

RessortForschtKlima

Ergebnisse aus drei Jahren Forschung
für mehr Klimaschutz in
Landwirtschaft, Wald und Ernährung

Abschlussbericht – Dezember 2025



Gefördert durch:



Bundesministerium
für Landwirtschaft, Ernährung
und Heimat

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Beteiligte Ressortforschungsinstitute und Herausgeber:



Friedrich-Loeffler-Institut (FLI)

Südufer 10
17493 Greifswald-Insel Riems
T: +49 38351 7-0



Julius Kühn-Institut (JKI)

Bundeforschungsinstitut für Kulturpflanzen
Erwin-Baur-Str. 27
06484 Quedlinburg
T: +49 3946 47-0



Max Rubner-Institut (MRI)

Bundeforschungsinstitut für Ernährung und Lebensmittel
Haid-und-Neu-Str. 9
76131 Karlsruhe
T: +49 721 6625 0



Thünen-Institut

Bundeforschungsinstitut für Ländliche Räume, Wald und Fischerei
Bundesallee 50
38116 Braunschweig
T: +49 531 596 1003

Zitiervorschlag:

RessortForschtKlima (2025)

Ergebnisse aus drei Jahren Forschung für mehr Klimaschutz in Landwirtschaft, Wald und Ernährung:

Abschlussbericht der RessortForschtKlima-Projekte. <https://doi.org/10.3220/253-2025-220>

Bildrechte Titelseite:

Doreen König, Julius Kühn-Institut

Dirk von Soosten, Friedrich-Loeffler-Institut

Max Rubner-Institut

Tania Runge, Thünen-Institut



© Die Autoren / Die Autorinnen.

Dieses Werk wird unter den Bedingungen der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (CC BY 4.0) zur Verfügung gestellt

(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>).

Treibhausgas Reduktion durch innovative Züchtungsfortschritte bei alternativen pflanzlichen Proteinquellen

Thorben Sprink, Yves Sprycha, Anne Zaar, Matthias Herrmann, Nan Ha, Monique Branco-Vieira, Isabella Karpinski, Maximilian Forchert, Dima Sabboura, Til Feike, Frank Hartung und Krishna Pathi (Julius Kühn-Institut); Ferike Thom (Thünen-Institut)

ZIELSETZUNG

Die Substitution von Milch- und Fleischprodukten durch heimische pflanzliche Proteine bietet ein großes Klimaschutzpotenzial im Agrar- und Ernährungssektor. Verbesserte Sorten sowie optimierter Anbau und Verarbeitung pflanzlicher Proteine kann dabei helfen, zusätzliche THG-Minderungspotenziale zu erschließen. Daher zielte das Projekt TRIP auf:

- i) die züchterische Verbesserung von Hafer (*Avena sativa*), insbesondere bezüglich Proteingehalt und Pilzresistenz,
- ii) die Entwicklung moderner Genom-Editing-Methoden zur Erweiterung des genetischen Potenzials von Hafer und Lupine (*Lupinus sp.*) sowie zur Reduktion von Allergenen
- iii) die Bewertung und Verbesserung der Klimawirkung vom Anbau bis zum fertigen Hafer- und Lupinenprodukt, und
- iv) die Analyse internationaler Handelsfolgen von Hafer- und Lupinendrinks.

METHODIK

Das Projekt kombinierte züchterische, molekularbiologische, pflanzenbauliche und sozioökonomische Ansätze, um pflanzliche Proteine als klimaschonende Milch- und Fleischersatzprodukte zu bewerten und zu verbessern.

Züchtung und Molekularbiologie: 2022 und 2023 wurde eine Hafer-Mutantenkollektion (1200 Mutanten) bezüglich des Rohproteingehaltes mittels Kjeldahl-Methode kultiviert und analysiert und eine robuste NIR-Methode (Nahinfrarotspektroskopie) entwickelt. Anschließend wurden die besten Linien zweistufig auf agronomische Eignung, Proteingehalt und Fusarium-Resistenz (Korninfektion nach künstlicher Inokulation) geprüft. Für genetische Kartierung und Markerentwicklung wurden ausgewählte Linien mittels Whole-Exome-Sequencing resequenziert. Zudem wurden Gewebekulturen für Hafer und Lupine erfolgreich etabliert, als Voraussetzung für DNA-basierte und DNA-freie Transformationen, um damit gezielt allergene Suszeptibilitäts-Gene auszuschalten. Dafür wurden existierende Methoden für Gräser auf die untersuchten Pflanzen übertragen und optimierte Gewebekulturverfahren entwickelt.

