



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 Gelbildungs-fähigkeit 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

Proteinzutat	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 Bildanalyse-Software 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

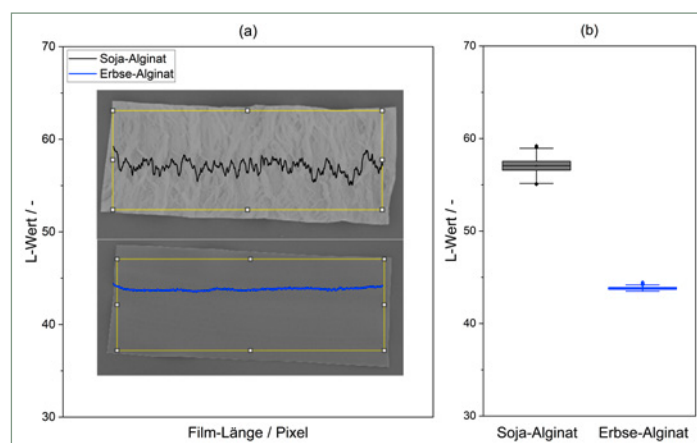


Abb. 1: Bewertung der Homogenität von Protein-Alginat-Filmen mit 40 % Glycerol durch Auftragung (a) der Helligkeitswerte (L-Werte) entlang der Film-Länge und (b) der Streuung der gemessenen Helligkeitswerte

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

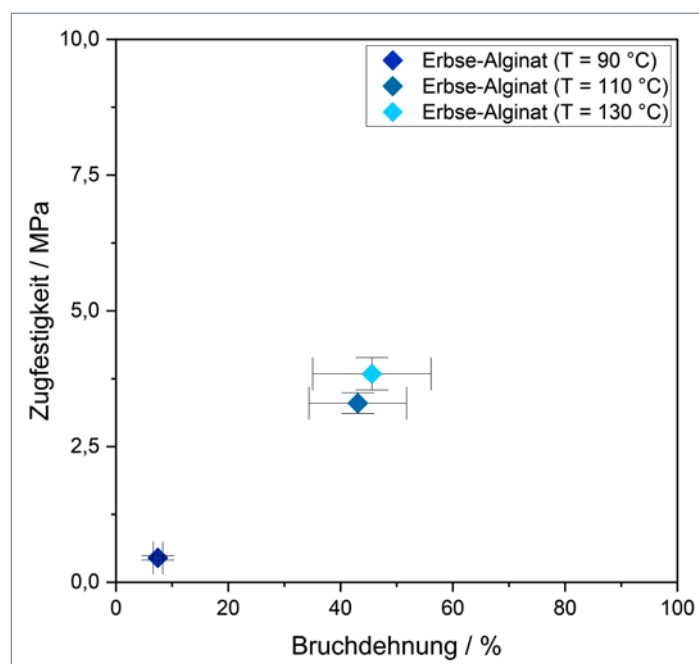


Abb. 2: **Mechanische Belastbarkeit von Erbsen-Alginat-Filmen mit 40 % Glycerol bei verschiedenen Gehäusetemperaturen**
 Prozessparameter: Temperatur = 90–130 °C,
 Schneckendrehzahl = 200 rpm, Trockensubstanz = 40 %

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 Alginatfilmen 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.

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 funktionaler 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 Proteinschichten (FKZ: 031B1219A; 031B1219B). Mehr Informationen unter www.newfoodsystems.de

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.

Angaben zu Interessenkonflikten und zum Einsatz von KI

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