



RE:THINK MICROALGAE

**Frische Mikroalgen - die natürliche Schlüssel-Ressource für eine gesunde,
nachhaltige Clean-Label Lebensmittelindustrie**

Version 3.0

Gunnar Mühlstädt
Antonia Bätzold

10. Dezember 2025

Dieses Whitepaper richtet sich an ein fachkundiges Publikum innerhalb der Lebensmittelwirtschaft und verfolgt das Ziel, wissenschaftlich fundierte Informationen zu den Eigenschaften und Potenzialen frischer Mikroalgen bereitzustellen. Die enthaltenen Inhalte basieren auf aktuellen wissenschaftlichen Erkenntnissen und dienen der allgemeinen Information. An ausgewählten Beispielen werden potenzielle Anwendungsbereiche exemplarisch aufgezeigt, unter anderem anhand von Umsetzungen beim ALGENWERK (PUEVIT GmbH). Diese Darstellungen verstehen sich nicht als werbliche Aussagen und beinhalten keine gesundheitsbezogenen Angaben im Sinne der Verordnung (EG) Nr. 1924/2006 (HCVÖ). Die genannten physiologischen Eigenschaften sind wissenschaftlich dokumentiert, stellen jedoch keine zugelassenen Health Claims dar. Insbesondere sind sie nicht als Aussagen über spezifische Produkte oder deren Eigenschaften zu verstehen.

URheberRECHTSHINWEIS UND NUTZUNGSBEDINGUNGEN

© 2025 Gunnar Mühlstädt / ALGENWERK (PUEVIT GmbH). Alle Rechte vorbehalten.

Dieses Dokument und die darin enthaltenen Analysen, Schlussfolgerungen und Argumentationsstrukturen sind geistiges Eigentum der PUEVIT GmbH und urheberrechtlich geschützt.

Nutzung und Weitergabe: Wir freuen uns, wenn die Inhalte dieses Whitepapers Ihre Arbeit inspirieren und unterstützen. Die Weitergabe des vollständigen, unveränderten Dokuments ist ausdrücklich erwünscht. Die Verwendung von Auszügen im Rahmen des wissenschaftlichen Zitatrechts ist unter korrekter Quellenangabe gestattet.

Bitte zitieren Sie wie folgt: Mühlstädt, G.; Bätzold, A. (2025): *RE:THINK MICROALGAE - Frische Mikroalgen als natürliche Schlüssel-Ressource für eine gesunde, nachhaltige Clean-Label Lebensmittelindustrie*. Whitepaper Version 3.0, ALGENWERK (PUEVIT GmbH), Dresden.

Für darüberhinausgehende Verwendungen, wie die teilweise oder vollständige Reproduktion, die kommerzielle Nutzung der Inhalte oder die Erstellung abgeleiteter Werke, kontaktieren Sie uns bitte zur Einholung einer schriftlichen Genehmigung.

Haftungsausschluss: Die in diesem Whitepaper enthaltenen Informationen wurden mit größter wissenschaftlicher Sorgfalt recherchiert und aufbereitet. Dennoch können wir keine Gewähr für die absolute Vollständigkeit, Aktualität und Fehlerfreiheit der Daten übernehmen. Die Nutzung der Informationen erfolgt auf eigene Verantwortung. Für die Richtigkeit der Inhalte in zitierten Drittquellen sind ausschließlich deren Autoren verantwortlich.

Hinweis zur KI-Unterstützung: Bei der Erstellung dieses Dokuments wurden KI-basierte Werkzeuge zur Recherche und Textoptimierung unterstützend eingesetzt. Die inhaltliche Prüfung, wissenschaftliche Validierung und finale Ausgestaltung obliegen jedoch vollumfänglich dem Autor.

Kontakt für Nutzungsanfragen:

ALGENWERK c/o PUEVIT GmbH

Am Torfmoor 1c

E-Mail: hallo@algenwerk.de

Tel.: +49351-89690500

Zu widerhandlungen werden ggf. verfolgt.

Inhalt

1. Zusammenfassung	5
2. Klassifizierung von Mikroalgen und Rechtliche Einordnung	7
2.1 Wissenschaftliche und regulatorische Klassifizierung als Mikroalge.....	7
2.2 Rechtlicher Status als traditionelles Lebensmittel in der EU	7
2.3 Frische Algen vs. Getrocknete Algen - Rechtliche und technologische Unterschiede	7
3. Extrazelluläre Polymere Substanzen und bioaktive Metaboliten	10
3.1 Definition und Bedeutung von EPS in frischen Mikroalgen.....	10
3.2 EPS-Produktion in verschiedenen Mikroalgen-Arten.....	10
3.3 Bioaktive Eigenschaften der EPS-Matrix: Antimikrobielle und präbiotische Potenziale	10
3.4 Technofunktionale Eigenschaften von EPS.....	10
4. Ernährungsphysiologisch relevante Inhaltsstoffe und Nutri-Score-Parameter.....	11
4.1 Spirulina – Das Multitalent	11
4.2 Beispiele weiterer Mikroalgen-Arten	12
4.3 Nutri-Score-Relevanz der Mikroalgen-Inhaltsstoffe	14
4.4 Vergleichende Analyse: Frische vs. getrocknete Spirulina-Biomasse.....	14
4.5 Protein-Qualität und technofunktionale Eigenschaften – Frische vs. getrocknete Spirulina.....	15
5. Vitamin B12 in Spirulina - Wissenschaftlicher Stand und neue Erkenntnisse	18
5.1 Der wissenschaftliche Konsens: Pseudovitamin B12-Problematik	18
5.2 Neue wissenschaftliche Ansätze: Kontrollierte Kultivierung.....	18
6. Substitution von Lebensmittelzusatzstoffen	19
6.1 Clean Label Strategie durch Mikroalgen	19
6.2 Farbstoffe - Natürliche Alternativen.....	19
6.3 Emulgatoren und Stabilisatoren	19
6.4 Antioxidantien und Konservierungsstoffe.....	19
6.5 Clean-Label-Marktvorteile.....	19
7. Nutri-Score-Optimierung durch frische Mikroalgen	20
7.1 Vollständige Nutri-Score-Parameter aus Mikroalgen.....	20
7.2 Ballaststoffe als Positiv-Faktor für Nutri-Score.....	20
7.3 Beispielprodukte: Zwei verschiedene Nutri-Score-Verbesserungen	21
7.4 Synergetische Effekte	21
8. Nachhaltigkeitsanalyse.....	22
8.1 LCA-Ergebnisse am Beispiel der ALGENWERK-Produktion	22
8.2 Nachhaltigkeit im Kontext: CO ₂ -Bilanz und Flächeneffizienz.....	22
9. Kundenakzeptanz und Markteinschätzung	24
9.1 Sensorisches Profil und Geschmacksakzeptanz	24

9.2 Kunden-Akzeptanz-Studie zu roh-veganer Spirulina.....	24
9.3 Lebensmitteltechnologische Potenziale.....	25
9.4 Marktpotenzial und Kundenpräferenzen.....	25
10. ALGENWERK – Technologieführer in Qualität, Sicherheit und Innovation	27
11. Anwendungen in der Lebensmittelindustrie und Innovationspotentiale.....	29
12. Fazit und Zukunftsperspektiven	30
13. Anhang A.....	31
Nutri-Score-Beispielrechnungen (Lebensmittel- und Getränke-Algorithmus)	31
14. Literaturverzeichnis	34
15. Abbildungsverzeichnis	40

1. ZUSAMMENFASSUNG

Die kulinarische Welt blickt zunehmend auf das Wasser, um neue, nachhaltige und nährstoffreiche Lebensmittel zu entdecken - eine Bewegung, die als "Blue Food" bekannt ist. An der Basis dieses maritimen Ernährungswandels stehen Mikroalgen, die seit Milliarden von Jahren die Grundlage des aquatischen Lebens bilden. Als Primärproduzenten und Basis der Nahrungskette in aquatischen Ökosystemen bieten sie eine unvergleichliche Fülle an wertvollen Inhaltsstoffen [6].

"Blue Food" wird zunehmend als zentrale Säule einer nachhaltigen Ernährungsstrategie verstanden, da aquatische Lebensmittel insbesondere aus Aquakulturen im Vergleich zu terrestrischen Proteinquellen oft geringere Umweltbelastungen aufweisen. Eine umfassende Metaanalyse von Froehlich et al. [2] zeigt, dass aquatische Produktionssysteme bei CO₂-Emissionen, Wasser- und Flächenverbrauch signifikante Vorteile gegenüber Fleischproduktion bieten. Die wachsende Bedeutung von "Blue Food" für die zukünftige Ernährungssicherheit wird

auch durch die Blue Food Assessment Studie hervorgehoben [1].

Im Gegensatz zu getrockneten Produkten, die oft einen Großteil ihrer sensiblen Nährstoffe und technofunktionalen Eigenschaften verlieren, bieten frische Mikroalgen einzigartige Vorteile. Sie sind nicht nur ernährungsphysiologisch überlegen, sondern bringen auch technologische Eigenschaften mit, die für innovative Lebensmittelentwicklungen entscheidend sind. Eine Masterarbeit der Hochschule Neubrandenburg [3] untersuchte diese Unterschiede systematisch.

Dieses Whitepaper "RE:THINK MICROALGAE" dient als umfassende wissenschaftliche Auskunft über die zukunftsweisenden Möglichkeiten frischer Mikroalgen als natürliche Technologie-Plattform für eine Clean-Label Lebensmittelindustrie. Besondere Aufmerksamkeit wird dem grundlegenden Unterschied zwischen frischen Mikroalgen als bioaktives System und rekonstituierten Trockenprodukten gewidmet.

Fundamentaler Unterschied: Frische vs. rekonstituierte Mikroalgen

Frische Mikroalgen bestehen nicht nur aus Algenzellen plus Wasser, sondern repräsentieren komplexe Habitate mit extrazellulären Substanzen (z.B. Extrazelluläre Polymere Substanzen EPS), Phytohormonen und symbiotischen Mikroorganismen, die für die Nährstoffproduktion und technofunktionalen Eigenschaften entscheidend sind. Diese biologische Matrix kann nicht durch einfache Rekonstitution getrockneter Algen mit Wasser wiederhergestellt werden, da Trocknungsprozesse zu irreversiblen strukturellen Veränderungen führen [4, 19, 20]. Die EPS-Matrix bildet dabei eine wesentliche Grundlage für den kommerziellen Vorteil des Zusatzstoffersatzes.

Ernährungsphysiologische Überlegenheit

Spirulina beispielsweise zeichnet sich durch ein außergewöhnliches Nährstoffprofil aus. Wissenschaftliche Untersuchungen liefern bereits wichtige neue Erkenntnisse zu den strukturellen und funktionellen Unterschieden zwischen frischer "roh-veganer Spirulina" und rekonstituierten Trockenprodukten. Eine aktuelle Studie im Journal of Applied Phycology bestätigt diese Vorteile und zeigt, dass frische Spirulina-Biomasse im

Vergleich zu getrockneten Produkten signifikant höhere Gehalte an wertvollen Inhaltsstoffen aufweist: z.B. 60% mehr Phycocyanin, 50% mehr Carotinoide und 87% mehr Vitamin E [84].

Protein-Qualität und technofunktionale Überlegenheit

Spirulina zeichnet sich durch einen außergewöhnlich hohen Proteingehalt von 55-70% der Trockensubstanz aus. Doch nicht nur die Quantität, sondern insbesondere die strukturelle Integrität und Funktionalität der Proteine unterscheidet frische von getrockneter Biomasse fundamental. Während Trocknungsprozesse – insbesondere thermische Verfahren – zu irreversiblen Proteindenaturierungen führen, bleiben in frischer Spirulina die nativen Proteinstrukturen und damit ihre technofunktionalen Eigenschaften vollständig erhalten [85, 86].

Diese strukturelle Integrität hat direkte Auswirkungen auf lebensmitteltechnologische Anwendungen: Frische Spirulina-Proteine zeigen überlegene Gelier-, Emulgier- und Wasserbindungseigenschaften im Vergleich zu rekonstituierten Trockenprodukten [87, 88]. Die Proteinverdaulichkeit frischer Spirulina liegt mit 85-90% signifikant höher als bei getrockneten Produkten, was auf die intakte Zellstruktur und die natürliche EPS-Matrix zurückzuführen ist [65, 66, 89].

Clean-Label Technologie-Plattform

Extrazelluläre Polymere Substanzen (EPS) in frischen Mikroalgen ermöglichen natürliche Emulgierung, Stabilisierung und Texturverbesserung ohne Zusatzstoffe. Diese EPS können verschiedene E-Nummern ersetzen und echte Clean-Label-Formulierungen ermöglichen, da sie als natürliche Verdickungsmittel, Gelbildner und Emulgatoren fungieren [5, 24]. Diese technofunktionalen Eigenschaften gehen bei der Trocknung meist unwiederbringlich verloren und können nicht durch einfache Rehydratation wiederhergestellt werden.

Nutri-Score-Revolution

Bereits 35% frische Spirulina in einem Smoothie können deutliche Nutri-Score-System Verbesserungen bewirken – beispielsweise von Nutri-Score D auf B. Die synergetischen Effekte zwischen Mikroalgen und anderen Zutaten verstärken diese positiven Auswirkungen zusätzlich.

Geschmacksprofil

Frische Spirulina zeichnet sich durch ein mildes Geschmacksprofil aus, das den Eigengeschmack anderer Zutaten in einem Produkt nicht beeinflusst. Dies ermöglicht eine vielseitige Integration in diverse Lebensmittel, ohne die sensorische Balance zu stören. Es können durch verschiedene Verarbeitungswege wie Erhitzen oder Rösten gezielt Geschmackskomponenten in der Spirulina aktiviert oder beeinflusst werden, um dem Endprodukt spezifische Geschmacksnuancen zu verleihen. Dies wird durch sensorische Analysen bestätigt, bei denen frische Spirulina als deutlich milder und angenehmer in Aroma und Textur bewertet wird, während getrocknete Produkte stärkere algige, bittere und Umami-Noten aufweisen. In direkten Vergleichstests bevorzugten bis zu 97% der Verkoster die frische Variante in einem Produkt mit hoher Konzentration [84].

Akzeptanz in der Kundschaft und Marktpotential

Eine Masterarbeit der Hochschule Neubrandenburg [3] zeigt eine wachsende Akzeptanz für "roh-vegane Spirulina" bei gesundheitsbewussten Verbraucher:innen. Die Frische wird als entscheidender Qualitätsfaktor wahrgenommen, und die sensorischen Eigenschaften frischer Spirulina werden als milder und angenehmer bewertet als getrocknete Produkte. Es ist hierbei anzumerken, dass die Stichprobe nicht repräsentativ für die deutsche Gesamtbevölkerung ist, aber die Anzahl der Probanden signifikant groß ist.

Nachhaltigkeitsvorteile

Die Mikroalgen-Produktion trägt zu mehreren UN-Nachhaltigkeitszielen bei. Eine LCA-Studie zur Produktion frischer Spirulina, durchgeführt als Masterarbeit an der Wageningen University [61], zeigt Umweltvorteile gegenüber konventionellen Lebensmitteln und Rohstoffen. Insbesondere mit einer minimalen Landflächennutzung und einer intelligenten Nutzung regenerativer Energie bietet frische Spirulina eine nachhaltige Alternative.

ALGENWERK als Qualitätsstandard

ALGENWERK hat sich als führender Produzent von frischen Mikroalgen in Europa etabliert und setzt Maßstäbe in der technologischen Exzellenz und Qualität der Mikroalgen-Produktion im Industriemaßstab. Die Produktionsanlagen basieren auf modernster skalierbarer Photobioreaktor-Technologie und umfassenden Qualitätsmanagementsystemen.

Das vorliegende Kompendium zeigt auf, wie frische Mikroalgen nicht nur als Nährstofflieferanten fungieren, sondern als natürliche Technologie-Plattform für Clean Label-Formulierungen, Nutri-Score-Optimierung und nachhaltige Lebensmittelproduktion.

2. KLASSIFIZIERUNG VON MIKROALGEN UND RECHTLICHE EINORDNUNG

Kernaussagen dieses Kapitels:

- Spirulina ist gemäß VO (EU) 2015/2283 kein neuartiges Lebensmittel
- Frische Spirulina bleibt ein 'unverarbeitetes Erzeugnis' (VO 852/2004); Trocknung gilt bereits als Verarbeitung
- NutriScore: Algen sind international Kategorie 8.55 'Gemüse' – voller F/V/N/A bzw. F/V/L-Bonus

2.1 Wissenschaftliche und regulatorische Klassifizierung als Mikroalge

Aus lebensmittelrechtlicher Sicht wird Spirulina der Gruppe der Algen zugeordnet. Dies gilt unabhängig von der taxonomischen Gattung, die in der Wissenschaft aktuell als *Limnospira* sp. bezeichnet wird [7]. Spirulina gehört biologisch zum Stamm der Cyanobakterien (früher als Blaualgen bezeichnet).

