

„Kunden-Akzeptanz-Studie von Mikroalgen als Lebensmittel und lebensmitteltechnologische Untersuchungen am Beispiel roh-veganer Spirulina“

Masterarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades

Master of Science im Fach Food Chain Environments

Hochschule Neubrandenburg



Fachbereich Agrarwirtschaft und Lebensmittelwissenschaften
Studiengang Food Chain Environments

Eingereicht von: **Yvonne Thomas**

1. Prüfer/in: Herr Prof. Dr. Michael Sandmann
2. Prüfer/in: Herr Dipl.-Ing. Gunnar Mühlstädt

URN-Nr: **urn:nbn:de:gbv:519-thesis-2024-0205-5**

Neubrandenburg, den **25.02.2025**

Inhaltsverzeichnis

Tabellenverzeichnis.....	IV
Abbildungsverzeichnis.....	V
Alphabetisches Abkürzungsverzeichnis.....	VI
Abstract (deutsch).....	VII
Abstract (englisch)	VIII
1. Einleitung.....	9
2. Methodik.....	11
2.1 Literaturrecherche	11
2.1.1 Suchstrategie	11
2.2 Verbraucher*innen-Befragung.....	13
2.2.1 Erhebungsmethode	14
2.2.2 Stichprobenauswahl und -größe	15
2.2.3 Aufbau des Fragebogens	16
2.2.4 Gesetze, Verordnungen und Datenschutz.....	20
2.3 Lebensmitteltechnologische Untersuchungen.....	21
2.3.1 Bestimmung der VOCs mittels Gaschromatographie mit Massenspektrometrie	23
2.3.1.1 Methodenentwicklung: Vorversuche zur Optimierung der GC-MS-Analyse	23
2.3.1.2 Finale HS-SPME GC-MS-Analyse	25
2.3.2 Humansensorische Analyse.....	26
2.3.2.1 Check-all-that-apply und Rate-all-that-apply	27
2.3.2.2 Geruchsbewertung mittels Skalenbewertung und freier Attributnennung	28
2.3.2.3 Planung und Durchführung der humansensorischen Analyse	28
2.4 Statistisches Vorgehen	30
3. Ergebnisse.....	31
3.1 Ergebnisse der Literaturrecherche.....	31
3.1.1 Taxonomie und Morphologie Limnospira.....	31
3.1.2 Nährstoffzusammensetzung von Limnospira	33
3.1.2.1 Proteine und Aminosäuren	34
3.1.2.2 Lipide und Fettsäuren.....	36
3.1.2.3 Kohlenhydrate	38
3.1.2.4 Vitamine	39
3.1.2.5 Mineralstoffe und Spurenelemente.....	40
3.1.2.6 Pigmente	41
3.1.2.7 Weitere sekundäre Pflanzenstoffe	42
3.1.2.8 Unterschiede in der frischen und getrockneten Biomasse von Limnospira	42
3.1.3 Potentielle nutraceutische Eigenschaften von Limnospira	44
3.1.4 Marktpotenzial von „Spirulina“	50
3.2 Ergebnisse der Verbraucher*innen-Befragung	52
3.2.1 Grundcharakteristik der Stichprobe.....	52

3.2.2 Einkaufsverhalten der Stichprobe.....	54
3.2.3 Wissen über Mikroalgen.....	55
3.2.4 Assoziation mit Mikroalgen bzw. Lebensmittel mit Mikroalgen.....	56
3.2.5 Einstellung gegenüber Mikroalgen.....	57
3.2.6 Bereitschaft zum Verzehr von Mikroalgen bzw. Lebensmittel mit Mikroalgen	58
3.2.7 Konsumformen und Präferenzen für Mikroalgenprodukte	60
3.2.8 Kaufbereitschaft gegenüber Produkten mit Mikroalgen	63
3.2.9 Zahlungsbereitschaft für mikroalgenhaltige Produkte	64
3.2.10 Akzeptanz gegenüber Mikroalgen bzw. Mikroalgen in Lebensmitteln.....	65
3.2.11 Gesundheitsinteresse und Nachhaltigkeitsbewusstsein.....	65
3.2.12 Einstellung gegenüber neuen Lebensmittel-/technologien.....	66
3.2.13 Korrelationen zwischen der Einstellung, der Akzeptanz und weiteren Variablen	67
3.3 Ergebnisse der lebensmitteltechnologischen Untersuchungen.....	69
3.3.1 Bestimmung der flüchtigen Verbindungen mittels GC-MS-Analyse.....	69
3.3.1.1 VOC-Profiles der frischen Biomasse unter verschiedenen Temperaturbedingungen....	69
3.3.1.2 VOC-Profiles in der frischen und der getrockneten Biomasse	71
3.3.1.2 VOC-Profiles in den Spirulina- und Chlorella-Pulvern unterschiedlicher Herkunft	72
3.3.2 Ergebnisse der humansensorischen Analyse	76
3.3.2.1 Check-all-that-apply und Rate-all-that-apply	76
3.3.2.2 Geruchsbewertung mittels Skalenbewertung und freier Attributnennung	80
3.3.3 Zusammenhang zwischen den identifizierten VOCs und Geruchsattributen	81
4. Diskussion der Ergebnisse	82
4.1. Literaturrecherche	82
4.2. Verbraucher*innen Befragung	85
4.3 Lebensmitteltechnologische Untersuchung	91
4.3.1 Bestimmung der flüchtigen Verbindungen mittels Analyse GC-MS-Analyse.....	91
4.3.2 Humansensorische Analyse.....	97
5. Stärken und Limitationen der vorliegenden Arbeit	101
5.1 Literaturrecherche	101
5.2 Verbraucher*innen Befragung	102
5.3 Lebensmitteltechnologische Untersuchungen	104
5.3.1 Bestimmung der flüchtigen Verbindungen mittels GC-MS-Analyse.....	104
5.3.2 Humansensorische Analyse.....	106
6. Zusammenfassung und Schlussfolgerung	107
7. Literaturverzeichnis.....	109
8. Danksagung	118
9. Anhang.....	119
10. Eidesstattliche Versicherung.....	159

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Systematische Suchstrategie: Schlüsselbegriffe für die Literaturrecherche	12
Tabelle 2: Minimal erforderliche Stichprobengröße ^[36]	15
Tabelle 3: Berechnung der minimal erforderlichen Stichprobengröße	16
Tabelle 4: Kategorisierung des Nachhaltigkeitsbewusstseins und Interpretation der Punktzahlen	19
Tabelle 5: Berechnung und Cut-off Werte und Kategorisierung der FNS-Kategoriein	19
Tabelle 6: Berechnung und Cut-off Werte und Kategorisierung der FTNS-Kategoriein.....	20
Tabelle 7: Zuordnung der Proben zu den Lagerbedingungen und Replikaten	23
Tabelle 8: Übersicht der analysierten Spirulina- und Chlorella-Pulver	24
Tabelle 9: Einstufung der Übereinstimmungsqualität nach NIST-Richtlinien.....	26
Tabelle 10: Nährstoffzusammensetzung von Limnospira bezogen auf 100g TS	33
Tabelle 11: Aminosäurezusammensetzung von Limnospira in g/100g TS	35
Tabelle 12: Fettsäurezusammensetzung von Limnospira in % des Gesamtfettgehaltes	37
Tabelle 13: Vitaminzusammensetzung in Limnospira bezogen auf 100 g TS	39
Tabelle 14: Mineralstoff- und Spurenelementgehalt in Limnospira in mg/100g TS.....	41
Tabelle 15: Pigmentgehalt in Limnospira in mg/g TS	41
Tabelle 16: Nutraceutische Potentiale der bioaktiven Inhaltsstoffe in Limnospira ^[12-17, 165]	44
Tabelle 17: Übersicht über randomisiert kontrollierte Studien zu Limnospira	49
Tabelle 18: Übersicht der Grundcharakteristika der untersuchten Stichprobe	53
Tabelle 19: Korrelationen zwischen Einstellung bzw. Akzeptanz und weiteren Variablen.....	68
Tabelle 20: Relative Häufigkeiten und Geruchsbeschreibungen der nachgewiesenen VOCs in der frischen Biomasse unter verschiedenen Temperaturbedingungen	69
Tabelle 21: Relative Häufigkeiten und Geruchsbeschreibungen der nachgewiesenen VOCs – Vergleich der frischen und getrockneten Biomasse.....	71
Tabelle 22: Relative Häufigkeiten und Geruchsbeschreibungen der nachgewiesenen VOCs in Spirulina- und Chlorella-Pulvern unterschiedlicher Herkunft.....	72

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Entwicklung, Überprüfung und Durchführung der Verbraucher*innen-Befragung	14
Abbildung 2: Versuchsablauf der chemischen und humansensorischen Analyse.....	22
Abbildung 3: Lichtmikroskopische Aufnahme von <i>L. maxima</i> (A) und <i>L. platensis</i> (B) [96].....	32
Abbildung 4: Lichtmikroskopische Aufnahme von Limnospira - frisch (A) und getrocknet (B).....	42
Abbildung 5: Ergebnisse der PubMed Suche zu Arthrospira und Gesundheit.....	49
Abbildung 6: Verteilung der monatlichen Ausgaben für Lebensmittel in der Stichprobe	54
Abbildung 7: Präferierte Einkaufsorte für den Lebensmitteleinkauf in der Stichprobe	54
Abbildung 8: Auswahlkriterien für Lebensmittel in der Stichprobe	55
Abbildung 9: Vertrautheit mit Mikroalgen in der Stichprobe	55
Abbildung 10: Selbsteinschätzung des Wissens über Mikroalgen in der Stichprobe Stichprobe	55
Abbildung 11: Assoziationen mit Mikroalgen bzw. Lebensmittel mit Mikroalgen in der Stichprobe	57
Abbildung 12: Generelle Einstellung gegenüber Mikroalgen in der Stichprobe	57
Abbildung 13: Wahrnehmung von Mikroalgen in der Stichprobe	58
Abbildung 14: Erfahrungen mit dem Verzehr von Mikroalgen in der Stichprobe	58
Abbildung 15: Bereitschaft zum Verzehr von Mikroalgen bzw. Lebensmittel mit Mikroalgen	59
Abbildung 16: Motivationsfaktoren für den Verzehr von Mikroalgen/-produkte.....	60
Abbildung 17: Darreichungsform von Mikroalgen in der Stichprobe	60
Abbildung 18: Angaben zu der Eignung von Mikroalgen in verschiedenen Produktkategorien	61
Abbildung 19: Wichtige Aspekte bei der Bewertung von Mikroalgenprodukten in der Stichprobe	62
Abbildung 20: Kaufbereitschaft gegenüber Produkten mit Mikroalgen in der Stichprobe	63
Abbildung 21: Zahlungsbereitschaft gegenüber Mikroalgenprodukte in der Stichprobe	64
Abbildung 22: Preisakzeptanz für Mikroalgen-produkte in der Stichprobe.....	64
Abbildung 23: Preisakzeptanz für frische Mikroalgen in der Stichprobe	65
Abbildung 24: Akzeptanz von frischen und verarbeiteten Mikroalgen in der Stichprobe	65
Abbildung 25: Kategorisierte Einteilung der Stichprobe nach Gesundheitsinteresse	65
Abbildung 26: Einstellung zum Thema Nachhaltigkeit (A) und Kategorisierung anhand des Nachhaltigkeitsbewusstseins (B).....	66
Abbildung 27: Einteilung der Stichprobe anhand der Food Neophobia Scale.....	66
Abbildung 28: Einstellung gegenüber neuen Lebensmitteltechnologien (A) und Kategorisierung anhand der FTNS (B).....	67
Abbildung 29: Relative Häufigkeit der geruchsgebenden VOCs in der frischen Biomasse unter verschiedenen Temperaturbedingungen.....	70
Abbildung 30: Relative Häufigkeit der geruchsgebenden VOCs in Spirulina- und Chlorella-Pulvern unterschiedlicher Herkunft, Teil 1.....	74
Abbildung 31: Relative Häufigkeit der geruchsgebenden VOCs in Spirulina- und Chlorella-Pulvern unterschiedlicher Herkunft, Teil 2.....	75
Abbildung 32: Häufigkeit der ausgewählten Attribute (%) unter den verschiedenen Temperaturbedingungen.....	77
Abbildung 33: Intensitätsbewertung der sensorischen Attribute unter verschiedenen Temperaturbedingungen (MW ± SD)	78
Abbildung 34: Differenz zwischen den wahrgenommenen Geruchsintensitäten.....	80
Abbildung 35: Absolute Antworthäufigkeiten der freien Attributnennung	80
Abbildung 36: Ergebnisse der Hauptkomponentenanalyse zwischen den identifizierten VOCs und Geruchsattributen	81

Alphabetisches Abkürzungsverzeichnis

ANOVA	Einfaktorielle Varianzanalyse
CAGR.....	Compound Annual Growth Rate
CATA.....	Check-all-that-apply
DHA.....	Docosahexaensäure
EFSA.....	Europäische Behörde für Lebensmittelsicherheit
EPA.....	Eicosapentaensäure
EPS.....	Exopolysaccharide
FAO.....	Food and Agriculture Organization
FDA.....	Food and Drug Administration
FNS.....	Food Neophobia Scale
FTNS.....	Food Technology Neophobia Scale
GC-MS.....	Gaschromatographie mit Massenspektrometrie
GHI.....	General Health Interest
GRAS.....	Generally Recognized as Safe
HS-SPME.....	Headspace-Solid-Phase Microextraction
ICN.....	International Code of Nomenclature for algae, fungi, and plants
IPS.....	intrazelluläre Polysaccharide
Limnospira maxima.....	L. maxima
MUFA	Monounsaturated Fatty Acids
NaCl	Natriumchlorid
NIST	National Institute of Standard and Technology
NPN	Nicht-Protein-Stickstoff
PCA	Hauptkomponentenanalyse
PUFA.....	Mehrfach ungesättigte Fettsäure (Polyunsaturated Fatty Acid)
RATA	Rate-all-that-apply
RCT	randomisierte kontrollierte Studien
SC	Sustainability Consciousness
SDGs	Sustainable Development Goals
SFA.....	Saturated Fatty Acids
TS	Trockensubstanz
VOCs.....	flüchtige organische Verbindungen
WTB	Willingness to Buy
WTP	Willingness to Pay
WTT	Willingness to Try

Abstract (deutsch)

Hintergrund: Trotz hoher Nährstoffdichte und vielseitiger Einsatzmöglichkeiten bestehen in westlichen Ländern Vorbehalte gegenüber Mikroalgen und Cyanobakterien. Diese Arbeit untersucht die Akzeptanz von Mikroalgen im deutschsprachigen Raum sowie die chemischen, sensorischen und ernährungsphysiologischen Eigenschaften von *Limnospira*. Ziel ist es, Potenziale und Herausforderungen ihrer Integration in die Ernährung zu bewerten und Optimierungsansätze zu identifizieren.

Methoden: Die Arbeit kombiniert eine umfassende Literaturrecherche, eine Verbraucher*innen-Umfrage (n=557) und lebensmitteltechnologische Analysen. Die Literaturrecherche fokussierte die Nährstoffzusammensetzung und die ernährungsphysiologische sowie nutraceutische Wirkung von *Limnospira*. Die Umfrage erfassste unter anderem die Einstellung und Akzeptanz gegenüber Mikroalgen sowie weitere relevante Faktoren. Mittels GC-MS-Analyse wurden VOCs in der frischen *Limnospira maxima*-Biomasse (-18°C, +4°C, +20°C, +99°C) sowie in verschiedenen Spirulina-Pulvern untersucht. Parallel erfolgte eine humansensorische Untersuchung unter verschiedenen Temperaturbedingungen (-18°C, +4°C, +20°C, +99°C) der frischen Biomasse mittels RATA- und CATA-Methoden.

Resultate: Die Umfrage zeigte, dass Nachhaltigkeit und gesundheitliche Vorteile Hauptmotive für den Konsum sind, während sensorische Barrieren und mangelndes Wissen als größte Hürden identifiziert wurden. Die GC-MS-Analyse zeigte temperaturabhängige Unterschiede in der VOC-Zusammensetzung der frischen Biomasse sowie Variationen zwischen den Pulvern, die insgesamt eine höhere Anzahl an VOCs aufwiesen als die frische Biomasse. Die humansensorische Analyse der frischen Biomasse zeigte ebenfalls temperaturabhängige Unterschiede. Zudem wurden sensorische Veränderungen über die Zeit beobachtet.

Konklusion: Mikroalgen und Cyanobakterien bieten vielversprechende Ansätze für eine gesunde und nachhaltige Ernährung, doch ihre Marktfähigkeit erfordert gezielte Optimierungen. Neben einer verbesserten Verbraucher*innenaufklärung spielen Preisstrukturen und Geschmack eine zentrale Rolle. Die mildere sensorische Ausprägung und ernährungsphysiologischen Vorteile frischer Biomasse gegenüber Pulvern könnten die Akzeptanz steigern

Anzahl der Wörter: 246

Schlüsselwörter: Mikroalgen, *Limnospira*, Spirulina, Cyanobakterien, GC-MS, VOCs, flüchtige organische Verbindungen, sensorische Analyse, Verbraucherakzeptanz, nachhaltige Ernährung, funktionelle Lebensmittel, Lebensmitteltechnologie, Humansensorik, RATA, CATA, Geruchsprofil, Nährstoffzusammensetzung

Abstract (englisch)

Background: Despite their high nutrient density and diverse applications, microalgae and cyanobacteria face consumer hesitancy in Western countries. This study examines the acceptance of microalgae in German-speaking regions, along with the chemical, sensory, and nutritional properties of *Limnospira maxima*. The objective is to evaluate their potential for dietary integration, identify challenges, and explore optimization strategies.

