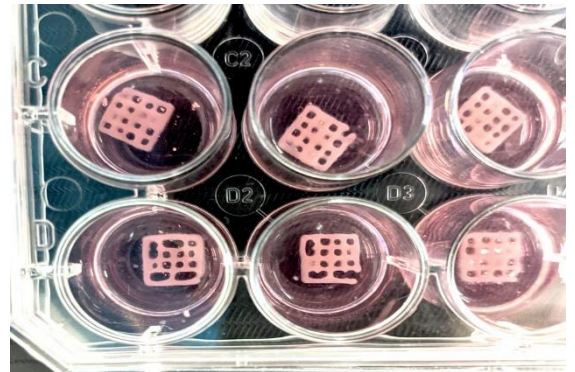


Extrudierte und 3D-gedruckte vegane Stützstrukturen für kultiviertes Fleisch



Koordinierung:	Forschungskreis der Ernährungsindustrie e. V. (FEI), Bonn
Forschungseinrichtung(en):	Technische Universität Dresden Institut für Naturstofftechnik Professur für Lebensmitteltechnik Prof. Dr. Anja Maria Wagemans Technische Universität Berlin Institut für Lebensmitteltechnologie und Lebensmittelchemie FG Lebensmittelbiotechnologie und -prozesstechnik Prof. Dr. Cornelia Rauh/M. Sc. Lisa Wölken Technische Universität Berlin Institut für Biotechnologie FG Angewandte Biochemie Prof. Dr. Jens Kurreck
Industriegruppe(n):	VDMA-Fachverband Nahrungsmittel- und Verpackungsmaschinen e. V., Frankfurt a. M. Gemeinschaft zur Förderung von Pflanzeninnovation e. V. (GFPI), Bonn
Projektkoordinator:	Dr. Sebastian Rakers Bluu GmbH, Hamburg
Laufzeit:	2022 - 2025
Zuwendungssumme:	€ 768.825,--

Ausgangssituation

Kultiviertes Fleisch bietet eine umwelt- und tierfreundliche Alternative zu konventionellem Fleisch. Die Produktion von kultiviertem Fleisch im industriellen Maßstab ist derzeit allerdings noch eine große technische Herausforderung, da es keine etablierten Prozesse für die Produktion von lebensmittelkonformen Stützstrukturen gibt, die es Myozyten ermöglichen, effektiv zu adhären, zu proliferieren und komplexe Fleischstrukturen zu bilden. In den letzten Jahrzehnten wurden allerdings deutliche Fortschritte im Bereich 3D-Biodruck und Gewebezüchtung geschaffen, was die Herstellung präziser Gewebe(mikro)strukturen mit veganem Kulturmedium ermöglicht.

Eine etablierte Herangehensweise zur Erzeugung veganer proteinreicher Strukturen in industriellem Maßstab bietet die thermoplastische Kochextrusion und High-Moisture-Extrusion. In den vergangenen Jahren wurden

mit dieser Technologie zahlreiche vegane Fleischalternativen auf dem Markt eingeführt. Das Potential derart hergestellter Extrudate als Stützstruktur für kultiviertes Fleisch wurde bisher allerdings nicht untersucht und genutzt.

3D-Druck wird in der Lebensmittelindustrie bislang v.a. zur Produktion von Spezialprodukten (z.B. Süßwaren) eingesetzt. Der 3D-Biodruck bietet den Vorteil, Mikrostrukturen von Fleisch präzise in Kombination mit μ CT und CAD nachbilden zu können. Für einen breiteren Einsatz dieser Technik sind allerdings noch Fragen zum Einfluss der Zusammensetzung der Biotinte und der Kultivierungsbedingungen auf die mögliche Herstellung von kultiviertem Fleisch zu klären. Außerdem sind die im 3D-Biodruck verwendeten Materialien und Prozesse oft lebensmitteluntauglich oder beinhalten mit Tierleid assoziierte Komponenten (z.B. Fötale Kälberserum, Matrigel).