Trotz dieser biologischen Feinheit wird die gesamte Gruppe aufgrund ihrer photosynthetischen Eigenschaften und ihres algenähnlichen Wachstums in der Lebensmittelwissenschaft, im Handel und in regulatorischen Kontexten einheitlich als Mikroalge klassifiziert [6]. Aufgrund ihrer Eigenschaften und regulatorischen Einordnung zählt sie zu den "Algen" im Sinne der Lebensmittelgesetzgebung.

Diese Klassifizierung ist für die regulatorische Bewertung und Marktpositionierung von entscheidender Bedeutung [6].

2.2 Rechtlicher Status als traditionelles Lebensmittel in der EU

Spirulina ist gemäß Artikel 3 der VO (EU) 2015/2283 kein neuartiges Lebensmittel, da der Verzehr vor dem 15. Mai 1997 in nennenswertem Umfang in der EU belegt ist [9]. Dieser Status basiert auf dem Nachweis einer etablierten Verzehrhistorie vor dem Stichtag und bietet erhebliche regulatorische Vorteile: Im Gegensatz zu Novel Foods, die aufwendige Zulassungsverfahren von mehreren Jahren Dauer und hohe Kosten verursachen können, ermöglicht dieser Status eine direkte Markteinführung von Spirulina-Produkten, sofern die allgemeinen Anforderungen der Lebensmittelsicherheitsverordnung (EG) Nr. 178/2002

bezüglich Sicherheit, Rückverfolgbarkeit und Kennzeichnung eingehalten werden [10].

2.3 Frische Algen vs. Getrocknete Algen - Rechtliche und technologische Unterschiede

Das Habitat-Konzept: Frische Algen als lebende Ökosysteme

Frische Mikroalgen sind fundamental anders als eine Mischung aus getrocknetem Algenpulver und Wasser. Sie repräsentieren komplexe, bioaktive Systeme, die aus Algenzellen und einem sie umgebenden Habitat bestehen. Dieses Habitat enthält eine Vielzahl bioaktiver Substanzen, die bei der Trocknung unwiederbringlich verloren gehen oder ihre Eigenschaften fundamental verändern.

Komponenten des Mikroalgen-Habitats:

Extrazelluläre Polymere Substanzen (EPS):

Extrazelluläre polymere Substanzen (EPS) sind hochkomplexe Biopolymere, die von Mikroalgen aktiv ausgeschieden werden und eine schützende Matrix um die Zellen bilden [18, 4]. Sie setzen sich primär aus Polysacchariden, Proteinen, Nukleinsäuren und Lipiden zusammen. EPS spielen eine zentrale Rolle für die technofunktionalen Eigenschaften frischer Mikroalgen in Lebensmitteln, insbesondere in Bezug auf Emulgierverhalten, Texturgebung, Bindefähigkeit sowie Feuchtigkeitsretention.

Phytohormone: Mikroalgen synthetisieren eine Vielzahl von Phytohormonen, darunter Auxine, Cytokinine, Gibberelline und Abscisinsäure [25]. Diese Substanzen regulieren nicht nur Wachstum und Differenzierung der Algenzellen, sondern sind auch Gegenstand wissenschaftlicher Forschung zu verschiedenen biochemischen Prozessen.

Symbiotische Mikroorganismen: Bei anderen bekannten und zugelassenen Mikroalgen wie z.B. Chlorella ist die Präsenz symbiotischer Bakterien ausschlaggebend für die Synthese und Verfügbarkeit von Vitamin B12 [14]. Diese Bakterien leben in enger Assoziation mit den Algenzellen und produzieren bioverfügbares Vitamin B12, das von Chlorella über spezifische Aufnahmesysteme aufgenommen wird. Studien zeigen, dass die B12-Konzentration in Chlorella-Zellen auf exogen produziertes B12 symbiotischer Mikroorganismen zurückzuführen ist [15].

Bioaktive Metaboliten: Das Habitat enthält eine Vielzahl sekundärer Metaboliten, die von den Algenzellen und symbiotischen Mikroorganismen produziert werden. Wissenschaftliche Studien zu isolierten Verbindungen dieser Art haben deren Potenzial in verschiedenen Forschungsbereichen untersucht, beispielsweise ihre Fähigkeit, in-vitro zur Stabilität von Lebensmitteln beizutragen, indem sie oxidative Prozesse verlangsamen.

Rechtliche Konsequenzen für die Deklaration

Diese rechtliche Unterscheidung schafft eine entscheidende Kausalkette, die das Rückgrat des kommerziellen Arguments pro Frischer Mikroalge bildet:

Rechtlicher Status → Deklaration
→ Nutri-Score → Marktvorteil
→ keine Zusatzstoffe → Marktvorteil
→ kurze Zutatenliste → Marktvorteil

FrISCHE Mikroalgen-Biomasse vs. Getrocknete Algen

Gemäß Verordnung (EG) Nr. 852/2004 über Lebensmittelhygiene, Artikel 2, Absatz 1, Buchstabe n, gelten als "unverarbeitete Erzeugnisse" solche Lebensmittel, die lediglich grundlegende physikalische Prozesse wie "Säubern", "Abtrennen", "Kühlen" oder "Gefrieren" durchlaufen haben. Im Gegensatz dazu wird "Verarbeitung" in derselben Verordnung als "jede Handlung, durch die ein Urprodukt wesentlich verändert wird" definiert, wobei "Trocknen" explizit als Beispiel für eine Verarbeitung genannt wird.

Waschen von Spirulina-Biomasse fällt unter den Begriff des "Säuberns". Techniken wie Filtration oder Zentrifugation zur Aufkonzentrierung der Algenmasse stellen eine zulässige Form der "Abtrennung" dar - konkret die Entfernung von Wasser und Kulturmedium - ohne dass das Produkt seinen Status als frische, unverarbeitete Mikroalge verliert.

Im Gegensatz dazu stehen rekonstituierte Trockenalgen (in Wasser wieder aufgelöste Algen), bei denen es sich

nicht mehr um frische Biomasse handelt. Diese Produkte entstehen durch die Rehydratation zuvor getrockneter Algen und müssen gemäß der Lebensmittelinformationsverordnung (EU) Nr. 1169/2011 als zwei separate Zutaten deklariert werden: "getrocknete Spirulina" und "Wasser".

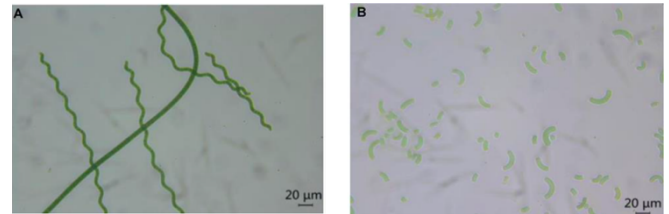


Abbildung 1: Lichtmikroskopische Aufnahme von *Limnospira* - frisch (A) und getrocknet (B) [3]

Praktische Auswirkungen auf die Nutri-Score-Berechnung

Für die Nutri-Score-Ermittlung ist nicht die Konzentration der frischen Spirulina-Biomasse ausschlaggebend, sondern ausschließlich ihr Gewichtsanteil am Endprodukt. Laut Nutri-Score-Leitlinie des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) [17] sowie einschlägigen Berechnungsbeispielen wird der Anteil an Zutaten wie Gemüse (V = Vegetable), Obst (F = Fruit), Hülsenfrüchten (L = Legumes), Nüssen (N = Nuts) oder Algen prozentual auf Basis des Gesamtgewichts des verzehrfertigen Produkts berechnet – unabhängig von der Konzentration dieser Zutat in ihrer verarbeiteten Form.

- Dieser Unterschied in der Deklaration hat direkte und signifikante Auswirkungen auf die Nutri-Score-Berechnung:
- Beim frischen Produkt trägt der gesamte Gewichtsanteil zur positiven F/V/L-Komponente bei
- Beim getrockneten Produkt zählt nur der wesentlich geringere Gewichtsanteil des Pulvers
- Dies schafft einen quantifizierbaren Marktvorteil für frische Spirulina bei Produktneuformulierungen

Technologische Unterschiede

Die technofunktionalen Eigenschaften unterscheiden sich erheblich zwischen frischen und rekonstituierten Algen. Frische Algen behalten ihre natürliche EPS-Matrix, die als natürlicher Emulgator und Stabilisator fungiert. Diese Eigenschaften gehen bei der Trocknung verloren und können nicht durch Rekonstitution wiederhergestellt werden, da hohe Temperaturen zu irreversiblen strukturellen Veränderungen und signifikanten konformationellen (räumlich, strukturellen) Änderungen in den Polymerketten führen [19, 20, 21, 43].

Eine Masterarbeit der Hochschule Neubrandenburg (Thomas, 2025) zeigt ebenso die spezifischen Unterschiede zwischen frischer und getrockneter Spirulina-Biomasse und dokumentiert, dass diese Unterschiede für die Lebensmittelindustrie von erheblicher Bedeutung sind [\[3\]](#).

3. EXTRAZELLULÄRE POLYMERE SUBSTANZEN UND BIOAKTIVE METABOLITEN

Kernaussagen dieses Kapitels:

- EPS-Matrix verleiht natürliche Emulgier-, Gel- und Verdickungseigenschaften
- Phytohormone & Sekundärmetaboliten bleiben in frischer Biomasse erhalten
- Trocknung zerstört EPS-Struktur – funktionelle Verluste sind nicht reversibel

3.1 Definition und Bedeutung von EPS in frischen Mikroalgen

Extrazelluläre polymere Substanzen (EPS) sind hochmolekulare Biopolymere, die von Mikroalgen aktiv in ihre Umgebung abgegeben werden. Sie bilden eine komplexe Matrix um die Zellen und spielen eine zentrale Rolle für die technofunktionalen Eigenschaften frischer Mikroalgen [18]. Die Zusammensetzung variiert je nach Algenart, Kultivierungsbedingungen und Umweltfaktoren und umfasst primär Polysaccharide sowie Proteine, Lipide und Nukleinsäuren [22, 4].

EPS kommen nur in frischen Mikroalgenkulturen in intakter Form vor. Trocknungsprozesse führen zu strukturellen Veränderungen, die durch Rekonstitution nicht rückgängig gemacht werden können [23, 43].

3.2 EPS-Produktion in verschiedenen Mikroalgen-Arten

Die Fähigkeit zur EPS-Produktion unterscheidet sich stark zwischen Mikroalgen-Arten und kann gezielt durch kultivierungsbedingte Faktoren wie Nährstoffstress oder Lichtintensität gesteuert werden [4]. *Spirulina* bildet dabei vorwiegend hochmolekulare Polysaccharide, die wesentlich zur Viskosität und Textur von Lebensmitteln beitragen [4, 24].

3.3 Bioaktive Eigenschaften der EPS-Matrix: Antimikrobielle und präbiotische Potenziale

Neben ihren technofunktionalen Vorteilen rückt die EPS-Matrix frischer Mikroalgen auch aufgrund ihrer bioaktiven Potenziale in den Fokus der Forschung. Insbesondere die enthaltenen sulfatierten Polysaccharide zeigen in wissenschaftlichen Untersuchungen vielversprechende Eigenschaften [80].

Antivirale und antibakterielle Aktivität: Laborstudien (*in vitro*) haben gezeigt, dass EPS aus verschiedenen Mikroalgen, darunter auch *Spirulina*, die Aktivität von behüllten Viren wie dem Herpes-Simplex-Virus (HSV) hemmen können [81]. Die Polysaccharide können dabei an die Virusoberfläche binden und so das Andocken an die Wirtszelle blockieren. Ähnliche Effekte wurden gegen einige pathogene Bakterien wie *Escherichia coli* und *Staphylococcus aureus* beobachtet, was auf ein Potenzial zur natürlichen Konservierung von Lebensmitteln hindeutet [80]. Die Forschung befindet sich hier überwiegend im In-vitro-Stadium; Studien am Menschen liegen noch nicht vor.

Präbiotische Wirkung und Einfluss auf das Darmmikrobiom: Die Polysaccharide der EPS-Matrix sind für den Menschen weitgehend unverdaulich und fungieren im Darm als Ballaststoffe mit präbiotischer Wirkung. Tierstudien deuten darauf hin, dass diese Substanzen das Wachstum nützlicher Darmbakterien wie *Lactobacillus* und *Bifidobacterium* selektiv fördern können [82]. Durch die Fermentation der Algen-Polysaccharide durch das Mikrobiom entstehen kurzkettige Fettsäuren (Short-Chain Fatty Acids, SCFAs) wie Butyrat, Propionat und Acetat. Diese SCFAs dienen als primäre Energiequelle für die Zellen der Darmschleimhaut, können zur Stärkung der Darmbarriere beitragen und sind Gegenstand intensiver Forschung bezüglich ihrer regulatorischen Rolle für das Immunsystem und den Stoffwechsel [83].

3.4 Technofunktionale Eigenschaften von EPS

EPS aus frischen Mikroalgen zeigen vielfältige technofunktionale Eigenschaften, die sie als natürliche Hilfsstoffe in der Lebensmittelverarbeitung attraktiv machen [4, 5]. Ihre funktionelle Wirkung als Verdickungsmittel, Gelbildner oder Emulgator [24, 5] ermöglicht die Reduktion oder den vollständigen Verzicht auf zugesetzte Zusatzstoffe – ein zentraler Hebel für Clean-Label-Strategien.

4. ERNÄHRUNGSPHYSIOLOGISCH RELEVANTE INHALTSSTOFFE UND NUTRI-SCORE-PARAMETER

Kernaussagen dieses Kapitels:

- Spirulina: 55-70% Protein, vollständiges Aminosäureprofil, reich an Vitaminen & Mineralstoffen
- Chlorella, Haematococcus, Dunaliella ergänzen Beta-Carotin, Astaxanthin u. a. Mikronährstoffe
- Frische Spirulina adressiert alle drei positiven Nutri-Score-Parameter (Protein, Ballaststoffe, Algen-Bonus)
- Trocknungsprozesse führen zu irreversibler Proteindenaturierung und Funktionsverlust
- Frische Spirulina zeigt überlegene Gelier-, Emulgier- und Wasserbindungseigenschaften
- Native Proteinstrukturen ermöglichen höhere Verdaulichkeit (85-90% vs. 75-82%)
- Technofunktionale Vorteile für Clean-Label-Formulierungen ohne Zusatzstoffe

4.1 Spirulina – Das Multitalent

Spirulina zeichnet sich durch ein außergewöhnliches Nährstoffprofil aus, das sie zu einer der nährstoffdichtesten Lebensmittelquellen macht.

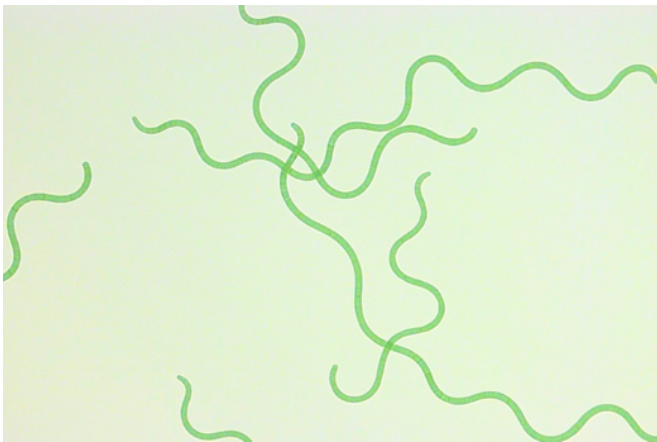


Abbildung 2: Spirulina (*Limnospira maxima*) [PUEVIT GmbH]

Proteine und Aminosäuren

Der Proteingehalt von Spirulina liegt zwischen 55 bis 70% der Trockensubstanz und übertrifft damit die meisten anderen natürlichen Proteinquellen deutlich [28]. Besonders bemerkenswert ist die hohe biologische Wertigkeit der Spirulina-Proteine, die alle essentiellen Aminosäuren in ausgewogenen Verhältnissen enthalten.

Die Aminosäurezusammensetzung zeigt hohe Gehalte an Leucin, Isoleucin, Valin (verzweigtkettige Aminosäuren), Lysin, Threonin, Phenylalanin, Methionin und Tryptophan.

Diese Vollständigkeit des Aminosäureprofils ist bei pflanzlichen Proteinquellen selten und macht Spirulina zu einer hochwertigen Proteinquelle für die menschliche Ernährung. Laut einer Masterarbeit der Hochschule Neubrandenburg [3] liegt die Proteinverdaulichkeit frischer Spirulina bei etwa 85-90%, was durch die intakte EPS-Matrix und höhere Zugänglichkeit für Verdauungsenzyme begünstigt wird [65, 66].

Lipide und Fettsäuren

Der Lipidgehalt von Spirulina beträgt typischerweise 4 bis 9% der Trockensubstanz. Besonders wertvoll ist die Zusammensetzung der Fettsäuren, die einen hohen Anteil an mehrfach ungesättigten Fettsäuren aufweist. Gamma-Linolensäure (GLA) ist eine mehrfach ungesättigte Fettsäure, die in der ernährungswissenschaftlichen Forschung aufgrund ihrer Rolle in Stoffwechselwegen von Interesse ist [29].