Methods: This study combines a comprehensive literature review, a consumer survey ($n = 557$), and food technological analyses. The literature review focused on the nutrient composition and nutritional as well as nutraceutical properties of *Limnospira*. The survey assessed attitudes, acceptance, and relevant consumer factors. GC-MS analysis was conducted to examine VOCs in fresh *L. maxima* biomass (-18°C, +4°C, +20°C, +99°C) and various Spirulina powders. Additionally, a human sensory analysis was performed on fresh biomass under different temperature conditions (-18°C, +4°C, +20°C, +99°C) using RATA and CATA methods.

Results: The survey revealed that sustainability and health benefits are key motivators for consumption, while sensory attributes and lack of awareness pose major barriers. The GC-MS analysis showed temperature-dependent differences in VOC composition within fresh biomass and variations between powders, which contained a higher overall number of VOCs. Sensory analysis confirmed temperature-dependent differences in fresh biomass perception, with additional temporal changes observed.

Conclusion: Microalgae and cyanobacteria offer promising potential for sustainable and nutritious diets, yet market acceptance requires targeted improvements. Consumer education, pricing strategies, and taste optimization are key factors. The milder sensory profile and nutritional benefits of fresh biomass compared to powders could enhance acceptance.

Word count: 248

Keywords: Microalgae, *Limnospira*, Spirulina, cyanobacteria, GC-MS, VOCs, volatile organic compounds, sensory analysis, consumer acceptance, sustainable nutrition, functional foods, food technology, human sensory analysis, RATA, CATA, odor profile, nutrient composition

1. Einleitung

Die globale Ernährungssicherheit ist durch das rasche Bevölkerungswachstum, den Klimawandel und den fortschreitenden Verlust natürlicher Ressourcen zunehmend gefährdet. Diese Faktoren stellen erhebliche Belastungen für bestehende Lebensmittelsysteme dar, die mit negativen ökologischen und gesundheitlichen Auswirkungen einhergehen [1]. Im Gegensatz dazu definiert die Food and Agriculture Organization (FAO) der Vereinten Nationen eine nachhaltige Ernährung als eine Ernährungsweise, die „geringe Auswirkungen auf die Umwelt hat und zur Lebensmittel- bzw. Ernährungssicherheit sowie zu einem gesunden Leben für heutige und künftige Generationen beiträgt“ [2]. Allerdings ist die aktuelle Lebensmittelproduktion und der Konsum in vielen Fällen nicht nachhaltig, da sie mit Umweltbelastungen, dem Rückgang der biologischen Vielfalt und der Übernutzung natürlicher Ressourcen einhergehen. Die derzeitigen Lebensmittelsysteme führen zudem zu negativen Auswirkungen auf Wasser und Boden, zum Verlust der biologischen Vielfalt und zu übermäßigen Treibhausgasemissionen [3].

Trotz dieser negativen Auswirkungen muss die Nahrungsmittelproduktion laut FAO bis zum Jahr 2050 um mindestens 60 % erhöht werden, um den Bedarf der wachsenden Weltbevölkerung decken zu können, die aktuellen Prognosen zufolge auf etwa 9,7 Mrd. Menschen anwachsen wird. Die FAO betont dabei, dass eine solche Steigerung der Nahrungsmittelproduktion jedoch nicht nur quantitative, sondern auch qualitative Aspekte berücksichtigen muss, wie z.B. die Verwendung von nachhaltigen Landwirtschafts- und Ernährungsmethoden, um die Umwelt und die Ressourcen zu schützen [4]. Eine nachhaltige Transformation der Landwirtschaft und Lebensmittelsysteme im Einklang mit den Zielen für eine nachhaltige Entwicklung (Sustainable Development Goals (SDGs)) wird somit als zentrale Voraussetzung für eine zukunftsfähige Ernährungssicherung angesehen [1]. Vor dem Hintergrund dieser Herausforderungen wird die Entwicklung alternativer Nahrungsquellen mit hoher ernährungsphysiologischer Qualität und geringem ökologischen Fußabdruck immer wichtiger [5].

Mikroalgen und Cyanobakterien, bieten in diesem Kontext vielversprechende Lösungsansätze. Diese Organismen können unter ressourcenschonenden Bedingungen hochwertige Nährstoffe wie Proteine, essentielle Fettsäuren, Vitamine und Mineralstoffe bereitstellen [6-11]. Zudem weisen Mikroalgen und Cyanobakterien potenzielle gesundheitliche Vorteile auf, darunter antioxidative, entzündungshemmende antidiabetische Eigenschaften [12-17]. Ihr hoher Biomasseertrag pro Fläche (7- bis 20-mal mehr Biomasse pro Fläche als Soja oder Mais) und die Möglichkeit, sie unter anderem auch auf nicht landwirtschaftlich nutzbaren Flächen anzubauen, machen sie zu einer nachhaltigen Alternative [17]. Sie sind, als eigenständiges Lebensmittel oder als Zutat in verarbeiteten Produkten, vielseitig einsetzbar und können in frischer, fermentierter, getrockneter oder gefrorener Form verzehrt werden [18]. Trotz dieser Potenziale wird der Einsatz von Mikroalgen und Cyanobakterien in der europäischen Ernährung bislang nur in Nischenmärkten wahrgenommen. Während Algenprodukte in asiatischen Ländern wie Japan oder Korea seit Jahrhunderten als Lebensmittel etabliert sind, stoßen sie in westlichen Ländern auf Vorbehalte, insbesondere in Bezug auf ihre Farbe, ihren Geruch und ihren Geschmack. Diese Einstellungen sowie eine mangelnde Akzeptanz stellen Barrieren für ihre Integration in die westliche Ernährung

dar [19]. Um diese Hindernisse zu überwinden, sind sowohl die Entwicklung innovativer Produkte als auch die Untersuchung der Wahrnehmungen, Einstellungen und Akzeptanz der Verbraucher*innen essenziell. Bislang mangelt es jedoch an Studien, die die Akzeptanz von Mikroalgen bzw. Cyanobakterien im europäischen Kontext systematisch analysieren. Die vorliegende Arbeit adressiert diese Forschungslücke durch eine mehrdimensionale Herangehensweise.

Im Rahmen einer umfassenden Literaturrecherche wurde insbesondere das Cyanobakterium *Limnospira* untersucht, das in der Literatur häufig noch als *Spirulina* oder *Arthrosphaera* bezeichnet wird. In dieser Arbeit wird jedoch der Name *Limnospira* verwendet, da er die wissenschaftlich korrekte Bezeichnung für die industriell genutzten Stämme ist. Die frühere Einordnung unter *Spirulina* ist taxonomisch überholt und führt oft zu Verwirrung [20], weshalb hier die aktuelle Nomenklatur berücksichtigt wird. Auch die Bezeichnung *Arthrosphaera* wird nicht verwendet, da neuere taxonomische Erkenntnisse diese Stämme eindeutig *Limnospira* zuordnen [20-23]. Dennoch wurden auch Publikationen einbezogen, die die Bezeichnung *Spirulina* oder *Arthrosphaera* verwenden, da in vielen Studien die taxonomische Zuordnung uneindeutig ist. Häufig werden Stämme als *Spirulina* bezeichnet, obwohl es sich tatsächlich um *Arthrosphaera* bzw. *Limnospira* handelt [21]. Insbesondere ältere Arbeiten vor der taxonomischen Neufassung 2019 konnten den Namen *Limnospira* noch nicht verwenden. Um eine umfassende Analyse der wissenschaftlichen Datenlage zu gewährleisten, wurden daher auch Studien berücksichtigt, die unter abweichender Nomenklatur relevante industrielle Stämme untersuchten.

Der Schwerpunkt der Literaturrecherche lag insbesondere auf der Nährstoffzusammensetzung sowie den ernährungsphysiologischen und ernährungstherapeutischen Wirkungen von *Limnospira*. Darüber hinaus wurde eine Befragung durchgeführt, um die Wahrnehmungen, Einstellungen und Akzeptanz der Bevölkerung gegenüber Mikroalgen im Allgemeinen sowie deren Verwendung in und als Lebensmittel zu erfassen. Ergänzend dazu wurden lebensmitteltechnologische Untersuchungen an der frischen Biomasse von *Limnospira maxima* durchgeführt, welche sowohl eine humansensorische Analyse als auch eine GC-MS-Analyse der flüchtigen organischen Verbindungen (VOCs) umfasste. Zusätzlich wurde die GC-MS-Analyse zum Vergleich auch an getrockneter *L. maxima*-Biomasse sowie an verschiedenen Spirulina-Pulvern und einem Chlorella-Pulver durchgeführt.

Ziel dieser Arbeit war es, das Potenzial von Mikroalgen und Cyanobakterien als nachhaltige und ernährungsphysiologisch wertvolle Nahrungsquelle zu bewerten sowie ihre Akzeptanz in der Bevölkerung und ihre humansensorischen Eigenschaften systematisch zu untersuchen. Die Ergebnisse sollen ein fundiertes Verständnis der Chancen und Herausforderungen ihrer Integration in die menschliche Ernährung ermöglichen und wertvolle Impulse für die Entwicklung nachhaltiger, akzeptierter und technologisch optimierter Lebensmittel liefern.

2. Methodik

2.1 Literaturrecherche

Es existieren zahlreiche wissenschaftliche Studien zur Nährstoffzusammensetzung und den potenziell gesundheitsfördernden Eigenschaften von *Limnospira*. Diese unterscheiden sich jedoch erheblich in Fragestellung, Methodik und Qualität. Die Forschungslage ist umfangreich und erstreckt sich zudem über verschiedene Disziplinen wie Biochemie, Ernährungswissenschaften und Medizin. Um ein umfassendes und differenziertes Verständnis der ernährungswissenschaftlichen und -therapeutischen Potenziale dieses Cyanobakteriums zu erlangen und zu bewerten, ist es notwendig, den aktuellen Stand der wissenschaftlichen Erkenntnisse zu erfassen. Aus diesem Grund wurde im Rahmen dieser Arbeit eine umfassende Literaturrecherche zum Thema *Limnospira* durchgeführt, mit einem besonderen Fokus auf die Nährstoffzusammensetzung sowie den möglichen ernährungsphysiologischen und ernährungstherapeutischen Wirkungen. Dabei wurde ein strukturiertes Vorgehen angewandt, um relevante wissenschaftliche Publikationen zu identifizieren, zu bewerten und zusammenzufassen. Ziel war es, eine umfassende und qualitativ hochwertige Datengrundlage zu schaffen.

2.1.1 Suchstrategie

Um eine detaillierte und präzise Übersicht über die aktuelle Forschung zum Thema *Limnospira* zu gewährleisten, wurde für die Literaturrecherche eine gezielte und strukturierte Suchstrategie entwickelt. Die Recherche wurde in mehreren wissenschaftlichen Datenbanken durchgeführt, um relevante Quellen umfassend abzudecken und Forschungslücken zu minimieren. Die primären Datenbanken für die Recherche waren PubMed, SpringerLink und Google Scholar (ergänzend für graue Literatur).

Für jede Datenbank wurde ein konsistenter Suchstring entwickelt, der relevante Schlüsselbegriffe wie „*Limnospira*“, „nutrient composition“ oder „health benefits“ umfasste (vgl. Tabelle 1). Dabei wurden Schlagwörter und Begriffskombinationen gewählt, die die Themenfelder Nährstoffzusammensetzung und ernährungsphysiologische bzw. ernährungstherapeutische Aspekte abdecken. Die Begriffe wurden mit logischen Operatoren wie „AND“, „OR“ und „NOT“ kombiniert, um die Suche zu verfeinern und die relevanten Publikationen zu extrahieren. Eine beispielhafte Suchstrategie lautete: („*Limnospira*“ OR „*Spirulina*“ OR „*Arthrospira*“) AND („health benefits“ OR „therapeutic potential“ OR „nutritional value“ OR „dietary supplement“). Um eine möglichst vollständige Sammlung von Quellen zu erhalten, wurden zusätzlich die Referenzen der identifizierten Publikationen überprüft, um weitere relevante Arbeiten zu ermitteln, die möglicherweise nicht direkt in den verwendeten Datenbanken aufgeführt waren. Es wurden ausschließlich Artikel in englischer und deutscher Sprache berücksichtigt. Konferenzbeiträge und nicht relevante graue Literatur wurden ausgeschlossen. Zur weiteren Eingrenzung wurden folgende Filtersysteme angewandt:

- Themenfelder (z.B. "Nutrition", "Food Science", "Health", "Human")
- Publikationsarten (z.B. "Original Research", "Systematic Review", "Meta-Analysis")
- Zugriff auf Volltexte (z.B. Open Access)

Tabelle 1: Systematische Suchstrategie: Schlüsselbegriffe für die Literaturrecherche

Thema	„Limnospira“, „Arthrospira“, „Spirulina“
Nährstoffzusammensetzung	„nutrient composition“, „nutritional profile“, „nutritional assessment“, „macronutrients“, „micronutrients“, „bioactive compounds“, „biochemical analysis“
Gesundheitsvorteile	„health benefits“, „therapeutic potential“, „nutritional value“, „dietary supplement“
Ernährungsphysiologie	„antioxidant properties“, „immunomodulation“, „lipid metabolism“, „blood sugar“, „blood pressure“, „anti-inflammatory“, „weight management“
Ernährungstherapie	„malnutrition“, „chronic diseases“, „inflammatory diseases“, „cardiovascular diseases“, „metabolic syndrome“, „diabetes“, „hypertension“, „obesity“
Methodiken	„randomized controlled trial“, „clinical study“, „placebo-controlled trial“, „double-blind study“, „dietary intervention“, „comparative study“

Zur Sicherstellung der Relevanz und Qualität der ausgewählten Literatur wurden zudem folgende Ausschlusskriterien definiert:

- Studien mit unzureichender Methodentransparenz
- Artikel, die sich ausschließlich auf industrielle Anwendungen/ ökologische Aspekte beziehen
- Nichtwissenschaftliche Quellen (z.B. Blogs, populärwissenschaftliche Artikel)

Durch die angewandte Suchstrategie wurde eine umfassende, relevante und wissenschaftlich hochwertige Literaturbasis geschaffen. Die Suchergebnisse wurden in EndNote® (Version 20.5, Clarivate Analytics) zusammengeführt, um die Quellen effizient zu verwalten. Doppelte Einträge wurden automatisch erkannt und entfernt. Durch eine manuelle Kontrolle wurde sichergestellt, dass keine relevanten Quellen übersehen wurden. Zudem wurde jedes Ergebnis auf Relevanz und Qualität geprüft, sodass nur wissenschaftlich bedeutende Arbeiten berücksichtigt wurden. Der Schwerpunkt lag auf der Hervorhebung konsistenter Erkenntnisse, der kritischen Diskussion widersprüchlicher Ergebnisse und der Identifikation möglicher Forschungslücken.

2.2 Verbraucher*innen-Befragung

Der Einsatz von Mikroalgen in der europäischen Ernährung ist derzeit vorwiegend auf Nischenmärkte beschränkt, da ihre Akzeptanz durch bestehende Vorbehalte beeinträchtigt wird [19]. Gleichzeitig ist in den letzten Jahren ein zunehmendes Interesse der Verbraucher*innen an funktionellen Lebensmitteln [24, 25] sowie an algenbasierten Produkten [26] zu beobachten. Diese Kombination eröffnet zwar neue Möglichkeiten für die innovative Nutzung von Mikroalgen in der Lebensmittelindustrie, allerdings ist unklar, inwieweit die Verbraucher*innen bereit sein werden, Mikroalgen bzw. Lebensmittel auf Mikroalgenbasis anzunehmen [27]. Die Akzeptanz der Verbraucher*innen, die von zahlreichen (ernährungsphysiologischen) Faktoren abhängt, ist entscheidend für den Erfolg neuartiger Lebensmittel [19].

Erwartungen und Einstellungen der Verbraucher*innen an ein Produkt spielen hinsichtlich der Akzeptanz eine entscheidende Rolle. Mikroalgen und Cyanobakterien können die Farbe und den Geschmack von Lebensmitteln verändern. Die Verbraucher*innen könnten aufgrund möglicher negativer Assoziationen, etwa einem vermeintlich fischigen Geschmack bzw. Geruch oder einer grünen Farbe, skeptisch gegenüber Lebensmitteln auf Mikroalgenbasis sein [19]. Die Erwartung an den Geschmack kann bei funktionellen Lebensmitteln noch entscheidender sein als bei herkömmlichen Lebensmitteln, da diese Lebensmittel meist teurer sind und die Verbraucher*innen zum Ausgleich einen ausgezeichneten Geschmack erwarten [28]. Die Erwartungen und Einstellungen der Verbraucher*innen wirken sich somit auf die Kaufabsicht und Zahlungsbereitschaft solcher Lebensmittel aus [28].

Weiterhin werden sich die Verbraucher*innen zunehmend der körperlichen und planetaren Folgen ihrer Konsumententscheidungen bewusst und sind eher bereit, umweltverträgliche als auch gesundheitlich vorteilhafte Produkte zu wählen [29, 30], weshalb ein ausgeprägtes Gesundheitsinteresse bzw. Umweltbewusstsein die Einstellung der Verbraucher*innen zu dieser Art von Lebensmitteln positiv beeinflussen kann [31]. Voraussetzung hierfür ist allerdings das Vorhandensein eines angemessenen Wissens über Mikroalgen bei den Verbraucher*innen. Ob die Verbraucher*innen über dieses Wissen verfügen, ist jedoch fraglich. Wahrscheinlicher ist, dass ihr Wissen über Mikroalgen begrenzt ist und sie sich der gesundheitlichen und ökologischen Vorteile nicht vollständig bewusst sind [31].

