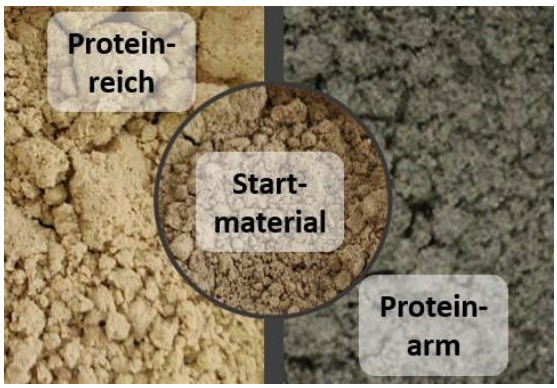
# Einsatz trockener Trennverfahren zur Herstellung von funktionellen proteinangereicherten Pulvern aus Hülsenfrüchten mit Fokus auf Vermahlung und triboelektrische Separationstechnologie




| | |
|---|---|
| Koordinierung: | Forschungskreis der Ernährungsindustrie e. V. (FEI), Bonn |
| Forschungseinrichtung(en): | Deutsches Institut für Lebensmitteltechnik e.V. (DIL), Quakenbrück<br>Dr. Volker Heinz/Dr. Volker Lammers<br><br>Technische Universität München<br>School of Life Sciences<br>Forschungsdepartment Life Science Engineering<br>Professur Food Process Engineering<br>Prof. Dr. Petra Först/Joshua Greiner |
| Industriegruppe(n): | Deutscher Verband Tiernahrung e.V. (VDT), Bonn<br>Verband der Getreide-, Mühlen- und Stärkewirtschaft e. V. (VGMS), Berlin |
| Projektkoordinator: | Dipl.-Ing. Bertram Brenner<br>Brenner Consulting, Augsburg |
| Laufzeit: | 2023 – 2026 |
| Zuwendungssumme: | € 522.133,-- |

## *Ausgangssituation*

Proteine sind Grundsteine der menschlichen Ernährung, die derzeit für die Lebensmittelproduktion hauptsächlich aus tierischen und in einem geringeren Maß aus pflanzlichen Quellen gewonnen werden. Allerdings steigt die Nachfrage nach hochfunktionellen, pflanzlichen Proteinen konstant, da diese in Umwelt-, Nachhaltigkeits- und Ethikaspekten deutlich nachhaltiger als tierische Proteine sind. Bei der Erzeugung pflanzlicher Proteine wird im Vergleich signifikant weniger Landfläche, Wasser und Energie verbraucht, als bei der Herstellung von tierischen Proteinen.

Die Qualität und die Funktionalität pflanzlicher Proteine ist abhängig von ihrer Zusammensetzung und Herkunft sowie dem angewandten Isolations- oder Konzentrationsverfahren. Zur Extraktion des wertgebenden Proteins werden bisher meist nasse Aufreinigungsverfahren verwendet. Durch die nasse Aufreinigung ist es möglich, Proteinisolate mit einer Reinheit von > 90 % herzustellen. Der Nachteil ist jedoch, dass der Prozess sehr energie- und ressourcenaufwändig ist und die Proteine durch die extremen pH-Bedingungen sowie durch den Trocknungsschritt denaturiert werden können, was ihre Funktionalität verändert. Trockene Verfahren, wie die Aufbereitung mittels Windsichtung, haben den Vorteil, dass der Energie- und Wasserverbrauch und somit auch die Verarbeitungskosten geringer sind als beim nassen Prozess. Allerdings hängt der Erfolg der bisherigen Technologien zur Trockenfraktionierung von der Partikelgröße und -dichte ab, wodurch die Reinheit der angereicherten Pulver limitiert ist.