Klimaschutz vom Feld bis zum Konsumenten: Basierend auf einem 2-jährigen Hafer-Feldversuch (Sorte × Aussaattermin × Bewässerung), Langzeitversuchsdaten (2005-2024) von Hafer und Lupine aus ganz Ostdeutschland, detaillierten Befragungen entlang der Hafer- und Lupinenwerteschöpfungskette, Lebenszyklusanalysen (LCA) und Lebenszykluskostenberechnungen (LCC), Mixed-Model-Analysen (MMA) einer umfangreichen Konsumentenbefragung und Marktanalyse wurde der CO₂-Fußabdruck (Product Carbon Footprint; PCF) von Hafer und Lupine und entsprechender

HIGHLIGHTS

- Gewebekulturen von Hafer und Lupine erfolgreich etabliert und erstmals Genome-Editierung an Hafer durchgeführt
- Selektion besonders interessanter Genotypen der Hafermutanten und Resequenzierung zur Untersuchung dieser Genotypen
- CO₂-Fußabdruck von Hafer- und Lupinenanbau sowie Haferdrink und Lupinentempeh als Milch- und Fleischersatz umfassend bewertet

Produkte vom Feld bis zum Konsumenten umfänglich bewertet und spezifische Klimaschutzpotenziale abgeleitet.

Agrarökonomische Modellierung: Um Änderungen in der Nachfrage nach Haferdrinks abbilden zu können, wurde das agrarökonomische CAPRI-Modell um verarbeitete und zusammengesetzte Lebensmittel erweitert. Alle Teilergebnisse flossen kontinuierlich zwischen den Partnern, sodass Züchtung, Klimabilanz und Marktanalysen eng verzahnt bleiben.

ERGEBNISSE

Feldversuche und Proteinbestimmung: Auf Grundlage der Ergebnisse der Züchtungsversuche und Proteinbestimmungen an 1200 Haferlinien konnten Genotypen mit besonders vielversprechenden Eigenschaften selektiert und im Jahr 2024 in Groß Lüsewitz (Abb. 1) und Quedlinburg angebaut werden.



Abbildung 1: Selektierte Hafer-Mutanten am Standort Groß Lüsewitz 2024. Infektion mit dem Pilz *Fusarium culmorum*

Es wurden die Phänotypisierungsdaten der Versuchsjahre 2022 und 2023 im Vorfeld genutzt, um ein selektiertes Panel mit 91 Hafermutanten auf Grundlage verschiedener Eigenschaften wie Phänotyp, Proteingehalt, Tausendkorngewicht, Blühzeitpunkt, Wuchshöhe oder Anfälligkeit auf Krankheiten zu erstellen. Insgesamt wurde an 75 vielversprechenden Hafermutanten eine Resequenzierung

KLIMAWIRKUNG

Das Projekt trägt mittel- bis langfristig durch züchterische Innovationen, durch neue Erkenntnisse zu klimaschonendem Anbau von Hafer und Lupine sowie zum Konsum von heimischen Milch- und Fleischersatzprodukten zum Klimaschutz bei.

Eine Substitution von Kuhmilch durch Haferdrinks würde ~275.000 (bei 10 % Substitution) bzw. ~550.000 t CO₂-Äq pro Jahr (bei 20 % Substitution) in Deutschland entsprechen.

Eine Reduktion des CO₂-Fußabdrucks (PCF) von Hafer durch verbesserte Sorten und verbesserten Anbau würde zudem eine Reduktion der THG-Emissionen um 25.000 (bei 10 % PCF Reduktion) bzw. 50.000 t CO₂-Äq pro Jahr (bei 20 % PCF Reduktion) in Deutschland ermöglichen.