Auch kulinarische Traditionen spielen eine wichtige Rolle. So hängt der Grad der Akzeptanz von mikroalgenhaltigen Erzeugnissen weitestgehend von der traditionellen Ernährung der Zielbevölkerung ab. In vielen asiatischen Ländern ist der Zusatz von Mikroalgen in Lebensmitteln sehr verbreitet, in Europa hingegen sind Mikroalgen keine traditionellen Zutaten, und ihre Verwendung wird als eine spürbare Veränderung in der Lebensmittelproduktion angesehen [19]. Lebensmittel auf Mikroalgenbasis sind in der westlichen Ernährung immer noch sehr neu und besitzen noch keine signifikante Konsumgeschichte. Daher ist es weiterhin notwendig, den Einfluss der Verbraucher*innen-Einstellungen gegenüber innovativen Lebensmitteln sowie ihre Abneigung gegenüber neuartigen Produkten zu berücksichtigen. Neophobie kann verhindern, dass Verbraucher*innen gesunde, alternative Versionen bekannter Produkte probieren, und so die Akzeptanz hemmen [32].

Bisher gibt es kaum detaillierte Erkenntnisse über den Zusammenhang der beschriebenen Faktoren und die daraus resultierenden Herausforderungen für Mikroalgen bzw. Lebensmittel auf Mikroalgenbasis. Aus diesem Grund wurde eine Verbraucher*innen-Befragung durchgeführt, um zu untersuchen, wie Einstellungen, Wissen sowie (ernährungsphysiologische) Faktoren wie die Food Neophobia, die Food Technology Neophobia, das Nachhaltigkeitsbewusstsein und das Gesundheitsinteresse die Akzeptanz und Einstellung gegenüber Mikroalgen beeinflussen. Zusätzlich wurde die Kaufbereitschaft der Verbraucher*innen für mikroalgenhaltige Produkte untersucht, einschließlich der Zahlungsbereitschaft für höhere Preise. Zudem wurden Hauptgründe für Kauf oder Ablehnung ermittelt.

2.2.1 Erhebungsmethode

Bei der durchgeführten Befragung handelte es sich um eine anonymisierte Querschnittsstudie in Form einer standardisierten quantitativen Online-Befragung. Die Form der Online-Befragung wurde gewählt, um in kürzester Zeit sowohl eine möglichst große und heterogene Stichprobe sowie qualitativ hochwertige Daten zu gewinnen. Online-Umfragen kommen in der empirischen Markt- und Sozialforschung zunehmend zum Einsatz. Darüber hinaus sind Online-Befragungen im Vergleich zu anderen Befragungsmethoden mit weniger zeitlichem Aufwand bei der Erhebung und Auswertung der Daten sowie geringeren Kosten verbunden [33]. Zudem erhöht die internetgestützte Datenerhebung die Teilnahmebereitschaft, indem die Befragungspersonen selbst entscheiden, ob bzw. wann, wo und mit welchem internetfähigen Gerät (Laptop, Smartphone oder Tablet) sie an der Befragung teilnehmen [33]. Die Befragung wurde auf Grundlage eines standardisierten Fragebogens durchgeführt, um eine Vergleichbarkeit der Antworten sicherstellen zu können. Die Konstruktion und Durchführung des Online-Fragebogens erfolgte mithilfe der Online-Software „Limesurvey“ (www.limesurvey.org/de). Dabei handelt es sich um eine benutzerfreundliche interaktive Software, die verschiedene Skalierungstechniken (z.B. Schieberegler) und visuelle Darstellungsformate unterstützt. Dies trägt zur Gestaltung eines ansprechenden Fragebogens bei und erhöht die Motivation der Teilnehmenden [33].

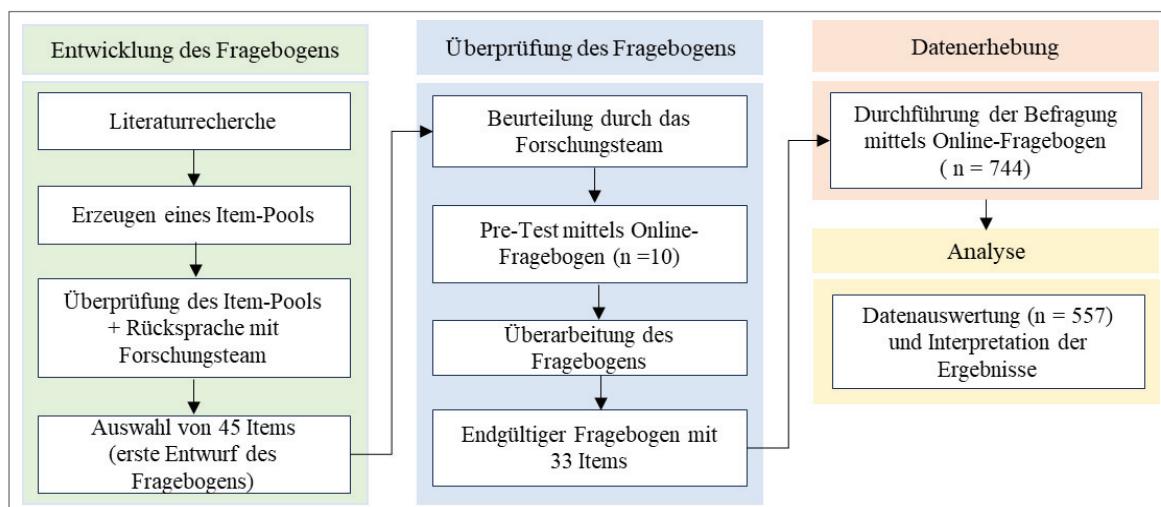


Abbildung 1: Entwicklung, Überprüfung und Durchführung der Verbraucher*innen-Befragung

Um vor der Durchführung der Hauptbefragung mögliche Fehlerquellen des Fragebogens identifizieren und minimieren zu können, wurde vorab ein Pretest durchgeführt. Das Hauptziel des Pretests war die Prüfung, ob der Fragebogen das Forschungsvorhaben angemessen abbildet. Weitere Ziele waren die Überprüfung des Inhaltes, der Verständlichkeit und der Reihenfolge der Fragen^[34]. Der Pretest fand im Zeitraum vom 23.05.2024 bis 31.05.2024 statt und umfasste 10 Teilnehmende. Die Befragten konnten frei Rückmeldungen zu Inhalt und Verständlichkeit geben. Anschließend wurde der Fragebogen entsprechend der Kommentare und Anmerkungen der Teilnehmenden optimiert. Die Hauptbefragung fand über einen Zeitraum von genau sieben Wochen (06.06.2024 bis 25.07.2024) in Deutschland statt. Zielgruppe der Studie waren dementsprechend Verbraucher*innen mit Wohnsitz in Deutschland.

2.2.2 Stichprobenauswahl und -größe

Bei dem vorliegenden Sample handelt es sich um eine Gelegenheitsstichprobe, deren Grundgesamtheit auf Untersuchungseinheiten mit Internetzugang beschränkt war. Zudem handelt es sich um eine selbst-selektierende Stichprobe, die auf freiwilliger Teilnahme und nicht auf aktiver Rekrutierung basierte^[35]. Um eine möglichst große Fallzahl zu erreichen, wurde der Umfrage-Link über verschiedene Kanäle verbreitet, darunter:

- E-Mail-Verteiler der Hochschule Neubrandenburg,
- E-Mail-Verteiler der Diätetik-Alumni der Hochschule Neubrandenburg
- E-Mail-Verteiler der Diätassistentenschulen in Deutschland
- Verschiedene Kanäle der PUEVIT GmbH Dresden
- LinkedIn und Instagram

Zudem wurde ein mehrstufiges Schneeballverfahren angewendet, bei dem die sozialen Netzwerke einzelner Teilnehmer*innen der Zielpopulation genutzt wurden. Die initialen Teilnehmenden wurden von den Forschenden gebeten, weitere geeignete Personen zu rekrutieren oder vorzuschlagen. Diese rekrutierten Personen wurden wiederum gebeten, weitere Mitglieder*innen der Population zur Teilnahme an der Befragung zu motivieren^[35].

Die bevorzugte Stichprobengröße in der Marktforschung liegt je nach Fragestellung in der Regel zwischen 150 und 3000 Teilnehmenden. Allerdings besteht bei zu großen Stichproben die Gefahr, dass systematische Fehler zunehmen und die Verringerung des Stichprobenfehlers überkompensiert wird^[33]. Für die vorliegende Studie wurde die erforderliche Mindeststichprobengröße daher wie folgt berechnet:

Tabelle 2: Minimal erforderliche Stichprobengröße^[36]

$n \geq \frac{N}{1 + \frac{(N-1) \cdot \varepsilon^2}{z^2 \cdot P \cdot Q}}$	$n = \text{minimal erforderlicher Stichprobengröße}$ $N = \text{Anzahl der Elemente in der Grundgesamtheit}$ $\varepsilon = \text{gewählter tolerierter Fehler}$ $z = \text{aus der zentralen Wahrscheinlichkeit der Standardnormalverteilung berechneter Wert der gewählten Sicherheitswahrscheinlichkeit}$ $P = \text{tatsächlicher Mittelwert der Grundgesamtheit bzw. prozentualer Anteilswert an der Grundgesamtheit}$ $Q = 1-P$
--	--

Der tatsächliche Mittelwert P (und damit auch Q) ist unbekannt. P wird aus diesem Grund so geschätzt, dass das Produkt $P \cdot Q$ den größtmöglichen Wert annimmt, um selbst für den ungünstigsten Fall eine hinreichend große Stichprobengröße n zu berechnen. Das Produkt $P \cdot Q$ erreicht sein Maximum von 0,25, wenn $P = 0,5$ ist. Da $Q = 1 - P$ direkt von P abhängt, ergibt sich $Q = 0,5$ [36]. Bei einer geschätzten Bevölkerung von 84,6 Millionen für das Jahr 2024 [37] beträgt die erforderliche Mindeststichprobengröße $n = 385$ Personen. Diese Stichprobengröße reicht aus, um ein 95 % Konfidenzniveau mit einer Fehlerspanne von $\pm 5\%$ zu gewährleisten (vgl. Tabelle 3).

Tabelle 3: Berechnung der minimal erforderlichen Stichprobengröße

$n \geq \frac{84.600.000}{1 + \frac{(84.600.000-1) \cdot 0,05^2}{1,96^2 \cdot 0,5 \cdot 0,5}}$	$n = \text{minimal erforderlicher Stichprobengröße}$
	$N = 84.600.000^1$
$n \geq \frac{84.600.000}{1 + \frac{84.599.999 \cdot 0,0025}{3.8416 \cdot 0,5 \cdot 0,5}}$	$\varepsilon = 0,05 \text{ (Präzision von } \pm 5\%)$
$n \geq \frac{84.600.000}{1 + \frac{211499,9975}{0,9604}}$	$z = 1,96 \text{ (entspricht einem Konfidenzniveau von } 95\%)$
$n \geq \frac{84.600.000}{220221,73875469}$	$P = 0,5$
$n \geq 384,1582601173 \approx 385$	$Q = 0,5$

1: geschätzte Bevölkerungszahl in Deutschland für das Jahr 2024 [37]

2.2.3 Aufbau des Fragebogens

Der finale Fragebogen (vgl. Anhang A1) umfasste 33 Fragen und das Ausfüllen der Umfrage dauerte etwa 30 Minuten. Die Fragen wurden im Voraus definiert und in einer festen Reihenfolge präsentiert. Es wurden unter anderem validierte Skalen eingesetzt, bei denen in einigen Fällen die Anzahl der Items reduziert wurde, um die Umfragelänge zu begrenzen. Es wurden ausschließlich ungerade Skalen mit einer mittleren Kategorie verwendet, die den Befragten die Möglichkeit bot, eine neutrale oder unentschiedene Position einzunehmen. Diese mittlere Antwortoption verringert Verzerrungen, die entstehen, wenn Teilnehmende sich trotz neutraler Haltung oder unzureichender Informationen für Zustimmung oder Ablehnung entscheiden müssten [33]. Aus demselben Grund wurde ergänzend die Antwortmöglichkeit „keine Antwort“ bzw. „kann ich nicht beantworten“ eingeführt, um Unsicherheiten der Teilnehmenden angemessen zu berücksichtigen [33]. Eine zusammenfassende tabellarische Übersicht der verwendeten Messinstrumente und Items befindet sich im Anhang (vgl. Anhang A2).

Bekanntheit und Wissen über Mikroalgen

Zum Einstieg in die Umfrage wurden den Teilnehmenden zunächst leicht verständliche und einfach zu beantwortende Fragen gestellt, um die Bekanntheit und das Wissen über Mikroalgen zu erfassen. Die Teilnehmenden wurden mittels Ja-Nein-Items gefragt, ob sie bereits von Mikroalgen bzw. Spirulina gehört haben und ob sie wissen, was Mikroalgen sind. Anschließend wurden Sie gebeten, anhand einer 5-stufigen Likert-Skala („sehr gut“ = 1 bis „sehr schlecht“ = 5), anzugeben, wie sie selbst ihr Wissen über Mikroalgen einschätzen würden.

Wahrnehmung und Einstellung gegenüber Mikroalgen bzw. Lebensmittel aus Mikroalgen

Um die Wahrnehmung gegenüber Mikroalgen bzw. Lebensmittel aus Mikroalgen zu erheben, wurden die Befragten gebeten, ihre Assoziationen mit diesen Begriffen in Form einer Freitexteingabe zu schildern. Diese freie Erhebungsform ermöglicht tiefgehende und nuancierte Einblicke in die Meinungen, Wahrnehmungen und Gedanken der Befragten [33]. Die Einstellung ist neben der Wahrnehmung eine weitere wichtige Determinante der Intention bzw. Bereitschaft, ein bestimmtes Verhalten auszuführen und trägt somit maßgeblich zur Akzeptanz bei [38]. Die Einstellung gegenüber Mikroalgen wurde mithilfe eines 10-stufigen semantischen Differenzials erfasst. Die Teilnehmenden bewerteten Mikroalgen auf 12 bipolaren Antwortskalen (- 5 bis + 5) mit kontrastierenden Begriffen (z.B. unnatürlich vs. natürlich, teuer vs. günstig, ekelhaft vs. lecker). Die einzelnen Antworten sind Abstufungen der gleichen Beurteilung und somit zwischen zwei Polen angeordnet, die verbale Gegensatzpaare bilden [38]. Für die Antwortoption „Ich weiß es nicht“ wurde der Wert 0 codiert, da sie keine valide Skalenposition im semantischen Differenzial darstellt. Diese Antworten wurden bei der Berechnung von Mittelwerten und Standardabweichungen ausgeschlossen, um Verzerrungen der Ergebnisse zu vermeiden. Das Gegensatzpaar „fettarm vs. fettreich“ wurde umkodiert, sodass hohe Werte eine positive Wahrnehmung widerspiegeln. Diese Anpassung sorgt für eine einheitliche Interpretation der Skalen und erleichtert die Analyse der Ergebnisse.

Bereitschaft zum Verzehr von Mikroalgen bzw. Lebensmittel aus Mikroalgen

Die Teilnehmenden wurden gefragt, ob sie schon einmal Mikroalgen gegessen haben und falls ja, um welches Produkt es sich gehandelt hat (Freitexteingabe). Anschließend wurde mittels einer 5-stufigen Likert-Skala („sehr bereit“ = 1 bis „sehr abgeneigt“ = 5) die generelle Verhaltensbereitschaft abgefragt Mikroalgen bzw. Lebensmittel aus Mikroalgen zu verzehren (Willingness to Try (WTT)). Zudem wurde gefragt, was die Person dazu ermutigt hat bzw. ermutigen würde, Mikroalgen in ihre Ernährung zu integrieren. Hierzu wurden verschiedene Antwortmöglichkeiten vorgegeben, aus denen die Befragten alle zutreffenden Antworten auswählen konnten. Zudem wurde gefragt, in welchen Lebensmittelkategorien sich die Befragten Mikroalgen besonders gut als Zusatz vorstellen könnten (geschlossenes Antwortformat mit Mehrfachnennung) und wie wichtig ihnen verschiedene Aspekte wie z. B. Klimafreundlichkeit oder Gesundheit bei einem solchen Produkt sind (5-stufigen Likert-Skala; „sehr wichtig“ = 5 bis „sehr unwichtig“ = 1).

Kauf- und Zahlungsbereitschaft gegenüber Mikroalgen bzw. Lebensmittel aus Mikroalgen

Die Kaufbereitschaft (Willingness to Buy (WTB)) wurde gemessen, indem den Befragten 7 Lebensmittelbeispiele vorgestellt wurden. Dazu wurde aus den zuvor abgefragten Lebensmittelkategorien jeweils ein Beispiel ausgewählt und bildlich dargestellt. Für jedes Lebensmittel wurden die Teilnehmenden gefragt, ob sie bereit wären, dieses Produkt zu kaufen („sehr wahrscheinlich“ = 5 bis „sehr unwahrscheinlich“ = 1) und ob sie dafür einen höheren Preis zahlen würden (Ja/Nein). Anschließend folgte die Abfrage der Zahlungsbereitschaft (Willingness to Pay (WTP)), also wie viel mehr in Prozent die Befragten bereit wären für eine Lebensmittel mit/aus Mikroalgen zu bezahlen (freie Zahleneingabe). Für ein

leichteres Verständnis wurde den Befragten folgendes Beispiel gegeben: „*Wenn eine Packung 5 € kostet (Inhalt 500 g), dann würde eine 10 %ige Preissteigerung zu einem Preis von 5,50 €, 20 % zu 6 € und 50 % zu 7,50 € führen.*“ Auch die WTB und WTP für frische Mikroalgen wurden erhoben. In diesem Fall wurde gezielt ermittelt, welchen Betrag die Teilnehmenden für ein Glas frische Mikroalgen zu zahlen bereit wären.