Kohlenhydrate und Ballaststoffe

Der Kohlenhydratgehalt von Spirulina liegt bei etwa 15 bis 25% der Trockensubstanz. Ein erheblicher Anteil davon besteht aus Ballaststoffen, die für die Nutri-Score-Berechnung besonders relevant sind. Die Zellwand von Spirulina enthält Peptidoglykane, eine Form von Ballaststoffen. Ballaststoffe sind in der allgemeinen Ernährungswissenschaft für ihre Rolle in der Verdauung bekannt. Bestimmte Ballstofftypen werden derzeit auf ihre Interaktion mit der Darmflora untersucht [30].

Vitamine

Spirulina ist eine reichhaltige Quelle verschiedener Vitamine, insbesondere der B-Vitamine sowie Vitamin E. Hohe Gehalte finden sich bei Vitamin B1 (Thiamin), B2 (Riboflavin), B3 (Niacin), B6 (Pyridoxin) und Folsäure. Besonders bemerkenswert sind die hohen Gehalte an Vitamin K und Beta-Carotin (Provitamin A). Phycocyanin

verleiht Spirulina ihre charakteristische grün-bläuliche Farbe.

Mineralstoffe und Spurenelemente

Spirulina enthält bedeutende Mengen an Mineralstoffen und Spurenelementen. Besonders hervorzuheben sind Eisen, Kalzium, Magnesium, Kalium, Zink und Selen.

Tabelle 1: Mineralstoffgehalt von getrockneter Spirulina (Beispielwerte aus der wissenschaftlichen Literatur)

Eisen	28,5 – 175,3	USDA [79]; Suliburska et al. (2016) [31]; Moradi et al. (2023) [32]
Kalzium	120 – 583,3	USDA [79]; Suliburska et al. (2016) [31]
Magnesium	195 – 746,7	USDA [79]; Suliburska et al. (2016) [31]
Kalium	1363	USDA [79]
Zink	2 – 4	USDA [79]
Selen	0,0074	USDA [79]

Anmerkung: Die Werte zeigen die natürliche Schwankungsbreite je nach Kultivierungsbedingungen und Analysemethoden

Studien haben gezeigt, dass das Eisen in Spirulina eine hohe Bioverfügbarkeit aufweist. Die Eisenabsorption aus Spirulina beträgt bis zu 27% – vergleichbar mit Häm-Eisen aus tierischen Quellen. Wenn die Verfügbarkeit pro Mikrogramm Eisen ausgedrückt wird, ist sie 6,5-mal höher als aus Fleisch [67, 68]. Zudem verbesserten sich Anämieparameter wie das mittlere Blutkörperchenvolumen und der Hämatokrit-Wert. Diese Ergebnisse unterstreichen die Eignung von Spirulina als effektive und gut verträgliche Eisenquelle, insbesondere für Personen mit erhöhtem Eisenbedarf oder für diejenigen, die auf tierische Produkte verzichten [69].

Der Ballaststoffgehalt ist ebenfalls hoch, wobei die unverdauliche Zellwand einen erheblichen Anteil ausmacht. Besonders bemerkenswert bei Chlorella ist der hohe Gehalt an Chlorophyll, der etwa 2 bis 3% der Trockensubstanz ausmacht. Darüber hinaus liefert Chlorella nennenswerte Mengen an Vitaminen und Mineralstoffen, darunter Eisen (bis zu 130 mg/100 g), Kalzium (bis 260 mg/100 g), Magnesium (bis 315 mg/100 g) und Kalium (bis 1200 mg/100 g). Die Alge enthält außerdem essentielle Fettsäuren, insbesondere Omega-3- (α -Linolensäure) und Omega-6-Fettsäuren (Linolensäure), sowie alle essentiellen Aminosäuren und teilweise hohe Anteile an Vitamin B12 [33].

4.2 Beispiele weiterer Mikroalgen-Arten

Neben Spirulina bieten weitere Mikroalgen-Arten interessante Nährstoffprofile für die Lebensmittelindustrie. Chlorella vulgaris, Haematococcus pluvialis und Dunaliella salina sind weitere Beispiele für kommerziell wichtige und etablierte Arten.

Chlorella vulgaris – Der Vitaminspeicher

Chlorella zeichnet sich durch einen hohen Proteingehalt aus, der bis zu 65% der Trockensubstanz erreichen kann.

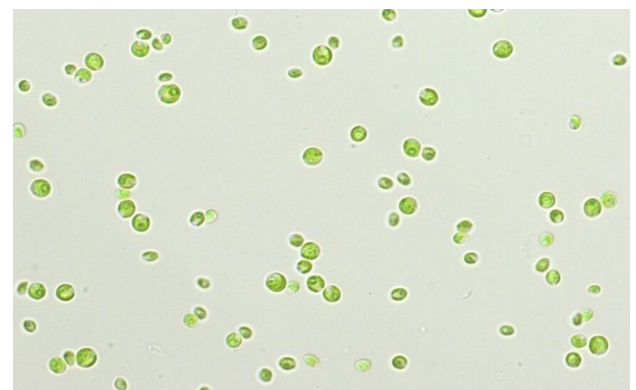


Abbildung 3: Chlorella vulgaris [F. Krujatz]

Haematococcus pluvialis – Der Astaxanthin Champion

Haematococcus pluvialis ist die reichste natürliche Quelle für Astaxanthin, ein Carotinoid aus der Gruppe der Xanthophylle [34]. Der Astaxanthin-Gehalt kann bis zu 4% der Trockensubstanz erreichen und verleiht der Alge ihre charakteristische rote Farbe [35]. Astaxanthin wird in der Lebensmittelindustrie als natürlicher Farbstoff und aufgrund seiner starken Farbgebung geschätzt. Neben Astaxanthin enthält *Haematococcus pluvialis* weitere Carotinoide wie Beta-Carotin, Lutein und Zeaxanthin, Proteine (30-40% der Trockensubstanz), Polysaccharide und geringe Mengen an Vitaminen (z. B. Vitamin C und E) sowie Mineralstoffen (Kalzium, Magnesium, Eisen) [34, 35, 36].

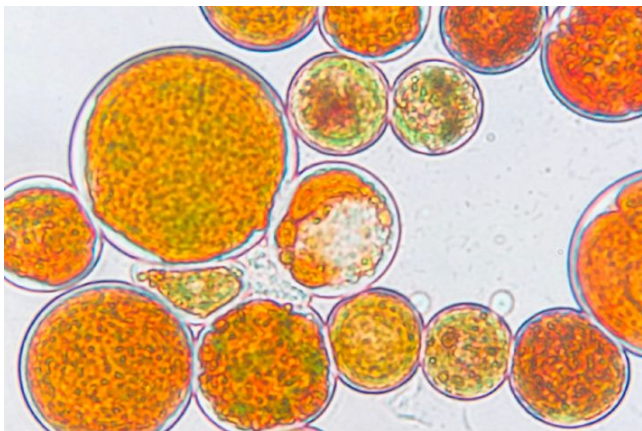


Abbildung 4: *Haematococcus pluvialis* [F. Krujatz]

Dunaliella salina – Die Beta Carotin Produzentin

Dunaliella salina ist eine halotolerante (salztolerant; wächst in hoher Salzkonzentration) Mikroalge und die wichtigste natürliche Quelle für β -Carotin, das bis zu 10% der Trockensubstanz ausmachen kann [37]. Dieses β -Carotin liegt überwiegend in den Isomeren all-trans und 9-cis vor und verleiht der Alge ihre orange-rote Farbe [38]. Neben β -Carotin enthält *D. salina* zwischen 22% und 39% Protein, etwa 27% Kohlenhydrate und bis zu 18% Lipide mit einem hohen Anteil an ungesättigten Fettsäuren [39]. Die Alge liefert zudem Mineralstoffe wie Kalzium, Magnesium und Eisen sowie Vitamine wie Vitamin C [40].

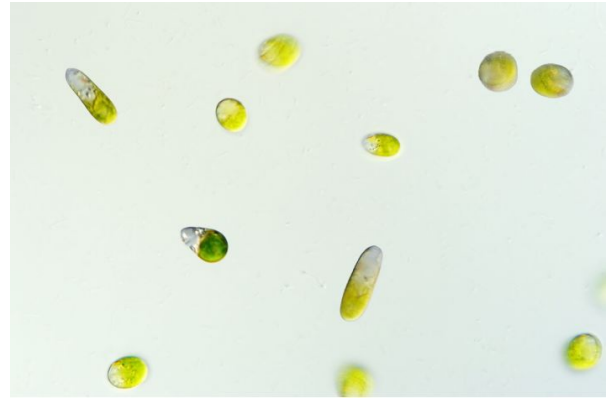


Abbildung 5: *Dunaliella salina* [J. Lukavský]

Nannochloropsis – Die reine EPA-Quelle

Die marine Mikroalgenart *Nannochloropsis* ist eine hocheffiziente Produzentin der mehrfach ungesättigten Omega-3-Fettsäure Eicosapentaensäure (EPA). Ihr entscheidendes Alleinstellungsmerkmal ist die Synthese von nahezu ausschließlich EPA, während sie von Natur aus frei von Docosahexaensäure (DHA) ist. Der EPA-Gehalt kann bis zu 5 % des Trockengewichts ausmachen. Neben ihrem einzigartigen Fettsäureprofil bietet *Nannochloropsis* ein breites Nährstoffspektrum: Der Proteingehalt liegt je nach Kultivierungsbedingungen zwischen 28 % und über 50 % der Trockenmasse, und sie ist reich an wertvollen Pigmenten wie verschiedenen Carotinoiden.

Der entscheidende Vorteil von *Nannochloropsis* liegt in der phototrophen Kultivierung in geschlossenen Photobioreaktoren. Als Primärproduzenten von Omega-3-Fettsäuren in der marinen Nahrungskette ermöglicht die direkte Gewinnung aus der Alge eine Produktion von höchster Reinheit. Im Gegensatz zu Fischöl, das durch Schwermetalle oder PCBs belastet sein kann, schließt die kontrollierte Kultivierung das Risiko von Umweltkontaminationen systembedingt aus. Dieser Ansatz ist zudem fundamental nachhaltiger, da er die globalen Fischbestände schont, nicht mit Agrarflächen konkurriert und aktiv CO₂ bindet.

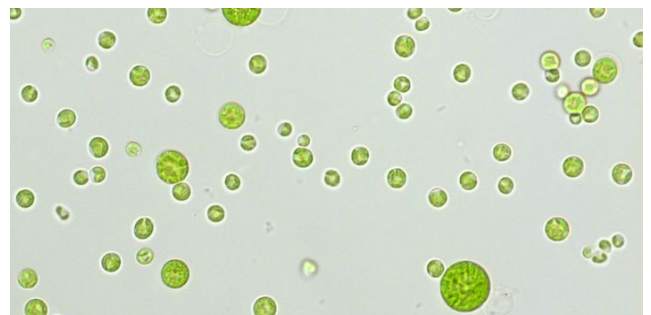


Abbildung 6: *Nannochloropsis* [M. Schubert]

4.3 Nutri-Score-Relevanz der Mikroalgen-Inhaltsstoffe

Nutri-Score-Strategie für die Lebensmittelherstellung

Die gezielte Integration von Mikroalgen – insbesondere frischer Spirulina – bietet Lebensmittelherstellern eine wirkungsvolle Möglichkeit zur systematischen Verbesserung des Nutri-Scores. Der hohe Proteingehalt (55 bis 70% bezogen auf die Trockensubstanz), der nennenswerte Anteil an Ballaststoffen sowie der spezifische Algen-Bonus im Nutri-Score-Algorithmus leisten einen signifikanten Beitrag zur positiven Gesamtbewertung. Gleichzeitig wirken Mikroalgen kompensierend gegenüber negativen Bewertungsfaktoren, da sie von Natur aus sehr geringe Mengen an gesättigten Fettsäuren, Zucker und Natrium enthalten.

Der Nutri-Score berücksichtigt insgesamt acht Bewertungsdimensionen:

- Negative Faktoren: Energiedichte, gesättigte Fettsäuren, Gesamtzuckergehalt, Natrium
- Positive Faktoren: Ballaststoffgehalt, Proteingehalt, Anteil an Obst, Gemüse, Hülsenfrüchten, Nüssen und Algen (F/V/N/A-Komponente)

Frische Spirulina kann alle drei positiven Parameter gleichzeitig adressieren und damit eine besonders effiziente Nutri-Score-Optimierung ermöglichen [41].

Beitrag von Mikroalgen zur Nutri-Score-Verbesserung

Diese Eigenschaften helfen dabei, die negativen Parameter des Nutri-Score-Systems gezielt zu reduzieren und damit eine vorteilhafte Gesamtbewertung zu erreichen [42].

4.4 Vergleichende Analyse: Frische vs. getrocknete Spirulina-Biomasse

Die Unterschiede zwischen frischer und getrockneter Spirulina-Biomasse sind für die Lebensmittelindustrie von erheblicher Bedeutung [3, 43].

Strukturelle Unterschiede

Frache Spirulina zeichnet sich durch eine intakte Zellstruktur und eine funktionelle Matrix aus extrazellulären polymeren Substanzen (EPS) aus. Diese mikrostrukturelle Integrität ist entscheidend für die

technofunktionalen Eigenschaften wie Textur, Wasserbindung und Emulgierverhalten. Während des Trocknungsprozesses – insbesondere bei thermischer Behandlung – kommt es zur Denaturierung von Proteinen und zur Zerstörung empfindlicher EPS- und Zellstrukturen. Dadurch gehen typischerweise wesentliche bioaktive Komponenten sowie funktionelle Eigenschaften der Algen irreversibel verloren [43].



Abbildung 7: Frische Spirulina von ALGENWERK - rein, unverarbeitet, vital [PUEVIT GmbH]

Bioaktivität und Nährstoffverfügbarkeit

Frache Spirulina weist im Vergleich zu getrockneten Produkten eine deutlich höhere Stabilität hitzeempfindlicher Inhaltsstoffe auf. Dazu zählen insbesondere Vitamine, Enzyme und andere empfindliche Verbindungen, deren Stabilität bei thermischen Trocknungsverfahren beeinträchtigt wird [44]. Die intakte Zellmatrix sowie die natürliche Interaktion mit extrazellulären polymeren Substanzen (EPS) fördern darüber hinaus die Bioverfügbarkeit relevanter Nährstoffe – ein Aspekt mit hoher Relevanz für die Entwicklung funktioneller Lebensmittel [45].

Eine vergleichende Analyse [84] quantifiziert diese Unterschiede deutlich. Frache Spirulina enthielt 60% mehr Phycocyanin und 50% mehr Carotinoide als kommerziell getrocknete Proben. Besonders drastisch war der Unterschied beim hitzeempfindlichen Vitamin E, dessen Gehalt in der frischen Biomasse um eine Größenordnung höher lag (87% höher als in getrockneten Produkten). Die Studie zeigt zudem, dass bereits der schonende Prozess der Gefriertrocknung zu einem Verlust von 29% des Phycocyanins führen kann, was die Sensibilität dieser wertvollen Verbindungen gegenüber jeglicher Art von Verarbeitung unterstreicht.

Sensorische Eigenschaften

Frache Spirulina weist ein deutlich milderes sensorisches Profil auf als getrocknete Produkte. Der typische "algige" Eigengeschmack ist kaum ausgeprägt, was zu einer

höheren sensorischen Akzeptanz bei Verbraucher:innen führt, wie in der Konsumstudie einer Masterarbeit der Hochschule Neubrandenburg gezeigt wurde [3]. Für Produktentwicklungen ist dieser Aspekt, dass frische Spirulina den Geschmack des Endproduktes eigentlich nicht beeinflusst von wesentlicher Bedeutung. Die Studie von Vasquez Guevara et al. (2025) [84] bestätigt dies durch detaillierte sensorische Profile: Frische Biomasse wurde als milder und angenehmer in Aroma und Textur beschrieben. Im Gegensatz dazu wies rehydrierte getrocknete Spirulina signifikant intensivere aligee, bittere und Umami-Geschmacksnoten sowie einen stärkeren Nachgeschmack auf, welche die Akzeptanz der Konsumierenden oft limitieren. In einem paarweisen Vergleichstest, bei dem Proben mit identischem Trockenmassegehalt verkostet wurden, konnten $\geq 79\%$ der Teilnehmenden einen Unterschied feststellen und bevorzugten mit überwältigender Mehrheit die frische Variante.

4.5 Protein-Qualität und technofunktionale Eigenschaften – Frische vs. getrocknete Spirulina

Proteindenaturierung durch Trocknungsprozesse

Proteine in Mikroalgen liegen in ihrer nativen Konformation in komplexen dreidimensionalen Strukturen vor, die für ihre biologische Aktivität und technofunktionalen Eigenschaften entscheidend sind. Trocknungsprozesse – insbesondere thermische Verfahren – führen zu irreversiblen strukturellen Veränderungen dieser Proteine [85, 86].

Auswirkungen verschiedener Trocknungsverfahren:

Sprühtrocknung (150-200°C):

Die am weitesten verbreitete industrielle Trocknungsmethode für Spirulina führt aufgrund der hohen Temperaturen zu den stärksten Proteindenaturierungen. Studien zeigen, dass bei Sprühtrocknung zwischen 15-30% des ursprünglichen Proteingehalts durch thermische Degradation verloren gehen [90, 91]. Die Sekundär- und Tertiärstrukturen der Proteine werden dabei irreversibel zerstört, was zu einem vollständigen Verlust der nativen Funktionalität führt [92].