Stützstrukturen, die zur Zellbesiedelung und Kultivierung von kultiviertem Fleisch herangezogen werden, müssen eine hohe mechanische Stabilität während der Kultivierung, eine hohe Porosität und eine hohe Biokompatibilität haben. Die Stabilität der Stützstrukturen kann durch die Denaturierung und/oder durch Vernetzung der Proteine und Polysaccharide bei der Kochextrusion, High-Moisture-Extrusion oder beim 3D-Biodruck gewährleistet werden. Die erhöhte Porosität der Stützstrukturen ist für die erfolgreiche Besiedlung der Zellen und eine ausreichende Versorgung der Zellen mit Nährstoffen wichtig. Eine hohe Porosität kann bei der Kochextrusion durch die Extrusionsbedingungen realisiert werden, da die Extrudate nach dem Verlassen der Düse expandieren. Zusätzlich ist davon auszugehen, dass die Porosität durch eine gezielte Einsetzung von thermodynamisch inkompatiblen Protein-Polysaccharid-Mischungen verstärkt werden kann. Zusätzlich kann eine anschließende Nachbehandlung (mechanisch, chemisch, thermisch oder enzymatisch) dazu beitragen die Porosität weiter zu erhöhen. Beim 3D-Druck kann die Versorgung der Zellen durch die sog. Vaskularisierung (d.h. Nachbildung blutgefäßähnlicher Strukturen) gewährleistet werden. Eine hohe Biokompatibilität der Stützstrukturen wird erreicht, wenn diese über sog. Zelladhäsionsmotive verfügen. Dies sind Aminosäuresequenzen, an denen Myozyten adhären und proliferieren können. In pflanzlichen Proteinen aus Soja, Weizen oder Mais wurde eine hohe Biokompatibilität nachgewiesen.

Ziel des Forschungsvorhaben war es, in einem Top-Down-Ansatz durch Extrusion und in einem Bottom-Up-Ansatz durch 3D-Biodruck vegane Stützstrukturen für kultiviertes Fleisch gezielt herzustellen. Im Top-Down-Ansatz sollten hochporöse bzw. faserartige Strukturen extrudiert werden, in denen mikrophasenseparierte Protein-Polysaccharid-Mischungen verwendet wurden. Eine der Komponenten sollte in einer Nachbehandlung zielgerichtet durch thermische oder enzymatische Verfahren herausgelöst werden. Eine hohe Porosität sollte die anschließende Zellbesiedelung mit Hühnermuskelzellen und eine Kultivierung ermöglichen. Im Bottom-Up-Ansatz sollten (als Referenz für die mithilfe der Extrusionsverfahren zu erzeugenden Mikrostruktur) vaskularisierte Stützstrukturen aus zuvor entwickelten veganen Biotinten 3D-gedruckt und besiedelt werden. Durch den kombinierten Bottom-Up- und Top-Down-Ansatz sollte mechanistisches Wissen zur Biokompatibilität und zum Phasenverhalten der Rohstoffe sowie zur erforderlichen Porosität der Stützstrukturen und zu den Kultivierungsbedingungen erarbeitet werden, um gezielt kultivierte Fleischprodukte herstellen zu können, die als Zielprodukte den Texturen und Strukturen von Hühnerfilet und Geflügelhackfleisch entsprechen. Das Vorhaben mündete in der technofunktionellen und wirtschaftlichen Bewertung der Erzeugung von kultiviertem Fleisch mithilfe des Top-Down-Ansatzes.

Forschungsergebnisse

Im Rahmen des ersten Arbeitspakets wurden verschiedene Alginat-Pflanzenprotein-Formulierungen hinsichtlich ihres Mikrophasenverhaltens untersucht und geeignete Systeme identifiziert. Die Charakterisierung der Gelierung zeigte, dass die Proteinzugabe antagonistische Effekte auf makroskopische Stabilität, Gelstärke und Gelierungsgeschwindigkeit ausübt. Für den extrusionsbasierten 3D-Biodruck wurden eine automatisierte Mischeinheit sowie unterschiedliche Mischelemente evaluiert, um Homogenität und Druckfähigkeit der Biotinten zu optimieren. Entscheidend für eine gute Druckbarkeit erwiesen sich eine schnelle Strukturherholung, eine ausgeprägte Fließgrenze sowie ein ausreichend hohes Speichermodul. Ein reduzierter Proteingehalt

führte zu einer beschleunigten Gelierung und verbesserten Druckergebnissen. Erste Zellversuche zeigten vielversprechende Resultate.