Akzeptanz von Mikroalgen von Mikroalgen bzw. Lebensmittel aus Mikroalgen

Die Akzeptanz von Mikroalgen ergab sich aus der Bereitschaft Mikroalgen zu verzehren und der Kaufbereitschaft. Die Akzeptanz wurde somit durch die Kombination der Werte von WTB und WTT bestimmt. Der Mittelwert dieser beiden Indikatoren ergab die Gesamtbewertung der Akzeptanz. Dabei wurde der WTB-Wert als Durchschnitt der Antworten auf alle 7 WTB-Fragen berechnet.

Gesundheitsinteresse

Das Gesundheitsinteresse wurde anhand der Subskala General Health Interest (GHI) eines validierten Fragebogens zur Einstellung gegenüber gesunder Ernährung gemessen [39]. Die Subskala umfasste acht Items (Cronbachs α : 0,89) zum Interesse an einer gesunden Ernährung. Die Teilnehmenden wurden gebeten, den Grad ihrer Zustimmung zu jeder Aussage auf einer 7-stufigen Likert-Skala von "stimme überhaupt nicht zu" = 1 bis "stimme voll und ganz zu" = 7 anzugeben. Für die Auswertung wurden negativ formulierte Aussagen umcodiert (GI_a, GI_c, GI_g und GI_h). Anschließend wurden alle Antworten addiert und zu einem Gesamtwert gemittelt, anhand dessen die Befragten drei Gruppen zugeordnet wurden: „niedriges“ (0 bis 3,9 Punkte), „mittleres“ (4,0 bis 5,0 Punkte) und „hohes“ (5,1 bis 7,0 Punkte) Gesundheitsinteresse [39].

Nachhaltigkeitsbewusstsein

Die Einstellung zum Thema Nachhaltigkeit wurde zunächst mit einer allgemeinen Einstellungsmessung abgefragt. Im Rahmen dessen wurde vorab der Zusammenhang zur Thematik der Mikroalgen mit einem kurzen informativen Text über die Nachhaltigkeitsaspekte bei der Anzucht von Mikroalgen hergestellt. Zusätzlich wurde das Nachhaltigkeitsbewusstsein (Sustainability Consciousness (SC)) im Zusammenhang mit Lebensmitteln gemessen (Cronbachs α : 0,95) [40]. Die Originalskala, die 14 Items umfasst, wurde in der vorliegenden Arbeit auf 10 Items beschränkt und mithilfe der Rückübersetzungsmethode ins Deutsche übertragen. Die Teilnehmenden wurden auf einer 7-Punkte-Likert-Skala gefragt, wie besorgt sie über verschiedene ökologische und ethische Aspekte der Nachhaltigkeit sind ("überhaupt nicht besorgt" = 1 bis "sehr besorgt" = 7). Die Befragten wurden anhand ihrer SC-Gesamtwerte in drei Kategorien eingeteilt (vgl. Tabelle 4).

Tabelle 4: Kategorisierung des Nachhaltigkeitsbewusstseins und Interpretation der Punktzahlen

Kategorie	Interpretation	Gesamtscore
niedriges Nachhaltigkeitsbewusstsein	Die Person zeigt ein geringes Bewusstsein für Nachhaltigkeit. Ihre Kenntnisse, Einstellungen und/oder Verhaltensweisen im Hinblick auf Nachhaltigkeit sind wahrscheinlich wenig ausgeprägt	10 - 30 Punkte
moderates Nachhaltigkeitsbewusstsein	Die Person hat ein mäßiges Bewusstsein für Nachhaltigkeit. Es gibt ein gewisses Maß an Wissen, positive Einstellungen und/oder nachhaltiges Verhalten, aber es gibt noch Potenzial für Verbesserungen	31 - 50 Punkte
hohes Nachhaltigkeitsbewusstsein	Die Person zeigt ein hohes Bewusstsein für Nachhaltigkeit. Ihre Kenntnisse, Einstellungen und/oder Verhaltensweisen sind stark auf nachhaltige Prinzipien ausgerichtet.	51 - 70 Punkte

Einstellung gegenüber neuen Lebensmitteln

Die Einstellung gegenüber neuartigen Lebensmitteln wurde anhand deutsche Version der Food Neophobia Scale (FNS) ermittelt (Cronbachs α : 0,79) [41]. Die FNS ist eine standardisierte und validierte Skala zur Erfassung des Maßes an Abneigung einer Person gegenüber neuen Lebensmitteln und berücksichtigt sowohl emotionale als auch kognitive Reaktionen [32]. Die Skala umfasst 10 Items, die jeweils aus einer 7-stufigen Likert-Skala bestehen ("stimme voll und ganz zu" = 7 bis „stimme überhaupt nicht zu“ = 1). Negativ formulierte Items (FNS_b; FNS_c; FNS_f; FNS_h; FNS_j) wurden für die Auswertung recodiert und anschließend der Gesamtwert aller Items berechnet. Die Gesamtskala reicht von 10 bis 70 Punkten, wobei höhere Werte auf eine stärkere Neophobie hindeuten. Ähnlich wie in früheren Studien [42, 43] wurden die Befragten auf der Grundlage ihrer FNS-Gesamtwerte in drei Kategorien eingeteilt (vgl. Tabelle 5).

Tabelle 5: Berechnung und Cut-off Werte und Kategorisierung der FNS-Kategorien

Kategorie	Berechnung	Cut-off Werte
keine bis niedrige Neophobie	FNS-Score \leq MW minus SD	≤ 19 (28,09-9,203)
moderate Neophobie	FNS-Score > Mittelwert minus SD, aber \leq MW plus SD	> 19 aber ≤ 37
erhöhte Neophobie	FNS-Score > MW plus SD	> 37 (28,09 + 9,203)

FNS: Food Neophobia Scale, SD: Standardabweichung, MW: Mittelwert

Einstellung gegenüber neuen Lebensmitteltechnologien

Die Einstellung gegenüber neuen Lebensmitteltechnologien, konkret im Zusammenhang mit Mikroalgen wurde mit einer allgemeinen Einstellungsmessung abgefragt. Daher wurden die Teilnehmenden vorab darüber informiert, dass Mikroalgen in Photobioreaktoren gezüchtet werden und warum dieses Verfahren genutzt wird. Zusätzlich wurde die Einstellung gegenüber neuen Lebensmitteltechnologien im Allgemeinen anhand der Food Technology Neophobia Scale (FTNS) erfasst, welche im Rahmen eines nationalen Forschungsprogramms (Food Futures National Research Flagship Project, www.csiro.au/FoodFutures) entwickelt und validiert wurde [44]. Um die Umfrage zu verkürzen, wurde die Anzahl der Items von ursprünglich 13 auf 4 reduziert (7-stufige Likert-Skalen; „stimme voll und ganz zu“ = 7 bis „stimme überhaupt nicht zu“ = 1). Dies ist eine gängige Methode, die bereits in vergleichbaren Studien angewandt wurde und als zuverlässig gilt (Cronbachs α : 0,77) [45-47]. Die deutsche Version der Skala wurde mithilfe der Rückübersetzungs-methode erstellt [45]. Auch hier wurden die Einzelwerte summiert, um die Gesamtpunktzahl zu berechnen. Die Befragten wurden ebenfalls auf der Grundlage ihrer FTNS-Gesamtwerte in drei Kategorien eingeteilt (vgl. Tabelle 6).

Tabelle 6: Berechnung und Cut-off Werte und Kategorisierung der FTNS-Kategoriein

Kategorie	Berechnung	Cut-off Werte
keine bis niedrige Neophobie	FNS-Score \leq MW minus SD	≤ 8
moderate Neophobie	FNS-Score > Mittelwert minus SD, aber \leq MW plus SD	> 8 aber ≤ 18
erhöhte Neophobie	FNS-Score > MW plus SD	> 18 (28,09 + 9,203)

FNS: Food Neophobia Scale, SD: Standardabweichung, MW: Mittelwert

Einkaufsverhalten

Um das generelle Einkaufsverhalten der Befragten besser einschätzen zu können wurden die Teilnehmenden gefragt, wo sie den größten Teil (über 50 %) ihres Lebensmitteleinkaufes tätigen (geschlossenes Antwortformat; Einfachnennung) und welche 5 Kriterien ihnen bei dem Kauf von Lebensmittel besonders wichtig sind (geschlossenes Antwortformat; Mehrfachnennung). Zusätzlich wurden sie gefragt, wie hoch ihre monatlichen Ausgaben für Lebensmittel sind (freie Zahleneingabe).

Soziodemografischen Daten

Die soziodemografischen Variablen waren Geschlecht, Alter, Bildungsgrad, monatliches Haushaltsnettoeinkommen, Haushaltsgröße und derzeitiger Hauptwohnsitz. Außerdem wurden die Teilnehmenden gebeten ihre aktuelle Ernährungsweise anzugeben. Die Befragung endete mit einer offenen Frage, in der die Teilnehmenden weitere Anmerkungen und Gedanken zum Thema oder zum Fragebogen äußern konnten.

2.2.4 Gesetze, Verordnungen und Datenschutz

Es wurden ausschließlich anonymisierte Daten erhoben, die keinen Rückschluss auf die Identität der Teilnehmenden zulassen. Es wurden keine sensiblen personenbezogenen Daten wie Gesundheitsdaten, ethnische Herkunft oder politische Meinungen abgefragt, sondern lediglich allgemeine Informationen. Die Teilnahme war freiwillig und die Teilnehmenden konnten die Umfrage jederzeit abbrechen. Zudem wurden die Teilnehmenden im Vorfeld über den Zweck der Studie, die Anonymität der Datenerhebung und die datenschutzrechtlichen Maßnahmen informiert. Die Datenschutzerklärung musste vor der Teilnahme an der Umfrage bestätigt werden. Da keine Eingriffe in die körperliche oder psychische Integrität der Teilnehmenden vorgenommen wurden und keine potenziellen Risiken für sie bestanden, war die Einreichung eines Ethikantrags nicht erforderlich. Die Erhebung und Verarbeitung der Daten entsprachen den datenschutzrechtlichen Anforderungen der Datenschutz-Grundverordnung. Ausschließlich die Studienmitarbeitenden hatten Einsicht in die Weiterverarbeitung der Daten. Sämtliche Personen, die Zugang zu den Daten erhielten, unterlagen im Umgang mit den Daten dem deutschen Datenschutzgesetz in seiner gültigen Fassung sowie der Datenschutz-Grundverordnung.

2.3 Lebensmitteltechnologische Untersuchungen

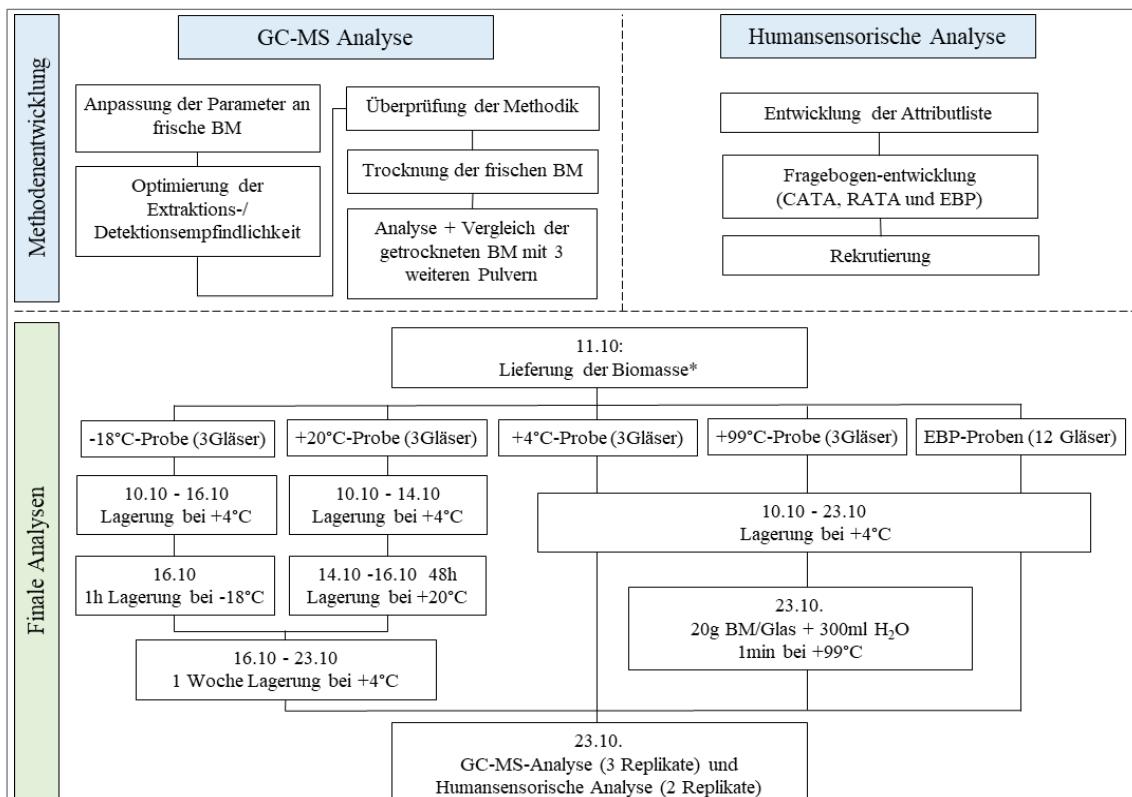
Die Verwendung von Mikroalgen bzw. Cyanobakterien in der Lebensmittelindustrie geht mit einigen Herausforderungen einher. Es ist bekannt, dass Mikroalgen und Cyanobakterien neben ihren vorteilhaften Eigenschaften auch eine breite Palette an VOCs produzieren, die das Aroma der Biomasse sowohl positiv als auch negativ beeinflussen können [48, 49]. Mit bislang etwa 50 identifizierten VOC-Komponenten weist *Limnospira* einen der höchsten VOC-Gehalte auf. Einige dieser VOCs, wie β -Ionon, Hep-tadecan und Dihydroactinidiolid, sind für das charakteristische Aroma verantwortlich. Die Zusammensetzung und der Gehalt der VOCs in der Biomasse wird maßgeblich durch Umwelt- und taxonomische Faktoren beeinflusst [48, 49].

Viele von Mikroalgen und Cyanobakterien produzierte VOCs haben, wie bereits angedeutet, intensive olfaktorische Eigenschaften, weshalb sie unter anderem in der Getränke-, Lebensmittelindustrie kommerziell genutzt werden [50]. Durch ihren prägenden Einfluss auf das Aroma gestalten sie das sensorische Erlebnis beim Konsum von Speisen und Getränken maßgeblich und tragen entscheidend zur Attraktivität von Lebensmitteln bei [48, 49]. Einige dieser VOCs können aber auch unangenehme Gerüche verursachen (off-odour) [48, 51]. Das Aroma eines Produktes ist ein wesentlicher Aspekt, der berücksichtigt werden muss, vor allem wenn Mikroalgen oder Cyanobakterien in Lebensmittel integriert werden sollen [52]. Der Geruch spielt dabei eine zentrale Rolle, da er die Akzeptanz oder Ablehnung eines Produkts sowie die Kaufabsicht maßgeblich beeinflusst [48, 53]. Wenn ein Produkt ein starkes und unangenehmes Aroma besitzt, werden es viele Verbraucher*innen ablehnen oder nicht genießen. Sanfte und frische (natürliche) Aromen hingegen erhöhen die Akzeptanz eines Produkts und können dessen wirtschaftlichen Erfolg steigern [54]. Zudem kann der Aromagehalt eines Lebensmittels dessen Charakter verändern, neue Produkte fördern und die Akzeptanz steigern [54].

Damit Mikroalgen und Cyanobakterien erfolgreich in der täglichen Ernährung eingesetzt werden können, müssen diese neuartigen Produkte zunächst von der Öffentlichkeit akzeptiert werden. Aus diesem Grund ist die Identifizierung der VOCs entscheidend um eine Grundlage für weitere Optimierungsprozesse zu schaffen und sensorischer Herausforderungen zu bewältigen und so die Akzeptanz der Verbraucher*innen zu fördern. In der wissenschaftlichen Literatur gibt es bereits einige Studien die sich mit der Zusammensetzung von VOCs in Mikroalgen und Cyanobakterien beschäftigt haben [48, 51, 55]. Allerdings handelte es sich dabei fast ausschließlich um verarbeitete Formen der Biomasse (z.B. getrocknet oder gefroren). Die industrielle Verarbeitung solcher Produkte kann strukturelle Schäden verursachen, insbesondere die Zerstörung der Zellwände, was sowohl den Verlust essenzieller Nährstoffe als auch eine signifikante Beeinflussung des Aromas zur Folge haben kann [56]. Daher stellt die frische Biomasse eine außergewöhnliche Alternative zu den derzeit auf dem Markt erhältlichen Trockenpulverprodukten dar, die besonders für Verbraucher*innen interessant ist, die zunehmend auf ihre Ernährung achten. Die frische Biomasse wird hauptsächlich in geschlossenen Photobioreaktoren kultiviert, wodurch eine Sprühwässerung überflüssig wird und sowohl die Nährstoffzusammensetzung als auch die bioaktiven Substanzen vollständig erhalten bleiben [57].