Zusätzliche Klimaschutzpotenziale ergeben sich durch den optimierten Anbau verbesserter Lupinensorten und dessen Ausweitung, sowie durch die Substitution von Fleisch durch heimische pflanzenbasierte Fleischersatzprodukte.

durchgeführt. Die agronomischen Eigenschaften der selektierten Mutanten sind sehr vielversprechend und werden 2026 mehrortig geprüft.

Die im Rahmen des Projekts neu entwickelte und erfolgreich validierte NIR-Kalibrierung für Hafer erlaubt dank Spektren- erfassung, Referenzanalyse und Modellentwicklung eine präzise und zerstörungsfreie Proteinbestimmung für unbekannte Proben (Abb. 2). Dies unterstützt eine noch effektivere zukünftige Züchtung klimaschonender Hafersorten.

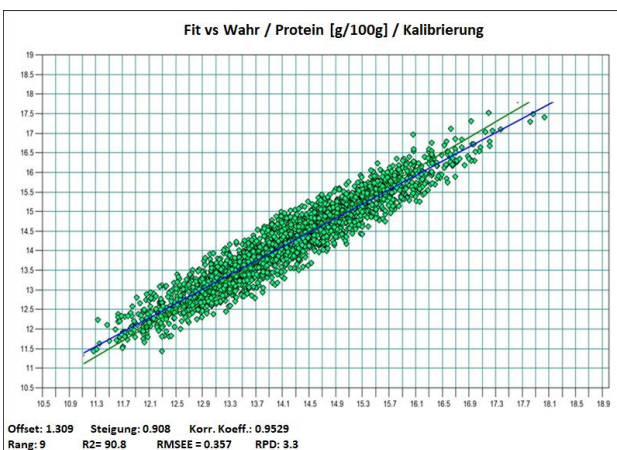


Abbildung 2: Darstellung der entwickelten und validierten NIR-Kalibrierung zur Vorhersage des (Roh)Proteingehaltes mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % für entspelzte und gesunde Haferkörner.

Entwicklung von Gewebekultur für Hafer und Lupine: Um Kandidatengene für die Züchtung mittels neuer Techniken zu überprüfen, ist die Etablierung von Gewebekulturverfahren unabdinglich. Im Verlauf des Projektes konnten funktionierende Protokolle für die Gewebekultur von Hafer und Lupine aus verschiedenen Geweben entwickelt und etabliert werden (Abb. 3). Diese Verfahren sind hoch effizient und ermöglichen erstmals den Einsatz neuer

Züchtungsverfahren, die im weiteren Projektverlauf etabliert wurden.

Als geeigneter Kandidat für den Einsatz von Genome Editing konnte das MLO-Gen im Hafer identifiziert werden, dieses Gen vermittelt eine Mehltau-Resistenz. Mit Hilfe eines Plasmid-Vektors und der PEG-vermittelten Transformation wurden die Komponenten für das Genome Editing erfolgreich in Protoplasten des Hafers eingebracht. Aus den transformierten Protoplasten wurde DNA isoliert und mittels Hochdurchsatz-Sequenzierung die Mutationsrate an den Zielorten im Genom bestimmt. Da die entsprechenden Zielsequenzen so gewählt wurden, dass sie perfekt zu den drei Genomen des Hafers passen, konnten diese erfolgreich verändert werden. Die Analyse der ersten Sequenzierungen ergibt insgesamt eine Mutationsrate von ca. 2-3 % über alle drei Allele.

Parallel dazu wurde das Plasmid mit den Genome-Editing-Komponenten durch Agrobakterien vermittelte Transformation stabil in das Hafergenom eingebracht. Die daraus entstandenen Pflanzen werden gerade für eine mögliche Integration in laufende Zuchtprogramme herangezogen.

