zur Stabilisierung der Einkommensquelle von Vanilleproduzenten leisten und indirekt dabei unterstützen, eine Stabilisierung der für die Lebensmittelindustrie wichtigen Versorgung mit Vanille auch in Deutschland zu erreichen. Eine erhöhte bzw. stabilere Verfügbarkeit von Gewürzvanille kann dazu beitragen, dass

- Preisspitzen auf dem Weltmarkt abgefedert werden,
- die Nahrungsmittelindustrie mehr Gewürzvanille verwenden kann und
- Konsumentinnen und Konsumenten dauerhaft mit Gewürzvanille versorgt werden.

Förderung

Beitrag im Rahmen der Publikationsreihe des Innovationsraums NewFoodSystems – Fördermaßnahme „Innovationsräume Bioökonomie“ im Rahmen der „Nationalen Forschungsstrategie BioÖkonomie 2030“ des Bundesministeriums für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR).



² Nagoya-Protokoll über den Zugang zu genetischen Ressourcen und die ausgewogene und gerechte Aufteilung der sich aus ihrer Nutzung ergebenden Vorteile zum Übereinkommen über die biologische Vielfalt

Danksagung

Diese Arbeit geht aus dem „Innovationsraum NewFood-Systems“ (Projekte SustainVanil und FoxyVanil) hervor und wurde vom Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR) im Rahmen der Fördermaßnahme „Innovationsräume Bioökonomie“ als Teil der Nationalen Forschungsstrategie „BioÖkonomie 2030“ gefördert. Fördernummern: 031B1238A, 031B1238E, 031B1238D (SustainVanil) und 031B1481 (FoxyVanil). Mehr Informationen unter → <https://newfoodsystems.de/>

Angaben zu Interessenkonflikten und zum Einsatz von KI
 Esther-Corinna Schwarze ist Mitarbeiterin der Symrise AG und im Bereich der Vanilleherstellung und -anwendung tätig. Jakob Peter Ley ist Mitarbeiter der Symrise AG, im Bereich der Vanilleherstellung und -anwendung tätig und Minderheitsaktionär.

Die anderen Autor*innen erklären, dass keine Interessenkonflikte bestehen. Bei der Erstellung des Manuskripts wurden keine KI-Anwendungen eingesetzt.

Literatur

1. Deutscher Verband der Aromenindustrie e. V. (DVAI): DVAI Positionspapier "Vanille". 2022.
2. Cameron K: *Vanilla orchids, natural history and cultivation*. Portland, London: Timber Press 2011.
3. Bruman H: *The culture history of Mexican vanilla*. *Hispanic American Historical Review* 1948; 28: 360–76.
4. Bramel P, Frey F: *Global strategy for the conservation and use of vanilla genetic resources*. Zenodo 2021.
5. The World Flora Online (WFO): *Explore the data*. Find out about. Check a plant name. www.worldfloraonline.org (last accessed on 25 April 2025).
6. Sasikumar B: *Vanilla breeding – a review*. *Agric Rev* 2010; 31: 139–44.
7. Odoux E, Grisoni M: *Vanilla*. CRC Press 2011.
8. Ferrara L: *Medicinal and pharmaceutical properties of Vanilla planifolia*. *Int J Med Rev* 2020; 7: 25–9.
9. Sinha AK, Sharma UK, Sharma N: *A comprehensive review on vanilla flavor: Extraction, isolation and quantification of vanillin and others constituents*. *Int J Food Sci Nutr* 2008; 59: 299–326.
10. Schwarz B, Hofmann T: *Identification of novel orosensory active molecules in cured vanilla beans (Vanilla planifolia)*. *J Agric Food Chem* 2009; 57: 3729–37.
11. Symrise AG: *Interne Quellen – Daten aus dem Symrise Anbau in Madagaskar* 2024. www.vanilla.symrise.com (last accessed on 25 April 2025).
12. Khan K, Su C-W, Khurshid A, Umar M: *Are there bubbles in the vanilla price?* *Agric Food Econ* 2022; 10: 6.
13. Osewold J, Korol Y, Osen K, et al.: *Support trees in vanilla agroforests of Madagascar: Diversity, composition and origin*. *Agrofor Syst* 2022; 96: 717–30.
14. Sustainable Vanilla Initiative (SVI): *A unique platform to create conditions for a sustainable vanilla sector*. <https://sustainablevanilla.org/about/> (last accessed on 25 April 2025).
15. Havkin-Frenkel D, Belanger FC: *Handbook of vanilla science and technology*. 2nd ed., Wiley 2018.
16. Karremans AP: *A Historical Review of the artificial pollination of Vanilla planifolia: The importance of collaborative research in a changing world*. *Plants* 2024; 13: 3203.
17. Quezada-Euán JJG, Guerrero-Herrera RO, González-Ramírez RM, MacFarlane DW: *Frequency and behavior of Melipona stingless bees and orchid bees (Hymenoptera: Apidae) in relation to floral characteristics of vanilla in the Yucatán region of Mexico*. *PLOS ONE* 2024; 19: e0306808.
18. Watteyn C, Scaccabarozzi D, Muys B, et al.: *Sweet as Vanilla hartii: Evidence for a nectar-rewarding pollination mechanism in Vanilla (Orchidaceae) flowers*. *Flora* 2023; 303: 152294.
19. Pansarin ER, Ferreira AWC: *Evolutionary disruption in the pollination system of Vanilla (Orchidaceae)*. *Plant Biology* 2022; 24: 157–67.
20. Castillo Martinez R, Engleman EM: *Caracterización de dos tipos de Vanilla planifolia*. *Acta Botanica Mexicana* 1993; 0: 49–59.
21. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO): *FAOSTAT-Abfrage*. www.fao.org/faostat/en/#search/Vanilla%2C%20raw (last accessed on 25 April 2025).
22. Hänke H, Barkmann J, Blum L, et al.: *Socio-economic, land use and value chain perspectives on vanilla farming in the SAVA Region (north-eastern Madagascar): The Diversity Turn Baseline Study (DTBS)*. Göttingen: Georg-August-University 2018.
23. Edel-Hermann V, Lecomte C: *Current status of Fusarium oxysporum formae speciales and races*. *Phytopathology*® 2019; 109: 512–30.
24. Koyyappurath S, Atuahiva T, Le Guen R, et al.: *Fusarium oxysporum f. sp. radicis-vanillae is the causal agent of root and stem rot of vanilla*. *Plant Pathology* 2016; 65: 612–25.

Modulare Produktion und Verwertung frischer Mikroalgen

Ein Bioraffinerie-Ansatz für *Spirulina*

Felix Krujatz, Richard Bleisch, Gunnar Mühlstädt, Gerd Hilpmann, Leander Seibel, Antonia Bätzold, Oliver Dörr, Nicole Thorpe, James Thorpe, Claudia Siemer, Marc Schmidt, Jens Wedel, Sara Neumann, Alexander Rudolph, Cornelia Rauh, Rayk Hassert, Juliane Steingröwer

Abstract

Mikroalgen gewinnen in Europa als nachhaltige Rohstoffquelle für die Lebensmittelindustrie zunehmend an Bedeutung. Für eine ökonomisch und ökologisch wertschöpfende Nutzung sind integrierte Konzepte zur Produktion und Verwertung der Biomasse erforderlich. Dieser Artikel stellt Verfahrensinnovationen zur Produktion und Verarbeitung von frischer *Spirulina*-Biomasse vor. Im Fokus der Forschungsarbeiten stehen eine ressourcenschonende Kultivierung mittels wassergekühlter LED-Beleuchtung, eine kontinuierliche Prozessführung sowie ein neuartiger Downstream-Ansatz für die Fraktionierung und Verwertung der Frischbiomasse, um energieintensive Trocknungsverfahren zu vermeiden und die ernährungsphysiologisch wichtigen Zellbestandteile zu erhalten. Insbesondere wurde der Einsatz gepulster elektrischer Felder (PEF) zur selektiven Extraktion von Proteinen und des Farbstoffs Phycocyanin als erster verfahrenstechnischer Fraktionierungsschritt untersucht. Die PEF-behandelte Restbiomasse fand Anwendung als funktioneller Bestandteil in Nassextraktionsversuchen einer erbsenproteinbasierten Rezeptur. Die Ergebnisse unterstreichen das Potenzial des Bioraffinerieansatzes für eine ganzheitliche Nutzung frischer Mikroalgenbiomasse in Lebensmittelanwendungen.

Zitierweise

Krujatz F, Bleisch R, Mühlstädt G, Hilpmann G, Seibel L, Bätzold A, Dörr O, Thorpe N, Thorpe J, Siemer C, Schmidt M, Wedel J, Neumann S, Rudolph A, Rauh C, Hassert R, Steingröwer J: Modular production and valorization of fresh microalgae. A biorefinery approach for *spirulina*. Ernährungs Umschau 2026; 73(5): online first.

Open access

The English version of this article is available online: DOI: 10.4455/eu.2025.060

Peer-Review-Verfahren

Manuskript (Original) eingereicht: 21.05.2025; Überarbeitung angenommen: 30.09.2025

Dr.-Ing. Felix Krujatz^{1,2}

Richard Bleisch³, Dr.-Ing. Juliane Steingröwer³

Gunnar Mühlstädt⁴, Dr.-Ing. Gerd Hilpmann⁴, Leander Seibel⁴, Antonia Bätzold⁴

Dr. Oliver Dörr⁵

Nicole Thorpe⁶, Dr. James Thorpe⁶

Dr.-Ing. Claudia Siemer⁷, Marc Schmidt⁷

Jens Wedel⁸, Sara Neumann⁸

Alexander Rudolph⁹, Prof. Dr. Cornelia Rauh⁹

Dr. Rayk Hassert¹⁰

¹ Technische Universität Chemnitz, Professur für Regelungstechnik & Systemdynamik, Chemnitz, Deutschland

² biotopa gGmbH – Zentrum für Angewandte Aquakultur & Bioökonomie, Radeberg, Deutschland

³ Technische Universität Dresden, Institut für Naturstofftechnik, Professur für Bioverfahrenstechnik, Dresden, Deutschland

⁴ PUEVIT GmbH, Dresden, Deutschland

⁵ DH Licht GmbH, Wülfrath, Deutschland

⁶ Exporio Micro Tech GmbH, München, Deutschland

⁷ ELEA Technology GmbH, Quakenbrück, Deutschland

⁸ endori food GmbH & Co. KG, Stegaurach, Deutschland

⁹ Technische Universität Berlin, Institut für Lebensmitteltechnologie und Lebensmittelchemie, Professur für Lebensmittelbiotechnologie und -prozess-technik, Berlin, Deutschland

¹⁰ Bruker Optics GmbH & Co. KG, Ettlingen, Deutschland

Einleitung

Algen – Einordnung und ihre Rolle im Ökosystem

Algen sind eine vielfältige Gruppe photosynthetisch aktiver Organismen, die in aquatischen und terrestrischen Ökosystemen vorkommen. Aufgrund ihrer unterschiedlichen Größe, Struktur, Lebensweise und Nutzung werden sie in Mikro- und Makroalgen unterteilt. Mikroalgen sind mikroskopisch kleine, meist einzellige Organismen, die entweder als Einzelzellen oder in Kolonien auftreten. Sie umfassen sowohl Cyanobakterien (Blaualgen) als auch eukaryotische Mikroalgen (♦ Abbildung 1).

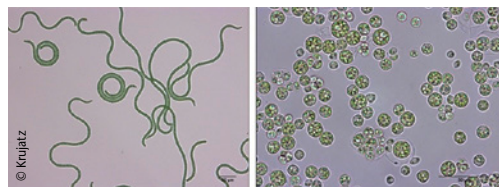


Abb. 1: Mikroskopische Aufnahmen von links: Cyanobakterium *Limnospira maxima* (*Spirulina*) und rechts: Grünalge *Chromochloris zofingensis*

Makroalgen sind vielzellige, makroskopische Algen, die eine Größe von wenigen Zentimetern bis zu mehreren Metern erreichen können und in Braunalgen (*Phaeophyceae*), Rotalgen (*Rhodophyceae*) bzw. Grünalgen (*Chlorophyceae*) unterschieden werden. Makroalgen sind v. a. in marinen Habitaten, vornehmlich an Küsten und Meeresböden beheimatet, wo sie mit wurzelähnlichen Strukturen (Rhizoiden) u. a. Felsen und andere Oberflächen besiedeln. Sowohl Mikro- als auch Makroalgen spielen eine entscheidende Rolle für das ökologische Gleichgewicht sowie den globalen Kohlenstoffkreislauf, insbesondere durch die Fixierung von atmosphärischem Kohlendioxid und die photosyntheseinduzierte Sauerstoffproduktion [1]. Als Primärproduzenten sind Algen die Basis mariner Nahrungsketten, bilden aber auch den Lebensraum für eine Vielzahl mariner (Mikro-)Organismen. Während Makroalgen insbesondere in der asiatischen Küche eine etablierte Zutat darstellen, ist die Nutzung von Mikroalgen als Lebensmittel bislang nur in begrenztem Umfang verbreitet [2].

Mikroalgen – Potenzial für gesunde Lebensmittel

Die Verwendung von Mikroalgen als nährstoffreiche Nahrungsquelle ist keine Errungenschaft der modernen Zeit, sondern lässt

sich bereits in frühen Kulturen, u. a. im Reich der Azteken, nachweisen. Auch in der Gegenwart werden die gesundheitsfördernden Eigenschaften bestimmter Mikroalgenarten, insbesondere von *Spirulina* und *Chlorella*, in verschiedenen Regionen der Welt (z. B. Afrika, Japan) genutzt. Das vorliegende Kapitel bietet eine kompakte Übersicht über die wichtigsten ernährungsphysiologisch relevanten und bioaktiven Komponenten von Mikroalgen und deren potenzielle Anwendung als funktionelle Lebensmittelszutaten. Für eine detailliertere Analyse einzelner Inhaltsstoffe wird an dieser Stelle auf aktuelle Übersichtsartikel verwiesen [3, 4].

Der Proteingehalt von Mikroalgen variiert je nach Art sowie den Umweltbedingungen während der Kultivierung. Beispielsweise enthält das Cyanobakterium *Limnospira maxima* (auch *Spirulina*) bis zu 70 g Protein pro 100 g Trockenmasse, während einzellige eukaryotische Mikroalgen wie *Chlorella* typischerweise einen Proteingehalt von 40–60 g pro 100 g Trockenmasse aufweisen [5]. Mikroalgenproteine besitzen eine hohe biologische Wertigkeit, vergleichbar mit Soja- oder Eiweiß. Sie sind reich an unentbehrlichen Aminosäuren wie Leucin und Lysin, die bis zu 7 % des Proteins ausmachen [5]. Neben ihrer strukturellen Funktion in Zellwand und Membranen enthalten Mikroalgenproteine auch bioaktive Peptide, die für die Entwicklung von „Functional Foods“ von Bedeutung sein können. Diese Peptide weisen antioxidative, antimikrobielle, blutdruck- und cholesterinsenkende sowie tumorhemmende Wirkungen auf [6].

Darüber hinaus sind Mikroalgen eine Quelle für Lipide, insbesondere langkettige, mehrfach ungesättigte Fettsäuren (*polyunsaturated fatty acids*, PUFAs) wie Docosahexaensäure (DHA) und Eicosapentaensäure (EPA). Diese Fettsäuren sind für ihre gesundheitsfördernden Effekte bekannt [7], v. a. entzündungshemmende Eigenschaften sowie präventive Wirkungen bei Herz-Kreislauf-Erkrankungen und Diabetes mellitus. Sie werden deshalb bereits intensiv in Nahrungsergänzungsmitteln und Medikamenten verarbeitet [8].

Ein bedeutendes Alleinstellungsmerkmal von Mikroalgen sind ihre bioaktiven Pigmente, die vielfältige Anwendungsmöglichkeiten in der Pharmazie, Kosmetik und Entwicklung neuer Lebensmittel bieten. Hierzu zählen antioxidativ wirkende Carotinoide wie Lutein, β -Carotin, Astaxanthin, Canthaxanthin und Zeaxanthin. Auch Chlorophylle und Phycobiliproteine, die als Chromoproteine in Cyanobakterien vorkommen, zeigen antioxidative, entzündungshemmende, antitumorale und kardioprotektive Effekte [9–12].

Neben Proteinen, Lipiden und Pigmenten enthalten Mikro- und Makroalgen zudem natürliche Polysaccharide (Hydrokolloide), die ein breites Spektrum bioaktiver Eigenschaften aufweisen. Beispielsweise zeigen Alginat und Fucan antioxidative, antikoagulative, antimikrobielle und antivirale Wirkungen und können evtl. zur Vorbeugung chronischer Erkrankungen beitragen [13]. Aktuelle Studien belegen zudem immunmodulatorische [14], antikarzinogene [15], präbiotische [16] sowie blutfett- und blutglucosesenkende Effekte dieser Polysaccharide [17].

Produktion von Mikroalgen

In der industriellen Mikroalgenproduktion erfolgt die Differenzierung primär anhand der genutzten Kohlenstoff- und Energiequelle [18]. Photoautotrophe Prozesse basieren auf natürlichen Photosynthesevorgängen, wobei Kohlendioxid (CO_2) als Kohlen-

stoff- und Licht als Energiequelle genutzt werden. Eine alternative Strategie stellt die chemoheterotrophe Kultivierung (Fermentation) dar, bei der organische Verbindungen, insbesondere Zucker, sowohl als Kohlenstoff- als auch als Energiequelle dienen.

Die Produktion bioaktiver Verbindungen aus Mikroalgen, insbesondere von Pigmenten, ist jedoch an lichtabhängige Stoffwechselprozesse gekoppelt. In solchen Fällen kommen sogenannte Photobioreaktoren (PBR) zum Einsatz, die eine gezielte Versorgung der Zellen mit photosynthetisch aktiver Strahlung (*photosynthetically active radiation*, PAR) realisieren, die entweder durch natürliches Sonnenlicht oder durch künstliche Lichtquellen, beispielsweise LEDs, erfolgt. Neben der photosynthetischen Strahlung als Energiequelle werden Mikroalgen in PBR kontrolliert mit Wasser, Nährstoffen und CO₂ versorgt, um eine optimale Biomasseproduktivität und -qualität zu gewährleisten. Die technische Gestaltung von PBR variiert hinsichtlich ihrer Geometrie, Skalierung und Standortbedingungen (*indoor vs. outdoor*) [19, 20]. Im industriellen Maßstab haben sich insbesondere Rohr- und Plattenreaktoren, die eine optimale Bereitstellung von Lichtenergie sowie eine präzise Kontrolle der Kultivierungsparameter wie Temperatur, pH-Wert und CO₂-Gehalt ermöglichen, bewährt (♦ Abbildung 2).

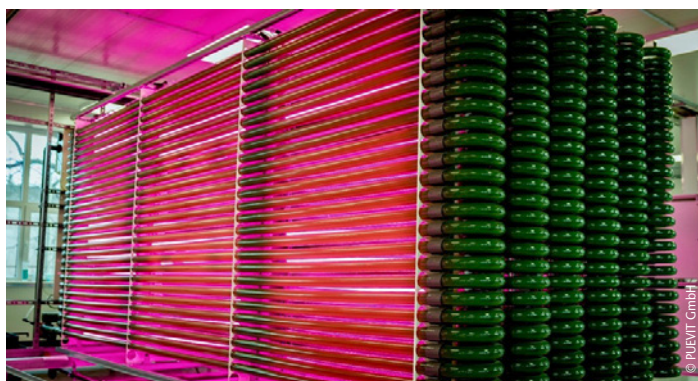


Abb. 2: PACT 6k – Containermodul des Unternehmens PUEVIT
Pioneering Green Solutions GmbH als geschlossener Rohr-
photobioreaktor für die kontrollierte Herstellung von frischen
Rohkost-Mikroalgen

Regulatorische und technische Herausforderungen zur Nutzung von Mikroalgen

Die Zulassung von Mikroalgen als Lebensmittel in der Europäischen Union (EU) unterliegt strengen regulatorischen Vorgaben, insbesondere im Rahmen der Novel-Food-Verordnung (Verordnung [EU] 2015/2283). Gemäß dieser Verordnung gelten als „neuartige Lebensmittel“ (*Novel Foods*) Produkte, „...die vor dem 15. Mai 1997 in der EU nicht in nennenswertem Umfang für den menschlichen Verzehr verwendet wurden...“. Dazu zählen u. a. Lebensmittelzutaten, „...die aus Mikroorganismen, Pilzen oder Algen bestehen oder aus diesen isoliert wurden...“ [21].

Da die Mikroalgenproduktion und ihr Verzehr, historisch betrachtet, vorrangig außerhalb Europas stattfanden, stellt die Novel-Food-Verordnung eine erhebliche Hürde für die Markteinführung neuer mikroalgenbasierter Produkte dar. Einen Überblick über zugelassene Algenarten und deren Nutzung als Lebensmittel oder Nahrungsergänzungsmittel bietet die Algenliste des Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit (BVL).

In Deutschland werden im Wesentlichen *Chlorella* und *Spirulina* als Nahrungsergänzungsmittel genutzt – häufig in Pulver- oder Tablettenform. Neben diesen beiden typischen Mikroalgen sind u. a. auch AFA-Algen (*Aphanizomenon flos-aquae*) oder *Haematococcus* teilweise in traditionellen Verwendungsformen zugelassen und damit auf dem deutschen Markt verfügbar. Die Anwendung erfolgt als tägliche Ergänzung zur normalen Ernährung, oft in Smoothies, Säften oder eingerührt in Wasser.

Die derzeit in Deutschland vermarkteten Mikroalgen-Biomassen stammen dabei überwiegend aus dem asiatischen Raum und weisen teils erhebliche Qualitätsschwankungen auf, u. a. in Bezug auf Verunreinigungen durch Fremdalgen [22]. Die importierten Mikroalgen werden für den Transport und die Lagerung getrocknet, wodurch ihre ernährungsphysiologischen und technofunktionellen Eigenschaften signifikant beeinträchtigt werden.

Eine gezielte Förderung regionaler Produktionskapazitäten kann dazu beitragen, diese Herausforderungen zu bewältigen und eine stabile, qualitätsgesicherte Versorgung mit Mikroalgenbiomasse hoher Qualität in Europa sicherzustellen. Unter den klimatischen Bedingungen Deutschlands ist die industrielle Produktion von Mikroalgen v. a. unter kontrollierten Prozessbedingungen in geschlossenen PBR realisierbar, da sowohl die Umgebungstemperaturen als auch die Verfügbarkeit von natürlicher PAR-Strahlung im Outdoor-Bereich stark limitiert sind. Eine kontrollierte Kultivierungsumgebung ermöglicht zudem eine konstante Produktqualität, die unter den dynamischen Umweltbedingungen in offenen PBR nur bedingt gewährleistet werden kann. Darüber hinaus zielt die modulare und dezentrale Produktion frischer Mikroalgen auf eine kontinuierliche Biomasseproduktion (24/7), reduziert Transportwege und spart Energieressourcen, da auf eine energieintensive Trocknung der Biomasse verzichtet werden kann. Dies hat erhebliche Auswirkungen auf den ökologischen Fußabdruck des Gesamtprozesses. Die landunabhängige Kultivierung von Mikroalgen in PBR eröffnet zusätzliche Möglichkeiten für die dezentrale Lebensmittelproduktion, z. B. auf bestehenden Industrie- und Gewerbeflächen sowie für urbane Produktionsmodelle (*Urban Farming*). Die Entwicklung autarker und modularer Produktionseinheiten sowie die Standardisierung und Automatisierung von Produktionsprozessen ist ein wichtiger Schritt für die Bereitstellung regionaler, frischer und gesunder Mikroalgen.

Die vorliegende Studie zeigt daher technologische Neuheiten zur ressourceneffizienten Produktion von Frischalgen sowie ein Bioraffineriekonzept zur Fraktionierung und Verwertung von frischer *Spirulina*-Biomasse.

Material und Methoden

Modulare Produktion frischer *Spirulina*-Biomasse

Die technologischen Rahmenbedingungen zur Produktion von Mikroalgenbiomasse wurden im Kapitel „Produktion von Mikroalgen“ erläutert. ♦ Abbildung 3 zeigt das untersuchte Bioraffineriekonzept auf Basis regional produzierter, frischer *Spirulina*-Biomasse. Die einzelnen Grundoperationen des Prozesses werden in den folgenden Kapiteln beschrieben.

Photobioreaktor, Prozessführung und Messtechnik

Die Kultivierung von *Spirulina* (*Limnospira maxima*, Culture Collection of Autotrophic Organisms CCA, Trebon, Tschechische Republik) wurde in tubulären PBR (PUEVIT GmbH, Deutschland) mit 25 L und 200 L Arbeitsvolumen unter kontinuierlichen Photonenflussdichten von $100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ für die 25-L-Vorkultur und $200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ für die 200-L-Hauptkultur bei $22 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$ durchgeführt. Die Begasung der Kulturen erfolgte durch kontinuierliche Zufuhr von Umgebungsluft (12 L min^{-1}) nach dem Airlift-Prinzip. Im Rahmen dieser Studie wurde die Produktivität von frischer *Spirulina*-Biomasse im Satz- und im kontinuierlichen Betrieb untersucht. Bei der Satzkultivierung erfolgt keine Zu- oder Abfuhr von frischem Medium; die Kulturen werden unter den eingestellten Bedingungen für die Prozesszeit im PBR belassen. Bei der kontinuierlichen Prozessführung wird eine kontinuierliche Zufuhr von frischem Kulturmedium sowie eine kontinuierliche Abfuhr von Prozesskultur realisiert. Dadurch stellt sich ein Gleichgewicht aus Zellwachstum und Auswaschvorgang ein, charakterisiert durch die Durchflussrate $D \text{ [d}^{-1}\text{]}$ als Verhältnis aus Zulaufstrom $[L \text{ d}^{-1}]$ und Volumen des PBR $[L]$. Zur Bereitstellung der photosynthetisch aktiven Strahlung wurden 8 spektral variable, wassergekühlte LED-Leuchten (DH Licht GmbH, Deutschland) eingesetzt (♦ Abbildung 4). Durch die Integration eines zusätzlichen Wasserkreislaufs in Verbindung mit einem Wärmetauscher sowie Temperatur-

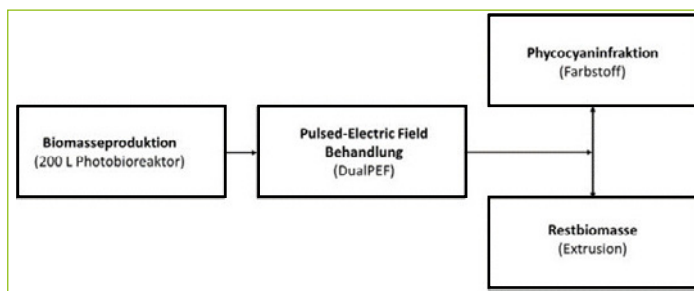


Abb. 3: Blockfließbild für die angestrebte Fraktionierung frischer *Spirulina*-Biomasse (eigene Darstellung)

messungen im PBR- und Kühlkreislauf (♦ Abbildung 5) wurde während des Anlagenbetriebs untersucht, inwieweit die von den LED-Leuchten erzeugte Wärme im Prozess zurückgewonnen werden kann. Die Installation der dafür notwendigen Mess- und Sensortechnik erfolgte durch die Firma Expor Micro Tech GmbH (Cultinova, München, Deutschland).