Das VOC-Profil frischer *L. maxima*-Biomasse ist bislang kaum erforscht, da der Großteil der bestehenden Studien getrocknete oder verarbeitete Proben untersucht. Das primäre Ziel des folgenden Abschnitts dieser Arbeit war daher die detaillierte Charakterisierung der VOCs und Aromaeigenschaften frischer *L. maxima*-Biomasse unter verschiedenen alltagsnahen Temperaturbedingungen mittels Gaschromatographie mit Massenspektrometrie (GC-MS) in Verbindung mit einer humansensorischen Analyse. Beide Methoden liefern wertvolle, aber unterschiedliche Informationen: Während die GC-MS-Analyse die chemische Zusammensetzung der Proben ermittelte, untersuchte die sensorische Analyse die Wahrnehmung der Proben durch die menschlichen Sinne. Die menschliche Nase ist in der Lage, Verbindungen zu erkennen, die vom Gerät nicht erfasst werden [58].

Die frische Biomasse von *L. maxima* wurde vom Algenwerk c./o. PUEVIT GmbH, Dresden, Deutschland bezogen und gemäß Abbildung 2 bis zur Analyse gelagert. Die GC-MS-Analyse und die humansensorische Analyse wurden am selben Tag und mit denselben Proben durchgeführt, um die Vergleichbarkeit und Konsistenz der Ergebnisse zu maximieren. Da dies eine organisatorische Herausforderung darstellte, wurde im Vorfeld ein detaillierter Plan ausgearbeitet, um eine effiziente Durchführung und optimale zeitliche Koordination der beiden Analysen zu gewährleisten (siehe Tabelle A.2). Durch die Verwendung der gleichen Proben für beide Untersuchungen konnte eine präzise Zuordnung der sensorischen Eindrücke zu den chemischen Verbindungen hergestellt werden. Abbildung 2 fasst den Ablauf der lebensmitteltechnologischen Untersuchungen zusammen.



Liefertemperatur: 6,7 °C, +4°C: Empfohlene Lagertemperatur vom Hersteller, BM: Biomasse,
EBP: Einfach beschreibende Prüfung

Abbildung 2: Versuchsablauf der chemischen und humansensorischen Analyse

Um die Veränderungen der flüchtigen Verbindungen und Aromaeigenschaften der *L. maxima*-Biomasse unter praxisnahen Bedingungen zu untersuchen, wurden verschiedene Temperaturen gewählt, die typischerweise im Alltag von Verbraucher*innen auftreten können. Die Zuordnung der Probennummern zu den jeweiligen Lagertemperaturen kann der Tabelle 7 entnommen werden. Die Lagerung bei +4 °C simuliert die übliche Aufbewahrung im Kühlschrank, die dazu dient, die Frische der Biomasse über einen längeren Zeitraum zu erhalten. Da Tiefkühlen eine gängige Methode zur langfristigen Konservierung von Lebensmitteln ist, wurde zudem eine Lagerung bei -18 °C gewählt, um die Stabilität der flüchtigen Verbindungen unter Gefrierbedingungen zu analysieren. Um auch mögliche Veränderungen unter Raumtemperaturbedingungen zu erfassen, wurde die Biomasse bei +20 °C untersucht, da dies eine Situation widerspiegelt, in der Verbraucher*innen das Produkt für kurze Zeit außerhalb des Kühlschranks lagern, sei es durch Vergessen oder bewusste Entscheidung vor der weiteren Verarbeitung. Schließlich wurde mit +99 °C eine Temperatur gewählt, die typische Erhitzungsprozesse bei der Zubereitung, etwa beim Kochen, simuliert. Die gewählten Bedingungen decken somit verschiedene alltagsnahe Szenarien ab und ermöglichen eine umfassende Analyse der VOCs und sensorischen Eigenschaften unter realistischen Nutzungsbedingungen.

Tabelle 7: Zuordnung der Proben zu den Lagerbedingungen und Replikaten

Glasnummer	Probennummer	GS-MS-Analyse 3 Replikate	Humansensorische Analyse 2 Replikate
Glas 1	853	+ 4 °C	+ 4 °C
Glas 2	167	+ 4 °C	+ 4 °C
Glas 3	961	+ 4 °C	-
Glas 4	275	+20 °C	+ 20 °C
Glas 5	179	+20 °C	+ 20 °C
Glas 6	316	+20 °C	-
Glas 7	452	- 18 °C	- 18 °C
Glas 8	651	- 18 °C	- 18 °C
Glas 9	485	- 18 °C	-
Glas 10	982	+ 99 °C	+ 99 °C
Glas 11	546	+ 99 °C	+ 99 °C
Glas 12	637	+ 99 °C	-
Glas 13 - 24	519		EBP: +4°C

EBP: Einfachbeschreibende Prüfung

2.3.1 Bestimmung der VOCs mittels Gaschromatographie mit Massenspektrometrie

2.3.1.1 Methodenentwicklung: Vorversuche zur Optimierung der GC-MS-Analyse

Die Analyse der VOCs in der frischen Biomasse von *L. maxima* stellte eine besondere Herausforderung dar, da keine spezifische Literatur mit etablierten GC-MS-Einstellungen für diese Probenart verfügbar war. Die vorhandene Literatur bezieht sich überwiegend auf die Analyse von getrockneter Biomasse, deren Matrix- und Feuchtigkeitszusammensetzung sich von frischer Biomasse unterscheidet. Um eine geeignete Methodik zu entwickeln und ihre Validität zu überprüfen, wurden umfangreiche Vorversuche durchgeführt. Basierend auf Publikationen zur GC-MS-Analyse von Spirulina-Pulvern [52, 59] wurden Parameter wie Temperaturprogramme, Trägergasfluss und Extraktionsbedingungen als Ausgangspunkt gewählt, welche dann Schritt für Schritt an die spezifischen Eigenschaften der frischen Biomasse

angepasst wurden. Der größte Teil der Analysen wurde mit Suspensionsproben der frischen Biomasse in verschiedenen Konzentrationen durchgeführt, um eine gleichmäßige Verteilung der Zellen in der Flüssigkeit zu erreichen. Weiterhin wurde einigen Proben Natriumchlorid (NaCl) zugesetzt, um die Analytkonzentration im Headspace sowie die Extraktions- und Detektionsempfindlichkeit zu verbessern und gleichzeitig die Wassermatrix zu reduzieren. Diese Technik optimiert die Effizienz der Extraktion, besonders bei flüchtigen und semi-flüchtigen organischen Verbindungen^[60]. Im Rahmen der Vorversuche wurde auch geprüft, ob die Verwendung von Ethanol als Lösungsmittel eine Optimierung der Analysemethode bewirkt. Diese Modifikation führte jedoch zu keiner nennenswerten Verbesserung. Zur Überprüfung der entwickelten Methodik wurde die frische Biomasse zwischenzeitlich getrocknet, um ein Material zu erhalten, das mit den in der Literatur beschriebenen Spirulina-Pulvern vergleichbar ist. Um die Eignung der entwickelten Methodik zu überprüfen, wurde die frische Biomasse von *L. maxima* zwischenzeitlich getrocknet. Anschließend wurde das Pulver manuell mit Mörser und Pistill zerkleinert. Die Trocknung erfolgte schonend in einem Vakuumtrockenschrank (Firma Memmert) bei 50 °C für 6 Stunden. Zusätzlich zur getrockneten Biomasse vom Algenwerk wurden drei weitere kommerziell erhältliche Pulver analysiert. Der Feuchtigkeitsgehalt der Pulver wurde mithilfe des Feuchtigkeitsbestimmers MA 40 von Sartorius ermittelt. Die Produktinformationen sind Tabelle 8 zu entnehmen. Eine Zusammenfassung der Vorversuche ist im Anhang zu finden (Anhang A4).

Tabelle 8: Übersicht der analysierten Spirulina- und Chlorella-Pulver

	Algenwerk-Spirulina ^[61]	Bio-Spirulina ^[62]	Raab-Spirulina ^[63]	Chlorella ^[64]
				
Hersteller	Algenwerk c./o. PUEVIT GmbH, Dresden, Deutschland	borchers fine food GmbH & Co. KG Oyten, Deutschland	Raab Vitalfood GmbH, Rohrbach, Deutschland	My Superfoods GmbH, Berlin, Deutschland
Feuchtigkeitsgehalt	11,53 %	14,42 %	13,30 %	16,28 %

2.3.1.2 Finale HS-SPME GC-MS-Analyse

Für die finale Analyse der frischen Biomasse von *L. maxima* wurden die Parameter aus dem Vorversuch Nr. 11 verwendet. Die Analyse der Proben erfolgte mittels Headspace-Festphasenmikroextraktion (Headspace-Solid-Phase Microextraction (HS-SPME)) in Verbindung mit der GC-MS. Alle Analysen wurden an Suspensionen der frischen Biomasse in dreifacher Ausführung durchgeführt, die unabhängig voneinander hergestellt und jeweils mit 1,5 g NaCl versetzt wurden.

Die Extraktion der flüchtigen Verbindungen erfolgte durch die HS-SPME mit einem Autosampler der Serie 7693 von Agilent Technologies; Waldbronn; Deutschland. Für die Extraktion wurden 5 mL der Suspension zusammen mit 1,5 g NaCl in 20 mL Vials überführt. Diese wurden mittels Schraubkappen mit Silikon/Polytetrafluorethylen-Septum (Laphapack GmbH, Langerwehe, DE, Deutschland) hermetisch verschlossen und 30 Minuten bei 40 °C unter Rühren (500 U/min) inkubiert und anschließend 2 Minuten equilibriert, um die flüchtigen Bestandteile im Kopfraum auszugleichen. Anschließend wurde die, gemäß den Richtlinien des Herstellers, vorkonditionierte HS-SPME-Faser (75 µm Carboxen/Polydimethylsiloxan (CAR/PDMS), Quarzglas (Gerstel GmbH & Co. KG, Mülheim an der Ruhr, DE, Deutschland) in das Vial eingeführt und mit dem Headspace in Kontakt gebracht und bei 40 °C für 20 Minuten adsorbiert. Anschließend wurde die Faser sofort aus dem Fläschchen entfernt und im Splitmodus (20:1) in das GC-MS-System injiziert.

Die GC-MS-Analyse wurde mit einem Agilent-Gaschromatographen des Typs 122-7032 durchgeführt (GC-System: 7890 B; MS-System: 5977A MSD; Agilent Technologies, Santa Clara, CA, USA). Nach thermischer Desorption der beladenen SPME-Faser (250 °C, 2 min) wurden die flüchtigen Bestandteile mittels einer Kapillarsäule (DB-Wax; 30 m × 0,25 mm, 0,25 µm Filmdicke; Agilent Technologies) und einem Trägergas (Helium; Flussrate: 1 ml/min) getrennt. Die Starttemperatur des Ofens lag bei 40 °C. Diese wurde 3 Minuten gehalten und dann zunächst mit 5 °C/min auf 150 °C erhöht, anschließend mit 15 °C/min auf 200 °C. Die Endtemperatur wurde 2 Minuten gehalten. Die Gesamlaufzeit betrug somit 30,33 Minuten. Die Massenspektren wurden mittels elektronischer Ionisierung (70 eV) aufgenommen und im Bereich von 25 bis 500 m/z gescannt. Die Temperatur der MS-Ionenquelle und des MS-Quadrupol betrug 230 °C bzw. 150 °C. Die Gerätesteuerung erfolgte mithilfe der Software MAESTRO (Version 1.4.36.0/35; Gerstel GmbH & Co KG).

Die Datenerfassung und Verarbeitung der Massenspektrometriedaten erfolgte mittels der Software MassHunter (Agilent Technologies) und die gemessenen Verbindungen wurden anhand der Datenbank des National Institute of Standard and Technology (NIST) identifiziert (Version 1.4). Für die weitere Analyse wurden nur Verbindungen berücksichtigt, die einen Qualitätsfaktor von ≥ 80 erreichten und in mindestens zwei von drei Proben identifiziert wurden. Der Qualitätsfaktor der MassHunter Software bezieht sich auf eine Metrik, die die Zuverlässigkeit der Peak-Identifizierung in einem Chromatogramm bewertet. Er gibt an, wie gut der erkannte Peak mit den erwarteten Eigenschaften der Verbindung übereinstimmt, unter Berücksichtigung von Faktoren wie dem Signal-Rausch-Verhältnis und der Konsistenz

der Retentionszeit. Eine höhere Qualitätsbewertung deutet auf eine zuverlässigere Identifizierung hin, während eine niedrigere Bewertung eine weniger sichere oder schwächere Übereinstimmung bedeuten kann [65]. Die NIST-Bibliotheksrichtlinien empfehlen eine vergleichbare Einstufung zur Interpretation der massenspektralen Übereinstimmungsqualität (Tabelle 9) [66].

Tabelle 9: Einstufung der Übereinstimmungsqualität nach NIST-Richtlinien

Schwellenwert für Übereinstimmungsfaktor	Massenspektrale Übereinstimmung
≥ 90	Exzellent
80 - 90	Gut
70 - 80	in Ordnung
< 60	Schwach

2.3.2 Humansensorische Analyse

Die humansensorische Analyse der frischen Biomasse von *L. maxima* wurde mit den Methoden Check-all-that-apply (CATA) und Rate-all-that-apply (RATA) durchgeführt. Ergänzend wurde eine Geruchsbewertung, die sowohl eine Intensitätsbewertung mittels Skala als auch eine freie Attributnennung umfasste, in die sensorische Analyse integriert. Grund hierfür war, dass beim Öffnen des Glases mit der frischen Biomasse ein intensiver und unangenehmer Geruch wahrnehmbar war. Dieser spezifische Geruch konnte durch die GC-MS-Analyse nicht erfasst werden, was vermutlich auf seine hohe Flüchtigkeit zurückzuführen ist, da er bereits vor der Extraktion verflog. Um diesen olfaktorischen Aspekt dennoch methodisch abzubilden, wurde die sensorische Untersuchung entsprechend erweitert.

Die sensorische Bewertung der frischen Biomasse erfolgte in zweifacher Ausführung, wobei der Schwerpunkt auf der Geruchswahrnehmung lag. Eine Bewertung des Geschmacks erfolgte nicht. Der Geruch eines Lebensmittels ist einer der ersten sensorischen Eindrücke, den der/die Konsument*in wahrnimmt, und spielt eine entscheidende Rolle in der Gesamteinschätzung der sensorischen Qualität eines Produkts [67]. Studien zeigen, dass der Geruch oft eine Schlüsselfunktion für die Wahrnehmung des Geschmacks übernimmt, da die olfaktorische Wahrnehmung stark mit dem Geschmackserlebnis verknüpft ist [68]. Die Fokussierung auf den Geruch erlaubt daher eine differenzierte Untersuchung dieses primären Sinneseindrucks, der die spätere Akzeptanz maßgeblich beeinflussen kann, während dennoch relevante sensorische Eigenschaften wie Geruchsintensität und Assoziationen zu Deskriptoren erfasst werden können.

2.3.2.1 Check-all-that-apply und Rate-all-that-apply

Die CATA-Methode ist eine verbraucherbasierte sensorischen Analysemethode, welche eine geeignete Alternative zu der traditionellen deskriptiven Analyse darstellt [69, 70] und ebenfalls valide sowie reproduzierbare Informationen liefert [71-73]. Sie wird häufig eingesetzt und gilt zudem als geeignet für die Arbeit mit ungeschulten bzw. halb-geschulten Panelist*innen [73, 74]. Der Fragebogen ist ein einfaches, leicht verständliches und vielseitiges Instrument [69, 75], welches keine tiefgreifende kognitive Verarbeitung erfordert [72]. Er liefert schnelle Antworten und Informationen über die Wahrnehmung von Verbraucher*innen in Bezug auf sensorische Merkmale von Produkten [69, 75] und kann somit vor allem in Projekten eingesetzt werden, bei denen Zeit sowie finanzielle Ressourcen einschränkende Faktoren sind. Um das Produkt bestmöglich beschreiben zu können, besteht der CATA-Fragebogen aus einer Multiple-Choice-Liste von Attributen, aus der die Panelist*innen gebeten werden, alle Attribute auszuwählen, die sie zur Beschreibung der Probe für zutreffend halten [70, 76].