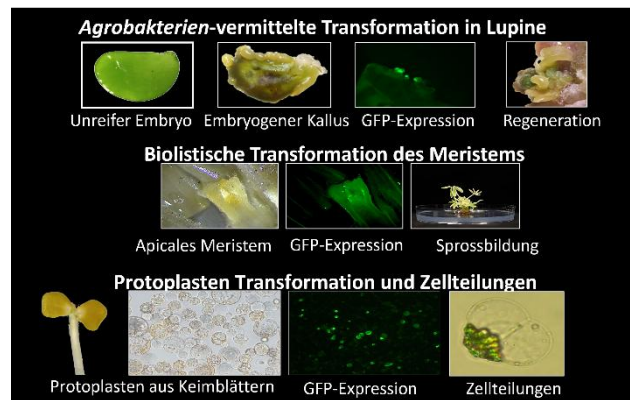


Abbildung 3: Etablierung der Gewebekultur für Lupine. Dargestellt ist die erfolgreiche Regeneration ausgehend vom unreifen Embryo im oberen und die biolistische Transformation des Sprossmeristems im mittleren Teil. Im unteren Teil sind die erfolgreiche Produktion und Transformation von Protoplasten aus Keimblättern exemplarisch dargestellt. GFP steht für das grün fluoreszierende Protein, das als Marker verwendet wurde.

Klimawirkung Anbau von Hafer und Lupine: Die sehr unterschiedlichen Witterungsverläufe in 2023 (feuchtes Frühjahr, später trocken) und 2024 (warm-trockenes Frühjahr, später Starkregen) zeigten signifikante Jahreseffekte im Hafer-Feldversuch in Berlin (Abb. 4). 2024 wurden höhere Erträge, mehr Blattfläche und größere Körner erzielt, jedoch geringere Proteingehalte. Die höchsten Erträge wurden bei Bewässerung und früher Aussaat mit 4,5 t/ha (2024) und 3,1 t/ha (2023) erreicht, während unbewässerte späte Saaten bis zu 56 % darunter lagen. Bewässerung steigerte den Ertrag im Mittel um rund 0,8 t/ha bzw. 27 %, frühe Saat um rund 0,6 t/ha bzw. 23 %. Während durch Bewässerung zusätzliche THG-Emissionen insbesondere für die Pump-Energie entstehen, ist eine frühere Aussaat nicht mit erhöhten Emissionen je Hektar verbunden. Dies macht frühe Aussaaten zu einer sinnvollen Maßnahme zur Reduktion des CO₂-Fußabdrucks im Haferanbau.

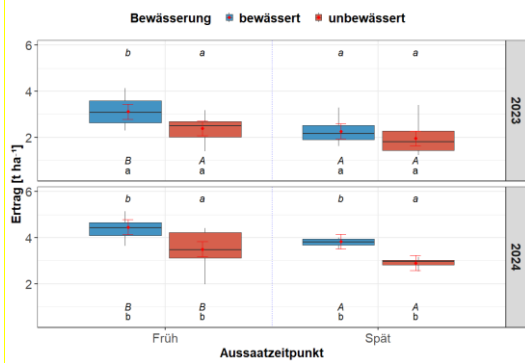


Abbildung 4: Einfluss von Saattermin (früh/spät) und Bewässerung (bewässert/unbewässert) auf Hafererträge in Berlin, getrennt für 2023 und 2024. Varianten die keinen Buchstaben teilen sind signifikant ($p \leq 0,05$) verschieden bzgl. Bewässerung (oben), Saattermin (MITTE) und Jahr (unten).

Auf Basis der freundlicherweise durch die Landeseinrichtungen bereitgestellten Sortenversuchsdaten wurde die raum-zeitliche Entwicklung des CO₂-Fußabdruck des Lupinen- und Haferanbaus von 2005–2024 mittels LCA und MMA bestimmt (Abb. 5). Der Lupinen-Datensatz umfasste dabei 19 Sorten an 23 Standorten in Ostdeutschland, der Hafer-Datensatz 19 Sorten an 22 Standorten in Ostdeutschland und Baden-Württemberg.

Über alle Jahre und Standorte ergibt sich für Lupine ein PCF_Korn von 0,15 kg CO₂-Äq/kg und ein PCF_Protein von 1,6 kg CO₂-Äq/kg Protein, und für Hafer von 0,16 kg CO₂-Äq/kg Korn sowie 3,0 kg CO₂-Äq/kg Protein. Dabei zeigten sich signifikante Unterschiede zwischen Standorten, Jahren und Anbauregionen. Vergleicht man Lupine mit Hafer, so ist der CO₂-Fußabdruck je Kilogramm Korn fast gleich, während er je kg Protein bei Lupine rund 50 % geringer als bei Hafer ist. Neben dem höheren Proteingehalt von Lupine wirkt sich hierbei auch der mögliche Verzicht auf Mineraldünger positiv aus.