Gefriertrocknung (Lyophilisation, -40 bis -80°C):

Dieses schonendere Verfahren minimiert thermische Schäden, führt jedoch durch Eiskristallbildung zu mechanischen Zellschädigungen und partiellen Strukturveränderungen der Proteine [93]. Der

Proteinverlust liegt bei 5-15%, wobei insbesondere die quartären Proteinstrukturen und Protein-Protein-Interaktionen beeinträchtigt werden [84, 94]. Die technofunktionalen Eigenschaften werden deutlich reduziert, auch wenn die Nährstoffverluste geringer sind als bei thermischer Trocknung.

Ofentrocknung (50-70°C):

Diese langsame Trocknungsmethode führt zu Proteinverlusten von 20-35% durch die verlängerte Hitzeeinwirkung [90]. Die längere Expositionszeit bei moderaten Temperaturen begünstigt oxidative Prozesse und Maillard-Reaktionen, die die Proteinqualität zusätzlich beeinträchtigen [95].

Molekulare Mechanismen der Denaturierung:

Bei allen Trocknungsverfahren kommt es zu einem Verlust der hydratisierten Proteinstruktur. Die Entfernung des gebundenen Wassers führt zur Exposition hydrophober Aminosäurereste, die normalerweise im Proteininneren verborgen sind. Dies resultiert in Proteinaggregation, dem Verlust der nativen Faltung und der irreversiblen Bildung neuer, nicht-funktionaler Proteinstrukturen [86, 96]. Diese strukturellen Veränderungen können durch Rehydratation nicht rückgängig gemacht werden.

Technofunktionale Eigenschaften nativer Spirulina-Proteine

Frische Spirulina-Biomasse enthält Proteine in ihrer nativen, funktionell aktiven Form. Diese strukturelle Integrität ist die Grundlage für überlegene technofunktionale Eigenschaften, die für moderne Lebensmittelformulierungen von entscheidender Bedeutung sind.

Gelbildungseigenschaften:

Native Spirulina-Proteine, insbesondere die Phycobiliproteine (Phycocyanin, Allophycocyanin) und strukturelle Zellwandproteine, besitzen ausgeprägte Gelbildungseigenschaften [87, 97]. In frischer Biomasse können diese Proteine bei pH-Wert- oder Temperaturveränderungen ein dreidimensionales Netzwerk ausbilden, das Wasser einschließt und stabile Gele formt [88].

Vergleichende Studien zeigen, dass frische Spirulina-Proteine bei einer Konzentration von 8-10% stabile Gele mit einer Festigkeit von 180-220 g (gemessen mit Texturanalysator) bilden können [98]. Im Gegensatz dazu zeigen rekonstituierte getrocknete Spirulina-Proteine bei gleicher Konzentration nur eine Gelfestigkeit von 45-70 g – ein Verlust von 65-75% der ursprünglichen Gelbildungskapazität [87, 99].

Diese Geleigenschaften sind besonders wertvoll für Anwendungen in:

- Pflanzlichen Joghurt-Alternativen (Texturgebung ohne Zusatzstoffe)
- Desserts und Puddings (natürliche Gelbildung)
- Fleischersatzprodukten (strukturelle Integrität)

Wasserbindungskapazität (WHC):

Die Wasserbindungskapazität ist ein kritischer Parameter für die Textur, Saftigkeit und Haltbarkeit von Lebensmitteln. Native Spirulina-Proteine in frischer Biomasse zeigen eine Wasserbindungskapazität von 4,5-6,8 g Wasser pro g Protein [100, 101]. Diese hohe WHC resultiert aus der hydrophilen Oberflächenstruktur nativer Proteine und den intakten polaren Aminosäureresten, die Wassermoleküle binden können.

Nach Sprühtrocknung reduziert sich die WHC auf 1,8-2,5 g/g – ein Verlust von 55-65% [100, 102]. Selbst nach Gefriertrocknung liegt die WHC nur bei 2,8-3,5 g/g [101]. Diese drastische Reduktion ist auf die Proteindenaturierung und die resultierende Exposition hydrophober Bereiche zurückzuführen, die Wasser abstoßen statt zu binden.

Praktische Bedeutung für die Lebensmittelindustrie:

- Reduzierung von Synärese (Wasserabscheidung) in Proteinprodukten
- Verbesserte Saftigkeit in Backwaren und Fleischersatzprodukten
- Erhöhte Haltbarkeit durch Feuchtigkeitsretention

Emulgierereigenschaften:

Proteine fungieren als natürliche Emulgatoren, indem sie sich an der Grenzfläche zwischen Öl und Wasser anlagern und die Oberflächenspannung reduzieren. Native Spirulina-Proteine besitzen sowohl hydrophobe als auch hydrophile Domänen in ihrer korrekten räumlichen Anordnung, was sie zu effektiven Emulgatoren macht [103, 104].

Frische Spirulina zeigt eine Emulsionskapazität von 180-250 m²/g Protein und eine Emulsionsstabilität von über 85% nach 24 Stunden [103, 105]. Getrocknete Spirulina-Proteine erreichen nur 65-95 m²/g bei einer Stabilität von 45-60% [104, 106]. Die denaturierten Proteine können sich nicht mehr effektiv an der Öl-Wasser-Grenzfläche ausrichten, was zu instabilen Emulsionen führt.

Anwendungen:

- Dressings und Saucen (Ersatz von E471, Mono- und Diglyceride)
- Pflanzliche Getränke (natürliche Stabilisierung)
- Aufstriche und Dips (cremige Textur ohne Zusatzstoffe)

Schaumbildungseigenschaften:

Native Proteine können durch Entfaltung an Luft-Wasser-Grenzflächen stabile Schäume bilden. Frische Spirulina-Proteine zeigen eine Schaumkapazität von 120-165% und eine Schaumstabilität von 75-85% nach 30 Minuten [107, 108]. Diese Eigenschaften sind für Anwendungen in Mousses, Schaumgetränken und luftigen Desserts relevant.

Ernährungsphysiologische Überlegenheit: Verdaulichkeit und Bioverfügbarkeit

Die strukturelle Integrität nativer Proteine hat direkte Auswirkungen auf ihre ernährungsphysiologische Qualität. Mehrere Faktoren tragen zur überlegenen Proteinverdaulichkeit frischer Spirulina bei.

Proteinverdaulichkeit:

Die wahre Proteinverdaulichkeit frischer Spirulina liegt bei 85-90%, während getrocknete Produkte nur 75-82% erreichen [65, 66, 89]. Eine Studie mit ¹⁵N-markierter Spirulina zeigte, dass frische Biomasse eine signifikant höhere ileal verdauliche Proteinfraktion aufweist als sprühgetrocknete Proben [65].

Mechanismen der verbesserten Verdaulichkeit:

1. **Intakte Zellstruktur:** In frischer Spirulina ist die dünne Peptidoglykan-Zellwand teilweise hydratisiert und für Verdauungsenzyme besser zugänglich. Bei der Trocknung kollabiert diese Struktur und bildet resistente Aggregate [109, 110].
2. **Native Proteinkonformation:** Verdauungsenzyme (Pepsin, Trypsin, Chymotrypsin) erkennen und spalten bevorzugt native Proteinstrukturen an spezifischen Peptidsequenzen. Denaturierte Proteine präsentieren diese Spaltstellen in veränderter Konformation, was die enzymatische Hydrolyse erschwert [111, 112].
3. **EPS-Matrix-Effekt:** Die extrazelluläre polymere Matrix in frischer Spirulina fördert die Dispersion der Algenzellen im Verdauungstrakt und erhöht die Kontaktfläche für Enzyme. Getrocknete Spirulina neigt zur Agglomeration, was die enzymatische Zugänglichkeit reduziert [66, 113].

Aminosäurenverfügbarkeit:

Trocknungsprozesse, insbesondere bei hohen Temperaturen, können zu Aminosäureverlusten führen. Hitzelabile Aminosäuren wie Lysin, Cystein und Methionin sind besonders betroffen [95, 114]. Maillard-Reaktionen zwischen reduzierenden Zuckern und freien Aminogruppen (vor allem Lysin) führen zu einer Reduktion der verfügbaren Aminosäuren um 10-25% bei Sprühtrocknung [115, 116]. Frische Spirulina bewahrt das vollständige Aminosäureprofil ohne Verluste durch thermische Degradation oder chemische Modifikation.

Praktische Implikationen für Lebensmittelformulierungen

Die überlegenen Proteineigenschaften frischer Spirulina eröffnen neue Möglichkeiten für die Lebensmittelindustrie:

Clean-Label-Proteinprodukte: Die nativen Funktionalitäten ermöglichen den Verzicht auf zugesetzte Verdickungsmittel, Stabilisatoren und Emulgatoren. Ein pflanzlicher Proteindrink mit 5% frischer Spirulina (0,5% TS) benötigt keine zusätzlichen Stabilisatoren, während vergleichbare Formulierungen mit getrockneter Spirulina Xanthan (E415) oder Guarkernmehl (E412) zur Stabilisierung erfordern [117, 118].

Proteinanreicherung mit funktionellem Mehrwert: Während getrocknete Spirulina hauptsächlich als Proteinquelle dient, fungiert frische Biomasse gleichzeitig als Texturmodifikator und natürlicher Stabilisator. Diese Mehrfachfunktionalität reduziert die Anzahl benötigter Zutaten und vereinfacht Zutatenlisten [119].

Synergistische Effekte mit anderen Proteinen: Native Spirulina-Proteine können synergistische Interaktionen mit anderen pflanzlichen Proteinen (Erbse, Soja, Reis) eingehen und so die Gesamttextur und Funktionalität von Proteinblends verbessern [120, 121]. Diese Synergien sind mit denaturierten Proteinen nicht erreichbar.

Kosteneffizienz und Prozessvorteile

Die höhere Funktionalität frischer Spirulina-Proteine führt zu quantifizierbaren wirtschaftlichen Vorteilen:

- **Reduktion der Zutatenliste:** Einsparung von 2-4 Zusatzstoffen pro Formulierung
- **Höhere Proteineffizienz:** Geringere benötigte Konzentration für gleiche funktionelle Effekte
- **Prozessvereinfachung:** Direktintegration ohne Rehydratations- oder Homogenisierungsschritte
- **Premium-Positionierung:** Höhere Margen durch Clean-Label und Superior Nutrition Claims

Fazit

Die Proteinqualität frischer Spirulina ist der von getrockneten Produkten in allen relevanten Parametern überlegen: strukturelle Integrität, technofunktionale Eigenschaften, Verdaulichkeit und Bioverfügbarkeit. Für die Lebensmittelindustrie bedeutet dies nicht nur einen ernährungsphysiologischen, sondern auch einen signifikanten technologischen und wirtschaftlichen Mehrwert. Frische Spirulina ermöglicht die Entwicklung von Clean-Label-Proteinprodukten mit überlegener Funktionalität – ohne Kompromisse bei Textur, Stabilität oder Geschmack.

5. VITAMIN B12 IN SPIRULINA - WISSENSCHAFTLICHER STAND UND NEUE ERKENNTNISSE

Kernaussagen dieses Kapitels:

- Spirulina enthält überwiegend Pseudovitamin B12 – nicht bioverfügbar, Forschungen zur Anpassung über Kultivierungsparameter laufen
- Kontrollierte Kultivierung & symbiotische Bakterien als Ansatz zur Cobalamin-Forschung
- Chlorella liefert bioaktives B12 und kann Spirulina in Mischungen ergänzen

WICHTIGER DISCLAIMER: Spirulina darf derzeit NICHT als Vitamin-B12-Quelle beworben werden!

5.1 Der wissenschaftliche Konsens: Pseudovitamin B12-Problematik

Die Vitamin-B12-Thematik zählt zu den kontroversesten Aspekten in der Spirulina-Forschung. Der derzeitige wissenschaftliche Konsens besagt, dass *Arthrospira platensis* (Spirulina) hauptsächlich sogenannte Vitamin-B12-Analoga – auch als Pseudovitamin B12 bezeichnet – enthält, die strukturell dem bioaktiven Cobalamin ähneln, jedoch nicht vom menschlichen Organismus verwertet werden können [12].

Diese Analoga besitzen zwar eine ähnliche chemische Grundstruktur wie Cobalamin, können jedoch die essenziellen physiologischen Funktionen – etwa in der DNA-Synthese oder der Blutbildung – nicht übernehmen [46]. Für die menschliche Ernährung gelten sie nach heutiger Meinung als nicht bioverfügbar.

Lichtgesteuerte Kultivierung: Die Variation von Lichtintensität und -qualität (z. B. LED-basierte Belichtung) wird ebenfalls als möglicher Steuerfaktor der Mikronährstoffsynthese untersucht, wobei verschiedene B12-Varianten in Cyanobakterien und eukaryotischen Algen unterschiedlich reguliert werden [13].

Ob diese Verfahren zuverlässig zu bioverfügbarem Vitamin B12 in Spirulina führen, ist Gegenstand laufender Studien. Derzeit fehlt eine wissenschaftlich und regulatorisch abgesicherte Grundlage für entsprechende Health Claims. ALGENWERK unterstützt in Kooperation mit Hochschulen die Grundlagenforschung in diesem Bereich, um das wissenschaftliche Verständnis der komplexen symbiotischen Zusammenhänge zu vertiefen.

5.2 Neue wissenschaftliche Ansätze: Kontrollierte Kultivierung

Aktuelle Forschungsansätze verfolgen die Hypothese, dass die Vitamin-B12-Verfügbarkeit in Spirulina-Kulturen gezielt beeinflusst werden kann. Zwei zentrale Forschungsrichtungen sind dabei von Bedeutung:

Integration symbiotischer Mikroorganismen: Einige Studien zeigen, dass bestimmte Bakterien innerhalb von Spirulina-Kulturen bioverfügbares Vitamin B12 synthetisieren können. Diese Bakterien leben in enger Assoziation mit den Algenzellen und könnten gezielt kultiviert werden [14].

6. SUBSTITUTION VON LEBENSMITTELZUSATZSTOFFEN

Kernaussagen dieses Kapitels:

- Mikroalgen-Pigmente ersetzen künstliche Farben
- EPS substituieren Emulgatoren/Stabilisatoren
- Clean-Label-Produkte erzielen höhere Kundengunst und Margen

6.1 Clean Label Strategie durch Mikroalgen

Der Ersatz von Lebensmittelzusatzstoffen durch funktionelle Inhaltsstoffe aus Mikroalgen stellt einen zentralen Hebel zur Umsetzung moderner Clean-Label-Strategien dar [47]. Dies betrifft eine Vielzahl gängiger E-Nummern, darunter Farbstoffe wie E131 (Patentblau V), Emulgatoren (z. B. E471), Stabilisatoren (z. B. Xanthan E415, Carrageen E407) sowie Antioxidantien (z. B. E300). Diese Substanzen lassen sich durch die natürlichen technologischen Eigenschaften spezifischer Mikroalgenkomponenten gezielt substituieren [48]. Die EPS-Matrix frischer Mikroalgen bildet dabei die wissenschaftliche Grundlage für diese technofunktionalen Vorteile.

6.2 Farbstoffe - Natürliche Alternativen

Mikroalgen sind eine vielseitige Quelle natürlicher Pigmente mit hoher Farbintensität und technologischer Stabilität, wie z.B.:

- **Phycocyanin:** ein wasserlöslicher, blauer Farbstoff aus Spirulina, der synthetische Blautöne wie E131 ersetzen kann [49].
- **Beta-Carotin:** gewonnen aus Dunaliella salina, eignet sich als natürliche gelb-orange Farbalternative [39].
- **Astaxanthin:** aus Haematococcus pluvialis, erzeugt intensive Rot- bis Pinktöne und bietet zugleich starke Farbstabilität [35].

6.3 Emulgatoren und Stabilisatoren

Die EPS aus frischen Mikroalgen besitzen eine amphiphile Molekülstruktur mit hydrophilen Polysaccharidketten und hydrophoben Seitenketten. Diese ermöglichen eine Reduktion der Grenzflächenspannung zwischen Öl- und Wasserphasen und fördern die Stabilisierung von

Emulsionen [5, 24]. Dadurch lassen sich Emulgatoren wie Mono- und Diglyceride von Speisefettsäuren (E471) in Produkten wie Dressings, Feinkostsaucen und Backwaren gezielt ersetzen.

6.4 Antioxidantien und Konservierungsstoffe

Mikroalgen liefern ein breites Spektrum natürlicher Verbindungen mit konservierenden Eigenschaften:

- Carotinoide wie Beta-Carotin und Astaxanthin tragen zur Stabilität von Lebensmitteln bei, indem sie oxidative Prozesse verlangsamen [59, 64].
- Tocopherole (Vitamin E) sind in verschiedenen Mikroalgenarten enthalten und wirken synergistisch mit anderen Verbindungen und tragen zur Haltbarkeitsverlängerung fetthaltiger Lebensmittel bei.