Abb. 4: Aufbau und Betrieb des 200-L-Forschungsmoduls (PACT200, PUEVIT GmbH, Dresden) des Innovationsraums NewFoodSystems Integration wassergekühlter LED-Leuchten sowie Datenaufnahme aus dem Prozess

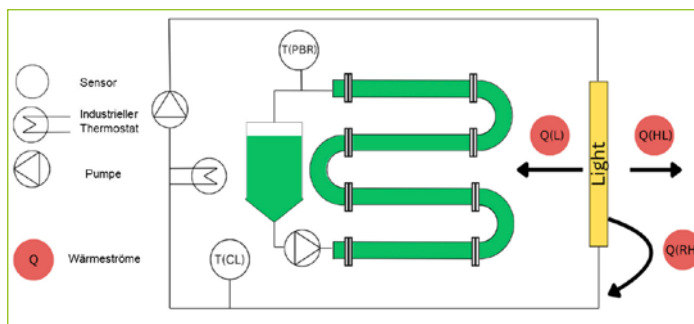


Abb. 5: Mess-Set-up für Aufnahme der Wärmeenergieströme (eigene Darstellung)

CL: Cooling Loop; PBR: Photobioreaktor; $Q(HL)$: heat loss, Wärmestrom, der an die Umgebung abgegeben wird; $Q(L)$: liquid, Wärmestrom, der vom Photobioreaktor aufgenommen wird; $Q(RH)$: recovery heat, Wärmestrom, der durch den Cooling Loop aufgenommen wird; T: Temperatur

Behandlung frischer *Spirulina*-Biomasse durch gepulste elektrische Felder

Im Sinne einer Bioraffinerie muss die frische *Spirulina*-Biomasse in verschiedene Produktfraktionen getrennt werden. Um an die wertvollen intrazellulären Metabolite, bspw. Phycocyanin, zu gelangen, ist normalerweise ein Zellaufschluss notwendig. Klassische Methoden basieren auf mechanischen und/oder chemischen

Prinzipien, welche sich negativ auf die Qualität der zu extrahierenden Stoffe auswirken können. Zudem erschwert ein kompletter Zellaufschluss eine selektive Extraktion einzelner Zellkomponenten. Die Technologie der gepulsten elektrischen Felder bietet die Möglichkeit, frische Algenbiomasse produktschonend zu fraktionieren. Das Wirkprinzip der *Pulsed Electric Field* (PEF)-Technologie beruht auf der Anwendung kurzer elektrischer Impulse hoher Spannung auf biologische Zellen. Dadurch wird eine Elektroporation der Zellmembran induziert. Die Ausbildung von transienten oder permanenten Poren in der Lipid-Doppelschicht der Zellmembran wird dabei beeinflusst von der Feldstärke, der Pulsdauer und dem Energieeintrag. Bei einer ausreichend hohen Feldstärke – typischerweise im Bereich von $10\text{--}50\text{ kV cm}^{-1}$ – übersteigt das durch das elektrische Feld erzeugte transmembrane Potenzial einen kritischen Schwellenwert von etwa $0,5\text{ V}$. Infolge der strukturellen Veränderungen der Zellmembran können intrazelluläre Bestandteile wie Proteine oder Pigmente in das umgebende Medium diffundieren und entsprechend selektiv extrahiert werden. Die PEF-Behandlung ermöglicht dabei eine schonende Extraktion, da die Temperaturerhöhung minimal ist und thermisch labile Zellbestandteile geschont werden. Zudem werden bei der Extraktion keine zusätzlichen Rohstoffe wie Chemikalien oder Enzyme benötigt.

♦ Abbildung 6 zeigt den für die Experimente verwendeten PEF-Versuchsaufbau im Pilotmaßstab (PEFPilot™ Dual, ELEA Technology GmbH, Quakenbrück, Deutschland). Die Optimierung der PEF-Behandlung frischer *Spirulina*-Biomasse erfolgte unter Berücksichtigung der folgenden Prozessparameter: Biotrockenmassekonzentration (1, 5 und 10 %), elektrische Feldstärke (15 und 20 kV cm^{-1}), spezifischer Energieeintrag (100 kJ L^{-1}) sowie Leitfähigkeit der Suspension (ca. $2\text{--}7\text{ mS cm}^{-1}$). Zusätzlich wurden die Ein- und Ausgangstemperatur der behandelten Zellsuspension erfasst. Nach Abschluss der Inkubationszeit wurde die PEF-behandelte *Spirulina*-Biomasse mittels Zentrifugation separiert und sowohl die Biotrockenmasse (BTM) als auch die Gehalte an Proteinen und

Pigmenten analysiert. Zur weiterführenden Charakterisierung wurde zudem der lösliche Anteil der Komponenten im Extrakt (= Löslichkeitsextrakt) wie folgt berechnet:

$$TM_{\text{Probe}} = \frac{m_{\text{Probe}} \cdot \%TM}{100}$$

TM_{Probe} : Trockenmasse der Probe [g]

m_{Probe} : Gesamtgewicht der Probe [g]

$\%TM$: Anteil der Trockenmasse in der Probe [%]

$$Y_{TM} = \frac{TM_{\text{Überstand}}}{TM_{\text{unbehandelt}}} \cdot 100$$

Y_{TM} : Löslichkeitsextrakt [%]

$TM_{\text{Überstand}}$: Trockenmasse im Überstand [g]

$TM_{\text{unbehandelt}}$: Trockenmasse der unbehandelten Probe [g]

Nassextrusion von Restbiomasse

Neben der löslichen Proteinfraktion fällt bei der PEF-Behandlung eine proteinreduzierte Restbiomasse an, die im Folgenden auf ihre Verwertbarkeit in der Nassextrusion untersucht wurde. Für die Durchführung der Nassextrusion wurde eine Basisrezeptur entwickelt, bestehend aus 40 % Erbsenproteinisolat, 59 % Pulpe – als Mischung aus Wasser und frischer bzw. PEF-behandelter *Spirulina*-Biomasse – und 1 % Öl. Die *Spirulina*-Biomasse wurde aufgrund ihrer flüssigen Konsistenz in Konzentrationen von 17,8 % bzw. 8,9 % direkt der Pulpe zugegeben. Daraus ergaben sich Endkonzentrationen der Algenbiomasse im extrudierten Strang von ca. 5 % bzw. 10 %. Um den Einfluss der Algenbiomasse auf die mechanischen Eigenschaften des Extrudats zu untersuchen, wurden für beide Biomassekonzentrationen drei verschiedene Pulver-zu-Pulpe-Verhältnisse getestet. Die experimentellen Untersuchungen wurden auf einer Pilotanlage zur Nassextrusion durchgeführt (♦ Abbildung 7). Zum Einsatz kam ein Doppelschneckenextruder mit Kühldüse (endori food GmbH & Co. KG, Stegaurach, Deutschland). Da in allen Versuchen eine ausreichend hohe Strangqualität erreicht wurde, war eine Modifikation der Prozessparameter im Vergleich zu standardisierten Proteinrezepturen nicht notwendig und konnte unter konstanten Prozessbedingungen durchgeführt werden, um den spezifischen Einfluss der Algenbiomasse auf die Strangqualität zu analysieren. Aufgrund der Zusammensetzung der verwendeten Basisrezeptur mit einem Anteil von 40 %



Abb. 6: Versuchsaufbau mit der PEF-Anlage PEFPilot™ Dual

Komponenten: 1: Vorratsbehälter, 2: Exzentrerschneckenpumpe, 3: Wärmetauscher, 4: Eingang von Druckluft und Eingang und Ausgang des Kühlwassers, 5: Produktein- und -ausgang, 6: parallele Behandlungszelle, 7: Druckluftfilter-Regelventil, 8: Bediendisplay

Erbsenproteinisolat wurde die Extrudertemperatur auf 110 °C festgelegt, da diese Prozesstemperatur optimal für die Verarbeitung von Erbsenprotein ist. Die Extrusion erfolgte mit einem Durchsatz von 40 kg h⁻¹ bei einer Schneckendrehzahl von 600 U min⁻¹.



Abb. 7: Versuchsaufbau zur Nassextrusion einer Basisrezeptur aus Erbsenproteinisolat und PEF-behandelter *Spirulina*-Biomasse im technischen Maßstab (A), Extrudat aus Basisrezeptur unter Nutzung frischer *Spirulina*-Biomasse (B)

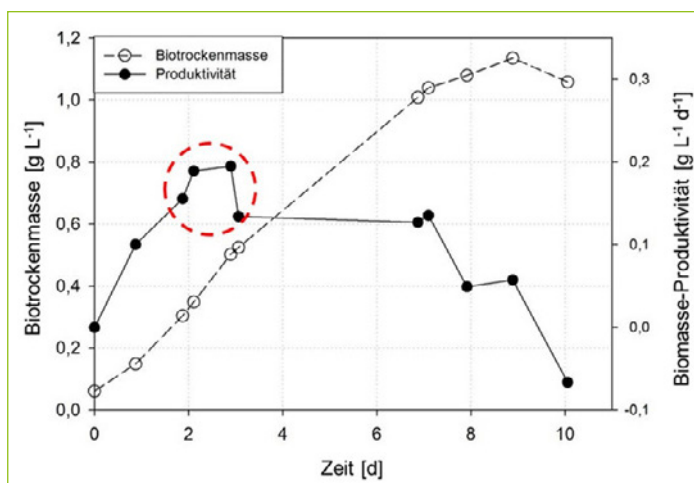


Abb. 8: Referenzkultivierung von *Spirulina* in einem 200-L-Forschungs-PBR-Modul
Dargestellt sind die zeitliche Entwicklung der Biotrockenmasse (leere Kreise) sowie die Produktivität (schwarze Kreise). Hervorgehoben ist ein optimaler Betriebspunkt für eine kontinuierliche Kultivierung von *Spirulina* (roter Kreis).

Ergebnisse und Diskussion

Biomasseproduktivität in Satz- und kontinuierlicher Kultur im Forschungs-PBR-Modul

♦ Abbildung 8 zeigt eine Referenzkultivierung von *Spirulina* im 200-L-Forschungs-PBR-Modul über einen Zeitraum von 10 Tagen. Anhand der Verläufe von Biotrockenmasse (leere Kreise) und Produktivität (gefüllte Kreise) wird deutlich, dass die maximale Produktivität von ca. 0,2 g L⁻¹ d⁻¹ im Gesamtprozess nur für ein kurzes Zeitfenster erreicht wird. In den ersten beiden Produktionstagen findet eine Adaption der Kultur an das technische System und die Prozessbedingungen statt, die mit einem sukzessiven Anstieg der Biomasseproduktivität einhergeht. Am 2. und 3. Kultivierungstag zeigt die Kultur ihre maximale Produktivität (roter Kreis in ♦ Abbildung 8); in diesem Zeitfenster sind alle Prozessbedingungen, insbesondere das Verhältnis von Zelldichte zu verfügbarer Lichtenergie, optimal für das Biomassewachstum. Ab dem 3. Tag der Kultivierung wird das Wachstum von *Spirulina* durch eine zu hohe Zelldichte und die damit verbundene eingeschränkte Bereitstellung von PAR-Energie gehemmt, was für den Rest der Prozessdauer zu einer kontinuierlich abnehmenden Biomasseproduktivität führt. Im Mittel wird somit eine Biomasseproduktivität von ca. 0,12 (bei 10 Tagen Prozessdauer) bis 0,14 g L⁻¹ d⁻¹ (bei 7 Tagen Prozessdauer) erreicht.

Der kontinuierliche Betrieb fixiert den Betriebspunkt für die Bedingungen der höchsten Biomasseproduktivität durch kontinuierliche Zufuhr von frischem Nährmedium. Gleichzeitig werden dem PBR-Modul äquivalente Mengen an Mikroalgensuspension entnommen, sodass sich ein Gleichgewicht zwischen Entnahme und Wachstum der Mikroalgen im System einstellt. Dadurch bleibt die Biomassekonzentration und deren biochemische Zusammensetzung im PBR-Modul über die Zeit konstant. Im Zuge der Optimierung wurde eine optimale Verdünnungsrate D von 0,2 d⁻¹ für das *Spirulina*-Wachstum unter kontrollierten Prozessbedingungen ermittelt, wodurch die Biomasseproduktivität auf 0,26 g L⁻¹ d⁻¹ gesteigert und über den gesamten Prozessverlauf konstant gehalten werden konnte. Dies entspricht in etwa einer Verdopplung der Biomasseproduktivität im Vergleich zum Satzbetrieb.

In der wissenschaftlichen Literatur sind nur wenige Daten zur kontinuierlichen Kultivierung von *Spirulina* in Photobioreaktoren zu finden. Aufgrund der Unterschiede in der Geometrie und Skalierung der PBR, der verwendeten Lichtquellen und Nährmedien sowie stammspezifischer Unterschiede ist ein Vergleich zwischen unterschiedlichen experimentellen Set-ups nur schwer durchführbar. In ihrer Studie aus dem Jahr 2007 erzielten Sassano et al. [23] eine Biomasseproduktivität von 0,0924 g L⁻¹ d⁻¹. Die Autor*innen nutzten einen zylindrischen Glastank mit einem Volumen von 9 L als PBR und variierten die Durchflussrate zwischen 0,08 und 0,32 d⁻¹. In einer aktuellen Studie der Universität Padua konnte in kleinen, plattenförmigen PBR-Systemen ($V = 0,35$ L) eine Biomasseproduktivität von 0,359 g L⁻¹ d⁻¹ bei hohen Durchflussraten von ca. 0,83 d⁻¹ erreicht werden [24].

Ein weiterer Fokus des 200-L-Forschungs-PBR-Moduls aus dieser Studie lag auf dem Einsatz wassergekühlter LED-Lichtquellen und der Rückgewinnung der LED-Abwärme. Die installierten Leuchten wiesen eine Gesamtleistung (bei voller Auslastung) von 7200 Watt sowie einen Wirkungsgrad von ca. 0,5 auf; d. h. ca. 50 % der Energie werden in Lichtenergie und 50 % in Form von Wärme abgegeben. Der Kühlkreislauf der LED-Leuchten umfasst ein Gesamtvolumen von 42 L. Anhand der aufgenommenen Temperaturdaten konnte gezeigt



werden, dass im Anfahrbetrieb der Leuchten, d. h. innerhalb der 1. Betriebsstunde, ca. 1300 Watt durch den zusätzlichen Kühlkreislauf aufgenommen werden können, was einer Temperaturerhöhung im Kühlkreislauf von 20 °C auf 40 °C entspricht. Im Dauerbetrieb der Leuchten konnten schließlich ca. 80 % der abgegebenen Wärme durch den zusätzlichen Kühlkreislauf rückgewonnen werden und stehen für die Nutzung von prozessinternen Heizaufgaben, u. a. Extraktion oder Wärmekopplung in die Kultur, zur Verfügung; ca. 0,7 kW gehen dem System als Abwärme verloren.

Schonende Fraktionierung von frischer *Spirulina*-Biomasse

Die Prozessierung der frischen *Spirulina*-Biomasse mittels gepulster elektrischer Felder erfolgte gemäß den Angaben aus ♦ Tabelle 1. Nach der PEF-Behandlung wurde eine Inkubation der behandelten Suspension in einem Schüttelinkubator für eine Dauer von bis zu 72 h durchgeführt, um die Diffusion der zellulären Bestandteile in das umgebende Medium zu ermöglichen.

Es zeigte sich ein Anstieg des Löslichkeitsextrakts in den PEF-behandelten Proben mit zunehmender Inkubationsdauer (♦ Abbil-

dung 9). Dies ist auf eine zeitabhängige Diffusion sowie eine irreversible Permeabilisierung der Zellmembran infolge der PEF-Behandlung zurückzuführen. Beispielsweise führte eine PEF-Behandlung mit einer Feldstärke von 15 kV cm⁻¹ und einem spezifischen Energieeintrag von 100 kJ L⁻¹ bei einer 1 %igen BTM zu einer Erhöhung des Löslichkeitsextrakts von anfänglich 14,14 % auf einen Maximalwert von 19,99 % nach 48 Stunden. Ein vergleichbarer Trend zeigte sich bei einer BTM von 5 % und 10 %, wobei die maximalen Werte von 23,16 % bzw. 17,56 % erst nach 72 Stunden erreicht wurden. Eine Erhöhung der Feldstärke auf 20 kV cm⁻¹ resultierte in einem höheren Löslichkeitsextrakt, insbesondere bei einer BTM von 1 %, die nach 48 Stunden einen Spitzenwert von 27,34 % erreichte. Im Vergleich zu den Kontrollproben, die lediglich nicht-signifikante Zunahmen des Löslichkeitsextrakts im Inkubationszeitraum aufwiesen, zeigten die PEF-behandelten Proben signifikant erhöhte Werte. Dies unterstreicht die Wirksamkeit der PEF-Behandlung zur Permeabilisierung der *Spirulina*-Zellmembran und die Freisetzung zellulärer Inhaltsstoffe. Insgesamt konnte eine sinkende Effizienz der Proteinfreisetzung bei steigender BTM-Konzentration identifiziert werden. Die resultierenden Proteinkonzentrationen im Überstand sind in ♦ Abbildung 10A dargestellt. Die höchste selektiv extrahierte Proteinkonzentration von 126,2 mg g_{BTM}⁻¹ wurde mit einer 1 %igen BTM, einer Feldstärke von 20 kV cm⁻¹, einem Energieeintrag von 100 kJ L⁻¹ sowie einer Inkubationszeit von 72 Stunden erzielt. 18,2 mg g_{BTM}⁻¹ an löslichem Protein gehen dabei auf das wasserlösliche Phycocyanin als natürlicher blauer Farbstoff zurück (♦ Abbildung 10B).

Biotrockenmasse [%]	Einstellung	Replikate	Eingangstemperatur [°C]	Ausgangstemperatur [°C]	Leitfähigkeit [mS cm ⁻¹]
1	Kontrolle	4	19,33 ± 3,50	19,33 ± 3,50	2,07 ± 0,62
	15 kV cm ⁻¹ 100 kJ L ⁻¹	4		42,53 ± 3,37	
	20 kV cm ⁻¹ 100 kJ L ⁻¹	3		43,13 ± 3,68	
5	Kontrolle	2	19,65 ± 3,95	19,65 ± 3,95	5,80 ± 0,80
	15 kV cm ⁻¹ 100 kJ L ⁻¹	2		37,90 ± 3,40	
10	Kontrolle	2	15,10 ± 0,60	15,10 ± 0,60	7,10 ± 0,20
	15 kV cm ⁻¹ 100 kJ L ⁻¹	2		35,35 ± 0,55	

Tab. 1: Angaben der Prozessparameter für die Prozessierung frischer *Spirulina*-Biomasse mittels gepulster elektrischer Felder
Werte als Mittelwerte ± Standardabweichung, n = 3

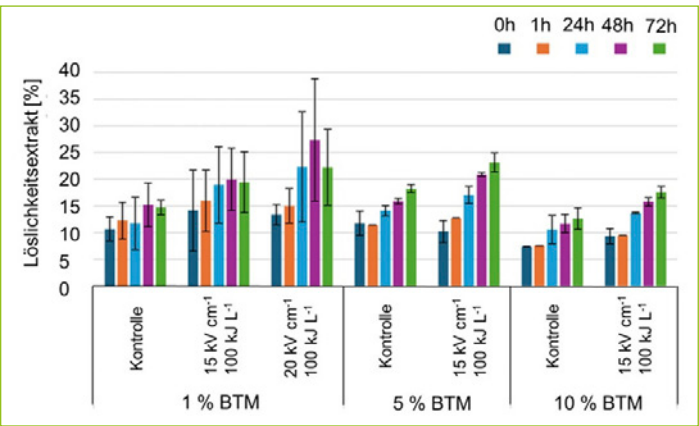


Abb. 9: Löslichkeitsextrakt [%] der Kontrolle und der PEF-behandelten Proben frischer *Spirulina*-Biomasse
elektrische Feldstärke = 15 bzw. 20 kV cm⁻¹ und spezifischer Energieeintrag = 100 kJ L⁻¹ nach unterschiedlichen Inkubationszeiten (0 h, 1 h, 24 h, 48 h, 72 h) und variierenden Biotrockenmassekonzentrationen von 1 %, 5 % und 10 % (Werte als Mittelwerte ± Standardabweichung, n = 3)
BTM: Biotrockenmasse; PEF: Pulsed Electric Field

Mehr als nur ein Produkt – Verwertung von PEF-behandelter Biomasse als Zusatz für Nassextrudate

Im Zuge der Studie wurde untersucht, ob nach dem initialen Schritt der Proteingewinnung aus der frischen *Spirulina*-Biomasse die proteinreduzierte (PEF-behandelte) Restbiomasse als Rohstoff für Nassextrudate genutzt werden kann. Dafür wurden Basismischungen mit unbehandelter sowie PEF-behandelter Biomasse hergestellt und hinsichtlich ihrer Farb- und Struktureigenschaften bewertet. Die extrudierten Stränge waren durchgehend stabil und von hoher Qualität. Bei allen Versuchen blieb die Oberfläche glatt und frei von Schuppenbildung, während die Faserstruktur gleichmäßig ausgeprägt war (♦ Ab-

bildung 11A). Die Stränge wiesen eine hohe Festigkeit auf, die sich in einer partiellen Rissbildung an den Strangseiten zeigte. Generell führte die Zugabe von *Spirulina*-Biomasse zur Basisrezeptur zu einer Erhöhung der Strangfestigkeit, was auf den erhöhten Trockenmasseanteil zurückzuführen ist.

Zur weiteren Charakterisierung der Extrudate wurden Farbmessungen und sensorische Untersuchungen durchgeführt. Die Farbmessungen wurden mit dem Sikkens 5051 Color Concept durchgeführt; die entsprechenden Bilder der Extrudate sind in ♦ Abbildung 11B–D dargestellt. Die Bewertung der Textur erfolgte auf einer Skala von 1 bis 3 nach dem Schema zur Bestimmung der Strangfestigkeit. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in ♦ Tabelle 2 zusammengefasst. Die Farbe der Extrudate wurde durch den Zusatz von *Spirulina*-Biomasse signifikant beeinflusst. Es konnte eine deutliche Grünfärbung beobachtet werden, die bei Verwendung von unbehandelter *Spirulina*-Biomasse stärker ausgeprägt war im Vergleich zur PEF-behandelten *Spirulina*-Biomasse. Bei höheren Konzentrationen (10 %) tendierte die Färbung in Richtung dunkelgrün bis schwarz (♦ Abbildung 11D). Im Gegensatz dazu zeigten Extrudate mit geringen Konzentrationen an PEF-behandelter *Spirulina*-Biomasse eine hellgrüne Färbung. Neben der Farbveränderung hatte die unbehandelte *Spirulina*-Biomasse auch einen stärkeren Einfluss auf Geschmack und Textur der Extrudate im

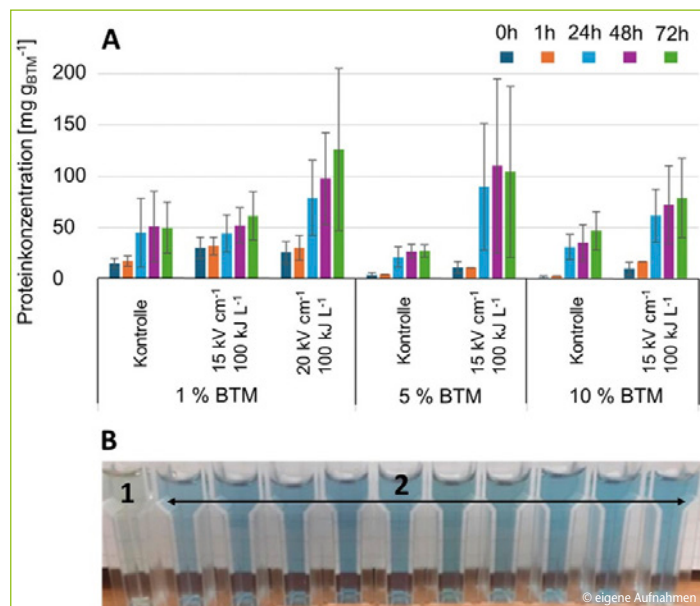


Abb. 10: Proteinkonzentration [mg g_{BTM}⁻¹] in der Kontrolle und in den PEF-behandelten Proben mit 15 bzw. 20 kV cm⁻¹ elektrischer Feldstärke und kJ L⁻¹ spezifischem Energieeintrag nach unterschiedlichen Inkubationszeiten (0 h, 1 h, 24 h, 48 h, 72 h) und variierenden Biotrockenmassekonzentrationen von 1 %, 5 % und 10 % (A), Kontrolle (unbehandelt, 1) sowie Phycocyaninextrakte aus PEF-behandelter frischer *Spirulina*-Biomasse (2) (B) (Werte als Mittelwerte ± Standardabweichung, n = 3)

BTM: Biotrockenmasse; PEF: Pulsed Electric Field

Vergleich zur PEF-behandelten Biomasse. Die Farbstabilität blieb bei einer Extrusionstemperatur von 110 °C erhalten. Die Zugabe von unbehandelter *Spirulina*-Biomasse führte im Vergleich zur PEF-behandelten *Spirulina*-Biomasse zu einem intensiveren Algenaroma und einer festeren Textur. Eine PEF-Behandlung der

Nr.	Probe	<i>Spirulina</i> -Biomasse [%]	Farbe	Geschmack	Textur	
1	Referenz	–	hellbeige; F0.25.60	pflanzlich, nach Erbse	1,5	wird fester mit mehr Trockenmasse
2	Referenz	–	hellbeige; F0.25.60		2	
3	Referenz	–	hellbeige; F0.25.60		2	
4	<i>Spirulina</i> PEF-behandelt	10,12	hellgrün; G0.30.30	pflanzlich, leicht nach Alge	3	fester als die Referenz
5	<i>Spirulina</i> PEF-behandelt	10,33	hellgrün; G0.30.30		3	
6	<i>Spirulina</i> PEF-behandelt	10,50	hellgrün; G9.20.19		3	
7	<i>Spirulina</i> unbehandelt	10,12	dunkelgrün; G9.20.19	intensiverer Algengeschmack als PEF-behandelte Proben	3	sehr fest und gummiartig
8	<i>Spirulina</i> unbehandelt	10,33	dunkelgrün; G9.20.19		3	
9	<i>Spirulina</i> unbehandelt	10,50	dunkelgrün; G9.20.19		3	
10	<i>Spirulina</i> PEF-behandelt	5,03	hellgrün; G0.30.50	pflanzlich, etwas nach Alge	2,5	sehr fest
11	<i>Spirulina</i> PEF-behandelt	5,13	hellgrün; G0.30.50		2,5	
12	<i>Spirulina</i> PEF-behandelt	5,22	hellgrün; G0.30.30		2,5	
13	<i>Spirulina</i> unbehandelt	5,03	grün; F4.28.47	pflanzlich, leicht nach Alge	2,5	sehr fest
14	<i>Spirulina</i> unbehandelt	5,13	grün; G0.30.50		2,5	
15	<i>Spirulina</i> unbehandelt	5,22	grün; G0.30.30		2,5	

Tab. 2: Untersuchung zur Extrusion von *Spirulina*-Frischbiomassen

In der Referenzrezeptur wurde Wasser anstelle von *Spirulina*-Biomasse integriert. Die Textur wurde auf einer Skala von 1–3 bewertet.

frischen *Spirulina*-Biomasse eignet sich daher sowohl für die Gewinnung von Hochwertprodukten (Primärfraktion) als auch zur Verbesserung der Verarbeitung einer nachgelagerten Nassextrusion der Restbiomasse (Sekundärfraktion).