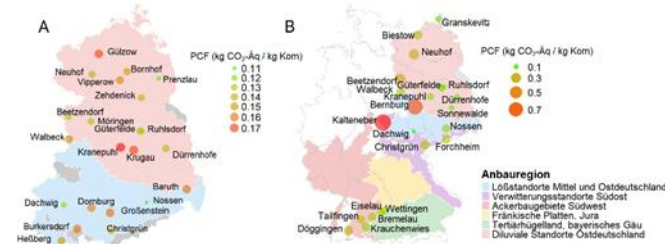


Abbildung 5: (A) Räumliche Unterschiede im CO₂-Fußabdruck (PCF; kg CO₂-Äq je kg Korn) von Lupine in Ostdeutschland, und (B) Hafer in Ostdeutschland und Baden-Württemberg basierend auf Landessortenversuchsdaten (2005-2024) der Länder.

Weiterhin zeigen sich große Unterschiede zwischen Jahren und Standorten: Bei Lupine liegt der PCF_Korn im Mittel bei 0,15, wobei die Werte zwischen den Standorten von minimal 0,11 (Nossen) bis maximal 0,17 (Kranepuhl) reichen, zwischen den Jahren von 0,13 (2018) bis 0,18 (2019). Für Hafer liegt der PCF_Korn im Mittel bei 0,25. Die Spannweite ist jedoch sehr groß, standortbezogen reicht sie von 0,09 (Dachwig) bis 0,94 (Kalteneber). Zwischen den Jahren variieren die Werte von 0,08 (2015) bis 0,92 (2012).

Wertschöpfungskettenanalyse und Akzeptanz:

Der Anteil von Milchalternativen stieg in Deutschland von 5 % (2020) auf über 10 % (2023). Auch der

Fleischersatzmarkt wächst rasant mit jährlich 20-30 % bei pflanzlichen Alternativen.

Der Product Carbon Footprint (PCF) für Haferdrink für die gesamte Wertschöpfungskette (Anbau bis Vertrieb) liegt bei ca. 0,2 kg CO₂-Äq/l (Abb. 6) und für Lupinentempeh bei ca. 0,4 kg CO₂-Äq/kg. Bei beiden Produkten hat die Verpackungsart (Glas bzw. Tetra Pak/Plastik) nur unwesentlichen Einfluss auf den PCF. Der Energieverbrauch zur Herstellung ist bei beiden Alternativprodukten die größte Quelle für THG -Ausstoß (0,084 CO₂-Äq, bzw. 0,215 CO₂-Äq). Aus ökonomischer Sicht stecken in der Verpackungsart (0,16 EUR/l) die Hauptkosten für Haferdrink (Abb. 6), während bei Lupinentempeh Anbau (0,24 EUR/kg) und Verpackung (0,13 EUR/kg) die größten Kostenquellen darstellen. Die Varianten beider Produkte in Tetra Pak und Plastikverpackung stellen nicht nur die ökonomisch vorteilhafteste Option dar, sondern sind auch der Verwendung von Mehrwegglas bzgl. THG-Emission deutlich überlegen. Erst nach 44 Wiederverwendungen erreicht die Pfandflasche des Haferdrink das Niveau des Tetra Paks.

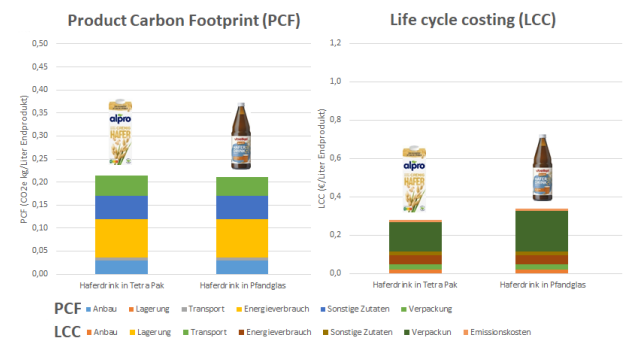


Abbildung 6: Haferdrink: CO₂-Fußabdruck (Product Carbon Footprint; PCF) und Life Cycle Costing (LCC) in zwei Packungsvarianten, Tetra Pak und Pfandglasflasche.