Ein Nachteil der CATA-Methode ist, dass sie keine quantitativen Informationen liefert, sondern nur Häufigkeitsdaten in binärer Form. Es erfolgt keine Messung der Intensität der bewerteten sensorischen Attribute, wodurch eine detaillierte Beschreibungen und die Produktunterscheidung erschwert wird, insbesondere wenn die Proben subtile Unterschiede in Bezug auf ihre charakteristischen sensorischen Attribute aufweisen [73, 75]. Somit könnte eine potenzielle Unterscheidung zwischen Proben verdeckt werden, die ähnliche sensorische Profile aufweisen, sich aber in der Intensität dieser Merkmale unterscheiden. Es ist bekannt, dass die Häufigkeit der Erwähnung der Begriffe in den berichteten CATA-Fragen eng mit der Intensität des Attributs zusammenhängt [73]. Um dennoch den Nachteil der fehlenden Intensitätsmessung der CATA-Methode zu überwinden, führten Ares et al. [77] das RATA-Konzept ein, mit dem Ziel die Beschreibung und Unterscheidung von Proben zu verbessern. Bei diesem alternativen Ansatz mit intensitätsbasierten Antworten auf einem CATA-ähnlichen Fragebogen wählen die Panelist*innen zutreffende Attribute zur Beschreibung der Probe aus und bewerten anschließend deren Intensität [77]. In der vorliegenden Untersuchung wurde hierzu eine strukturierten 5-Punkte-Skala verwendet (1 = "trifft kaum zu" bis 5 = "trifft sehr zu"). Die RATA-Methode hat im Vergleich zur CATA-Methode somit eine höhere Trennschärfe [76, 77] und ist auch für Proben geeignet, die subtile Unterschiede aufweisen [78], erfordert aber auch einen höheren kognitiven Aufwand als die CATA-Methode [79]. Durch die RATA-Methode werden die Panelist*innen außerdem eher dazu angeregt eine breitere Charakterisierung der Proben vorzunehmen, indem sie eine größere Anzahl von Attributen auswählen und später deren Intensität angeben [78, 80]. Die Reproduzierbarkeit von RATA mit halbgeschulten Panelist*innen scheint ähnlich wie bei einer einfachen Checkliste zu sein, was die Validität von RATA als sensorisches Profilierungsinstrument unterstützt [81].

Generierung der Attribute

Die Attribute, die in den Fragebogen aufgenommen wurden, wurden durch das Forschungsteam in einem mehrstufigen Prozess entwickelt. Zunächst wurde die frische Biomasse von *L. maxima* sensorisch auf ihren Geruch geprüft. Anschließend wurden die wahrgenommenen Eigenschaften diskutiert, bis ein Konsens über relevante sensorische Attribute erzielt wurde. Ergänzend wurden die Ergebnisse der GC-MS-Vorversuche sowie einschlägige Literatur und bereits veröffentlichte Studien^[50, 82-86] herangezogen, um die Validität und Vollständigkeit der Begriffsauswahl sicherzustellen. Die resultierende Attributliste wurde anschließend durch Diskussionen innerhalb des Forschungsteams weiter verfeinert, wodurch eine finale Auswahl von 12 sensorischen Attributen getroffen wurde. Der endgültige Fragebogen für die humansensorische Analyse ist im Anhang A5 dokumentiert.

2.3.2.2 Geruchsbewertung mittels Skalenbewertung und freier Attributnennung

Die ergänzende Geruchsbewertung der frischen Biomasse mittels Skalenbewertung und freier Attributnennung kombiniert sowohl quantitative als auch qualitative Elemente. Die Panelist*innen sollten zunächst den Geruch der Proben auf einer numerischen Skala von 1 bis 10 (1 = „kein Geruch wahrnehmbar“, 10 = „extrem intensiver Geruch“) bewerten. Anschließend wurden sie dazu aufgefordert, 4 bis 5 Attribute frei zu nennen, die ihnen zum Geruch der Probe spontan in den Sinn kamen. Die Skalenbewertung ist eine weit verbreitete Methode zur Quantifizierung sensorischer Eindrücke und ermöglicht es, die Intensität eines Geruchs in einer vergleichbaren, numerischen Form darzustellen^[87]. Diese qualitative Komponente, bei der die Teilnehmenden ohne vorgegebene Deskriptoren arbeiten, ermöglicht es, zudem individuelle sensorische Eindrücke detailliert zu erfassen und relevante Eigenschaften der Proben zu identifizieren. Die freie Attributnennung erlaubt es, eine breite Palette sensorischer Assoziationen zu dokumentieren, was insbesondere für explorative sensorische Studien relevant ist^[88]. Durch die Kombination dieser beiden Techniken lassen sich sowohl objektive als auch subjektive Aspekte der Geruchswahrnehmung erfassen. Diese Methode eignet sich besonders zur Quantifizierung der Geruchsintensität und zur Erfassung sensorischer Merkmale einer Probe^[67].

2.3.2.3 Planung und Durchführung der humansensorischen Analyse

Rekrutierung der Panelist*innen

Die Rekrutierung der Panelist*innen erfolgte gezielt unter Lebensmitteltechnologiestudent*innen der Hochschule Neubrandenburg, die sich mindestens im 5. Semester ihres Bachelorstudiums oder bereits im Masterstudium befanden. Diese Teilnehmenden wurden als geschulte Panelist*innen eingestuft. Ausschlusskriterien umfassten Lebensmittelallergien, Unverträglichkeiten, Störungen des Geschmacks- oder Geruchssinns, Schwangerschaft sowie fehlendes Interesse. Die finale Panelgröße umfasste 12 Personen (männlich: 5 (41,7 %); Alter $25,67 \pm 5,07$).

Probenvorbereitung

Alle Proben wurden 15 Minuten vor der Prüfung vorbereitet. Die Proben (je 9 g) wurde in einem sauberen transparenten Einwegkunststoffbecher (40 mL) ohne Deckel simultan präsentiert. Die Proben wurden mit zufälligen dreistelligen Zahlen codiert und in einer ausgewogenen Reihenfolge präsentiert, um Reihenfolgeeffekte zu minimieren [71]. Zur weiteren Vermeidung von Verzerrungen variierten die dreistelligen Codes zwischen den Sitzungen. Die Proben mit +4 °C, -18 °C und +20 °C wurden ohne weitere Behandlung direkt bei Kühlschranktemperatur serviert. Die +99 °C-Probe hingegen wurde vor der Prüfung in 200 mL Wasser erhitzt und den Panelist*innen unmittelbar nach dem Erhitzen präsentiert, um die sensorische Wahrnehmung unter realistischen Kochbedingungen zu erfassen.

Durchführung der sensorischen Testung

Die sensorische Prüfung fand, gemäß der ISO-Norm 8589:2007 [89], unter genormten Bedingungen statt und wurde in dem Sensoriklabor der Hochschule Neubrandenburg durchgeführt. Die Tests wurden unter künstlicher Beleuchtung, kontrollierter Luftzirkulation und in sensorischen Einzelkabinen durchgeführt. Die Raumtemperatur lag bei 21,6 °C, und die Luftfeuchtigkeit betrug etwa 48 %. Beide Replikate wurden am selben Tag durchgeführt, im Abstand von 30 Minuten. Eine Testdurchführung dauerte 40 Minuten. Vor Beginn der Prüfung wurden die Panelist*innen kurz eingewiesen. Dabei wurde der Fragebogen erläutert, die sensorischen Attribute besprochen und offene Fragen beantwortet, um sicherzustellen, dass alle Teilnehmenden die Aufgabenstellung vollständig verstanden hatten.

2.4 Statistisches Vorgehen

Die statistische Auswertung erfolgte mit IBM SPSS Statistics (Version 29.0, New York, USA) und Microsoft® Excel® LTSC MSO (Version 2411, Washington, USA). Es kamen sowohl deskriptive als auch inferenzstatistische Methoden zum Einsatz. Vor der Analyse wurde die Normalverteilung mittels des Shapiro-Wilk-Tests geprüft (vgl. Anhang B). Bei normalverteilten Daten wurden parametrische Testverfahren angewandt: der ungepaarte t-Test für zwei unabhängige Gruppen und die einfaktorielle Varianzanalyse (ANOVA) für mehr als zwei Gruppen. Zusammenhänge zwischen kontinuierlichen, normalverteilten Variablen wurden mittels Pearson-Korrelation analysiert. Wenn die Normalverteilungsannahme nicht erfüllt war, kamen nicht-parametrische Testverfahren zum Einsatz: der Mann-Whitney-U-Test für zwei Gruppen und der Kruskal-Wallis-Test für mehr als zwei Gruppen. Signifikante ANOVA-Ergebnisse wurden mit dem Tukey-Post-hoc-Test analysiert, da er robuste Paarvergleiche ermöglicht und das Risiko eines Fehlers 1. Art kontrolliert. Beim Kruskal-Wallis-Test diente der Mann-Whitney-U-Test als Post-hoc-Test. Zusammenhänge zwischen ordinalen Daten wurden mit der Spearman-Rangkorrelation berechnet, während für nominale Daten der Chi-Quadrat-Test zur Prüfung kategorialer Zusammenhänge genutzt wurde.

Das Signifikanzniveau wurde a priori auf $\alpha \leq 0,05$ festgelegt. Für die statistische Analyse wurde durchgehend die zweiseitige Signifikanz verwendet, um sowohl positive als auch negative Abweichungen zu berücksichtigen. Wo immer möglich, wurde die exakte Signifikanz berechnet, da sie bei kleinen Stichproben einen präzisen p-Wert liefert [90]. Bei größeren Datensätzen, bei denen die Berechnung der exakten Signifikanz aufgrund der Datenmenge nicht möglich war, wurde auf die Monte-Carlo-Signifikanz zurückgegriffen. Diese basiert auf der Simulation von 10.000 Stichprobentabellen und ermöglicht eine präzisere Schätzung des p-Werts. Bei den Post-hoc-Tests wurde die angepasste Signifikanz (Bonferroni-Korrektur) verwendet, um das Risiko eines Fehlers 1. Art zu minimieren. Da bei multiplen Paarvergleichen die Wahrscheinlichkeit eines solchen Fehlers steigt, wurden statistische Korrekturen vorgenommen. Diese Korrekturen gewährleisten, dass das Signifikanzniveau für die Gesamtanalyse kontrolliert bleibt und die Ergebnisse statistisch valide und zuverlässig sind. Durch die konservativen Korrekturmethoden kann es jedoch vorkommen, dass ein Post-hoc-Test nicht signifikant ist, obwohl der zugehörige Haupttest eine signifikante Differenz aufzeigte. Dieses Phänomen ist eine bekannte Konsequenz der strengen Anpassungsmethoden, die die Wahrscheinlichkeit von falsch-positiven Ergebnissen reduzieren [91].

Um Zusammenhänge zwischen den in der GC-MS-Analyse identifizierten VOCs und den sensorischen Attributen aus der humansensorischen Analyse zu untersuchen wurde eine Hauptkomponentenanalyse (PCA) durchgeführt. Diese ermöglichte eine Reduktion der Datendimension und zeigt, welche VOCs mit bestimmten sensorischen Wahrnehmungen assoziiert sind.

3. Ergebnisse

3.1 Ergebnisse der Literaturrecherche

3.1.1 Taxonomie und Morphologie *Limnospira*

Cyanobakterien, einschließlich *Limnospira*, wurden historisch als Pflanzen oder pflanzenähnliche Organismen eingeordnet und unter Bezeichnungen wie „Schizophyceae“, „Cyanophyta“, „Cyanophyceae“ oder „blaugrüne Algen“ klassifiziert. Seitdem ihre prokaryotische Natur Mitte des 20. Jahrhunderts aufgedeckt wurde, hat sich in der wissenschaftlichen Literatur die Bezeichnung „Cyanobakterien“ (oder gelegentlich „Cyanoprokaryoten“) durchgesetzt [92, 93]. Cyanobakterien zählen zu den ältesten Lebensformen der Erde und sind die ursprünglichen Erzeuger der sauerstoffhaltigen Atmosphäre der Erde [94].

Die Nutzung von *Limnospira* (bzw. *Arthrospira* oder *Spirulina*) als Nahrungsmittel lässt sich bis ins 16. Jahrhundert zurückverfolgen [95, 96]. 1827 identifizierten Botaniker den Hauptbestandteil dieser Nahrung als *Spirulina oscillarioide* [97]. Später wurde *Spirulina* aus morphologischen Gründen in *Arthrospira* umbenannt [98]. Obwohl viele Autor*innen lange der Klassifikation nach Geitler [99] folgten, zeigte sich später, dass *Spirulina* und *Arthrospira* deutlich unterschiedliche Merkmale aufwiesen. Viele der als *Spirulina* verkauften Organismen wurden daher als *Arthrospira* neu klassifiziert. Weiterhin wurde 2019 die neue Bezeichnung *Limnospira* eingeführt. Diese neue Gattung enthält unter anderem wirtschaftlich bedeutende Stämme, die zuvor als *Spirulina* oder *Arthrospira* klassifiziert waren [21]. Zusammengefasst identifizierten phylogenetische Untersuchungen und bioinformatische Ansätze zahlreiche Linien von *Spirulina*-Arten, die heute in drei verschiedene Gattungen eingeordnet werden [20]:

- *Spirulina* spp. (12 Arten mit *S. subsalsa* als Typusstamm)
- *Arthrospira* spp. (35 Arten mit *A. jenneri* als Typusstamm)
- *Limnospira* spp. (4 wirtschaftlich relevante Arten, darunter *L. maxima*)

Eine aktuelle genomische Analyse zeigt, dass *Limnospira* eine weitgehend monospezifische Gruppe ist, die durch *L. platensis* repräsentiert wird. Weitere verwandte Stämme, darunter *L. fusiformis*, *L. indica* und *L. maxima*, sollten als Unterstämme von *L. platensis* betrachtet werden [22]. Nach dem Internationalen Code der Nomenklatur für Algen, Pilze und Pflanzen (International Code of Nomenclature for algae, fungi, and plants (ICN) gehört *Limnospira* zur folgenden taxonomischen Ordnung [23]:

Reich:	Prokaryota
Domäne:	Bacteria
Stamm:	Cyanobacteria
Klasse:	Cyanophyceae
Ordnung:	Oscillariales
Familie:	Microcoleaceae
Gattung:	<i>Limnospira</i>

Cyanobakterien der Gattung *Limnospira* sind autotrophe, symbiotische Bakterien, die in der Lage sind, Kohlendioxid als primäre Kohlenstoffquelle für die Photosynthese zu nutzen [96]. *Limnospira* ist ein mehrzelliger und fadenförmiger Organismus ohne Zellkern und Zellorganellen. Die Zellen sind von einer Zytoplasma- sowie einer Außenmembran umgeben und enthalten Thylakoidmembranen, die für die Photosynthese verantwortlich sind. Das genetische Material liegt in Form eines zirkulären Chromosoms im prokaryontischen Nukleoid vor. Die Trichome von *Limnospira* sind isopolar gewunden oder gerade, zylindrisch und regelmäßig spiralförmig mit einer Tendenz zur Lockerung der Windungen. Sie sind unverzweigt und verjüngen sich mehr oder weniger zu den Enden hin. Die Querwände sind kaum oder nur leicht eingeschnürt. Die Färbung variiert von blaugrün bis dunkelgrün. Die Zellen sind stets kürzer als breit, wobei die Endzellen rund oder subkapitata sind und häufig eine verdickte äußere Zellwand aufweisen, die gelegentlich eine kelchartige Struktur bildet [21, 100].

Verschiedene Wachstumsbedingungen wie Temperatur, Lichtquelle und -intensität, Salzgehalt, Alkalinität, Turbulenz und Nährstoffverfügbarkeit können die morphologischen und morphometrischen Merkmale beeinflussen, wie z.B. die Filamentlänge, Spiralbreite, Helixsteigung, Dichtheit der Windungen, Häufigkeit von Aerotopen oder die Helixorientierung [101]. Die beiden wichtigsten Arten dieser Gattung sind *Limnospira maxima* und *Limnospira platensis* (Abbildung 3). Zwischen ihnen bestehen taxonomische Unterschiede in Bezug auf Filamente, Vakuolen, äußere Hülle oder die Regelmäßigkeit der Kapsel jedes Filaments [96].

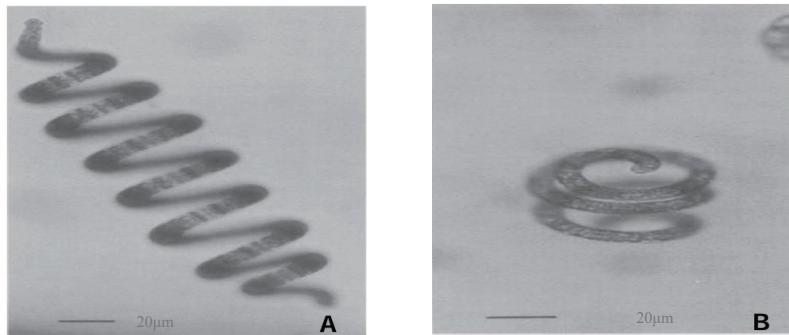


Abbildung 3: Lichtmikroskopische Aufnahme von *L. maxima* (A) und *L. platensis* (B) [96]

Obwohl „Spirulina“ im Handel weiterhin als übergeordneter Begriff verwendet wird, umfasst die Bezeichnung *Limnospira* mittlerweile, wie bereits erwähnt, die industriell genutzten Stämme [20, 102]. Aufgrund der langen Geschichte der Vermarktung von *Limnospira* bzw. *Arthospira* unter dem Handelsnamen „Spirulina“ sind zahlreiche falsche taxonomische Bezeichnungen entstanden. Trotz der großen Anzahl wissenschaftlicher Arbeiten, die die klare Abgrenzung zwischen und *Spirulina*, *Limnospira* und *Arthospira* betonen, wird *Limnospira* in vielen Studien nach wie vor unter der ungültigen Bezeichnung „Spirulina“ bzw. veralteten Bezeichnung *Arthospira* geführt [21]. Diese Praxis stellt ein Problem in der aktuellen Wissenschaft dar, da sie die Gültigkeit von Forschungsarbeiten untergräbt. Zusätzlich wird das Problem dadurch verstärkt, dass in einigen Fällen Stämme mit falschen Artnamen angeboten werden [103].