Eine neuere Technologie zur trockenen Aufbereitung stellt die triboelektrische Trennung dar. Im Gegensatz zum Windsichtungsverfahren beruht das Trennprinzip nicht auf der Dichte der Partikel, sondern auf den unterschiedlichen Oberflächenladungen. Dabei laden die Partikel durch den triboelektrischen Effekt (Kontaktladung) und werden in einem elektrischen Feld voneinander getrennt, basierend auf den verschiedenen Oberflächenladungen von Proteinen, Ballaststoffen und Stärke; so werden ein proteinreiches und ein proteinarmes Pulver produziert.

Die technofunktionellen Eigenschaften der mit triboelektrischer Separation hergestellten Pulver wurden bisher erst wenig untersucht, jedoch liegt nahe, dass die Funktionalität der Proteine erhalten bleibt, da sie weder durch Chemikalien noch durch hohe Temperaturen geschädigt werden. Kommt es jedoch bei der triboelektrischen Separation zu einer Verschiebung von Proteinfraktionen, würde dies vermutlich die technofunktionellen Eigenschaften der proteinreichen Pulver beeinflussen.

Im Labormaßstab werden Separatoren mit unterschiedlicher Bauweise bereits zu Forschungszwecken benutzt. So gibt es beispielsweise Freifallseparatoren mit vertikal angeordneten Elektroden. Die Partikel werden in einer vorgeschalteten Ladeeinheit durch den triboelektrischen Effekt geladen und gelangen durch einen pneumatischen Luftstrom in die Separationseinheit, die aus zwei parallelen, vertikalen Elektroden besteht; an den Enden der Elektroden können die aufgetrennten Pulver gesammelt werden. Auch eine horizontale Bauweise ist möglich. Für diese Separatoren braucht man keine Ladeeinheit. Die Partikel gelangen über einen Dosierer in den Separator, der aus zwei horizontalen Elektroden besteht, die parallel übereinander angeordnet sind. Im Spalt zwischen den Elektroden laden die Partikel durch Kollisionen und werden von den unterschiedlich geladenen Elektroden angezogen. Ein Band befördert die Partikel durch den Spalt zwischen den Elektroden zu den Enden des Separators, wo auf einer Seite das proteinarme und auf der anderen Seite das proteinreiche Pulver gewonnen wird.

Bisher war diese Technologie im Lebensmittelbereich noch weitestgehend unerforscht und die Anwendbarkeit für industrielle Prozesse stark begrenzt. Daher sollte in diesem Projekt ein besseres Verständnis für die Beziehung zwischen den Eigenschaften von Lebensmittelpulvern und ihrer Anwendbarkeit für die elektrostatische Separation gewonnen werden, damit diese Technologie in der Lebensmittelindustrie implementiert werden kann. Auch ein direkter Vergleich der Ergebnisse aus den unterschiedlich gebauten Separatoren sollte helfen, den Prozess besser verstehen zu können.

Ziel des Forschungsvorhabens war es, die Zusammenhänge der Pulvereigenschaften in Abhängigkeit der Vorbehandlung und Rohstoffcharakteristik und der Ausbeute bei der triboelektrischen Separation zu erschließen. Hierbei sollten verschiedene Mühlen und verschiedene Vermahlungsparameter getestet werden, um das Verhalten der Pulver mit verschiedenen Partikelgrößenverteilungen und Partikelformen zu charakterisieren. Auch die Bildung und das Aufbrechen von Partikelagglomeraten und die elektrische Ladung der Partikel, die stark mit der Ausbeute zusammenhängen, sollten untersucht werden. Im Projektverlauf sollten der Einfluss der Vermahlung sowie der Maschinen- und Prozessparameter auf die Proteinanreicherung, die Massenausbeute, die Proteinfraktionen und die technofunktionellen Eigenschaften der hergestellten Pulver bestimmt werden. Darüber hinaus war zu untersuchen, ob durch die Kombination trockener Fraktionierungsverfahren die Ausbeute des proteinangereicherten Pflanzenpulvers weiter erhöht werden kann. Abschließend sollte das Anwendungspotenzial der hergestellten proteinangereicherten Pflanzenpulver anhand der Extrusion zur Herstellung texturierter Fleischanaloga beispielhaft bewertet werden.