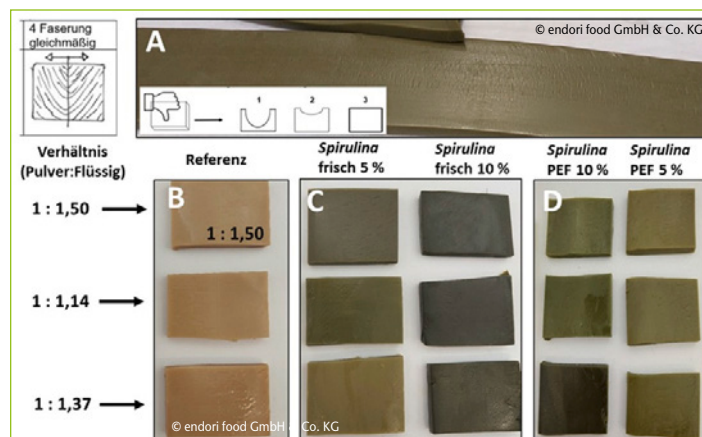


Abb. 11: Strangqualität von Nassextrudaten mit einem Anteil an PEF-behandelter *Spirulina*-Biomasse (A), Farbvariationen der Nassextrudate aufgrund unterschiedlicher Gehalte an Biomasse in der Rezeptur (B, C, D)
PEF: Pulsed Electric Field

Abschließende Bemerkungen

Das Forschungsprojekt „ALGAE-MODULE 4.0“ im Rahmen des Innovationsraums NewFoodSystems vereint die interdisziplinäre Expertise von neun Projektpartnern entlang der gesamten Wertschöpfungskette der Mikroalgenproduktion. Beteiligt waren Unternehmen aus den Bereichen Mikroalgenkultivierung (PUEVIT GmbH, Algenium GmbH & Co. KG), technische Ausstattung mit Schwerpunkt auf Beleuchtungstechnologien (DH Licht GmbH) sowie Regelungs- und Kommunikationstechnik (Experior MicroTech GmbH). Darüber hinaus waren Partner mit Expertise in Aufbereitungsverfahren (ELEA Technology GmbH) und optischer Prozessanalytik (Bruker Optik GmbH) involviert. Ergänzt wurde das Konsortium durch Unternehmen aus der Lebensmittelverarbeitung (endori food GmbH & Co. KG) sowie universitäre Forschungseinrichtungen, die sich mit *Downstream Processing* (TU Berlin) und der Entwicklung sowie Optimierung von Produktionsprozessen (TU Dresden) befassen.

Durch diese interdisziplinäre Zusammenarbeit wurden entscheidende Fortschritte in der Prozessentwicklung, der Qualitätssicherung und der industriellen Anwendbarkeit von frischen Mikroalgen als nachhaltige Rohstoffquelle für die Lebensmittelproduktion erzielt.

Förderung

Beitrag im Rahmen der Publikationsreihe des Innovationsraums NewFoodSystems – Fördermaßnahme „Innovationsräume Bioökonomie“ im Rahmen der „Nationalen Forschungsstrategie BioÖkonomie 2030“ des Bundesministeriums für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR).



Danksagung

Die Autoren danken dem BMFTR-Innovationsraum NewFoodSystems für die Förderung des Vorhabens ALGAE-MODULE 4.0.

Angaben zu Interessenkonflikten und zum Einsatz von KI

Die Autor*innen erklären, dass keine Interessenkonflikte bestehen. KI wurde zur Sprachoptimierung eingesetzt.

Literatur

- Sharma A, Arya SK: Ecological and environmental services of microalgae. In: Bandh SA, Malla FA (eds.): *Valorization of microalgal biomass and wastewater treatment*. Elsevier 2023; 261–315.
- Gohara-Beirigo AK, Matsudo MC, Cezare-Gomes EA, Carvalho JCMD, Danesi EDG: Microalgae trends toward functional staple food incorporation: Sustainable alternative for human health improvement. *Trends Food Sci Technol* 2022; 125: 185–99.
- Zhou L, Li K, Duan X, et al.: Bioactive compounds in microalgae and their potential health benefits. *Food Biosci* 2022; 49: 101932.
- Bouyahya A, Bakrim S, Chamkhi I, et al.: Bioactive substances of cyanobacteria and microalgae: Sources, metabolism, and anticancer mechanism insights. *Biomed Pharmacother* 2024; 170: 115989.
- Wang Y, Tibbetts S, McGinn P: Microalgae as sources of high-quality protein for human food and protein supplements. *Foods* 2021; 10: 3002.
- Kumar R, Hegde AS, Sharma K, Parmar P, Srivatsan V: Microalgae as a sustainable source of edible proteins and bioactive peptides – current trends and future prospects. *Food Research International* 2022; 157: 111338.
- Liu Y, Ren X, Fan C, Wu W, Zhang W, Wang Y: Health benefits, food applications, and sustainability of microalgae-derived n-3 PUFA. *Foods* 2022; 11: 1883.
- Remize M, Brunel Y, Silva JL, Berthon J-Y, Filaire E: Microalgae n-3 PUFAs production and use in food and feed industries. *Marine Drugs* 2021; 19: 113.



9. Jung F, Braune S, Jung CHG, et al.: Lipophilic and hydrophilic compounds from *Arthrospira platensis* and its effects on tissue and blood Cells – an overview. *Life* 2022; 12: 1497.
10. Mimouni V, Ulmann L, Pasquet V, et al.: The potential of microalgae for the production of bioactive molecules of pharmaceutical interest. *CPB* 2012; 13: 2733–50.
11. Sun D, Wu S, Li X, et al.: The structure, functions and potential medicinal effects of chlorophylls derived from microalgae. *Marine Drugs* 2024; 22: 65.
12. Tounsi L, Ben Hlima H, Hentati F, et al.: Microalgae: A promising source of bioactive phycobiliproteins. *Marine Drugs* 2023; 21: 440.
13. Mirza SS, Akbar S, Ijaz MU, Morowvat MH, Ishaque A, Fatima K: Nutritional health connection of algae and its pharmaceutical value as anticancer and antioxidant constituents of drugs. *BIOT* 2025; 19: 19–34.
14. Hwang J, Yadav D, Lee PC, Jin J: Immunomodulatory effects of polysaccharides from marine algae for treating cancer, infectious disease, and inflammation. *Phytother Res* 2022; 36: 761–77.
15. Casas-Arrojo V, Arrojo Agudo MDLÁ, Cárdenas García C, et al.: Antioxidant, immunomodulatory and potential anticancer capacity of polysaccharides (glucans) from *Euglena gracilis* G.A. Klebs. *Pharmaceuticals* 2022; 15: 1379.
16. De Medeiros VPB, De Souza EL, De Albuquerque TMR, et al.: Freshwater microalgae biomasses exert a prebiotic effect on human colonic microbiota. *Algal Research* 2021; 60: 102547.
17. Villarruel-López A, Ascencio F, Nuño K: Microalgae, a potential natural functional food source – a review. *Pol J Food Nutr Sci* 2017; 67: 251–63.
18. Ruiz J, Wijffels RH, Domínguez M, Barbosa MJ: Heterotrophic vs autotrophic production of microalgae: Bringing some light into the everlasting cost controversy. *Algal Res* 2022; 64: 102698.
19. Abdur Razzak S, Bahar K, Islam KMO, et al.: Microalgae cultivation in photobioreactors: sustainable solutions for a greener future. *Green Chem Eng* 2024; 5: 418–39.
20. Chanquia SN, Vernet G, Kara S: Photobioreactors for cultivation and synthesis: Specifications, challenges, and perspectives. *Eng Life Sci* 2022; 22: 712–24.
21. Pisanello D, Caruso G: EU Regulation on Novel Foods. In: Pisanello D, Caruso G (eds.): *Novel Foods in the European Union*. Cham: Springer International Publishing 2018, 1–29. (SpringerBriefs in Molecular Science).
22. Görs M, Schumann R, Hepperle D, Karsten U: Quality analysis of commercial *Chlorella* products used as dietary supplement in human nutrition. *J Appl Phycol* 2010; 22: 265–76.
23. Sassano CEN, Gioielli LA, Almeida KA, Sato S, Perego P, Converti A, Carvalho JCM: Cultivation of *Spirulina platensis* by continuous process using ammonium chloride as nitrogen source. *Biomass Bioenergy* 2007; 31: 593–8.
24. Pattaro L, Colta AR, Saccardo A, Borella L, Barbera E, Sforza E: Effect of medium recycle ratio on spirulina cultivation: Experiments and modelling. *J Environ Chem Eng* 2025; 13: 117264.



Larvenmehl der Schwarzen Soldatenfliege (*Hermetia illucens*) eignet sich für die Fütterung der Weißbeingarnele (*Penaeus vannamei*) unter Praxisbedingungen in einer modernen Kreislaufanlage

Timo Stadtlander, Kristoffer Deininger, Christoph Sandrock, Franziska Schindler, Bert Wecker, Jens Wohlfahrt, Andreas Lemme, Christian Lambertz

Abstract

Die Eignung von Proteinmehl der Larven der Schwarzen Soldatenfliege (*Hermetia illucens*) ist als Fisch- oder Sojamehlersatz in Futtermitteln vieler Nutztierarten, inklusive verschiedenen Speisefischen, aber auch Geflügel und Schweinen, bereits in zahlreichen Untersuchungen gezeigt worden. In Bezug auf die pazifische Weißbeingarnele (*Penaeus vannamei*) wurde dies bisher jedoch noch nicht in großem Umfang erforscht. Ziel dieser Untersuchungen war es daher, unter Praxisbedingungen zu testen, inwieweit sich Proteinmehl der Schwarzen Soldatenfliege als Proteinkomponente für *P. vannamei* eignet.

In vier zeitlich aufeinanderfolgenden Durchgängen wurden ein Versuchsfutter mit zehnprozentigem Anteil Soldatenfliegenmehl und ein Kontrollfutter unter Praxisbedingungen in einer Kreislaufanlage getestet. Um die Produktionsperformance beider Futter vergleichen zu können, wurden Wachstum, Futterverwertung und Mortalität einander gegenübergestellt. Die Leistung war generell hoch und dennoch wurden verglichen mit der Kontrollgruppe tendenziell oder sogar signifikant positive Effekte des Insektenmeihls für wichtige Parameter gefunden.

Diese Arbeit zeigt, dass das Larvenmehl der Schwarzen Soldatenfliege in dem getesteten Anteil von 10 % unter praktischen Bedingungen in Kreislaufanlagen eingesetzt werden kann, ohne Produktionsperformance einzubüßen.

Zitierweise

Stadtlander T, Deininger K, Sandrock C, Schindler F, Wecker B, Wohlfahrt J, Lemme A, Lambertz C: Larval meal of the black soldier fly (*Hermetia illucens*) is suitable for feeding whiteleg shrimp (*Penaeus vannamei*) under practical conditions in a modern closed-loop system. *Ernährungs Umschau* 2025; 72(8): 146–54.

Open access

The English version of this article is available online: DOI: 10.4455/eu.2025.034

Peer-Review-Verfahren

Manuskript (Original) eingereicht: 04.09.2024; Überarbeitung angenommen: 17.02.2025

Dr. Timo Stadtlander¹, Dr. Christoph Sandrock¹, Jens Wohlfahrt¹

Kristoffer Deininger²

Dr. Franziska Schindler³

Dr. Bert Wecker⁴

Dr. Andreas Lemme⁵

Dr. Christian Lambertz⁶

¹ Forschungsinstitut für biologischen Landbau (FiBL), Ackerstr. 113, 5070 Frick, Schweiz

² Oceanloop Munich GmbH, Straßacker 6, 85465 Langenpreising, Deutschland

³ Hermetia Baruth GmbH, An der Birkenpfuhlheide 10, 15837 Baruth/Mark, Deutschland

⁴ Oceanloop Kiel GmbH & Co. KG, Bülker Huk, 24229 Strande, Deutschland

⁵ Evonik Operations GmbH, Rodenbacher Chaussee 4, 63457 Hanau, Deutschland

⁶ Forschungsinstitut für biologischen Landbau (FiBL), Kasseler Str. 1a, 60486 Frankfurt am Main, Deutschland
christian.lambertz@fibl.org

Einleitung

Die Nutztierhaltung steht aufgrund ihres hohen Ressourcenverbrauchs zunehmend in der Kritik. Primär aufgrund des notwendigen Futtermittelanbaus, des großflächigen Einsatzes von Düngemitteln und daraus resultierenden Klimagasemissionen (CO₂, Methan, Lachgas). Bei Monogastriern, insbesondere Schwein und Geflügel, steht der Einsatz von Sojafuttermitteln als Proteinkomponente im Zentrum der Kritik. In der Aquakultur sind es in erster Linie die steigende Nachfrage nach Fischmehl- und Fischölproduktion und die damit zusammenhängenden Umwelteffekte [1].

Insektenmehle, produziert aus den Larvenstadien verschiedener Insektenarten, könnten hier einen Beitrag zu mehr Nachhaltigkeit in der Tierproduktion leisten [2, 3]. Insektenlarven ernähren sich in der Natur oftmals von verrottem organischen Material und genau dies macht sie zu einem nachhaltigen Futtermittel, unter der Voraussetzung, dass Restströme aus der Lebensmittelproduktion und Lebensmittelabfälle selbst als Substrat für die Insektenlarven genutzt werden. Durch die Nutzung dieser Substrate können die enthaltenen Nährstoffe durch die Insektenlarven zu wertvollen Futtermitteln veredelt werden (*upcycling*) [2, 4]. Global wird rund ein Drittel aller Lebensmittel weggeworfen (*food waste*) oder geht im Laufe der Produktion verloren (*food loss*) [5]. Die Rückführung dieser Nährstoffe in das Lebensmittelsystem kann die Nachhaltigkeit steigern. Aufgrund der unzureichenden Datenlage und des Sicherheitsprinzips erlaubt die EU derzeit lediglich Insektensubstrate, die bereits Futtermittelqualität aufweisen und somit auch direkt in der Nutztierfütterung oder Aquakultur eingesetzt werden können (VO (EU) 2017/893 vom 24. Mai 2017; VO (EU) 2021/1372 vom 17. August 2021). Potenziell problematische Substrate, z. B. Speiseabfälle aus Restaurants oder Großküchen (*post consumer*), die auch Fleisch oder Fisch enthalten können, sind nicht erlaubt. Ebenso dürfen Exkremente aus der Tierhaltung (z. B. von Geflügel, Schweinen oder Rindern) nicht verwendet werden.

Die in der EU und der Schweiz zugelassenen Insektenarten unterscheiden sich je nach vorgesehenem Verwendungszweck, d. h. Nutzung als Futtermittel oder als Nahrungsmittel. Entsprechend sind Proteinmehle verschiedener Insektenspezies als Futtermittel für die Aquakultur (Fische und Garnelen), Geflügel und Schweine derzeit in der EU zugelassen: von

der Schwarzen Soldatenfliege (*Hermetia illucens*, engl. *black soldier fly*), der Hausfliege (*Musca domestica*), dem gelben Mehlwurm oder Mehlkäfer (*Tenebrio molitor*), dem Getreideschimmelkäfer (*Alphitobius diaperinus*), dem Heimchen (*Acheta domestica*), der Kurzflügelgrille (*Gryllodes sigillatus*), der Steppengrille (*Gryllus assimilis*), der Wanderheuschrecke (*Locusta migratoria*) und der Seidenraupe (*Bombyx mori*).

International hat sich die Schwarze Soldatenfliege als Futterinsekt als am weitesten und intensivsten produzierte Insektenart durchgesetzt [6]. Dies hat verschiedene Gründe, u. a. wachsen und entwickeln sie sich schneller als viele der anderen Insektenlarven und haben somit deutlich kürzere Produktionszyklen. Zudem können sie ein sehr viel breiteres Spektrum organischer Materialien sehr effizient verwerten als z. B. die Larven des Mehlkäfers.

In der Aquakultur sind die Larven bzw. das Proteinmehl der Schwarzen Soldatenfliege (*black soldier fly larvae*, BSFL) stark etabliert. Hier standen insbesondere die Salmoniden (Lachse und Forellen) im Fokus [7–9]. Andere Fischarten, an denen BSFL-Mehle als Proteinkomponente getestet wurden, schließen Steinbutt [10], Tilapien [11], Europäischer Flussbarsch [12, 13] und Zander [14] ein. In jüngerer Zeit wurden Mehle der Schwarzen Soldatenfliege auch für die Weißbeingarnele unter Laborbedingungen getestet [15–18], jedoch bisher noch nicht unter Praxisbedingungen im Rahmen einer kommerziell betriebenen Shrimpszucht.

Kommerzielle, für die Tierernährung produzierte Insektenmehle sind im Allgemeinen reich an Chitin [19]. Chitin ist ein komplexes Polysaccharid, welches für viele Tiere nur schlecht oder gar nicht verdaulich ist. Insbesondere aquatische Süß- und Meerwassertierarten, die auf ihrer natürlichen Speisekarte entweder Insekten, Insektenlarven oder Zooplankton (insbesondere Kleinkrebse wie Daphnien oder Copepoden) haben, sind besser geeignet, Chitin zu verdauen als z. B. die meisten terrestrischen Nutztiere [20, 21]. Geißelgarnelen, zu denen auch die pazifische Weißbeingarnele (*Penaeus vannamei*) zählt, fressen neben viel Zooplankton v. a. aber auch ihre eigene Exuvie (abgelegte Tierhaut) nach der Häutung. Weißbeingarnelen weisen dementsprechend verstärkte Chitinaseaktivitäten auf, können also Chitin ernährungsphysiologisch besser verwerten als Tierarten ohne großen Insekten- oder Zooplanktonanteil in ihrer Nahrung [21, 22].

Neben dem Chitin bestimmt auch die Aminosäurezusammensetzung der Insektenmehle deren Nährwert. Zum Beispiel zeigt der Vergleich von Fischmehlen mit vergleichbarem Proteingehalt geringere Lysingehalte als BSFL-Mehle. Auch die schwefelhaltigen Aminosäuren fallen geringer aus, während die verzweigtkettigen Aminosäuren Isoleucin, Valin und Leucin höher konzentriert sind [23]. Darüber hinaus können die Proteingehalte und das Aminosäureprofil von BSFL-Mehlen beträchtlich schwanken [24, 25].

Fragestellung

Das Projekt „Nachhaltige und resiliente Kultivierung von Insekten für den innovativen Einsatz in der Futter- und Lebensmittelherstellung“ (reKult4Food) wurde im Rahmen des Innovationsraums NewFoodSystems durchgeführt [26]. In drei Arbeitspaketen wurden für die effiziente Produktion und Nutzung der Schwarzen Soldatenfliege wichtige Fragestellungen hinsichtlich Produktion und Verwertung des BSFL-Mehls adressiert.





In dem hier berichteten Versuch wurde Insektenmehl als Proteinkomponente für die pazifische Weißbeingarnele (*P. vannamei*) unter Praxisbedingungen, d. h. in einer kommerziell betriebenen Kreislaufanlage, in vier zeitlich replizierten Durchgängen von kompletten Produktionszyklen getestet. Während die wissenschaftliche Literatur für die ernährungsphysiologische Eignung von BSFL-Mehl bei verschiedenen Speisefischen, insb. Salmoniden (Lachse und Forellen), Tilapien, Karpfen und Flussbarschen, Geflügel und auch Schweinen sehr umfangreich ist, gibt es bislang nur relativ wenige Studien zu Eignung und empfohlenen Höchstmengen an BSFL-Mehl im Futter für *P. vannamei* und keine für die Garnelenproduktion in Kreislaufanlagen. Die Produktion von *P. vannamei* ist in Europa eine Nischenproduktion, die aber hochwertige und hochpreisige Meeresfrüchte lokal bereitstellen kann und damit lange Transportwege sowie energieintensive Kühlketten vermeidet.

Im folgenden Artikel wird der Fragestellung nachgegangen, wie gut ein kommerziell extrudiertes Versuchsfutter mit 10 % BSFL-Mehl als Proteinkomponente für *P. vannamei* gegenüber einem unter gleichen Bedingungen hergestellten und langfristig eingesetzten Standard- bzw. Kontrollfutter auf Fischmehlbasis abschneidet.

Methodik

Fütterungsversuche im laufenden Produktionsbetrieb zu integrieren und mit wissenschaftlich notwendiger Genauigkeit durchzuführen, stellt immer eine gewisse Herausforderung dar. Die Garnelenzucht Oceanloop Munich (zu Beginn des Projektes noch „CrustaNova“) produziert in geschlossenen Kreislaufanlagen pazifische Weißbeingarnelen, die weltweit mengenmäßig am meisten produzierte Garnele [27]. In der Anlage zirkuliert das Haltungswasser kontinuierlich und wird durch die Wasseraufbereitung, bestehend aus Trommelfilter, Abschäumung, Biofilter, Denitrifikationsreaktor und Entgasung, gereinigt, wodurch eine Wasseraustauschrate von nur 1–3 % pro Tag ermöglicht wird. Darüber hinaus existieren weitere Eintragssysteme für technischen Sauerstoff, Pufferlösungen und Wärme, um das Haltungswasser optimal auf die Bedürfnisse der Garnelen einzustellen. Der Sauerstoffgehalt in den Mastbecken beträgt 5–7 mg/L, der pH-Wert 7,4–8,3 und die Temperatur 29–31 °C. Die Fütterung erfolgt stündlich über Futterautomaten und orientiert sich an einem Futtermodell. Die Futtermenge wird täglich nach Bedarf angepasst, sodass Futterreste in den Becken zu jeder Zeit vermieden werden. Kommerzielle Anlagen sind nicht auf möglichst viele Versuchsreplikate und direkt parallele Produktion ausgerichtet. In der Anlage sind aber geeignete Kapazitäten vorhanden, um Kontroll- und Versuchsfutter parallel zu füttern. Daher wurden vier zeitliche Replikate durchgeführt. In den Versuchsfuttermischungen wurden 10 % des Fischmehls durch BSFL-Mehl ersetzt, ohne weitere Anpassungen im Nährstoffprofil vorzunehmen. Die Zusammensetzung der Kontrollfuttermischung ist in • Tabelle 1 dargestellt. Im Versuchsfutter hatte das Fischmehl nach dem teilweisen Austausch mit dem BSFL-Mehl noch einen Anteil von 11 % (110 g/kg). Zudem wurde der Gehalt an Krillmehl erhöht, um die Differenz des Proteingehalts von Fischmehl und BSFL-Mehl zu kompensieren.

Daraus ergab sich, dass zwar die Rohproteingehalte annähernd gleich blieben, die Versuchsfutter aber z. B. 0,10–0,13 %-Punkte niedrigere Methionin- + Cystein-, 0,07–0,08 %-Punkte niedrigere Threonin-, 0,11–0,14 %-Punkte niedrigere Arginin-, 0,05–0,07 %-Punkte niedrigere Valin- + Iso-leucin- und 0,19 %-Punkte niedrigere Leucin-gehalte aufwiesen, während Lysin nur marginal betroffen war. Innerhalb der essenziellen Aminosäuren lagen nur die Tyrosingehalte um 0,07 % höher. Diese Effekte sind hauptsächlich damit zu erklären, dass ein höherer Teil des Rohproteins im BSFL-Futter durch Chitin im Larvenmehl zu erklären ist, während die Aminosäurekonzentration geringer ist. Beide Futter wurden in zwei verschiedenen Pelletgrößen (1,6 und 2,2 mm Durchmesser) extrudiert, um der zunehmenden Größe der Garnelen gerecht zu werden.