Die Akzeptanzanalyse von Konsumenten (n=1000) zu Einstellungen, Wahrnehmungen und Präferenzen der Verbraucher gegenüber pflanzlichen Milchersatzprodukten zeigte in einem diskreten Choice Experiment, dass die Befragten nur begrenztes Interesse an Bio- und regionaler Produktion haben. Das Vorhandensein eines Mehrweg- oder Pfandetiketts erhöhte die Kaufwahrscheinlichkeit signifikant. Produkte mit niedrigen CO₂-Fußabdruckwerten (PCF) oder mit einem PCF-Symbol wurden stark bevorzugt. Preisunterschiede hatten keinen signifikanten Einfluss.

Die Untersuchung der demografischen Akzeptanz und Substitutionsneigung von Kuhmilch durch Haferdrink zeigt: Personen mit hoher Kaufneigung für Haferdrink sind meist mittleren Alters, gut gebildet und offen für Innovationen. Mittlere Neigung findet sich vor allem bei älteren Menschen mit gemischtem Bildungshintergrund. Geringe Neigung zur Substitution zeigt sich überwiegend bei älteren, gering qualifizierten Männern.

Abschätzung von Entwicklungsszenarien: Zur Bewertung des Klimaschutzpotenzials von pflanzenbasierten Milchalternativen ist die Analyse der eingesparten Milchproduktion entscheidend. Da Milch überwiegend nicht als Trinkmilch, sondern in verarbeiteten Produkten konsumiert wird, wurden letztere in Frischmilchäquivalente umgerechnet. Zur Erfassung der Verzehrsmuster sind Studien wie die Nationale Verzehrsstudie II (NVSII) von 2006 zentral, jedoch weisen deren Daten aufgrund von Over- und Underreporting

typischerweise Unsicherheiten auf. Die NVSII-Daten wurden in ein selbst entwickeltes Mengenflussmodell integriert, das die Wertschöpfungskette abbildet und Verzehrdaten mit Marktbilanzdaten, Verarbeitungskoeffizienten, Rezepturen und Abfalldaten verknüpft. So konnten realistische Verzehrsmuster von Milchprodukten identifiziert werden (Säule "Verzehr", Abb. 7): Rund 15 % der Milch werden als Trinkmilch konsumiert, 37 % als Käse, 10 % als Butter und 15 % als Joghurt. Weitere 12 % entfallen auf Milch und Butter in Getreideprodukten (z. B. Kuchen), 11 % auf andere verarbeitete Lebensmittel (z. B. Käse auf Pizza).

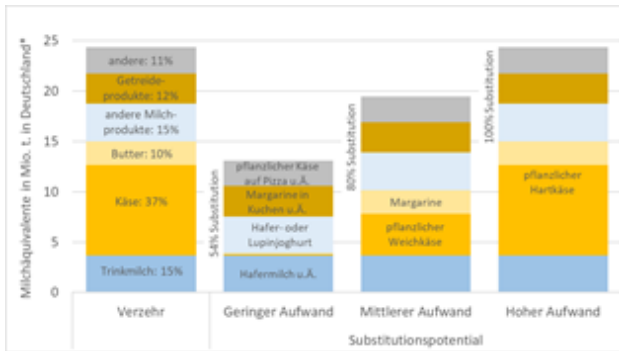


Abbildung 7: Verzehr von Milchprodukten und Substitutionspotential von pflanzlichen Alternativprodukten in Milchäquivalenten in Deutschland pro Jahr (Referenzjahr 2006).