3.1.2 Nährstoffzusammensetzung von *Limnospira*

Die Cyanobakteriengattung *Limnospira* hat einen hohen Nährwert, deren chemische Eigenschaften und Nährstoffzusammensetzung in Tabelle 10 zusammengefasst. Ein zentrales Merkmal ist ihr hoher Trockenmasseanteil, der zwischen 87,4 % und 95,4 % angegeben wird [8, 104]. Der Wassergehalt bleibt entsprechend niedrig und schwankt zwischen 4,7 % und 12,7 % [10, 104]. Den Hauptbestandteil bilden mit rund 53,1 % bis 76,7 % der Trockensubstanz (TS) die Proteine [9, 10], gefolgt von den Kohlenhydraten mit 3,6 % bis 33,6 % der TS [9, 104]. Der Fettgehalt ist vergleichsweise geringer und variiert ebenfalls stark. Während einige Studien einen sehr niedrigen Fettanteil von etwa 1,3 % [6] aufzeigen, deuten andere Ergebnisse auf einen moderaten Anteil von 8,3 % [11] oder sogar 16,1 % [7] hin. Ein weiterer relevanter Parameter ist der Rohfasergehalt, der zwischen 0,3 % und 9,0 % (bzw. 22,1 %) der TS ausmacht [7, 8, 105]. Ebenso variiert der Aschegehalt, der die mineralischen Bestandteile widerspiegelt, zwischen 6,7 % und 14,6 % [11, 104]. Der Energiegehalt von *Limnospira* liegt laut Untersuchungen zwischen 366,5 und 436,2 kcal pro 100 g TS [10, 106]. Die Zellwand von *Limnospira* enthält Glucosamin und Muraminsäure, zwei Aminozucker, die an Peptide gebunden sind und der Zellwand grampositiver Bakterien ähneln. Diese Zellwände sind, anders als bei Organismen mit Zellulosezellwänden (z.B. Hefen, Chlorella), nicht besonders stabil, wodurch der Zellinhalt für Verdauungsenzyme relativ leicht zugänglich ist [107]. Dies lässt darauf schließen, dass die Bioverfügbarkeit der Nährstoffe von *Limnospira* möglicherweise höher ist als bei anderen (insbesondere pflanzlichen) Nahrungsmitteln [108].

Tabelle 10: Nährstoffzusammensetzung von *Limnospira* bezogen auf 100g TS

	<i>Limnospira maxima</i>				<i>Limnospira platensis</i>				<i>Limnospira</i> (Stamm nicht näher bestimmt)							
	Trockenmasse (%)	Feuchtigkeit (%)	Eiweiß (%)	Fett (%)	Kohlehydrate (%)	Aschegehalt (%)	Faser (%)	Energiegehalt (kcal)	Trockenmasse (%)	Feuchtigkeit (%)	Eiweiß (%)	Fett (%)	Kohlehydrate (%)	Aschegehalt (%)	Faser (%)	Energiegehalt (kcal)
Trockenmasse (%)	89,3	91,6	87,4	-	89,9	70	93,0	91,9	94,9	95,4	-	94,2	94,6			
Feuchtigkeit (%)	10,7	8,4	12,6	2,8	10,1	12,7	6,9	8,0	5,1	4,7	-	5,8	5,4			
Eiweiß (%)	60,6	58,0	60,7	54,8	53,1	76,7	56,8	63,7	67,9	62,8	63,0	59,2	61,6			
Fett (%)	1,3	16,1	1,5	6,6	2,9	2,5	8,3	-	5,6	6,9	4,3	1,4	7,2			
Kohlehydrate (%)	17,4	17,3	-	15,5	33,6	6,5	13,6	15,8	14,7	3,6	17,8	24,5	16,2			
Aschegehalt (%)	9,6	8,6	-	11,7	9,9	14,6	10,1	7,5	6,7	7,5	-	-	7,1			
Faser (%)	-	9,0	0,3	-	-	4,1	4,3	7,6	0,4	8,1	7,7	22,1	7,9			
Energiegehalt (kcal)	-	-	-	-	-	436,2	-	366,5	381,0	-	373,0	-	-			
Referenz	[6]	[7]	[8]	[109]	[9]	[10]	[11]	[106]	[110]	[104]	[111]	[105]	[112]			

Wie in Tabelle 10 ersichtlich, variieren die chemischen Eigenschaften und die Nährstoff-zusammensetzung von *Limnospira* teilweise erheblich. Diese Unterschiede können auf verschiedene Faktoren wie dem Kulturmedium, den physikalisch-chemischen Bedingungen (Temperatur, pH-Wert, Sauerstoff- oder Salzgehalt) sowie den Erntezeitpunkt und die Analysemethoden zurückgeführt werden [105, 111]. Beispielsweise variiert die Zusammensetzung von Proteinen, Lipiden und phenolischen Verbindungen in Abhängigkeit von der Temperatur und dem Natriumgehalt während der Kultivierung, wobei höhere Temperaturen zu einem Anstieg dieser Inhaltsstoffe führen [113, 114]. Höhere Aschegehalte können unter anderem durch Verunreinigungen während des Ernte- und Trocknungsprozesses entstehen oder auf das Vorhandensein von Sandanteilen zurückzuführen sein [115]. Die Fettsäurezusammensetzung kann weiterhin je nach Salzgehalt und Inkubationszeit variieren [114].

Limnospira ist von der US-amerikanischen Food and Drug Administration (FDA) für den Verzehr als generell sicher („Generally Recognized as Safe (GRAS)“) eingestuft worden und ist seit 2003 für Nahrungsergänzungsmittel zugelassen^[116]. Die Europäische Behörde für Lebensmittelsicherheit (EFSA) hat keine spezifische Höchstmenge für den Verzehr von *Limnospira* festgelegt^[117]. Allerdings geben Hersteller, Gesundheitsorganisationen und wissenschaftliche Studien allgemeine Empfehlungen basierend auf üblichen Dosierungen und traditionellen Anwendungen. So liegt die empfohlene Verzehrmenge für Erwachsene zwischen 3 g und 10 g pro Tag, wobei eine maximale Tagesdosis von 30 g nicht überschritten werden sollte^[118, 119]. Da *Limnospira* beträchtliche Mengen an Proteinen und Aminosäuren enthält, sollte es von Personen mit Protein- oder Aminosäurebeschränkungen wie Phenylketonurie oder Ahornsirup-Urin-Krankheit gemieden werden^[120]. Auch Personen mit einer Allergie gegen Algen in der Vergangenheit sollten bei dem Verzehr von *Limnospira* mit Bedacht agieren^[121]. Darüber hinaus wird in Studien darauf hingewiesen, dass die Verwendung von *Limnospira* mit immunsuppressiven Medikamenten aufgrund ihrer immunmodulatorischen Wirkung nicht empfohlen wird^[120].

3.1.2.1 Proteine und Aminosäuren

Der Proteingehalt von *Limnospira* liegt den Analysen verschiedener Publikationen zufolge zwischen 53,1 % und 76,7 % bezogen auf die TS (vgl. Tabelle 10). Einige Studien konnten aber auch einen Proteingehalt von bis zu 90 % nachweisen^[122]. Ein Grund für sehr hohe Werte könnte darin liegen, dass der Anteil des Proteins bei der Berechnung durch das Vorhandensein von Nicht-Protein-Stickstoff (NPN) überschätzt wird^[123]. Der Gehalt an NPN-Verbindungen (u.a. Nukleinsäuren, Amine und Stickstoff-haltigem Zellwandmaterial) in *Limnospira* hat je nach Jahreszeit und Wachstumsphase eine Schwankungsbreite von 4 % bis 40 % des Gesamtstickstoffs. Somit könnte der Proteingehalt durch den standardmäßigen Umrechnungsfaktor von N x 6,25 überschätzt werden. Für Mikroalgen konnte bereits ein Umrechnungsfaktor von N x 4,78 bestimmt werden^[123]. Nichtsdestotrotz hat *Limnospira* einen höheren Proteingehalt als andere üblicherweise als reichhaltige Proteinquelle bekannte Lebensmittel wie Fleisch und Fisch (15 % bis 29 %), Soja (35 %), Erdnüsse (25 %), Eier (12 %) oder Getreide (8 % bis 10 %)^[124].

Die Protein Zusammensetzung von *Limnospira* zeichnet sich durch ein umfassendes Aminosäurenprofil aus, dass sowohl unentbehrliche als auch entbehrliche Aminosäuren in bedeutenden Mengen umfasst. Die Aminosäuren Zusammensetzung variiert in den verschiedenen Publikationen ebenfalls (vgl. Tabelle 11). In der Proteinfraktion sind zwar alle unentbehrlichen Aminosäuren, die etwa 37 % bis 47 % des Gesamtgewichts der Proteine ausmachen vorhanden, insgesamt ist der Gehalt an entbehrlichen Aminosäuren, wie Glutaminsäure, Asparaginsäure, Arginin, Alanin, Prolin und Serin aber höher^[105]. Trotzdem zeigen die Analysen der Aminosäuren in *Limnospira* im Allgemeinen eine qualitativ hochwertige Ausgewogenheit der Aminosäuren Zusammensetzung, d.h. sie enthält alle unentbehrlichen Aminosäuren und zwar in einer Menge, die (rein rechnerisch) bis zu 100 % des Tagesbedarfs eines Erwachsenen gemäß den FAO/WHO-Empfehlungen für die Proteinzufluss decken kann. Beispielsweise reicht der an

Isoleuci-Gehalt in *Limnospira* von 2,8 g bis 6,78 g pro 100 g TS. [112, 125]. Eine 70 kg schwere Person müsste je nach Isoleucingehalt der TS zwischen 20,65 g und 50 g verzehren, um ihren täglichen Bedarf zu decken. Ähnlich verhält es sich mit Aminosäuren wie Leucin oder Lysin, dessen Werte zwischen 1,8 g und 9,81 g [125, 126] bzw. 2,09 g und 7,3 g pro 100 g TS [6, 125] liegen. Auch wenn *Limnospira* eine Vielzahl an essentiellen Aminosäuren liefert, ist der Gehalt an Methionin (0,001 g bis 2,75 g pro 100 g TS) [6, 96] und Cystein (0,1 g bis 1,94 g pro 100 g TS) [6, 126] vergleichsweise gering, was ihre Eignung als alleinige Proteinquelle begrenzen könnte [127]. Nichtsdestotrotz ist die Proteinzusammensetzung von *Limnospira* den meisten anderen pflanzlichen Quelle (einschließlich Hülsenfrüchten, wie z.B. Sojabohnen) überlegen [111]. In Bezug auf den Gehalt an Phenylalanin in *Limnospira* zeigen Analysen Werte zwischen 2,61 g und 7,85 g pro 100 g TS [6, 126]. Diese Werte können für Menschen mit Phenylketonurie, einer Stoffwechselstörung, bei der der Körper Phenylalanin nicht abbauen kann, ein erhebliches Risiko darstellen. Aus diesem Grund müssen Lebensmittel, die signifikante Mengen an Phenylalanin enthalten, laut der europäischen Verordnung Nr. 1169/2011 zur Information der Verbraucher*innen über Lebensmittel, deutlich gekennzeichnet werden [128]. Weitere detaillierte Informationen zum Aminosäurenprofil sind in Tabelle 11 zusammengefasst.

Tabelle 11: Aminosäurenzusammensetzung von *Limnospira* in g/100g TS

Aminosäure	<i>Limnospira maxima</i>				<i>Limnospira platensis</i>				<i>Limnospira</i> (Stamm nicht näher bestimmt)				Tagesbedarf ^l		
unentbehrlich [129]															
Histidin	0,8	3,2	0,8	2,2	2,2	1,0	1,7	1,1	2,8	2,7	2,8	1,2	1,0	2,7	10
Isoleucin	3,2	2,8	2,6	6,7	4,5	3,6	5,4	3,2	6,5	6,8	3,9	3,1	3,5	6,8	20
Leucin	6,3	1,8	4,1	9,8	9,8	5,8	9,1	5,0	7,9	7,7	8,4	5,1	5,4	7,9	39
Lysin	2,1	7,3	1,9	4,8	7,1	3,0	4,4	3,0	4,7	4,4	4,6	3,3	3,0	4,4	30
Methionin	-	-	0,9	2,5	1,9	1,6	1,9	1,2	2,3	2,4	2,8	-	1,2	2,4	10,4
Phenylalanin	2,6	-	2,4	5,3	7,9	3,0	4,4	2,8	4,4	4,4	4,1	2,7	2,8	4,4	25
Threonin	2,9	-	2,6	6,2	4,6	3,3	5,7	3,0	4,6	4,9	3,4	2,9	2,9	4,9	15
Tryptophan	-	-	0,3	1,2	1,1	-	0,9	1,9	1,9	2,0	-	1,1	1,9	4	
Valin	3,3	1,3	3,1	7,1	7,8	4,1	6,1	3,5	6,1	6,4	4,0	3,6	3,9	6,4	26
konditionell unentbehrlich [129]															
Arginin	5,5	-	3,3	7,3	6,0	4,5	8,4	4,2	7,5	7,7	4,9	3,9	4,3	7,6	-
Cystein	0,1	-	-	0,9	1,9	0,6	0,2	0,7	1,1	1,3	0,6	-	0,6	1,3	-
Glutamin	-	14,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	13,8	-
Serin	3,1	6,6	2,5	5,1	3,3	3,3	5,2	3,0	4,6	4,2	3,8	3,2	2,8	4,1	-
Tyrosin	2,6	-	1,8	5,3	7,9	2,8	4,4	2,6	-	3,5	3,4	-	2,5	3,5	-
entbehrlich [129]															
Alanin	6,5	-	4,0	9,5	11,5	5,1	8,3	4,5	7,5	7,4	11,8	4,2	4,6	7,4	-
Asparagin	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Asparaginsäure	5,7	17,2	4,8	11,8	10,1	6,4	8,8	5,8	11,2	11,2	5,4	5,0	6,0	11,2	-
Glutaminsäure	8,0	15,7	7,9	10,3	14,4	9,3	16,1	8,4	13,7	13,8	7,0	8,4	9,1	-	-
Glycin	2,5	3,4	2,3	5,7	5,3	3,2	5,8	3,1	5,2	5,2	6,7	3,1	3,1	5,2	-
Prolin	4,8	-	1,5	4,2	5,2	2,4	4,2	2,4	4,4	4,4	4,1	2,3	2,4	4,3	-
Referenz	[6]	[125]	[109]	[130]	[126]	[110]	[9]	[131]	[104]	[112]	[96]	[105]	[111]	[132]	[127]

1: in mg/kg KG/Tag Bezogen auf eine 70 kg schwere Person

Wie bereits beschrieben weist *Limnospira* keine Zellulose in der Zellwand auf, sondern eine dünne instabile Hülle aus Murein, einem Peptidoglykan. Die Zellwand stellt damit keine Barriere für proteolytische Enzyme dar^[133], weshalb die Proteinverdaulichkeit ohne vorherige chemische oder physikalische Verarbeitung bei 80 % - 90 % liegt^[115]. Das *Limnospira*-Protein weist zudem weitere Eigenschaften auf, die seinen Nährwert erhöhen. So zum Beispiel der biologische Wert, welcher bei 75 liegt^[111] und ein Maß für den im Körper verbleibenden Stickstoff im Verhältnis zum aufgenommenen Stickstoff darstellt^[129]. Die Netto-Proteinverwertung, also der Prozentsatz des aufgenommenen Stickstoffs, der im Organismus verbleibt, liegt bei 62 %. Außerdem weist *Limnospira* einen hohen Verdaulichkeitskoeffizienten von 85 - 95 auf, wobei die Proteineffizienz bei 1,9 liegt^[111].

3.1.2.2 Lipide und Fettsäuren

Die vorherrschenden Fettsäuren in *Limnospira* sind die langkettigen Fettsäuren Palmitinsäure (bis zu 52,0 %^[134]), Ölsäure (bis zu 16,6 %^[107]), γ -Linolensäure (bis zu 26,1 %^[135]) und Linolsäure (bis zu 18,7 %^[16]). Einige Quellen berichten teils auch höhere Werte^[96]. Weitere Lipide in *Limnospira* sind unter anderem die Eicosapentaensäure (bis zu 7,2 %^[136]), Docosatriensäure (bis 10,5 %^[136]) und Arachidonsäure (bis zu 13,9 %^[113]) (vgl. Tabelle 12).

Ein besonderes Merkmal der in *Limnospira* enthaltenen Lipide ist der relativ hohe Gehalt an mehrfach ungesättigten Fettsäuren (Polyunsaturated Fatty Acid (PUFA)), die etwa 20 % bis 52 % der Gesamtfettsäuren ausmachen^[107, 137], sowie der hohe Gehalt an essentiellen ω -3- und ω -6-Fettsäuren. Die mengenmäßig bedeutendsten essenziellen Fettsäuren sind Linolsäure und γ -Linolensäure, wobei *Limnospira* als eine der pflanzlichen Quellen mit dem höchsten Gehalt an γ -Linolensäure gilt^[111]. In einigen Studien wurden überraschenderweise auch Docosahexaensäure (DHA) (bis zu 6,6 % der Gesamtfettsäuren^[114]) und Eicosapentaensäure (EPA) (bis zu 7,2 % der Gesamtfettsäuren^[136]) in *Limnospira* nachgewiesen. Die Präsenz von DHA und EPA in *Limnospira* ist eher ungewöhnlich, da Cyanobakterien diese langkettigen ω -3-Fettsäuren typischerweise nicht synthetisieren. Mögliche Erklärungen hierfür sind Kontamination durch marine Mikroalgen, methodische Ungenauigkeiten oder spezielle Kultivierungsbedingungen, die geringe Mengen dieser Fettsäuren begünstigen könnten. Aufgrund der geringen Mengen ist dieser Befund aus diätetischer Sicht jedoch von begrenzter Relevanz.