Nach ihrer Quarantänezeit wurden je 12500 Garnelen (Postlarven im Alter von 10 Tagen) mit gleicher Größe und gleichem Gewicht (im Schnitt über alle Durchgänge 3,74 mg) in die jeweiligen Abteile eingesetzt. Verfüttert wurden das normal genutzte Standardfutter als Kontrollfutter und das Versuchsfutter mit gleicher ernährungsphysiologischer Zusammensetzung. Die Fütterungsmenge betrug zu Beginn der Versuche 5,9 % der Biomasse und am Ende 3,8 % der Biomasse. Die Fütterungsdauer (Masttage) richtete sich nach der Größe der Garnelen und den betriebswirtschaftlichen Umständen. Am Ende der Mastperiode wurden beide Abteile parallel abgefischt, sodass die Anzahl Masttage identisch war.

Komponente ^a	Kontrollfutter [g/kg]
Weizennachmehl ^b	320
Fischmehl	280
Triticale	50
Rapsschrot	50
Sonnenblumenschrot	50
Krillmehl	50
Weizenkeime	50
Rapssaar	40
Futterkalk	35
Fischöl	25
Lecithin	5

Tab. 1: Zusammensetzung der Kontrollfuttermischungen

^a Vitaminpremix und Spezialkomponenten sind nicht gelistet; BSFL-Versuchsfutter enthielt 110 g/kg Fischmehl und 100 g/kg BSFL-Mehl.

^b Nebenerzeugnis, das bei der Herstellung von Mehl aus gereinigtem Weizen entsteht.

Die Nährwertangaben für die beiden Pelletgrößen 1,6 und 2,2 mm Durchmesser sind in ♦ Tabelle 2 dargestellt. Die Nährwertangaben unterscheiden sich leicht zwischen beiden Pelletgrößen, wobei keine Unterschiede zwischen Kontroll- und Versuchsfutter vorlagen.

Zu Beginn eines jeden Durchgangs wurden ca. 200 g Garnelen als Initialgruppe für die spätere Aminosäurebestimmung gefangen und eingefroren.

Die Mastdauer pro Durchgang betrug im Mittel $97 \pm 8,5$ Tage mit einer Spannweite von 83–105 Tagen. In regelmäßigen Abständen (alle 1–2 Wochen) wurden Stichproben aus jeder Gruppe gewogen und anschließend die Anzahl Tiere ausgezählt, um das Wachstum zu dokumentieren.

Am Ende eines jeden Durchgangs wurden jeweils 1 kg Garnelen aus dem Kontroll- und dem Versuchsbecken gefangen und für die spätere Aminosäurebestimmung eingefroren. Am Ende des Versuchs wurden sämtliche Garnelen aus den Initial-, Kontroll- und Versuchsgruppen gefriergetrocknet und vermahlen. Anschließend wurden die Aminosäurezusammensetzungen aller Kontroll- und Versuchsfutter in beiden Pelletgrößen im Duplikat und aller beprobten Garnelen (Initial-, Kontroll- und Versuchsgruppen) in jeweils vier Replikaten bei Evonik in Essen bestimmt.

Die erhobenen Daten (Wachstum, Futterverwertung und Mortalität) wurden genutzt, um Produktivitätskennzahlen und somit die Performance der beiden Futter zu berechnen. Diese beinhalteten u. a. die folgenden Kennzahlen:

Wachstum

In regelmäßigen, allerdings in den vier Durchgängen nicht zu den gleichen Zeitpunkten durchgeführten, Wägungen wurden zwischen 3 und 126 Tiere (im Mittel 23 Tiere) pro Wägung gewogen. Bei kleineren Tieren war die Anzahl entsprechend größer als bei größeren Tieren. Es gab mindestens 3, maximal 6 Wägungen pro Durchgang. Die Tiere wurden als Gruppe gefangen und gewogen. Bevor sie zurück in ihre jeweiligen Becken gebracht wurden, fand eine Zählung statt, um das durchschnittliche individuelle Körpergewicht der Garnelen errechnen zu können.

Da die Garnelen aller vier Durchgänge nicht nur an unterschiedlichen Tagen gewogen wurden, sondern auch die Mastdauer unterschiedlich lang war, werden für den Vergleich des Wachstums die spezifische Wachstumsrate (SWR, %/Tag) und der durchschnittliche

	Durchmesser: 1,6 mm	Durchmesser: 2,2 mm
Rohprotein (g/kg)	400	360
Rohfett (g/kg)	100	95
Rohasche (g/kg)	103	100
Rohfaser (g/kg)	25	30
Bruttoenergie (MJ/kg)	19,3	18,0

Tab. 2: Nährwertangaben für die beiden Futtergrößen (1,6 und 2,2 mm) des Kontroll- und Versuchsfutters

Zuwachs (g/Tag) genutzt und die Wiegedaten beider Fütterungsgruppen in einem gemischten statistischen Modell verglichen. SWR:

$$\frac{\ln \text{Endgewicht (g)} - \ln \text{Startgewicht (g)}}{\text{Anzahl Masttage}} \times 100$$

Futterverwertung

Die Futterverwertung (*feed conversion ratio*) wurde für jede Behandlung (Kontrolle und BSFL) über die vier Durchgänge gemittelt. Sie wurde berechnet über den gesamten Futterverbrauch (in g) und den gesamten Biomassezuwachs bzw. die finale Ernte der kontrollgefütterten Garnelen und der BSFL-gefütterten Garnelen.

Mortalität

Für die Berechnung der Mortalität wurde die Anzahl der eingesetzten (ermittelt über durchschnittliche Gewichte von Stichprobenzählungen und gesamt eingesetztes Gewicht der Besatztiere bzw. PLs) und abgefischten bzw. geernteten Garnelen (ermittelt über gesamte abgefischte Biomasse und Stichprobenwägungen zur Ermittlung des durchschnittlichen Individualgewichts) bzw. die Reduktion der Tierzahl von Anfang bis Ende genutzt (Anzahl Tiere Ende/Anzahl Tiere Anfang * 100).

Statistik

Der Wachstumsverlauf der beiden Fütterungsgruppen über die Zeit wurde mithilfe sukzessiver Modellvereinfachungen untersucht, die sich auf ein lineares gemischtes Modell bezogen, welche die Interaktion zwischen der Fütterungsgruppe und einer nicht-linearen Funktion zur Modellierung des Gewichts über die Zeit (*natural splines*) als fixe Effekte beinhalteten sowie die aufeinanderfolgenden Versuchswiederholungen als Zufallsfaktor. Inwiefern das komplexe oder die vereinfachten Modelle die Daten besser erklären, wurde vergleichend analysiert. Für die Zielvariablen Erntegewicht, Futterverwertung, spezifische Wachstumsrate, Mortalität und Proteingehalt der Garnelen wurden statistische Vergleiche basierend auf gemischten Modellen angewendet, wobei die Fütterungsgruppe als fixer Effekt und die Versuchswiederholungen als zufälliger Faktor berücksichtigt wurden. Sämtliche Modelldiagnostiken wurden visuell überprüft. Die Anteile der einzelnen Aminosäuren am Proteingehalt wurden sowohl zwischen den Fütterungsgruppen als auch in Bezug auf die Zusammensetzung der anfangs eingesetzten Garnelen mittels einfaktorieller Varianzanalyse und anschließend post-hoc-Vergleich untersucht.





Ergebnisse

Die vergleichende Modellanalyse zum Wachstumsverlauf ergab, dass der Effekt der Fütterungsgruppe (Kontrolle vs. BSFL) vernachlässigbar war (sowohl interaktiv als auch additiv) und die zeitliche Funktion allein die Daten hinreichend und signifikant gegenüber einem Null-Modell erklärt (♦ Abbildung 1). Über die vier Durchgänge wurde kein Effekt der Fütterung auf die Mortalität gefunden ($p = 0,229$). Während sich für die Futterverwertung nur ein Trend zugunsten der BSFL-gefütterten Gruppe ergab ($p = 0,109$), wurde für die spezifische Wachstumsrate pro Tag ein signifikant positiver Effekt ($p = 0,036$) festgestellt. Die Erntegewichte der BSFL-gefütterten Garnelen waren signifikant höher als die der Kontrollgruppe ($p = 0,003$), die Proteingehalte der geernteten Garnelen beider Gruppen unterschieden sich jedoch nicht ($p = 0,153$). Die entsprechenden Daten sind in ♦ Tabelle 3 dargestellt. Die gesamte Mastdauer betrug zwischen 83 und 105 Tage und im Mittel

Parameter	Kontrolle	BSFL
individuelles Endgewicht (g)	22,4 ± 4,4	24,0 ± 4,2
Mortalität (%)	53 ± 20	51 ± 19
Futterverwertung (g Futter/g Zuwachs)	1,56 ± 0,15	1,52 ± 0,18
SWR (%/Tag)	9,16 ± 0,25	9,24 ± 0,25
Gewichtszunahme (g/Tag)	0,23 ± 0,029	0,25 ± 0,026

Tab. 3: Übersicht über die wichtigsten produktionsrelevanten Parameter

Im individuellen Endgewicht sind nur die Bereiche angegeben und es wurde wegen der verschiedenen Mastdauern und damit uneinheitlichen Abfischzeitpunkte kein Mittelwert gebildet. Bei Mortalität, Futterverwertung, SWR und Gewichtszunahme handelt es sich um Mittelwerte ± Standardabweichung ($N = 4$).

SWR: spezifische Wachstumsrate

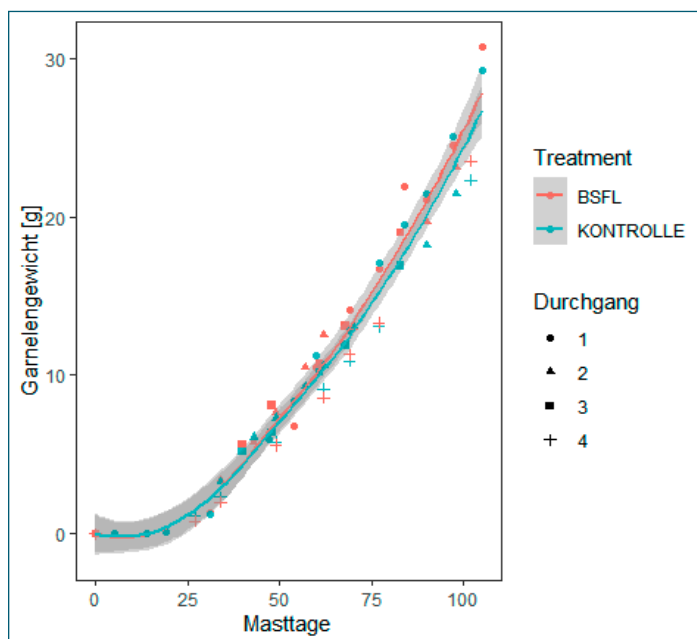


Abb. 1: Darstellung des Wachstumsverlaufs der BSFL-gefütterten (rot) gegenüber den kontrollgefütterten (grün) Garnelen über die Zeit in den vier einzelnen Durchgängen (Symbole) (eigene Darstellung)

BSFL: *black soldier fly larvae*

97,8 Tage. Das Anfangsgewicht ist bei beiden Gruppen identisch, da sie am gleichen Tag in die Becken eingesetzt wurden und entsprechend gleich schwer waren. Die Mastdauer ist ebenfalls identisch für beide Gruppen, da sie am gleichen Tag abgefischt wurden.

Die Aminosäuregehalte in den Versuchsfuttermischungen waren geringer als im Kontrollfutter (♦ Tabelle 4). In den Aminosäureprofilen der abgefischten Shrimps zeigte sich, dass viele BSFL-gefütterte Tiere höhere Aminosäuregehalte in der Trockensubstanz aufwiesen. Bei Lysin, Arginin, Leucin und Glycin waren die Gehalte am Ende der Mast bei BSFL-gefütterten Shrimps signifikant ($p < 0,05$) höher als bei den Anfangstieren und den kontrollgefütterten Tieren. Bei Tyrosin wiesen sowohl die Kontroll- als auch die BSFL-gefütterten Tiere einen signifikant höheren Wert auf als die Anfangstiere (♦ Tabelle 5).

Diskussion

Die allgemeine Produktionsleistung unterschied sich nicht zwischen den beiden Gruppen (Mortalität, Futterverwertung) bzw. war in der BSFL-Gruppe verbessert (Wachstum). Im Vergleich zu bislang publizierten Ergebnissen zur Fütterung von *P. vannamei* aus kontrollierten Laborversuchen [15–18] schneiden die Ergebnisse dieses Praxisversuchs ähnlich ab. Die Mortalität war in beiden Gruppen sehr ähnlich, im Mittel aber eher im oberen Bereich der von publizierten Studien berichteten Mortalitäten. Überlebensraten ($100\% - \text{Überlebensrate} = \text{Mortalität}$) von 86,7–95,6 % wurden von Cummins et al. [15] berichtet während Chen et al. [16] sogar noch höhere Überlebensraten von über 95 % beobachtete. Nur He und Kollegen [18] berichteten über ähnliche Mortalitäten (26,7–62,7 %), wie sie in dieser Studie beobachtet wurden. Dort waren die Überlebensraten in der Kontrolle und in einer Gruppe mit geringem Anteil an BSFL im Futter (25 %) deutlich besser im Vergleich zu 100-prozentigem Fischmehlersatz durch BSFL, bei dem nur 26,7 % der Garnelen überlebten [18]. Wichtig zu bedenken ist hier jedoch noch die Mastdauer. Keine der oben genannten Studien hat den kompletten Mastzyklus von Besatzgarnelen bis zum Abfischen der vermarktungsfähigen Garnelen umfasst, sondern sie dauerten nur zwischen 4 [17] und 9 Wochen [15]. Betrachtet man die Mortalität



	Kontrolle (1,6 mm)	Kontrolle (2,2 mm)	BSFL-Futter (1,6 mm)	BSFL-Futter (2,2 mm)
Rohprotein	39,7	39,2	38,9	38,3
Methionin	1,05	1,04	1,01	0,97
Cystein	0,54	0,54	0,49	0,48
Methionin + Cystein	1,59	1,58	1,49	1,45
Lysin	2,26	2,26	2,29	2,23
Threonin	1,51	1,50	1,45	1,42
Tryptophan	0,45	0,45	0,46	0,46
Arginin	2,22	2,26	2,13	2,11
Isoleucin	1,51	1,51	1,47	1,44
Leucin	2,70	2,67	2,52	2,47
Valin	1,92	1,90	1,88	1,84
Histidin	1,05	1,05	1,02	0,99
Phenylalanin	1,56	1,56	1,47	1,46
Tyrosin	1,14	1,16	1,21	1,22
Glycin	2,28	2,23	2,14	2,07
Serin	1,65	1,64	1,52	1,51
Prolin	2,01	1,98	1,93	1,93
Alanin	2,10	2,06	2,07	2,02
Asparagin	3,13	3,19	3,04	3,02
Glutamin	5,57	5,67	5,37	5,36

Tab. 4: **Rohproteingehalt und Aminosäureprofile der Kontroll- und BSFL-Versuchsfuttermischungen**
jeweils für die beiden Pelletgrößen 1,6 mm und 2,2 mm (Angaben in %)
BSFL: *black soldier fly larvae*

ten der hier vorliegenden Studie unter Praxisbedingungen, können sie als gut eingeschätzt werden, auch wenn in einem der Durchgänge eine erhöhte Sterberate festgestellt wurde. Zwischen der Kontrolle und dem BSFL-Futter wurde kein Unterschied festgestellt.

Die spezifische Wachstumsrate (SWR, %/Tag) ist über das gesamte Experiment, unabhängig von der Gruppe oder einzelnen Durchgängen gemittelt, sehr hoch (Kontrolle: $9,16 \pm 0,25$ %/Tag; BSFL: $9,24 \pm 0,25$ %/Tag). Sie befindet sich im Vergleich zu anderen Studien deutlich oberhalb der jeweilig publizierten Bereiche (3,06–4,07 %/Tag [14]; 4,15–4,34 %/Tag [16]; 6,01–7,53 %/Tag [17]) und kann somit, besonders betrachtet über den gesamten Produktionszeitraum, als sehr gut bewertet werden. Dies kann v. a. mit der verwendeten Genetik begründet werden, die sich durch ein sehr hohes Wachstumspotenzial auszeichnet. Die SWR nahm bei Richardson et al. [18] mit zunehmendem Anteil an BSFL-Mehl sogar signifikant zu und es wurde kein Plateau mit wieder abnehmenden Werten im Wachstum beobachtet, wie bei den übrigen Studien, welche klare negative Effekte zeigten, wenn der Anteil an BSFL-Mehl im Futter zu hoch war oder gar zu 100 % BSF-Larven verfüttert wur-

den [18]. Zu berücksichtigen ist hierbei, dass die Larven frisch und nicht wie im vorliegenden Versuch in extrudierter Form verfüttert wurden.

Ähnlich verhält es sich mit den in diesem Experiment beobachteten Futterverwertungen. Beide Gruppen zeigten sehr nahe beieinander liegende Futterverwertungen mit 1,56 g Futter pro g Zuwachs in der Kontrolle und 1,52 g Futter pro g Zuwachs in der BSFL-Versuchsgruppe. Dies liegt etwas unterhalb der für 2020 prognostizierten globalen Futterverwertung für Garnelen von 1,6 [28]. Im Vergleich zu Studien mit BSFL-Mehl im Futter von *P. vannamei* ist die Futterverwertung aber deutlich niedriger als die von Cummins et al. [15] berichteten Futterverwertungen von 2,01 (7 % BSFL-Mehl) bis hin zu 4,51 (36 % BSFL-Mehl). Ähnliche, aber doch leicht höhere Futterverwertungen im Vergleich zu unserer Studie wurden von Chen et al. [16] erreicht und schwankten zwischen 1,55 bei 20 % Fischmehlproteinersatz durch BSFL-Protein und 1,7 bei 30 % Fischmehlproteinersatz durch BSFL-Protein. Etwas niedrigere Futterverwertungen werden von Richardson et al. [17] berichtet. Diese sanken mit zunehmendem BSFL-Anteil im Futter von 1,42 auf 1,23 und lagen damit signifikant unter der Kontrolle (1,70) [17].

Eine niedrige Futterverwertung hat einen sehr direkten Einfluss auf die Nachhaltigkeit, sowohl auf die finanzielle als auch die ökologische Nachhaltigkeit. Die Futterverwertung von 1,6 auf 1,2 zu senken bedeutet direkt eine Reduzierung der Futterkosten um 25 % bei identischem Futterpreis und auch eine direkte Reduktion von Nährstoffemissionen (z. B. Stickstoff und Phosphor), die jedoch zusätzlich von der Verdaulichkeit des Futters und der Nähr-



	Initial	Kontrolle	BSFL
Rohprotein	71,9 ± 0,91	75,7 ± 2,63	77,55 ± 2,32
Methionin	1,58 ± 0,04	1,53 ± 0,04	1,68 ± 0,10
Cystein	0,79 ± 0,02	0,76 ± 0,02	0,83 ± 0,05
Methionin + Cystein	2,36 ± 0,06	2,30 ± 0,06	2,51 ± 0,15
Lysin	4,72 ± 0,09 ^a	4,78 ± 0,09 ^a	5,10 ± 0,19 ^b
Threonin	2,56 ± 0,05	2,50 ± 0,05	2,67 ± 0,16
Tryptophan	0,75 ± 0,02	0,76 ± 0,01	0,78 ± 0,01
Arginin	5,38 ± 0,17 ^a	5,62 ± 0,08 ^a	6,13 ± 0,32 ^b
Isoleucin	2,69 ± 0,06	2,64 ± 0,05	2,85 ± 0,16
Leucin	4,65 ± 0,09 ^a	4,68 ± 0,07 ^a	4,97 ± 0,21 ^b
Valin	3,10 ± 0,06	3,03 ± 0,06	3,22 ± 0,19
Histidin	1,60 ± 0,05	1,52 ± 0,03	1,59 ± 0,09
Phenylalanin	2,89 ± 0,07	2,82 ± 0,06	2,99 ± 0,17
Tyrosin	2,32 ± 0,06 ^a	2,64 ± 0,06 ^b	2,63 ± 0,08 ^b
Glycin	4,37 ± 0,17 ^a	4,83 ± 0,27 ^a	5,53 ± 0,25 ^b
Serin	2,65 ± 0,05	2,62 ± 0,04	2,77 ± 0,16
Prolin	4,38 ± 0,21	4,66 ± 0,24	4,66 ± 0,36
Alanin	4,24 ± 0,16 ^{a, b}	4,13 ± 0,13 ^a	4,52 ± 0,14 ^b
Asparagin	6,59 ± 0,13	6,49 ± 0,13	6,98 ± 0,39
Glutamin	9,83 ± 0,16	9,49 ± 0,21	10,3 ± 0,58

Tab. 5: Rohproteingehalt und Aminosäureprofile der Shrimps jeweils vor Fütterungsbeginn (Initial) und am Ende nach Fütterung und Abfischen der Kontroll- und BSFL-gefütterten Tiere (N = 4; Angaben in %) BSFL: *black soldier fly larvae*
^{a, b} signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen (Irrtumswahrscheinlichkeit 5 %)

stoffretention im Tier beeinflusst wird. Generell gelten Tiere niedrigerer trophischer Stufe (also z. B. herbivore Tiere) als finanziell und ökologisch nachhaltiger und stabiler produzierbar, aber nicht unbedingt profitbringender gegenüber Tieren höherer trophischer Stufen (z. B. karnivore Tiere) [29]. Die pazifischen Weißbeingarnelen sind mit einer relativ niedrigen trophischen Stufe von 2,5



Abb. 2: Fressende Garnelen (*P. vannamei*) in Aquarien-Kreislaufanlage an der Universität Hohenheim

[29] eher nachhaltig in der Produktion. Andererseits sind die Futtermittelverwertungen aufgrund der Art und Weise der Futteraufnahme bei Garnelen höher als bei Fischen. Fische schlucken Pellets meist als Ganzes herunter und eine eventuelle mechanische Zerkleinerung findet im Schlund oder oft auch gar nicht statt. Garnelen hingegen „knabbern“ an den Futterpellets, weswegen es bei ihnen zu einem sogenannten „sloppy feeding“ kommt, wobei es, je nach Pelletstabilität und Vermahlungsgrad der Futterkomponenten (je feiner, desto stabiler das Pellet), zu Partikelbildung und entsprechendem Abrieb kommt (♦ Abbildung 2). Schlechte mechanische Pelleteigenschaften erhöhen somit nicht nur die Futterkosten durch weniger Futteraufnahme bzw. mehr Abrieb, sondern steigern auch die Notwendigkeit, das Wasser in der Kreislaufanlage mit Trommel- und Biofilter aufzubereiten. Im Versuch wurden die Pelleteigenschaften nicht untersucht; Beobachtungen an den Becken legen aber nahe, dass es zwischen den beiden Futtervarianten keine grundlegenden Unterschiede gab.

Schlussfolgerung

Insgesamt betrachtet sind die Ergebnisse dieses Praxisversuchs sehr vielversprechend, denn sie zeigen, dass das hier eingesetzte BSFL-Mehl einen Teil des Fischmehls ohne Leistungseinbußen ersetzen kann. Allerdings sind die Kosten für Insektenmehle derzeit noch höher als diejenigen anderer Proteinkomponenten wie Fisch-, Krill und Sojamehl.

Andererseits sind in den „traditionellen“ Proteinmehlen die externen Kosten (Umweltschäden der Herstellung) nicht in den Preis integriert.

Globale Fischmehlpreise liegen zwar mit rund 1700 US-\$ je metrischer Tonne (unterschiedlich je nach Qualität und Herkunft, Stand 2. Juli 2024) ebenfalls unter denen von Insektenmehl, jedoch gibt es viel Kritik an der Nutzung von Fischmehl als Tierfutter. Ein Großteil (90 %) des global direkt für die Herstellung von Fischmehl gefangenen Fisches besitzt Lebensmittel- oder erstklassige Lebensmittelqualität [30] und trägt dadurch ebenfalls zu der Konkurrenz zwischen Futter- und Lebensmitteln bei.

Lokal oder regional produzierte Insektenmehle könnten also einen Beitrag zu einer nachhaltigen Produktion tierischer Lebensmittel liefern. Derzeit ist die Datenlage zur Nachhaltigkeit

aber noch unklar, obwohl eine neuere Übersichtsstudie über Insektenmehle als Fischfuttermittelkomponente auf Nachteile hinsichtlich der Nachhaltigkeit hindeutet [31]. Eine mögliche Steigerung der Nachhaltigkeit könnte dadurch erreicht werden, dass weitere Restströme bzw. Lebensmittelabfälle als Futtersubstrat für Insekten erlaubt würden, vorausgesetzt deren Unbedenklichkeit ist nachgewiesen.

Förderung

Beitrag im Rahmen der Publikationsreihe des Innovationsraums NewFoodSystems – Fördermaßnahme „Innovationsräume Bioökonomie“ im Rahmen der „Nationalen Forschungsstrategie BioÖkonomie 2030“ des Bundesministeriums für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR).



Danksagung

Die Autor*innen danken dem Innovationsraum NewFoodSystems für die Förderung des Vorhabens reKulti4Food (FKZ: 031B1206A). Mehr Informationen unter www.newfoodsystems.de

Angaben zu Interessenkonflikten und zum Einsatz von KI
Franziska Schindler ist bei der Hermetia Baruth GmbH beschäftigt, die Insektenproteine herstellt und vertreibt. Das Unternehmen ist Partner des Forschungsprojekts, finanziert diesen Artikel aber nicht. Die weiteren Autor*innen erklären, dass keine Interessenkonflikte bestehen und für die Erstellung des Manuskripts keine KI eingesetzt wurde.

Literatur

1. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO): The state of world fisheries and aquaculture 2022. Towards blue transformation. Rome: FAO 2022. DOI: 10.4060/cc0461en.
2. Heuel M, Sandrock C, Leiber F, et al.: Black soldier fly larvae meal and fat as a replacement for soybeans in organic broiler diets: effects on performance, body N retention, carcase and meat quality. *Br Poult Sci* 2022; 63(5): 650–61.
3. Gasco L, Renna M, Odon SB, Far AR, El Deen SN, Veldkamp T: Insect meals in a circular economy and applications in monogastric diets. *Anim Front* 2023; 13(4): 81–90. DOI: 10.1093/af/vfad016.
4. Newton GL, Booram CV, Barker RW, Hale OM: Dried *Hermetia illucens* larvae meal as a supplement for swine. *J Anim Sci* 1977; 44: 395–400.
5. Gustavsson J, Cederberg C, Sonesson U: Global food losses and food waste — extent, causes and prevention. Rome: Food and Agricultural Organization of the United Nations (FAO) 2011.
6. Kaya C, Generalovic TN, Ståhls G, et al.: Global population genetic structure and demographic trajectories of the black soldier fly, *Hermetia illucens*. *BMC Biology* 2021; 19(1): 94. DOI: 10.1186/s12915-021-01029-w.
7. St.-Hilaire S, Sheppard C, Tomberlin JK, et al.: Fly prepupae as a feedstuff for rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss*. *J World Aquac Soc* 2007; 38: 59–67.
8. Lock EJ, Arsiwalla T, Waagbø R: Insect larvae meal as an alternative source of nutrients in the diet of Atlantic salmon (*Salmo salar*) postsmolt. *Aquac Nutr* 2015; 22: 1202–13. DOI: 10.1111/anu.12343.
9. Stadlander T, Stamer A, Buser A, Wohlfahrt J, Leiber F, Sandrock C: *Hermetia illucens* meal as fish meal replacement for rainbow trout on farm. *J Insects Food Feed* 2017; 3: 165–75. DOI: 10.3920/JIFF2016.0056.
10. Kroeckel S, Harjes A-GE, Roth I, et al.: When a turbot catches a fly: Evaluation of a pre-pupae-meal of the black soldier fly (*Hermetia illucens*) as fishmeal substitute – growth performance and chitin degradation in juvenile turbot (*Psetta maxima*). *Aquaculture* 2012; 364–5: 345–52. DOI: 10.1016/j.aquaculture.2012.08.041.
11. Devic E, Leschen W, Murray F, Little D: Growth performance, feed utilization and body composition of advanced nursing Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) fed diets containing black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae meal. *Aquac Nutr* 2016; 24(1), 416–23.
12. Stejskal V, Tran HQ, Prokešová M, et al: Partially defatted *Hermetia illucens* larva meal in diet of Eurasian perch (*Perca fluviatilis*) juveniles. *Animals* 2020; 10: 1876. DOI: 10.3390/ani10101876.
13. Tran HQ, Nguyen TT, Prokešová MD, et al.: Insight into bioavailability of various insect meals for European perch (*Perca fluviatilis*): a nutritional and stable isotopic evaluation. *Aquaculture* 2023; 563: 738912. DOI: 10.1016/j.aquaculture.2022.738912.
14. Tran HQ, Prokešová M, Zare M, et al.: How does pikeperch *Sander lucioperca* respond to dietary insect meal *Hermetia illucens*? Investigation on gut microbiota, histomorphology, and antioxidant biomarkers. *Front Mar Sci* 2021; 8: 680942. DOI: 10.3389/fmars.2021.680942.
15. Cummins VC Jr, Rawles SD, Thompson KR, et al.: Evaluation of black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae meal as partial or total replacement of marine fish meal in practical diets for Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*). *Aquaculture* 2017; 473: 337–44. DOI: 10.1016/j.aquaculture.2017.02.022.
16. Chen Y, Chi S, Zhang S, et al.: Evaluation of the dietary black soldier fly larvae meal (*Hermetia illucens*) on growth performance, intestinal health, and disease resistance to *Vibrio parahaemolyticus* of the Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*). *Front Mar Sci* 2021; 8: 706463. DOI: 10.3389/fmars.2021.706463.
17. Richardson A, Dantas-Lima J, Lefranc M, Walraven M: Effect of a black soldier fly ingredient on the growth performance and disease resistance of juvenile Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*). *Animals* 2021; 11: 1450. DOI: 10.3390/ani11051450.
18. He Y, Liu X, Zhang N, et al.: Replacement of commercial feed with fresh black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae in Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*). *Aquaculture Nutrition* 2022. DOI: 10.1155/2022/9130400.
19. Soetemans L, Uytendaele M, Bastiaens L: Characteristics of chitin extracted from black soldier fly in different life stages. *Int J Biol Macromol* 2020; 165: 3206–14. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2020.11.041.
20. Eggink KM, Pedersen PB, Lund I, Dalsgaard J: Chitin digestibility and intestinal exochitinase activity in Nile tilapia and rainbow trout fed different black soldier fly larvae meal size fractions. *Aquac Res* 2022; 53: 5536–46. DOI: 10.1111/are.16035.





21. Clark DJ, Lawrence AL, Swakon DHD: Apparent chitin digestibility in penaeid shrimp. *Aquaculture* 1993; 109: 51–7.
22. Ikeda M, Kakizaki H, Matsumiya M: Biochemistry of fish stomach chitinase. *Int J Biol Macromol* 2017; 104: 1672–81.
23. Evonik Operations GmbH: AMINODat 6.3 – Feed Ingredient Nutrient Compendium 2024.
24. Sandrock C, Leupi S, Wohlfahrt J, et al.: Genotype-by-diet interactions for larval performance and body composition traits in the black soldier fly, *Hermetia illucens*. *Insects* 13 (2022): 424.
25. Lemme A, Channarayapatna G, Jayaraman B: Protein quality of black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*). In: *Proceedings of the Insects to Feed the World*. Singapore, 19–22 June 2024.
26. Fink L, Bunzel D, Horn J, Eitzbach L, Daniel H, Schweiggert-Weisz U, Kulling SE: Der Innovationsraum NewFoodSystems und die Transformation unserer Ernährungs- und Lebensmittelsysteme. *Ernährungs Umschau* 2024; 71(9): M521–9. DOI: 10.4455/eu.2024.032.
27. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO): *The state of world fisheries and aquaculture 2024. Blue Transformation in action*. Rome: FAO 2024. DOI: 10.4060/cd0683en.
28. Tacon AGJ, Metian M: Feed matters: satisfying the feed demand of aquaculture. *Rev Fish Sci Aquac* 2015; 23: 1–10. DOI: 10.1080/23308249.2014.987209.
29. Neori A, Nobre AM: Relationship between trophic level and economics in aquaculture. *Aquacult Econ Manag* 2012; 16: 40–67. DOI: 10.1080/13657305.2012.649046.
30. Cashion T, Le Manach F, Zeller D, Pauly D: Most fish destined for fishmeal production are food-grade fish. *Fish* 2017; 18: 837–44. DOI: 10.1111/faf.12209.
31. Tran HQ, Doan HV, Stejskal V: Environmental consequences of using insect meal as an ingredient in aquafeeds: a system review. *Rev Aquac* 2021; 14(1), 237–51. DOI: 10.1111/raq.12595.

Pilzmyzel als Nahrungsmittel

Wann kommt die Novel-Food-Zulassung?

Pia Bergmann, Leonie Juhrich, Marco Alexander Fraatz, Martin Gand



Einleitung

Pilze stehen schon seit jeher auf dem Speiseplan der Menschheit. Ihr Genusswert oder ihre Giftigkeit wurden von unserer Spezies ausgiebig per *trial and error* getestet. Die besten Kandidaten für den menschlichen Verzehr wurden über die Jahrhunderte selektiert und werden mittlerweile für unsere kontinuierliche Versorgung in Stellagen oder auf Substratblöcken in konditionierten Klimakammern angezogen. Und das nicht zu knapp: Laut Statistischem Bundesamt wurden in Deutschland im letzten Jahr rund 78000 Tonnen Champignons geerntet [1]. Jeder gut bestückte Supermarkt bietet heutzutage nicht nur weiße und braune Champignons (*Agaricus bisporus*) an, sondern auch Kräuterseitlinge (*Pleurotus eryngii*), Austern-Seitlinge (*Pleurotus ostreatus*) oder Shiitake (*Lentinula edodes*).

Der Fortschritt der Technologie ermöglicht nun neben dem Anbau der Fruchtkörper auch die Kultivierung des Myzels, das normalerweise im Boden oder in der Baumrinde verborgene „Wurzelgeflecht“ des Pilzes. Stellt man dem Pilzmyzel ein adäquates Nährmedium zur Verfügung, kann man es unter sterilen Bedingungen auch in Flüssigkultur vermehren, ohne dass Fruchtkörper entstehen (♦ Abbildung 1). Daraus ergeben sich im Hinblick auf den Klimawandel und die wachsende Weltbevölkerung einige Vorteile:

Die zur Produktion notwendige Fläche wird, wie beim *Vertical Farming*, effizienter genutzt. Da Fermenter prinzipiell überall auf der Welt aufgestellt und unter gleichen Bedingungen betrieben werden können, ist der Produktionsprozess ortsunabhängig. In sterilisierten Nährmedien werden keine Pestizide oder Antibiotika benötigt, um das Wachstum von Konkurrenzspezies zu unterdrücken. Die Unabhängigkeit von Wetter und Saison bietet Produktionssicherheit, selbst bei Starkwetter-Ereignissen. Weiterhin ist die Herstellungsdauer bei der submersen Kultivierung von Myzel deutlich kürzer als die Anbauzeit bis zur Ernte der Fruchtkörper.

Abstract

Speisepilze werden seit hunderten von Jahren vom Menschen verzehrt, und doch besteht ein lebensmittelrechtlicher Unterschied zwischen Fruchtkörper und Myzel. Während die Fruchtkörper von bekannten Speisepilzen wie Champignons oder Seitlingen als Lebensmittel gelten, wird das dazugehörige Myzel als „neuartiges Lebensmittel“ gewertet und darf erst nach Sicherheitsbewertung und Zulassung auf den Markt gebracht werden. In diesem Artikel wird erläutert, warum das so ist, was ein „neuartiges Lebensmittel“ ist und wie sich der Markt aktuell entwickelt.

Zitierweise

Bergmann P, Juhrich L, Fraatz MA, Gand M: Mycelium as food. When will it be approved as a Novel Food? Ernährungs Umschau 2025; 72(9): 168–73.

Open access

The English version of this article is available online: DOI: 10.4455/eu.2025.040

Peer-Review-Verfahren

Manuskript (Übersicht) eingereicht: 25.11.2024; Überarbeitung angenommen: 03.03.2025

Dr. Pia Bergmann¹

Leonie Juhrich, M.Sc.

Dr. Marco Alexander Fraatz

Dr. Martin Gand

Justus-Liebig-Universität Gießen, Institut für Lebensmittelchemie und Lebensmittelbiotechnologie

Heinrich-Buff-Ring 17, 35392 Gießen

¹ pia.bergmann@lcb.chemie.uni-giessen.de

Die Novel-Food-Verordnung

Nach der EU-Verordnung 2015/2283 gelten alle Lebensmittel als „neuartige Lebensmittel“ (*Novel Foods*), die vor dem 15. Mai 1997 nicht in nennenswertem Umfang für den menschlichen Verzehr in der Europäischen Union verwendet wurden und in eine von zehn spezifizierten Kategorien fallen [3]. Hierzu zählen auch Lebensmittel, die aus von Pilzen gewonnenen Zellkulturen bestehen oder daraus isoliert oder erzeugt wurden. Diese müssen, bevor sie in den Verkehr gebracht werden dürfen, zum Schutz der Bevölkerung gesundheitlich bewertet werden. Konkret bedeutet das, dass die Fruchtkörper von Champignons, Seitlingen oder Shiitake keine neuartigen Lebensmittel darstellen und nicht von dieser Verordnung betroffen sind; das Myzel dieser Speisepilze hingegen schon. Soll es in Verkehr gebracht werden, bedarf es einer gesonderten Zulassung. Der Weg bis zum zugelassenen neuartigen Lebensmittel führt über die EFSA (European Food Safety Authority, dt.: Europäische Behörde für Lebensmittelsicherheit), die nach Eingang eines gültigen Antrags bei der Europäischen Kommission eine

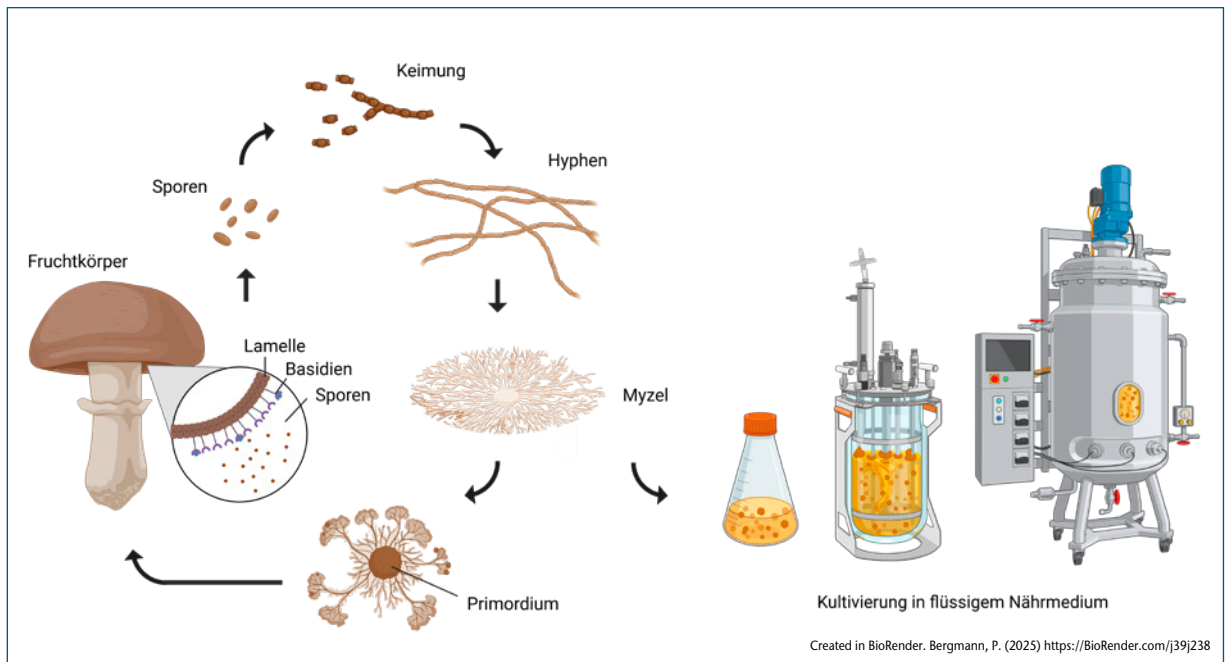


Abb. 1: Der Lebenszyklus eines Ständerpilzes und die biotechnologische Nutzbarmachung des Myzels [2]

Fruchtkörper vs. Myzel

wissenschaftliche Bewertung erstellt. Festgeschrieben ist dabei ein maximaler Bearbeitungszeitraum von neun Monaten. In der Praxis fallen die Verfahren aber häufig durch fehlende Daten, und damit verbundener Nachforderung weiterer Unterlagen, deutlich länger aus. Zugelassene neuartige Lebensmittel werden in die Unionsliste aufgenommen und können dort eingesehen werden [4]. Dort finden sich z. B. neben der Hausgrille (*Acheta domesticus*) oder dem antarktischen Krill (*Euphausia superba*) bereits einige Produkte aus Pilzen (♦ Tabelle 1). Beschleunigt werden kann die Sicherheitsbewertung für Mikroorganismen durch einen QPS-Status (*Qualified Presumption of Safety*, dt.: Qualifizierte Sicherheitsannahme), der auf Basis von Wissensstand um die taxonomische Identität und damit einhergehender geringer potenzieller Sicherheitsbedenken vergeben wird. Filamentöse Pilze, sowohl Schlauch- als auch Ständerpilze, wurden allerdings von QPS-Evaluierungen ausgeschlossen [6].

Sind die Fruchtkörper und das Myzel von beispielsweise Champignons wirklich so verschieden, dass eins als „neuartiges Lebensmittel“ umfangreich bewertet werden muss und das andere nicht? Das Myzel stellt den vegetativen Teil des Pilzes dar und besteht aus einem Netzwerk von Hyphen, die Nährstoffe aus der Umgebung aufnehmen. Fruchtkörper sind im Gegensatz dazu die Fortpflanzungsstrukturen, die sich unter geeigneten Bedingungen aus dem Myzel entwickeln und für die Produktion und Verbreitung von Sporen verantwortlich sind (♦ Abbildung 1). Durch ihre unterschiedlichen biologischen Rollen kann sich die molekulare Zusammensetzung von Myzel und Fruchtkörper erheblich unterscheiden, auch wenn die Erbinformation gleich ist. Beobachten kann man diese Unterschiede im Genexpressionsprofil, wie bereits für den Shiitake, den Trüffel und die Braunkappe beschrieben [7–9]. Je nach Umgebungsbedingungen und Phase der Differenzierung sind verschiedene Gene hoch- oder herunterreguliert und sorgen für unterschiedliche Metabolitkonzentrationen in den Zellen. In fermentativ produziertem Trüffelmyzel wurden beispielsweise höhere Fettgehalte als im Fruchtkörper nachgewiesen, während die Fettsäurezusammensetzung hingegen nahezu identisch war [10]. Es sollte dabei nicht außer Acht gelassen werden, dass die natürlichen Schwankungen in der Zusammensetzung von Pilzen generell erheblich sind. Pilze sind bekannt und geschätzt für ihre hohe Anpassungsfähigkeit gegenüber verschiedenen Substraten, und auch verschiedene Generationen derselben Spezies weisen deutliche Unterschiede auf [11, 12].

Da die Umgebungs- bzw. Kultivierungsbedingungen (Licht, Temperatur, Nährmedium etc.) einen erheblichen Einfluss auf die Zusammensetzung des Fruchtkörpers und des Myzels haben, wird bei



Spezies	Produkt	Status	
Zucht-Champignon (<i>Agaricus bisporus</i>)	Fruchtkörper	Lebensmittel, nicht neuartig	✓
	mit Selen und Cobalamin (Vitamin B ₁₂) angereicherte Fruchtkörper	Lebensmittel, nicht neuartig	✓
	Fruchtkörper, nach der Ernte mit UV-Licht behandelt zur Erhöhung des Vitamin-D ₂ -Gehalts	zugelassenes neuartiges Lebensmittel	✓
Mandelpilz (<i>Agaricus blazei</i>)	Fruchtkörper	Lebensmittel, nicht neuartig	✓
	dehydratisiertes Myzelpulver	bisher nicht zugelassenes neuartiges Lebensmittel	✗
Shiitake (<i>Lentinula edodes</i>)	Fruchtkörper	Lebensmittel, nicht neuartig	✓
	wässriger Auszug aus dem Myzel von <i>L. edodes</i> , das in einer Submersfermentation kultiviert wurde	zugelassenes neuartiges Lebensmittel	✓
	mit Myzelien fermentiertes Erbsen- und Reisprotein ^a	zugelassenes neuartiges Lebensmittel	✓
	dehydratisiertes Myzelpulver	bisher nicht zugelassenes neuartiges Lebensmittel	✗
Austern-Seitling (<i>Pleurotus ostreatus</i>)	Fruchtkörper	Lebensmittel, nicht neuartig	✓
	β-Glucan	Lebensmittel, nicht neuartig	✓
	Myzel und dehydratisiertes Myzelpulver	bisher nicht zugelassenes neuartiges Lebensmittel	✗
Kampferpilz (<i>Antrodia camphorata</i>)	gefriergetrocknetes Myzel aus Festbett-Fermentation für Nahrungsergänzungsmittel	zugelassenes neuartiges Lebensmittel	✓
Zunderschwamm (<i>Fomes fomentarius</i>)	Chitin-Glucan-Komplex aus Zellwänden der Fruchtkörper für Nahrungsergänzungsmittel	zugelassenes neuartiges Lebensmittel	✓
Vitamin-D ₂ -Pilzpulver ^a	nach der Ernte mit UV-Licht behandelte Pilze, getrocknet und gemahlen	zugelassenes neuartiges Lebensmittel	✓

Tab. 1: **Ständerpilze als Lebensmittel und ihr Status nach der Novel-Food-Verordnung**

Auszüge aus der Unionsliste der neuartigen Lebensmittel (VO EU 2017/2470 [4]) und dem online einsehbaren Novel-Food-Statuskatalog [5]

^a unterliegt dem Datenschutz und darf bis zur Erlöschung nur vom Antragsteller in der EU in den Verkehr gebracht werden oder mit dessen Zustimmung

der Novel-Food-Zulassung nicht nur das Endprodukt oder der Produktionsstamm betrachtet, sondern das gesamte Produktionsverfahren. Es gibt dementsprechend keine allgemeingültige Zulassung. Im Hinblick auf Fleischalternativen könnte biotechnologisch produziertes Pilzmyzel die Produktvielfalt ergänzen: Die Biomasse weist durch das filamentöse Wachstum bereits eine faserige Textur auf, die Muskelsträngen ähnelt. Im Gegensatz zu Produkten pflanzlichen Ursprungs müsste sie nicht zwingend aufwendig extrudiert oder texturiert werden. Isoliertes Mykoprotein könnte analog zu pflanzlichem Protein in der breiten Produktpalette vegetarischer und veganer Lebensmittel eingesetzt werden.

Berücksichtigt werden sollte, dass viele Speisepilze bei rohem Verzehr zu Unverträglichkeiten (z. B. Magenschmerzen, Darmprobleme) führen können oder das (leicht zerstörbare) Toxin Agaritin enthalten. Inwieweit mögliche Unverträglichkeiten auch für das Myzel dieser Speisepilze zutreffen, bleibt durch belastbare Studien zu klären. Für das submers kultivierte Myzel des Champignons werden im Vergleich zum Fruchtkörper geringere Gehalte an Agaritin berichtet [13, 14]. Eine thermische Behandlung vor dem Verzehr ist jedoch immer ratsam.

Ernährungsphysiologisch stehen Pilze im Allgemeinen gut dar: Sie bestehen überwiegend aus Wasser (85–95 % des Frischgewichts) und enthalten in der Regel wenig verwertbare Kohlenhydrate (Zu-

cker) oder Fett, dafür viele Ballaststoffe und viel Protein. Abhängig von der Spezies, den Wachstumsbedingungen und anderen Faktoren (s. o.) enthalten sie zwischen 9–43 % Protein bezogen auf die Trockenmasse [15]. Direkt vergleichende Daten von Myzel und Fruchtkörpern gibt es nur wenige, da die Fruchtkörper häufig unter anderen Bedingungen kultiviert werden als das Myzel in flüssiger Kultur. Die Nährstoffzusammensetzung kann je nach Spezies, Substrat und Kultivierungsbedingungen erheblich schwanken. Die Proteinqualität von „Quorn“, dem aktuell einzigen Fleischersatzprodukt aus submers kultiviertem (Schimmelpilz-)Myzel auf dem europäischen Markt, wurde mit 0,99 von 1 im *Protein Digestibility Corrected Amino Acid Score* (dt.: Aminosäureindex, korrigiert um die faecale Verdaulichkeit des Nahrungsproteins) bewertet und schneidet damit besser ab als Soja (0,91) oder Rindfleisch (0,92) [16, 17]. Der Gesamtkohlenhydratgehalt liegt zwischen 34–72 %, wobei das Chitin und die Glucane aus den Zellwänden als *dietary fibers*



den größten Anteil ausmachen. Der Fettgehalt wird mit 1–8 % angegeben, wobei Linolsäure, α -Linolensäure, Palmitinsäure und Ölsäure die am häufigsten vorkommenden Fettsäuren sind [18, 19]. Die Zellmembranen enthalten von Natur aus Ergosterol, das unter UV-B-Strahlung zu Vitamin D₂ umgewandelt werden kann. Mit diesem Verfahren behandelte Champignons sind bereits als neuartige Lebensmittel zugelassen (♦ Tabelle 1).

Forschung im NewFoodSystems-Innovationsraum

Ein weiterer Vorteil, den die Ständerpilze mitbringen, ist ihre Fähigkeit, auf unterschiedlichsten Nebenströmen aus der Agrar- und Lebensmittelindustrie zu wachsen. Als wichtige Destruenten im Wald besitzen sie Enzyme, die es mit Lignin aufnehmen können, der schwer abbaubaren Substanz in verholzten pflanzlichen Zellwänden. Ob Kleie, Treber, Trester, Presskuchen oder Molke, viele Restströme in Lebensmittelqualität können als Substrat für die Fermentation eingesetzt werden. Pilzmyzel als Nahrungsmittel kann also im Sinne der Nachhaltigkeit helfen, Abfälle zu vermeiden und das Ziel einer zirkulären Wirtschaft unterstützen. Im Rahmen des Innovationsraums NewFoodSystems setzt hier das vom Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR) geförderte Projekt „LacOat4Fungi“ an. Zu den Projektpartnern gehören Milei GmbH, das Fraunhofer-Institut für Verfahrenstechnik und Verpackung, Albert Handtmann Maschinenfabrik GmbH & Co. KG, Albert Handtmann Armaturenfabrik GmbH & Co. KG und die Justus-Liebig-Universität Gießen.

Ziel des Projekts ist die Produktion von neuen Lebensmittelsystemen auf Basis von biotechnologisch produziertem Pilzmyzel. Für die Herstellung dieser Lebensmittel müssen, im Gegensatz zu vielen anderen veganen und vegetarischen Produkten mit Ähnlichkeit zu Produkten tierischen Ursprungs, keine Kulturpflanzen wie Erbsen oder Soja angebaut werden. Stattdessen werden zwei bereits existierende, aber bislang wenig genutzte Nebenströme aus der Lebensmittelindustrie als Substrate für die Fermentation verwendet: Hafer-Okara aus der Haferdrink-Produktion und ein Molkenkonzentrat, das bei der Herstellung von Käse anfällt.

Seit Beginn des Projekts im November 2023 wurden bereits 56 Speisepilze untersucht und ihr Wachstum auf den Nebenströmen charakterisiert. Geeignete Pilz-Substrat-Kombinationen wurden identifiziert und die Produktion im Pilotmaßstab steht nun in den Startlöchern. Nach der Kultivierung werden die unlöslichen und löslichen Fraktionen des Myzels isoliert. Diese sollen dann, je nach Eigenschaften und Textur, für die Entwicklung von alternativen Fleischwaren und Milchprodukten verwendet werden.

Wie ist die aktuelle Marktlage?

Einige Start-ups tüfteln bereits seit langem an der Kultivierung von Pilzmyzel. Deutsche Beispiele sind Infinite Roots aus Hamburg, Kynda Biotech aus Jelmstorf bei Uelzen oder Nosh.bio aus Berlin.

Ob das fermentativ gewonnene Myzel als Lebensmittel in den Verkehr gebracht werden darf oder nicht, muss von Fall zu Fall geklärt werden. Wie aus einer Pressemitteilung des Niedersächsischen Ministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz hervorgeht, handele es sich bei dem von Kynda Biotech produzierten Myzel nicht um ein *Novel Food* und brauche daher keine Zulassung [20]. Der Produktionsstamm bleibt ein Geheimnis, und so lässt sich nur mutmaßen, dass es sich vielleicht um den Schimmelpilz *Fusarium venenatum* handelt; das einzige aktuell am europäischen Markt erhältliche Pilzmyzel, das trotz Produktion in Flüssigkultur keine Zulassung im Sinne der Novel-Food-Verordnung benötigt. Verkauft wird es bereits seit 1985 in Großbritannien unter dem Namen „Quorn“ und kam dem Stichtag vom 15.05.1997 damit bereits 12 Jahre zuvor.

Währenddessen berichtet das Handelsblatt, dass Konkurrent Infinite Roots für ihr Produkt bereits vor zwei Jahren einen Antrag auf Zulassung bei der EFSA eingereicht habe [21]. Unter den laufenden Bewerbungsverfahren, die auf der Website der Europäischen Kommission einsehbar sind, sind sie allerdings nicht auffindbar [22]. Dafür gibt es bei dem amerikanischen Pendant der EFSA, der FDA (*U.S. Food and Drug Administration*, dt.: U.S. Bundesbehörde zur Überwachung von Nahrungs- und Arzneimitteln), einen Treffer. Der Antrag auf GRAS-Status (*Generally Recognized as Safe*; dt.: allgemein als sicher anerkannt) für das Myzel des Lungen-Seitlings (*Pleurotus pulmonarius*) ist noch in Bearbeitung [23].

Der amerikanische GRAS-Status kann äquivalent zum europäischen QPS-Status betrachtet werden und wurde erst kürzlich an das von The Better Meat Co. produzierte Myzel vom Bäcker-schimmel (*Neurospora crassa*) vergeben [24]. Der Schlauchpilz darf nun in den USA in Fleisch-, Fisch- und Milchanaloga eingesetzt werden. Nosh.bio arbeitet auch mit einem Schimmelpilz: „Koji“ (*Aspergillus oryzae*), der unter anderem in der Fermentation von Sojabohnen zur Herstellung von Sojasoße eingesetzt wird [25]. Die submers kultivierte Biomasse ist sowohl in den USA als auch der EU zugelassen. Vor Kurzem wurde ein Produkt mit Ähnlichkeit zu Frischkäse auf Basis von fermentativ gewonnenem „Koji-Protein“ in den deutschen Einzelhandel eingeführt, das vom Berliner Start-up Formo entwickelt wurde.

Das Schimmelpilz-Myzel ist also bereits im Aufschwung, während das Myzel der als Lebensmittel geschätzten Ständerpilze noch auf ihre Sicherheitsbewertungen wartet. Es wird noch eine Weile dauern, bis Myzel und Fruchtkörper der bekannten Speisepilze nebeneinander im örtlichen Supermarkt liegen. Dennoch schätzen die Autor*innen dieses Artikels, dass unser Gesetzgeber den Verbraucherschutz und die Sicherheit von Lebensmitteln priorisiert und warten dafür gerne die Urteile der EFSA ab.

Förderung

Beitrag im Rahmen der Publikationsreihe des Innovationsraums NewFoodSystems – Fördermaßnahme „Innovationsräume Bioökonomie“ im Rahmen der „Nationalen Forschungsstrategie BioÖkonomie 2030“ des Bundesministeriums für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR).



Danksagung

Die Autor*innen danken dem BMFTR-Innovationsraum NewFoodSystems für die Förderung des Vorhabens LacOat4Fungi (FKZ: 031B1477). Mehr Informationen unter www.newfoodsystems.de

Angaben zu Interessenkonflikten und zum Einsatz von KI

Die Autor*innen erklären, dass keine Interessenkonflikte bestehen und bei der Erstellung des Manuskripts keine KI-Anwendungen eingesetzt wurden.

Literatur

1. Statistisches Bundesamt Deutschland: Betriebe, Erntefläche, Erntemenge (Speisepilze): Tabelle 41214-0001. www-genesis.destatis.de/genesis/online?sequenz=statistikTabellen&selectionname=41214#abreadcrumb (last accessed on 26 September 2024).
2. Bergmann P: Der Lebenszyklus eines Ständerpilzes und die biotechnologische Nutzbarmachung des Myzels: Created in BioRender, modified after Soe, Z. (2023). Life Cycle of Mushroom. 2024.
3. Verordnung (EU) 2015/2283 des europäischen Parlaments und des Rates vom 25. November 2015 über neuartige Lebensmittel.
4. Durchführungsverordnung (EU) 2017/2470 der Kommission vom 20. Dezember 2017 zur Erstellung der Unionsliste der neuartigen Lebensmittel.
5. European Commission: Food and Feed Information Portal Database: EU Novel Food status Catalogue. <https://ec.europa.eu/food/food-feed-portal/screen/novel-food-catalogue/search> (last accessed on 26 September 2024).
6. Koutsoumanis K, Allende A, Alvarez-Ordóñez A, et al.: Scientific opinion on the update of the list of QPS-recommended biological agents intentionally added to food or feed as notified to EFSA (2017-2019). *EFSA Journal* 2020; 18(2).
7. Hao H, Zhang J, Wang Q, et al.: Transcriptome and differentially expressed gene profiles in mycelium, primordium and fruiting body development in *Stropharia rugosoannulata*. *Genes (Basel)* 2022; 13(6).
8. Lacourt I, Duplessis S, Abbà S, Bonfante P, Martin F: Isolation and characterization of differentially expressed genes in the mycelium and fruit body of *Tuber borchii*. *Appl Environ Microbiol* 2002; 68(9): 4574–82.
9. Song H-Y, Kim D-H, Kim J-M: Comparative transcriptome analysis of dikaryotic mycelia and mature fruiting bodies in the edible mushroom *Lentinula edodes*. *Sci Rep* 2018; 8(1): 8983.
10. Tang Y, Li Y-Y, Li H-M, Wan D-J, Tang Y-J: Comparison of lipid content and fatty acid composition between tuber fermentation mycelia and natural fruiting bodies. *J Agric Food Chem* 2011; 59(9): 4736–42.
11. Krahe N-K, Berger RG, Witt M, Zorn H, Omarini AB, Ersoy F: Monokaryotic *Pleurotus sapidus* strains with intraspecific variability of an alkene cleaving DyP-Type peroxidase activity as a result of gene mutation and differential gene expression. *Int J Mol Sci* 2021; 22(3): 1363.
12. Berger RG, Bordewick S, Krahe N-K, Ersoy F: Mycelium vs. fruiting bodies of edible fungi – a comparison of metabolites. *Microorganisms* 2022; 10(7): 1379.
13. Liebenow H, Hahn A, Michalak H: Risiko Pilze – Einschätzung und Hinweise. Berlin 2005.
14. Speroni JJ, Beelman RB, Schisler LC: Factors influencing the agaritine content in cultivated mushrooms, *Agaricus bisporus*. *J Food Prot* 1983; 46(6): 506–9.
15. Cohen N, Cohen J, Asatiani MD, et al.: Chemical composition and nutritional and medicinal value of fruit bodies and submerged cultured mycelia of culinary-medicinal higher Basidiomycetes mushrooms. *Int J Med Mushrooms* 2014; 16(3): 273–91.
16. Schaafsma G: The protein digestibility-corrected amino acid score. *J Nutr* 2000; 130(7): 1865S–7S.
17. Edwards DG, Cummings JH: The protein quality of mycoprotein. *Proc Nutr Soc* 2010; 69(OCE4).
18. Barreira JCM, Oliveira MBPP, Ferreira ICFR: Development of a novel methodology for the analysis of ergosterol in mushrooms. *Food Anal Methods* 2014; 7(1): 217–23.
19. Ahlborn J, Stephan A, Meckel T, Maheshwari G, Rühl M, Zorn H: Upcycling of food industry side streams by basidiomycetes for production of a vegan protein source. *Int J Recycl Org Waste Agricult* 2019; 8(S1): 447–55.
20. Niedersächsisches Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz: Landwirtschaft im Wandel: Ministerin Miriam Staudte auf Sommertour in Helmstedt und Uelzen. Hannover 2024.
21. Katrin Terpitz: Infinite Roots bekommt frisches Kapital für Fleischersatz aus Pilzen. *Handelsblatt* 2024, 25 January 2024. www.handelsblatt.com/unternehmen/handel-konsumgueter/lebensmittel-infinite-roots-bekommt-frisches-kapital-fuer-fleischersatz-aus-pilzen/100010050.html (last accessed on 26 September 2024).
22. European Commission: Summary of applications and notifications: https://food.ec.europa.eu/safety/novel-food/authorisations/summary-applications-and-notifications_en (last accessed on 26 September 2024).





23. U.S. Food and Drug Administration: GRN No. 1152: Phoenix oyster mushroom (*Pleurotus pulmonarius*) mycelial biomass. www.cfsanappsexternal.fda.gov/scripts/fdcc/index.cfm?set=GRASNotices&id=1152 (last accessed on 5 September 2024).
24. U.S. Food and Drug Administration: GRN No. 1117: Mycelial biomass from *Neurospora crassa*. www.cfsanappsexternal.fda.gov/scripts/fdcc/?set=GRASNotices&id=1117 (last accessed on 5 September 2024).
25. Elaine Watson: Meet the founders: Nosh.bio's Tim Fronzek and Felipe Lino... 'We're the only ones making a meat analog from a single ingredient'. *AgFunderNews* 2024, 26 April 2024. <https://agfundernews.com/meet-the-founders-nosh-bios-tim-fronzek-and-felipe-lino-were-the-only-ones-making-a-meat-analog-from-a-single-ingredient> (last accessed on 26 September 2024).

Anzeige

© arthobbit/Stock/Getty Images Plus



Peer-Review-Beiträge der ERNÄHRUNGS UMSCHAU sind als englischer Volltext frei zugänglich (CC-BY-NC-ND). Die deutsche Printausgabe erreicht Monat für Monat über 8 000 Leser*innen. Die ERNÄHRUNGS UMSCHAU ist die auflagenstärkste deutschsprachige Abonnementzeitschrift für Ernährungsfachkräfte.*

Erhöhen Sie die Sichtbarkeit Ihrer Publikation durch Freischaltung des deutschen Artikels!



Wir bewerben Ihre Original-Publikationen auch via social media:

www.instagram.com/ernaehrungsumschau/

www.facebook.com/EUmschau/

www.linkedin.com/company/ernaehrungsumschau

Mehr Informationen:

www.ernaehrungs-umschau.de/fachzeitschrift/hinweise-fuer-autoren/

kontakt@ernaehrungs-umschau.de

* 8 288 Druckexemplare pro Ausgabe, IVW-Durchschnitt für den Zeitraum 01.07.2024–30.06.2025

**ERNÄHRUNGS
UMSCHAU**
FORSCHUNG
& PRAXIS

Insekten als nachhaltige Proteinquelle

Potenziale und Herausforderungen

Benedikt Jahnke, Berlianti Puteri, Christian Rung, Mirjam Busch, Simon Früh, Andreas Detzel, Rebecca Rüsçh, Kathleen Oehlke

Einleitung

Die Lebensmittelproduktion wird, mit dem voraussichtlichen Wachstum der Weltbevölkerung auf ca. 9,7 Mrd. im Jahre 2050, um etwa 70 % ansteigen müssen [1]. Die Auswirkungen des Klimawandels gefährden zusätzlich die globale Ernährungssicherheit. Der Lebensmittelsektor steht damit vor der Herausforderung, seine Umweltauswirkungen zu reduzieren und gleichzeitig die Menge der auf dem globalen Markt produzierten Lebensmittel zu erhöhen. Die Suche nach alternativen Nahrungs- und Proteinquellen mit geringeren Umweltauswirkungen ist dafür ein wesentlicher Baustein.

Insekten als Lebens- und Futtermittel werden als Teil eines Lösungsansatzes für die Herausforderungen der Ernährungssicherheit diskutiert. Die Insektenzucht ermöglicht nicht nur die Bereitstellung von Proteinen, sondern, unter Berücksichtigung der geltenden Futtermittelregularien, auch eine kreislaforientierte Verwertung von Nebenströmen aus der Lebens- und Futtermittelproduktion [2]. Während weltweit ca. 2100 essbare Insektenarten bekannt sind, wurden bislang der Mehlkäfer (*Tenebrio molitor*, Coleoptera: Tenebrionidae) im Larvenstadium (gelber Mehlwurm), die Wanderheuschrecke (*Locusta migratoria*, Orthoptera: Acrididae), die Hausgrille (*Acheta domestica*, Orthoptera: Gryllidae, Heimchen) sowie Larven des glänzenschwarzen Getreideschimmelkäfers (*Alphitobius diaperinus*, Coleoptera: Tenebrionidae, Buffalowurm) als neuartige Lebensmittel in der EU zugelassen [3]. Die Produktion von Insektenproteinen erfordert eine Reihe sukzessiver Prozessschritte, die von der Aufzucht bis zur finalen Verarbeitung reichen (♦ Abbildung 1). Dabei umfasst die Futtermittelbereitstellung die Herstellung und den Transport der Futtermittel sowie die Konditionierung zu fertigem Substrat. Die Zucht findet in klimatisierten Räumen statt und unterteilt sich in Aufzucht der Junglarven, Mast sowie Reproduktion. Bei der Weiterverarbeitung können neben den dargestell-

Abstract

Im Rahmen des NewFoodSystems-Projekts „Pr:Ins“ wurde die Produktion und Vermarktung von Larven des Mehlkäfers (*Tenebrio molitor*; Coleoptera: Tenebrionidae; Mehlwürmer) als alternative Proteinquelle in Bezug auf Qualität, Nachhaltigkeit und Verbraucherakzeptanz betrachtet. Die Forschungsergebnisse zeigen vielversprechende Entwicklungsmöglichkeiten. So weisen Mehlkäferlarven ein günstiges Nährwertprofil mit hohem Proteingehalt auf, können durch nachhaltige Produktionsmethoden, u. a. durch Nutzung von Nebenprodukten, umweltschonend produziert werden und stoßen bei etwa 45 % der Verbraucher*innen auf grundsätzliche Akzeptanz. Als Futtermittel kommen u. a. zahlreiche Nebenströme aus der Lebens- und Futtermittelproduktion in Frage, was aus ökologischer Sicht günstig ist, gleichzeitig den größten Kostentreiber darstellt. Zentrale Herausforderungen umfassen darüber hinaus die Optimierung von Produktionsprozessen und Verarbeitungstechnologien, den Umgang mit potenziellen Sicherheitsrisiken sowie die Entwicklung zielgruppengerechter Marketingstrategien. Hier sollten zukünftige Forschungs- und Entwicklungsarbeiten ansetzen, um das Potenzial von Mehlkäferlarven als innovative Proteinquelle vollständig zu erschließen.

Zitierweise

Jahnke B, Puteri B, Rung C, Busch M, Früh S, Detzel A, Rüsçh R, Oehlke K: Insects as a sustainable protein source. Potential and challenges. Ernährungs Umschau 2026; 73(2): online first.

Open access

The English version of this article is available online: DOI: 10.4455/eu.2025.058

Peer-Review-Verfahren

Manuskript (Übersicht) eingereicht: 28.02.2025; Überarbeitung angenommen: 25.08.2025

Dr. Benedikt Jahnke¹, Berlianti Puteri¹

Christian Rung², Mirjam Busch², Simon Früh², Andreas Detzel²

Rebecca Rüsçh³, Dr. Kathleen Oehlke³

¹ Universität Kassel, Fachbereich Ökologische Agrarwissenschaften, Fachgebiet Agrar- und Lebensmittelmarketing, Witzenhausen, Deutschland

² Institut für Energie und Umweltforschung gGmbH, Heidelberg, Deutschland

³ Max Rubner-Institut, Bundesforschungsinstitut für Ernährung und Lebensmittel, Institut für Lebensmittel- und Bioverfahrenstechnik, Karlsruhe, Deutschland

ten Schritten (Trocknung, Vermahlung, Entfettung, Proteinextraktion) auch andere Verfahren wie die Extrusion zum Einsatz kommen.

Damit sich Insekten als Lebensmittel erfolgreich am Markt etablieren können, müssen Wissenslücken hinsichtlich Nachhaltigkeit, Wirtschaftlichkeit, Verbraucherakzeptanz, Qualität und Sicherheit geschlossen werden. Deshalb ist das Ziel des NewFoodSystems-Projekts „Pr:Ins – Ganzheitliche Bewertung von

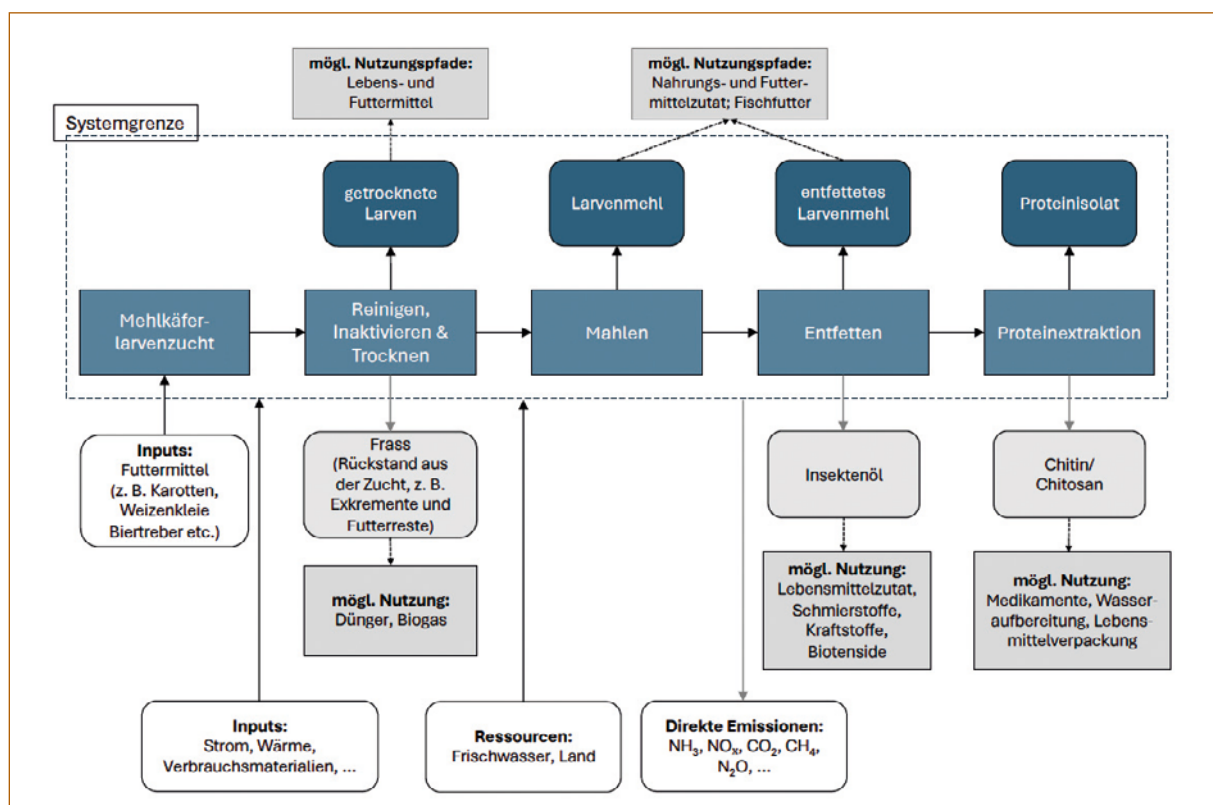


Abb. 1: Systemgrenzen und Prozessschritte der Produktion von Mehlkäferlarven mit den zugehörigen Inputs, Ressourcen und direkten Emissionen
Dargestellt sind die Hauptprozessschritte von der Larvenzucht bis zur Proteinoxtraktion sowie die jeweiligen Zwischenprodukte.

alternativen Proteinquellen unter besonderer Berücksichtigung von Insekten“, Kenntnisse in diesen Bereichen zu erweitern. Im Rahmen von drei Teilprojekten mit jeweils eigenem Schwerpunkt werden Insektenprodukte, mit Fokus auf Mehlkäferlarven, als nachhaltige und innovative Lebensmittel analysiert. Dabei wird u. a. herausgearbeitet, wie die Teilbereiche miteinander verknüpft sind und sich gegenseitig beeinflussen können (♦ Abbildung 2). In diesem Beitrag werden die wichtigsten Aspekte der Qualität und Sicherheit (Teilprojekt 3), der Nachhaltigkeit (Teilprojekt 1) und der Verbraucherakzeptanz (Teilprojekt 2) betrachtet und deren Verknüpfungen aufgezeigt.

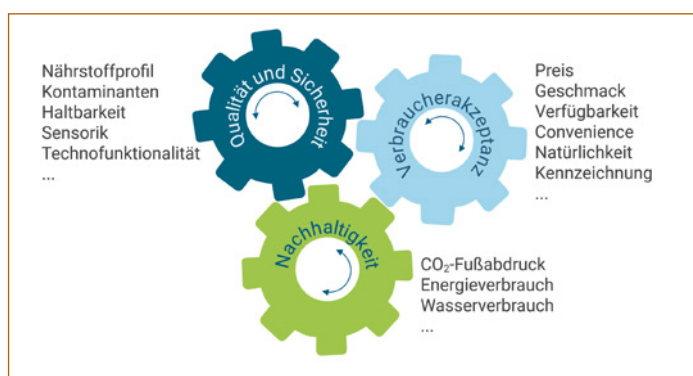


Abb. 2: Schematische Darstellung der drei Teilprojekte zur ganzheitlichen Bewertung der Mehlwurmproduktion bzw. mehlwurm-basierter Produkte mit den jeweils wichtigsten untersuchten Parametern

Qualität und Sicherheit

Nährstoffprofil und ernährungsphysiologische Qualität

Die ernährungsphysiologische Qualität von Insekten ist insgesamt hoch. Speziesabhängige Unterschiede und die Einflüsse der Verarbeitung sind jedoch so groß, dass allgemeine Aussagen kaum möglich sind. Selbst inner-

halb einer Spezies können die Nährstoffzusammensetzung und damit weitere qualitätsbestimmende Merkmale stark schwanken. Wichtige Einflussfaktoren dabei sind die Futtermittel und deren nutritive Qualität, die Aufzuchtbedingungen sowie das Alter bzw. Stadium, in dem die Larven geerntet werden, wie u. a. in eigenen Untersuchungen gezeigt wurde (♦ Abbildung 3).

Frische, d. h. ungetrocknete, Mehlkäferlarven enthalten typischerweise 11–30 % Rohprotein, 6–23 % Fett, 56–71 % Wasser, etwa 1 % Asche und ca. 5 % andere Bestandteile [9]. Mit einem

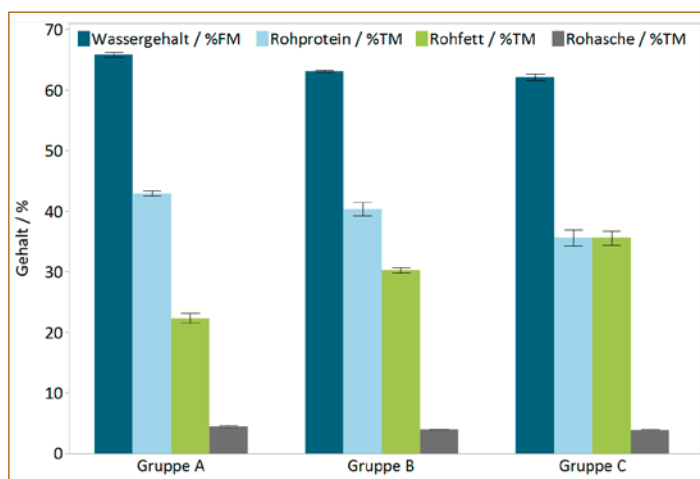


Abb. 3: Beispielhafte Zusammensetzung von Mehlkäferlarven aus einer eigenen Fütterungsstudie, in der Futtermittel und Erntegewicht variiert wurden

Gruppe A: Weizenkleie, Erntegewicht 80 mg; Gruppe B: Rübenpressschnitzel + Trockenschlempe, Erntegewicht 80 mg; Gruppe C: Weizenkleie + Reiskleie + Apfeltrester, Erntegewicht 100 mg
Rohprotein- und Rohfettgehalt beziehen sich auf die Trockenmasse (TM), Wassergehalt und Erntegewicht auf die Frischmasse (FM). Bestimmung von Rohprotein mittels Kjeldahl-Methode [4] mit Umrechnungsfaktor 4,76 [5], von Rohfett mittels Weibull-Stoldt [6, 7], des Wassergehalts gravimetrisch und des Aschegehalts nach Veraschung [8].
Angabe sind Mittelwerte $\pm$ Standardabweichungen von $n = 5$ biologischen Replikaten. (unveröffentlichte Daten)

Restfeuchtegehalt von ca. 1–3 % enthalten getrocknete Mehlkäferlarven und daraus hergestellte Mehle dementsprechend etwa 24–55 % Rohprotein, 28–49 % Fett, 3 % Asche und ca. 10 % andere Bestandteile. Proteinkonzentrate werden über mehrstufige Verfahren hergestellt ($\diamond$ Abbildung 1) und enthalten je nach Prozessführung bis etwa 80 % Protein [10]. Proteinreiche Futtermittel können häufig zu einem höheren Proteingehalt führen, wobei die Proteinquelle eine wichtige Rolle spielt [11]. Mit zunehmendem Larvenalter bzw. Larvenstadium nimmt der Proteingehalt ab. Eine Gewichtszunahme von 80 mg auf 100 mg hatte in eigenen Fütterungsstudien bspw. eine Abnahme des Proteingehalts um rund 10 % zur Folge (unveröffentlichte Daten).

Der Proteingehalt von Lebensmitteln wird häufig mittels Kjeldahl-Analyse bestimmt, bei der sich der Proteingehalt durch Multiplikation des Stickstoffgehalts mit einem Umrechnungsfaktor ergibt. Die Lebensmittelinformationsverordnung VO 1169/2011 schreibt einen Umrechnungsfaktor von 6,25 vor. Bei Insekten führt dieser Faktor aufgrund des hohen Gehalts an Nichtprotein-Stickstoff aus dem Chitin zu einer Überschätzung des Proteingehalts. Für Mehlkäferlarven wurden alternativ die Faktoren 4,76 [5] bzw. 5,33 [12] vorgeschlagen, werden aber noch nicht standardmäßig genutzt. Momentan muss daher davon ausgegangen werden, dass viele Angaben den tatsächlichen Proteingehalt von Insekten um etwa 20 % überschätzen.

Die Proteinverdaulichkeit von Mehlkäferlarven und -mehl ist etwa so hoch wie die von anderen tierischen Proteinquellen, z. B. Fleisch oder Fisch [13]. Berichte über den Einfluss der Verarbeitung, insbesondere Erhitzungsschritte, Garverfahren oder auch Extrusion, sind kaum verfügbar und kommen zu unterschiedlichen Ergebnissen, sodass hier weiterer Forschungsbedarf besteht. Die hohe

Proteinqualität ergibt sich des Weiteren aus dem günstigen Aminosäureprofil, in dem alle für Menschen essenziellen Aminosäuren enthalten sind. Limitierend sind die schwefelhaltigen Aminosäuren Cystein und Methionin; unproblematisch ist hingegen z. B. das in Weizen limitierende Lysin [14]. Das Aminosäureprofil wurde in eigenen, bislang unveröffentlichten Arbeiten durch das Futtermittel und das Larvenalter wenig beeinflusst, was sich mit den Beobachtungen in der Literatur deckt [15].

Der Fettgehalt von Mehlkäferlarven nimmt mit zunehmender Anzahl an Larvenstadien zu und kann bis zu 22 % in der Frischmasse bzw. 50 % in der Trockenmasse betragen, typisch sind Werte um 35 % [9]. Durch eine gezielte Fütterung und einen frühen Erntezeitpunkt konnten in einer eigenen, bislang unveröffentlichten Studie deutlich fettärmere Larven mit lediglich 14 % Fett in der Trockenmasse herangezogen werden. Das Fettsäureprofil zeichnet sich generell durch hohe Gehalte an ungesättigten Fettsäuren aus, insbesondere Ölsäure und α -Linolensäure, die ca. 45 % bzw. ca. 20 % der gesamten Fettsäuren ausmachen [16]. Während das Aminosäureprofil von Mehlkäferlarven weitgehend stabil und unabhängig von der Fütterung ist, kann das Fettsäureprofil durch unterschiedliche Futtermittel beeinflusst werden. Bspw. konnte durch den Zusatz von Lein- oder Chiasamen zum Futtermittel das $\omega 6:\omega 3$ -Verhältnis in Mehlkäferlarven (inkl. ihres Darminhalts) von 50 auf 3–6 gesenkt werden, was für die menschliche Ernährung günstig ist [17].

Da der Verzehr von Insekten nicht wesentlich zur Aufnahme von Kohlenhydraten beiträgt, wird hierauf nicht weiter eingegangen. Erwähnenswert hingegen ist das Chitin, das bei getrockneten Mehlkäferlarven ca. 5 % der Trockenmasse ausmacht. In der Literatur finden sich Hinweise darauf, dass das weitgehend unverdauliche Chitin positive Effekte auf die Darmgesundheit hat; andererseits wird ein negativer Einfluss auf die Proteinverdaulichkeit und die Mineralstoffbioverfügbarkeit diskutiert [18].

Abschließend sei erwähnt, dass verbliebene Futtermittelreste im Darm der Larven zum Nährstoffprofil beitragen können [19], was bei der Interpretation von entsprechenden Studienergebnissen berücksichtigt werden muss. Bei Anwendungen für die menschliche Ernährung ist eine mind. 24-stündige Futterkarenz vor der Tötung zum Zweck der Darmentleerung vorgeschrieben [20], sodass eine mögliche Nährstoffanreicherung durch Futtermittelreste im Darm in der Praxis an Relevanz verliert.

Sensorische Qualität und Verarbeitung

Der Geruch bzw. Geschmack von getrockneten Mehlkäferlarven oder Mehlwurmmehl ist charakterisiert durch würzige/umami, nussige, ölige, „tierische“ Noten mit einem charakteristischen Nachgeschmack [21]. Wie auch bei anderen Lebensmitteln beeinflussen Trocknungs- und andere Verarbeitungsverfahren maßgeblich die sensorischen Eigenschaften eines insektenbasierten Produkts. Auch futtermittelbedingte Einflüsse sind nicht auszuschließen und werden momentan im Rahmen des Projekts „Pr:Ins“ untersucht. Die charakteristischen Aromen sowie der Einfluss von Insektenmehlen z. B. auf Backeigenschaften sind teils limitierend für potenzielle Anwendungen. Sensorisch akzeptabel bzw. aus technofunktionaler Sicht umsetzbar sind etwa in Keksen und Crackern 10–20 % Mehlwurmmehl und in Weizenbrot 5–10 % Mehlwurmmehl [22]. In eigenen, noch unveröffentlichten Arbeiten lieferte ein Anteil von 30 % blanchierten Mehlkäferlarven in herzhaften Snackbällchen gute Ergebnisse. Der Zusatz von Mehlkäferlarven zu pflanzenbasierten Fleischersatzprodukten kann deren Akzeptanz sogar erhöhen [23]. Hingegen wurden bei verschiedenen fleischbasierten Wurstwaren aufgrund von Einbußen bei der Textur 5–10 % Mehlwurmmehl als Obergrenze ermittelt [24]. Inwiefern verschiedene Verarbeitungsverfahren die Funktionalität von Mehlwurmmehlen und daraus hergestellten proteinreichen Fraktionen verbessern können, ist Gegenstand der Forschung [25] und wird ebenfalls im Projekt „Pr:Ins“ untersucht.

Sicherheitsaspekte

Die mikrobiologische Sicherheit von Mehlkäferlarven ist in der Regel nach entsprechender Erhitzung gegeben. Ohne vorherigen Erhitzungsschritt ähneln die möglichen Gefahren denen anderer tierischer Proteinquellen [26]. Da als Vorteil von Insekten genannt wird, dass sie auf Nebenströmen herangezogen werden können, stellt sich die Frage nach einem möglichen Übergang von Kontaminanten aus dem Futtermittel. Mehrere Studien konnten zeigen, dass keine Anreicherung von Mykotoxinen durch Mehlkäferlarven stattfindet [27]. Problematisch hingegen könnte die Anreicherung von Schwermetallen sein [28]. In einer eigenen Fütterungsstudie führte die Fütterung mit Reiskleie bspw. zu einer Anreicherung von Arsen (Daten noch nicht veröffentlicht). Andererseits konnten durch eine Anreicherung mit Zink über das Substrat die Cadmiumgehalte in Mehlkäferlarven reduziert werden [29].

Ein wesentlicher sicherheitsrelevanter Faktor beim Verzehr von Insekten ist ihr allergenes Potenzial. Kreuzallergien mit Hausstaubmilben und Krustentieren stellen für Allergiker*innen einen wesentlichen Hinderungsgrund für den Verzehr dar. Ursächlich sind dafür eine Reihe von Proteinen, darunter Tropomyosin und Argininkinase [30]. Inwiefern die Allergenität von Insekten durch Verarbeitungsverfahren beeinflusst werden kann, ist Gegenstand der aktuellen Forschung. Zumindest eine teilweise Reduktion der Allergenität kann durch Hitzebehandlungen erreicht werden [31]. Zu den üblichen Futtermitteln von Mehlkäferlarven gehören in erster Linie Getreideprodukte. Da Substrate an der Haut haften oder im Darm der Larven vorkommen können, können Spuren von Gluten auch in verarbeiteten Mehlkäferlarven nicht ausgeschlossen werden [21]. Mehlkäferlarven entwickeln sich aber auch auf vielen glutenfreien Substraten gut, sodass grundsätzlich auch glutenfreie mehlwurmbasierte Produkte hergestellt werden können.

Nachhaltigkeitsbewertung: Umweltbilanz und Optimierungspotenziale der Mehlwurmproduktion

Umweltbilanz von Mehlwurmprotein von der Pilot- zur Industrieanlage

Die beschriebenen Hauptproduktionsschritte, von der Futtermittelbereitstellung über die Zucht bis hin zur Proteinextraktion, stellen die technische Grundlage für die industrielle Mehlwurmproduktion dar. Die Anlagen zur Zucht und Verarbeitung befinden sich derzeit auf verschiedenen Technologiereifegraden und Produktionskapazitäten, die von experimenteller Entwicklung bis hin zu marktreifen Industrieanlagen reichen. Labor- und Pilotanlagen arbeiten oft manuell und in begrenztem Produktionsumfang, während industrielle Produktionssysteme durch Automatisierung und höhere Effizienz gekennzeichnet sind.

Die wissenschaftliche Literatur zur Nachhaltigkeit der Mehlwurmzucht und -verarbeitung ist begrenzt. Derzeit liegen lediglich drei Studien vor, die auf Anlagenprimärdaten marktreifer Produktionen mit geringer bis mittlerer Produktionskapazität basieren [32–34]. Die verbleibenden sechs verfügbaren Literaturstudien stützen ihre Analysen auf diese Primärdaten und/oder verschneiden sie mit experimentellen Daten sowie Ergebnissen aus Fütterungsstudien. Die Studien beleuchten grundlegende Aspekte der Mehlwurmproduktion oder -verarbeitung in spezifischen Regionen, bieten jedoch keine umfassenden Umweltbilanzen, da sie nur einzelne Wirkungskategorien adressieren. Die meisten Studien analysieren die potenziellen Auswirkungen auf den Klimawandel, wobei Werte für die Erzeugung frischer Mehlkäferlarven zwischen 1,0 und 4,6 kg CO₂-Äquivalenten pro Kilogramm berichtet wurden [33, 35–37]. Die Bandbreite ist auf Unterschiede in den Futterzusammensetzungen, den Energiequellen und den Produktionsmethoden zurückzuführen. Die bedeutendsten Umweltbelastungen treten dabei bei der Futtermittelproduktion und beim Energieverbrauch während der Zucht auf [32, 34, 36]. Diese beiden Faktoren machen bei der Mast von Mehlkäferlarven in der Regel jeweils bis zu 50 % der gesamten Treibhausgasemissionen

(THG-Emissionen) aus. Andere Faktoren wie Abwasser und Abfälle aber auch die Prozessierung und Verarbeitung der gemästeten Mehlkäferlarven tragen im Allgemeinen nur geringfügig zur Gesamtemissionsbilanz bei. Der Energieverbrauch resultiert größtenteils aus dem Beheizen der Aufzuchtanlagen, während die Emissionen der Futtermittelproduktion aus Anbau, Transport und der Nutzung von Düngemitteln entstehen. Die Wahl des Strommixes beeinflusst die THG-Emissionen, wobei Regionen mit erneuerbaren Energien oder Kernkraft deutlich niedrigere Emissionen haben als solche mit fossilen Brennstoffen [36].

Um die Datenlage zu verbessern und Wissenslücken zu schließen, wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens „Pr:Ins“ Primärdaten verschiedener Insektenfarmen und -verarbeiter in Europa erhoben. Das Ziel ist eine umfassende Analyse der europäischen Mehlwurmproduktion und ihrer Umweltpotenziale mit Blick auf ihre Integration in zukünftige Ernährungssysteme. Anhand der erhaltenen Produktionsdaten konnte die Zucht und Verarbeitung von Mehlkäferlarven sowohl in Pilot- wie auch geplanten Industrieanlagen analysiert werden. Die Ergebnisse zeigten kennzeichnende Unterschiede zwischen den Anlagen, abhängig von Faktoren wie Futterart, Energiequelle, Automatisierungsgrad und geografischer Lage. Pilotanlagen wiesen dabei häufig höhere Umweltbelastungen auf als größere, industrielle Anlagen. Dieses Potenzial zeigte sich auch in der Berechnung der Planungsdaten für eine Industrieanlage der Firma Alpha-Protein GmbH (Bruchsal, D), die ihre Daten für die Bewertung zur Verfügung stellte. Dabei konnten Produktionsoptimierungen im Upscaling zu Verbesserungen von bis zu 72 % der Umweltbelastungen führen. Die Herstellung von frischen Mehlkäferlarven in der geplanten Industrieanlage von Alpha-Protein GmbH zeigt Klimawandelergebnisse, die im unteren Bereich der aus der Literatur bekannten Werte liegen. Dabei trägt die Futtermittelbereitstellung ca. 22 %, die Mast ca. 48 % und die Prozessierung ca. 16 % zum Klimawandelergebnis bei (♦ Abbildung 4). Als Futtermittel wurden Brauherfe, Altbrot,

Lignocellulose und Weizenkleie bilanziert. Der Hauptbeitrag zum Treibhausgaspotenzial kommt dabei aus letzterer bzw. dem ihr zugeordneten Anteil an Weizenanbau und -verarbeitung. Bei Mast und Prozessierung stammt der Hauptbeitrag aus der eingesetzten Energie.

Optimierungspotenziale in der Mehlwurmproteinproduktion

Die Umweltbilanz der Mehlwurpzucht wird primär durch die Futtermittelherstellung sowie den Energieträger und -bedarf für die Mast bestimmt, während Transportwege, Verarbeitung und Infrastruktur nur eine untergeordnete Rolle spielen.

Die Wahl des Futters hat sowohl Einfluss auf die mit der Futtermittelherstellung verbundenen Umweltlasten als auch auf zentrale Zuchtparameter wie die Futterverwertungsrate (FCR), die Überlebensrate und die Aufzuchtdauer. Eine niedrige FCR kombiniert mit einer hohen Überlebensrate optimieren die Ressourcennutzung und minimieren Verluste. Ergänzende primäre Futtermittel wie Karotten können die Aufzuchtdauer verkürzen und die Überlebensrate erhöhen. Nebenprodukte wie Weizenkleie, Bierhefe oder auch Altbrot bieten eine kostengünstige und umweltfreundliche Alternative zu primären Futtermitteln und tragen dazu bei, Kreisläufe zu schließen, was die Ressourcennutzung effizienter gestaltet. Im Vergleich zu anderen Insektenspezies wie der Schwarzen Soldatenfliege zeigen Mehlkäferlarven eine höhere physiologische Sensitivität gegenüber der Komposition und Qualität der Nebenproduktströme wie Untersuchungen u. a. des Max Rubner-Instituts zeigen. Eine suboptimale Zusammensetzung der Nährsubstrate führt zu einer deutlichen Reduktion der Larvenüberlebensrate, was konsekutiv einen erhöhten Ressourceninput und eine Verschlechterung der Umweltbilanz zur Folge hat. Zudem steht die Nutzung von Nebenströmen potenziell in Konkurrenz zu einer bereits etablierten Verwendung in anderen Sektoren. Nebenströme wie Getreidekleie, Obst- und Gemüseabfälle oder Ölschrote werden heute häufig in der Tierfütterung, der Biogasproduktion oder als Rohstoff in der chemischen Industrie eingesetzt. Eine Umwidmung dieser Ressourcen für die Insektenzucht könnte bestehende Wertschöpfungsketten stören und möglicherweise den Druck auf Primärrohstoffe erhöhen, falls diese Nebenströme knapper werden. Sollte der Konsum anderer tierischer Lebensmittel in Zukunft zurückgehen, könnten die dadurch freiwerdenden Nebenströme allerdings für die Insektenzucht genutzt werden.

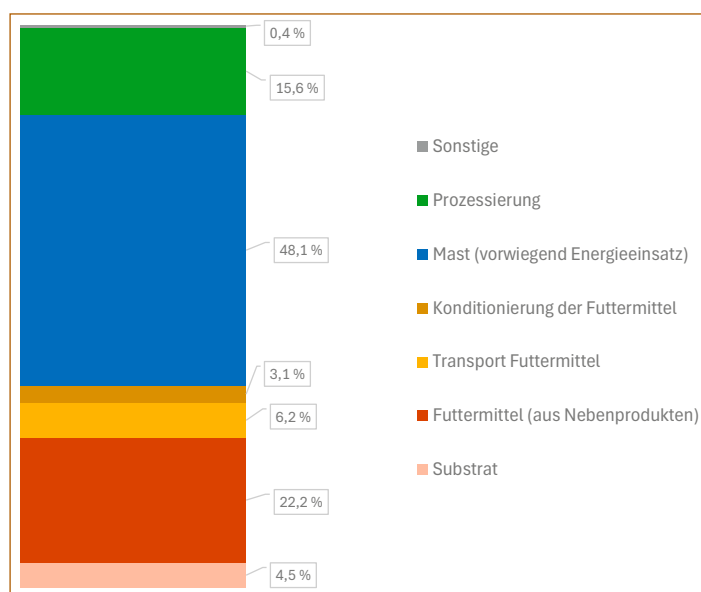


Abb. 4: Beitragsanalyse der Prozessschritte zum Treibhausgaspotenzial der geplanten Industrieanlage von der Alpha-Protein GmbH zur Herstellung von Mehlkäferlarvenmehl (noch unveröffentlichte Daten)

Die Strommenge, die für die Aufrechterhaltung der optimalen Zuchtbedingungen erforderlich ist, stellt den zweitgrößten Einflussfaktor auf die Umweltbilanz dar. Der Wechsel zu erneuerbaren Energien bietet hier erhebliches Potenzial zur Reduktion von Emissionen. Durch regionale Aufzucht und Nutzung lokal verfügbarer Ressourcen lassen sich zudem Transportwege verkürzen und regionale Wirtschaftskreisläufe stärken.

Wie am Beispiel von Alpha-Protein GmbH gezeigt wurde, führt das Upscaling von Pilot- zu Industrieanlagen zu einer Verringerung der Umweltbelastungen, was durch optimierte Ressourcennutzung, den Einsatz fortschrittlicher Technologien sowie verbesserte Produktionsprozesse ermöglicht wird. So werden Skaleneffekte genutzt, um den Energieverbrauch und resultierende Emissionen pro Produktionseinheit weiter zu reduzieren und somit die Nachhaltigkeit der gesamten Wertschöpfungskette zu steigern.

Ein weiteres Optimierungspotenzial liegt in der Nutzung der Nebenprodukte der Mehlwurmproduktion. Die Larvenexkremente und Futterreste aus der Mast (Frass) können als hochwertiger Dünger genutzt werden. Dies reduziert den Bedarf an konventionellen Düngemitteln und verringert dadurch die Emissionen, die bei deren Produktion entstehen. In Zukunft könnte die Mehlwurmproduktion so nicht nur eine wichtige Proteinquelle darstellen, sondern auch ein Bestandteil eines ressourcenschonenden Ernährungssystems werden.

Verbraucherakzeptanz

Akzeptanzbarrieren und Marktpotenzial

Ungeachtet der Tatsache, dass Insekten von mehr als zwei Mrd. Menschen auf der Welt täglich oder als Teil traditioneller Speisen verzehrt werden, gelten sie in westlichen Ländern (z. B. in der EU) als neuartige Lebensmittel und ihr Verzehr wird als unüblich betrachtet. Eine fehlende bzw. zu geringe Akzeptanz und Bereitschaft seitens der Verbraucher*innen, Insekten in die Ernährung zu integrieren, gelten als die größten Herausforderungen für den Aufbau und die Entwicklung eines Markts und führen dazu, dass Insekten bislang v. a. als Futtermittel verwendet werden. Zu den wichtigsten Hindernissen der Verbraucherakzeptanz zählen Ekelgefühle und Lebensmittel-Neophobie sowie Bedenken bzgl. der Qua-

lität und Sicherheit [38, 39]. Hinzu kommen verbraucherexterne produkt- und marktbedingte Faktoren wie die geringe Verfügbarkeit von insektenbasierten Lebensmitteln am Markt und hohe Preise, die einem vermehrten Konsum von Insekten entgegenstehen. Daher leisten Unternehmen trotz z. T. langjähriger Erfahrungen nach wie vor Pionierarbeit, um einen Markt für Insekten aufzubauen. Aufgrund dieser Situation ist es Ziel dieses Beitrags, aktuelle Erkenntnisse aus der Verbraucherforschung zu insektenbasierten Lebensmitteln und deren Vermarktungsmöglichkeiten kompakt darzustellen. Dabei wird zurückgegriffen auf eine Reihe bereits veröffentlichter Daten aus Experteninterviews, Fokusgruppendifkussionen mit Verbraucher*innen, Verbraucherbefragungen und einem Literaturreview [40–43], aus denen die wesentlichen Ergebnisse zusammengefasst werden.

Trotz der dokumentierten Akzeptanzbarrieren für den Konsum von Insekten ist die Gesellschaft in Deutschland nicht uniform. Es gibt eine nicht zu vernachlässigende Gruppe an Verbraucher*innen, die eine grundsätzliche Offenheit gegenüber insektenbasierten Lebensmitteln zeigt. Eigene Studienergebnisse deuten an, dass sich von über 18000 Befragten knapp 45 % den Verzehr von Insekten vorstellen können [41]. Von diesen haben zwischen 30 % und 40 % bereits Insekten gegessen und bewerten diese Erfahrung überwiegend positiv. Beides, die grundsätzliche Offenheit für Insekten sowie positive Geschmackserlebnisse, sind Voraussetzungen für eine weitere Etablierung und sie bilden daher eine wichtige Zielgruppe. Zu beobachten ist, dass Menschen, die sich den Verzehr von Insekten grundsätzlich vorstellen können, in der konkreten Kauf- oder Konsumsituation ein Gefühl von Unsicherheit und inneren Widersprüchen (Neugier/Interesse vs. Ekel) empfinden. Um dieser Ambivalenz entgegenzuwirken, sind genaue Kenntnisse über die Wünsche und Bedürfnisse der Zielgruppen und darauf abgestimmte Marketinginstrumente erforderlich. Ergebnisse und Ansatzpunkte dazu werden in den folgenden Abschnitten vorgestellt.

Produktherstellung und -kennzeichnung

Eine Stellschraube zur Stärkung der Verbraucherakzeptanz ist die Produktherstellung und -kennzeichnung. Die Vermarktung ganzer Insekten, ob einzeln oder als sichtbarer Bestandteil verarbeiteter Lebensmittel, ist aufgrund der existierenden Ekelbarriere mit hohen Hürden verbunden und wird auf absehbare Zeit nur eine marginale Konsumentengruppe finden. Studien aus Europa und den USA dokumentieren eine größere Offenheit gegenüber der Verwendung von Insekten als unsichtbare Zutat (z. B. Mehl) in verarbeiteten Lebensmitteln [44].

Als Zutat sind Insekten potenziell in einer Vielzahl an Produkten aus unterschiedlichen Bereichen einsetzbar, jedoch gilt es, diejenigen Produkte zu identifizieren, die auf die größte Zustimmung treffen. Dies sind v. a. Produkte, die westlichen Verbraucher*innen vom Aussehen und Geschmack vertraut sind. Gerade der Snackbereich scheint hier gute Voraussetzungen zu bieten. So wiesen in einem Choice-Experiment insektenbasierte Cracker im Vergleich zu falafelähnlichen Bällchen höhere Akzeptanzwerte und Wiederkaufsbekundungen auf [41]. Cracker, aber auch andere Snacks wie Riegel, profitieren dabei einerseits vom anhaltenden Convenience-Trend und der Möglichkeit, diese Produkte überall und jederzeit dabei zu haben. Andererseits knüpfen sie, bedingt durch

die hochwertigen Proteine und Fettsäuren der Insekten, an das Interesse von Verbraucher*innen nach Produkten zur Eiweißergänzung, Sporternährung und Nahrungsergänzung an [45]. Eine gezielte Ansprache dieser Interessen, z. B. durch das Angebot von mit „high protein“ gekennzeichneten Produkten, ermöglicht es Herstellern, von einer höheren Zahlungsbereitschaft der Verbraucher*innen zu profitieren, wodurch wiederum höhere Produktionskosten gedeckt werden können.

Um Verbraucher*innen eine bewusste Entscheidung für oder gegen den Kauf eines insektenbasierten Produkts zu ermöglichen, ist eine verständliche Kennzeichnung auf der Vorderseite der Verpackung notwendig. Die in einer eigenen Verbraucherstudie dokumentierten Ansprüche und Wünsche an eine solche Kennzeichnung zeigen, dass eine dezente aber eindeutige Kennzeichnung z. B. in Form eines standardisierten Labels favorisiert wird [43]. Weiterhin legt diese Studie nahe, dass im Abwägungsprozess zwischen der Informations- und Marketingwirkung eines solchen Labels eine allgemeine Bezeichnung „mit Protein aus Insekten“ einer Nennung der spezifischen Insektenart „mit Protein aus Mehlwürmern“ vorzuziehen ist und speziell das Herausstellen des Proteins im Vergleich zu z. B. Insektenmehl auf Anklang bei den Verbraucher*innen trifft.

Verbraucherkommunikation und Produktverkostungen

Zur Stärkung der Verbraucherakzeptanz und erfolgreichen Vermarktung von insektenbasierten Produkten gilt es, die Verbraucherkommunikation zielgerichtet zu entwickeln. Viele Hersteller heben insbesondere die Vorzüge von Insekten in Hinblick auf die ökologische Nachhaltigkeit und Nährwertqualität hervor. Derartige Informationen verbessern nachweislich die Einstellung von Verbraucher*innen gegenüber insektenbasierten Lebensmitteln und erhöhen die Kaufabsicht bzw. Probierbereitschaft [46–48]. Die Ergebnisse einer eigenen Studie zeigen erweiternd, dass eine Ergänzung und Betonung des Aspekts der Natürlichkeit für Verbraucher*innen entscheidungsrelevant ist [41]. Natürlichkeit steht dabei stellvertretend auch für einen guten Geschmack und gesundheitliche Vorteile – beides hedonistische Produktmerkmale. Für den Bereich der Produktentwicklung ließe sich dies berücksichtigen, indem herstellerseitig auf einfache und natürliche Zutaten sowie kurze Zutatenlisten und einen Verzicht auf Zusatz- und Konservierungsstoffe geachtet wird. Der zunehmenden Skepsis von Verbraucher*innen gegenüber sogenannten hochverarbeiteten Produkten sowie der wachsenden Bedeutung von *Clean Labeling* [49] würde damit Rechnung getragen und könnte perspektivisch ein relevantes Merkmal sein, um sich gegenüber vielen anderen veganen und vegetarischen Alternativprodukten abzuheben. Einer gezielten Kommunikation bedarf es auch, um die Qualitäts- und Sicherheitsbedenken von Verbraucher*innen zu adressieren. Dies kann, so verdeutlichen unsere Studienergebnisse, insbesondere durch eine unabhängige Produktvalidierung seitens vertrauenswürdiger Institutionen erfolgen. Gerade für skeptische und unerfahrene Verbraucher*innen können derartige objektive Untersuchungen, die auf den Produktverpackungen durch entsprechende Siegel oder Kennzeichnungen symbolisiert werden, wichtige Entscheidungsgrundlagen darstellen.