Im zweiten Arbeitspaket wurden mikrophasenseparierte Nassextrudate auf Basis von Alginat-Erbsenproteinisolat und Alginat-Sojaproteinkonzentrat hergestellt und strukturell sowie rheologisch charakterisiert. Beim Erbsenprotein führte die Alginatzugabe zu einer erhöhten Faserigkeit und einer Auflockerung der Struktur, was sowohl visuell als auch im Bruchverhalten erkennbar war. Beim Sojaprotein resultierte die Alginatzugabe in einer leichten Erweichung der Extrudate, ohne die Faserigkeit signifikant zu beeinflussen. Die anschließende Zellbesiedelung zeigte über einen Zeitraum von sieben Tagen Zellwachstum auf allen nachbehandelten Extrudaten, trotz unterschiedlicher Mikrostrukturen.

Im dritten Arbeitspaket wurden geeignete tierische Zelllinien, Materialformulierungen und Bioprinting-Strategien identifiziert. Das Einbett-Bioprinting erwies sich dabei als besonders geeignet und effizienter als beispielsweise Direct Ink Writing. Auf Basis von μ CT-Daten konnten komplexe Fleischmodelle (Schwein, Rind, Fisch) reproduziert werden, einschließlich der Nachbildung eines steakähnlichen Aufbaus mit getrennten Muskel- und Fettgewebestrukturen. Die Zugabe von Erbsenprotein zu 2 %igen Alginat-Biotinten führte vermutlich infolge erhöhter Scherbelastung zu einer reduzierten Zellviabilität unmittelbar nach dem Druck. Über einen Kultivierungszeitraum von 14 Tagen zeigte sich jedoch kein Unterschied im relativen Anstieg der Zellviabilität zwischen reinen Alginat- und Alginat-Erbsenprotein-Biotinten.

Im vierten Arbeitspaket wurde ein Proof-of-Concept entwickelt. Dieser bestand aus zusammengepressten, besiedelten Extrudat-Scaffolds, die zu Nugget-ähnlichen Strukturen verarbeitet wurden. Die Nuggets wurden anschließend gebraten und der Wasserverlust wurde nach dem Bratprozess evaluiert. Dabei konnte kein Unterschied zwischen besiedelten und unbesiedelten Nuggets festgestellt werden.

Wirtschaftliche Bedeutung

Die wirtschaftliche Bedeutung des Marktes für Fleischalternativen zeigt sich in dessen rasanter Entwicklung: Laut dem Statistischen Bundesamt (Destatis) stieg der Produktionswert in Deutschland zwischen 2020 und 2024 von 374,9 Mio. € auf rund 647,1 Mio. €. Dieser sprunghafte Anstieg innerhalb weniger Jahre unterstreicht das hohe Innovations- und Wachstumspotenzial des Sektors. Da ca. 80 % der Hersteller in diesem Segment kleine und mittlere Unternehmen (KMU) sind, benötigen diese Unternehmen belastbare wissenschaftlich-technische Grundlagen, um sich strategisch in einem internationalen Wachstumsfeld positionieren und neue Produkte, einschließlich pflanzlich-kultivierter Hybride, entwickeln zu können.

Dieses Projekt liefert hierfür zentrale Erkenntnisse zur Herstellung veganer, lebensmitteltauglicher Stützstrukturen für kultiviertes Fleisch. Durch die Kombination von Extrusion und 3D-Biodruck wurden das Mikrophasenverhalten von Alginat-Protein-Systemen, die rheologischen Eigenschaften druckfähiger Biotinten sowie deren Einfluss auf Strukturstabilität und Zellviabilität eingehend untersucht. Im 3D-Druck konnten auf Basis von μ CT-Daten steakähnliche Mikrostrukturen erfolgreich nachgebildet werden.

Ein weiterer wichtiger Erfolg war der Nachweis, dass tierische Muskelzellen auf Erbsenprotein- und Sojaprotein-Nassextrudaten adhären und proliferieren können. Die daraus herstellbaren nugget-ähnlichen Strukturen zeigen das Potential rein pflanzlicher Extrudate als Scaffolds. Allerdings traten hierbei häufig mikrobielle Kontaminationen auf, die eine Sterilisierung der Extrudate erforderlich machten, ein im Labormaßstab lösbares, im industriellen Scale-up jedoch herausforderndes Thema. Diese Erkenntnisse sind für KMU besonders wertvoll, da sie frühzeitig auf notwendige Hygienekonzepte und Prozessanpassungen hinweisen.