Diese Differenzierung ist grundlegend für die Quantifizierung des Substitutionspotenzials pflanzlicher Alternativen. Hierzu wurde eine Datenbank entwickelt, die Alternativen für Milchprodukte erfasst und nach Substitutionsaufwand klassifiziert. Als mit geringem Aufwand substituierbar gelten u. a. Trinkmilch, Joghurt, Milch und Butter in Getreideprodukten sowie Käse in industriell verarbeiteten Lebensmitteln wie Pizza. Allein durch diese Substitutionen lassen sich 54 % der jährlich in Deutschland verzehrten Milchäquivalente einsparen (Abb. 7: Säule "geringer Aufwand"). Mit mittlerem Aufwand können insgesamt 80 % substituiert werden, etwa beim Verzehr von Butter oder Käse. Da der Eigengeschmack dieser Milchprodukte beim direkten Verzehr stärker ins Gewicht fällt als bei zusammengesetzten Produkten, wird die Substitution als aufwändiger für die Konsumierenden klassifiziert (Säule "mittlerer Aufwand", Abb. 7). Für die verbliebenen Milchprodukte gibt es kaum überzeugend ähnliche Alternativen mit weiter Marktverbreitung, weswegen die letzten 20 % zur vollständigen Substitution als sehr aufwändig kategorisiert wurden (Säule "hoher Aufwand", Abb. 7).

Das entwickelte Mengenflussmodell ermöglicht es, die Auswirkungen von Verbesserungen einzelner Alternativprodukte oder Veränderungen in der Konsumierendenakzeptanz auf Markt- und Agrarsektorebene zu simulieren.

Handlungsempfehlungen für Politik und Praxis

Hafer und Lupine als wichtige pflanzliche Proteinquellen sollten an geeigneten Standorten unter optimierten Bedingungen produziert werden, wobei Lupinenprotein grundsätzlich klimafreundlicher als Haferprotein ist. Agrarpolitische Maßnahmen zur gezielten Anbauberatung und Förderung regionaler Wertschöpfungsketten können den Klimaschutz weiterbefördern. Die Einführung von CO₂-Fußabdruck-Labels auf pflanzenbasierten Milch- und Fleischersatzprodukten können deren Absatz wirksam unterstützen. Ergänzend könnten gezielte Informations- und Bildungsoffensiven größere Teile der Bevölkerung für eine klimaschonendere Ernährung gewinnen.

SCHLUSSFOLGERUNGEN

- Die Etablierung effizienter Gewebekulturverfahren und Transformationstechniken für Hafer und Lupine ebnet den Weg für den erfolgreichen Einsatz präziser Genome-Editing-Verfahren in Forschung und Pflanzenzüchtung.
- Die Selektion und genetische Charakterisierung vielversprechender Hafermutanten sowie die entwickelte präzise Proteinbestimmung mittels NIRS fördern die Züchtung protein- und ertragreicher klimaschonender Hafersorten.
- Frühe Aussaaten im Hafer ermöglichen eine Reduzierung des CO₂-Fußabdrucks gegenüber späten Saaten.
- Lupinenprotein hat einen fast 50 % geringeren CO₂-Fußabdruck als Haferprotein.
- Die Wertschöpfungskettenanalyse zeigt, dass pflanzliche Milch- und Fleischalternativen ökologisch vorteilhaft sind. Ein zentraler Treiber für pflanzliche Milchalternativen ist die hohe Verbraucherpräferenz für Produkte mit niedrigem CO₂-Fußabdruck und klarer Nachhaltigkeitskennzeichnung. Ein wesentliches Hemmnis stellt die geringe Substitutionsbereitschaft bestimmter Bevölkerungsgruppen dar.

Die Integration realistischer Verzehrsmuster in ein Mengenflussmodell ermöglicht eine differenzierte Bewertung des Substitutionspotenzials pflanzenbasierter Milchalternativen und damit eine fundierte Abschätzung ihrer Klima Auswirkungen auf Markt- und Agrarsektorebene.

AUSGEWÄHLTE VERÖFFENTLICHUNGEN

- Pathi & Sprink (2023): From Petri Dish to Field: Plant Tissue Culture and Genetic Engineering of Oats for Improved Agricultural Outcomes. *Plants*, 12, 3782.
- Karpinski et al. (2024): Treibhausgasreduktion durch Forschung an pflanzlichen Proteinquellen – retten wir mit Haferdrinks das Klima? *Getreide, Mehl und Brot*, 30(3), 2–9.
- Pathi, & Sprink (2025): Lupins in the Genome Editing Era: Advances in Plant Cell Culture, Double Haploid Technology and Genetic Transformation for Crop Improvement. *Frontiers in Plant Science*.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages