

# POTENZIALE DER PRÄZISIONSFERMENTATION FÜR NIEDERSACHSEN



## ZUSAMMENFASSUNG

Als „Agrarland Nr. 1“ sieht sich Niedersachsen in besonderem Maß mit den aktuellen Entwicklungen wie der weltweit steigenden Nachfrage nach Lebensmitteln, den Auswirkungen des Klimawandels auf die Landwirtschaft und der Umsetzung der Klimaneutralitätsziele konfrontiert. Einen Beitrag zur Bewältigung dieser Herausforderungen könnte die Präzisionsfermentation leisten, d. h. die gezielte biotechnologische Herstellung einzelner Lebensmittelzutaten/-bestandteile wie Proteine oder Lipide. Mit Hilfe optimierter Produktionsorganismen (z. B. Hefen oder Bakterien) lassen sich im Bioreaktor Produkte herstellen, die in ihrer chemischen Struktur und ihren Eigenschaften identisch mit solchen aus tierischen Quellen sind.

Die vorliegende Studie beschreibt den aktuellen Stand der Präzisionsfermentation anhand relevanter Produktgruppen, Produktionsorganismen und der technischen Prinzipien und setzt dies in den Kontext der Voraussetzungen in Niedersachsen. Sie fokussiert dabei auf die Produktgruppen Proteine (besonders Milch- und Eiproteine sowie Kollagen) und (tierische) Lipide sowie auf Häm-Proteine. Alle genannten Produkte haben ein hohes Potenzial für Anwendungen in Lebensmitteln: Sie können tierische Zutaten ersetzen, ohne dass es dabei zu Einbußen bei Funktionalität, Textur oder Mundgefühl kommt. Dabei ist es nicht das Ziel, komplexe natürliche Produkte wie Vollmilch oder Vollei zu ersetzen; die Präzisionsfermentation ist vor allem dort sinnvoll und in realistischen Zeiträumen wettbewerbsfähig, wo es um einzelne Bestandteile wie Casein, Albumin, Ovalbumin, bestimmte Fette oder andere funktionale Substanzen geht, die aus den Naturprodukten aufwändig isoliert werden müssen.

Während bei Proteinen einige Unternehmen, vor allem Start-ups, kurz vor dem Markteintritt stehen oder diesen bereits (im Ausland) vollzogen haben, ist der Entwicklungsstand bei Lipiden oft noch nicht ganz so weit. Um eine Präzisionsfermentationsindustrie aufzubauen und zu betreiben, bedarf es neben den Forschungs- und Entwicklungsarbeiten vor allem einer gesicherten Rohstoffbasis sowie Anlagen, die für die Produktion von Lebensmitteln geeignet sind. Niedersachsen ist hinsichtlich der Rohstoffe als starkes Agrarland mit einer großen Zucker- und Stärkeindustrie hervorragend aufgestellt und verfügt auch über sehr gute Voraussetzungen hinsichtlich der verfügbaren erneuerbaren Energie, die aus Kosten- und Nachhaltigkeitsgründen für die Präzisionsfermentation eine wichtige Rolle spielt. Dagegen fehlt es – wie überall – an geeigneten Anlagenkapazitäten vom Pilot- bis in den Produktionsmaßstab. Für ihren Aufbau muss öffentliches und privates Kapital mobilisiert werden, was durch Modelle wie Reallabore oder öffentlich zugängliche Demonstrationsanlagen erleichtert werden kann.

Eine wichtige Voraussetzung für die erfolgreiche Vermarktung von Produkten der Präzisionsfermentation ist die enge Zusammenarbeit mit der verarbeitenden Industrie. Sehr häufig werden Prozesse für die Präzisionsfermentation von Start-ups entwickelt, die mit etablierten Unternehmen der nachgelagerten Wertschöpfungskette kooperieren. Mit seiner starken und innovativen Lebensmittelbranche bietet Niedersachsen dafür sehr gute Voraussetzungen, die durch bestehende Netzwerke weiter unterstützt werden.

Zu den großen Vorteilen der Präzisionsfermentation, die auch für den Standort Niedersachsen hohe Relevanz haben, gehören die Nachhaltigkeit, Effizienz und Flexibilität der Verfahren sowie das hohe Innovationspotenzial; dem stehen derzeit jedoch noch Nachteile hinsichtlich der regulatorischen Rahmenbedingungen und der Produktionskosten entgegen. Bei der Verbraucherakzeptanz gibt es einige positive Indizien; dennoch ist für eine erfolgreiche Einführung von Produkten aus Präzisionsfermentation eine offene Kommunikation und Information ein ganz wesentlicher Faktor.

Angesichts laufender Transformationsprozesse und des internationalen Wettbewerbs muss Niedersachsen sich mit den Chancen und Herausforderungen der Präzisionsfermentation auseinandersetzen. Die Frage sollte dabei nicht sein „konventionelle Landwirtschaft oder Präzisionsfermentation“, sondern „welche Rolle können beide einnehmen, um im Zusammenspiel den Standort zu sichern und zu stärken, Nachhaltigkeitsziele zu erreichen und Wertschöpfung in Niedersachsen zu halten und auszubauen“? Neben der Schließung von Lücken bei Anlagen und der Schaffung günstiger Standortbedingungen vor allem für Start-ups ist deshalb ein offener, konstruktiver Diskurs aller Interessengruppen von der Landwirtschaft über die Industrie bis zu Politik und Verbraucherinnen und Verbrauchern ausschlaggebend, um die vorhandenen Potenziale der Präzisionsfermentation für Niedersachsen zu nutzen.



## VORWORT

Mit dem weltweiten Bevölkerungszuwachs steigt die Nachfrage nach Nahrungsmitteln kontinuierlich an. Eine global wachsende Mittelschicht erhöht zudem die Nachfrage insbesondere nach tierischen Erzeugnissen. Gleichzeitig setzen der Klimawandel und damit verbundene Katastrophen, Verknappung von Anbauflächen, Verschlechterung der Böden oder Wasserknappheit unsere Ernährungssysteme – Landwirtschaft, Viehzucht und Aquakultur – zunehmend unter Druck. Unsere bestehenden Ernährungssysteme selbst treiben den Klimawandel ebenfalls an und sind für etwa 20 - 30 % aller Treibhausgasemissionen verantwortlich<sup>1,2</sup>.

Auch in Niedersachsen, dem „Agrarland Nr. 1“ in Deutschland<sup>3</sup>, sind die Auswirkungen des Klimawandels bereits zu spüren. Extremereignisse wie Starkniederschläge in Kombination mit längeren Trockenperioden wirken sich auf Bodenfruchtbarkeit oder Wasserverfügbarkeit aus. Damit steigt das Risiko für Ertragseinbußen in der Landwirtschaft zunehmend an<sup>4,5</sup>. Auch für die große lebensmittelverarbeitende Industrie in Niedersachsen ergeben sich vor dem Hintergrund des Klimawandels neue Risiken: So wächst beispielsweise die Gefahr, dass globale Lieferketten unterbrochen werden und eine kontinuierliche Versorgung mit benötigten Rohstoffen nicht mehr in allen Fällen gewährleistet werden kann bzw. Rohstoffe verknappen.

Gleichzeitig hat Niedersachsen sich zum Ziel gesetzt, „Klimaschutzland Nr. 1“ zu werden und die jährlichen Treibhausgasemissionen des Landes bis zum Jahr 2030 um 55 % gegenüber 1990 zu mindern. Bis zum Jahr 2050 soll Klimaneutralität erreicht werden<sup>6</sup>.

Für diese Herausforderungen bietet die Herstellung von Nahrungsmitteln durch Mikroorganismen in Fermentationsprozessen wertvolle Lösungsansätze. Solche Verfahren werden zunehmend als eine flexible und ökologische Alternative zur herkömmlichen Nahrungsmittelproduktion gesehen. Die Entwicklung entsprechender Verfahren und Produkte wird weltweit intensiv vorangetrieben<sup>7,8</sup>. Insbesondere, wenn mikrobiell produzierte Nahrungsmittel tierische Produkte ersetzen, sind deutliche ökologische Vorteile hinsichtlich z. B. Landnutzung, Wasser- und Energieverbrauch, *Global Warming Potenzial* oder Eutrophierungspotenzial zu erwarten (siehe z. B. Milch<sup>9</sup> oder Rindfleischprodukte<sup>10,11</sup>). Auch bieten entsprechende Verfahren die Möglichkeit, Abhängigkeiten von internationalen Märkten zu reduzieren und die Resilienz z. B. gegenüber Rohstoffverknappungen oder Brüchen in Lieferketten zu stärken.

**INHALTSVERZEICHNIS**

<b>I. PRÄZISIONSFERMENTATION – ÜBERBLICK UND AKTUELLER STAND .....</b>	9
<b>1. Definition Präzisionsfermentation und Geltungsbereich der Studie.....</b>	10
<b>2. Aktueller Stand und Potenziale der Präzisionsfermentation (allgemein) .....</b>	12
a. Aktueller Stand .....	12
b. Vorteile .....	13
c. Herausforderungen .....	15
d. Präzisionsfermentation und Start-ups .....	18
<b>3. Relevante Produktgruppen .....</b>	19
a. Proteine .....	19
b. Lipide .....	20
c. Kohlenhydrate .....	21
d. Andere .....	21
<b>4. Technische Prinzipien der Präzisionsfermentation und Verfügbarkeit von Technologien .....</b>	22
a. Rohstoffe.....	22
b. Produktionsorganismen und Werkzeuge .....	23
c. Apparate- und Anlagenbedarf / Investitionskosten .....	26
d. Betriebskosten und Economy of Scale .....	29
<b>II. VORAUSSETZUNGEN UND POTENZIALE IN NIEDERSACHSEN .....</b>	31
<b>1. Rohstoffströme in Niedersachsen .....</b>	32
a. Zuckerrüben .....	34
b. Kartoffeln .....	35
c. Getreide .....	36
d. Ölpflanzen .....	36
e. Sonstige Agrarprodukte .....	37
f. Transformation der Landwirtschaft .....	39
<b>2. Für die Präzisionsfermentation relevante Expertise und Infrastruktur in Niedersachsen .....</b>	42
<b>3. Weiterverarbeitende Industrie in Niedersachsen .....</b>	45
a. Verarbeitung von Milch und Milchprodukten .....	47
b. Verarbeitung von Eiern und Eiprodukten .....	48
c. Verarbeitung von Gelatine .....	49
d. Verarbeitung von pflanzlichen Proteinen und Fetten zur Herstellung von Fleischersatzprodukten .....	50
<b>4. Weitere Standortfaktoren .....</b>	51
<b>III. ABLEITUNGEN UND EMPFEHLUNGEN .....</b>	53
Anhang und Quellenverzeichnis .....	60
Impressum .....	66
Methodik und Haftungsausschluss .....	66



I

# PRÄZISIONS- FERMENTATION

## Überblick und aktueller Stand

## 1.

## DEFINITION PRÄZISIONSFERMENTATION UND GELTUNGSBEREICH DER STUDIE

Der Begriff „Fermentation“ bezeichnet in der Biotechnologie aerobe wie anaerobe Prozesse, bei denen Zucker oder andere Ausgangsstoffe durch Mikroorganismen (bzw. Enzyme) in neue Produkte umgewandelt werden. Fermentationsprozesse im Lebensmittelbereich können grob in drei verschiedene Kategorien eingeteilt werden: Traditionelle Fermentation, Biomassefermentation und Präzisionsfermentation.



### TRADITIONELLE FERMENTATION

Bei der traditionellen Fermentation werden Lebensmittel in der Regel durch den (natürlichen) Stoffwechsel von Mikroorganismen modifiziert und so z. B. Nährwert, Textur, Geschmack oder Haltbarkeit der Ausgangsstoffe verändert. Beispiele hierfür sind die Herstellung von Bier, Wein, Joghurt, Käse oder Sauerkraut.



### BIOMASSEFERMENTATION

Ziel der Biomassefermentation ist es, essbare Mikroorganismen wie Hefen, Bakterien, filamentöse Pilze oder Mikroalgen, die beispielsweise wünschenswerte Kombinationen funktionaler Inhaltsstoffe oder hohe Protein- oder Lipidgehalte aufweisen, gezielt zu vermehren und diese (oder Teile daraus) dann als Grundlage oder Zutat für Lebensmittel zu verwenden. Wie auch bei den anderen Fermentationsarten kann die Zusammensetzung der Produkte unter anderem durch Fermentationsbedingungen und Ausgangssubstrat gesteuert werden. Beispielprodukte der Biomassefermentation sind Algenöl, Mycoprotein oder *Sing-  
le Cell Oil*.



### PRÄZISIONSFERMENTATION

Die Präzisionsfermentation ist ein biotechnisches Produktionsverfahren, bei dem mit Hilfe maßgeschneideter Produktionsorganismen und Bioprozesse Proteine, Lipide, Chemikalien, Wirkstoffe oder andere Verbindungen zielgerichtet hergestellt werden. Die eingesetzten Produktionsorganismen werden meist mittels Methoden der synthetischen Biologie und insbesondere der Gentechnik gezielt verändert, damit sie die gewünschten Produkte erzeugen. Beispiele für entsprechende Produkte sind bestimmte Häm- oder Milchproteine als Ersatz für tierische Produkte in Lebensmitteln, Wachstumsfaktoren nicht-tierischen Ursprungs, die bei der Erzeugung von *In-vitro-Fleisch (Cultured Meat)* verwendet werden, oder Chymosin für die Käseherstellung<sup>12, 13</sup>. Abbildung 1 zeigt die typischen Schritte zur Herstellung von Produkten für die Lebensmittelindustrie unter Verwendung der Präzisionsfermentation.

Die Präzisionsfermentation wird oft auch als ein Bereich der zellulären Landwirtschaft (*Cellular Agriculture*) bezeichnet. Der zweite Bereich der zellulären Landwirtschaft, die Zell- bzw. Gewebekultivierung zur Herstellung von *Cultured Meat*, bei dem Gewebe in dreidimensionalen Strukturen kultiviert wird, wird im Rahmen dieser Studie nicht betrachtet. Ziel der vorliegenden Studie ist es, die Potenziale der Präzisionsfermentation für die Ernährungswirtschaft in Niedersachsen und darüber hinaus zu beleuchten. Den Autorinnen und Autoren ist bewusst, dass die Grenzen zwischen Biomassefermentation oder traditioneller Fermentation und Präzisionsfermentation fließend sein können. So gibt es beispielsweise Ansätze, Bier mit veränderten Hefen zu erzeugen, die während des Fermentationsprozesses Hopfenaromen bilden<sup>15</sup>. Solche Spezialfälle werden in der Studie nicht oder nur am Rande berücksichtigt.

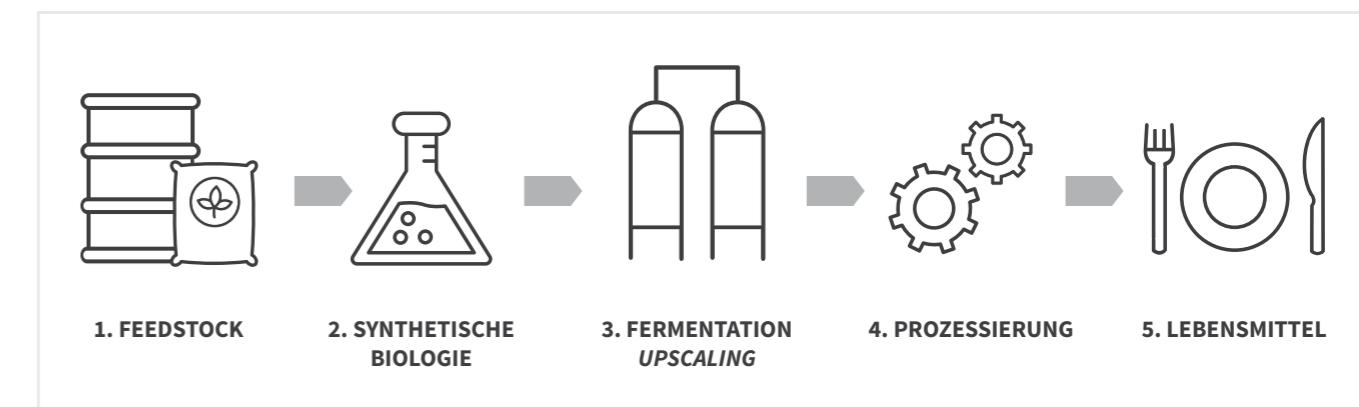


Abb. 1: Typische Schritte zur Herstellung von Produkten für die Lebensmittelindustrie unter Verwendung der Präzisionsfermentation.

**1:** Als Feedstock werden meist günstige Rohstoffe wie Zucker oder Öle als Fermentationssubstrat genutzt. Auch Zucker der 2. Generation (z. B. Lignocellulosezucker), Reststoffströme aus der Lebensmittelindustrie oder anderen Industrien (z. B. Melasse oder Glycerin aus der Biodieselherstellung) oder Gase (z. B. Syngas oder CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>) werden zunehmend eingesetzt.

**2:** Die Organismen werden genetisch so verändert, dass sie das gewünschte Produkt in großen Mengen produzieren. Dies erfordert meist mehrere Zyklen in einem „Design-Build-Test-Learn“-Prozess. In diesem werden Veränderungen im Stoffwechselweg geplant, genetische Veränderungen vorgenommen, das Vorhandensein des Zielproduktes geprüft, die gewünschte Lebensmitteleigenschaft validiert und weitere genetische Verbesserungen vorgenommen, um die Produktmenge und -qualität zu erhöhen. Dies findet im Labormaßstab (wenige ml bis etwa 30 Liter Kulturvolumen) statt.

**3:** Sobald die Organismen das Zielprodukt in der gewünschten Quantität und Qualität synthetisieren, wird das Kulturvolumen schrittweise bis in den kommerziellen Maßstab vergrößert (je nach Produkt bis zu einigen hunderttausend Litern).

**4:** Je nach Produkt und Anwendung wird das Zielprodukt (aus dem Medium oder den Zellen) extrahiert, gereinigt und mit anderen Komponenten kombiniert (formuliert).

**5:** Finales Produkt für den Konsumenten (Grafik verändert nach: Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation<sup>14</sup>).

## 2.

## AKTUELLER STAND UND POTENZIALE DER PRÄZISIONSFERMENTATION (ALLGEMEIN)

### A. AKTUELLER STAND

Präzisionsfermentation wird nicht nur in der pharmazeutischen (siehe z. B. Produktion von Humaninsulin) oder der chemischen Industrie (siehe z. B. Produktion von 1,3-Propandiol für die Herstellung von Polymeren), sondern auch im Lebensmittelbereich seit vielen Jahrzehnten erfolgreich angewendet. Lebensmittel, die Zutaten aus Präzisionsfermentation enthalten, sind weit verbreitet: So werden beispielsweise die meisten Vitamine zur Anreicherung von Lebensmitteln oder Ernährungsergänzung über entsprechende Technologien hergestellt (Vitamine A, B, C, D, E und K). Auch eine große Zahl von Enzymen, die in kommerziell hergestellten Lebensmitteln enthalten sind, stammen bereits aus entsprechenden Verfahren. Bekannte Beispiele sind Chymosin als Ersatz für Lab aus den Mägen von Wiederkäuern zur Bildung des Käsebruchs bei der Käseherstellung, Amylasen zur Mehlbehandlung in Bäckereien, Pektinasen zur Verringerung der Trübung und Bitterkeit von Fruchtsäften oder Transglutaminasen, die Proteine in Fleischwaren vernetzen und so helfen, Produkte wie z. B. Würste zusammenzuhalten. Auch werden viele Geschmacks- und Aromastoffe, die regelmäßig in Lebensmitteln verwendet werden, mittels Präzisionsfermentation hergestellt. Beispiele hierfür sind natürliches Vanillin, natürliches Zitrusaroma Nootkaton sowie der Süßstoff Stevia<sup>16, 17, 18</sup>.

Obwohl die Präzisionsfermentation als Technologie schon lange existiert und erfolgreich angewendet wird, steht sie bei der Produktion von Proteinen, Lipiden oder Oligosacchariden noch relativ am Anfang. In den vergangenen Jahren wurden jedoch sehr große Fortschritte erzielt. So verweist z. B. das Good Food Institute (GFI) in seiner Datenbank auf etwa 60 Unternehmen, die Präzisionsfermentation nutzen, um Proteine herzustellen. Fast drei Viertel von ihnen wurden in den letzten fünf Jahren (ab 2019) gegründet<sup>19</sup> und die ersten tierfreien Milchprodukte sind seit 2020 auf dem Markt; Impossible Foods Leghämoglobin-haltiger Burger-Patty wird sogar schon seit 2016 verkauft<sup>20, 21</sup>.

Die Branche ist aktuell sehr stark von Start-ups geprägt. Investitionen in entsprechende Präzisionsfermentations-Unternehmen und/oder -Technologien sind in den letzten Jahren stark angestiegen. So wurden in den vergangenen vier Jahren zwischen 222 und 938 Millionen US Dollar pro Jahr in die Präzisionsfermentation investiert, was einem Anteil von 45 – 67 % aller Investitionen in Fermentationstechnologien entsprach. Zunehmend beteiligen sich auch etablierte Fleisch-, Lebensmittel- und Biotechnologieunternehmen an entsprechenden Projekten oder Kooperationen. So ging beispielsweise Nestlé eine Partnerschaft mit Perfect Day ein und testete 2022 Milch aus tierfreier Molke in ausgewählten Märkten in den USA. Auch Unternehmen wie Unilever (Speiseeis), General Mills (Käse) oder die Bel-Gruppe (Käse) starteten in den vergangenen Jahren entsprechende Aktivitäten in Zusammenarbeit mit jungen Unternehmen<sup>22, 23</sup>.



### B. VORTEILE

Die genannten Beispiele, aber auch die im Rahmen dieser Studie geführten Interviews mit Industrievertreterinnen und Branchenkennern zeigen, dass etablierte Fleisch-, Lebensmittel- Chemie- oder Biotechnologie-Unternehmen in der Präzisionsfermentation ein großes Potenzial sehen und sich zunehmend in diesem Feld engagieren. Auch die an der Erarbeitung der Niedersächsischen „Landesstrategie Biologisierung“ beteiligten Expertinnen und Experten sprechen der Präzisionsfermentation eine wachsende Rolle bei der Etablierung einer nachhaltigeren Landwirtschaft sowie der Sicherstellung ausreichender Proteinquellen für die menschliche Ernährung zu<sup>24</sup>. Grund für das wachsende Interesse an der Präzisionsfermentation ist, dass sie gegenüber anderen Verfahren wie der Gewinnung von Fetten/Ölen oder Proteinen aus tierischen oder pflanzlichen Ausgangsstoffen oft deutliche Vorteile aufweist:

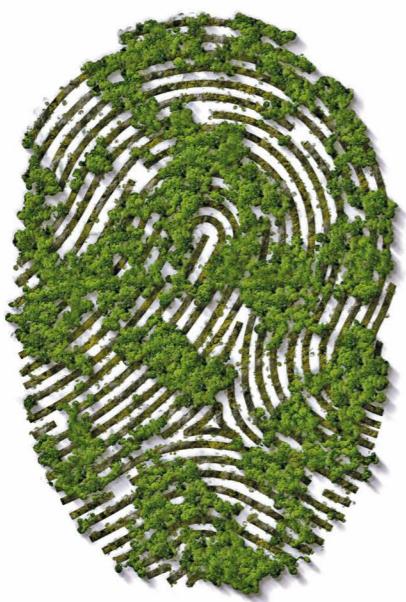
- NACHHALTIGKEIT:** Gegenüber traditionellen Verfahren kann die Präzisionsfermentation große Vorteile unter anderem in Bezug auf Treibhausgasemissionen (THG), Landnutzung, Wasserverbrauch oder die Produktion von Nebenströmen aufweisen<sup>25, 26, 27, 28</sup>.
- EFFIZIENZ:** Präzisionsfermentation kann Moleküle gezielt und kontrolliert in großen Mengen produzieren und so gegenüber Verfahren, die Moleküle aus natürlichen Ressourcen gewinnen, eine deutlich höhere Produktivität erzielen. Bei traditionellen Verfahren anfallende ungewollte Rest- und Abfallströme können so vermieden werden (z. B. Sauermolke). Zielmoleküle aus Präzisionsfermentation können somit auch kommerziell deutlich attraktiver als aus herkömmlichen Verfahren sein bzw. es in Zukunft werden.
- FLEXIBILITÄT:** Die Präzisionsfermentation ermöglicht die Produktion von Zielmolekülen aus einer Vielzahl von Rohstoffquellen<sup>29</sup> (u. a. auch Reststoffströmen wie Lignocellulosezucker, Melasse oder Glycerin sowie Gasen wie CO<sub>2</sub>) und kann so deutlich mehr Flexibilität gegenüber traditionellen Verfahren (wie z. B. der Extraktion von Ölen aus Ölplanten) bieten.
- UNABHÄNGIGKEIT:** Entsprechende Anlagen können weltweit errichtet und mit vielen regional verfügbaren Rohstoffen betrieben werden, was die Unabhängigkeit von internationalen Märkten erhöht und die Resilienz z.B. gegenüber Rohstoffverknappungen oder Brüchen in Lieferketten stärkt. Preisschwankungen kann entgegengewirkt und ein wesentlicher Beitrag zur Ernährungssicherung von Regionen geleistet werden.
- KONSISTENZ:** Durch die stark kontrollierten Produktionsbedingungen der Präzisionsfermentation und die Stoffwechseleffizienz der eingesetzten Organismen kann eine gleichbleibende Qualität sichergestellt werden<sup>30</sup>, die bei herkömmlichen Verfahren gegebenenfalls nicht gewährleistet werden kann (siehe z. B. Saisonalität oder Einfluss des Wetters auf Gehalt und Qualität von Zielmolekülen in Agrarprodukten).
- INNOVATIONSPOTENZIAL:** Die Entkopplung von der ursprünglichen Zielmolekülquelle und seiner Produktionsmethode ermöglicht nicht nur die Herstellung von Zielmolekülen, deren Gewinnung bisher nicht wirtschaftlich rentabel war (z. B. weil sie schwer zu gewinnen, unzugänglich oder zu teuer sind), sondern auch die Produktion neuartiger Zielmoleküle, die die Funktionalität natürlicher Zielmolekülen übertreffen oder völlig neue Eigenschaften aufweisen<sup>31</sup>.
- PATENTIERBARKEIT:** Erfolgreiche oder Erfolg versprechende Konzepte werden gerade im Nahrungsmittelbereich oft kopiert<sup>32</sup>. Die Präzisionsfermentation hat gegenüber anderen Fermentationsverfahren oder Konzepten in der Branche oft Vorteile; so handelt es sich meist um technologisch anspruchsvolle Verfahren, die nicht einfach kopiert werden können und auch in Bezug auf mögliche Applikationen Möglichkeiten des gewerblichen Rechtsschutzes bieten können. Ein entsprechender Schutz stellt wiederum für Investoren ein wichtiges Argument dar und ist oft wesentlich für die Akquise von Kapital.

## NACHHALTIGKEIT

Nachhaltigkeit ist eines der wesentlichen Argumente für den Einsatz der Präzisionsfermentation in der Lebensmittelherstellung. Insbesondere wenn Proteine aus der Tierhaltung (z. B. Milch-, Ei-, Fleischproteine) durch Alternativen aus der Präzisionsfermentation ersetzt werden, eröffnen sich den Unternehmen große Potenziale, ihre Treibhausgasemissionen (THG) radikal zu reduzieren und Nachhaltigkeitsziele zu erreichen. Lebenszyklusanalysen (*Life Cycle Assessment; LCA*) der Hersteller entsprechender Proteine und Einschätzungen von Branchenexpertinnen und -experten im Rahmen dieser Studie gehen von möglichen THG-Einsparungen von über 70% aus (abhängig von Produkt, Anwendung, Region und Szenario) <sup>33, 34, 35</sup>.

So zeigt beispielsweise eine Studie zu Ovalbumin, das mit dem Pilz *Trichoderma reesei* hergestellt wird, dass bei der Produktion von einem Kilogramm dieses Proteins mittels Präzisionsfermentation nur 2,54 kg Glukose und 2,04 kg Mineralien und Stickstoff notwendig sind, während der Futtermittelbedarf pro kg Hühnereiweiß 27,5 kg beträgt. Dies würde sich bei einer kommerziellen Produktion deutlich im Flächenverbrauch niederschlagen <sup>36</sup>. Eine LCA für das Milchprotein von Perfect Day ergab ein um 91,2 bis 96,6 % geringeres Treibhausgaspotenzial im Vergleich zum Milchgesamtprotein. Auch der Wasserverbrauch lag um 96,3 bis 98,7 % niedriger <sup>37</sup>. Der Vergleich der potenziellen Auswirkungen des Impossible Burgers® und eines amerikanischen Hackfleisch-Burgers von der Wiege bis zur Bahre pro kg Endprodukt via LCA ergab für alle untersuchten Auswirkungen erhebliches Verringerungspotenzial von zwischen 87 % (Wasserverbrauch) und 96 % (Flächenverbrauch). Das im Rahmen dieser Studie berechnete Treibhausgaspotenzial für den Impossible Burger war um 89 % geringer <sup>38</sup>.

Auch, wenn die Zahlen für jeden Einzelfall hinterfragt und die Rahmenbedingungen der Berechnung berücksichtigt werden müssen <sup>39</sup>, eröffnen sie für Lebensmittelunternehmen, die dringend die Klimaauswirkungen ihrer Lieferketten verringern möchten, attraktive Perspektiven und sind Haupttreiber für entsprechende Aktivitäten (z. B. Kooperationen mit oder Beteiligungen an Start-ups oder In-House-Projekte; s. S. 16). Ausschlaggebend für die tatsächliche Nachhaltigkeit sind unter anderem die Rahmenbedingungen der Rohstofferzeugung – sowohl für die Fermentation als auch z. B. die Frage der Viehfütterung (Weidehaltung oder Futtermittel), der jeweilige Energiemix vor Ort sowie die Produktivität der biotechnologischen Prozesse und die angestrebte Produktqualität bzw. der Einsatz des Produkts. In allen diesen Punkten sind in den nächsten Jahren weitere Fortschritte zu erwarten.



## C. HERAUSFORDERUNGEN

Im Kontext der Produktion von Proteinen, Lipiden oder Oligosacchariden mittels Präzisionsfermentation werden sowohl in öffentlich zugänglichen Informationsquellen wie auch in den Gesprächen mit Branchenkennern immer wieder zwei Hauptherausforderungen genannt, die einen schnellen kommerziellen Erfolg am Lebensmittelmarkt derzeit noch hemmen: Hohe Kosten sowie komplizierte regulatorische Rahmenbedingungen. In der öffentlichen Debatte werden zudem immer wieder Herausforderungen diskutiert, die in Verbindung mit der Akzeptanz seitens der Konsumenten bestehen könnten.

### KOSTEN

Aktuell steht insbesondere die Produktion von Proteinen, Lipiden oder Oligosacchariden mittels Präzisionsfermentation häufig noch relativ am Anfang und es bedarf eines größeren finanziellen und zeitlichen Aufwands, um einen Technologie-Reifegrad zu erreichen, der eine vollständige kommerzielle Umsetzung ermöglicht. Ein erhöhter F&E-Aufwand zur Entwicklung und Optimierung von Stämmen und Prozessen, Investitionen in spezielle Ausrüstung, Infrastruktur und qualifizierte Arbeitskräfte sowie Ausgaben, die für die Einhaltung gesetzlicher Vorgaben notwendig sind, gehören zu den wesentlichen Kostentreibern bei der Etablierung der neuen Verfahren. Im Vergleich zur Präzisionsfermentation von Vitaminen, Aromastoffen oder Enzymen werden bei der Herstellung von Proteinen und Lipiden zudem deutlich höhere Volumina bei gleichzeitig deutlich geringeren Herstellungskosten pro Tonne Endprodukt benötigt, um am Markt gegenüber herkömmlichen Verfahren (z. B. traditionelle Landwirtschaft und Viehzucht) bestehen zu können. Geeignete Kapazitäten fehlen aber vielerorts noch und entsprechende Anlagen müssen erst auf- oder umgebaut werden <sup>40</sup>. Auch sind für wirtschaftlich tragbare Prozesse vielfach die Ausbeuten noch zu gering. Die Herstellungskosten können daher oft noch nicht mit denen herkömmlicher industrieller Verfahren konkurrieren. Zum Beispiel sind die Herstellungskosten von Proteinen wie Casein oder Albumin via Präzisionsfermentation mit etwa 60 €/kg heute noch um das Drei- bis Vierfache höher als die entsprechenden Produkte am Markt. Auch entsprechend hergestellte Lipide sind mit etwa 4 €/kg um das Zwei- bis Zweieinhalfache teurer als aktuelle Marktpreise. Doch sind seit einigen Jahren – auch vor dem Hintergrund der wachsenden Nachfrage nach ethisch wie ökologisch unbedenklicheren Lebensmitteln – große Fortschritte zu beobachten. Analysen gehen davon aus, dass Proteine aus Präzisionsfermentation zwischen 2023-2025 bei 10 – 30 €/kg liegen werden, was wiederum - abhängig von Protein und Anwendung - eine erste Markterschließung ermöglicht <sup>41</sup>. Die Entwicklung neuer Werkzeuge in der synthetischen Biologie, die kontinuierliche Optimierung der Prozesse, die Erhöhung des Produktionsmaßstabs, steigende Verfügbarkeit erneuerbarer Energien oder die Verwendung kostengünstigerer Substrate (z. B. aus Reststoffströmen) sind Faktoren, die die Produktionskosten weiter senken werden <sup>42, 43</sup>. Die Entwicklung und Produktion von Zielmolekülen mit verbesserten oder neuen Eigenschaften stellen zusätzliche Möglichkeiten dar, konkurrenzfähige Präzisionsfermentationsprodukte am Markt zu etablieren.

### REGULATORISCHE RAHMENBEDINGUNGEN

Neuartige Lebensmittel müssen, um für den Verkauf zugelassen zu werden, entsprechende Antragsverfahren durchlaufen. Diese können je nach Region sehr komplex sein und teilweise bis zu vier Jahren oder gar länger dauern. Die Variabilität von Vorschriften in Verbindung mit dem Fehlen klarer Leitlinien oder einer Harmonisierung in den verschiedenen Rechtsordnungen behindern den Markteintritt oder Investitionen. Die Antragsverfahren in der EU gelten gegenüber z. B. denen in den USA, Singapur oder auch Ländern Lateinamerikas als langwieriger und schwieriger und führen dazu, dass Präzisionsfermentationsunternehmen ihre Produkte in Märkten außerhalb der EU launchen <sup>44, 45, 46, 47</sup>. So plant zum Beispiel das finnische Start-up Onego Bio, sein Produkt „Bioalbumen“ nicht in Europa, sondern in den USA erstmals auf den Markt bringen <sup>48</sup>.

Betroffene Unternehmen nennen als wesentliche Hürden einer Zulassung neben der Novel-Food-Verordnung in der EU immer wieder Unklarheit und fehlende Transparenz bezüglich einzureichender Informationen <sup>49, 50</sup>. Ein weiteres Hemmnis kann die Frage sein, ob die Europäische Kommission die Endprodukte als genetisch verändert einstuft und

sie somit unter die GVO-Verordnung fallen. In diesem Fall kann sich das Zulassungsverfahren deutlich verlängern<sup>51</sup>. Das seit 2019 andauernde Antragsverfahren von Impossible Foods' Leghmoglobin - seit 2016 in den USA, aber auch in anderen Ländern bereits zugelassen - ist dafür ein prominentes Beispiel<sup>52</sup>.

Es gibt jedoch auch in Europa Beispiele von Produkten aus Präzisionsfermentationsprozessen, die die Zulassungsverfahren erfolgreich durchlaufen haben und bereits am Markt etabliert sind. Ein Beispiel sind Humane Milch-Oligosacharide<sup>53,54,55</sup>. Zudem reagiert die Branche und gründete 2023 den Verband „Food Fermentation Europe“<sup>56</sup>, eine Allianz mehrerer europäischer Start-ups aus dem Bereich Präzisionsfermentation, die sich das Ziel gesetzt haben, Unternehmen bei der Zulassung neuartiger Lebensmittel durch die EU zu unterstützen. Unter anderem möchte die Organisation politische Entscheidungsträgerinnen und Interessenvertreter über das Thema informieren.

Ein weiterer, wichtiger Aspekt ist die Kennzeichnung entsprechend hergestellter Produkte – insbesondere auch vor dem Hintergrund der Transparenz gegenüber Verbraucherinnen und Verbrauchern. Die Kennzeichnung ist in einigen Märkten noch nicht klar geregelt bzw. wird laufend angepasst. Während in der EU z. B. Fleischbegriffe wie „Wurst“ oder „Burger“ auch für Produkte nicht-tierischen Ursprungs genutzt werden dürfen, sind Bezeichnungen für Milchprodukte wie „Milch“ und „Joghurt“ nach EU-Recht verboten, wenn es sich um nicht-tierische Alternativen handelt.

Auch für die Produkte bzw. Zutaten aus der Präzisionsfermentation selbst existiert bis heute noch keine einheitliche Terminologie. Eine Studie des Start-ups Formo in Zusammenarbeit mit der Fordham University und Mercy for Animals aus dem Jahr 2022 zu fermentationsgestützten Milchprodukten zeigte, dass der Verbraucher die Bezeichnung „tierfreie Milchprodukte“ bevorzugt. Die Bezeichnung „tierfrei“ wird weltweit von Unternehmen bereits vielfach genutzt<sup>57,58</sup>. In Deutschland sind, wie in ganz Europa, aktuell noch keine solchen „tierfreien Milchprodukte“ auf dem Markt, doch wird beispielsweise entsprechend hergestelltes Chymosin als Ersatz für tierisches Lab oft als „mikrobielles Lab“ oder „mikrobieller Labaustauschstoff“ gekennzeichnet.

Ähnliche Diskussionen sind zu erwarten, wenn es um die Einstufung der Produkte als „vegetarisch“ oder „vegan“ geht. Da die Proteine oder Lipide chemisch identisch zu denen aus tierischen Produkten sind, aber ohne Tiere hergestellt werden, hängt es stark von der Definition des Gesetzgebers bzw. einzelner Label ab, inwieweit ein „tierfreier Käse“ als vegetarisch bzw. vegan bezeichnet werden darf.



## AKZEPTANZ

Die wenigen bisher verfügbaren Studien zu Produkten aus Präzisionsfermentationsprozessen in Lebensmitteln zeichnen ein eher positives Bild in Bezug auf die Akzeptanz bei Verbraucherinnen und Verbrauchern. Dabei sind jüngere Generationen (Millennials und Generation Z) offener gegenüber Lebensmittelinnovationen wie der Präzisionsfermentation als die Gesamtheit aller Erwachsenen. Auch zeigt sich, dass die Bereitschaft, entsprechende Produkte zu konsumieren, deutlich höher ist, wenn ein besseres Verständnis bei den Verbrauchern gegeben ist. So gaben in einer Studie, die im Jahr 2023 von der Hartman-Gruppe in Zusammenarbeit mit Perfect Day und Cargill erstellt wurde, 77 % der in den USA befragten Erwachsenen, die nach eigenen Aussagen mit Präzisionsfermentation vertraut waren, an, dass sie wahrscheinlich Präzisionsfermentationsprodukte kaufen würden. Bei den jüngeren Angehörigen dieser Gruppe konnten sich das sogar 84 – 85 % vorstellen. Im Schnitt lag die Bereitschaft aller Befragten, entsprechende Produkte auszuprobieren, bei 40 %. Starke Treiber waren die Erwartung an die Präzisionsfermentation, nachhaltigere und ethisch vertretbarere Alternativen zu herkömmlichen tierischen Produkten bieten zu können<sup>59</sup>.

Ähnliche Ergebnisse in Bezug auf die Akzeptanz lieferte eine Studie der Universität Bath und des deutschen Start-up Formo aus dem Jahr 2021: Hier wurden Verbraucherinnen und Verbraucher aus Brasilien, Deutschland, Indien, dem Vereinigten Königreich und den USA – nachdem sie mit Hintergrundinformationen zur Präzisionsfermentation versorgt wurden – über ihre Einstellung zu tierfreiem Käse befragt, der mittels entsprechender Fermentationsprodukte hergestellt wurde. Je nach Land gaben 64,9 % (USA) bis 92 % (Brasilien) der Verbraucherinnen und Verbraucher an, sie würden ein solches Produkt wahrscheinlich oder auf jeden Fall probieren (Deutschland 75,9 %). Insgesamt 70,5 % gaben an, sie würden es wahrscheinlich oder auf jeden Fall kaufen. Auf die Frage, ob sie entsprechende Produkte wahrscheinlich regelmäßig kaufen würden, gaben durchschnittlich 49,8 % der Befragten aus jedem Land an, dass sie dies wahrscheinlich oder auf jeden Fall tun würden. Wie auch in anderen Studien wurden ethische und ökologische Aspekte als Prädiktoren für die Kaufbereitschaft identifiziert, zum Teil spielten aber auch Geschmack, Gesundheits- und Sicherheitsaspekte eine Rolle<sup>60</sup>.

Die oben genannten Beispiele, aber auch die im Rahmen dieser Studie geführten Interviews mit Expertinnen und Experten zeigen, dass Verbraucherinformation ein wesentlicher Faktor für den Markterfolg von Lebensmitteln mit Bestandteilen aus Präzisionsfermentation ist. Mit Transparenz und im Dialog können Fehler, wie sie in der Vergangenheit bei der Einführung von gentechnisch veränderten Pflanzen gemacht wurden, vermieden und das Vertrauen in entsprechende Lebensmittel gestärkt werden. Studien zeigen, dass der Verbraucher dabei insbesondere Lebensmittelunternehmen in der Verantwortung sieht<sup>61</sup>. Ein wichtiges Argument gegenüber Skeptikern in diesem Kontext könnte z. B. sein, dass es sich bei den finalen Produkten nicht um gentechnisch veränderte Organismen (GMO) handelt.

Dass Transparenz und Dialog essenziell für den Markterfolg entsprechender Produkte sind, hat die stark von Start-ups getriebene Branche erkannt. Viele der Unternehmen veröffentlichen Informationen auf ihren Homepages, bieten Verbraucherinnen und Verbrauchern an, bei Produkttests mitzuwirken, oder geben Einblicke in ihre Produktionsstätten. Im Jahr 2023 gründeten führende in dem Bereich tätige Unternehmen die „Precision Fermentation Alliance“, die sich aus Unternehmerinnen, Wissenschaftlern, Ernährungswissenschaftlerinnen und Pädagogen zusammensetzt und sich zum Ziel gesetzt hat, das Verständnis für die Technologie zu fördern, weltweit Transparenz in Bezug auf entsprechende Lebensmittelzutaten zu schaffen und ein Forum zur Erörterung globaler Fragen zum Thema bereitzustellen<sup>62</sup>. Auch Institutionen wie das Good Food Institute (GFI) bieten ausführliche Informationen<sup>63</sup>.

Letztlich wird es stark auf die Kommunikation und das Framing ankommen – „Laborfleisch“ wird wahrscheinlich auf weniger Akzeptanz stoßen als „Fleisch ohne Tiere“. Ein frühzeitiger Dialog mit Stakeholdern wie Verbraucherschützern, Naturschutzorganisationen, aber auch der Politik ist essenziell, um Vorbehalte abzubauen oder gar nicht erst aufkommen zu lassen.

## D. PRÄZISIONSFERMENTATION UND START-UPS

Insbesondere bei der Produktion von Proteinen, Lipiden oder Oligosacchariden, aber auch bei der Aromen- oder Pigmentherstellung spielen Start-ups eine entscheidende Rolle und sind ein Innovationsmotor der Branche. Etablierte Unternehmen haben das längst erkannt und engagieren sich zunehmend. Die Start-ups wiederum profitieren von der technischen Expertise, Infrastruktur oder dem Zugang zu Vertriebskanälen der etablierten Unternehmen. Investitionen, Übernahmen, der Kauf von Produkten oder der Verkauf von benötigten Betriebsmitteln oder Dienstleistungen an die Start-ups können den kommerziellen Erfolg entsprechender Vorhaben zusätzlich stark fördern<sup>64</sup>.

Ein bekanntes Beispiel für die Partnerschaft von Start-up und etabliertem Unternehmen im Bereich Präzisionsfermentation ist die Zusammenarbeit von The EVERY Company mit der AB InBev Gruppe (bzw. BioBrew), um die Skalierung des Präzisionsfermentationsprozesses von The EVERY Company zu unterstützen (Eiprotein)<sup>65</sup>. Weitere Beispiele sind die Unterstützung von New Culture bei der Produktentwicklung und dem Scale-up ihres Caseins durch ADM<sup>66</sup>, die Partnerschaft zwischen Formo und BRAIN Biotech zwecks Scale-up der Formo-Milchproteine<sup>67</sup> oder die Markteinführung der ersten tierfreien Schokolade von Mars bzw. des ersten tierfreien Schokoladenriegels von Betterland Foods jeweils in Zusammenarbeit mit Perfect Day<sup>68, 69</sup>. Weitere Partnerschaften, die 2022 öffentlich angekündigt wurden und sich auf die Entwicklung von Endprodukten oder die Skalierung von Bioprozessen konzentrierten, sowie gemeinsame Produktlaunches hat das GFI in seinem „State of the Industry Report“ zusammengetragen<sup>70</sup>.

Betrachtet man die Investitionen in Präzisionsfermentations-Start-ups in Europa und Israel insgesamt, fällt auf, dass vor allem Start-ups im Bereich Lebensmittel und Getränke (FoodTech) gefördert werden (sie erhielten in den letzten Jahren etwa 70 % aller Mittel). Die Investorinnen und Investoren sehen bisher vor allem ein großes Potenzial im Bereich der Proteine; die Mehrheit aller Investitionen fließt in entsprechende Unternehmen. Die meisten Deals und Finanzierungen erfolgen in Technologien mit geringer technologischer Reife (TRL bis 5)<sup>71</sup>. Dies impliziert eine große Zuversicht seitens der Geldgeberinnen und Geldgeber, dass bestehende Hürden beseitigt und die Technologie sich im Lebensmittelbereich wird durchsetzen können. Zurückhaltung ist insbesondere in späteren Phasen zu beobachten, wenn für Scale-up-Aktivitäten große Summen aufgerufen werden müssen, da Anlagen für den Demo- oder gar kommerziellen Maßstab weltweit fehlen (siehe S. 24 ff.)<sup>72, 73</sup>.



## 3.

## RELEVANTE PRODUKTGRUPPEN

### A. PROTEINE

Die stärkste Aktivität in der Lebensmittel-Präzisionsfermentation ist aktuell im Bereich „Proteine“ zu beobachten. Besonders Milchproteine sind sehr erfolgreich: So zählt das GFI in seinem aktuellen Report allein in den USA inzwischen mindestens 30 tierfreie Molkereiprodukte, die im Einzelhandel erhältlich sind. Kommerzielle Produkte umfassen beispielsweise Milch, Eis und Schokolade, Proteinpulver und Käse<sup>74</sup>. Zunehmend sind auch Ei- und Häm-Proteine, die über Präzisionsfermentation gewonnen wurden, auf dem Markt zu finden. Beispiele hierfür sind Macarons, die mit Eiklar von The EVERY Company hergestellt wurden<sup>75</sup>, oder Impossible Foods' Leghmoglobin-haltiger Burger-Patty<sup>76</sup>. In nahezu allen Regionen der Welt laufen intensive F&E- sowie Gründungsaktivitäten in diesem Bereich. Die avisierten Zielprodukte reichen von Casein, Lactoferrin und Molkenprotein (siehe z. B.<sup>77, 78</sup>) über Ovalbumin, Ovotransferrin, Ovomucoid oder Ovomucin (siehe z. B.<sup>79</sup>) bis hin zu verschiedenen Häm-Proteinen (siehe z. B.<sup>80</sup>) und Kollagen/Gelatine (siehe z. B.<sup>81</sup>).

Wenn tierische Proteine (aber auch tierische Fette; s. S. 18) in Lebensmitteln ersetzt werden sollen, stoßen pflanzliche Alternativen sowohl hinsichtlich ihrer technofunktionellen als auch ihrer sensorischen Eigenschaften oft an Grenzen. So lassen sich zum Beispiel Ovalbumin oder Kollagen nur begrenzt durch pflanzliche Alternativen ersetzen. Auch Käsealternativen auf Pflanzenbasis erfüllen häufig die Erwartungen an Schmelzfähigkeit oder Elastizität nicht, die für die Verarbeitung analog zum konventionellen Produkt wichtig sind<sup>82</sup>. Die Lebensmittelindustrie sieht daher in Alternativen aus Präzisionsfermentation, regulatorische Klarheit, konkurrenzfähige Preise und verfügbare Volumina vorausgesetzt, ein sehr hohes Potenzial. Konsequenterweise investieren viele global agierende Unternehmen in entsprechende Projekte und Start-ups bzw. gehen Kooperationen ein. Als Beispiel hierfür sei die Investition der Grupo Bimbo, eines der größten Lebensmittelproduzenten der Welt, in The EVERY Company (Eiproteine<sup>93</sup>) oder die Kooperation zwischen Geltor (Kollagen) mit GELITA, einem führenden Anbieter auf dem globalen Kollagenproteinmarkt<sup>271</sup>, genannt.

Auch Myoglobin, ein Häm-Protein, das im Muskel vorkommt, ist für die Lebensmittelindustrie zunehmend von Interesse. Es ist für die sensorische Qualität von Fleisch wichtig, beispielsweise für den serumartigen Geschmack und das metallische Mundgefühl von Rindfleisch<sup>83</sup>. Auch hier sind in den letzten Jahren vermehrt Unternehmensgründungen und Projekte zu beobachten, die sich zum Ziel gesetzt haben, diese Proteine über Präzisionsfermentation herzustellen (siehe z. B. Motif FoodWorks<sup>84</sup> und Paleo<sup>85</sup>). Branchenkenner sehen auch für Milchproteine wie Casein, Lactoferrin und Molkenprotein ein hohes Potenzial und inzwischen investieren zahlreiche global agierende Unternehmen in entsprechende Projekte<sup>86, 87, 88</sup> (s. o.). Ein Grund sind vor allem Nachhaltigkeitsbetrachtungen (s. S. 12). Beispielsweise werden jährlich weltweit jeweils etwa 2,6 Millionen Tonnen Magermilch- und Vollmilchpulver gehandelt<sup>89</sup> und für die Herstellung von Joghurt, Käse, Süß- und Backwaren oder Babynahrung genutzt. Die weltweite Nachfrage nach Milchpulver wird mittelfristig voraussichtlich weiter steigen. Proteine aus der Präzisionsfermentation bieten verarbeitenden Unternehmen attraktive Möglichkeiten, ihren Nachhaltigkeitszielen deutlich näher zu kommen, da hier im Vergleich zur traditionellen Herstellung deutliche Einsparungen bei z. B. Trinkwasser, Energieverbrauch oder Treibhausgasausstoß zu erwarten sind<sup>90, 91, 92</sup>. Auch lassen sich Proteine „nach Bedarf“ fertigen und es muss nicht die Kommerzialisierung von Seiten- oder Nebenströmen, wie sie bei der herkömmlichen Herstellung von Eiweiß- oder Milchproteinen entstehen (z. B. Eigelb oder Milchfett), bedacht werden.

## B. LIPIDE

Die erfolgreiche Entwicklung und Produktion von mikrobiellen Fermentationsfetten und -ölen ist für die Branche ein wichtiges Ziel. Anbieter werden dringend gesucht, um mit ihren Produkten den Geschmack und auch die Textur von Produkten aus alternativen Proteinen zu verbessern. Palmöl- oder Kakaobutter-Äquivalente sind für die Lebensmittelindustrie besonders interessant, aber auch gezielt auf spezifische Bedürfnisse ausgerichtete Fettsäureprofile wären für die Branche von hohem Wert. Besonderes Interesse besteht zudem an Alternativen für tierische Fette, denn auch hier reichen pflanzliche Alternativen sowohl bei den technofunktionellen als auch den sensorischen Eigenschaften meist nicht an die Leistung ihres tierischen Pendants heran. Die Präzisionsfermentation bietet auch hier enorme Potenziale. Teilweise wird sogar erwartet, dass entsprechend hergestellte Lipide sich im Vergleich zu vielen Proteinen schneller am Markt durchsetzen können.

Trotz des absehbaren Marktpotenzials sind Projekte zur Präzisionsfermentation zur Herstellung von Lipiden für die Lebensmittelproduktion im Vergleich zur Herstellung von Proteinen aktuell jedoch weniger verbreitet und befinden sich oft noch in einem früheren Entwicklungsstadium. Grund hierfür sind u. a. zusätzliche Herausforderungen bei der Etablierung entsprechender Prozesse. Geeignete Biosynthesewege müssen identifiziert, optimiert oder übertragen werden, um die gewünschte Produktivität zu erreichen; anders als bei der Herstellung von Proteinen genügt es nicht, ein Gen zu verändern, sondern der gesamte Metabolismus muss untersucht und angepasst werden. Wirtschaftlich rentable Prozesse aufzubauen, kann somit deutlich komplexer sein und damit auch deutlich höhere Investitionen erfordern, als es z. B. bei der Herstellung rekombinanter Proteine der Fall ist. Andererseits jedoch sind vergleichbare Fermentationsprozesse für die Herstellung von Lipiden in der chemischen Industrie bereits etabliert und die Übertragung relevanter Erkenntnisse aus diesem Bereich könnte die Kommerzialisierung von fermentativ gewonnenen Fetten für die Lebensmittelindustrie beschleunigen<sup>94</sup>.

Erste Fortschritte und verstärkte Aktivitäten in der Herstellung von tierfreien Fetten und Ölen mittels Präzisionsfermentation sind bereits zu erkennen. So haben im vergangenen Jahr z. B. das australische Start-up Nourish Ingredients in einer Serie A 45 Mio. AU\$<sup>95</sup> und das schwedische Unternehmen Melt&Marble in einer Seed-Runde 5 Mio. €<sup>96</sup> erhalten, um entsprechende Entwicklungsaktivitäten voranzutreiben. Auch in Deutschland gibt es immer mehr Unternehmensgründungen im Bereich „Lipide“ (siehe z. B. CoLiPi<sup>97</sup>, Global Sustainable Transformation<sup>98</sup>, Planet A Foods<sup>99</sup> oder Insempra<sup>100</sup>). Diese fallen jedoch nicht immer unter die hier verwendete Definition der „Präzisionsfermentation“.



## C. KOHLENHYDRATE

Präzisionsfermentation wird bereits seit einigen Jahren genutzt, um Humane Milch-Oligosaccharide (HMO) zu produzieren (siehe z. B. Jennewein/Chr. Hansen<sup>101</sup>, FrieslandCampina<sup>102</sup>, Conagen<sup>103</sup> oder Glycom/DSM<sup>104</sup>). HMO sind komplexe Zucker, die ausschließlich in der menschlichen Muttermilch vorkommen und unter anderem für den Aufbau und den Erhalt eines gesunden Darmmikrobioms, die Stärkung der Magen-Darm-Barriere, die Entwicklung des Immunsystems oder die Förderung der neuronalen Entwicklung verantwortlich gemacht werden<sup>105</sup>. Sie werden Säuglingsnahrung zugesetzt und sind wichtig, wenn Säuglinge nicht gestillt werden können. Entsprechende Produkte sind für den Konsum behördlich zugelassen. So wurde beispielsweise im Jahr 2017 das in der Muttermilch dominierende Oligosaccharid 2'-Fucosyllactose für den europäischen Markt zugelassen (Novel-Food-Zulassung)<sup>106</sup>. Weitere HMO wie 3-Fucosyllactose, Lacto-N-tetraose, 3'-Sialyllactose oder 6'-Sialyllactose sind erhältlich. An der Charakterisierung und Herstellung weiterer HMO wird intensiv geforscht<sup>107,108</sup>.

Auch Polysaccharide spielen in der Lebensmittelindustrie eine wesentliche Rolle. Sie können beispielsweise als Emulgatoren, Stabilisatoren, Verdickungs-, Koagulations-, Binde-, Gelier- oder Suspendiermittel eingesetzt werden. Schon heute wird eine große Zahl von Polysacchariden für die Lebensmittelindustrie über fermentative Prozesse gewonnen (siehe z. B. Xanthan<sup>109</sup>, Gelan<sup>110</sup>, Pullulan<sup>111</sup>, Curdlan<sup>112</sup>). Bei den verwendeten Stämmen handelt es sich im Wesentlichen jedoch um Wildtypstämme. Die Präzisionsfermentation bietet in Bezug auf neue und auf spezifische Anwendungen optimierte Polysaccharide ein riesiges Potenzial. Jedoch scheint es bisher nur wenige Projekte in diesem Bereich zu geben.

## D. ANDERE

Während der Einsatz der Präzisionsfermentation für die Herstellung von Proteinen, Lipiden und Kohlenhydraten erst in den letzten Jahren Fahrt aufgenommen hat, werden Vitamine, Farbstoffe, Enzyme oder Aromen bereits seit Jahrzehnten erfolgreich mittels Präzisionsfermentation hergestellt. Diese Verbindungen haben den Vorteil, dass sie nur in geringeren Mengen im finalen Produkt enthalten sind und so pro Produkteinheit wesentlich höhere Preise am Markt aufgerufen werden können. Insbesondere im Bereich Aromen (siehe z. B. Vanillin oder Nootakon von Evolva, Süßungsmittel, Vanillin oder Squalen von Amyris<sup>113</sup> sowie Hopfenaromen von EvodiaBio<sup>114</sup>) und Farbstoffen (siehe z. B. Astaxanthin von Bicomer<sup>115</sup> oder Karminsäure von Conagen<sup>116</sup>) sind in den letzten Jahren zunehmend Gründungskaktivitäten zu beobachten. Aber auch internationale Konzerne verfolgen entsprechende Projekte, haben Akquisitionen getätigt oder Kooperationen gestartet. Beispiele sind die Akquise von First Choice durch DSM<sup>117</sup>, von Isobionics durch BASF<sup>118</sup> oder die Kooperation von Givaudan mit Amyris<sup>119</sup>.

Ein vergleichsweise neues Feld stellt die Produktion von Wachstumsfaktoren nicht-tierischen Ursprungs für die Produktion von *Cultured Meat* dar. Bisher wird zur Förderung des Zellwachstums und die Zelldifferenzierung bei der Kultivierung der tierischen Zellen meist fetales Kälberserum eingesetzt, was – neben ethischen Gesichtspunkten – auch zu hohen Kosten führen kann. Hier gibt es intensive Bemühungen, das Serum durch synthetische, über Präzisionsfermentation hergestellte Alternativen zu ersetzen. Eine Reihe von Unternehmen bieten bereits entsprechende Lösungen an oder sind dabei, diese zu entwickeln, (siehe z. B. Peprotech<sup>120</sup>, Tiamat Sciences<sup>121</sup> oder Laurus Bio<sup>122</sup>). Expertinnen und Experten sehen in synthetischen Wachstumsfaktoren einen für den kommerziellen Erfolg von kultiviertem Fleisch wesentlichen Baustein und attestieren der Präzisionsfermentation hier ein sehr großes Potenzial.

## 3.

## TECHNISCHE PRINZIPIEN DER PRÄZISIONSFERMENTATION UND VERFÜGBARKEIT VON TECHNOLOGIEN

### A. ROHSTOFFE

Als Kohlenstoff- und Energiequelle für die Präzisionsfermentation werden aktuell primär Zucker der ersten Generation genutzt (ca. 70 - 80 % der Prozesse) <sup>123</sup>. Darunter fallen insbesondere Glukose und Saccharose. Im Unterschied zu anderen Fermentationen, beispielsweise für Kraftstoffe oder chemische Grundstoffe, besteht bei der Weiterverarbeitung zu Lebensmitteln keine „Tank-Teller-Konkurrenz“, so dass Zucker problemlos eingesetzt werden können.

Doch nicht jeder Organismus kann jedes dieser Substrate mit der gleichen Effizienz umsetzen und die unterschiedlichen Substrate können je nach Regionen der Welt stark variieren. Zum Beispiel dominiert in den USA Glukose aus Maisstärke, während in Brasilien und Indien Saccharose aus Zuckerrohr und in Deutschland Saccharose aus Zuckerrüben vorherrscht. Glukose aus Maniok wird beispielsweise in einzelnen Regionen Asiens immer interessanter.

Fermentationssubstrate sind wesentliche Kostentreiber <sup>124</sup>. Deshalb gibt es zunehmend Bestrebungen, biogene Rest- und Nebenstoffe oder Gase als Feedstock zu nutzen. Zucker der zweiten Generation (z. B. Lignocellulosezucker), aber auch aus Restströmen oder CO<sub>2</sub> gewonnenes grünes Methanol, Ameisensäure, Essigsäure oder Ethanol könnten mittel- bis langfristig aussichtsreiche Alternativen sein <sup>125</sup>. Beim Einsatz von biogenen Rest- und Nebenstoffen muss jedoch immer geprüft werden, ob der Aufwand zur Vorbehandlung nicht den Kostenvorteil gegenüber herkömmlichen Substraten zunichte macht.

Produkte aus der Präzisionsfermentation wie z. B. Proteine werden meist in Kombination mit anderen kultivierten, fermentierten oder pflanzlichen Rohstoffen genutzt, um Lebensmittel herzustellen. Das Leghämoglobin von Impossible Foods zum Beispiel wird im „Impossible Beef“ mit Soja-Proteinen, Fetten aus Sonnenblumenöl und Kokosnussöl sowie anderen Zutaten kombiniert <sup>126</sup>. Auch Unternehmen, die das Molkenprodukt von Perfect Day nutzen, kombinieren dieses in ihren Produkten mit anderen Zutaten wie z. B. verschiedenen pflanzlichen Fetten (siehe z. B. <sup>127, 128</sup>).

Die meisten Präzisionsfermentations-Unternehmen haben sich auf den B2B-Bereich fokussiert und liefern ihre Produkte an die verarbeitende Industrie. Die Kombination von pflanzlichen Rohstoffen und Präzisionsfermentationsprodukten soll es z. B. ermöglichen, den Geschmack zu optimieren und dem Verbraucher nachhaltige, vegane, erschwingliche und sichere Produkte anzubieten <sup>129</sup>.



### B. PRODUKTIONSORGANISMEN UND WERKZEUGE

Investitionen kommen aktuell vor allem der Entwicklung von Stämmen und Prozessen zugute. Fortschritte in diesem Bereich sind für den kommerziellen Erfolg der Präzisionsfermentation wesentlich – vor allem bei hochvolumigen, aber vergleichsweise günstigen Produkten wie Proteinen oder Lipiden. Ziel ist u. a. eine möglichst hohe Effizienz. Doch sind aktuell bei vielen Prozessen die Titer und Ausbeuten noch zu gering. Man kann z. B. davon ausgehen, dass für die Produktion von einem Kilogramm Protein heute im Schnitt etwa 4 – 6 kg Zucker notwendig sind <sup>130</sup>.

Um kommerziell attraktive Präzisionsfermentationsprozesse zu entwickeln, braucht es im Wesentlichen für das Vorhaben geeignete Organismen, verlässliche Daten und – in den meisten Fällen – genetische Werkzeuge. Bei der Wahl der Organismen müssen u. a. folgende Fragen beachtet werden:

- ?** Was ist das in Bezug auf Produktionsprozess, Anwendung und Wirtschaftlichkeit geeignete Zielmolekül?
- ?** Gibt es für das Vorhaben geeignete Organismen, die bereits in Bezug auf einzusetzendes Substrat und zu produzierendes Zielmolekül vorteilhafte Stoffwechselwege oder Eigenschaften aufweisen und eine effiziente, skalierbare Produktion ermöglichen?
- ?** Welche Schritte müssen und können unternommen werden, um das Zielprodukt in der notwendigen Ausbeute und Qualität zu synthetisieren?
- ?** Insbesondere bei Organismen, die zuvor noch nicht zur Herstellung von Lebensmitteln genutzt wurden: Ist der Organismus in Bezug auf etwaige Zulassungsverfahren geeignet, also würde er beispielsweise im Zuge einer Sicherheitsbeurteilung einen Generally Recognized As Safe (GRAS)-Status erlangen?
- ?** Gibt es für die notwendigen Arbeiten am Organismus die richtigen genetischen Werkzeuge?

Eine Reihe neuer Screening-, Charakterisierungs- sowie *in-silico*-Methoden ermöglichen es heute, im Hochdurchsatzverfahren neue, potenziell geeignete Stämme zu identifizieren und näher zu charakterisieren. Dies birgt in Bezug auf neue Produktionsorganismen riesige Potenziale, nicht nur hinsichtlich (neuer) Produkte. Auch mit Blick auf alternative Fermentationssubstrate wie Lignocellulose-haltige (z. B. Stroh aus der Landwirtschaft), Zucker-haltige (z. B. Melasse aus der Zuckerrübenverarbeitung) oder Stärke-haltige Rest- und Nebenstoffströme (z. B. Stärkefraktion aus der Proteingewinnung aus Linsen, Erbsen oder Bohnen) eröffnet sich eine Vielzahl von Möglichkeiten. Auch industrielle Nebenströme wie Glycerin aus der Biodieselproduktion oder auch Syngas oder CO<sub>2</sub>-haltige Ströme aus industriellen Prozessen sind in diesem Kontext zu nennen.

Bis heute wird jedoch meist nur eine kleine Zahl von gut etablierten Arten für die Lebensmittelindustrie genutzt. Einer der Gründe ist, dass aufgrund der langjährigen Verwendung eine große Expertise im Umgang mit den Stämmen besteht. Auch werden durch die Nutzung etablierter Stämme Herausforderungen, die sich aufgrund regulatorischer Rahmenbedingungen bei der Nutzung oder Vermarktung neuer Stämme ergeben können, vermieden.

*Escherichia coli* ist einer der weltweit wichtigsten Organismen für biotechnologische Anwendungen und es existiert eine Vielzahl gut etablierter genetischer Werkzeuge und Protokolle zu seiner Verwendung und Optimierung. Er wird nicht nur in der Pharma- oder Chemieindustrie schon viele Jahrzehnte erfolgreich eingesetzt (siehe z. B. Insulin- oder 1,4-Butandiol-Produktion), sondern auch für die Lebensmittelindustrie ist er seit Langem ein wesentlicher Produktionsorganismus. Neben Enzymen für die Lebensmittelbranche (siehe z. B. Chymosin A aus *E. coli* K-12 in den 1980/90ern <sup>131, 132</sup>) fanden und finden entsprechende Stämme heute beispielsweise Anwendung bei der Produktion von Humanen

Milch-Oligosacchariden (z. B. Jennewein; heute Chr. Hansen<sup>133</sup>), Strukturproteinen wie Kollagen (z. B. Geltor<sup>134</sup>) oder Cytokinen (z. B. Peprotech<sup>135</sup>). Neben *E. coli* werden auch andere Prokaryoten für die Präzisionsfermentation von Enzymen für die Lebensmittelindustrie genutzt (z. B. *Bacillus subtilis* oder *B. licheniformis*<sup>136</sup>). Bakterielle Stämme werden zudem zur Herstellung von Vitaminen (siehe z. B. Vitamin B12 durch Stämme der Gattungen *Pseudomonas* oder *Propionibacterium*<sup>137</sup>) oder Aromen (siehe z. B. Biotransformationen zu Vanillin unter Verwendung von *Bacillus*-Stämmen<sup>138</sup>) herangezogen. Eukaryotische Systeme wie Mikroalgen oder Pilze werden ebenfalls eingesetzt. So können u. a. Organismen der Gattungen *Chlorella* oder *Prototheca* der Produktion von *Single Cell Protein* und *Single Cell Oil*<sup>139</sup> oder Stämme der Gattung *Aspergillus* der Herstellung von Labenzym (Chymosin B) dienen<sup>140</sup>.

Hefen sind weitere wichtige Produktionsorganismen. Eine der am häufigsten verwendeten Gattungen in der Präzisionsfermentation ist *Saccharomyces*, zu der auch die Back- bzw. Bierhefe *S. cerevisiae* gehört. Auch in der Präzisionsfermentation von Milch-, Fleisch - oder Ei-Proteinen sowie von Lipiden scheinen heute vor allem Hefen Anwendung zu finden. So nutzt beispielsweise Remilk modifizierte Stämme von *Pichia pastoris* (syn. *Komagataella phaffii*), um Milchproteine herzustellen<sup>141</sup>. Auch Impossible Foods<sup>142</sup> oder Motif FoodWorks<sup>143</sup> nutzen diese Hefe, um Soja-Leg hämoglobin respektive Rinder-Myoglobin zu produzieren. In beiden Fällen liegt das Zielprodukt intrazellulär vor und muss mit entsprechendem Aufwand gereinigt werden. Das belgische Start-up Paleo nutzt modifizierte Stämme von *P. pastoris*, die ein Myoglobin sekretieren. Dies kann den Aufwand bei der Isolation und Reinigung des Zielprodukts erheblich reduzieren und auch Vorteile bei der Zulassung des Endproduktes bieten, da keine DNA im finalen Produkt verbleibt<sup>144</sup>. *P. pastoris* ist eines der beliebtesten und etabliertesten Expressionssysteme in der industriellen Biotechnologie und wird weithin für die für die Herstellung rekombinanter Proteine herangezogen. *P. pastoris*-Systeme erlauben die Kultivierung zu sehr hohen Zelldichten, eine effiziente Genexpression und Sekretion rekombinanter Proteine sowie die einfache Reinigung dieser Proteine aufgrund der begrenzten Produktion endogener sekretorischer Proteine<sup>145</sup>. *P. pastoris*-Stämme wurden und werden z. B. auch zur Synthese von Süßungsmitteln und Enzymen eingesetzt. Bereits vor mehr als 40 Jahren wurden sie zur kommerziellen Produktion von *Single Cell Protein* genutzt<sup>146,147,148</sup>.



Auch bei der Herstellung von Lipiden spielen Hefen eine wichtige Rolle. So gibt es Hinweise, dass die Start-ups Nourish Ingredients und Yali Bio für die Herstellung von Alternativen zu tierischen Fetten Stämme von *Yarrowia* nutzen<sup>149, 150</sup>. Auch C16 Bioscience (Palmöl), Melt & Marble (tierische Fette) oder Planet A Foods (Kakaobutter) nutzen für die Produktion Hefe-Stämme<sup>151</sup>. Die Fettthefe *Y. lipolytica* ist für die kommerzielle Produktion von Fetten und Ölen via Präzisionsfermentation aus mehreren Gründen besonders interessant: Die Organismen reichern natürlicherweise hohe Mengen Lipide an (ca. 20 % des Zelltrockengewichts); Organismen und Kultivierungsbedingungen konnten inzwischen sogar so weit optimiert werden, dass bis zu 90 % des Zelltrockengewichts und ein Lipidtiter von 25 g/L erreicht werden konnten. Der Organismus ist sehr gut erforscht und es existiert eine Vielzahl geeigneter biotechnologischer Werkzeuge. Auch kann er ein breites Spektrum an Substraten verarbeiten<sup>152, 153</sup>. Nicht zuletzt sind die rechtlichen Hürden zum Einsatz von *Y. lipolytica* im Lebensmittelbereich im Vergleich zu vielen anderen Arten geringer, u. a. da die US-amerikanische Food and Drug Administration (FDA) bereits zahlreichen kommerziellen Prozessen den GRAS-Status verliehen hat und auch die Europäische Behörde für Lebensmittelsicherheit (EFSA) *Y. lipolytica*-Biomasse 2019 als sicheres neuartiges Lebensmittel zugelassen hat<sup>154, 155</sup>.

Auch die Verwendung von *Trichoderma reesei* wird für die Branche zunehmend interessanter: So greifen Onego Bio und Perfect Day für die Produktion von Ovoalbumin respektive β-Lactoglobulin auf Stämme dieses Schlauchpilzes zurück<sup>156, 157</sup>. *T. reesei* zeichnet sich durch hohe Syntheseleistungen und eine hohe natürliche Kapazität zur Sekretion von (cellolytischen) Enzymen aus, was ihn zu einem für die industrielle Herstellung von Proteinen sehr interessanten Stamm macht. Einige Studien berichten sogar von einem sekretierten Gesamtproteintiter von mehr als 100 g/L. Neben der Herstellung der oben genannten Produkte werden Stämme z. B. auch für die Produktion von Cellulasen, Xylanasen, Amylasen und Proteasen oder für Biopharmazeutika wie Interferone genutzt oder in Betracht gezogen<sup>158</sup>.

Zwar wird nach wie vor auch nach neuen Wildtypen gesucht, die für die Präzisionsfermentation eingesetzt werden können. Doch für Produkte, die sonst aus Tieren stammen, führt an einer genetischen Optimierung kaum ein Weg vorbei. Deshalb setzt man zur Erzeugung geeigneter Stämme heute oft gentechnische Werkzeuge oder auch CRISPR-basierte Technologien ein, mit denen Gene gezielt optimiert, aus dem Organismus entfernt oder ausgeschaltet werden, ihre Expression verstärkt oder Gene von anderen Organismen in den Produktionsorganismus gebracht werden. Auch nicht-rekombinante Techniken wie zufällige Mutagenese, gerichtete oder adaptive Evolution können zur Stammverbesserung verwendet werden. Die Nutzung nicht-rekombinanter Techniken kann Vorteile hinsichtlich der Zulassungsverfahren haben.

Wenn für Stämme noch keine oder nur wenige genetische Werkzeuge vorliegen, kann dies ein entsprechendes Vorhaben deutlich verlängern und verteuern. Auch wenn die Zielmoleküle nicht durch ein einziges Gen oder Gencluster codiert werden (wie z. B. Proteine), sondern Verbindungen synthetisiert werden, bei denen mehrere Gene oder ganze Stoffwechselwege involviert sind (siehe z. B. Lipide oder Aromen), kann sich der finanzielle und zeitliche Aufwand deutlich erhöhen. Wichtig für viele dieser Techniken ist, dass die Genomsequenz des Produktionsorganismus bekannt ist.

Auch andere „Omics-Technologien“ wie beispielsweise Transkriptomics, Proteomics oder Metabolomics können wertvolle Erkenntnisse liefern, um die Stoffwechselwege der Produktionsorganismen anzupassen bzw. weiter zu optimieren. Methoden zur Analyse der Produkte (wie z. B. Chromatographie) sind für den „Design-Build-Test-Learn“-Prozess ebenfalls wesentlich, um beispielsweise das Vorhandensein des Zielproduktes zu prüfen oder die gewünschte Lebensmitteleigenschaft zu validieren.

Zunehmend werden Biofoundries aufgebaut, die einen optimalen Einsatz von Automatisierungs- und Hochdurchsatzgeräten ermöglichen und so Fortschritte in der synthetischen Biologie beschleunigen sollen<sup>159</sup>. Experten erwarten, dass Fortschritte in den Bereichen Software und Datenverfügbarkeit die Präzisionsfermentation immens vorantreiben werden. Stoffwechselwege, Prozesse und Produkteigenschaften können immer besser simuliert werden und entsprechende Vorhersagen werden zuverlässiger. Dies ermöglicht die schnellere und zuverlässigeren Identifikation wirtschaftlich relevanter Produkte.

### C. APPARATE- UND ANLAGENBEDARF / INVESTITIONSKOSTEN

Für die Präzisionsfermentation werden Rohstoffe, üblicherweise Zucker, Ammoniakwasser und Spurenelemente, ggf. ergänzt durch Entschäumer, gemischt und sterilisiert. Die Organismen werden oft bis zu einer gewissen Zelldichte kultiviert und dann die Produktion induziert (theoretisch z. B. durch Einstellung des pH-Werts, UV-Licht, Temperaturänderungen oder Zugabe induzierender Verbindungen möglich). Bei der Präzisionsfermentation im Lebensmittelbereich handelt es sich meist um eine Zulauffermentation (Fed-Batch) und es wird vorwiegend das Submersverfahren eingesetzt: Die Zellen befinden sich in einem ständig gerührten, flüssigen Nährmedium; die Sauerstoffversorgung erfolgt durch Einblasen. Dieses Verfahren hat eine lange Tradition und wird auch in der industriellen Biotechnologie zur Produktion von Vitaminen, Aminosäuren, Arzneistoffen oder Chemikalien schon lange eingesetzt. Trotzdem bestehen Herausforderungen: So verhalten sich Zellen im Industriemaßstab oft nicht wie zuvor im Labormaßstab und Parameter wie pH-Wert, Temperatur, Druck, Zelldichte und andere Faktoren müssen perfekt auf die Anlagen und Organismen abgestimmt sein. Auch muss beispielsweise die durch den Stoffwechsel der Organismen erzeugte Wärme abgeführt werden.<sup>160,161</sup>

Obwohl einige Unternehmen neuartige Bioprozesse und Bioreaktoren entwickeln, erfahren diese bisher eher wenig Aufmerksamkeit. So werden für die Präzisionsfermentation heute meist nach wie vor klassische Rührkessel-Bioreaktoren eingesetzt. Ein Grund dafür ist nicht zuletzt, dass es für Unternehmen, die Partner für die Auftragsherstellung suchen oder eine bestehende Anlage kaufen wollen, nur wenige Möglichkeiten gibt, das Bioprozessdesign wesentlich zu ändern. Auch lässt sich Investitionskapital einfacher beschaffen, wenn auf nachweislich etablierte Prozesse zurückgegriffen wird. Branchenkenner gehen jedoch davon aus, dass durch neue Ansätze beim Bioreaktordesign wesentliche Fortschritte hinsichtlich Produktivität, Skalierbarkeit und Kostensenkung möglich werden und ein verbesserter Nährstoff- und Luftaustausch, ein geringerer Energieverbrauch oder eine optimierte kontinuierliche Produktion umsetzbar sind. Ein Beispiel sind Air-Lift-Reaktoren oder ähnliche Konzepte, die kein Rührwerk erfordern, weniger Energie benötigen als herkömmliche Reaktoren und sich auch für stark viskose Kulturen eignen. Entsprechende Konzepte sind besonders für hochvolumige Prozesse interessant, aber auch für Verfahren, die gasförmige Rohstoffe nutzen (z. B. Syngas oder CO<sub>2</sub>). Vor dem Hintergrund einer bestehenden Bioethanol-Fermentationsinfrastruktur werden auch anaerobe Konzepte immer interessanter.<sup>163</sup> Experten weisen jedoch generell darauf hin, dass angesichts der angestrebten niedrigen Produktionskosten ein Ziel sein sollte, möglichst einfache Reaktoren einzusetzen.



Im Vergleich zu den vorgelagerten Fermentationsprozessen sind nachgelagerte Prozessstufen („Downstream Processing“) deutlich variabler und u. a. stark vom Produkt abhängig. Typische nachgelagerte Schritte für die Prozessierung von Proteinen und anderen Produkten sind:

- (i) Separieren (z. B. Zentrifugation),
- (ii) gegebenenfalls Aufbrechen der Zellen, wenn die Produkte nicht durch diese in das Medium sekretiert werden (z. B. Zellyse),
- (iii) Filtern (z. B. Mikro- und Ultrafiltration) und
- (iv) Trocknen (z. B. Sprühtrocknung).

Der Aufbau und Betrieb entsprechender Anlagen kann Unternehmen vor einige Herausforderungen stellen: So müssen beispielsweise sehr große Mengen an Wasser behandelt, im Kreis geführt oder gegebenenfalls entsorgt werden. Anlagen aufzustellen und zu betreiben, erfordert ausreichend Platz (siehe z. B. Anlagen zur Sprühtrocknung). Gleichzeitig bieten die der Fermentation nachgelagerten Prozesse viele Möglichkeiten zur Skalierung, zur Verbesserung der Qualität oder zur Kostensenkung.<sup>164</sup>

Einer der größten Engpässe bei der Etablierung der Präzisionsfermentation für die Lebensmittelindustrie bzw. das Wachstum der Branche ist die Verfügbarkeit geeigneter Produktionskapazitäten. Heute bestehende Präzisionsfermentations-Anlagen, die für die kommerzielle Produktion genutzt werden, sind meist für die pharmazeutische Produktion ausgelegt, d. h. sie bedürfen eines höheren Personaleinsatzes, als für die Lebensmittelproduktion notwendig wäre, und sind im Anlagenumfang oft zu klein ausgelegt.<sup>165</sup> Auch besitzen sie oftmals nicht das optimale Equipment für die nachgelagerten Prozessschritte, was dazu führen kann, dass Ausbeuten niedriger oder Kosten höher liegen als sie sein könnten. Zudem überfüllen sie häufig die Sterilitätsanforderungen und sind dabei zu teuer für die Produktion vergleichsweise preissensitiver Lebensmittel. Auch bestehende Anlagen zur Herstellung von z. B. Bioethanol oder Brauereien sind in der Regel nicht für die Präzisionsfermentation geeignet.

Schätzungen zufolge sind weltweit nur etwa 5 % aller Anlagen von Vertragsherstellern explizit für die Fermentation und Aufbereitung von Lebensmitteln ausgelegt. Davon soll lediglich eine etwa vierstellige Zahl an Kubikmetern wirklich für entsprechende Projekte zur Verfügung stehen, u. a. auch, da der Großteil der weltweiten Kapazitäten über Verträge gebunden ist. Angesichts der vielen Projekte in der Entwicklungspipeline wird dies nach Expertenmeinung bei weitem nicht ausreichen. Selbst unter Berücksichtigung geplanter Bauprojekte wird die Nachfrage das Angebot übertreffen.<sup>166</sup> Und tatsächlich: Eine vor kurzem veröffentlichten Analyse, die auf Basis der Einträge und Suchanfragen der Capacitor-Datenbank von Synonym erstellt wurde, zeigt, dass weltweit weniger als 20 % der existierenden Anlagen über Bioreaktoren mit einem Volumen von mehr als 20 m<sup>3</sup> verfügen. Die Mehrheit der dort gelisteten Anlagen ist für den Labor- oder Pilotmaßstab dimensioniert. Die Mehrheit der Nutzer suchte in dieser Datenbank jedoch Lösungen für Prozesse im Demo- (bis etwa 100 m<sup>3</sup>) oder kommerziellen Maßstab (> 100 m<sup>3</sup>).<sup>167</sup>

Im Rahmen der vorliegenden Studie durchgeführte Interviews ergaben, dass in Deutschland aber auch schon Reaktoren bis 20 m<sup>3</sup> fehlen und die Errichtung entsprechender Anlagen (inkl. einer Gerätekapsel für vor – und nachgelagerte Prozessschritte) in ausreichendem Umfang einen klaren Standortvorteil darstellen würde. In Niedersachsen ist mit dem vor kurzem in Hildesheim eröffneten GEA New Food Application and Technology Center of Excellence (ATC) ein wesentlicher erster Schritt gemacht. Das ATC bietet Bioreaktoren/Gärtanks im Pilotmaßstab bis 0,5 m<sup>3</sup> sowie Anlagen für die vor- und nachgelagerten Prozessstufen.<sup>168</sup> (s. S. 40).

Insbesondere junge Unternehmen greifen aus Kosten- und Aufwandsgründen oft auf Anlagen von Vertragsherstellern zurück. Deren Kapazitäten wiederum sind ebenfalls stark limitiert und es kommt zu Konkurrenzsituationen. Zudem kann die Auftragsherstellung um ein Mehrfaches teurer sein als die Herstellung in eigenen Anlagen; ausschlaggebend dafür sind u.a. Faktoren wie verfügbares Downstream-Equipment, aber auch die Frage, ob die Anlage bereits abgeschrieben ist. Soll ein einzelnes Produkt in großem Maßstab produziert werden, können die Produktionskosten in

einer Single-Product-Anlage, die möglichst automatisiert läuft, deutlich niedriger sein als in Multi-Product-Anlagen. Daher kann sich – weitestgehende Auslastung und vollständiger Verkauf aller produzierten Einheiten vorausgesetzt – der Bau eigener Anlagen im kommerziellen Maßstab für Unternehmen lohnen. Dabei ist aber zu unterscheiden zwischen Pilot- und Demonstrationsanlagen, die temporär für die Produkt- und Prozessentwicklung benötigt werden, und Produktionsanlagen. Für das Upscaling sind Multipurpose-Anlagen sehr wichtig, denn sie werden vom einzelnen Unternehmen in der Regel nur für einen relativ kurzen Zeitraum benötigt.



Foto: GEA/Mike Henning

Der Bau einer Anlage mit einem Produktionsvolumen von  $2500 \text{ m}^3$  für die Herstellung von Proteinen würde etwa 250 - 375 Mio. € kosten und würde etwa zweieinhalb bis vier Jahre dauern, was in der Planung solcher Projekte unbedingt berücksichtigt werden sollte. Einen wesentlichen Kostenfaktor stellt dabei die Errichtung geeigneter Downstream-Processing (DSP)-Anlagen dar. Diese kann z. B. bei Anlagen zur Herstellung von Proteinen etwa die Hälfte aller Kosten ausmachen. Eine Alternative kann unter Umständen – sofern vorhanden – die Umrüstung geeigneter Anlagen sein. Der Kapitalbedarf würde dann um etwa 1/3 geringer ausfallen als bei der Konstruktion neuer Anlagen<sup>169, 170</sup>.

Mehrere Aspekte sprechen dafür, bei der Dimensionierung der Fermenter ab einer gewissen Größe auch „Numbering-up“ statt eines „Scale-ups“ in Betracht zu ziehen (abhängig auch von Prozess und Produkt), d. h. mehrere „mittelgroße“ statt eines sehr großen Fermenters zu bauen. Ein Argument dafür ist, dass meist Batch-Verfahren angewendet werden und in der Zeit, in der die Organismen das Produkt bilden, kein Downstream Processing durchgeführt werden kann. Über den zeitversetzten Betrieb mehrerer Fermenter lassen sich die Auslastung der DSP-Anlagen optimieren und zumindest dort Totzeiten vermeiden. Zudem kann das Risiko von Verlusten durch Kontaminationen etc. eingeschränkt werden. Ein weiterer Vorteil gerade für junge Unternehmen ist, dass sie ihre Kapazitäten nach und nach stufenweise erweitern können.

Auch wenn die Engpässe hinsichtlich der Kapazitäten bekannt sind, es viel Interesse am Aufbau entsprechender Anlagen gab und Projektansätze existierten, scheiterten viele der Vorhaben an mangelnder Finanzierung<sup>171, 172, 173</sup>. Auch Remilk, einer der am besten finanzierten Akteure im Bereich tierfreie Milchprodukte, hat vor Kurzem seine Pläne zum Bau einer groß angelegten Präzisionsfermentationsanlage in Dänemark vorerst gestoppt und skaliert stattdessen die Produktion von Molkeprotein gemeinsam mit einem westeuropäischen Vertragshersteller, um die Produktionsziele schneller zu erreichen<sup>174</sup>. Doch es gibt auch weiterhin vielversprechende Projekte: So plant beispielsweise ScaleUp Bio (Joint Venture zwischen ADM und Nurasa), 2023 zwei Präzisionsfermentationsanlagen in Singapur zu eröffnen; Change Foods will mit Unterstützung des Wirtschaftsministeriums der Vereinigten Arabischen Emirate eine Produktionsstätte in Abu Dhabi aufbauen und Planetary entwickelt gemeinsam mit Glatt und der IE Group die weltweit

erste integrierte Präzisions- und Myzel-Fermentationsanlage in der Schweiz<sup>175, 176, 177, 178</sup>. Abnahmeverträge können den Präzisionsfermentationsunternehmen helfen, potenzielle Kapitalgeber zu überzeugen, dass Anlagenbauprojekte wahrscheinlich erfolgreich sein werden, und so das für den Bau von Großanlagen erforderliche Kapital freizusetzen<sup>179</sup> (oder auch langfristige Übereinkommen mit geeigneten Vertragsherstellern zu treffen).

Im Vergleich zu anderen Ländern und Regionen wie z. B. den USA steht Europa, was Fermentationskapazitäten insgesamt angeht, zwar etwas besser da, aber noch immer sind deutlich zu wenige Anlagen insbesondere für die Präzisionsfermentation von Lebensmittelinhaltstoffen vorhanden<sup>180, 181, 182</sup>. Niedersachsen bildet hier keine Ausnahme (s. S. 40).

### C. BETRIEBSKOSTEN UND ECONOMY OF SCALE

Etwa  $\frac{3}{4}$  der Betriebskosten von Präzisionsfermentationsanlagen verteilen sich auf drei wesentliche Kostenstellen: Energie (insbesondere auch für Kühlung), Rohstoffe (bzw. Medien; aktuell vor allem Zucker, zukünftig vermehrt auch z. B. Wasser) und Arbeitskräfte. Diese Punkte sind also bei der Entscheidung für einen Standort zur Errichtung von kommerziellen Anlagen wesentlich und müssen genau analysiert werden<sup>183</sup>.

Über die Verwendung kostengünstigerer Fermentationssubstrate (z. B. biogene Rest- und Nebenstoffe) und Energie sowie durch die Entwicklung robusterer und effizienterer Prozesse (bzw. auch Stämme) können die Betriebskosten deutlich gesenkt werden. Eine Sekretion der Produkte durch den Organismus in das Medium kann die DSP-Kosten ebenfalls deutlich reduzieren. Zudem können Kosten durch intelligente Verwertung oder Kreisführung der Neben- oder Restströme ausgeglichen bzw. gesenkt werden (z. B. Verwertung der Zellfraktionen). Auch Automatisierung bzw. Digitalisierung bieten Potenziale (siehe beispielsweise Konzept der vollautomatisierten Produktionsplattform zur Casein-Herstellung von Fermify<sup>184</sup>).

Durch die Erhöhung des Produktionsumfangs können die Unternehmen weitere Kostenvorteile erzielen (Economy of scale). Bei größeren Volumina sinken die Kosten pro Produktionseinheit, da z. B. die Kosten für Ausrüstung und Personal nicht im gleichen Maße ansteigen wie der Produktionsumfang. Der Economy of scale ist für den Erfolg der Branche absolut wesentlich, insbesondere wenn Produkte hergestellt werden, die am Markt mit deutlich unter 100 €/kg gehandelt werden (sollen)<sup>185</sup>. Nach Expertenschätzungen könnten im Prinzip durch die Skalierung des Produktionsvolumens von  $250-500 \text{ m}^3$  auf etwa  $2500 \text{ m}^3$  allein die Herstellungskosten von Proteinen von etwa 60 €/kg auf unter 30 €/kg reduziert werden und somit ein entscheidender Schritt zur Konkurrenzfähigkeit gemacht werden.

Die Entscheidung, bis zu welchem Volumen eine Skalierung der Fermenter sinnvoll ist oder ab wann eher ein „Numbering-up“ vorgenommen werden sollte (bzw. kann), ist von vielen Faktoren abhängig, die von Fall zu Fall analysiert werden müssen. So sind beispielsweise die Robustheit der Prozesse und Kontaminationsgefahren dabei wesentliche Faktoren, da Fehlchargen/Kontaminationen immense Kosten verursachen können. Sehr lange Fermentationszeiten sprechen eher für ein Numbering-up, um die Downstream-Anlagen besser auszulasten. Auch sind Rührwerke z. B. nur bis zu einer gewissen Größe sinnvoll, was wiederum die Attraktivität anderer Konzepte erhöhen kann.



## II

# VORAUSSETZUNGEN UND POTENZIALE IN NIEDERSACHSEN

## 1.

## ROHSTOFFSTRÖME IN NIEDERSACHSEN

Die Einordnung Niedersachsens als „Agrarland Nr. 1“ lässt sich durch konkrete Zahlen untermauern (Abb. 3): 2021 bewirtschafteten über 35.000 landwirtschaftliche Betriebe eine Fläche von rund 2,6 Mio. ha mit 135.100 Arbeitskräften (etwa jeder 10. Arbeitsplatz in Niedersachsen ist dem „Cluster Agribusiness“ zuzuordnen) <sup>186</sup>. Die wichtigsten pflanzlichen Anbauprodukte sind Getreide (2020 rund 5,9 Mio. t), wovon Weizen und Gerste den größten Anteil ausmachen. Sehr wichtige Feldfrüchte sind außerdem Kartoffeln (2020 rund 5,5 Mio. t) und Zuckerrüben (2021 rund 6,5 Mio. t).

Ein wesentlicher Teil der niedersächsischen Betriebe hat sich auf den Futterbau- bzw. Weideviehbetrieb (41,8 %) oder den Ackerbau (30,7 %) spezialisiert. Während Niedersachsen damit im Bundesvergleich 2020 auf ähnlichem Niveau wie andere Bundesländer lag, verfügte das Land mit 11,8 % über deutlich mehr Veredelungsbetriebe als der bundesdeutsche Durchschnitt (5,8 %). Sie waren vor allem in der Zucht und/oder Mast von Schweinen und/oder Geflügel aktiv. Der fortschreitende landwirtschaftliche Strukturwandel lässt sich auch in Niedersachsen beobachten: Generell ist auch hier ein deutlicher Trend hin zu weniger, aber immer größeren Betrieben zu erkennen. Dies gilt sowohl für die Viehbestände als auch die bewirtschaftete Ackerfläche pro Betrieb. Insgesamt hat sich der Tierbestand seit 2010 deutlich verringert. Die Spezialisierung der Betriebe nimmt zu, was unter anderem zur Reduktion von Betriebskosten führt <sup>187</sup>.

Der Produktionswert der niedersächsischen Landwirtschaft liegt bei etwa 13,0 Milliarden Euro. Den größeren Anteil hieran hat die Tierhaltung, wobei wertmäßig vor allem Schweine (19,6 %), Milch (17,7 %) sowie Geflügel und Eier (13,5 %) die wichtigsten landwirtschaftlichen Erzeugnisse sind (Stand 2020). Den größten Wert bei den pflanzlichen Erzeugnissen weisen Kartoffeln (9,5 %), Getreide (7,8 %), Gemüse (4,2 %) und Zuckerrüben (1,6 %) auf <sup>188</sup>.



■ 1 % Körnerleguminosen

■ 2 % Sonstige

■ 2 % Brache

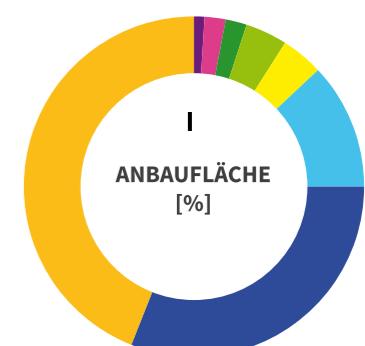
■ 4 % Ackerfutterbau

■ 4 % Ölfrüchte

■ 4 % Hackfrüchte

■ 31 % Mais

■ 44 % Getreide



■ 0,5 % Pflanzenbauverbund

■ 1,8 % Dauerkulturen

■ 2,4 % Gartenbau

■ 3,3 % Viehhaltungsverbund

■ 7,7 % Pflanzenbau-Viehhaltungsverbund

■ 11,8 % Veredlung

■ 30,7 % Ackerbau

■ 41,8 % Futterbau



■ 7,5 % Getreide

■ 7,5 % Kartoffeln

■ 1,8 % Zuckerrüben

■ 0,8 % Ölsaaten

■ 4,4 % Gemüse

■ 2,0 % Obst

■ 2,2 % Baumschulerzeugnisse

■ 1,4 % Blumen und Zierpflanzen

■ 11,9 % Sonstige pflanzl. Erzeugnisse

■ 5,9 % Rinder einschl. Kälber

■ 18,7 % Schweine

■ 0,1 % Schafe und Ziegen

■ 13,1 % Geflügel und Eier

■ 18,0 % Milch

■ 1 % Sonstige tierische Erzeugnisse

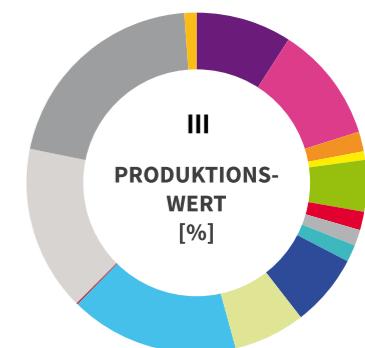


Abb. 3: Die niedersächsische Landwirtschaft in Zahlen.

I Bodennutzung des Ackerlandes in Niedersachsen (beträgt etwa 1,9 Mio. ha Ackerland, Stand 2019; Grünland zudem etwa 0,7 Mio. ha, hier nicht dargestellt) <sup>189</sup>.

II Betriebswirtschaftliche Ausrichtung der niedersächsischen Betriebe (insgesamt 35.348 landwirtschaftliche Betriebe, Stand 2020) <sup>190</sup>.

III Produktionswerte der Landwirtschaft in Niedersachsen (insgesamt 13.490 Mio. €, Stand 2020) <sup>191</sup>. Angaben in Prozent.

## A. ZUCKERRÜBEN

Niedersachsen zeichnet für rund 25 % der deutschen Zuckerrübenproduktion verantwortlich. In Deutschland insgesamt wurden im Jahr 2022 rund 25,8 Mio. t Zuckerrüben (von insgesamt 28,3 Mio. t) zu 3,96 Mio. t Zucker verarbeitet<sup>192</sup>. Auf Niedersachsen (6,5 Mio. t Rüben) heruntergerechnet ergäben sich so rund 1 Mio. t Zucker. Mit den heutigen Präzisionsfermentationprozessen ließen sich hiermit theoretisch 200.000 t Proteine pro Jahr erzeugen. Gesicherte statistische Daten zur Zuckerherstellung in Niedersachsen sowie zu den Warenströmen innerhalb Niedersachsens liegen jedoch nicht vor<sup>193</sup>.

Zuckerrüben werden meist regional verarbeitet. Nordzucker betreibt im südlichen Niedersachsen vier Zuckerfabriken: Das größte Werk steht in Uelzen und produziert nach Angaben des Unternehmens rund ein Drittel des Zuckers für den Einzelhandel in Deutschland sowie Sondersorten. Das Werk in Clauen beliefert Kunden der Lebensmittelherstellung mit unverpacktem kristallinen Weißzucker, in Nordstemmen werden Raffinade und Puderzucker für den Haushaltsbereich sowie Grundsorte und Sonderspezifikationen für die industrielle Weiterverarbeitung und Kristallzucker aus Rübendicksaft produziert. Die Fabrik in Schladen ist auf Biozucker spezialisiert. Dazu kommt ein Flüssigzuckerwerk in Groß Munzel, welches vor allem die Getränkeindustrie beliefert<sup>194</sup>. Die Struktur der Zuckerindustrie ergibt sich im Wesentlichen aus der notwendigen Logistik: Lange Transportwege sollen vermieden werden, weswegen sich der Rübenanbau stark um die großen Zuckerwerke konzentriert.

Seit dem Wegfall der Zuckerquoten in der EU konkurriert deutscher Rübenzucker auf dem Weltmarkt. Die Verbraucherpreise für Zucker sind in der jüngsten Zeit erheblich gestiegen. Als Gründe werden höhere Energiekosten genannt, aber auch die Flächenkonkurrenz mit anderen Agrarrohstoffen, die ebenfalls deutlich teurer geworden sind. In der Nutzung konkurriert die Lebensmittelbranche mit der Bioethanolherstellung um den Rohstoff Zucker. Dazu kommen Steuern und Zölle für Importe. Laut Süddeutscher Zeitung lag der Zuckerpreis in der EU im Frühjahr 2023 im Schnitt doppelt so hoch wie auf dem Weltmarkt<sup>195</sup>.

Ein wichtiges Nebenprodukt der Zuckerproduktion aus Rüben sind Rübenschitzel, die als Futtermittel zum Einsatz kommen. Bei der Abtrennung des Kristallzuckers in der Produktion bleibt Melasse zurück, welche ebenfalls in der Tierernährung eingesetzt wird, aber auch ein gut etablierter Grundstoff für die Fermentation z. B. bei der Hefe- und Alkoholherstellung ist<sup>196</sup>. Das Zwischenprodukt Zuckerdicksaft spielt eine wesentliche Rolle für die Lagerung bzw. den Transport zwischen Produktionsstandorten. Die Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung geht davon aus, dass Melasse und Rübenschitzel in der Ernährungs- und Futtermittelindustrie sowie in der Energiewirtschaft weiter in den Fokus rücken werden<sup>197</sup>, was die Konkurrenz um diese Rohstoff- bzw. Nebenströme weiter erhöhen und damit die Preise treiben könnte.



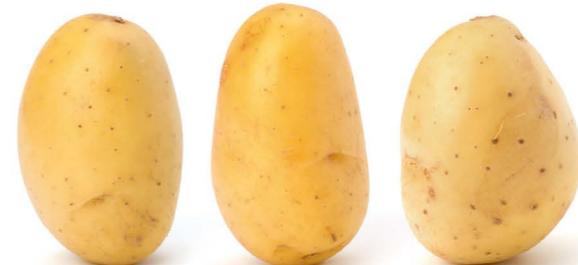
## B. KARTOFFELN

Die Kartoffel gehört zu den wichtigsten Ackerkulturen in Niedersachsen. Das Bundesland hat mit rund 121.200 ha einen Anteil von ca. 45,5 % an der deutschen Kartoffelanbaufläche. Die Anbauflächen sind in den letzten Jahren im Schnitt gewachsen. Als Gründe hierfür nennt die Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) u. a. den gestiegenen Bedarf der Verarbeitungsindustrie, aber auch den Rückgang der Rübenanbaufläche aufgrund von Werkschließungen und Preisschwankungen, so dass freiwerdende Flächen für Kartoffeln zur Verfügung stehen.

Neben dem direkten Verzehr bzw. der Verarbeitung von Speisekartoffeln zu Lebensmitteln ist die Herstellung von Stärke die wichtigste Verwendung von Kartoffeln und machte 2021/2022 etwa 21,5 % an der bundesweiten Bruttoernte aus. Die dazu genutzten Stärkekartoffeln sind als sogenannte „Wirtschaftskartoffeln“ nicht für den Direktverzehr zugelassen. Der Stärkekartoffelanbau konzentriert sich auf die Einzugsgebiete der Stärkehersteller und umfasst etwa 22 % der Anbaufläche. Deutschland ist damit der größte Kartoffelstärkeproduzent in der europäischen Union und exportiert etwa 50 % der produzierten Kartoffelstärke. Nach vorläufigen Daten der BLE wurden 2021/22 in Deutschland 594.000 t Kartoffelstärke hergestellt<sup>198</sup>.

Von den neun Unternehmen der deutschen Stärkeindustrie betreiben zwei Standorte in Niedersachsen: Die AVEBE Kartoffelstärkefabrik ist mit einem Werk in Lüchow ansässig, die Emsland-Stärke GmbH hat Werke in Emlichheim und in Wietzendorf. Alle in Niedersachsen ansässigen Fabriken produzieren Kartoffelstärke, in geringerem Umfang wird in Emlichheim auch Erbsenstärke gewonnen. Die Stärkeproduktion aus Mais oder Weizen spielen hingegen keine Rolle. Die Erzeugerkosten für Stärkekartoffeln steigen seit einiger Zeit kontinuierlich an, insbesondere Betriebsmittel verzeichnen erhebliche Kostensteigerungen. Aber auch die Verarbeitungskosten bei den weiterverarbeitenden Betrieben steigen<sup>199, 200</sup>. Alle Hersteller zielen daher auf eine möglichst vollständige Verwertung der Kartoffel, d. h. neben der Stärke werden auch Püsse, Eiweiß und Fasern weiterverarbeitet bzw. vor allem für die Lebens- und Futtermittelindustrie vermarktet. Neue Absatzwege können der Branche neue Möglichkeiten eröffnen.

Im Kontext der Präzisionsfermentation kann Stärke zum einen als Rohstoff für die Fermentation dienen, zum anderen kann Kartoffelstärke ein wesentlicher Bestandteil in der Weiterverarbeitung zu Lebensmitteln sein. Schon heute wird Kartoffelstärke in verschiedenen Formen in vegetarischen oder veganen Produkten als „Clean-Label“-Fettersatz für Milch- und Käseanaloga und generell als strukturgebender Inhaltsstoff genutzt<sup>201</sup>.



## C. GETREIDE

Nach Fläche dominiert der Anbau von Getreide die niedersächsische Landwirtschaft massiv; rund 835.000 ha werden dafür genutzt – mehr als dreimal so viel wie für die Hackfrüchte Zuckerrübe und Kartoffel zusammen. Diese Flächen lieferten 2021 2,8 Mio. t Weizen, 1,2 Mio. t Gerste, 740.000 t Körnermais sowie 26,4 Mio. t Silomais<sup>202</sup>.

Während Silomais als Futtermittel und zum Teil zur Biogaserzeugung eingesetzt wird, wird Körnermais zum großen Teil zu Lebensmitteln verarbeitet. Die Vermahlung und Weiterverarbeitung zu Lebensmitteln wie Gebäck dominiert auch die Nutzung von Weizen. 20 % der deutschen Weizengehölzerstellung findet in Niedersachsen statt. Gerste wird zu einem erheblichen Teil zu Malz verarbeitet und geht dann in die Brauereiwirtschaft. Weitere Verwertungswege von Getreide umfassen die Herstellung von Cerealien, Frühstücksflocken, aber auch Teigwaren.

Neben der menschlichen und tierischen Ernährung wird Getreide auch industriell zur Gewinnung von Stärke und Stärkeerzeugnissen genutzt. Sie werden u. a. in der chemischen und pharmazeutischen Industrie sowie der Papier- und Verpackungsindustrie verarbeitet. In Niedersachsen ist nach unseren Informationen derzeit kein Werk zur Stärkegewinnung aus Getreide in Betrieb (s. Abschnitt „Kartoffeln“). 2022 gingen bundesweit 18 % des Getreides in die Industrie, davon wurden 10 % für die Bioethanolherstellung bzw. sonstige energetische Nutzung eingesetzt<sup>203</sup>.



## D. ÖLPFLANZEN

Raps ist die wichtigste Ölpflanze in Niedersachsen; die Anbaufläche von Winterraps beläuft sich auf etwa 95.700 ha. In jüngster Zeit gehörte der Raps wegen der hohen Erträge in Verbindung mit ebenfalls hohen Markterlösen zu den lukrativsten Mähdruschfrüchten. Rapsöl wird sowohl energetisch als auch stofflich genutzt. Je nach Fettsäureprofil (z. B. Erucasäure-reiche Rapssorten oder Doppelnullsorten ohne Erucasäure und Glucosinolate) findet es außerdem Verwendung in der chemischen Industrie, als Treibstoff oder in der Lebensmittelindustrie<sup>204, 205, 206</sup>.

Wegen der langen Vegetationsperioden und den erforderlichen milden Temperaturen hatte der Anbau von Sonnenblumen zur Ölgewinnung in Niedersachsen bisher kaum Bedeutung. Unter anderem vor dem Hintergrund des angespannten Ölmarkts nehmen die Anbauflächen jedoch auch in Niedersachsen zu (2.500 ha 2022). Je nach Sorte ist Sonnenblumenöl sowohl für die Lebensmittelindustrie als auch für die chemische Industrie ein wertvolles und viel verwendetes Pflanzenöl<sup>207, 208, 209</sup>. Ölein (Ölsamen) wurde 2022 auf etwa 200 ha kultiviert und spielt somit eine untergeordnete Rolle in Niedersachsen. Leinöl wird zur Herstellung von Farben, Lacken, Kitt und Linoleum verwendet, findet aber auch als Nahrungsmittel Verwendung<sup>210, 211</sup>.

Die aus den Ölpflanzen gewonnenen Öle spielen im Kontext der Präzisionsfermentation als Fermentationssubstrat kaum eine Rolle. Sie sind aber wichtig, um in Kombination mit den Fermentationsprodukten marktfähige Endprodukte zu formulieren.

## E. SONSTIGE AGRARPRODUKTE

Andere Kulturen wie Hülsenfrüchte oder andere Leguminosen machen derzeit ebenfalls nur einen kleinen Anteil an der Landwirtschaft in Niedersachsen aus. 2022 wurden auf gut 16.500 ha Körnerleguminosen angebaut, wobei Ackerbohnen dominierten, gefolgt von Futtererbsen<sup>212</sup>.

Doch durch den Klimawandel und die Änderung von Ernährungsgewohnheiten ist eine Umwidmung von Anbauflächen z. B. für die Kultivierung von Soja oder Erbsen durchaus realistisch. Diese Pflanzen dienen vor allem der Gewinnung von Proteinen, die in der Ernährung eine wachsende Rolle spielen. Der Sojabohnenanbau ist in Niedersachsen grundsätzlich möglich und die Anbaufläche ist von 2021 auf 2022 um 627 ha auf 1474 ha angewachsen<sup>213</sup>.

In der „Landesstrategie Biologisierung“, die 2022 veröffentlicht wurde, prognostizieren die Expertinnen und Experten eine wachsende Bedeutung alternativer Proteinquellen, zu denen die Hülsenfrüchte zählen<sup>214</sup>. Die Nachfrage nach heimischen Proteinen anstelle von Importen aus Übersee werde steigen und damit den Aufbau neuer Wertschöpfungsketten z. B. für die Verarbeitung von Soja vorantreiben. Ein weiterer Aspekt, warum der Anbau von Hülsenfrüchten politisch gefördert wird, sind die positiven Effekte durch Fruchtfolgen auf die Bodenqualität und den verringerten Einsatz von Dünger und Pflanzenschutzmitteln.

Mit der Kultivierung und Verarbeitung neuer Feldfrüchte entstehen auch neue Nebenströme, die für die Fermentation und/oder die Formulierung neuer Lebensmittel aus der Präzisionsfermentation interessant sein könnten. So fallen bei der Verarbeitung von Proteinen aus Hülsenfrüchten wie Erbsen oder Linsen Stärkefraktionen an, die als Fermentationssubstrat dienen könnten. Fasern und Ballaststoffe könnten genutzt werden, um die Textur neuer Produkte zu verbessern. Versuche zur Fermentation von Sojaserum aus der Tofuproduktion laufen bereits<sup>215</sup>.

Produkte oder Nebenströme aus der Tierhaltung sind als Substrate für die Präzisionsfermentation aus mehreren Gründen in der Regel nicht interessant: Handelt es sich um Produkte, die auch direkt zum Verzehr geeignet sind, spricht der ökologische Fußabdruck als Summe aus der Erzeugung tierischer Produkte und der zusätzlichen Präzisionsfermentation gegen solche Modelle. Neben- und Abfallströme wie Gülle, die für den Verzehr ungeeignet sind, werden auch als Grundlage für Präzisionsfermentation zur Nahrungsmittelerzeugung nicht zulässig sein. Anders sieht es aus, wenn es um die Aufwertung und Anreicherung tierischer Produkte z. B. durch Proteine oder funktionale Inhaltsstoffe geht; für einen „High-Protein-Quark“ könnte der zusätzliche Proteinanteil durchaus aus Präzisionsfermentation stammen.



Tabelle 1: Beispiele für in Niedersachsen anfallende Haupt-/ Nebenströme in der Lebens- und Futtermittelindustrie und ihre (potenzielle) Rolle in der Präzisionsfermentation.

Landwirtschaftl. Produkt	Rohstoffstrom	Haupt-/ Nebenprodukt	Bisherige Nutzung	(Potenzielle) Rolle in der Präzisionsfermentation
<b>Zuckerrüben</b>	Kristallzucker	Hauptprodukt	Haushalte und Lebensmittelindustrie	Substrat für Fermentation/ Formulierung der Produkte
	Flüssigzucker	Hauptprodukt	Lebensmittelindustrie	Substrat für Fermentation
	Melasse	Nebenprodukt	Hefeproduktion	Substrat für Fermentation
	Rübenschotel	Nebenprodukt	Futtermittel	Nicht bekannt
<b>Kartoffeln</b>	Dicksaft	Zwischenprodukt	Lager-/ Logistikmedium	Substrat für Fermentation
	Stärke	Hauptprodukt	Lebensmittelindustrie	Substrat für Fermentation/ Formulierung der Produkte
	Pülpe	Nebenprodukt	Futtermittel	Nicht bekannt
<b>Raps, Sonnenblumen</b>	Eiweiß	Hauptprodukt	Lebensmittelindustrie	Formulierung der Produkte
	Faser	Nebenprodukt	Low-Carb-Mehlersatz	Formulierung der Produkte
	Öle und Fette	Hauptprodukt	Lebensmittelindustrie	Vor allem Formulierung der Produkte
<b>Erbsen, Linsen</b>	Eiweiß	Hauptprodukt	Lebensmittelindustrie	Formulierung der Produkte
	Stärke	Nebenprodukt	Lebensmittelindustrie	Substrat für Fermentation/ Formulierung der Produkte
<b>Soja</b>	Eiweiß	Hauptprodukt	Futtermittel, Lebensmittelindustrie	Formulierung der Produkte
	Öl	Hauptprodukt	Lebensmittelindustrie, Biodieselgewinnung	Vor allem Formulierung der Produkte

## F. TRANSFORMATION DER LANDWIRTSCHAFT

Die Landwirtschaft in Niedersachsen ist außerordentlich erfolgreich. Doch mit diesem Erfolg gehen auch Probleme einher. Dazu gehören u. a. die hohe Intensität der Bodennutzung, der überhöhte Nährstoffeintrag durch die intensive Tierhaltung, die Freisetzung von Treibhausgasen bei der Herstellung und dem Einsatz von Düngemitteln sowie der Verlust an Biodiversität. Die niedersächsische Landwirtschaft wird sich in der nahen und mittleren Zukunft verändern (müssen): „Vor diesem Hintergrund ist die Produktion von gesunden und hochwertigen Nahrungsmitteln nicht mehr das alleinige Ziel der Landwirtschaft in Niedersachsen. Sie ist vielmehr gefordert, eine Vielzahl von Herausforderungen wie den Ressourcenschutz (Wasser, Boden), den Klimaschutz, den Tierschutz, den Erhalt der Biodiversität oder die Landschaftspflege mit einem multifunktionalen Ansatz zu integrieren“<sup>216</sup>.

Zu den unmittelbaren Treibern der Transformation der Landwirtschaft zählen u. a.

**1. KLIMAWANDEL:** Die schon heute wahrnehmbaren und für die Zukunft zu erwartenden Auswirkungen des Klimawandels auf die Landwirtschaft sind in der Niedersächsischen Strategie zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels skizziert<sup>217</sup>. Dazu gehören die Verschiebung der Niederschläge und im Jahresmittel eine Abnahme der Wasserverfügbarkeit in der Landwirtschaft und damit eine (allerdings regional varierende) Beregnungsbedürftigkeit, wenn die heutigen Feldfrüchte weiterhin angebaut werden sollen. Dem stehen eine Verlängerung der Vegetationsperiode und die Möglichkeit gegenüber, wärmeliebende Kulturen wie Sorghum und Soja anzubauen, sofern genügend Wasser verfügbar ist. Andere Kulturen wie Weizen könnten hingegen unter der Temperaturerhöhung leiden.

**2. EINHALTUNG DER KLIMAZIELE:** Der Anteil der Landwirtschaft an den Gesamtemissionen von Klimagassen in Niedersachsen lag 2019 bei 16 %<sup>217</sup>. In der Niedersächsischen Klimaschutzstrategie 2021 ist eine Minderung der Emissionen aus der Landwirtschaft von 24 % bis 2030 gegenüber 2017 vorgegeben. Die wesentliche Stellschraube dafür ist der Umgang mit Düngemitteln, sowohl stickstoffhaltigen Düngemitteln als auch der Vergärung von Wirtschaftsdünger. Auch, wenn es bisher keine Beschlusslage zur Umsetzung der Empfehlungen der „Borchert-Kommission“ von 2017 gibt, steht zudem eine Reduzierung der Tierzahlen im Raum, ebenso wie ein verstärkter Anbau von Eiweißpflanzen.

**3. VERÄNDERUNG DER ERNÄHRUNGSGEWOHNHEITEN:** Der Pro-Kopf-Verzehr von Fleisch ist in den letzten Jahren deutlich gesunken<sup>218</sup>. Der Anteil der Vegetarier oder überwiegend auf Fleischkonsum verzichtenden lag in Deutschland 2022 bei ca. 10 %<sup>219</sup>. Veganer sind demgegenüber mit rund 1,6 Millionen noch eine eher kleine Gruppe. Insgesamt unterliegen Ernährungsgewohnheiten Schwankungen und Trends; das Bestreben nach einer klimafreundlichen, nachhaltigen und flexitarischen, also fleischärmeren, Ernährung ist aber deutlich wahrnehmbar<sup>220</sup>. Dazu kommt das höhere Bewusstsein für Lebensmittelunverträglichkeiten oder Allergien, die Konsummuster verändern.

Alle drei genannten Faktoren lassen erwarten, dass sich die Struktur der niedersächsischen Landwirtschaft ändern wird, hin zu einer Reduzierung der Nutztierzahlen und zu einer Erweiterung des Spektrums an Ackerfrüchten mit einem wachsenden Anteil an Leguminosen und Hülsenfrüchten bis hin zur Aufnahme gänzlich neuer Pflanzen in das Anbauportfolio.

Damit wird auch eine Verschiebung von Stoffströmen einhergehen. Eine geringere Nutztierzahl führt dazu, dass Flächen, die bisher für den Futtermittelanbau genutzt wurden (2021 immerhin 621.000 ha für die Grünernte, die in Futter, aber auch Biogasgewinnung geht)<sup>221</sup>, zumindest teilweise für andere Kulturen zur Verfügung stehen. Außerdem können Stoffströme, die bisher in die Futtermittelherstellung gingen (wie Rübenschotel oder Futtermais) für andere Anwendungen frei werden. Der Anbau neuer Feldfrüchte, aber auch neue Nutzungen bestehender pflanzlicher Ressourcen, können zudem neue Reststoffströme generieren, die einer neuen wertschöpfenden Nutzung zugeführt werden können.

Das Projekt „Transformationsszenarien der Agrar- und Ernährungswirtschaft in Nordwest-Niedersachsen (TRAIN)“, das von der Oldenburgischen Industrie- und Handelskammer initiiert wurde, beschreibt drei Szenarien, die auf einem unterschiedlich starken Rückgang der Viehwirtschaft beruhen. „Schon im Szenario „geringer Rückgang der Viehhaltung“ geht die Bruttowertschöpfung in der Agrarwirtschaft um 20 Prozent und in der Nahrungs- und Futtermittelindustrie um 11 Prozent zurück. Die Beschäftigungsverluste sind mit 20 bzw. 12 Prozent fast ebenso hoch. Im Szenario „starker Rückgang“ bricht die Bruttowertschöpfung in der Agrarwirtschaft um 54 Prozent und in der Nahrungs- und Futtermittelindustrie um 30 Prozent ein. Die Beschäftigungsverluste liegen bei 55 bzw. 32 Prozent. Durch Verflechtungen mit weiteren Branchen addieren sich die Gesamtverluste bei der Bruttowertschöpfung je nach Szenario auf 1,1 bis 3,0 Milliarden Euro, bei der Beschäftigung auf 8.900 bis 23.900 Arbeitsplätze“, heißt es dazu auf der Webseite der IHK<sup>222</sup>. Angesichts dessen, dass etwa  $\frac{3}{4}$  aller landwirtschaftlichen Betriebe in Niedersachsen Tierhaltung betreiben<sup>223</sup>, sind sowohl die unmittelbaren Effekte wie die Auswirkungen auf die weitere Wertschöpfungskette dramatisch.

Umso wichtiger ist es, für alle Stufen dieser Wertschöpfungskette neue Einkommenspotenziale zu erschließen. Im Bereich der Tierhaltung kann dies durch die Vermarktung der tierischen Produkte als Premium-Produkte gelingen, während ein Teil der heutigen weniger hochpreisigen Produkte durch Präzisionsfermentation ersetzt wird (s. Kapitel „Empfehlungen“). Für den Ackerbau erschließen sich durch die Präzisionsfermentation neue Absatzwege für Produkte und Nebenströme.



## 2.

## FÜR DIE PRÄZISIONSFERMENTATION RELEVANTE EXPERTISE UND INFRASTRUKTUR IN NIEDERSACHSEN

Um Präzisionsfermentationsvorhaben zu einem wirtschaftlichen Erfolg zu führen und die Ernährung nachhaltig zu verändern, braucht es für entsprechende F&E-Aktivitäten neben geeigneten Geräten und Anlagen (z. B. gentechnische Anlagen) im Besonderen auch Fachwissen bzw. Expertise und Netzwerke. Für den Aufbau einer Präzisionsfermentationsindustrie müssen viele verschiedene Disziplinen und Akteure eng zusammenspielen.

Niedersachsen ist diesbezüglich stark aufgestellt (Abb. 4). Seine international renommierten Universitäten, Hochschulen und Forschungseinrichtungen bieten die notwendige Infrastruktur und Expertise in allen Bereichen: Von der Auswahl und Charakterisierung von Stämmen über die Modifizierung von Produktionsorganismen und Produkten bis hin zur Prozesstechnologieentwicklung und Analyse der Lebensmittelsicherheit. Niedersachsen ist Sitz des Leibniz-Institut DSMZ - Deutsche Sammlung von Mikroorganismen und Zellkulturen, eines biologischen Ressourcenzentrums mit der größten Sammlung von Mikroorganismen und Zellkulturen weltweit<sup>224</sup>. Auch ist das Deutsche Institut für Lebensmitteltechnik (DIL) hier angesiedelt. Neben eigenen F&E-Aktivitäten insbesondere in den Bereichen Produktentwicklung sowie Verfahrenstechnik fördert das DIL die Vernetzung nationaler und internationaler Akteure entlang der gesamten Wertschöpfungskette<sup>225</sup>. Mit dem Accelerator „Seedhouse“ bietet Niedersachsen Gründerinnen und Gründern eine hervorragende Plattform, um ihre Ideen auch im Bereich der Präzisionsfermentation voranzutreiben<sup>226</sup>.

Dedizierte Anlagen zur Skalierung von Präzisionsfermentationsvorhaben im Lebensmittelbereich in Niedersachsen sind jedoch rar. Aktuell bietet lediglich das GEA New Food Application and Technology Center of Excellence (ATC) in Hildesheim eine Pilotanlage, die auf mikrobiell hergestellte (oder Zell-basierte) Fleisch-, Milch-, Meeresfrüchte- und Eialternativen ausgelegt ist. Das ATC bietet die Möglichkeit, aerobe und anaerobe Fermentationen bis zu einem Volumen von 0,5 m<sup>3</sup> durchzuführen, und stellt zudem die für nachgelagerte Downstream-Prozesse benötigte Infrastruktur zur Verfügung<sup>227</sup>. Da in Europa kaum vergleichbare Angebote zu finden sind, ist die Nachfrage groß; sowohl Start-ups – national wie international – als auch große Hersteller zeigen sich interessiert. Es ist davon auszugehen, dass die Auslastung der Anlagen auf absehbare Zeit hoch sein wird – insbesondere auch vor dem Hintergrund der vielen in den letzten Jahren gestarteten Projekte.

Neben dieser Pilotanlage, die vor allem für das Scale-up von Prozessen gedacht ist, existieren jedoch nur wenige weitere geeignete Anlagen in Niedersachsen. Sie würden den Kapazitätsbedarf einer breiter angelegten Präzisionsfermentationsindustrie nicht decken. Zum Teil könnten Unternehmen wie z. B. Chr. Hansen an ihrem Standort in Nienburg/Weser oder auch kleinere und mittelständische Unternehmen wie ASA Spezialenzyme oder Bioweg (potenziell) geeignete Anlagen vorhalten. Auch über Lohnhersteller ließen sich eventuell Projekte realisieren. So bietet z. B. die von Richter-Helm BioLogics in Hannover betriebene Anlage die Infrastruktur zur aeroben Fermentation bis zu einem Volumen von 0,3 m<sup>3</sup>. Der Fokus der Mehrzweck-Produktionsstätte liegt jedoch auf der Herstellung rekombinanter Proteine, Impfstoffe, Antikörper und Plasmid-DNA im GMP-Umfeld für die pharmazeutische Industrie<sup>228</sup>.

Auch Fermentations- und DSP-Kapazitäten niedersächsischer Forschungseinrichtungen sind meist nicht für die Herstellung von Lebensmitteln ausgelegt. So bietet beispielsweise das Helmholtz-Zentrum für Infektionsforschung (HZI) in Braunschweig Möglichkeiten zur aeroben Fermentation in einem Volumen bis zu 2 m<sup>3</sup>, doch werden hier meist Mikroorganismen zur Produktion von Sekundärmetaboliten kultiviert<sup>229</sup>. Das DIL verfügt zwar über eine für die Lebensmittelherstellung ausgelegte Infrastruktur, kann jedoch aktuell nur Fermentationskapazitäten bis zu 30 Litern anbieten.

Wie auch im Rest der Welt sind die größten Fermentationskapazitäten in Niedersachsen in der Bioethanolindustrie zu finden. So produziert beispielsweise die ebenfalls in Hannover ansässige Kraul & Wilkening u. Stelling KG-GmbH & Co. (KWST) über anaerobe Fermentation im Jahr ca. 80.000 m<sup>3</sup> Ethanol aus Zucker und Melasse und ist damit einer



Abb. 4: Beispiele für in Niedersachsen, Bremen und Hamburg ansässige Unternehmen/Organisationen/Initiativen, die über für die Etablierung einer Präzisionsfermentationsindustrie wichtiges Fachwissen, Netzwerke und Infrastruktur verfügen (ohne weiterverarbeitende Industrie).

**FORSCHUNGSEINRICHTUNGEN:** 1. Universität Osnabrück (z. B. Akzeptanzforschung), 2. HS Osnabrück (z. B. Forschung Enzyme und Proteine in Lebensmittelanwendungen), 3. DIL Deutsches Institut für Lebensmitteltechnik e. V. (Forschungsinstitut und Bindeglied zwischen Wissenschaft und Industrie), 4. Uni Vechta (z. B. Innovations- und Akzeptanzforschung), 5. Universität Göttingen (z. B. Sequenzierung und Genomanalyse, Mikrobiologie und Genetik sowie Akzeptanzforschung), 6. Leibniz-Institut DSMZ-Deutsche Sammlung von Mikroorganismen und Zellkulturen (Forschungsinstitut, Bioressourcensammlung und Patent- und Sicherheitshinterlegungsstelle für biologisches Material), 7. TU Braunschweig (z. B. Lebensmittelchemie, Mikrobiologie, Biochemie, Biotechnologie, Bioinformatik, Pharmaverfahrenstechnik), 8. Leibniz Universität Hannover (z. B. Biokatalyse und Bioreaktionstechnik), 9. HS Bremerhaven (z. B. Molekularbiologie, Lebensmitteltechnologie und Bioverfahrenstechnik), 10. Universität Hamburg (z. B. Lebensmittelchemie), 11. TU Hamburg (Creative Food Lab, Feststoffverfahrenstechnik und Partikeltechnologie, Center for Biobased Solutions, Biokatalyse, Bioprozess- und Biosystemtechnik), 12. Helmholtz-Zentrum für Infektionsforschung (z. B. Entwicklung Prozesse bis zum Pilotmaßstab), 13. Leuphana Universität Lüneburg (z. B. Nachhaltige Chemie).

**START-UPS UND -UNTERNEHMEN:** 1. Bioweg (z. B. Cellulose-basiertes Hydrokolloid für pflanzl. Fleisch), 2. ASA Spezialenzyme (Produktion und Vertrieb Enzyme), 3. COLIPI (Produktion von Lipiden), 4. Chr. Hansen (Herstellung von HMO und Enzymen).

**UNTERNEHMEN/ORGANISATIONEN/INITIATIVEN, die ggfls. Präzisionsfermentationsprojekte unterstützen könnten:**  
 1. Sartorius (Anbieter von Technologien & Plattformen), 2. Seedhouse (Accelerator), 3. LI Food - Landesinitiative Ernährungswirtschaft (Initiierung und Begleitung von F&E-Projekten, die Wettbewerbsunterstützung und die Fördermittelberatung, Netzwerkbildung, Wissenstransfer), 4. Symrise (Anbieter von Geschmacks- und Inhaltsstoffen), 5. Life Science Factory (Inkubator mit S1-Laboren), 6. GEA New Food Application and Technology Center of Excellence (Pilotanlagen), 7. Kynda Biotech (Bioreaktoren), 8. Future Food Campus (Projekt), 9. SeSaM.Biotech (Directed Enzyme Evolution), 10. Food Harbour Hamburg (Innovation-Hub), 11. Richter-Helm (Lohnhersteller), 12. Kraul & Wilkening u. Stelling (KWST, Hersteller für Industriekohol).

## 3.

**WEITERVERARBEITENDE INDUSTRIE IN NIEDERSACHSEN**

Mit der großen Bedeutung der Landwirtschaft geht in Niedersachsen eine starke Ernährungswirtschaft als verarbeitende Industrie einher, die die gesamte Wertschöpfungskette abbildet; sie ist nach der Automobilindustrie der zweitwichtigste Wirtschaftszweig Niedersachsens. 2021 waren 168 Betriebe in der Fleischwarenindustrie (einschließlich Schlachtung) aktiv. 267 Betriebe stellten Back- und Teigwaren her, elf Unternehmen produzierten Kartoffelerzeugnisse und 17 Firmen waren Mühlen bzw. der Herstellung von Stärke und Stärkeerzeugnissen zuzurechnen. Darüber hinaus waren sechs Hersteller von pflanzlichen und tierischen Ölen und Fetten aktiv. Nach Einschätzung von Expertinnen und Experten<sup>233</sup> liegen die wesentlichen Stärken Niedersachsens in der Lebensmittelproduktion und -verarbeitung sowie der Herstellung von Wirk- und Inhaltsstoffen.

Eine Reihe der wichtigsten deutschen Unternehmen der Brot- und Backwarenindustrie<sup>234</sup> sind in Niedersachsen ansässig oder unterhalten dort Produktionsstandorte: Harry Brot als größte Lieferbäckerei mit Stammsitz in Schenefeld bei Hamburg hat Werke in Hannover, Schneverdingen und Soltau. Der Wettbewerber Lieken produziert u.a. in Garrel. Dazu kommen mehrere Produktionsstandorte z. B. der Filialbäckerei Schäfer's. Zu den wichtigsten Herstellern von Keksen und Süßgebäck zählen Unternehmen wie Bahlsen, Parlasca oder Heidekeks. Im Bereich Torten und Kuchen ist Coppenrath und Wiese der wichtigste Akteur, daneben gibt es weitere Hersteller wie die Aerzener Brot und Kuchen als Tochter der Mestemacher-Gruppe. Auch das RUF Lebensmittelwerk als Hersteller von Backmischungen und Desserts kann in diesem Kontext genannt werden.

Neben Back- und Teigwarenherstellern gehören die Produzenten von Wurst, Feinkost und Fertiggerichten wie beispielsweise Homann Feinkost oder Wernsing Feinkost zu bedeutenden Abnehmern vor allem von Ei und Milch. Rügenwalder ist einer der Vorreiter bei der Entwicklung von vegetarischen Wurst- und Aufschnittalternativen. Außerdem beziehen auch die Produzenten von Süßwaren und Eis (z. B. Froneri Ice Cream) Milch- und Eiprodukte. Zu nennen sind außerdem Hersteller von Energieriegeln wie etwa die DeVauGe Gesundkostwerk, die in Lüneburg vor allem die Eigenmarken verschiedener Einzelhandelsketten produziert.



der größten Hersteller für Industriekohol in Deutschland<sup>230</sup>. Bis heute ist jedoch kein Fall bekannt, in welchem eine Bioethanolanlage erfolgreich für die Präzisionsfermentation von beispielsweise Proteinen nachgerüstet bzw. eingesetzt wurde. Auch bestehende Brauanlagen eignen sich hierfür nicht.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die fehlenden Fermentations-Kapazitäten eine der größten Hürden zur erfolgreichen Etablierung einer Präzisionsfermentationsindustrie in Niedersachsen darstellen (inkl. daran angeschlossener und für den Lebensmittelbereich ausgelegter DSP-Anlagen). Das gilt für alle Phasen der Entwicklung und Produktion: Obwohl bereits mit dem ATC ein erster wichtiger Schritt gegangen wurde, fehlen auch für frühe Phasen (bis etwa 1 m<sup>3</sup> bzw. Pilotphase) noch Anlagen, um Daten zu gewinnen, technische Erfahrungen zu sammeln und entsprechende Prozesse zu optimieren. Gleches gilt für Demo- und Pilotanlagen bis in die Produktion. Niedersachsen bildet damit keine Ausnahme: Auch in Deutschland und in Europa gibt es nur eine kleine zweistellige Zahl an geeigneten Kapazitäten (siehe z. B. Corden BioChem in Frankfurt am Main)<sup>231, 232</sup>.





Abb. 5: Schematische Darstellung der Einsatzmöglichkeiten von Produkten aus der Präzisionsfermentation als Rohstoffe in der Lebensmittelindustrie.

Viele dieser Unternehmen profitieren von der Nähe zu den landwirtschaftlichen Erzeugern und legen Wert auf ein möglichst regionales Sourcing, um Qualitätskontrolle, Versorgungssicherheit und Flexibilität zu gewährleisten. In Deutschland stammen etwa 3/4 der in der Ernährungsindustrie verarbeiteten Agrarrohstoffe aus dem Inland. Nur etwa 1/4 werden im europäischen und außereuropäischen Ausland eingekauft, u. a. da sie nicht in ausreichenden Mengen vorhanden sind oder nicht angebaut werden können (z. B. Palmöl). Insbesondere das Thema Nachhaltigkeit (s. S. 12) bzw. die Erreichung gesetzter Nachhaltigkeitsziele wird von der Ernährungsindustrie als ein wesentlicher Faktor für den Erhalt der Wettbewerbsfähigkeit wahrgenommen und wirkt als ein starker Treiber für neue Lösungen/Konzepte<sup>235</sup>. In Interviews im Rahmen dieser Studie zeigten sich Branchenvertreterinnen und Branchenvertreter Rohstoffen aus der Präzisionsfermentation überwiegend aufgeschlossen und sahen ein sehr hohes Potenzial (insbesondere Proteine und Lipide für Milch- und Eiproducte oder Fleischalternativen; siehe Abb. 5), Größere technische Hürden bei der Integration entsprechender Rohstoffströme wurden nicht gesehen. So ließe sich z. B. Proteinpulver einfach in bestehende Prozessketten einbinden/einfügen. Wichtig sei aber die Einbindung der weiterverarbeitenden Unternehmen in die Entwicklung, um Produktspezifikationen gemeinsam so zu gestalten, dass eine nahtlose Weiterverarbeitung möglich ist.

## A. VERARBEITUNG VON MILCH UND MILCHPRODUKTEN

2022 wurden in Deutschland rund 31 Millionen t Kuhmilch angeliefert (davon 7,3 Mio. t in Niedersachsen). Daraus wurden u. a. 4,2 Millionen t Konsummilch, 2,6 Millionen t Käse, 472.600 t Butter und 351.500 t Magermilchpulver hergestellt. Dabei besteht bei Magermilch- und auch Molkenpulver in Deutschland eine hohe Überproduktion gegenüber der Eigenverwendung<sup>236</sup>.

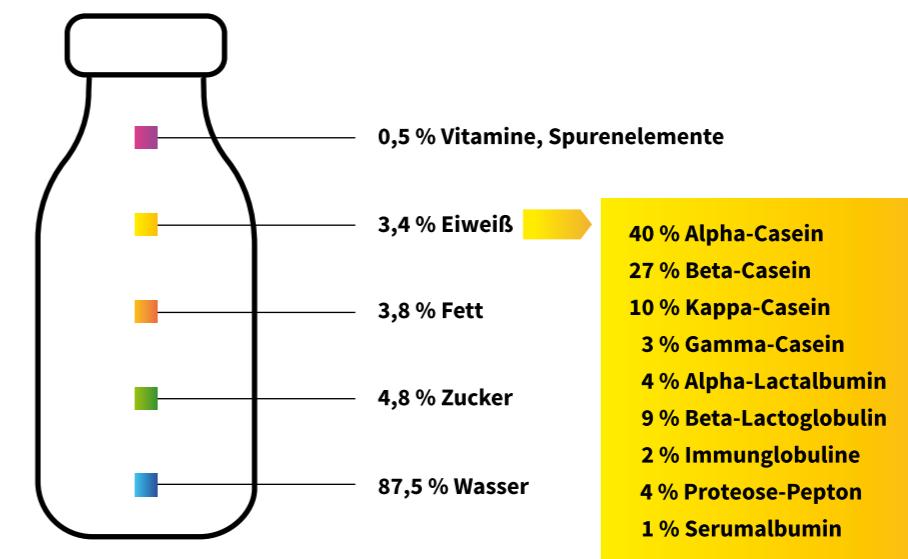


Abb. 6: Zusammensetzung von Milch (links). Rechts: Proteinfraktion der Milch.

Die Zusammensetzung von Milch ist in Abbildung 6 dargestellt. Wichtige Abnehmer für Milch und Produkte aus Milch sind die Back- und Teigwarenindustrie sowie Feinkostersteller, aber auch in Wurst und in Süßwaren finden Milcherzeugnisse Anwendung. Neben Produkten, die aus Vollmilch, Sahne oder Butter hergestellt werden und deren komplexe Zusammensetzung mehr oder weniger vollständig abbilden, werden in der Lebensmittelindustrie Mischungen und Compounds mit definierter Zusammensetzung verwendet, teils auch nach Kundenanforderungen maßgeschneidert<sup>237, 238</sup>.

Dazu kommen einzelne Bestandteile der Milch wie Milchzucker, Butterreinfett und Milcheiweißerzeugnisse. Nach Angaben des Milchindustrieverbands<sup>239</sup> wurden 2020 in Deutschland 33.175 t Milcheiweißerzeugnisse aus Milch (d. h. im Wesentlichen Casein) sowie 36.283 t Milcheiweißerzeugnisse aus Molke produziert, dazu 289.025 t Milchzucker. Casein wird u. a. in Schokolade, Eiscreme und Backwaren, als Emulgator in Suppen und Soßen, aber auch als Bindemittel in Fleisch- und Wurstwaren eingesetzt<sup>240</sup>. Darüber hinaus gibt es technische Anwendungen für Casein vor allem in Klebern, aber auch der Papier- und Textilindustrie. Molkeproteine finden sich in Backwaren, Schokolade, Eiscreme, Feinkosterzeugnissen und Dressings. Sowohl Casein als auch Molkeproteine werden zudem als reine Proteinpulver oder als Zusatz in High-Protein-Produkten und Sporternahrung bzw. Supplementen vermarktet. Milchzucker / Laktose ist Bestandteil von Babynahrung, wird in der Pharmazie verwendet und als Bindemittel oder Aromaträger in der Lebensmittelindustrie eingesetzt<sup>241</sup>.

## B. VERARBEITUNG VON EIERN UND EIPRODUKTEN

Die Gesamtmenge der in Deutschland produzierten Eier lag 2022 bei 13,2 Milliarden, davon 5,2 Milliarden in Niedersachsen, das damit seine Position als Haupt-Eierzeugungsland mit großem Abstand wahrt. Grund dafür ist u. a. die gut ausgebauten weiterverarbeitende Industrie; mit z. B. Ovobest und der AEP Handelsgesellschaft sowie der Eipro Vermarktung GmbH haben einige der größten Verarbeiter von Ei ihren Sitz in Niedersachsen. 2022 wurden in Deutschland rechnerisch pro Kopf 230 Eier verzehrt. Gut die Hälfte dieser Eier wird mit Schale im Laden gekauft und landet als Frühstücksei auf dem Teller oder wird in der heimischen Küche zum Backen oder Kochen genutzt. Die Zusammensetzung von Ei ist in Abbildung 7 dargestellt.

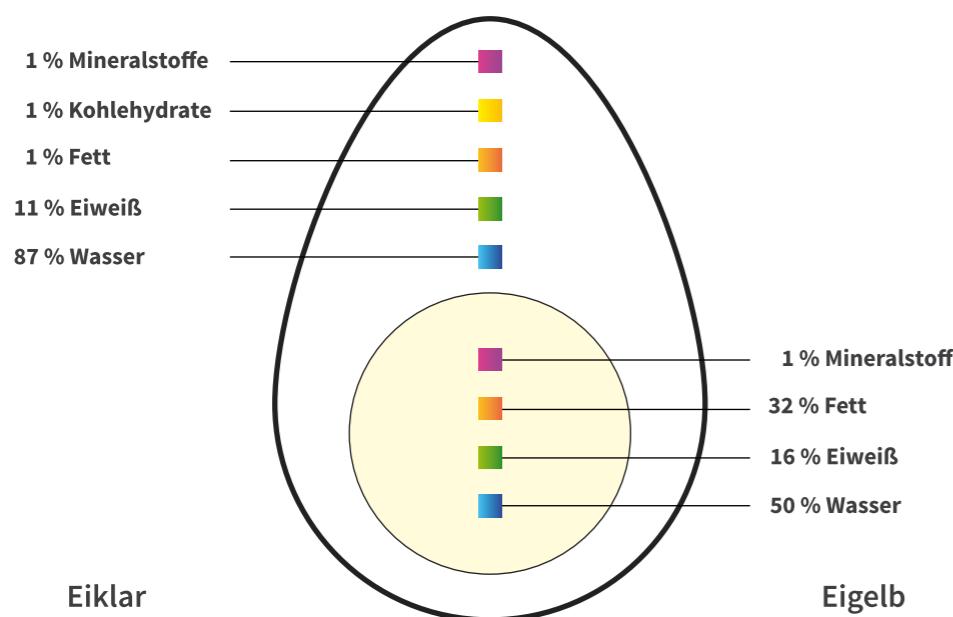


Abb. 7: Die Zusammensetzung von Ei (Angaben in Prozent).

Für die Lebensmittelindustrie bieten Eiverarbeiter verschiedene Produkte an:

- + Vollei, flüssig oder getrocknet
- + Eiklar, flüssig oder getrocknet, teilweise entzuckert (u. a. durch Fermentation)
- + Eigelb, flüssig oder getrocknet

Diese Produkte haben vor allem für die Textur der fertigen Lebensmittel wichtige Funktionen. So wird Eiklar unter anderem zur Bindung und zur Lockerung von Lebensmitteln, z. B. Backwaren, eingesetzt. Eiklarpulver wird meist über Sprühtrocknung hergestellt. Da die enthaltene Glukose dabei stört – es kann zu Maillardreaktionen kommen – wird sie entfernt, in der Regel über Fermentation; das entstehende Ethanol entweicht als Dampf bei der Trocknung. Aus dem Eiklar werden außerdem Isolate gewonnen, vor allem Lysozym, Avidin und Conalbumin<sup>242</sup>. Lysozym wird als konservierendes Mittel in der Kosmetikindustrie und in der Käseherstellung genutzt, während Avidin in der Analytik eingesetzt wird.

Anders als z. B. in Milch liegen die Proteine in Eigelb zu einem erheblichen Teil als Lipoproteine im Verbund mit den Fetten vor; diese Lipoproteine bestimmen wesentlich die Eigenschaften des Eigelbs. Eigelb hat emulgierende Eigenschaften, bildet Schäume, dient in Backwaren als Klebstoff und zum Abbinden von Saucen und Suppen. Aus Eigelb kann Eilecithin isoliert werden, das unter anderem in Lebensmitteln, technischen Anwendungen und in Kosmetika verwendet wird.

## C. VERARBEITUNG VON GELATINE

Gelatine ist ein Gemisch insbesondere aus Proteinen, das vor allem aus Kollagen besteht und aus Haut und Knochen von Rindern oder Schweinen gewonnen wird. Eine der wichtigsten Quellen ist die Häute-verarbeitende Industrie. Gelatine findet in zahlreichen Lebensmitteln Anwendung, vor alle zum Gelieren, Verdicken, Stabilisieren, Emulgieren und zum Einstellen der Konsistenz. Gelatine wird in Süßigkeiten, Backwaren, Milch-, Fisch-, Fleisch- und Wurstprodukten eingesetzt. Als komplexes Gemisch mit 84 - 90 % Eiweißanteil, Mineralsalzen und Wasser und dank unterschiedlicher Eiweißzusammensetzungen, die über die Herstellverfahren beeinflusst werden können, umfasst Gelatine zahlreiche unterschiedliche Produkte, die für die jeweilige Anwendung maßgeschneidert werden können. Der europäische Herstellerverband GME schätzt, dass in Europa 2021 ca. 267.800 t Gelatine in der Lebensmittelverarbeitung zum Einsatz kamen. Außerdem wurden schätzungsweise 80.500 t Kollagenpeptide verarbeitet, kürzerkettige Proteine, die wegen der mangelnden Fähigkeit zur Quervernetzung nicht gelieren<sup>243</sup>.

Angesichts der erzielbaren Preise sind für den Markteintritt von Kollagen aus Präzisionsfermentation zunächst kosmetische und pharmazeutische Anwendungen (z. B. für Kapseln) interessant; erste Produkte sind bereits erhältlich<sup>244</sup>. Functional-Food-Anwendungen<sup>245</sup> könnten dann den ersten Schritt in den Lebensmittelmarkt darstellen. Auch als Gerüstsubstanz für „Cultured Meat“ könnte Kollagen aus Präzisionsfermentation zukünftig eine Rolle spielen.



## D. VERARBEITUNG VON PFLANZLICHEN PROTEINEN UND FETTEN ZUR HERSTELLUNG VON FLEISCHERSATZPRODUKTEN

Kaum ein Bereich der Lebensmittelindustrie ist in den vergangenen Jahren so stark gewachsen, wie der Markt für Fleischersatzprodukte. Während der Fleischkonsum weiter rückläufig ist<sup>246</sup>, wurden im Jahr 2021 in Deutschland knapp 98.000 Tonnen pflanzliche Fleischalternativen hergestellt (+17 % gegenüber 2020); der Produktwert belief sich auf 458 Mio. € (+22 % gegenüber 2020)<sup>247, 248</sup>. So verkaufte beispielsweise die Rügenwalder Mühle aus Bad Zwischenahn vor kurzem erstmals mehr vegane und vegetarische Produkte als Fleischprodukte<sup>249</sup>. Niedersachsen ist mit Unternehmen wie Rügenwalder Mühle<sup>250</sup> oder Lohmann & Co. AG (PHW-Gruppe mit Tochterunternehmen wie z. B. Green Meadows in Visbek<sup>251, 252</sup> und exklusiver deutscher Vertriebspartner von Beyond Meat<sup>253</sup>) Sitz innovativer Unternehmen mit einem großen Portfolio an pflanzlichen Fleisch- und Fischalternativen.

Neben den seit vielen Jahren verfügbaren Fleischalternativen aus Magermilchpulver, Seitan, fermentiertem Pilzmyzel und Sojaprotein kommen kontinuierlich neue Produkte auf den Markt, die Fleisch- und Fischprodukten immer ähnlicher werden. Zunehmend werden auch regional verfügbare Proteine wie Erbsen-, Ackerbohnen-, Kartoffel-, Sonnenblumen- und Lupinenproteine eingesetzt, um entsprechende Produkte herzustellen. Fette und Öle wie Kokosöl werden z. B. für ein gutes Mundgefühl und die Saftigkeit eingesetzt. Darüber hinaus gibt es Bemühungen, Fette und Öle, die oft mit ökologischen und sozialethischen Problemen einhergehen (Palmfett und Kokosöl), durch regionale Alternativen wie Raps- oder Sonnenblumenöl zu ersetzen<sup>254, 255</sup>. Dies jedoch ist wegen der besonderen chemischen und physikalischen Eigenschaften von Palmfett und Kokosöl oft nicht im vollen Umfang möglich.

Faktoren wie die wachsende Nachfrage nach nachhaltigen und regionalen Produkten treiben den Markt an. Entsprechende Produkte sind jedoch oft nur erfolgreich, wenn sie auch in Geschmack und Textur bekannten Produkten ähneln. Dies gilt um so mehr, als einige der Vorreiter nach eigenen Angaben gar nicht unbedingt Vegetarierinnen und Veganer als Zielgruppe ihrer tierfreien Produkte sehen, sondern „Skeptiker“ überzeugen wollen<sup>256</sup>. Gerade diejenigen, die tierische Produkte mögen, aber aus gesundheitlichen oder ethischen Gründen nach Alternativen suchen, erwarten davon jedoch das gleiche Geschmackserlebnis wie bei Milch-, Ei- oder Fleisch-haltigen Produkten und sind mit Labeln wie „vegan“ oder „pflanzlich“ allein nicht zu gewinnen<sup>257</sup>. Dies ist jedoch mit rein pflanzlichen Rohstoffen nur schwer zu erreichen. Deren funktionale Eigenschaften entsprechen häufig nicht dem Original, sei es geschmacklich oder im Hinblick auf die Textur. So bindet Muskelweiß in Fleischprodukten Wasser, wirkt emulgierend und sorgt für die feste, elastische Struktur; dies lässt sich mit rein pflanzlichen Ausgangsstoffen häufig nur sehr aufwändig und mit Hilfsstoffen „nachbauen“, was dann dem Gedanken von „clean label“ und möglichst wenig verarbeiteten Lebensmitteln widerspricht. Ähnliches gilt für Milch und Molkereiprodukte, bei denen die Funktionalität je nach Einsatzgebiet (von der Verhinderung des Ausflockens von Milchersatz in heißem Kaffee bis zum typischen Joghurt-Geschmack) durch die Formulierung angepasst werden muss<sup>258</sup>. Die „Originalproteine“ aus der Präzisionsfermentation könnten für viele Anwendungen deshalb eine willkommene Ergänzung des derzeitigen Portfolios sein.



## 4.

## WEITERE STANDORTFAKTOREN

Aktuell erscheint der wirtschaftlich tragfähige Betrieb von Präzisionsfermentationsanlagen in Deutschland vielen Experten insbesondere wegen der hohen Rohstoff- und Energiepreise schwierig. Andere Regionen werden als attraktiver wahrgenommen (siehe z. B. Nord- und Südamerika). Niedersachsen bietet jedoch, auch gegenüber anderen Bundesländern, in Bezug auf Energie wesentliche Vorteile: So wird jede fünfte in Deutschland erzeugte Kilowattstunde aus erneuerbaren Energien in Niedersachsen produziert. Niedersachsen deckt bereits heute über Windenergie, Biomasse- und Solaranlagen rund 88 % seines Strombedarfs. Entsprechende Kapazitäten werden stark ausgebaut (z. B. Offshore- wie Onshore-Windenergie sowie Solarenergie) und mit sinkenden Preisen kann mittel- bis langfristig gerechnet werden<sup>259, 260, 261</sup>. Verbundinitiativen, in welchen die Abwärme für andere (industrielle) Prozesse genutzt wird, bieten weitere Möglichkeiten, die Energiekosten für Präzisionsfermentationen zu senken. Die Energieerzeugung unmittelbar vor Ort und auch Modelle, bei denen der Anlagenbetreiber gleichzeitig Betreiber von Solar- und/oder Windenergielparks ist, können ebenfalls finanzielle Vorteile bieten.

Die hohe Dichte an Wasserstraßen und Häfen in Niedersachsen bietet weitere Standortvorteile. So besitzen viele der 39 See- und Binnenhäfen sowie Deutschlands einziger Tiefwasserhafen (JadeWeserPort) Umschlageinrichtungen, die geeignet sind, ggf. benötigte Rohstoffe zu importieren oder Präzisionsfermentationsprodukte zu exportieren<sup>262</sup>. Zudem bietet Niedersachsen ein umfangreiches Schienennetz und zahlreiche Güterverkehrszentren für den kombinierten Verkehr<sup>263</sup>.



### III

## ABLEITUNGEN UND EMPFEHLUNGEN

Niedersachsen bietet hervorragende Bedingungen für die Etablierung einer Präzisionsfermentationsindustrie für den Lebensmittelbereich: Das Land verfügt über die notwendigen Rohstoffe, erneuerbare Energien, eine starke F&E-Landschaft und eine große und innovative weiterverarbeitende Industrie (siehe Abbildung 8).

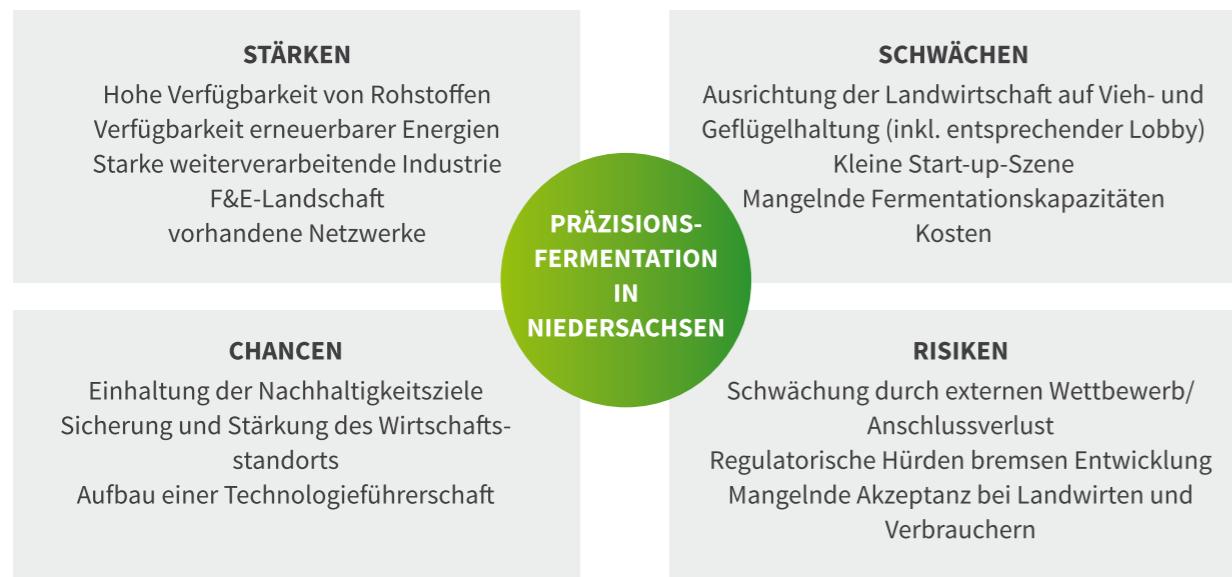


Abb.8: SWOT-Analyse für die Präzisionsfermentation in Niedersachsen

Zu den Schwächen zählen die starke Orientierung der Landwirtschaft auf Vieh- und Geflügelhaltung sowie die relativ kleine Start-up-Szene. Mangelnde Fermentationskapazitäten und (noch zu) hohe Kosten sind dagegen keine für Niedersachsen spezifischen Schwächen.

Anders als bei Produkten der industriellen Biotechnologie, die als Werkstoffe oder Treibstoff Eingang in den Wirtschaftskreislauf finden, tritt hier keine „Tank-Teller-Problematik“ auf. Die Präzisionsfermentation kann vielmehr als Veredelungsschritt angesehen werden, der aus den Rohstoffen höherwertige Produkte (sowohl aus ernährungsphysiologischer als auch aus preislicher Sicht) generiert. Handelt es sich dabei um Produkte, die z. B. tierische Nahrungsmittel ersetzen, kann zudem von einem vorteilhaften ökologischen Fußabdruck ausgegangen werden (der allerdings im Einzelnen zu prüfen ist).

Ausschlaggebend dafür, ob Präzisionsfermentation mittel- und langfristig einen positiven Beitrag zum Standort Niedersachsen leisten kann, ist, inwieweit den bestehenden Betrieben der rechtzeitige Umstieg auf vermarktbares Alternativprodukte gelingt bzw. inwieweit sie der Konkurrenz erfolgreich begegnen können. Die vorliegende Studie konzentriert sich auf die erste Fragestellung: Wie können die existierenden Unternehmen und Produzenten die Chancen der Präzisionsfermentation erfolgreich nutzen?

Für die niedersächsische Land- und Ernährungswirtschaft stellt eine wachsende Bedeutung der Präzisionsfermentation in der Lebensmittelherstellung sowohl eine Chance als auch eine Bedrohung dar: Zum einen sind Produkte wie Milch- und Eialternativen eine wachsende Konkurrenz für die Vieh- und Geflügelwirtschaft, besonders verbunden mit einem zunehmenden Trend zu vegetarischer oder veganer Ernährung. Zum anderen können vorhandene und zukünftige pflanzliche Rohstoffe aber auch in einer in Niedersachsen ansässigen Präzisionsfermentationsindustrie zu hochwertigen Produkten verarbeitet und vermarktet werden und so allen Akteuren der Wertschöpfungskette neue Potenziale eröffnen (Abbildung 9).



Abb. 9: Präzisionsfermentation in der Wertschöpfungskette von Land- und Ernährungswirtschaft.

- Für Ackerbau und Grünland sowie die Zucker- und Stärkeindustrie bietet die Präzisionsfermentation Chancen: Letztere ist auf pflanzliche Rohstoffe wie Zucker oder Stärke als Fermentationssubstrat angewiesen und kann als zusätzliche Abnehmerbranche dazu beitragen, Märkte zu stabilisieren. Dabei ist u. U. auch die Vermarktung von Nebenströmen und/oder Zwischenprodukten möglich (z. B. Stärke aus der Proteinproduktion oder Melasse), was eine bessere Auslastung von Kapazitäten ermöglichen kann.
- Für die Futtermittelindustrie bietet die Präzisionsfermentation ebenfalls Chancen. Sie verfügt über die Anlagen, um die pflanzlichen Rohstoffe aufzubereiten, und könnte eine wichtige Rolle als Zulieferer der Branche spielen.
- Für die Geflügel- und Viehzucht ist eine Präzisionsfermentationsindustrie, die sich auf tierische Proteine, Fette und Kollagen fokussiert, zunächst eine Konkurrenz. Gleichwohl kann sie u.U. dazu beitragen, Märkte zu stabilisieren und unerwünschte Nebenströme wie Sauermolke zu vermeiden, wenn mit ihrer Hilfe einzelne Milch- oder Eibestandteile gezielt hergestellt werden.
- Für Getreidemühlen, Ölmühlen etc. stellt die Präzisionsfermentation keinen unerwünschten Wettbewerb dar, da entsprechend hergestellte Produkte bei der Verarbeitung zu verzehrfertigen Lebensmitteln mit pflanzlichen Zwischenprodukten wie Getreide, Stärke oder Ölen formuliert werden.
- Für die nachgelagerte Lebensmittelindustrie bietet die Präzisionsfermentation die Chance, ihre Produktpalette um vegetarische und vegane bzw. tierfreie Alternativen zu erweitern, die in der Verarbeitung und den sensorischen Qualitäten den konventionellen Produkten entsprechen und damit eine breite Zielgruppe (s.S. 48) ansprechen.
- Für die gesamte Agrar- und Ernährungswirtschaft bietet die Präzisionsfermentation die Chance, Nachhaltigkeitsziele zu erreichen und damit auch den Fortbestand einer Vieh- und Geflügelwirtschaft – wenn auch in geringerem Umfang als heute – zu sichern.

Sowohl aus der Literatur als auch aus den Gesprächen mit Stakeholdern ergibt sich ein eindeutiges Bild: Treiber für die Präzisionsfermentation ist die Nachhaltigkeit. Demgegenüber spielen Änderungen der Ernährungsgewohnheiten oder ein Trend hin zu vegetarischer / veganer Ernährung eine untergeordnete Rolle (Abbildung 10).



Abb. 10: Treiber und Hemmnisse für die Präzisionsfermentation für Lebensmittel

Der erfolgreiche Aufbau einer Präzisionsfermentationsindustrie hängt nicht nur von den technischen Maßgaben und der Rohstoff- und Anlagenverfügbarkeit ab. Ganz entscheidend für den Erfolg ist ein klares Bild von der Verwertung und Vermarktbarkeit der Produkte: Wer sind die zukünftigen Abnehmer, in welchen Formulierungen kommen die Produkte zum Einsatz, welche Rohstoffe sind dafür neben den Fermentationssubstraten notwendig, lassen sich die fertigen Lebensmittel erfolgreich innerhalb Niedersachsens/ Deutschlands und darüber hinaus vermarkten?

Dafür spielt die weiterverarbeitende Industrie die entscheidende Rolle (s. S. 45 ff). Für eine zukünftige Präzisionsfermentationsindustrie stellen die weiterverarbeitenden Betriebe wie die Hersteller von Molkereiprodukten, Backwaren, Teigwaren, Feinkost oder Fleisch- und Fischalternativen die hauptsächlichen Abnehmer dar. Nach dem Eindruck aus den Recherchen im Rahmen dieser Studie sind entsprechende Unternehmen meist offen gegenüber neuen Produktionsprozessen. Viele Betriebe der Back- und Teigwaren-, Fleisch- und Wurst- sowie der Feinkostindustrie haben ihre Produktpaletten in den letzten Jahren bereits um vegane Produkte aus pflanzlichen Alternativen erweitert. Dabei zielen diese Produkte nicht auf die Nische der Vegetarier/Veganer, sondern explizit auf die „Flexitarier“, die prinzipiell tierische Produkte konsumieren, deren Konsum aber reduzieren möchte, oder auf Konsumentinnen und Konsumenten, die nicht auf ihre gewohnten Produkte verzichten möchten (s. S. 48). Deren Herstellung lässt sich mit den Nachhaltigkeitszielen der Produzenten häufig nicht mehr vereinbaren – besonders Milchprodukte zahlen negativ auf die Klimabilanz ein. Ziel der Hersteller ist es daher, dem Verbraucher Produkte anzubieten, die den gewohnten Qualitäten, Geschmacks- und Texturerfahrungen entsprechen, aber nachhaltiger produziert werden. Präzisionsfermentations-basierten Produkten wie Häm-, Milch- oder Ei-Proteinen, Kollagen sowie Fetten mit den Eigenschaften ihres tierischen Pendants werden hier von der Industrie hohe Potenziale bescheinigt.

Das gilt insbesondere dann, wenn auch bisher nicht das vollständige tierische Produkt verwertet wird, sondern nur einzelne Komponenten (s. S. 45 ff). Werden sie aus dem tierischen Produkt isoliert, bleibt häufig die Frage, was mit den Nebenströmen passiert bzw. inwieweit diese überhaupt nutzbar sind. Hier könnte die Substitution durch Produkte aus Präzisionsfermentation nicht nur erhebliche Vorteile hinsichtlich der Nachhaltigkeit bieten, sondern auch Kostenvorteile; zudem könnte sie zu einer Preisstabilisierung beitragen.

Im ersten Schritt bieten sich deshalb vor allem die Milch- und Eiproteine, Fette sowie Kollagen als Zielprodukte an. Sie können überall dort eingesetzt werden, wo auch bisher nur das einzelne Proteinprodukt z. B. in Pulverform im Fokus stand. Als „Drop-In“-Produkte mit der gleichen Chemie und den gleichen Funktionalitäten erfordern sie keine größeren Anpassungen in den weiterverarbeitenden Anlagen. Zum zweiten können die Proteine als Komponenten für die Formulierung neuer Produkte genutzt werden, z. B. im Molkereibereich, wo mit Hilfe der naturnahen Milchproteine in Kombination z. B. mit pflanzlichen Fetten neue hochwertige Nahrungsmittel formuliert werden können. Außerdem können sie in Kombination mit den „ursprünglichen“ Lebensmitteln wie Milch die Grundlage für angereicherte, maßgeschneiderte Produkte bieten, wie sie heute z. B. als „High-Protein“-Quark oder -Joghurt vermarktet werden. Ebenso vielversprechend ist der Einsatz von Häm-Proteinen (oder anderen Proteinen), Kollagen oder Fetten aus der Präzisionsfermentation zur Herstellung von Fleischersatzprodukten. Kaum ein Bereich der Lebensmittelindustrie ist in den vergangenen Jahren so stark gewachsen wie der Markt für Fleischalternativen. Da aber rein pflanzliche Alternativen sowohl hinsichtlich ihrer technofunktionellen als auch ihrer sensorischen Eigenschaften oftmals an Grenzen stoßen, bieten Produkte aus der Präzisionsfermentation hier ein enormes Potenzial<sup>264</sup>.

Die Entwicklung und Produktion von Zielmolekülen mit verbesserten oder neuen Eigenschaften (z. B. Kollagen oder Eiweißpulver, Proteine ohne allergene Epitope) und die Formulierung neuartiger Produkte bzw. Ersatzprodukte (z. B. für Molkereiprodukte) stellen zusätzliche Möglichkeiten dar, konkurrenzfähige Präzisionsfermentationsprodukte am Markt zu etablieren.

Entscheidend für den Markterfolg in allen Fällen ist, dass die Produktpalette breit und variabel ist und die Präzisionsfermentationsunternehmen eng mit den Anwendern zusammenarbeiten, um deren Anforderungen möglichst genau abzubilden. Der mittelfristige 1:1-Ersatz von Vollmilch und Vollei in großem Umfang ist eher unwahrscheinlich. Entsprechende Naturprodukte sind in ihrer komplexen Zusammensetzung nur mit sehr großem Aufwand nachzuahmen.

Preisparität ist der Schlüssel zum erfolgreichen Markteintritt von Produkten aus der Präzisionsfermentation, die heute häufig noch um ein Vielfaches teurer sind als die tierischen Produkte, die sie ersetzen sollen (s. S. 27). Das verwundert nicht, steht die Präzisionsfermentation von Proteinen und Fetten doch noch vergleichsweise am Anfang der Entwicklung, während die Optimierung bei der Herstellung tierischer Produkte Jahrzehnte und länger zurückreicht. Expertenschätzungen gehen aber davon aus, dass in etwa zwei bis fünf Jahren Preisgleichheit erreicht werden kann und darüber hinaus bestimmte Präzisionsfermentationsprodukte langfristig sogar deutlich günstiger als herkömmlich erzeugte Produkte sein werden (z. B. Casein)<sup>265, 266, 267, 268, 269</sup>.

Rechtssicherheit und Kundenakzeptanz vorausgesetzt, wird dies dazu führen, dass sich Präzisionsfermentationsprodukte auch in Europa breit am Markt werden etablieren können. Die Nachhaltigkeitsbemühungen werden sich weiter als starker Treiber dieser Industrie erweisen. Entscheidend für den Erfolg der Präzisionsfermentation werden die kommen Jahre sein: Hier wird sich entscheiden, ob die erwarteten technischen Fortschritte erzielt werden können, die politischen/rechtlichen Rahmenbedingungen entsprechende Entwicklungen ausbremsen oder fördern und die Kundinnen und Kunden die Produkte akzeptieren.



## EMPFEHLUNGEN

- 1** Die niedersächsische Land- und Ernährungswirtschaft muss sich mit der Präzisionsfermentation, ihren Potenzialen und ihrer Entwicklung auseinandersetzen; der Wettbewerb von außen wird zunehmen, wenn in anderen Märkten (USA, Israel, Singapur u. a.) zunehmend Produkte aus der Präzisionsfermentation auf den Markt kommen. Auch Abhängigkeiten von überregionalen Märkten/Lieferketten müssen angesichts aktueller und drohender Krisen (Umweltkatastrophen/Konflikte/etc.) reduziert und die Resilienz der Wirtschaft gestärkt werden.
- 2** Die niedersächsische Landwirtschaft steht angesichts von Klimawandel und Nachhaltigkeitszielen unter einem starken Transformationsdruck. An einem Umbau bzw. einer Reduzierung der Tierbestände scheint mittelfristig kein Weg vorbeizuführen, wenn die Klimaziele erreicht werden sollen. Auch in anderen Ländern wird bereits laut darüber nachgedacht, welche Rolle die Landwirtschaft für Treibhausgasemissionen spielt und welche Schlüsse daraus zu ziehen sind<sup>270</sup>. Die Präzisionsfermentation sollte in diesem Kontext nicht als (zusätzliche) Bedrohung, sondern als Chance wahrgenommen werden. Sie könnte dazu beitragen landwirtschaftliche Wertschöpfung im Land zu halten, auszubauen und für die Vieh- und Geflügelhaltung neue Geschäftsmodelle zu eröffnen. So sollte die Frage auch nicht lauten „Kuh oder Fermenter?“, sondern „wofür Kuh – wofür Fermenter?“. Welche Produkte lassen sich nachhaltiger, kostengünstiger und/oder in höherer Qualität aus tierischer Milch oder Ei herstellen, und für welche Zwecke ist das Produkt aus der Präzisionsfermentation zu bevorzugen? Auf der Basis solcher Fragestellungen kann die Präzisionsfermentation als sinnvolle Ergänzung und Entlastung für die Landwirtschaft dienen.
- 3** Der offene Dialog mit Industrie, Politik, Forschung, Öffentlichkeit und unterschiedlichen Interessensvertreterinnen und -vertretern ist für den Erfolg der Präzisionsfermentation in Niedersachsen wesentlich. Dafür müssen Möglichkeiten für Diskussion und Austausch geschaffen werden (z. B. Diskussionsforen). So sollte die Landwirtschaft über entsprechende Dialog- und Diskussionsforen eng in den Entwicklungsprozess eingebunden sein. Themen, die ein hohes Konfliktpotenzial aufweisen (beispielsweise Subventionspolitik oder unterschiedliche Mehrwertsteuersätze), müssen sachlich und unter Berücksichtigung der Interessen aller relevanten Stakeholder diskutiert werden. Kritik einzelner Interessensgruppen sollte mit Transparenz begegnet und Entscheidungen mit wissenschaftlich fundierten und überprüfbaren Tatsachen hinterlegt werden.
- 4** Vorrangiges Ziel sollte es nicht sein, vollständige Produkte wie Milch oder Vollei mit vielen Komponenten „nachzubauen“; die Funktionalitäten, die aus dem Zusammenspiel der Inhaltsstoffe entstehen, gehen auf komplexe Wechselwirkungen zurück und sind schwer zu erreichen. Erfolgsversprechend ist dagegen die Konzentration auf einzelne Inhaltsstoffe wie Proteine oder Lipide, die bisher aufwändig und unter Entstehung ggf. nicht benötigter oder schwer vermarktbarer Nebenströme aus den tierischen Produkten isoliert werden. Diese lassen sich über Präzisionsfermentation gezielt und effizient herstellen.
- 5** Auch Fleischersatzprodukte auf pflanzlicher Basis sind ein wachsender Markt, für den Proteine und vor allem Fette aus der Präzisionsfermentation sehr attraktiv sind. Rein pflanzliche Produkte erreichen meist die Parameter herkömmlicher Produkte hinsichtlich ihres Geschmacks und ihrer Textur nur bis zu einem gewissen Grad. Präzisionsfermentations-basierte Produkte wie Häm-, Milch- oder Ei-Proteine, Kollagen sowie Fette mit den Eigenschaften ihres tierischen Pendants können attraktive, nachhaltige Lösungen bieten. In der Herstellung von kultiviertem Fleisch können Wachstumsfaktoren für die Kulturmedien sowie Kollagen als Gerüstsubstanz eine wichtige Rolle spielen.
- 6** Für den Erfolg einer Präzisionsfermentations-Industrie ist nicht nur der Marktpreis des unmittelbaren Produkts entscheidend; ausschlaggebend ist die Aufnahme in den Markt durch die weiterverarbeitende Industrie. Diese sollte daher eng in die Entwicklungen eingebunden werden.
- 7** Eine der größten Hürden beim Aufbau einer Präzisionsfermentationsindustrie in Niedersachsen ist das Fehlen dedizierter Anlagen. Auch bestehende Anlagen lassen sich nur bedingt für die Präzisionsfermentation von Lebensmitteln nutzen oder entsprechend umbauen. Hier braucht es starke gemeinsame Anstrengungen von Politik und Wirtschaft, um Finanzierungsstrukturen zur Unterstützung größerer Kapitalprojekte zu entwickeln sowie dringend benötigte Infrastruktur zur Verfügung zu stellen. Unternehmen, die in Niedersachsen eine Präzisionsfermentation etablieren wollen, sollten innovative Finanzierungskonzepte zur Verfügung gestellt und Infrastrukturinvestitionen finanziell abgesichert werden.
- 8** Energie ist ein wesentlicher Kostentreiber der Präzisionsfermentation und entscheidet u. a. mit über ihre Nachhaltigkeit. Deshalb braucht es ausreichend erneuerbare Energien zu konkurrenzfähigen Preisen. Niedersachsen sollte deshalb sein Ziel, „Klimaschutzland Nr. 1“ zu werden und die erneuerbaren Energien auszubauen, verstärkt verfolgen.
- 9** Start-ups treiben die Präzisionsfermentation im Lebensmittelbereich weltweit stark voran. Das Land Niedersachsen sollte Voraussetzungen schaffen, damit sich entsprechende junge Unternehmen hier ansiedeln bzw. gründen. Neben Finanzierungskonzepten braucht es eine für entsprechende Vorhaben notwendige Infrastruktur (z. B. Labore und flexible Pilotanlagen inklusive Beratungsangebote). „Share-Konzepte“ könnten ebenfalls Vorteile bieten. Auch sollten der Standortvorteil Niedersachsens genutzt und Gründerinnen und Gründer verstärkt in Kontakt mit ansässigen Rohstoffproduzenten und der weiterverarbeitenden Industrie gebracht werden (z. B. Ausbau von Vernetzungsmöglichkeiten). Reallabore könnten darüber hinaus einen wesentlichen Anreiz zur Ansiedlung von jungen Unternehmen darstellen und Skalierung sowie Markteintritt beschleunigen. Der bürokratische Aufwand für Gründerinnen und Gründer sollte so gering wie möglich gehalten werden.
- 10** Die regulatorischen Rahmenbedingungen erschweren bisher die Entwicklung einer Präzisionsfermentationsbranche. Das betrifft sowohl die Novel-Food-Verordnung als auch ggf. die Einstufung nach GVO. Dass Zulassungsverfahren in Europa transparenter und entsprechende Abläufe beschleunigt werden, ist wesentlich für den Erfolg der Branche. Das Bundesland Niedersachsen sollte sich deshalb auf nationaler und europäischer Ebene an den laufenden Diskussionen beteiligen und auf eine Senkung der regulatorischen Hürden hinwirken.
- 11** Bei der Markterschließung sollte das Augenmerk nicht vorrangig auf den Verbrauchern liegen, die grundsätzlich ihr Essverhalten ändern wollen (Veganismus/Vegetarismus). Vielmehr bietet die Präzisionsfermentation die Chance, dem „normalen“ Verbraucher gewohnte Produkte in gewohnter Qualität, jedoch mit klaren ökologischen Vorteilen anzubieten.
- 12** Die Öffentlichkeit sollte umfassend über das Thema informiert und so ein breiteres Verständnis für die Technologie und ihre Produkte vermittelt werden (z. B. über eine Informationsplattform, Broschüren oder Medienkampagnen). Dabei sollten reißerische Formulierungen („Milch aus dem Labor“, „Kunstkäse“), die bewusst oder unbewusst negative Assoziationen wecken, vermieden werden und stattdessen auf Aufklärung gesetzt werden.

## ANHANG UND QUELLENVERZEICHNIS

1. <https://www.nature.com/articles/s43016-021-00358-x>
2. [https://www.gea.com/de/binaries/gea-neuland-new-food-bericht-A4-druckversion\\_tcm24-111793.pdf](https://www.gea.com/de/binaries/gea-neuland-new-food-bericht-A4-druckversion_tcm24-111793.pdf)
3. <https://www.ml.niedersachsen.de/startseite/themen/landwirtschaft/landwirtschaft-in-niedersachsen-4513.html>
4. <https://www.umwelt.niedersachsen.de/startseite/themen/klima/klimawandel/schon-heute-spurbar-klimawandel-in-niedersachsen-210950.html>
5. [https://www.lbeg.niedersachsen.de/boden\\_grundwasser/klimawandel/klimawirkungsstudie/klimawirkungsstudie-niedersachsen-176704.html](https://www.lbeg.niedersachsen.de/boden_grundwasser/klimawandel/klimawirkungsstudie/klimawirkungsstudie-niedersachsen-176704.html)
6. [https://www.umwelt.niedersachsen.de/startseite/themen/klima/klimaschutz/klimaschutz\\_in\\_niedersachsen/klimaschutz-in-niedersachsen-200413.html](https://www.umwelt.niedersachsen.de/startseite/themen/klima/klimaschutz/klimaschutz_in_niedersachsen/klimaschutz-in-niedersachsen-200413.html)
7. <https://gfi.org/>
8. <https://www.nature.com/articles/s41467-023-37891-1>
9. [https://m4f6w9b2.rocketcdn.me/app/uploads/2022/01/Comparative-Perfect-Day-Whey-LCA-report-prepared-by-WSP\\_20AUG2021\\_Non-Confidential-1.pdf](https://m4f6w9b2.rocketcdn.me/app/uploads/2022/01/Comparative-Perfect-Day-Whey-LCA-report-prepared-by-WSP_20AUG2021_Non-Confidential-1.pdf)
10. [https://assets.ctfassets.net/hhv516v5f7sj/4exF7Ex74UoYku640WSF3t/cc213b148ee80fa2d8062e430012ec56/Impossible\\_foods\\_comparative\\_LCA.pdf](https://assets.ctfassets.net/hhv516v5f7sj/4exF7Ex74UoYku640WSF3t/cc213b148ee80fa2d8062e430012ec56/Impossible_foods_comparative_LCA.pdf)
11. <https://www.nature.com/articles/s41586-022-04629-w>
12. <https://gfi.org/fermentation/>
13. <https://bioekonomie.de/themen/dossiers/praezisionsfermentation-massgeschneiderte-bioproduktion#dossier-page-4>
14. [https://ecos.csiro.au/whats-brewing-precision-fermentation/?utm\\_medium=email&utm\\_source=rasa\\_io](https://ecos.csiro.au/whats-brewing-precision-fermentation/?utm_medium=email&utm_source=rasa_io)
15. <https://today.oregonstate.edu/news/genetically-modified-yeast-yields-intense-hop-aromas-beer-oregon-state-research-finds-0>
16. <https://www.greenqueen.com.hk/precision-fermentation-animal-free-dairy-facts/>
17. <https://www.sigmaldrich.com/DE/de/technical-documents/technical-article/food-and-beverage-testing-and-manufacturing/flavor-and-fragrance-formulation/genetically-modified-flavors>
18. <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10408398.2023.2166014>
19. <https://gfi.org/resource/alternative-protein-company-database/>
20. <https://www.foodnavigator.com/Article/2022/04/14/Regulating-precision-fermentation-Challenges-and-opportunities-in-marketing-microbiially-derived-foods-in-Europe>
21. <https://www.weforum.org/agenda/2016/08/meat-free-beefburger-impossible-foods/>
22. <https://www.weforum.org/agenda/2016/08/meat-free-beefburger-impossible-foods/>
23. <https://www.greenqueen.com.hk/general-mills-remilk-precision-fermentation-dairy-category-expansion/>
24. [https://www.mw.niedersachsen.de%2Fdownload%2FLandesstrategie\\_Biologisierung.pdf&usg=AOvVaw1woa1FKHcm5M6G8ctlv0E4](https://www.mw.niedersachsen.de%2Fdownload%2FLandesstrategie_Biologisierung.pdf&usg=AOvVaw1woa1FKHcm5M6G8ctlv0E4)
25. <https://www.nature.com/articles/s43016-021-00418-2>
26. [https://m4f6w9b2.rocketcdn.me/app/uploads/2022/01/Comparative-Perfect-Day-Whey-LCA-report-prepared-by-WSP\\_20AUG2021\\_Non-Confidential-1.pdf](https://m4f6w9b2.rocketcdn.me/app/uploads/2022/01/Comparative-Perfect-Day-Whey-LCA-report-prepared-by-WSP_20AUG2021_Non-Confidential-1.pdf)
27. <https://www.rethinkx.com/food-and-agriculture#food-and-agriculture-download>
28. <https://planet-a.com/wp-content/uploads/2023/03/lca-paleo.pdf>
29. <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10408398.2023.2166014>
30. [https://www.gea.com/en/binaries/gea-new-food-report\\_tcm11-110562.pdf](https://www.gea.com/en/binaries/gea-new-food-report_tcm11-110562.pdf)
31. <https://gfi.org/science/the-science-of-fermentation/>
32. <https://www.business-angels.de/druckfrisch-angel-investing-at-its-best-leitfaden-fuer-business-angels-ii/>
33. [https://m4f6w9b2.rocketcdn.me/wp-content/uploads/2022/01/Comparative-Perfect-Day-Whey-LCA-report-prepared-by-WSP\\_20AUG2021\\_Non-Confidential-1.pdf](https://m4f6w9b2.rocketcdn.me/wp-content/uploads/2022/01/Comparative-Perfect-Day-Whey-LCA-report-prepared-by-WSP_20AUG2021_Non-Confidential-1.pdf)
34. <https://impossiblefoods.com/sustainable-food/burger-life-cycle-assessment-2019>
35. <https://www.nature.com/articles/s43016-021-00418-2.epdf>
36. <https://www.nature.com/articles/s43016-021-00418-2.epdf>
37. [https://m4f6w9b2.rocketcdn.me/wp-content/uploads/2022/01/Comparative-Perfect-Day-Whey-LCA-report-prepared-by-WSP\\_20AUG2021\\_Non-Confidential-1.pdf](https://m4f6w9b2.rocketcdn.me/wp-content/uploads/2022/01/Comparative-Perfect-Day-Whey-LCA-report-prepared-by-WSP_20AUG2021_Non-Confidential-1.pdf)
38. [https://assets.ctfassets.net/hhv516v5f7sj/4exF7Ex74UoYku640WSF3t/cc213b148ee80fa2d8062e430012ec56/Impossible\\_foods\\_comparative\\_LCA.pdf](https://assets.ctfassets.net/hhv516v5f7sj/4exF7Ex74UoYku640WSF3t/cc213b148ee80fa2d8062e430012ec56/Impossible_foods_comparative_LCA.pdf)
39. Behm, K., Nappa, M., Aro, N. et al. Comparison of carbon footprint and water scarcity footprint of milk protein produced by cellular agriculture and the dairy industry. *Int J Life Cycle Assess* 27, 1017–1034 (2022). <https://doi.org/10.1007/s11367-022-02087-0>
40. <https://www.foodnavigator-usa.com/Article/2022/02/25/GUEST-ARTICLE-Microbes-all-dressed-up-with-no-place-to-go#>
41. <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10408398.2023.2166014>
42. <https://peakbridge.vc/precision-fermentation-a-guide-for-endless-opportunities-to-reshape-traditional-foods-using-microbial-factories/>
43. <https://www.brain-biotech.com/we-crisper-for-you>
44. <https://insights.figlobal.com/sustainability/pioneering-precision-fermentation-more-sustainable-and-localised-food-production>
45. <https://brightgreenpartners.com/navigating-novel-food-regulation/>
46. <https://www.rangeme.com/blog/taking-a-closer-look-at-food-standards-eu-versus-u-s/>
47. <https://www.foodnavigator.com/Article/2023/03/15/Food-Fermentation-Europe-Advocating-for-precision-fermentation-industry>
48. <https://agfundernews.com/onego-bio-ceo-makes-the-case-for-animal-free-egg-proteins>
49. <https://brightgreenpartners.com/navigating-novel-food-regulation/>
50. <https://agfundernews.com/precision-fermentation-startups-launch-food-fermentation-europe>
51. <https://provegincubator.com/precision-fermentation-regulation/>
52. <https://www.foodnavigator.com/Article/2022/04/14/Regulating-precision-fermentation-Challenges-and-opportunities-in-marketing-microbiially-derived-foods-in-Europe>
53. <https://www.chr-hansen.com/de/media/press-releases/2020/9/chr-hansen-acquires-jennewein-biotechnologie-gmbh-to-enter-and-lead-the-highgrowth-human-milk-oli>
54. <https://www.dairyreporter.com/Article/2023/01/09/FrieslandCampina-Ingredients-joins-forces-with-biotech-firm-Triplebar#>
55. <https://www.nature.com/articles/s41467-023-37891-1/tables/1>
56. <https://www.foodfermentation.eu/>
57. <https://gfi.org/wp-content/uploads/2023/01/2022-Fermentation-State-of-the-Industry-Report-2.pdf>
58. [https://prismic-io.s3.amazonaws.com/formo/79909028-2cd3-4ab2-8096-1b95f39caf38\\_Formo\\_ANewWay\\_ConsumerReport.pdf](https://prismic-io.s3.amazonaws.com/formo/79909028-2cd3-4ab2-8096-1b95f39caf38_Formo_ANewWay_ConsumerReport.pdf)
59. <https://www.greenqueen.com.hk/precision-fermentation-survey-hartman-cargill-perfect-day/>
60. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fsufs.2021.678491/full>
61. <https://www.forbes.com/sites/gmoanswers/2015/11/30/transparency-no-longer-optional/>
62. <https://www.pfalliance.org/>
63. <https://gfi.org/resource/precision-fermentation-and-cellular-agriculture/>
64. <https://gfi.org/wp-content/uploads/2023/01/2022-Fermentation-State-of-the-Industry-Report-2.pdf>
65. <https://www.greenqueen.com.hk/clara-foods-partners-with-brewing-giant-ab-inbev-to-unlock-animal-free-egg-protein-at-scale/>
66. <https://thespoon.tech/adm-partners-with-new-culture-as-part-of-growing-buildout-of-alt-protein-production-infrastructure/>
67. <https://www.greenqueen.com.hk/formo-announces-brain-biotech-partnership/>
68. <https://vegeconomist.com/food-and-beverage/sweets-snacks/mars-perfect-day-first-dairy-chocolate/>
69. <https://www.greenqueen.com.hk/woo-chocolate-launches-with-perfect-day-whey/>
70. <https://gfi.org/wp-content/uploads/2023/01/2022-Fermentation-State-of-the-Industry-Report-2.pdf>
71. <https://netzeroinsights.com/wp-content/uploads/2023/06/Precision-fermentation-article.pdf>
72. <https://www.foodnavigator-usa.com/Article/2022/02/25/GUEST-ARTICLE-Microbes-all-dressed-up-with-no-place-to-go#>
73. <https://agfundernews.com/synonym-bio-report-documents-global-gaps-in-fermentation-capacity>
74. <https://gfi.org/wp-content/uploads/2023/01/2022-Fermentation-State-of-the-Industry-Report-2.pdf>
75. <https://www.greenqueen.com.hk/the-every-co-unveils-eggwhite-with-macarons/>
76. <https://www.weforum.org/agenda/2016/08/meat-free-beefburger-impossible-foods/>
77. <https://www.greenqueen.com.hk/zero-cow-factory-raises-4-million-for-its-precision-fermentation-casein/>
78. <https://www.greenqueen.com.hk/the-worlds-first-precision-fermentation-lactoferrin-turtletree/>
79. <https://www.greenqueen.com.hk/perfect-days-precision-fermentation-technology-nth-bio/>
80. <https://www.greenqueen.com.hk/paleo-raises-e12-million-for-precision-fermentation-myoglobin/>
81. <https://geltor.com/solutions/food/>
82. <https://www.just-food.com/features/precision-fermentation-cracks-stretch-and-melt-cheese-code-but-more-challenges-await?cf-view>
83. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9265346/>
84. <https://www.foodnavigator-usa.com/Article/2021/09/17/Motif-FoodWorks-to-launch-myoglobin-a-yeast-derived-heme-binding-protein-delivering-the-flavor-and-aroma-of-real-meat>
85. <https://www.foodnavigator.com/Article/2023/05/15/paleo-hermes-sanctorum-talks-making-myoglobin-without-animals#>
86. <https://www.remilk.com/newsroom>
87. <https://perfectday.com/made-with-perfect-day/>
88. <https://www.greenqueen.com.hk/fonterra-precision-fermentation-whey/>
89. <https://www.fao.org/3/c3418en/cc3418en.pdf>
90. [https://m4f6w9b2.rocketcdn.me/wp-content/uploads/2022/01/Comparative-Perfect-Day-Whey-LCA-report-prepared-by-WSP\\_20AUG2021\\_Non-Confidential-1.pdf](https://m4f6w9b2.rocketcdn.me/wp-content/uploads/2022/01/Comparative-Perfect-Day-Whey-LCA-report-prepared-by-WSP_20AUG2021_Non-Confidential-1.pdf)
91. <https://nicholasinstitute.duke.edu/sites/default/files/publications/Life-Cycle-Assessment-and-Carbon-Offset-Potential-for-Cultured-Milk-Protein.pdf>
92. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11367-022-02087-0>
93. <https://www.just-food.com/news/grupo-bimbo-affiliate-takes-part-in-clara-foods-investment-round/>

94. <https://gfi.org/science/the-science-of-fermentation/>
95. <https://www.greenqueen.com.hk/nourish-ingredients-closes-series-a-for-microbial-fermentation-fats/>
96. <https://www.greenqueen.com.hk/meltmarble-e5-million-seed-raise/>
97. <https://colipi.com/>
98. <https://bioekonomie.de/akteure/biopioniere/der-oelinnovator-thomas-brueck>
99. <https://planet-a-foods.com/de/>
100. <https://insempra.bio/>
101. <https://www.chr-hansen.com/de/media/press-releases/2020/9/chr-hansen-acquires-jennewein-biotechnologie-gmbh-to-enter-and-lead-the-highgrowth-human-milk-oli>
102. <https://www.dairyreporter.com/Article/2023/01/09/FrieslandCampina-Ingredients-joins-forces-with-biotech-firm-Triplebar#>
103. <https://www.nature.com/articles/s41467-023-37891-1/tables/1>
104. <https://www.glycom.com/>
105. <https://www.mdpi.com/2072-6643/13/8/2871>
106. <https://bioekonomie.de/en/node/101110>
107. <https://www.chr-hansen.com/de/media/press-releases/2021/8/chr-hansen-publishes-first-scientific-study-of-human-milk-oligosaccharides-mix-in-natural-concentr>
108. <https://www.frieslandcampinaingredients.com/ingredient-index-hmos/>
109. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0260877411001816>
110. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852422008276?via%3Dihub>
111. [https://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007/978-3-319-03751-6\\_58-1](https://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007/978-3-319-03751-6_58-1)
112. <https://www.mdpi.com/2311-5637/6/1/16>
113. <https://amyris.com/>
114. <https://evodiabio.com/>
115. <https://bioekonomie.de/akteure/portraets/bakterien-als-farbstoff-fabriken>
116. <https://conagen.com/press-item/conagen-develops-sustainable-intense-red-pigment-carminic-acid/>
117. <https://annualreport.dsm.com/ar2021/review-of-business/nutrition/nutrition-performance-2021/dsm-food-specialties.html>
118. <https://bioekonomie.de/en/news/bASFbuys-flavor-maker-isobionics>
119. <https://www.givaudan.com/media/media-releases/2016/givaudan-announces-long-term-collaboration-amyris-active-cosmetic>
120. <https://www.peprotech.com/en/animal-free-cytokines>
121. <https://www.tiamat-sciences.com>
122. <https://laurus.bio/>
123. <https://netzeroinsights.com/wp-content/uploads/2023/06/Precision-fermentation-article.pdf>
124. <https://www.youtube.com/watch?v=-XXGKlr98K0>
125. <https://www.youtube.com/watch?v=-XXGKlr98K0>
126. <https://faq.impossiblefoods.com/hc/en-us/articles/360018937494-What-are-the-ingredients-in-Impossible-Beef-Made-From-Plants->
127. <https://braverobot.co/>
128. <https://tryboredcow.com/>
129. <https://gfi.org/wp-content/uploads/2023/01/2022-Fermentation-State-of-the-Industry-Report-2.pdf>
130. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11367-022-02087-0>
131. <https://www.biotech-enzymes.com/chymosin-labenzym-gentechnisch-veraenderte-mikroorganismen-kaeseherstellung>
132. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0273230006000869?via%3Dihub>
133. <https://www.lvt-web.de/news/jennewein-biotechnologie-entwickelt-fermentationsverfahren-fuer-humane-milch-oligosacharide>
134. <https://www.nature.com/articles/s41467-023-37891-1>
135. <https://www.peprotech.com/en/animal-free-cytokines>
136. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0273230006000869?via%3Dihub>
137. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5282855/>
138. <https://evolva.com/app/uploads/2022/08/220825-HY22-results-presentation-Final.pdf>
139. <https://www.nature.com/articles/s41467-023-37891-1>
140. <https://www.biotech-enzymes.com/chymosin-labenzym-gentechnisch-veraenderte-mikroorganismen-kaeseherstellung>
141. <https://agfundernews.com/animal-free-dairy-startup-remilk-hits-pause-on-worlds-largest-precision-fermentation-facility-plan-in-denmark>
142. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33171209/>

143. <https://www.foodnavigator-usa.com/Article/2022/04/20/Motif-FoodWorks-challenges-validity-of-Impossible-Foods-patent-as-plant-based-meat-IP-battle-heats-up>
144. <https://www.foodnavigator-usa.com/Article/2022/07/14/we-make-animal-proteins-without-animals-paleo-ups-ante-in-alt-meat-area-with-animal-free-myoglobin#>
145. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7228273/>
146. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmicb.2022.1059777/full>
147. <https://www.brain-biotech.com/de/alternative-proteins/drei-beispiele-fuer-die-praezisionsfermentation>
148. <https://www.nature.com/articles/s41467-023-37891-1>
149. <https://techcrunch.com/2021/03/25/while-other-startups-develop-alt-proteins-for-meat-replacement-nourish-ingredients-focuses-on-fat/>
150. <https://www.yali.bio/>
151. <https://www.nature.com/articles/s41467-023-37891-1>
152. <https://www.mdpi.com/2076-2607/8/12/1937>
153. <https://www.nature.com/articles/ncomms4131>
154. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7009294/>
155. [https://food.ec.europa.eu/system/files/2019-05/novel-food\\_sum\\_ongoing-app\\_2018-0208.pdf](https://food.ec.europa.eu/system/files/2019-05/novel-food_sum_ongoing-app_2018-0208.pdf)
156. <https://www.fda.gov/media/136754/download>
157. <https://www.onego.bio/ourway/technology>
158. <https://www.nature.com/articles/s41598-019-41573-8>
159. <https://www.nature.com/articles/s41467-019-10079-2>
160. <https://www.gea.com/de/expert-knowledge/new-food-frontiers/index.jsp>
161. <https://gfi.org/science/the-science-of-fermentation/>
162. <https://www.gea.com/de/expert-knowledge/new-food-frontiers/index.jsp>
163. <https://gfi.org/science/the-science-of-fermentation/>
164. <https://www.youtube.com/watch?v=aqr18eio>
165. <https://www.foodnavigator-usa.com/Article/2022/02/25/GUEST-ARTICLE-Microbes-all-dressed-up-with-no-place-to-go#>
166. <https://www.youtube.com/watch?v=aqr18eiot9Q>
167. <https://capacitor.bio/>
168. <https://www.gea.com/de/articles/new-food-application-technology-center/index.jsp>
169. <https://www.youtube.com/watch?v=aqr18eiot9Q>
170. [https://gfi.org/wp-content/uploads/2023/01/SCI23024\\_FERM-manufacturing-capacity-analysis\\_Final.pdf](https://gfi.org/wp-content/uploads/2023/01/SCI23024_FERM-manufacturing-capacity-analysis_Final.pdf)
171. <https://gfi.org/wp-content/uploads/2023/01/2022-Fermentation-State-of-the-Industry-Report-2.pdf>
172. <https://www.foodnavigator-usa.com/Article/2022/02/25/GUEST-ARTICLE-Microbes-all-dressed-up-with-no-place-to-go#>
173. <https://www.foodnavigator.com/Article/2022/09/20/Beating-the-bioreactor-bottleneck-German-start-up-plans-bigger-and-more-out-of-the-box-ways-to-scale-cultivated-meat#>
174. <https://agfundernews.com/animal-free-dairy-startup-remilk-hits-pause-on-worlds-largest-precision-fermentation-facility-plan-in-denmark>
175. <https://gfi.org/wp-content/uploads/2023/01/2022-Fermentation-State-of-the-Industry-Report-2.pdf>
176. <https://www.foodbev.com/news/adm-jv-scaleup-bio-to-open-two-precision-fermentation-facilities/#~:text=ScaleUp%20Bio%2C%20a%20joint%20venture,investment%20management%20company%20in%20Singapore.>
177. <https://vegeconomist.com/manufacturing-technology/change-foods-announces-microbial-casein-facility-abu-dhabi/>
178. <https://vegeconomist.com/manufacturing-technology/worlds-first-precision-mycelium-fermentation-plant/>
179. <https://www.genengnews.com/news/the-state-of-global-fermentation/>
180. <https://capacitor.bio/trends>
181. <https://www.youtube.com/watch?v=aqr18eiot9Q>
182. [https://gfi.org/wp-content/uploads/2023/01/SCI23024\\_FERM-manufacturing-capacity-analysis\\_Final.pdf](https://gfi.org/wp-content/uploads/2023/01/SCI23024_FERM-manufacturing-capacity-analysis_Final.pdf)
183. <https://www.youtube.com/watch?v=-XXGKlr98K0>
184. <https://www.fermify.org/>
185. <https://www.youtube.com/watch?v=-XXGKlr98K0>
186. <https://www.statistik.niedersachsen.de/download/177569#:~:text=Niedersachsen%20lag%20damit%20C3%BCber%20dem,2020%20nur%20rund%20jeder%2017.>
187. <https://www.ml.niedersachsen.de/startseite/themen/landwirtschaft/landwirtschaft-in-niedersachsen-4513.html>
188. <https://www.ml.niedersachsen.de/ackergruen/die-niedersachsische-ackerbau-und-grunlandstrategie-198625.html>
189. <https://www.statistik.niedersachsen.de/download/177569#:~:text=Niedersachsen%20lag%20damit%20C3%BCber%20dem,2020%20nur%20rund%20jeder%2017>

191. <https://www.ml.niedersachsen.de/startseite/themen/landwirtschaft/landwirtschaft-in-niedersachsen-4513.html>
192. [https://www.ble.de/SharedDocs/Downloads/DE/BZL/Daten-Berichte/Zucker/2023BerichtZucker.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=3](https://www.ble.de/SharedDocs/Downloads/DE/BZL/Daten-Berichte/Zucker/2023BerichtZucker.pdf?__blob=publicationFile&v=3)
193. Auf einen Blick – Zucker – Süße vom Feld, <https://www.statistik.niedersachsen.de/download/134062>
194. [www.nordzucker.de](http://www.nordzucker.de), aufgerufen am 15.6.2023
195. <https://www.sueddeutsche.de/wirtschaft/lebensmittelpreise-zucker-lambertz-suedzucker-teurer-1.5797068>, aufgerufen 15.6.2023
196. Von der Rübe zum Zucker, Nordzucker, [https://www.nordzucker.com/de/wp-content/uploads/sites/2/2020/08/NZ\\_Zuckerflyer\\_D\\_2022\\_online.pdf](https://www.nordzucker.com/de/wp-content/uploads/sites/2/2020/08/NZ_Zuckerflyer_D_2022_online.pdf)
197. Bericht zur Markt- und Versorgungslage Zucker, BLE 2022, <https://www.ble.de/SharedDocs/Downloads/DE/BZL/Daten-Berichte/Zucker/2022BerichtZucker.pdf>
198. [https://www.ble.de/SharedDocs/Downloads/DE/BZL/Daten-Berichte/Kartoffeln/2023BerichtKartoffeln.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=2](https://www.ble.de/SharedDocs/Downloads/DE/BZL/Daten-Berichte/Kartoffeln/2023BerichtKartoffeln.pdf?__blob=publicationFile&v=2)
199. <https://www.topagrar.com/markt/news/staerkekartoffelerzeuger-steigende-kosten-erfordern-hoheren-kartoffelpreis-12676793.html>
200. [https://www.ble.de/SharedDocs/Downloads/DE/BZL/Daten-Berichte/Kartoffeln/2023BerichtKartoffeln.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=2](https://www.ble.de/SharedDocs/Downloads/DE/BZL/Daten-Berichte/Kartoffeln/2023BerichtKartoffeln.pdf?__blob=publicationFile&v=2)
201. <https://www.avebe.com/products; https://www.emsland-group.de/unserproduktloesungen/food> (beide aufgerufen am 22.6.2023)
202. Die niedersächsische Landwirtschaft in Zahlen 2021, Niedersächsisches Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz
203. Bericht zur Markt- und Versorgungslage Getreide 2021, Bundesanstalt für Ernährung und Landwirtschaft
204. [https://www.statistik.niedersachsen.de/landwirtschaft\\_forstwirtschaft\\_fischerei/landwirtschaft\\_in\\_niedersachsen/bodenutzung/landwirtschaftliche-bodenutzung-in-niedersachsen-ergebnisse-209478.html](https://www.statistik.niedersachsen.de/landwirtschaft_forstwirtschaft_fischerei/landwirtschaft_in_niedersachsen/bodenutzung/landwirtschaftliche-bodenutzung-in-niedersachsen-ergebnisse-209478.html)
205. <https://www.3-n.info/themen/rohstoffe/oelpflanzen.html>
206. [https://www.lwk-niedersachsen.de/lwk/thema/559\\_Raps](https://www.lwk-niedersachsen.de/lwk/thema/559_Raps)
207. <https://www.ndr.de/nachrichten/niedersachsen/Niedersachsens-Landwirte-bauen-deutlich-mehr-Sonnenblumen-an,sonnenblumen122.html>
208. <https://www.3-n.info/themen/rohstoffe/oelpflanzen.html>
209. [https://www.statistik.niedersachsen.de/landwirtschaft\\_forstwirtschaft\\_fischerei/landwirtschaft\\_in\\_niedersachsen/bodenutzung/landwirtschaftliche-bodenutzung-in-niedersachsen-ergebnisse-209478.html](https://www.statistik.niedersachsen.de/landwirtschaft_forstwirtschaft_fischerei/landwirtschaft_in_niedersachsen/bodenutzung/landwirtschaftliche-bodenutzung-in-niedersachsen-ergebnisse-209478.html)
210. <https://www.3-n.info/themen/rohstoffe/oelpflanzen.html>
211. [https://www.statistik.niedersachsen.de/landwirtschaft\\_forstwirtschaft\\_fischerei/landwirtschaft\\_in\\_niedersachsen/bodenutzung/landwirtschaftliche-bodenutzung-in-niedersachsen-ergebnisse-209478.html](https://www.statistik.niedersachsen.de/landwirtschaft_forstwirtschaft_fischerei/landwirtschaft_in_niedersachsen/bodenutzung/landwirtschaftliche-bodenutzung-in-niedersachsen-ergebnisse-209478.html)
212. [https://www.lwk-niedersachsen.de/lwk/news/40044\\_Landessortenversuche\\_2022\\_Ackerbohnen\\_und\\_Futtererbsen](https://www.lwk-niedersachsen.de/lwk/news/40044_Landessortenversuche_2022_Ackerbohnen_und_Futtererbsen), aufgerufen 9.7.2023
213. [https://www.lwk-niedersachsen.de/lwk/news/40044\\_Landessortenversuche\\_2022\\_Ackerbohnen\\_und\\_Futtererbsen](https://www.lwk-niedersachsen.de/lwk/news/40044_Landessortenversuche_2022_Ackerbohnen_und_Futtererbsen), aufgerufen 9.7.2023
214. Landesstrategie Biologisierung, [https://www.mw.niedersachsen.de/startseite/themen/wirtschaft/innovationsland\\_niedersachsen/landesinitiativen\\_und\\_cluster/landesstrategie\\_biologisierung-213403.html](https://www.mw.niedersachsen.de/startseite/themen/wirtschaft/innovationsland_niedersachsen/landesinitiativen_und_cluster/landesstrategie_biologisierung-213403.html)
215. <https://www.fei-bonn.de/gefoerderte-projekte/projekte-des-monats/pdm-2023-05>, aufgerufen am 20.07.2023
216. [https://www.ml.niedersachsen.de/startseite/themen/landwirtschaft/nachhaltigkeit\\_und\\_klimaschutz/nachhaltigkeit-146290.html](https://www.ml.niedersachsen.de/startseite/themen/landwirtschaft/nachhaltigkeit_und_klimaschutz/nachhaltigkeit-146290.html), aufgerufen am 19.7.2023
217. [https://www.umwelt.niedersachsen.de/startseite/themen/klima/klimaschutz/klimaschutz\\_in\\_niedersachsen/klimaschutz\\_in\\_niedersachsen-200413.html](https://www.umwelt.niedersachsen.de/startseite/themen/klima/klimaschutz/klimaschutz_in_niedersachsen/klimaschutz_in_niedersachsen-200413.html), aufgerufen am 20.07.2023
218. <https://www.bmel-statistik.de/ernaehrung-fischerei/versorgungsbilanzen/fleisch>, abgerufen 20.07.2023
219. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/173636/umfrage/lebenseinstellung-anzahl-vegetarier/>, aufgerufen am 20.07.2023
220. [https://www.ble.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2023/230125\\_Trendreport\\_BZfE.html](https://www.ble.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2023/230125_Trendreport_BZfE.html), aufgerufen am 20.07.2023
221. Bodennutzung in Niedersachsen – Statistische Berichte 2021
222. <https://www.ihk.de/oldenburg/service/branchen/ernaehrungsgewerbe/transformation-durch-innovation-5595934>, aufgerufen am 7.7.2023
223. Niedersächsische Ackerbau- und Grünlandstrategie, Niedersächsisches Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, 2021
224. <https://www.dsmz.de/>
225. <https://www.dil-ev.de/>
226. <https://www.seedhouse.de/>
227. <https://www.gea.com/de/products/bioreactor-systems/new-food-application-technology-center-excellence.jsp>
228. <https://www.richter-helm.eu/about-us/#locations>
229. <https://www.helmholtz-hzi.de/en/research/research-topics/anti-infectives/microbial-drugs/fermentation/>
230. <https://kwst.com/unternehmen/?lang=de/#zahlen-und-fakten>
231. <https://capacitor.bio/database/map>
232. <http://www.cordenbiochem.com/>
233. [https://www.mw.niedersachsen.de/startseite/themen/wirtschaft/innovationsland\\_niedersachsen/landesinitiativen\\_und\\_cluster/landesstrategie\\_biologisierung/landesstrategie.biologisierung-213403.html](https://www.mw.niedersachsen.de/startseite/themen/wirtschaft/innovationsland_niedersachsen/landesinitiativen_und_cluster/landesstrategie_biologisierung/landesstrategie.biologisierung-213403.html)
234. „Branchenanalyse Brot- und Backwarenindustrie“, 2018, herausgegeben von der Hans-Böckler-Stiftung
235. <https://www.bve-online.de/presse/infothek/publikationen-jahresbericht/bve-jahresbericht-ernaehrungsindustrie-2022>
236. Bericht zur Markt- und Versorgungslage mit Milch und Milcherzeugnissen 2023, Bundesanstalt für Ernährung und Landwirtschaft, Mai 2023

237. <https://www.ingredients.uelzena.com/milchprodukte/kundenindividuelle-milchprodukte/>, aufgerufen am 24.7.2023
238. [https://www.meggle-foodingredients.de/fettpulver\\_bakery/](https://www.meggle-foodingredients.de/fettpulver_bakery/)
239. Statistischer Teil des MIV-Geschäftsberichts 2021/2022, Milchindustrieverband
240. <https://milchindustrie.de/milkikipedia/kaseinat/>, abgerufen 24.07.2023
241. <https://milchindustrie.de/milkikipedia/laktose/>
242. Landbauforschung - vTI Agriculture and Forestry Research, Sonderheft 322 / Special Issue 322 (2008), Kapitel 9: Eiprodukte; aktuelle Trends in der Verarbeitung Verwendung
243. <https://www.gelatine.org/de/gelatine/eigenschaften-vorteile.html>, aufgerufen 27.7.2023
244. <https://www.cambrion.bio/products>
245. <https://thespoon.tech/geltor-debuts-animal-free-collagen-for-food-and-beverage-markets/>
246. [https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Tiere-Tierische-Erzeugung/\\_inhalt.html](https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Tiere-Tierische-Erzeugung/_inhalt.html)
247. <https://www.zdf.de/nachrichten/wirtschaft/fleischalternative-vegan-vegetarisch-wurst-boom-100.html>
248. [https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2022/05/PD22\\_N025\\_42.html](https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2022/05/PD22_N025_42.html)
249. [https://www.ndr.de/nachrichten/niedersachsen/oldenburg\\_ostfriesland/Ruegenwalder-verkauft-erstmals-mehr-Veggieprodukte-als-Wurst,ruegenwalder102.html](https://www.ndr.de/nachrichten/niedersachsen/oldenburg_ostfriesland/Ruegenwalder-verkauft-erstmals-mehr-Veggieprodukte-als-Wurst,ruegenwalder102.html)
250. <https://www.ruegenwalder.de>
251. <https://www.phw-gruppe.de/geschaeftsfelder/alternative-proteinquellen/>
252. <https://www.green-legend.com/>
253. <https://www.phw-gruppe.de/newsbereich/de/beyond-meat-steigt-mit-der-phw-gruppe-als-exklusivem-vertriebspartner-in-den-deutschen-markt-ein/>
254. <https://www.phw-gruppe.de/geschaeftsfelder/alternative-proteinquellen/>
255. <https://www.ruegenwalder.de/de/produkte/zutaten-zusatzstoffe>
256. <https://veconomist.de/marketing-und-medien/die-ruegenwalder-muehle-veganuary/?nab=0>
257. <https://lebensmittelpraxis.de/sortiment/28853-vegan-und-vegetarisch-veggie-kaeufe-marketing-verfehlt-ofz-zielgruppe.html>
258. <https://www.dlg.org/de/lebensmittel/themen/publikationen/expertenwissen-lebensmitteltechnologie/vegane-lebensmittel>, aufgerufen 24.7.2023
259. <https://www.umwelt.niedersachsen.de/startseite/themen/energie/energiewendebericht/energiewendebericht-119325.html>
260. <https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/studien/studie-stromgestehungskosten-erneuerbare-energien.html>
261. [https://www.mw.niedersachsen.de/startseite/themen/wirtschaft/wirtschaftsstandort\\_niedersachsen\\_im\\_wettbewerb/wirtschaftsstandort-niedersachsen-15378.html](https://www.mw.niedersachsen.de/startseite/themen/wirtschaft/wirtschaftsstandort_niedersachsen_im_wettbewerb/wirtschaftsstandort-niedersachsen-15378.html)
262. [https://www.mw.niedersachsen.de/startseite/themen/wirtschaft/maritime\\_wirtschaft/seehafen\\_inklusive\\_hafenbehorde/seehaefen-in-niedersachsen-145543.html](https://www.mw.niedersachsen.de/startseite/themen/wirtschaft/maritime_wirtschaft/seehafen_inklusive_hafenbehorde/seehaefen-in-niedersachsen-145543.html)
263. <https://www.logistikportal-niedersachsen.de>
264. <https://www.brain-biotech.com/we-crispr-for-you>
265. <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10408398.2023.2166014>
266. <https://veconomist.com/cultivated-cell-cultured-biotechnology/fermentation/fermify-5m-animal-free-casein/>, aufgerufen 24.7.2023
267. <https://veconomist.com/food-and-beverage/cheese-alternatives/fermify-and-bilfinger-animal-free-dairy/>, aufgerufen 24.7.2023
268. <https://gfieuropa.org/wp-content/uploads/2023/05/GFI-Europe-Alternative-Proteins-in-Deutschland-Full-Report.pdf>
269. <https://web-assets.bcg.com/6f/f1/087a0cc74221ac3fe6332a2ac765/the-untapped-climate-opportunity-in-alternative-proteins-july-2022.pdf>
270. So wurde im Juni 2023 in Irland ein internes Regierungspapier öffentlich, dass die Schlachtung von 200.000 Kühen vorschlug, um die Klimaziele zu erreichen. <https://www.zdf.de/nachrichten/politik/irland-kuehe-tod-keulung-klima-100.html>
271. <https://www.gelita.com/de/GELITA-Geltor-2019>
272. <https://www.umwelt.niedersachsen.de/startseite/themen/klima/Klimaanpassung/klimaanpassung-in-niedersachsen-199341.html>

Alle Quellen wurden zwischen Dezember 2022 und August 2023 aufgerufen.

## IMPRESSUM

Herausgeber

**LI FOOD Landesinitiative Ernährungswirtschaft in Niedersachsen**

**DIL Technologie GmbH**

**Professor-von-Klitzing-Straße 7**

**49610 Quakenbrück**

**info@li-food.de**

**www.li-food.de**

Erstellt durch Analysis + Consulting by DECHEMA

**DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V.,**

**Theodor-Heuss-Allee 25,**

**60486 Frankfurt**

Autoren

**Dr. Sebastian Hiessl**

**Dr. Kathrin Rübberdt**

Design und Layout

**Running Frames GmbH**

**www.runningframes.de**

Bildnachweis

**iStock S. 1, 4, 7, 8, 10, 14, 18, 24, 26, 30, 34, 44, 45.**

**Envatoelements S. 10, 12, 16, 20, 22, 32, 35, 36, 37, 40, 49, 50, 52, 57.**

**GEA S. 28**

Stand

**Oktober 2023**

Alle Rechte liegen beim Herausgeber.

Ein Nachdruck – auch auszugsweise – ist nur mit ausdrücklicher Genehmigung des Herausgebers gestattet.

Die LI Food wird gefördert durch das Niedersächsische Ministerium für Wirtschaft, Verkehr, Bauen und Digitalisierung.

## METHODIK UND HAFTUNGSAUSSCHLUSS

Die vorliegende Studie basiert auf Recherchen öffentlich zugänglicher Quellen sowie auf Interviews mit Expertinnen und Experten, die verschiedene Akteursgruppen der Ernährungswirtschaft repräsentieren. Die Informationen und Daten wurden sorgfältig analysiert und auf Plausibilität geprüft. Die Empfehlungen gründen sich auf die Informationen und Einschätzungen, die die Autoren im Rahmen der Studie sammeln konnten, und wurden mit Experten und Expertinnen kritisch diskutiert. Die Autoren übernehmen keine Verantwortung für die Vollständigkeit und Richtigkeit der Daten und für Entscheidungen, die auf Basis der vorliegenden Studie getroffen werden.



[www.li-food.de](http://www.li-food.de)