## *Forschungsergebnisse*

Die Vermahlungsversuche zeigten, dass die Freilegung von Protein- und Stärkekörpern wesentlich von Mühlentyp und Betriebsbedingungen abhängt. Feinere Pulver mit einem höheren Anteil freigelegter Proteinpartikel wurden insbesondere durch hohe Sichtraddrehzahlen in Sichtermühlen sowie durch die Ultrazentrifugalmühle bei kleiner Siebweite und hoher Umfangsgeschwindigkeit erzielt. Die erzielte Freilegung erwies sich als einer der wesentlichen Einflussfaktoren für die nachfolgende Fraktionierung.

Einzelpartikelladungsmessungen zeigten für alle Rohstoffe sowohl positiv als auch negativ geladene Partikel bei jeweils positiver mittlerer Partikelladung. Gleichzeitig wurden deutliche rohstoffspezifische Unterschiede im Ladeverhalten festgestellt.

Mit dem Bandseparator wurde bei Lupine die höchste Proteinanreicherung erzielt. Diese erfolgte ausschließlich in der Fraktion E2 und erreichte maximal 61,6 % Protein (TS) bzw. eine relative Proteinanreicherung von 37,9 %. Mit steigender Feldstärke nahm die Proteinanreicherung zunächst zu. Hinsichtlich der Produktfeuchte wurde die höchste Proteinanreicherung bei etwa 7 % erreicht, während niedrigere Feuchtegehalte höhere Massenausbeuten ermöglichten. Bei Erbse und Ackerbohne war das Trennverhalten weniger eindeutig. Abhängig von der Bandgeschwindigkeit wurde Protein entweder in E1 oder E2 angereichert. Bei der Ackerbohne blieb die Anreicherung insgesamt begrenzt.

Im Freifallseparator wurden Proteingehalte von 51,6 % TS für Lupine, 36,7 % TS für Ackerbohne und 26,0 % TS für Erbse erreicht. Die Prozessoptimierung mittels Box-Behnken-Versuchsplänen identifizierte Einflüsse der Pulverfeuchte, der Feldstärke, des Elektrodenabstands und des Massenstroms auf die Trennleistung. Der Vergleich beider Separatorbauweisen zeigte, dass mit dem Bandseparator die höchsten Proteinanreicherungen erreicht wurden, insbesondere bei Lupine. Der Freifallseparator erzielte hingegen bessere Ergebnisse bei den Trennungen von Erbse und Ackerbohne. Die Massenausbeuten der proteinreichen Fraktionen lagen bei beiden Bauweisen in einem vergleichbaren Bereich von etwa 35 bis 60 %.

Die Windsichtung erwies sich vor allem für die stärkereichen Rohstoffe Erbse und Ackerbohne als wirksame Methode zur Proteinanreicherung. Eine anschließende triboelektrische Separation erhöhte den Proteingehalt weiter, verringerte jedoch die Gesamtmassenausbeute. Bei Lupine konnten sowohl mit der Windsichtung als auch mit der triboelektrischen Separation Proteinkonzentrate von etwa 60 % Protein (TS) erzeugt werden, wobei die triboelektrische Separation eine höhere Massenausbeute ermöglichte.

Die durch Windsichtung und anschließende triboelektrische Separation gewonnenen Fraktionen aus Erbse und Ackerbohne sowie die triboelektrisch angereicherte Lupinenfraktion konnten in Extrusionsversuchen erfolgreich zu texturierten Pflanzenproteinen verarbeitet werden.