6.5 Clean-Label-Marktvorteile

Die strategische Substitution zugesetzter Stoffe durch Mikroalgen-Inhaltsstoffe unterstützt nicht nur die ernährungsphysiologische Qualität, sondern bietet auch klare B2B-Vorteile:

- **Kosteneffizienz:** Ersetzen mehrerer Zusatzstoffe durch eine Zutat
- **Resilienz der Lieferkette:** Lokale Produktion möglich
- **Marketingvorteile:** Clean Label und Nutri-Score-Verbesserung

Produkte mit verständlicher, kurzer Zutatenliste ("Clean Label") treffen auf eine steigende Nachfrage in der Kundschaft und erlauben in vielen Märkten eine höhere Preispositionierung [47]. Dies stärkt die Differenzierung im Wettbewerbsumfeld und erhöht die Absatzchancen im wachstumsstarken Segment der Clean-Label-Produkte.

7. NUTRI-SCORE-OPTIMIERUNG DURCH FRISCHE MIKROALGEN

Kernaussagen dieses Kapitels:

- Frische Spirulina kann zu drastischen Verbesserungen des Nutri-Scores führen
- Gleichzeitige Reduktion von Zucker und Kalorien, Erhöhung von Protein & Ballaststoffen
- Synergetische Effekte mit Obst-Matrix optimieren die Produkteigenschaften

7.1 Vollständige Nutri-Score-Parameter aus Mikroalgen

Die Klassifizierung von Algen als positiver Parameter im Nutri-Score ist offiziell durch die zuständige französische Behörde Santé publique France geregelt. In den offiziellen Anwendungsdokumenten zum Nutri-Score-Algorithmus werden Algen ("Seaweeds and algae") explizit als Teil der Komponente "Früchte, Gemüse, Hülsenfrüchte & Nüsse" (F/V/N/A) aufgeführt und tragen somit zur Verbesserung des Scores bei [55].

Gemäß der EU-Verordnung 1169/2011 und der französischen Verordnung von 2017 legt die Behörde Santé publique France die offiziellen Produktkategorien fest und ordnet dabei Meeresalgen (Kategorie 8.55 "Seaweeds") eindeutig und verbindlich der Gemüse-Sektion zu.

Der Nutri-Score bewertet Lebensmittel anhand eines Punktesystems, das fünf negative und drei positive Nährstoffkomponenten berücksichtigt.

Für den "günstigen" P-Block des Nutri-Scores gelten heute zwei verschieden breite Rohstoffgruppen:

- Im Getränke-Algorithmus 2023 umfasst der Bonus nur F/V/L = Fruits, Vegetables, Legumes; Nüsse sowie Raps-, Walnuss- und Olivenöl bleiben hier ausdrücklich außen vor, um stark verdünnte oder ölhaltige Drinks nicht künstlich aufzuwerten (siehe Tab. 4 des offiziellen Beverage-Updates 2023) [55].
- Im allgemeinen Lebensmittel-Algorithmus 2022 (und in den FAQ 2024) heißt die Gruppe weiterhin F/V/N/A = Fruits, Vegetables, Legumes, Nuts and rapeseed, walnut & olive Oils; hier profitieren also auch Nuss-, Samen- oder Pesto-Produkte von zusätzlichen Pluspunkten (Tab. 2 & 4 der aktuellen FAQ) [56].

Die beiden Kürzel sind somit nicht synonym: Sie spiegeln bewusst unterschiedliche Bonus-Logiken wider – eine

"schmalere" für Getränke und eine "breitere" für feste Lebensmittel. Diese spezifische, nuancierte Regel aus den offiziellen Richtlinien zu kennen, schafft Vertrauen und positioniert den Anbieter als Experten für komplexe Formulierungsherausforderungen.

[Drink-Format-Hinweis: Im Getränke-Algorithmus kann ausschließlich Wasser A erreichen; alle anderen Getränke sind maximal B – unabhängig davon, ob eine rechnerische A-Konstellation vorliegt.]

Frische Mikroalgen – insbesondere Spirulina – sind in der Lage, alle drei positiven Parameter (Protein, Ballaststoffe, Anteil an Gemüse) signifikant zu verbessern, während sie gleichzeitig kaum negative Bestandteile enthalten. Damit ermöglichen sie eine ganzheitliche Nährwertoptimierung, ohne technologische oder sensorische Kompromisse.

NUTRI-SCORE-AUSWIRKUNGEN:

- Die gesamte frische Spirulina-Zubereitung (unabhängig vom Gehalt der Trockensubstanz) wird als eine Zutat behandelt
- Für die F/V/L-Komponente (Fruits, Vegetables, Legumes) werden die vollen Anteile als Gemüseanteil angerechnet
- Wasser erhält 0 Punkte im Nutri-Score-Algorithmus
- Die Algen-Klassifizierung als Gemüse (Kategorie 8.55) bleibt vollständig erhalten

7.2 Ballaststoffe als Positiv-Faktor für Nutri-Score

Ballaststoffe sind ein zentraler positiver Bewertungsfaktor im Nutri-Score-Algorithmus [55, 56]. Mikroalgen liefern sowohl lösliche als auch unlösliche Ballaststoffkomponenten, die zur Verbesserung des Gesamtwerts beitragen [58]. Bei Spirulina besteht die Zellwand überwiegend aus Peptidoglykanen, die als Ballaststoffe klassifiziert werden [30].

7.3 Beispielprodukte: Zwei verschiedene Nutri-Score-Verbesserungen

Um die Wirkung frischer Spirulina auf den Nutri-Score zu demonstrieren, werden zwei unterschiedliche Produktbeispiele präsentiert:

Beispiel 1: Frucht-Smoothie (Haupttext) - Verbesserung von D auf B

Basisprodukt, Nutri-Score D

Zutatenliste:

Apfelsaft 35,7%, Sauerkirschmark 25%, Bananenmark, Himbeermark 6%, Aroniasaft, Acerolamark, Reisprotein 3,6%, Zitronensaft, Mandelmark 0,9%, Verdickungsmittel (Pektin, Gellan), Curryblattextrakt, Vanilleextrakt

Spirulina-Rezeptur (35% frische Spirulina, 1% TS)

35% frische Spirulina-Biomasse ersetzen anteilig den Basis-Smoothie. Spirulina zählt laut Eurocode 8.55 ("Seaweeds and algae") voll zum F/V/L-Anteil.

Ergebnis: Die Spirulina-Optimierung senkt Energie und Zuckergehalt, erhöht den F/V/L-Anteil auf 100% und verbessert das Produkt von Nutri-Score D auf B – ein praxisnahes Beispiel für Gemüse- und Protein-Anreicherung und Zuckerreduktion ohne Zusatzstoffe.

Beispiel 2: Smoothie-Bowl (Anhang A1) - Erreichen von Nutri-Score A

Eine detaillierte Berechnung für eine "Smoothie-Bowl" mit anderen Nährwerten findet sich in Anhang A1. Diese löffelbare Rezeptur mit 35 g frischer Spirulina (1% TS), 40 g Apfel-Bananen-Püree und 25 g Sauerkirschküree erreicht aufgrund ihrer spezifischen Nährwertzusammensetzung (172,1 kJ Energie, 8,135 g Zucker, 1,115 g Ballaststoffe) einen Score von -5, was Nutri-Score A entspricht.

Klarstellung: Es handelt sich um zwei verschiedene Rezepturen mit unterschiedlichen Nährwerten, die zeigen, wie flexibel frische Spirulina zur Nutri-Score-Optimierung eingesetzt werden kann.

7.4 Synergetische Effekte

Die Kombination frischer Spirulina mit weiteren Lebensmittelzutaten kann synergetische Wirkungen erzeugen, die über die additive Verbesserung einzelner Nährwerte hinausgehen. Besonders relevant ist dabei die komplementäre Aminosäurezusammensetzung: Das Proteinprofil von Spirulina ergänzt Fruchtkomponenten, indem es limitierende Aminosäuren wie Lysin bereitstellt und so das Gesamtaminosäuremuster des Produkts optimiert.

Die hydratisierte EPS-Matrix und die weichere Zellstruktur von frischer Spirulina können die Zugänglichkeit für Verdauungsenzyme im Vergleich zu getrockneter Biomasse erheblich verbessern und somit die Proteinverdaulichkeit positiv beeinflussen [65, 66].

Auch funktionelle Synergieeffekte lassen sich gezielt nutzen: Die Kombination verschiedener Inhaltsstoffe kann die technofunktionalen Eigenschaften des Endprodukts verbessern, beispielsweise durch verbesserte Hydrokolloid-Interaktionen.

Fazit

Frische Spirulina ist ein hochwirksamer Rohstoff zur gezielten Verbesserung des Nutri-Scores, da sie alle drei positiven Parameter adressiert und gleichzeitig keine nennenswerten negativen Komponenten einbringt. Der Effekt ist messbar: In praxisnahen Rezepturen lässt sich der Nutri-Score um mehrere Stufen verbessern – ohne technologische Zusätze oder deklarationspflichtige Modifikationen.

Darüber hinaus eröffnet die Kombination mit anderen Zutaten funktionelle Synergien:

- Proteine werden ernährungsphysiologisch aufgewertet
- Technofunktionale Eigenschaften verstärken sich gegenseitig
- Die EPS-Matrix unterstützt die Verdaulichkeit und Texturstabilität

Damit wird Spirulina nicht nur zum ernährungsphysiologischen Mehrwertträger, sondern auch zum strategischen Formulierungselement für Clean-Label- und Health-Positionierungen im wachsenden Marktsegment funktioneller Lebensmittel.

8. NACHHALTIGKEITSANALYSE

Kernaussagen dieses Kapitels:

- Frische Spirulina trägt zur Erreichung vieler UN-Nachhaltigkeitsziele bei
- Flächeneffizienz: bis 50 kg Protein/m²·a – 100-fach besser als Soja
- Es ist keine fruchtbare Ackerfläche für den Anbau von Mikroalgen notwendig

Die Mikroalgen-Produktion trägt zu mehreren UN-Nachhaltigkeitszielen bei [60] – z.B.:

- **SDG 2 (Kein Hunger):** Bereitstellung nachhaltiger, nährstoffreicher Proteinquellen
- **SDG 6 (Sauberes Wasser):** Effizienter Wasserverbrauch und Abwasserbehandlung
- **SDG 7 (Bezahlbare und saubere Energie):** Integration erneuerbarer Energien
- **SDG 12 (Nachhaltige Konsum- und Produktion):** Kreislaufwirtschaft und Ressourceneffizienz
- **SDG 13 (Maßnahmen zum Klimaschutz):** CO₂-Bindung und Emissionsreduktion
- **SDG 14 (Leben unter Wasser):** Reduzierung der Belastung mariner Ökosysteme
- **SDG 15 (Leben an Land):** Schonung terrestrischer Ökosysteme durch reduzierten Landverbrauch

8.1 LCA-Ergebnisse am Beispiel der ALGENWERK-Produktion

Eine Masterarbeit der Wageningen University / United Nations University Dresden (van Daal, 2024) liefert eine erste umfassende Ökobilanzierung (Life Cycle Assessment, LCA) der Spirulina-Produktion beim ALGENWERK [61]. Diese Studie ist die erste detaillierte LCA-Analyse für die Produktion flüssiger Spirulina in Photobioreaktoren nach ISO 14040:2006 und ISO 14044:2006.

Die LCA-Studie analysiert die Umweltauswirkungen von der Rohstoffgewinnung bis zur Auslieferung der frischen Spirulina-Suspension. Als funktionelle Einheit wurde 1 kg frische Spirulina-Suspension mit 10% Trockensubstanz definiert.

Die Studie betrachtet den gesamten Produktlebenszyklus und zeigt bereits deutliche Optimierungsmöglichkeiten durch z.B. Wasserrecycling bzw. den Einsatz anderer Rohstoffe und Energieressourcen.

Insbesondere der Fakt, dass keine fruchtbare Landfläche für die Produktion von Mikroalgen notwendig ist, zeigt erhebliches Nachhaltigkeitspotential für die Produktion pflanzlicher Rohstoffe aus frischen Mikroalgen auf.

Wesentliche Ergebnisse:

- Treibhauspotenzial: 16,7 kg CO₂-Äquivalente pro 1 kg frische Spirulina
- Wasserverbrauch: ca. 520 Liter Wasser pro kg frische Spirulina
- Flächenbedarf: ca. 1,28 m²·a Fläche (keine Agrarfläche!) pro kg frische Spirulina

Die Analyse identifiziert klare ökologische Vorteile in Bezug auf Landnutzung, Emissionen, Ressourceneinsatz und Transportwege – insbesondere im Vergleich zu globalen Lieferketten herkömmlicher Proteine.

8.2 Nachhaltigkeit im Kontext: CO₂-Bilanz und Flächeneffizienz

Flächeneffizienz-Vorteil: Der entscheidende Nachhaltigkeitsvorteil der Mikroalgenproduktion im ALGENWERK liegt in der herausragenden Flächeneffizienz. Durch die vertikale Kultivierung in Photobioreaktoren kann eine Proteinproduktion von 25-50 kg pro m² und Jahr erreicht werden. Dies ist eine 100-fach höhere Effizienz im Vergleich zur konventionellen Landwirtschaft (0,1-0,5 kg pro m²), die für den Anbau von z.B. Soja oder als Weideland für Rinder benötigt wird. In einer Welt mit knapper werdenden Landressourcen ist dies ein fundamentaler Beitrag zur Ernährungssicherheit.

Bezüglich der CO₂-Bilanz pro Kilogramm Protein zeigt die Analyse ein differenziertes Bild. Während die Produktion in geschlossenen Systemen energieintensiver ist als der Anbau von Soja, bietet sie im Vergleich zu tierischen Proteinquellen wie Rindfleisch erhebliche Vorteile und ist

ein wichtiger Schritt zur Reduzierung der Emissionen im Proteinsektor.

Sojaimporte, insbesondere aus Südamerika, sind häufig mit Landnutzungsänderungen wie Abholzung verbunden, was die tatsächliche CO₂-Bilanz deutlich verschlechtert [51]. In diesem Kontext bietet regional produzierte Spirulina aus Photobioreaktoren nicht nur direkte

Emissionsvorteile, sondern vermeidet auch indirekte Emissionen durch Flächenkonkurrenz.

→ bis zu 100-fach höhere Flächenproduktivität

In Zeiten begrenzter Anbauflächen bietet dies eine strategische Lösung für globale Ernährungssicherheit, urbane Lebensmittelproduktion und klimafreundliche Wertschöpfungsketten.

Fazit

Nachhaltigkeit durch Technologie und Systemdesign

Die LCA-basierte Analyse zeigt: ALGENWERK verbindet technologische Effizienz mit ökologischer Verantwortung. Durch lokale, flächeneffiziente Produktion in geschlossenen Systemen können Unternehmen:

- CO₂-Emissionen gegenüber tierischen Produkten senken
- Wasserverbrauch optimieren

- Landverbrauch drastisch senken
- Lieferketten regionalisieren und Risiken minimieren
- ESG-Ziele strategisch untermauern

Frische Spirulina bietet damit nicht nur ernährungsphysiologische und funktionale Vorteile, sondern auch eine nachhaltige Grundlage für zukunftsorientierte Produktportfolios.



Abbildung 8: Produktionsanlage im ALGENWERK Dresden [PUEVIT GmbH]

9. KUNDENAKZEPTANZ UND MARKTEINSCHÄTZUNG

Kernaussagen dieses Kapitels:

- 78% der gesundheitsbewussten Befragten bewerten frische Spirulina als Qualitätsmerkmal
- Sensorisch milder, deutlich weniger 'algig' als getrocknete Produkte
- Zahlungsbereitschaft: Ø +25% Preisaufschlag im Premium-Segment

9.1 Sensorisches Profil und Geschmacksakzeptanz

Das sensorische Profil von Mikroalgen ist ein entscheidender Faktor für ihre Integration in Lebensmittelprodukte und die damit verbundene Akzeptanz bei den Verbraucher:innen. Insbesondere der Vergleich zwischen frischer und getrockneter Mikroalgenbiomasse zeigt signifikante Unterschiede, die für die Lebensmittelindustrie von erheblicher Bedeutung sind. Frische Spirulina wurde wissenschaftlich bestätigt [84] als sensorisch überlegen bewertet, mit einem milderem Profil und einer signifikant höheren Akzeptanz im direkten Vergleich zu getrockneten Produkten. Die Autoren schlussfolgern, dass frische Spirulina in höheren Konzentrationen in Lebensmitteln eingesetzt werden kann, ohne die sensorische Akzeptanz zu beeinträchtigen.

Sensorische Überlegenheit frischer Spirulina

Laut einer Masterarbeit der Hochschule Neubrandenburg zeichnet sich frische Spirulina durch ein deutlich milderer und angenehmeres Geschmacksprofil aus als getrocknete Produkte [3]. Dies unterstreicht die präferierte sensorische Wahrnehmung der frischen Biomasse.

Ursachen der sensorischen Unterschiede

Die verbesserten sensorischen Eigenschaften frischer Mikroalgen sind auf mehrere Faktoren zurückzuführen:

Intakte Zellstruktur und EPS-Matrix: Im Gegensatz zu getrockneten Produkten, bei denen es durch den Trocknungsprozess zur Denaturierung von Proteinen und zur Zerstörung empfindlicher Zellstrukturen und Oxidation von empfindlichen Fettsäuren kommt, bleibt die intakte Zellstruktur und die funktionellen extrazelluläre polymere Substanzen (EPS)-Matrix in frischer Spirulina erhalten. Diese strukturelle Integrität beeinflusst nicht nur die Textur und Wasserbindung, sondern auch die Freisetzung flüchtiger Aromastoffe, die für den "algigen" Geschmack verantwortlich sein können.

Erhalt hitzeempfindlicher Inhaltsstoffe: Thermische Trocknungsverfahren können hitzeempfindliche Inhaltsstoffe wie bestimmte Vitamine, Enzyme und andere Verbindungen degradieren, was sich auf das Aroma und den Geschmack auswirken kann. In frischer Biomasse bleiben diese Komponenten stabil und tragen zu einem runderen Geschmacksprofil bei.

Geringere Konzentration von "Off-Flavors": Die Bildung unerwünschter Geschmacksstoffe ("Off-Flavors") kann durch Oxidationsprozesse während der Trocknung oder Lagerung getrockneter Algen verstärkt werden. Frische Spirulina, die unter kontrollierten Bedingungen produziert und gekühlt gelagert wird, minimiert die Entstehung solcher Verbindungen [74, 75].

Bedeutung für Lebensmittelanwendungen

Die mildereren und angenehmeren sensorischen Eigenschaften frischer Spirulina eröffnen neue Möglichkeiten für Lebensmittelhersteller, die Akzeptanz von Mikroalgen-basierten Produkten zu erhöhen. Insbesondere in Anwendungen, bei denen der Eigengeschmack einer Zutat eine große Rolle spielt, wie Smoothies, Joghurt-Alternativen oder Clean-Label-Snacks, bietet frische Spirulina einen entscheidenden Vorteil [76, 77, 78]. Sie ermöglicht die Entwicklung von Produkten mit einem ausgewogenen Geschmacksprofil, die eine breitere Kundschaft ansprechen und die Integration von Mikroalgen als funktionellen und nährstoffreichen Inhaltsstoff erleichtern.

9.2 Kunden-Akzeptanz-Studie zu roh-veganer Spirulina

Eine Masterarbeit der Hochschule Neubrandenburg (Thomas, 2025) liefert eine der ersten fundierten Studien zur Akzeptanz von frischer, roh-veganer Spirulina auf dem deutschen Markt [3]. Die Untersuchung basiert auf einer gesundheitsbewussten Stichprobe und beleuchtet zentrale Aspekte für Produktpositionierung, sensorische Entwicklung und Preisgestaltung.

Kernaussagen der Studie

Frische als Qualitätsmerkmal

78% der Befragten assoziierten "frische Spirulina" mit höherer Qualität und besseren Nährstoffeigenschaften.

Besonders hohe Zustimmung bei:

- Höherem Bildungsabschluss: 85%
- Regelmäßigen Bio-Käufer:innen: 82%
- Gesundheitsbewussten Verbraucher:innen: 89%
- Vegetarier:innen/Veganer:innen: 91%

Sensorische Bewertung: Frische vs. getrocknete Spirulina

In Blindverkostungen zeigte sich ein deutliches sensorisches Akzeptanzplus für frische Spirulina:

- 40% weniger Bitterkeit
- Cremigeres Mundgefühl, weniger sandige Textur
- 60% weniger intensiver Algen-Nachgeschmack

Gesamtbewertung (Skala 1-10):

- Frisch: 7,2
- Getrocknet: 5,8

Clean-Label-Relevanz

85% der Befragten bevorzugten Produkte mit frischen Mikroalgen gegenüber solchen mit synthetischen Zusatzstoffen.

Besonders hohe Präferenz bei:

- Familien mit Kindern: 92%
- Konsument:innen über 45 Jahre: 88%
- Haushalten mit höherem Einkommen: 91%

Zahlungsbereitschaft

- Ø 25% Premiumaufschlag wurde akzeptiert
- Bis zu 45% bei stark gesundheitsbewusster Zielgruppe
- Geringe Preissensitivität bei Bio-Kund:innen und höheren Einkommensgruppen

Hinweis: Die befragte Stichprobe war nicht repräsentativ für die Gesamtbevölkerung. Die Ergebnisse sind primär auf gesundheitsorientierte, einkommensstärkere und bildungsnahe Zielgruppen übertragbar – decken sich jedoch stark mit den typischen Käuferprofilen im funktionellen Premiumsegment.

Fazit

Die Ergebnisse der Studie zeigen klar: Frische Spirulina wird von gesundheitsbewussten Zielgruppen als hochwertig, sensorisch überlegen und "clean" wahrgenommen – mit einer ausgeprägten Zahlungsbereitschaft. Für Hersteller im Bereich Clean-Label-, Functional- oder Premiumprodukte eröffnet dies ein attraktives Marktpotenzial mit klar definierbarer Zielgruppe und strategischen Alleinstellungsmerkmalen gegenüber getrockneter Spirulina.

9.3 Lebensmitteltechnologische Potenziale

Die Masterarbeit von Thomas (2025) umfasst auch lebensmitteltechnologische Untersuchungen zu frischer Spirulina [3]. Diese Untersuchungen zeigen Unterschiede zwischen frischen und getrockneten Produkten in verschiedenen Anwendungen.

Die frische *Limnospira*-Biomasse weist aufgrund ihrer naturnahen Matrix Vorteile hinsichtlich der technologischen Funktionalität und der Erhaltung bioaktiver Substanzen auf, die bei Trocknungsprozessen teilweise verloren gehen können.

Die bessere Wasserbindungs- und Gelbildungsfähigkeit frischer Spirulina macht sie besonders interessant für feuchte Lebensmittelanwendungen und unterstützt die funktionellen Eigenschaften der Polysaccharide (IPS, EPS).

9.4 Marktpotenzial und Kundenpräferenzen

Wachsender Markt für Mikroalgen in Lebensmitteln

Der globale Markt für Mikroalgen in Lebensmitteln zeigt robustes Wachstum. Die Prognosen variieren je nach Marktumfang und analysiertem Segment:

Marktprognosen für Mikroalgen (verschiedene Quellen und Segmente)				
Fortune Business Insights	7,29%	841 Mio. USD	1,38 Mrd. USD (2032)	Spezifisches Segment [71]
Future Market Insights	8,0%	13,7 Mrd. USD	29,6 Mrd. USD	Breiter Marktumfang [72]
Market Research Future	14,43%	1,18 Mrd. USD	5,2 Mrd. USD	Breiter Mikroalgenmarkt [70]
Premium-Segment (frisch)	25-35%	-	150-250 Mio. EUR	Schätzung für frische Mikroalgen

Besonders dynamisch entwickeln sich die Segmente:

- Functional Foods
- Premium-Smoothies und Health-Drinks
- Clean-Label-Produkte

Das Wachstumspotenzial des Mikroalgenmarktes wird durch aktuelle Prognosen weiter untermauert. Eine weitere Studie für das Teilsegment der hochwertigen Mikroalgen-Öle sieht zwischen 2023 und 2032 sogar eine CAGR von 17,15% [63].

Zusätzliche Wachstumsfaktoren:

- Premium-Segment: Höhere Margen gegenüber getrockneten Produkten
- Prognose für frische Mikroalgen: 25-35% jährliches Wachstum in den nächsten 5 Jahren

Zielgruppenprofil laut Konsumforschung

Die Studie von Thomas [3] identifiziert drei Hauptzielgruppen mit hoher Affinität zu frischer Spirulina:

1. **Gesundheitsbewusste Premium-Käufer:innen:**
Hohes Einkommen, hohe Bildung, starkes Interesse an Functional Foods
2. **Nachhaltigkeitsorientierte Verbraucher:innen:**
Fokus auf lokale Produktion und ökologische Aspekte
3. **Flexitarische und Pflanzenbasierte Ernährung:**
Suche nach hochwertigen Proteinquellen

- Höchstes Marktpotenzial: Anwendungen in Smoothies, Getränken und Frischeprodukten
- Preisbereitschaft ist vorhanden – Mehrwertkommunikation ist entscheidend

Kommunikationsstrategie für den Markterfolg

Die Konsumstudie [3] zeigt, dass bestimmte Botschaften in der Kommunikation besonders wirksam sind (Relevanz abhängig vom Zielgruppensegment):

- Frische und Natürlichkeit
- Lokale Produktion in Deutschland/Europa
- Vollständiges Aminosäureprofil
- Clean Label ohne Zusatzstoffe
- Nachhaltige Produktion

Fazit

Attraktives Wachstum mit strategischer Relevanz

Frische Spirulina adressiert ein dynamisches Marktsegment mit überdurchschnittlichem Wachstumspotenzial, klar definierbaren Zielgruppen und einer hohen Zahlungsbereitschaft, sofern der funktionelle Mehrwert überzeugend kommuniziert wird. Für Unternehmen ergeben sich daraus Chancen für:

- Premium-Positionierungen mit Clean-Label-Fokus
- Neue Produktkategorien im Frische- und Getränkesegment
- ESG-konforme Sortimentsentwicklung

10. ALGENWERK – TECHNOLOGIEFÜHRER IN QUALITÄT, SICHERHEIT UND INNOVATION

Kernaussagen dieses Kapitels:

- Geschlossene Photobioreaktoren + KI-gestützte Prozesskontrolle sichern gleichbleibende Qualität
- Zertifizierungen: HACCP, ISO 9001; Global G.A.P. in Vorbereitung
- Power2Food-Konzept: erneuerbare Energie → proteinreiche Nahrung

Technologische Exzellenz in der Mikroalgen-Produktion

ALGENWERK übernimmt eine technologische Führungsposition in der frischen Mikroalgenproduktion. Modernste geschlossene Photobioreaktoren und ein durchgängiger Prozessvorsprung – von der hochreinen Kultivierung über schonende Ernteprozesse bis zu hygienisch validierten Verarbeitungsschritten – sichern eine konkurrenzlose Haltbarkeit und Konsistenz der Produkte für die Lebensmittelindustrie.

Die vollständige Digitalisierung der Prozesskette, kombiniert mit IoT-Sensorik für Echtzeitüberwachung und KI-gestützter Prozessoptimierung, ermöglicht eine präzise Steuerung aller qualitätsrelevanten Parameter. Dadurch werden Qualitätsschwankungen minimiert und eine verlässliche, skalierbare Lieferkette gewährleistet.

Qualitätsmanagementsystem und Zertifizierungen

ALGENWERK setzt auf ein umfassendes Qualitätsmanagementsystem, das höchsten Anforderungen in der Lebensmittelproduktion entspricht. Aktuell bestehen Zertifizierungen nach:

- HACCP (Hazard Analysis and Critical Control Points)
- ISO 9001 (Qualitätsmanagementsysteme)

Die angestrebte Global G.A.P.-Zertifizierung als weltweit erster Algenproduzent unterstreicht das Bekenntnis zu Rückverfolgbarkeit, Nachhaltigkeit und Produktsicherheit auf internationalem Niveau. Für B2B-Kunden bedeutet das: minimiertes Produktrisiko, reduzierte Rückrufwahrscheinlichkeit und gestärktes Vertrauen der Kundschaft.

Qualitätsanforderungen an Inverkehrbringende frischer Algen

Für Inverkehrbringer dieser frischen Biomasse sind kompromisslose Qualitätsstandards und deren engmaschige Überwachung von höchster Relevanz. Angesichts des derzeitigen Mangels an einheitlichen nationalen oder internationalen Grenzwerten für mikrobielle, chemische und Schwermetallbelastungen bei frischen Algen ist ein besonderes Augenmerk auf die Produktsicherheit zu legen.

ALGENWERK hat sich diesem Anspruch verschrieben und setzt intern besonders hohe Anforderungen an die Qualität seiner frischen Mikroalgen-Biomasse gemäß Verordnung (EG) Nr. 2073/2005 über mikrobiologische Kriterien für Lebensmittel [73]. Ein zentraler Aspekt der Qualitätsphilosophie betrifft die mikrobielle Reinheit. Insbesondere die aerobe Gesamtkeimzahl ist ein kritischer Indikator für die Produktqualität. Als Grenzwert wurde hier z.B. $1,0 \times 10^5$ KBE/g festgelegt wobei die Qualität typischerweise deutlich unter $< 1,0 \times 10^4$ KBE/g liegt. Dies unterstreicht das Engagement für höchste Hygienestandards.

Darüber hinaus ist die richtige Lagerung entscheidend für die Erhaltung der Produktqualität und Nährstoffintegrität. Unsere frische Mikroalgen-Biomasse sollte stets bei Temperaturen zwischen 2°C und 7°C gelagert werden. Unter diesen optimalen Bedingungen gewährleistet ALGENWERK eine Haltbarkeit der frischen Biomasse von bis zu 5 Wochen, was eine hohe Flexibilität in der Weiterverarbeitung ermöglicht.

Mit diesen strengen Richtlinien und unserem umfassenden Qualitätsmanagement stellt ALGENWERK sicher, dass ein Rohstoff zur Verfügung steht, der höchsten Ansprüchen an Sicherheit, Frische und Nährstoffgehalt gerecht wird.

In der Studie von Vasquez Guevara et al. (2025) [84] wurden in den Proben keine bekannten Lebensmittelpathogene nachgewiesen, was die grundsätzliche Sicherheit des Produkts bei kontrollierter Kultivierung auch wissenschaftlich unterstreicht. Interessanterweise zeigt die Studie auch, dass der Kultivierungsprozess selbst einen entscheidenden Einfluss auf die Qualität hat. Dies bestätigt den Ansatz von ALGENWERK, durch eine präzise, KI-gestützte Prozesskontrolle eine gleichbleibend hohe Produktqualität sicherzustellen.

Innovation und Forschungsk Kooperationen

ALGENWERK investiert gezielt in Forschung und Entwicklung und kooperiert mit führenden wissenschaftlichen Einrichtungen. Fokusbereiche sind unter anderem:

- Weiterentwicklung der Photobioreaktor-Technologie
- Zellschonende Ernteverfahren
- Innovative Konservierungsmethoden zur Erhaltung der EPS-Matrix
- Prozessbegleitende Qualitätskontrolle

Diese kontinuierliche Innovationsarbeit garantiert ALGENWERK-Kund:innen Zugang zu den funktionalsten, frischesten und technologisch fortschrittlichsten Mikroalgenprodukten am Markt.

Nachhaltigkeit und Power-2-Food-Konzept

Nachhaltigkeit ist zentraler Bestandteil des Geschäftsmodells von ALGENWERK. Die Produktion erfolgt mithilfe regenerativer Energiequellen und auf Basis eines dezentralen Anlagenkonzepts, das kurze Lieferketten, minimale CO₂-Emissionen und maximale Frische gewährleistet. Dieses Prinzip ist im Power2Food-Konzept verankert: einer innovativen Verbindung aus sauberer Energie und hochwertiger Lebensmittelproduktion.

Über ein skalierbares standardisiertes Franchisekonzept werden Landwirte und Erzeuger regenerativer Energie adressiert, die durch dezentrale Produktionsstandorte neben nachhaltiger Produktion auch eine Resilienz in der Lieferkette für industrielle Abnehmer der frischen Biomasse sicherstellen. Dieses Modell ermöglicht es Investoren und Partnern, Mikroalgen-Produktionsanlagen mit minimalem Risiko und hoher Prozesssicherheit zu betreiben. Alle kritischen Produktionsschritte – von der Kultivierung über die Ernte bis zur Qualitätssicherung – sind dokumentiert, validiert und zentral gesteuert. So wird der Einstieg in die frische Spirulina-Produktion wirtschaftlich attraktiv und technologisch abgesichert.

11. ANWENDUNGEN IN DER LEBENSMITTELINDUSTRIE UND INNOVATIONSPOTENTIALE

Kernaussagen dieses Kapitels:

- Einsatz in Smoothies, pflanzlichen Joghurt-Alternativen, Clean-Label-Snacks
- EPS ermöglichen natürliche Emulsionen & Texturen ohne Zusatzstoffe
- Frische Spirulina fungiert als Technologie-Plattform für funktionelle Frischeprodukte

FrISChe Mikroalgen eröffnen ein breites Anwendungsspektrum in verschiedenen Produktkategorien der Lebensmittelindustrie [76, 77, 78]. Einfache Beispiele sind:

- **Smoothies und funktionelle Getränke:** Nutri-Score-Optimierung bei minimalem Geschmackseinfluss
- **Joghurt-Alternativen und fermentierte Frischeprodukte:** Natürliche Texturgebung durch EPS
- **Clean-Label-Snacks:** Ersatz mehrerer E-Nummern durch eine Zutat
- **Proteinangereicherte Reformulierungen:** Vollständiges Aminosäureprofil ohne tierische Komponenten

Ein Alleinstellungsmerkmal frischer Spirulina ist die natürliche EPS-Matrix, die technofunktionale Vorteile in der Verarbeitung bietet:

Konkrete Anwendungsbeispiele:

- **Als Emulgator:** In Dressings ersetzt frISChe Spirulina E471 (Mono- und Diglyceride) und verbessert gleichzeitig den Nutri-Score
- **Als Stabilisator:** In Fruchtzubereitungen kann auf Pektin (E440) verzichtet werden
- **Als Verdickungsmittel:** In veganen Joghurtalternativen ersetzt die EPS-Matrix Guarkernmehl (E412)

Vor dem Hintergrund wachsender Verbraucher:innenansprüche an natürliche, minimal verarbeitete und funktionelle Lebensmittel bieten frISChe Mikroalgen eine zukunftsweisende Lösung. Sie bedienen sowohl die steigende Clean-Label-Nachfrage als auch das Bestreben der Industrie, synthetische Zusatzstoffe zu reduzieren und gleichzeitig Kosten durch den Ersatz mehrerer Zusatzstoffe durch eine einzige, multifunktionale Zutat zu optimieren.

12. FAZIT UND ZUKUNFTSPERSPEKTIVEN

Kernaussagen dieses Whitepapers:

- Frische Mikroalgen verbinden Ernährung, Funktionalität und Nachhaltigkeit
- Strategische Empfehlung: Einstieg über Premium-Produkte, Fokus Clean Label & Nutri-Score
- Frische Spirulina ist Schlüsselressource für ESG-konforme Lebensmittelinnovationen

FrISCHE Mikroalgen – insbesondere Spirulina – stellen einen natürlichen Technologieträger mit hohem Potenzial für die Entwicklung moderner Clean-Label-Produkte dar.

Die grundlegenden Unterschiede zwischen frischer Biomasse und rekonstituierten Trockenalgen sind technologisch, sensorisch und ernährungsphysiologisch von zentraler Bedeutung. Nur frISCHE Mikroalgen liefern das volle funktionelle und bioaktive Potenzial, einschließlich EPS, Phytohormone und intakter Zellstruktur.

Die Zukunft der Lebensmittelindustrie wird von der Fähigkeit geprägt sein, natürliche, nachhaltige und gesundheitsfördernde Produkte zu entwickeln – und zwar auf Grundlage stabiler, skalierbarer und technologiegestützter Systeme. FrISCHE Mikroalgen erfüllen diese Anforderungen in einzigartiger Weise.

Strategische Empfehlungen für produzierende Unternehmen:

1. **Einstieg über Premium- und funktionelle Produkte** (z. B. Getränke, Frischeprodukte)
2. **Fokussierung auf gesundheitsbewusste und Clean-Label-affine Zielgruppen**
3. **Nutzung der Mikroalge als natürlichen Zusatzstoff-Ersatz** mit klarer Kosteneffizienz
4. **Integration in bestehende Nutri-Score-Strategien** zur Produktoptimierung mit klar messbarem Mehrwert

Die zentrale Kausalkette des kommerziellen Vorteils lautet:

FrISCHE Spirulina ist nicht nur ein Rohstoff – sie ist eine funktionale Schlüsselressource für die nächste Generation gesunder, nachhaltiger und innovativer Lebensmittel.

13. ANHANG A

Nutri-Score-Beispielrechnungen (Lebensmittel- und Getränke-Algorithmus)

Berechnungsgrundlage: Offizielle Nutri-Score-Leitlinien (Santé publique France, Updates 2022–2024 für Lebensmittel; Getränke-Update 2023). Alle Schwellenwerte und Punkte sind offen gelegt.

A0. Wichtiger Hinweis – Getränke: Nur Wasser kann A erreichen

Im Getränke-Algorithmus kann ausschließlich **Wasser** den Nutri-Score A erhalten. Alle anderen Getränke – auch "zero"-Getränke – sind maximal B. Positive Komponente im Getränke-Algorithmus ist F/V/L (Fruits, Vegetables, Legumes). Nüsse sowie Raps-/Walnuss-/Olivenöl zählen

dort nicht. Für löffelbare Produkte gilt der allgemeine Lebensmittel-Algorithmus (F/V/N/A, plus Ballaststoffe und Protein).

A1. Smoothie-Bowl (löffelbar) mit 35% frischer Spirulina

Kategorie: Lebensmittel-Algorithmus

Rezeptur (pro 100 g):

- 35 g frische Spirulina (1% TS)
- 40 g Apfel-Bananen-Püree (70/30)
- 25 g Sauerkirschpüree

Komponenten-Nährwerte (pro 100 g, typische BLS/USDA):

Komponente	Energie (kJ)	Protein (g)	Fett (g)	Zucker (g)	Ballaststoffe (g)	Natrium (mg)
FrISChe Spirulina 1% TS	16	0,6	0,05 (ges. 0,02)	0,1	0,1	15
Apfel-Banane 70/30	260	0,6	0,2 (ges. 0,05)	14	1,7	5
Sauerkirschpüree	250	1,0	0,3 (ges. 0,05)	10	1,6	3

Gemischte Nährwerte je 100 g:

- **Energie:** 172,1 kJ
- **Zucker:** 8,135 g
- **Ges. Fettsäuren:** 0,0395 g
- **Natrium:** 8 mg
- **Protein:** 0,70 g
- **Ballaststoffe:** 1,115 g
- **F/V/N/A:** 100%

Kategorie	Komponente	Punkte	Summe
A-Block (Negativ)	Zucker	1	1
P-Block (Positiv)	F/V/N/A	5	6
	Ballaststoffe	1	

Score = A-Block – P-Block = 1 – 6 = –5

Nutri-Score: A (Lebensmittel)

A2. Green Hummus mit 30% frischer Spirulina

Kategorie: Lebensmittel-Algorithmus

Rezeptur (pro 100 g):

- 30 g frische Spirulina (1% TS)
- 45 g Kichererbsen (gekocht, püriert, ohne Salz)
- 15 g Tahin
- 10 g Zitronensaft

Gemischte Nährwerte je 100 g:

- **Energie:** 654,7 kJ
- **Zucker:** 1,195 g
- **Ges. Fettsäuren:** 1,331 g
- **Natrium:** 10 mg
- **Protein:** 7,90 g
- **Ballaststoffe:** 4,875 g
- **F/V/N/A:** 85%

Kategorie	Komponente	Punkte	Summe
A-Block (Negativ)	Energie	1	2
	SFA	1	
P-Block (Positiv)	F/V/N/A	5	13
	Ballaststoffe	4	
	Protein	4	

Score = A-Block – P-Block = 2 – 13 = –11

Nutri-Score: A (Lebensmittel)

A3. Trink-Format: "Green Fruit Drink" mit frischer Spirulina

Kategorie: Getränke-Algorithmus

Konkrete Rezeptur (pro 100 ml, trinkbar):

Komponente	Energie (kJ)	Zucker (g)	Ballaststoffe (g)	Natrium (mg)
Apfelsaft	190	10,4	—	4
Bananenpüree	371	12,2	2,6	1
Sauerkirschsaft	200	10,0	—	3
Wasser	0	0	—	0
FrISCHE Spirulina 1% TS	16	0,1	0,1	15

- 40 g Apfelsaft (Direktsaft)
- 20 g Bananenpüree
- 20 g Sauerkirschsaft (Direktsaft)
- 15 g Wasser
- 5 g frische Spirulina (1% TS)

Komponenten-Nährwerte (pro 100 g/ml; typische BLS/USDA):

Gemischte Nährwerte je 100 ml (gewichtetes Mittel):

Energie:

$$0,40 \times 190 + 0,20 \times 371 + 0,20 \times 200 + 0,15 \times 0 + 0,05 \times 16 \\ = 76 + 74,2 + 40 + 0 + 0,8 = \mathbf{191,0 \text{ kJ}}$$

Zucker:

$$0,40 \times 10,4 + 0,20 \times 12,2 + 0,20 \times 10,0 + 0,15 \times 0 + 0,05 \times 0,1 \\ = 4,16 + 2,44 + 2,0 + 0 + 0,005 = \mathbf{8,605 \text{ g}}$$

Natrium:

$$0,40 \times 4 + 0,20 \times 1 + 0,20 \times 3 + 0,15 \times 0 + 0,05 \times 15 \\ = 1,6 + 0,2 + 0,6 + 0 + 0,75 = \mathbf{3,15 \text{ mg}}$$

F/V/L-Anteil:

Apfelsaft 40% + Bananenpüree 20% + Sauerkirschsaft 20%
(Spirulina zählt nicht im Getränke-Bonus) = **80%**

Getränke-Algorithmus – Punkte (Auszug gemäß 2023-Update):

Kategorie	Komponente	Wert	Punkte	Summe
A-Block (Negativ)	Energie	191 kJ	2	8
	Zucker	8,605 g/100 ml	6	
	Natrium	3,15 mg	0	
P-Block (Positiv)	F/V/L	80%	5	5

Hinweis: Protein/Ballaststoffe werden im Getränke-Algorithmus nicht positiv bewertet.

$$\mathbf{\text{Score} = A - P = 8 - 5 = 3}$$

Nutri-Score: C (Getränke)

Hinweis: Unabhängig vom rechnerischen Ergebnis gilt als Obergrenze für Getränke: Bestnote maximal B (nur Wasser kann A).

Varianten-Hinweis: Durch weitere Zuckerreduktion (höherer Wasseranteil, Einsatz weniger zuckerreicher

Säfte/Komponenten) kann der Score verbessert werden. Die Bestnote bleibt bei B gedeckelt (außer Wasser).

Annahmen & Quellen: Zutatenwerte aus typischen BLS/USDA-Profilen; Abweichungen produkt-/markenspezifisch möglich. Getränke-Algorithmus: 2023-Update des wissenschaftlichen Komitees; Lebensmittel-Algorithmus: FAQ/Leitlinien 2022–2024. Rechenweg nachvollziehbar, Rundungen geringfügig möglich.

14. LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Costello, C., et al. (2020). The future of food from the sea. *Nature*, 588(7836), 95-100. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2616-y>
- [2] Froehlich, H. E., et al. (2018). Comparative terrestrial feed and land use of an aquaculture-dominant world. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(20), 5295-5300
- [3] Thomas, Y. (2025). Kunden-Akzeptanz-Studie von Mikroalgen als Lebensmittel und lebensmitteltechnologische Untersuchungen am Beispiel roh-veganer Spirulina. Masterarbeit, Hochschule Neubrandenburg. URN: urn:nbn:de:gbv:519-thesis-2024-0205-5. Open access: https://digibib.hs-nb.de/resolve/id/dbhsnb_thesis_0000003224
- [4] Delattre, C., et al. (2016). Production, extraction and characterization of microalgal and cyanobacterial exopolysaccharides. *Biotechnology Advances*, 34(7), 1159-1179
- [5] Raposo, M. F. D. J., et al. (2013). Bioactivity and applications of sulphated polysaccharides from marine microalgae. *Marine Drugs*, 11(1), 233-252
- [6] Pulz, O., & Gross, W. (2004). Valuable products from biotechnology of microalgae. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 65(6), 635-648
- [7] Vonshak, A. (1997). *Spirulina platensis (Arthrospira): Physiology, cell-biology and biotechnology*. Taylor & Francis, London
- [8] European Food Safety Authority. (2019). Scientific Opinion on the safety of dried whole cell *Arthrospira (Spirulina) platensis* as a novel food ingredient. *EFSA Journal*, 17(6), e05716
- [9] Verordnung (EU) 2015/2283 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 25. November 2015 über neuartige Lebensmittel. *Amtsblatt der Europäischen Union*
- [10] Verordnung (EG) Nr. 178/2002 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 28. Januar 2002 zur Festlegung der allgemeinen Grundsätze und Anforderungen des Lebensmittelrechts
- [11] Plaza, M., et al. (2009). Screening for bioactive compounds from algae. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 51(2), 450-455
- [12] Watanabe, F., et al. (1999). Pseudovitamin B12 is the predominant cobamide of an algal health food, spirulina tablets. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 47(11), 4736-4741
- [13] Helliwell, K. E., et al. (2011). Cyanobacteria and eukaryotic algae use different chemical variants of vitamin B12. *Current Biology*, 21(8), 666-671
- [14] Croft, M. T., et al. (2005). Algae acquire vitamin B12 through a symbiotic relationship with bacteria. *Nature*, 438(7064), 90-93
- [15] Watanabe, F., et al. (2013). Vitamin B12 sources and bioavailability. *Experimental Biology and Medicine*, 238(10), 1165-1172
- [16] Verordnung (EU) Nr. 1169/2011 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 25. Oktober 2011
- [17] Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (2023). Nutri-Score FAQ
- [18] Flemming, H. C., & Wingender, J. (2010). The biofilm matrix. *Nature Reviews Microbiology*, 8(9), 623-633
- [19] Kulshreshtha, A., et al. (2008). Spirulina in health care management. *Current Pharmaceutical Biotechnology*, 9(5), 400-405
- [20] Grand View Research. (2021). Hydrocolloids Market Size, Share & Trends Analysis Report. Report ID: GVR-1-68038-064-0
- [21] Transparency Market Research. (2020). Hydrocolloids Market - Global Industry Analysis, Size, Share, Growth, Trends, and Forecast 2020-2030
- [22] Poli, A., et al. (2010). Microbial diversity in extreme marine habitats and their biomolecules. *Current Research, Technology and Education Topics in Applied Microbiology and Microbial Biotechnology*, 1, 794-820

- [23] Sutherland, I. W. (2001). The biofilm matrix--an immobilized but dynamic microbial environment. *Trends in Microbiology*, 9(5), 222-227
- [24] Raposo, M. F. D. J., et al. (2013). Bioactivity and applications of sulphated polysaccharides from marine microalgae. *Marine Drugs*, 11(1), 233-252
- [25] Stirk, W. A., et al. (2013). Cytokinins in macroalgae. *Plant Growth Regulation*, 71(2), 155-166
- [26] Martins, A., et al. (2014). Marketed marine natural products in the pharmaceutical and cosmeceutical industries. *Marine Drugs*, 12(2), 1066-1101
- [27] Ramanan, R., et al. (2016). Algae-bacteria interactions: evolution, ecology and emerging applications. *Biotechnology Advances*, 34(1), 14-29
- [28] Dillon JC, Phuc AP, Dubacq JP. Nutritional value of the alga *Spirulina*. *World Rev Nutr Diet*. 1995;77:32-46. doi:10.1159/000424464
- [29] Tokusoglu, Ö., & Ünal, M. K. (2003). Biomass nutrient profiles of three microalgae: *Spirulina platensis*, *Chlorella vulgaris*, and *Isochrysis galbana*. *Journal of Food Science*, 68(4), 1144-1148
- [30] Mahadevaswamy, M., & Venkataraman, L. V. (1986). Integrated utilization of algae for pollution abatement and biomass production. *Journal of Fermentation Technology*, 64(5), 415-421
- [31] Suliburska, J., et al. (2016). Effect of *Spirulina maxima* Supplementation on Calcium, Magnesium, Iron, and Zinc Status in Obese Patients with Treated Hypertension. *Biological Trace Element Research*, 173(1), 1-6
- [32] Moradi, S., et al. (2023). The effects of spirulina supplementation on serum iron and ferritin, anemia parameters, and fecal occult blood in adults with ulcerative colitis. *Clinical Nutrition ESPEN*, 57, 755-763
- [33] Belay, A. (2002). The potential application of *Spirulina* (*Arthrospira*) as a nutritional and therapeutic supplement. *Journal of the American Nutraceutical Association*, 5(2), 27-48
- [34] Lorenz, R. T., & Cysewski, G. R. (2000). Commercial potential for *Haematococcus* microalgae as a natural source of astaxanthin. *Trends in Biotechnology*, 18(4), 160-167
- [35] Hussein, G., et al. (2006). Astaxanthin, a carotenoid with potential in human health and nutrition. *Journal of Natural Products*, 69(3), 443-449
- [36] Shah, M. R., et al. (2016). *Haematococcus pluvialis*: From pigments to health. *Food Science and Technology International*, 22(4), 282-289
- [37] Ben-Amotz, A., & Avron, M. (1990). The biotechnology of cultivating the halotolerant alga *Dunaliella*. *Trends in Biotechnology*, 8(5), 121-126
- [38] Borowitzka, M. A., et al. (1990). The commercial production of β -carotene from *Dunaliella salina*. *Biomass*, 21(2), 107-129
- [39] Lamers, P. P., et al. (2008). Carotenoid and fatty acid metabolism in light-stressed *Dunaliella salina*. *Biotechnology and Bioengineering*, 101(6), 1145-1152
- [40] Sathasivam, R., & Ki, J.-S. (2018). Microalgae as a Source of Bioactive Compounds. *Plants*, 7(1), 14
- [41] Julia, C., & Hercberg, S. (2017). Development of a new front-of-pack nutrition label in France: the five-colour Nutri-Score. *Public Health Panorama*, 3(4), 712-725
- [42] World Health Organization. (2015). Guideline: Sugars intake for adults and children. Geneva: WHO
- [43] Oliveira, E. G., et al. (2010). The effects of different drying conditions on the quality of *Spirulina platensis*. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 53(6), 1297-1301
- [44] Oliveira, E. G., et al. (2009). Characterization of thin layer drying of *Spirulina platensis*. *Bioresource Technology*, 100(3), 1297-1303
- [45] Gummy, C., et al. (2018). Polysaccharides of *Arthrospira platensis* and their biological activities. *International Journal of Biological Macromolecules*, 111, 41-55

- [46] Herbert, V. (1988). Vitamin B-12: plant sources, requirements, and assay. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 48(3), 852-858
- [47] Asioli, D., et al. (2017). Making sense of the "clean label" trends. *Food Research International*, 99, 58-71
- [48] Sigurdson, G. T., et al. (2017). Natural colorants: food colorants from natural sources. *Annual Review of Food Science and Technology*, 8, 261-280
- [49] Eriksen, N. T. (2008). Production of phycocyanin--a pigment with applications in biology, biotechnology, foods and medicine. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 80(1), 1-14
- [50] Mintel. (2021). *Global Food & Drink Trends 2021. Market Intelligence Report*
- [51] Richards, P., et al. (2017). Soybean production in South America and biodiversity conservation. *Ambio*, 46(3), 282-290
- [52] MarketsandMarkets (2023). *Microalgae-based Products Market by Type, Application, and Region - Global Forecast to 2030*
- [53] Safi, C., et al. (2014). Morphology, composition, production, processing and applications of *Chlorella vulgaris*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 35, 265-278
- [54] Wikipedia. (2025). *Spirulina (dietary supplement)*. Verfügbar unter: [https://en.wikipedia.org/wiki/Spirulina_\(dietary_supplement\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Spirulina_(dietary_supplement))
- [55] Wissenschaftlicher Ausschuss des Nutri-Score. (2023). *Update of the Nutri-Score algorithm for beverages*. Max Rubner-Institut (MRI)
- [56] RAL gGmbH. (2024). *Nutri-Score FAQ*
- [57] Matsui, M., et al. (2003). Structural analysis of sulfated polysaccharides from red alga. *Carbohydrate Research*, 338(20), 2025-2032
- [58] Dietary Guidelines Advisory Committee. (2020). *Scientific Report*. U.S. Department of Agriculture
- [59] Palozza, P., & Krinsky, N. I. (1992). Antioxidant effects of carotenoids. *Methods in Enzymology*, 213, 403-420
- [60] Olabi AG, et al. (2023). Role of microalgae in achieving sustainable development goals. *Sci Total Environ*. 854:158689
- [61] van Daal, S. (2024). *A Life Cycle Assessment on the environmental performance of liquid Spirulina production in photobioreactors; a case study on the production by Algenwerk, Germany*. MSc Thesis, Wageningen University
- [62] Market Research Future. (2025). *Microalgae Market (Forecast to 2035)*
- [63] WiseGuy Reports. (2025). *Global Microalgae Oil Market Research Report*
- [64] Goiris, K., et al. (2012). Antioxidant potential of microalgae. *Journal of Applied Phycology*, 24(6), 1477-1486
- [65] Tessier, R., et al. (2021). Protein and amino acid digestibility of 15N *Spirulina* in rats. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 69(38), 11267-11275
- [66] Demarco, M., et al. (2022). Digestibility of amino acids in spirulina. *Frontiers in Nutrition*, 9, 883213
- [67] Puyfoulhoux, G., et al. (2001). Iron availability from iron-fortified spirulina by an in vitro digestion/Caco-2 cell culture model. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 49(3), 1625-1629
- [68] Kapoor, R., & Mehta, U. (1993). Iron bioavailability from *Spirulina platensis*, whole egg and whole wheat. *Indian Journal of Experimental Biology*, 31(2), 140-143
- [69] Selmi, C., et al. (2011). The effects of *Spirulina* on anemia and immune function in senior citizens. *Cellular & Molecular Immunology*, 8(3), 248-254
- [70] Market Research Future. (2025). *Microalgae Market (Forecast to 2035). CAGR 14.43%*
- [71] Fortune Business Insights. (2025). *Global Microalgae Market Report. CAGR 7.29%*
- [72] Future Market Insights. (2025). *Microalgae Market Size, Demand & Trends. CAGR 8.0%*

- [73] Verordnung (EG) Nr. 2073/2005 über mikrobiologische Kriterien für Lebensmittel. Amtsblatt der Europäischen Union
- [74] Cuellar-Bermudez, S. P., et al. (2015). Extraction and purification of high-value metabolites from microalgae. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 14(1), 67-88
- [75] Enzing, C., et al. (2014). Microalgae-based products for the food and feed sector. JRC Scientific and Policy Reports
- [76] Batista, A. P., et al. (2017). Microalgae biomass as alternative ingredient in cookies. *LWT - Food Science and Technology*, 75, 139-147
- [77] Niccolai, A., et al. (2019). Microalgae of interest as food source. *Algal Research*, 38, 101402
- [78] Wells, M. L., et al. (2017). Algae as nutritional and functional food sources. *Journal of Applied Phycology*, 29(2), 949-982
- [79] USDA National Nutrient Database for Standard Reference. (2025). Seaweed, spirulina, dried. Basic Report: 11667
- [80] de Jesus Raposo, M. F., de Morais, A. M. M. B., & de Morais, R. M. S. C. (2015). Marine-derived polysaccharides from algae with potent antimicrobial properties. *Marine Drugs*, 13(11), 6947-6976.
- [81] Hayashi, K., Hayashi, T., & Kojima, I. (1996). A calcium spirulan, an inhibitor of enveloped virus replication, from a blue-green alga *Spirulina platensis*. *Journal of Natural Products*, 59(1), 83-87.
- [82] Neyrinck, A. M., et al. (2017). Spirulina protects against diet-induced obesity and metabolic disorders in association with a modulation of gut microbiota in mice. *Nutrient*, 9(6), 637.
- [83] Bouter, K. E., et al. (2022). The role of the gut microbiome in the protective effect of prebiotics and probiotics against obesity and metabolic syndrome in animal models. *Nutrients*, 14(15), 3123.
- [84] Vasquez Guevara, C. M., Lucakova, S., Branysova, T., Ilko, V., Tobolka, A., Rajchl, A., & Branyikova, I. (2025). Fresh spirulina biomass for human nutrition – safety, microbiology, storage, sensorics. *Journal of Applied Phycology*. <https://doi.org/10.1007/s10811-025-03631-9>
- [85] Desmorieux, H., & Hernandez, F. (2004). Biochemical and physical criteria of *Spirulina* after different drying processes. *Proceedings of the 14th International Drying Symposium (IDS 2004)*, São Paulo, Brazil, 22-25 August 2004, Vol. C, pp. 900-907
- [86] Oliveira, E. G., Duarte, J. H., Moraes, K., Crexi, V. T., & Pinto, L. A. A. (2010). Optimization of *Spirulina platensis* convective drying: evaluation of phycocyanin loss and lipid oxidation. *International Journal of Food Science & Technology*, 45(8), 1572-1578. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2010.02299.x>
- [87] Chronakis, I. S., Galatanu, A. N., Nylander, T., & Lindman, B. (2000). The behaviour of protein preparations from blue-green algae (*Spirulina platensis* strain Pacifica) at the air/water interface. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 173(1-3), 181-192. [https://doi.org/10.1016/S0927-7757\(00\)00552-2](https://doi.org/10.1016/S0927-7757(00)00552-2)
- [88] Batista, A. P., Nunes, M. C., Fradinho, P., Gouveia, L., Sousa, I., Raymundo, A., & Franco, J. M. (2012). Novel foods with microalgal ingredients – Effect of gel setting conditions on the linear viscoelasticity of *Spirulina* and *Haematococcus* gels. *Journal of Food Engineering*, 110(2), 182-189. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.05.044>
- [89] Demarco, M., Babio, N., & Salas-Salvadó, J. (2022). Digestibility of amino acids in *Spirulina*: A systematic review. *Frontiers in Nutrition*, 9, 883213. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.883213>
- [90] Desmorieux, H., & Decaen, N. (2005). Convective drying of *Spirulina* in thin layer. *Journal of Food Engineering*, 66(4), 497-503. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.04.021>
- [91] Oliveira, E. G., Rosa, G. S., Moraes, M. A., & Pinto, L. A. A. (2009). Characterization of thin layer drying of *Spirulina platensis* utilizing perpendicular air flow. *Bioresource Technology*, 100(3), 1297-1303. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.05.052>
- [92] Desmorieux, H., Madiouli, J., Herraud, C., & Mouaziz, H. (2010). Effects of size and form of *Arthrospira platensis* biomass on the shrinkage and porosity during drying. *Journal of Food Engineering*, 100(4), 585-595. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.04.034>
- [93] Çelekli, A., Yavuzatmaca, M., & Bozkurt, H. (2009). An eco-friendly process: predictive modelling of copper adsorption from aqueous solution on *Spirulina platensis*. *Journal of Hazardous Materials*, 173(1-3), 123-129

- [94] Cha, K. H., Kang, S. W., Kim, C. Y., Um, B. H., Na, Y. R., & Pan, C. H. (2010). Effect of pressurized liquids on extraction of antioxidants from *Chlorella vulgaris*. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 58(8), 4756-4761
- [95] Soni, R. A., Sudhakar, K., & Rana, R. S. (2019). Comparative study on the growth performance of *Spirulina platensis* on modifying culture media. *Energy Reports*, 5, 327-336. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.02.009>
- [96] Işık, M. F., & Şanlıbaba, P. (2014). The effect of different concentrations of *Spirulina* on lipid oxidation and color characteristics in meatballs during refrigerated storage. *International Food Research Journal*, 21(2), 675-681
- [97] Phadke, S. S., & Srivastava, S. (2021). Protein extraction from *Spirulina*: Conventional processes and emerging technologies. *Food Reviews International*, 37(8), 878-901. <https://doi.org/10.1080/87559129.2020.1737708>
- [98] Raymundo, A., Gouveia, L., Batista, A. P., Empis, J., & Sousa, I. (2005). Fat mimetic capacity of *Chlorella vulgaris* biomass in oil-in-water food emulsions stabilized by pea protein. *Food Research International*, 38(8-9), 961-965. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2005.02.016>
- [99] Benelhadj, S., Gharsallaoui, A., Degraeve, P., Attia, H., & Ghorbel, D. (2016). Effect of pH on the functional properties of *Arthrospira* (*Spirulina*) *platensis* protein isolate. *Food Chemistry*, 194, 1056-1063. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.08.133>
- [100] Safi, C., Charton, M., Pignolet, O., Silvestre, F., Vaca-Garcia, C., & Pontalier, P. Y. (2013). Influence of microalgae cell wall characteristics on protein extractability and determination of nitrogen-to-protein conversion factors. *Journal of Applied Phycology*, 25(2), 523-529. <https://doi.org/10.1007/s10811-012-9886-1>
- [101] Hadiyanto, H., Nur, M. M. A., Hartanto, G. D., & Sukandar, S. (2018). The influence of drying methods and storage time on phycocyanin content and the functional properties of microalga *Spirulina platensis* protein concentrate. *Bulgarian Chemical Communications*, 50(Special Issue H), 116-121
- [102] Haque, F., Dutta, A., Thimmanagari, M., & Chiang, Y. W. (2016). Intensified green production of astaxanthin from *Haematococcus pluvialis*. *Food and Bioproducts Processing*, 99, 1-11
- [103] Jung, F., Krüger-Genge, A., Franke, R. P., Hufnagel, P., & Valjent, F. (2019). *Spirulina platensis*, a super food? *Journal of Cellular Biotechnology*, 5(1), 43-54. <https://doi.org/10.3233/JCB-189012>
- [104] De Marco, E. R., Steffolani, M. E., Martínez, C. S., & León, A. E. (2014). Effects of *Spirulina* biomass on the technological and nutritional quality of bread wheat pasta. *LWT - Food Science and Technology*, 58(1), 102-108. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.02.054>
- [105] Kepekçi, R. A., & Saygideger, S. D. (2012). Enhancement of phenolic compound production in *Spirulina platensis* by two-step batch mode cultivation. *Journal of Applied Phycology*, 24(4), 897-905. <https://doi.org/10.1007/s10811-011-9706-8>
- [106] Becker, E. W. (2007). Micro-algae as a source of protein. *Biotechnology Advances*, 25(2), 207-210. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2006.11.002>
- [107] Seghiri, R., Kharbach, M., & Essamri, A. (2019). Functional composition, nutritional properties, and biological activities of Moroccan *Spirulina* microalga. *Journal of Food Quality*, 2019, 3707219. <https://doi.org/10.1155/2019/3707219>
- [108] Batista, A. P., Gouveia, L., Bandarra, N. M., Franco, J. M., & Raymundo, A. (2013). Comparison of microalgal biomass profiles as novel functional ingredient for food products. *Algal Research*, 2(2), 164-173. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2013.01.004>
- [109] Safi, C., Zebib, B., Merah, O., Pontalier, P. Y., & Vaca-Garcia, C. (2014). Morphology, composition, production, processing and applications of *Chlorella vulgaris*: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 35, 265-278. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.04.007>
- [110] Morris, H. J., Almarales, A., Carrillo, O., & Bermúdez, R. C. (2008). Utilisation of *Chlorella vulgaris* cell biomass for the production of enzymatic protein hydrolysates. *Bioresource Technology*, 99(16), 7723-7729. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.01.080>
- [111] Harnedy, P. A., & FitzGerald, R. J. (2012). Bioactive peptides from marine processing waste and shellfish: A review. *Journal of Functional Foods*, 4(1), 6-24. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2011.09.001>
- [112] Bleakley, S., & Hayes, M. (2017). Algal proteins: Extraction, application, and challenges concerning production. *Foods*, 6(5), 33. <https://doi.org/10.3390/foods6050033>

- [113] Tesson, B., Gaillard, C., & Martin-Jézéquel, V. (2009). Insights into the polymorphism of the diatom *Phaeodactylum tricornutum* Bohlin. *Botanica Marina*, 52(2), 104-116. <https://doi.org/10.1515/BOT.2009.012>
- [114] Maisuthisakul, P., & Gordon, M. H. (2009). Antioxidant and tyrosinase inhibitory activity of mango seed kernel by product. *Food Chemistry*, 117(2), 332-341
- [115] Schwenzfeier, A., Wierenga, P. A., Eppink, M. H. M., & Gruppen, H. (2014). Effect of charged polysaccharides on the techno-functional properties of fractions obtained from algae soluble protein isolate. *Food Hydrocolloids*, 35, 9-18. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2013.07.022>
- [116] Agyei, D., & Danquah, M. K. (2011). Industrial-scale manufacturing of pharmaceutical-grade bioactive peptides. *Biotechnology Advances*, 29(3), 272-277
- [117] Lucas, B. F., Morais, M. G. D., Santos, T. D., & Costa, J. A. V. (2018). Spirulina for snack enrichment: Nutritional, physical and sensory evaluations. *LWT - Food Science and Technology*, 90, 270-276. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.12.040>
- [118] Niccolai, A., Zittelli, G. C., Rodolfi, L., Biondi, N., & Tredici, M. R. (2019). Microalgae of interest as food source: Biochemical composition and digestibility. *Algal Research*, 42, 101617. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2019.101617>
- [119] Grahl, S., Palanisamy, M., Strack, M., Meier-Dinkel, L., Toepfl, S., & Mörlein, D. (2018). Towards more sustainable meat alternatives: How technical parameters affect the sensory properties of extrusion products derived from soy and algae. *Journal of Cleaner Production*, 198, 962-971. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.041>
- [120] Lafarga, T., Fernández-Sevilla, J. M., González-López, C., & Acién-Fernández, F. G. (2020). Spirulina for the food and functional food industries. *Food Research International*, 137, 109356. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109356>
- [121] Dey, S., & Rathod, V. K. (2013). Ultrasound assisted extraction of β -carotene from *Spirulina platensis*. *Ultrasonics Sonochemistry*, 20(1), 271-276. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2012.05.010>

15. ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Lichtmikroskopische Aufnahme von Limnospira - frisch (A) und getrocknet (B) Quelle: Thomas, Y. (2025). Kunden-Akzeptanz-Studie von Mikroalgen als Lebensmittel und lebensmitteltechnologische Untersuchungen am Beispiel roh-veganer Spirulina. Masterarbeit, Hochschule Neubrandenburg. URN: urn:nbn:de:gbv:519-thesis-2024-0205-5. Open access: https://digibib.hs-nb.de/resolve/id/dbhsnb_thesis_0000003224	8
Abbildung 2: Spirulina (Limnospira maxima) Quelle: ALGENWERK c/o PUEVIT GmbH	11
Abbildung 3: Chlorella vulgaris Quelle: Dr.-Ing. Felix Krujatz	12
Abbildung 4: Haematococcus pluvialis Quelle: Dr.-Ing. Felix Krujatz	13
Abbildung 5: Dunaliella salina Quelle: J. Lukavský, 2018	13
Abbildung 6: Nannochloropsis Quelle: Prof.-Dr.-Ing. Markus Schubert, TU Dresden	13
Abbildung 7: Frische Spirulina von ALGENWERK - rein, unverarbeitet, vital Quelle: ALGENWERK c/o PUEVIT GmbH	14
Abbildung 8: Produktionsanlage im ALGENWERK Dresden [PUEVIT GmbH] Quelle: ALGENWERK c/o PUEVIT GmbH	23