Neben Informationen über die Vorteile des Insektenkonsums und dem Herausstellen von *Unique Selling Points* (USPs) insektenbasierter Lebensmittel spielen Verkostungen eine entscheidende Rolle

bei der Steigerung der Verbraucherakzeptanz. So haben Studien gezeigt, dass Verkostungen sich positiv auf die Einstellung der Verbraucher*innen zur Entomophagie auswirken und die Absicht erhöhen, erneut insektenbasierte Lebensmittel zu essen [50, 51]. Verkostungen richten sich als ein unverbindliches und niedrigschwelliges Angebot an Verbraucher*innen, eigene sensorische Erfahrungen zu sammeln. Hinzu kommt, dass bei Verkostungen die Zeitspanne zwischen Information und Verzehr sehr gering ist, wodurch Informationen direkt mit einem Geschmackserlebnis verknüpft und effektiver aufgenommen werden. Verkostungen im öffentlichen Raum haben, anders als beim Verzehr im Privaten, zusätzlich noch eine soziale Komponente. Indem sich andere beim Verkosten beobachten lassen, verliert der Verzehr von Insekten den Charakter des Abnormalen. Dies kann Ekelvorstellungen reduzieren und einen gewissen Schneeball-Effekt auslösen. Verkostungen, gerade wenn es sich dabei für Verbraucher*innen um einen Erstkontakt mit Insekten handelt, kommt eine Schlüsselfunktion zu, indem Negativerfahrungen zu einer grundsätzlichen Ablehnung und Positiverfahrungen zu einer langfristigen Offenheit gegenüber insektenbasierten Lebensmitteln führen können.

Ausblick

Die Produktion und Vermarktung von Mehlkäferlarven als Lebensmittel stehen vor komplexen, aber lösbaren Herausforderungen in den Bereichen Qualität und Sicherheit, Nachhaltigkeit sowie Verbraucherakzeptanz.

Im Bereich Qualität und Sicherheit zeigt sich, dass Mehlkäferlarven ein vielversprechendes Nährwertprofil aufweisen, das durch gezielte Fütterung und optimale Erntezeiten an bestimmte Produkthanforderungen angepasst werden kann. Besonders hervorzuheben sind der hohe Proteingehalt und das günstige Fettsäureprofil, beides Merkmale, die im Zuge einer gesundheits- und fitnessorientierten Ernährung von Seiten der Verbraucher*innen zukünftig noch stärker nachgefragt werden. Die Produktsicherheit kann durch kontrollierte Aufzuchtbedingungen und standardisierte Verarbeitungsprozesse gewährleistet werden und sollte durch unabhängige Institutionen geprüft und zertifiziert werden, um Verbrauchervertrauen aufzubauen. Allerdings bedarf es weiterer Forschung, um bspw. die

Rolle des Chitingehalts besser zu verstehen und potenzielle Allergierisiken vollständig zu erfassen. Auch die Optimierung der Verarbeitungsprozesse hinsichtlich sensorischer und technofunktioneller Eigenschaften bleibt ein wichtiges Entwicklungsfeld.

Die Analyse der im Forschungsrahmen erhobenen Primärdaten zeigt deutliche Optimierungspotenziale beim Übergang von Pilot- zu Industrieanlagen. Die größten Hebel zur Verbesserung der Umweltbilanz liegen in der Futtermittelwahl und dem Energieverbrauch. Der Einsatz von Nebenprodukten aus der Lebensmittelindustrie als Futtermittel kann die Umweltbelastung erheblich reduzieren, wobei die physiologischen Anforderungen der Mehlkäferlarven berücksichtigt werden müssen. Hinsichtlich der Verwendung von Nebenströmen als Futtermittel ist zu beachten, dass auch bei der Insektenmast die Futtermittelregulierungen der EU bindend sind und somit viele nährstoffreiche Nebenströme nicht als Futtermittel für Insekten verwendet werden dürfen. Auch ist zu prüfen, inwiefern das Verfüttern aus ökologischer wie ökonomischer Perspektive als vorteilhaft gegenüber alternativen Verwendungsmöglichkeiten zu bewerten ist. Die Nutzung erneuerbarer Energien und effiziente Produktionssysteme können den ökologischen Fußabdruck weiter verringern. Auch die Integration in regionale Wirtschaftskreisläufe und die Verwertung von Nebenprodukten der Mehlwurmzucht bieten vielversprechende Ansätze für eine nachhaltige Produktion.

Die Verbraucherakzeptanz stellt weiterhin eine zentrale Herausforderung dar, zeigt aber auch positive Entwicklungen: Etwa 45 % der Verbraucher*innen sind grundsätzlich bereit, insektenbasierte Produkte zu konsumieren. Um diese Basis auszubauen und in tatsächliches Handeln zu überführen, ist eine zielgerichtete Produktentwicklung und Vermarktungsstrategie erforderlich. Verarbeitete Produkte, bei denen Insekten als „unsichtbare“ Zutat eingesetzt werden, stoßen auf deutlich höhere Akzeptanz als ganze Insekten. Besonders der Snackbereich bietet vielversprechende Möglichkeiten. Wichtige Erfolgsfaktoren sind eine klare aber dezente Kennzeichnung, eine Natürlichkeitsfokussierte Kommunikation sowie das Ermöglichen von Geschmackserfahrungen durch Verkostungen.

Für die zukünftige Rolle von Insekten in der menschlichen Ernährung wird es entscheidend sein, die unterschiedlichen Bereiche und ihre Wechselwirkungen untereinander gemeinsam

zu betrachten und ganzheitlich weiterzuentwickeln (♦ Abbildung 2). Insektenbasierte Produkte müssen den Verbrauchererwartungen entsprechen und zu wettbewerbsfähigen Preisen angeboten werden. Gleichzeitig muss die Optimierung der Produktionsprozesse sowohl Qualitäts- und Sicherheitsaspekte als auch Nachhaltigkeitsziele berücksichtigen. Dabei spielen die Auswahl der Futtermittel und die Aufzuchtbedingungen eine wesentliche Rolle, da sie sowohl Qualitätsparameter als auch Nachhaltigkeitsaspekte direkt beeinflussen und sich mindestens indirekt auf die Verbraucherakzeptanz auswirken. Mit solch einem integrierten Ansatz kann die Mehlwurmproduktion und -vermarktung dazu beitragen, dass Insekten ihr Potenzial als nachhaltige und akzeptierte Proteinquelle für das Ernährungssystem der Zukunft entfalten.

Förderung

Beitrag im Rahmen der Publikationsreihe des Innovationsraums NewFoodSystems – Fördermaßnahme „Innovationsräume Bioökonomie“ im Rahmen der „Nationalen Forschungsstrategie BioÖkonomie 2030“ des Bundesministeriums für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR).



Gefördert durch:



Danksagung

Die Autoren und Autorinnen danken dem BMFTR-Innovationsraum NewFoodSystems für die Förderung des Vorhabens Pr:Ins – Ganzheitliche Bewertung (FKZ: 031B1236A, B3101236H, 031B1236F) sowie allen Kooperationspartnern, die an dem Projekt beteiligt sind und maßgeblich zum Erfolg des Projekts beigetragen haben.

Mehr Informationen unter → www.newfoodsystems.de

Angaben zu Interessenkonflikten und zum Einsatz von KI

Die Autor*innen erklären, dass keine Interessenkonflikte bestehen und bei der Erstellung des Manuskripts keine KI-Anwendungen eingesetzt wurden.

Literatur

1. Food and Agriculture Organization (FAO): *How to feed the world in 2050*. 2009. www.fao.org/fileadmin/templates/wsfs/docs/expert_paper/How_to_Feed_the_World_in_2050.pdf (last accessed on 19 August 2025).
2. Van Peer M, Frooninckx L, Coudron C, et al.: *Valorisation potential of using organic side streams as feed for Tenebrio molitor, Acheta domesticus and Locusta migratoria*. *Insects* 2021; 12: 796.
3. European Commission: *Commission Implementing Regulation (EU) 2017/2470 of 20 December 2017 establishing the Union list of novel foods in accordance with Regulation (EU) 2015/2283 of the European Parliament and of the Council on novel foods*. 2025.
4. Federal Office of Consumer Protection and Food Safety (BVL): *Official collection of analysis methods according to § 64 of the German Food and Feed Code (LFGB). Untersuchung von Lebensmitteln – Bestimmung des Stickstoffgehaltes in Milch- und Milcherzeugnissen – Teil 1: Kjeldahl-Verfahren und Berechnung des Rohproteingehaltes*. L 0100 10/1.



5. Janssen RH, Vincken J-P, van den Broek LAM, Fogliano V, Lakemond CMM: Nitrogen-to-protein conversion factors for three edible insects: *Tenebrio molitor*, *Alphitobius diaperinus*, and *Hermetia illucens*. *J Agric Food Chem* 2017; 65: 2275–8.
6. Bench BJ, Whittington W, Kranz M, Guerrero F: Validation study. Total fat content by automated acid hydrolysis (HYDROTHERM) – ISO 8262-1. www.gerhardt.de/fileadmin/Redaktion/downloads/Publikationen_und_Whitepaper/Validation_Study_HYDROTHERM_ISO_8262-1_AOAC_922.06_german.pdf (last accessed on 22 October 2025).
7. International Organization for Standardization ISO 8262-1|IDF 124-1:2005: Milk products and milk-based foods – Determination of fat content by the Weibull-Berntrop gravimetric method (Reference method); p. 8.
8. Federal Office of Consumer Protection and Food Safety (BVL): Official collection of analysis methods according to § 64 of the German Food and Feed Code (LFGB). Bestimmung der Asche in Fleisch, Fleischerzeugnissen und Wurstwaren. Gravimetrisches Verfahren (Referenzverfahren). L 0600-4.
9. Payne CLR, Scarborough P, Rayner M, Nonaka K: A systematic review of nutrient composition data available for twelve commercially available edible insects, and comparison with reference values. *Trends Food Sci Technol* 2016; 47: 69–77.
10. Pinel G, Berthelot U, Queiroz LS, et al.: Influence of the processing on composition, protein structure and techno-functional properties of mealworm protein concentrates produced by isoelectric precipitation and ultrafiltration/diafiltration. *Food Chem* 2024; 449: 139177.
11. Kröncke N, Benning R: Influence of dietary protein content on the nutritional composition of mealworm larvae (*Tenebrio molitor* L.). *Insects* 2023; 14: 261.
12. Boulos S, Tännler A, Nyström L: Nitrogen-to-protein conversion factors for edible insects on the Swiss market: *T. molitor*, *A. domesticus*, and *L. migratoria*. *Front Nutr* 2020; 7: 89.
13. Rodríguez-Rodríguez M, Barroso FG, Fabrikov D, Sánchez-Muros MJ: In vitro crude protein digestibility of insects: A review. *Insects* 2022; 13.
14. Oliveira LA, Pereira SMS, Dias KA, et al.: Nutritional content, amino acid profile, and protein properties of edible insects (*Tenebrio molitor* and *Gryllus assimilis*) powders at different stages of development. *J Food Compos Anal* 2024; 125: 105804.
15. Ruschioni S, Loreto N, Foligni R, et al.: Addition of olive pomace to feeding substrate affects growth performance and nutritional value of mealworm (*Tenebrio molitor* L.) larvae. *Foods* 2020; 9: 317.
16. Dreassi E, Cito A, Zanfini A, Materozzi L, Botta M, Francardi V: Dietary fatty acids influence the growth and fatty acid composition of the yellow mealworm *Tenebrio molitor* (Coleoptera: Tenebrionidae). *Lipids* 2017; 52: 285–94.
17. Lawal KG, Kavle RR, Akanbi TO, Miroso M, Agyei D: Enrichment in specific fatty acids profile of *Tenebrio molitor* and *Hermetia illucens* larvae through feeding. *Future Foods* 2021; 3: 100016.
18. Deutsche Gesellschaft für Ernährung (DGE): 15. DGE-Ernährungsbericht. 2024. www.dge.de/fileadmin/dok/wissenschaft/ernaehrungsberichte/15eb/15-DGE-Ernaehrungsbericht.pdf (last accessed on 19 August 2025).
19. Finke MD: Gut loading to enhance the nutrient content of insects as food for reptiles: A mathematical approach. *Zoo Biol* 2003; 22: 147–62.
20. EFSA Panel on Nutrition, Novel Foods and Food Allergens (NDA), Turck D, Bohn T, et al.: Safety of frozen and dried forms of whole yellow mealworm (*Tenebrio molitor* larva) as a novel food pursuant to Regulation (EU) 2015/2283. *EFSA Journal* 2025; 23: e9155.
21. Mancini S, Fratini F, Tuccinardi T, Degl'Innocenti C, Paci G: *Tenebrio molitor* reared on different substrates: is it gluten free? *Food Control* 2020; 110: 107014.
22. Amoah I, Cobbinah JC, Yeboah JA, et al.: Edible insect powder for enrichment of bakery products – a review of nutritional, physical characteristics and acceptability of bakery products to consumers. *Future Foods* 2023; 8: 100251.
23. de Albuquerque RS, Bernardo YAdA, Conte-Junior CA: Edible insects as an alternative protein source in meat products: advantages, challenges, limitations, and gaps. *Eur Food Res Technol* 2025. DOI: 10.1007/s00217-025-04802-1.
24. Borges MM, da Costa DV, Trombete FM, Câmara AKFI: Edible insects as a sustainable alternative to food products: An insight into quality aspects of reformulated bakery and meat products. *Curr Opin Food Sci* 2022; 46: 100864.
25. Mishyna M, Keppler JK, Chen J: Techno-functional properties of edible insect proteins and effects of processing. *Curr Opin Colloid Interface Sci* 2021; 56: 101508.
26. Efsa Scientific Committee: Risk profile related to production and consumption of insects as food and feed. *EFSA Journal* 2015; 13: 4257.
27. Schrögel P, Wätjen W: Insects for food and feed-safety aspects related to mycotoxins and metals. *Foods* 2019; 8: 288.
28. Truzzi C, Illuminati S, Girolametti F, et al.: Influence of feeding substrates on the presence of toxic metals (Cd, Pb, Ni, As, Hg) in larvae of *Tenebrio molitor*: Risk assessment for human consumption. *Int J Environ Res Public Health* 2019; 16: 4815.
29. Keil C, Maeres M, Kröncke N, Benning R, Haase H: Dietary zinc enrichment reduces the cadmium burden of mealworm beetle (*Tenebrio molitor*) larvae. *Scientific Reports* 2020; 10: 20033.
30. Ribeiro JC, Sousa-Pinto B, Fonseca J, Fonseca SC, Cunha LM: Edible insects and food safety: allergy. *J Insects Food Feed* 2021; 7: 833–47.
31. Yang J, Zhou S, Kuang H, Tang C, Song J: Edible insects as ingredients in food products: nutrition, functional properties, allergenicity of insect proteins, and processing modifications. *Crit Rev Food Sci Nutr* 2024; 64: 10361–83.
32. Oonincx DGAB, de Boer IJM: Environmental impact of the production of mealworms as a protein source for humans – a life cycle assessment. *PLoS ONE* 2012; 7: e51145.
33. Thévenot A, Rivera JL, Wilfart A, et al.: Mealworm meal for animal feed: Environmental assessment and sensitivity analysis to guide future prospects. *J Clean Prod* 2018; 170: 1260–7.
34. Dreyer M, Hörtenhuber S, Zollitsch W, et al.: Environmental life cycle assessment of yellow mealworm (*Tenebrio molitor*) production for human consumption in Austria – a comparison of mealworm and broiler as protein source. *Int J Life Cycle Assess* 2021; 26: 2232–47.
35. Joensuu K, Silvenius F: Production of mealworms for human consumption in Finland: A preliminary life cycle assessment. *J Insects Food Feed* 2017; 3: 211–6.
36. Modahl IS, Brekke A: Environmental performance of insect protein: A case of LCA results for fish feed produced in Norway. *SN Applied Sciences* 2022; 4: 183.
37. Zlaugotne B, Sanchez FAD, Pubule J, Blumberga D: Protein alternatives for use in fish feed – life cycle assessment of black soldier fly, yellow mealworm and soybean protein. *Environ Climate Technol* 2023; 27: 581–92.
38. Onwezen MC, Bouwman EP, Reinders MJ, Dagevos H: A systematic review on consumer acceptance of alternative

- proteins: Pulses, algae, insects, plant-based meat alternatives, and cultured meat. *Appetite* 2021; 159: 105058.
39. Sogari G, Riccioli F, Moruzzo R, et al.: Engaging in entomophagy: The role of food neophobia and disgust between insect and non-insect eaters. *Food Qual Prefer* 2023; 104: 104764.
 40. Puteri B, Jahnke B, Zander K: Booming the bugs: How can marketing help increase consumer acceptance of insect-based food in Western countries? *Appetite* 2023; 187: 106594.
 41. Puteri B, Oehlmann M, Jahnke B: Who has an appetite for insects? Identifying segments of early adopters of insect-based food and their product attribute preferences: Insights from a choice experiment study in Germany. *Food Res Int* 2024; 196: 114994.
 42. Puteri B, Suckert M, Kocaaydin S, Jahnke B: Kurzbericht zur Status-Quo-Analyse in Forschung und Praxis. 2023. https://newfoodsystems.de/wp-content/uploads/2024/01/PrIns_Status-Quo-Bericht_final.pdf (last accessed on 19 August 2025).
 43. Puteri B, Jahnke B: A cute little grasshopper on the front? A qualitative study of consumers' perceptions and expectations of insect-based food labelling in Germany. *Future Foods* 2025; 12: 100705.
 44. Kröger T, Dupont J, Büsing L, Fiebelkorn F: Acceptance of insect-based food products in western societies: A systematic review. *Front Nutr* 2022; 8: 759885.
 45. Nutrition Hub: Trendreport Ernährung 2025. www.nutrition-hub.de/post/trendreport-ernaehrung-trends-2025 (last accessed on 19 August 2025).
 46. Verneau F, La Barbera F, Kolle S, Amato M, Del Giudice T, Grunert K: The effect of communication and implicit associations on consuming insects: An experiment in Denmark and Italy. *Appetite* 2016; 106: 30–6.
 47. Lombardi A, Vecchio R, Borrello M, Caracciolo F, Cembalo L: Willingness to pay for insect-based food: The role of information and carrier. *Food Qual Prefer* 2019; 72: 177–87.
 48. Naranjo-Guevara N, Fanter M, Conconi AM, Floto-Stammen S: Consumer acceptance among Dutch and German students of insects in feed and food. *Food Science & Nutrition* 2021; 9: 414–28.
 49. Grant KR, Gallardo RK, McCluskey JJ: Consumer preferences for foods with clean labels and new food technologies. *Agribusiness* 2021; 37: 764–81.
 50. Menozzi D, Sogari G, Veneziani M, Simoni E, Mora C: Eating novel foods: An application of the Theory of Planned Behaviour to predict the consumption of an insect-based product. *Food Qual Prefer* 2017; 59: 27–34.
 51. Barton A, Richardson CD, McSweeney MB: Consumer attitudes toward entomophagy before and after evaluating cricket (*Acheta domesticus*)-based protein powders. *J Food Sci* 2020; 85: 781–8.

ERNÄHRUNGS FORSCHUNG & PRAXIS UMSCHAU

Die Sonderausgabe „Impulse für die Ernährung von morgen – Forschung und Perspektiven aus NewFoodSystems“ ist eine Sonderpublikation der Zeitschrift ERNÄHRUNGS UMSCHAU.

1. Auflage November 2025
Bezug als PDF-ePaper
www.ernaehrungs-umschau.de/fachzeitschrift/sonderdruckespecial-editions/

Verlag: UMSCHAU ZEITSCHRIFTENVERLAG GmbH
Ein Unternehmen der ACM Unternehmensgruppe

Anschrift: UMSCHAU ZEITSCHRIFTENVERLAG GmbH, Marktplatz 13, 65183 Wiesbaden
Tel.: 0611 36098-0
E-Mail: uzv@uzv.de
Internet: www.ernaehrungs-umschau.de



Geschäftsführung: Christian Schnücke,
Tel.: 0611 3 60 98-134 • Fax 0611 30 13 03

Verantwortlich für den Inhalt:
Dr. Udo Maid-Kohnert (Objekt- und Redaktionsleitung), Dr. Caroline Krämer (stv. Redaktionsleitung), Tel.: 06403 63 77 2
E-Mail: eu-redaktion@mpm-online.de

Koordinationsbüro – Innovationsraum NewFoodSystems
Max Rubner-Institut, Bundesforschungsinstitut für Ernährung und Lebensmittel, Institut für Sicherheit und Qualität bei Obst und Gemüse, Haid-und-Neu-Straße 9, 76131 Karlsruhe und Technische Universität München, School of Life Sciences, Professur Plant Proteins and Nutrition, Weihenstephaner Berg 1, 85354 Freising
Internet: <https://newfoodsystems.de/>

Abo-/Leser*innenservice: Albrecht König,
Tel.: 0611 36098-362, Fax: 0611 36098-113
E-Mail: a.koenig@uzv.de

Gestaltung, Satz: Nitin Gaßen

Gendering: Es wird grundsätzlich die geschlechtergerechte Schreibweise mit dem sog. Gendersternchen (*) verwendet, außer wenn von den Autor*innen explizit anders gewünscht.

Einsatz KI-basierter Anwendungen: KI-basierte Anwendungen kommen mittlerweile in vielen Bereichen, teilweise unbewusst, zum Einsatz (z. B. Such- und Anzeigialgorithmen von Suchmaschinen, die zur Recherche genutzt werden). Die Autor*innen der Beiträge legen bei Einreichung der Manuskripte Art und Umfang einer eventuellen Nutzung KI-basierter Anwendungen offen. Im Abspann der Beiträge ist dies aufgeführt. Für illustrierende Abbildungen nutzt die Redaktion teilweise Fotos und Grafiken aus Bilddatenbanken, die Verwendung von KI-Anwendungen zur Grafikgestaltung und Bildoptimierung kann daher nicht ausgeschlossen werden. Im Bildnachweis ist die Bildquelle gekennzeichnet. Für redaktionell erstellte Texte kommen keine KI-basierten Anwendungen zum Einsatz. Online-Vorschautexte auf der Website können mittels KI-Einsatz für Suchmaschinen optimiert werden.

Die Zeitschrift und alle in ihr enthaltenen einzelnen Beiträge und Abbildungen sind urheber-

rechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Mehr Reichweite für „Junge Forschung“

Deine Abschlussarbeit im Bereich Ernährung oder Diätetik wurde als hervorragend oder sehr gut bewertet? Du möchtest Deine Ergebnisse der deutschsprachigen Ernährungsfachwelt vorstellen? Sprich mit deiner Betreuerin* deinem Betreuer und reiche deine Arbeit stark verkürzt als „Junge Forschung“ bei uns ein!

Das Wichtigste in Kürze:

- Maximal 1 Druckseite (ca. 5500 Zeichen inkl. Leerzeichen) – das ist etwa die Textmenge eines Posters.
- Aufbau orientiert sich am Aufbau wissenschaftlicher Arbeiten:
Einleitung, Methoden, Ergebnisse, Diskussion, Zusammenfassung/Fazit, Literatur
- „Junge Forschung“ erscheint außerhalb des Peer-Review-Verfahrens in der Rubrik „Kurz & bündig“, als Online-Meldung sowie verkürzt auf unseren Social-Media-Kanälen (Twitter, Instagram, Facebook) und durchläuft die Prüfung im Redaktionsprozess (Fachredaktion + Herausgeber)
- Geeignet: Originalarbeiten und Übersichten, quantitative und qualitative Forschung

Interesse? Die Redaktion erreichst Du hier:

eu-redaktion@mpm-online.de
Tel.: 06403-63772

Weitere Tipps in unseren Hinweisen für Autor*innen (konzipiert für Full und Short Paper):



Die Sonderhefte der **ERNÄHRUNGS UMSCHAU** bieten fundiertes Grundlagenwissen sowie Handlungs- und Reflexionsempfehlungen für den Berufsalltag von Ernährungsfachkräften.



Ernährungsberatung
2. Aufl. 2018, 15,00 €



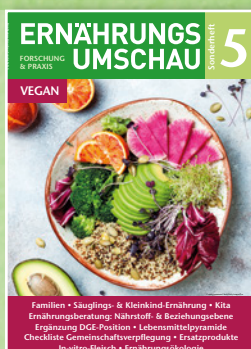
**Ernährungsmedizin
und Diätetik**
3. Aufl. 2022, 15,00 €



Lebensmittel
2018, 15,00 €



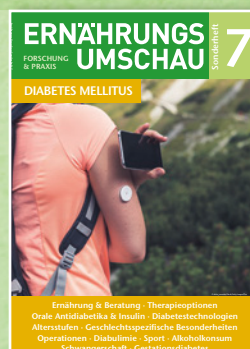
Ernährungstherapie
2019, 15,00 €



Vegan
2020, 16,90 €



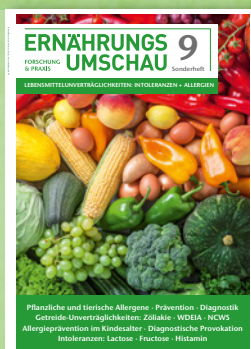
**Lebensmittel 2:
süß & fettig**
2021, 16,90 €



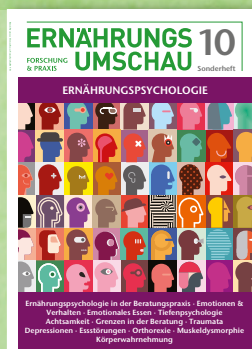
Diabetes mellitus
2022, 16,90 €



**Lebensmittel: Genuss –
Nutzen – Nachhaltigkeit**
2023, 16,90 €



**Lebensmittelunverträglichkeiten:
Intoleranzen
+ Allergien**
2024, 16,90 €



Ernährungspsychologie
2024, 16,90 €



Mangelernährung
2025, 16,90 €
Einführungspreis