Insgesamt zeigte sich ein rohstoffabhängiges Potenzial der triboelektrischen Separation. Bei Lupine wurden mit triboelektrischer Separation und Windsichtung vergleichbare Proteingehalte von etwa 60 % TS erzielt, wobei die triboelektrische Separation eine höhere Massenausbeute ermöglichte. Bei Erbse und Ackerbohne wurde durch die Windsichtung eine stärkere Proteinanreicherung erreicht. Das angestrebte gleichzeitige Erreichen eines höheren Proteingehalts und einer höheren Massenausbeute gegenüber der Windsichtung konnte somit nicht für alle Rohstoffe realisiert werden.

## *Wirtschaftliche Bedeutung*

Die triboelektrische Separation ist eine vielversprechende Technologie, die im industriellen Maßstab in der Mineralienverarbeitung und beim Recyclen von Plastik angewandt wird. Die Technologie wurde bisher nicht kommerziell für Lebensmittel genutzt, jedoch wird in der Forschung bereits daran gearbeitet, den Prozess für die Verarbeitung von pulverförmigen pflanzlichen Rohstoffen anzupassen, da der Bedarf an pflanzlichen, hochfunktionellen Proteinen stetig steigt. Im Gegensatz zum konventionellen Nassprozess ist die Technologie deutlich energie- und kostenärmer, da keine Chemikalien und kein Wasser eingesetzt werden, wodurch ein Trocknungsschritt entfällt. Das Verfahren ist somit nachhaltiger und stellt eine gute Ergänzung oder Alternative zu anderen Trockenfraktionierungstechnologien dar. Da klassische Trockenfraktionierungsverfahren auf der Partikelgröße und -dichte basieren, die triboelektrische Separation jedoch von der Oberflächenladung der Partikel abhängig ist, kann eine Kombination aus Windsichtung und anschließender triboelektrischer Separation die Ausbeute und den Proteingehalt signifikant erhöhen.

Bezahlbare, funktionelle und nachhaltige Proteine aus pflanzlichen Quellen sind insbesondere für die rohstoffverarbeitenden Betriebe der Lebensmittelindustrie interessant. Darüber hinaus bietet die triboelektrische Separation insbesondere für kleine und mittlere Unternehmen (KMU) die Möglichkeit, sich mit innovativen

Produkten durch maßgeschneiderte Proteine im Markt abzuheben. Für den Maschinenbau bietet diese Technologie die Chance, neue Anlagen entweder als Prozessalternative zu entwickeln oder diese in bereits vorhandene Anreicherungsprozesse zu integrieren, beispielsweise in Kombination mit einem Vermahlungs- und Sichtungsschritt. Hiermit könnten nasse Anreicherungsprozesse möglicherweise langfristig ersetzt und die Prozesskosten reduziert werden.

## *Publikationen*

1. FEI-Schlussbericht 2026
2. Greiner, J., Englet, M., Bollwein, J., Poller, L., Wurzer, S., Hilmer, M., & Foerst, P.: Dynamic mechanical analysis of food powders: Direct determination of the mechanical properties and glass transitions in native faba bean meal at different hydration states. Food Hydrocolloids 171, 111812 https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2025.111812 (2026).

## *Weiteres Informationsmaterial*

Deutsches Institut für Lebensmitteltechnik e.V. (DIL)
Prof.-von-Klitzing-Straße 7, 49610 Quakenbrück
Tel.: +49 5431 183-232
E-Mail: v.heinz@dil-ev.de

Technische Universität München
School of Life Sciences
Forschungsdepartment Life Science Engineering
Professur Food Process Engineering
Weihenstephaner Berg 1, 85354 Freising
Tel.: +49 8161 71-4205
E-Mail: petra.foerst@tum.de

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

## *Förderhinweis*

*… ein Projekt der* ***Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF)***

Gefördert durch:

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

FORSCHUNGSKREIS DER ERNÄHRUNGSINDUSTRIE E.V.

INDUSTRIELLE GEMEINSCHAFTSFORSCHUNG

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: © L. Wockenfuß, Deutsches Institut für Lebensmitteltechnik e.V. (DIL), Quakenbrück, 2022*

*Stand: 17. November 2026*