Die Ergebnisse versetzen KMU in die Lage, Nischenprodukte mit hohem wirtschaftlichem Entwicklungspotential zu entwickeln. Durch die Kombination pflanzlicher Rohstoffe mit kultivierten Zellen können hochwertige Fleischalternativen entstehen, die besonders für nachhaltig orientierte Konsumentinnen und Konsumenten attraktiv sind. Auch Hersteller rein pflanzlicher Fleischersatzprodukte profitieren von den Erkenntnissen: Das im Projekt gewonnene mechanistische Verständnis der Mikrophasenseparation und der

Verfestigungsmechanismen kann zur Optimierung bestehender Produkte genutzt werden und verbessert die technologische Basis zukünftiger Entwicklungen.

Insgesamt schafft das Projekt damit eine wesentliche Grundlage für skalierbare, nachhaltige und wirtschaftlich relevante Prozessketten im Bereich kultivierten Fleisches und stärkt insbesondere die Innovations- und Wettbewerbsfähigkeit von KMU.

Publikationen (Auswahl)

1. FEI-Schlussbericht 2025
2. Woelken, L., Bäther, S., Dehmlow, K., Rodriguez Agudo, J. A., Wu, D., Kurreck, J., Wagemans, A. M. & Rauh, C.: Impact of advanced mixing techniques and ink composition on gelation and rheology of alginate-pea-protein-inks in 3D printing for cultivated meat. Food Hydrocolloids 178, 112694, <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2026.112694> (2026).
3. Wu, D., Pang, S., Bäther, S., Woelken, L., Abyzova, M., Morales-Dalmau, J., Haibel, A., Jia, Y., Berg, J., Kauter, B. B., Denesvre, C., Wagemans, A. M., Rauh, C. & Kurreck, J.: Embedded Bioprinting Enables Precise Fabrication of Cultured Meat with Authentic Structural Properties. Food Hydrocolloids, 111795. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2025.111795> (2025).
4. Bäther, S., Woelken, L., Risse, K., Hundschell, C. S. & Wagemans, A. M.: Influence of pea protein on alginate gelation behaviour: Implications for plant-based inks in 3D printing. Applied Rheology, 35(1). <https://doi.org/10.1515/arh-2025-0058> (2025).
5. Woelken, L., Weckowska, D. M., Dreher, C. & Rauh, C.: Toward an innovation radar for cultivated meat: exploring process technologies for cultivated meat and claims about their social impacts. Frontiers in Sustainable Food Systems, 8. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2024.1390720> (2024).
6. Bäther, S., Seibt, J. H., Hundschell, C. S., Bonilla, J. C., Clausen, M. P. & Wagemans, A. M.: Phase behaviour and structure formation of alginate-gelatin composite gels. Food Hydrocolloids, 149, 109538. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.109538> (2024).
7. Ali, A. S. M., Berg, J., Roehrs, V., Wu, D., Hackethal, J., Braeuning, A., Woelken, L., Rauh, C. & Kurreck, J.: Xeno-Free 3D Bioprinted Liver Model for Hepatotoxicity Assessment. International Journal of Molecular Sciences, 25(3). <https://doi.org/10.3390/ijms25031811> (2024).

Weiteres Informationsmaterial

Technische Universität Dresden
Institut für Naturstofftechnik
Professur für Lebensmitteltechnik
Bergstraße 120, 01069 Dresden
Tel.: +49 351 463-32420
Fax: +49 351 463-37761
E-Mail: anja.wagemans@tu-dresden.de

Technische Universität Berlin
Institut für Lebensmitteltechnologie
FG Lebensmittelbiotechnologie & -prozesstechnik
Königin-Luise-Straße 22, 14195 Berlin
Tel.: +49 30 314-71250
Fax: +49 30 314-12370614
E-Mail: cornelia.rauh@tu-berlin.de

Technische Universität Berlin
Institut für Biotechnologie
FG Angewandte Biochemie
Gustav-Meyer-Allee 25, 13355 Berlin
Tel.: +49 30 314-27581
Fax: +49 30 314-27502
E-Mail: jens.kurreck@tu-berlin.de

Forschungskreis der Ernährungsindustrie e.V. (FEI)
Godesberger Allee 125, 53175 Bonn
Tel.: +49 228 3079699-0
Fax: +49 228 3079699-9
E-Mail: fei@fei-bonn.de

Förderhinweis

... ein Projekt der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF)

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Das o. g. IGF-Vorhaben der Forschungsvereinigung Forschungskreis der Ernährungsindustrie e. V. (FEI), Godesberger Allee 125, 53175 Bonn, wird/wurde im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWE) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Bildnachweis - Seite 1: © Lisa Wölken, Technische Universität Berlin

Stand: 20. April 2026