Der Anteil der ω -3-Fettsäuren in *Limnospira* beträgt bis zu 17,7 %^[136], der Anteil der ω -6-Fettsäuren bis zu 52,1 %^[107] des Gesamtfettgehaltes. Basierend auf den verfügbaren Literaturdaten variiert das Verhältnis von ω -3- zu ω -6-Fettsäuren in *Limnospira* je nach Quelle zwischen 0,05 und 0,65^[113, 114, 135-137], mit einem Durchschnitt von 0,30. Somit ist der Gehalt an ω -6-Fettsäuren durchschnittlich etwa dreimal so hoch wie der an ω -3-Fettsäuren. Ein ω -3/ ω -6-Verhältnis nahe 1:1 oder mit einem leichten Überschuss an ω -6-Fettsäuren wird allgemein als vorteilhaft für die Gesundheit betrachtet^[129].

Limnospira enthält neben PUFA weiterhin mit bis zu 75,1 % des Gesamtfettgehalts einen hohen Anteil an gesättigten Fettsäuren (Saturated Fatty Acids (SFA)). Quantitativ von Bedeutung ist hier vor allem

die Palmitinsäure. Einfach ungesättigte Fettsäuren (Monounsaturated Fatty Acids (MUFA)) sind mit bis zu 20,4 % des Gesamtfettgehalts nur in geringeren Mengen enthalten (vgl. Tabelle 12).

Tabelle 12: Fettsäurezusammensetzung von *Limnospira* in % des Gesamtfettgehaltes

Fettsäure		<i>Limnospira maxima</i>				<i>Limnospira platensis</i>				<i>Limnospira</i> (Stamm nicht näher bestimmt)			
Myristinsäure	C14:0	-	2,3	-	1,3	-	-	-	1,7	-	0,5	7,5	0,5
Myristoleinsäure ω-5	C14:1	-	4,1	-	-	-	-	-	4,8	-	-	2,6	-
Palmitinsäure	C16:0	36,9	36,8	52,0	33,5	25,8	44,2	26,8	31,6	37,1	40,7	34,6	39,9
Palmitoleinsäure ω-7	C16:1	9,8	5,3	4,0	3,6	3,8	6,4	7,1	8,3	-	6,4	2,8	6,5
Stearinsäure	C18:0	1,2	4,8	1,5	5,8	1,7	-	-	8,6	5,5	1,9	8,9	2,0
Elaidinsäure ω-9	C18:1	-	-	-	-	-	-	-	2,8	-	-	-	-
Ölsäure ω-9	C18:1	2,6	8,6	3,0	5,9	16,6	0,9	8,2	11,2	2,3	1,6	11,3	1,8
Linolsäure ω-6	C18:2	17,1	7,4	17,4	11,0	12,0	18,7	14,1	11,8	3,3	17,9	5,6	17,9
γ-Linolensäure ω-6	C18:3	26,1	12,5	21,4	3,2	40,1	23,4	-	14,1	24,5	24,5	11,4	24,6
α-Linolensäure ω-3	C18:3	-	-	-	0,6	+	-	-	4,3	+	-	-	+
Arachinsäure	C20:0	3,0	1,6	-	14,4	-	-	-	1,6	6,2	-	6,1	-
Eicosatriensäure ω-3	C20:3	-	-	-	0,9	-	-	-	-	-	-	-	-
Arachidonsäure ω-6	C20:4	-	-	-	-	-	-	13,3	-	13,9	-	-	-
Eicosapentaensäure ω-3	C20:5	-	-	-	1,7	-	-	7,2	-	-	-	-	-
Behensäure	C22:0	-	-	-	0,9	-	-	12,7	-	-	-	-	-
Erucasäure ω-9	C22:1	-	-	-	2,1	-	5,2	-	-	-	5,3	-	5,4
Docosatriensäure ω-3	C22:3	-	-	-	-	-	-	10,5	-	-	-	-	-
Docosahexaensäure ω-3	C22:6	2,2	6,6	-	2,7	-	-	-	5,4	-	-	5,5	-
Lignocerinsäure	C24:0	-	-	-	1,0	-	1,1	-	-	-	1,2	-	1,5
Σ SFA		41,1	45,5	53,5	56,9	27,5	45,3	39,5	43,5	48,8	44,3	57,1	43,8
Σ UFA		57,8	44,5	45,8	31,7	72,5	54,6	60,4	55,6	51,1	55,7	39,2	56,2
Σ MUFA		12,4	18	7	11,6	20,4	12,5	15,3	24,3	5,1	13,3	16,7	13,7
Σ PUFA		45,4	26,5	38,8	20,1	52,1	42,1	45,1	31,3	46	42,4	22,5	42,5
Σ ω-3		2,2	6,6	-	5,9	-	-	17,7	5,4	4,3	-	5,5	-
Σ ω-6		43,2	19,9	38,8	14,2	52,1	42,1	27,4	25,9	41,7	42,4	17	42,5
ω-3 / ω-6		0,05	0,33	-	0,42	-	-	0,65	0,21	0,10	-	0,32	-
UFA/SFA		1,41	0,98	0,86	0,56	2,64	1,21	1,53	1,28	1,05	1,26	0,69	1,28
Referenz		[135]	[114]	[134]	[137]	[107]	[16]	[136]	[114]	[113]	[104]	[114]	[108]

+ : enthält Spuren

Die Lipide in *Limnospira* lassen sich in verschiedene Klassen einteilen. Innerhalb der Gesamtfette ist der Anteil der Neutralfette mit 45 % am höchsten, gefolgt von Glykolipiden (39 %) und Phospholipiden (16 %). Insbesondere den Glykolipiden werden bioaktive Wirkungen zugesprochen [12]. Die Unterkasse der Neutralfette besteht zu 55 % aus Triacylglycerin, zu 20 % aus veresterten Sterolen und zu 9 % aus freien Sterolen. Zudem sind geringe Mengen an freien Fettsäuren, Diacylglycerin und Monoacylglycerin in abnehmender Reihenfolge vorhanden. Unter den Glycolipiden sind Sulfochinovosyldiacylglycerin und Digalactosyldiacylglycerin die vorherrschenden Komponenten und machen etwa 70 % der gesamten Glycolipide aus, gefolgt von Monogalactosyldiacylglycerin mit 10 %. Cerebroside, Steryl-glycoside und veresterte Sterylglycoside machen zusammen etwa 20 % der Glycolipide aus [16]. Die Phospholipide bestehen zu 35 % aus Phosphatidylethanolamin, zu etwa 35 % aus Phosphatidylcholin und zu geringen Mengen aus Phosphatidylinositol sowie Phosphatidylserin [16]. Die in *Limnospira* enthaltenen Fette lassen sich zudem in verseifbare (83 %) und unverseifbare Verbindungen (17 %) einteilen. Die unverseifbaren Fraktionen der Fette bestehen im Wesentlichen aus Paraffin, Pigmenten, Terpenalkoholen und Sterolen [107, 115]. Der verseifbare Anteil besteht hauptsächlich aus Monogalactosyl und Digalactosyl, Diglyceride (23 %), Sulfochinovosyldiglycerid (5 %) und Phosphatidylglycerin (25,9 %), Phosphatidylcholin, Phosphatidylethanolamin und Phosphatidylinositol [107].

3.1.2.3 Kohlenhydrate

Der Kohlenhydratanteil in *Limnospira* ergibt sich aus der Differenz zwischen der Gesamtbiomasse und den analysierten Asche-, Fett- und Proteinanteilen. Die Angaben schwanken wie bereits beschrieben zwischen 3,6 % und 33,6 % der TS [9, 104] (vgl. Tabelle 10). Die Kohlenhydrate in *Limnospira* enthalten keine Zellulose, sondern bestehen aus weichen Mucopolysacchariden. Im Gegensatz zu Zellulose sind diese leicht verdaulich (Verdaulichkeit 85 % bis 95 %) und nährstoffreich. Sie sind damit auch für ältere Menschen und Personen, die unter einer Malabsorption im Darm leiden, gut verträglich [96, 108, 131].

Die Analysen der Monosaccharidprofile zeigen, dass sich der Gesamtzucker auf etwa 7,5 % der TS beläuft, wobei Glucose und Rhamnose die am häufigsten vorkommende Monosaccharide darstellen [138]. Die in *Limnospira* enthaltenen Polysaccharide sind vielversprechende bioaktive Substanzen aus langen, glykosidisch verknüpften Monosaccharidketten. Der überwiegende Teil liegt in Form von glukosehaltigen Polymeren, wie Rhamnosamin (9,7 %), Glucosamin (1,9 %), und Glykogen (0,5 %) vor [107]. Weiterhin bestehen die Polysaccharide zu 5,31 % aus Sulfaten, zu 3,60 % aus Uronsäuren, zu 2,75% aus Proteinen, zu 0,21 % aus Aminosäuren und zu 0,15 % aus Betaglucanen [138].

Die in *Limnospira* enthaltenen Polysaccharide lassen sich in intrazelluläre Polysaccharide (IPS) und Exopolysaccharide (EPS) unterteilen. IPS bestehen aus komplexen sauren Sulfatpolysacchariden und machen 15 - 20 % der Zellmasse aus. EPS hingegen sind wasserlösliche Heteropolysaccharide [139], die von *Limnospira* sezerniert werden und essenzielle Funktionen in der Biofilmbildung, Zelladhäsion sowie dem Schutz vor Umweltstressoren erfüllen [12, 139]. Die biochemische Zusammensetzung der EPS ist sehr komplex. Sie enthalten verschiedene Monosaccharide wie Neutralzucker (Glucose, Galactose, Xylose und Mannose), Säurezucker (Glucuron- und Galacturonsäure) und Desoxyzucker (Rhamnose und Fucose). Außerdem können sie Sulfat, Acetat, Pyruvat oder methylierte Gruppen enthalten [12, 140] und zeichnen sich durch das Vorhandensein von Pentosen aus, die normalerweise in Polysacchariden prokaryotischen Ursprungs fehlen [12]. Auch Glykoproteine und Lipide können mit EPS assoziiert sein. Verschiedene Wachstumsbedingungen können zudem die Produktion und die Zusammensetzung der Kohlenhydrate beeinflussen [140].

Peptidoglykane und Hemizellulose in der Zellwand von *Limnospira* wirken präbiotisch, indem sie Probiotika nähren und somit die Darmflora, das Immunsystem sowie die Verdauung unterstützen. Gleichzeitig weisen diese Zellwandpolysaccharide Ballaststoffeigenschaften auf, die zur Verbesserung des Stuhlgangs sowie zur Regulation des Blutzucker- und Cholesterinspiegels beitragen können [56, 141]. Neben diesen strukturellen Polysacchariden enthält *Limnospira* weitere bioaktive Kohlenhydrate mit nutritiven Potenzial. Dazu zählt das hochmolekulare Polysaccharid Immulina, das etwa 0,5 % der TS ausmacht [131, 142]. Zudem sind in *Limnospira* sulfatierte Polysaccharide wie Calcium-Spirulan und Natrium-Spirulan nachweisbar, die für ihre biologischen Aktivitäten von Interesse sind [12]. Ein weiterer relevanter Bestandteil sind die 1,3:1,6- β -Glucane, deren Produktion durch Phosphorlimitierung gezielt gesteigert werden kann, mit Anteilen von bis zu 34 % der TS [143].

Die verschiedenen Polysaccharide in *Limnospira* enthalten eine Vielzahl funktioneller Gruppen, die ihnen zusammen mit ihrer strukturellen Vielfalt eine große Bandbreite bioaktiver Eigenschaften verleihen, wie z.B. antimykotische, antimikrobielle und antioxidative Aktivität, Fangen freier Radikale und Hemmung der Lipidperoxidation^[139]. Dadurch gewinnen sie zunehmend an wissenschaftlicher und industrieller Relevanz, da ihr vielseitiges bioaktives Potenzial sowohl für die Gesundheitsforschung als auch für innovative Anwendungen in der Lebensmittel- und Pharmawissenschaft von wachsendem Interesse ist. Darüber hinaus eröffnet die Nutzung löslicher *Limnospira*-Polysaccharide neue Perspektiven in der Materialwissenschaft. Eine aktuelle Studie beschreibt ihre Anwendung in der umweltfreundlichen Synthese von Silber-Nanopartikeln (Ag-NPs), die für ihre antimikrobiellen und antioxidativen Eigenschaften bekannt sind^[144].

3.1.2.4 Vitamine

Limnospira ist unter anderem reich an β-Carotin (Vitamin A), Tocopherol (Vitamin E), Thiamin (Vitamin B₁), Biotin (Vitamin B₇) und Inositol (Vitamin B₈) (vgl. Tabelle 13). *Limnospira* weist einen vergleichsweise hohen Gehalt an Cobalamin (Vitamin B₁₂) auf, wobei es sich in natürlicher Form größtenteils um das biologisch inaktive Pseudovitamin B₁₂ handelt^[145]. Dieses kann vom menschlichen Organismus auf zellulärer Ebene nur schlecht verwertet werden und möglicherweise sogar die Aufnahme von bioverfügbarem Cobalamin aus anderen Quellen hemmen^[146]. Jüngste Forschungsergebnisse zeigen jedoch auch, dass durch gezielte Kultivierungsstrategien *Limnospira*-Stämme entwickelt werden konnten, bei denen mehr als 98 % des enthaltenen Vitamin B₁₂ in der bioaktiven Form vorliegen^[147].

Tabelle 13: Vitaminzusammensetzung in *Limnospira* bezogen auf 100 g TS

Vitamine	<i>Limnospira maxima</i>	<i>Limnospira platensis</i>	<i>Limnospira</i> (Stamm nicht näher bestimmt)						Tagesbedarf ^l	
			-	-	352.000	-	233.000	-		
Provitamin A (IU)	β-Carotin	-	233.000	-	-	-	352.000	-	2.333	
Thiamin (mg)	Vit B ₁	3,1	3,8	3,5	3,0	5,6	5,8	0,5	5,6	3,5
Riboflavin (mg)	Vit B ₂	4,0	4,8	4,0	3,7	4,9	4,7	4,5	4,5	4,0
Niacin (mg)	Vit B ₃	21,0	12,3	14,0	12,2	17,2	15,4	14,9	17,1	14,0
Pantothensäure (mg)	Vit B ₅	-	-	0,1	-	136	108	-	135	0,1
Pyridoxin (mg)	Vit B ₆	0,9	5,3	0,8	-	0,9	0,9	0,7	0,9	0,8
Biotin (µg)	Vit B ₇	-	-	5,0	-	8,3	8,0	-	8,3	10,0
Cobalamin (µg)	Vit B ₁₂	290	180	320	-	193	175	162	193	320
Folsäure (µg)	Vit B ₉	-	-	-	-	9.660	9.920	-	9.660	10,0
Ascorbinsäure (mg)	Vit C	-	-	-	-	-	-	-	-	10,1
Tocopherol (mg)	Vit E	-	-	5,0	6,0	9,6	9,9	-	9,6	10,0
Phyllochinon (µg)	Vit K	-	-	2.200	-	1.124	1.095	1.090	1.120	2.200
Inositol (mg)	Vit B ₈	-	-	-	-	58,4	60,5	-	58,38	-
Referenz		[148]	[149]	[131]	[11]	[112]	[104]	[111]	[132]	[55]
									[150]	[151]

l: Referenzwerte für Erwachsene im Alter vom 25 – 51 Jahre

Der Vitamin-E-Gehalt in *Limnospira* kann bis zu 60 bzw. 100 mg pro 100 g Trockenmasse (TS) erreichen [11, 55] und setzt sich aus etwa 73 % α-Tocopherol und 27 % γ-Tocopherol zusammen [16]. Das enthaltene β-Carotin liegt in einer abiotransformierten Form vor [131], welches nach der Aufnahme im menschlichen Organismus effizient in Vitamin A umgewandelt werden kann [129].

Auch die Konzentrationen von Riboflavin und Thiamin sind mit bis zu 4,9 mg bzw. 5,8 mg pro 100 g TS vergleichsweise hoch. Bereits 28 g bzw. 21 g TS decken den täglichen Bedarf eines erwachsenen Mannes an diesen Vitaminen. Der Niacingehalt in *Limnospira* beträgt bis zu 21 mg pro 100 g TS und zeichnet sich durch eine hohe Bioverfügbarkeit aus. Im Gegensatz zu pflanzlichen Niacinquellen wie Mais oder bestimmten Getreidesorten enthält *Limnospira* keine niacinbindenden Verbindungen wie Phytinsäure, die die Aufnahme und Verwertung des Vitamins beeinträchtigen könnten [152]. Zu beachten ist, dass Vitamine im Allgemeinen empfindlich gegenüber äußeren Einflüssen wie UV-Strahlung, Hitze, Sauerstoff oder Säuren sind. Eine ungünstige Lagerung sowie ungeeignete Zubereitungsverfahren führen teilweise zu erheblichen Vitaminverlusten [129].

3.1.2.5 Mineralstoffe und Spurenelemente

Limnospira ist eine reichhaltige Quelle für eine Vielzahl von Mineralien und Spurenelementen wie Calcium (bis zu 6000 mg/100 g TS [10]), Magnesium (bis zu 486 mg/100 g TS [113]) und Kupfer (bis zu 2,48 mg/100 g TS [8]) (vgl. Tabelle 14).

Besonders bemerkenswert ist der hohe Eisengehalt von bis zu 339 mg pro 100 g TS [112], wodurch *Limnospira* eine wertvolle Eisenquelle darstellt. Im Gegensatz zu vielen pflanzlichen Lebensmitteln enthält *Limnospira* keine nennenswerten Mengen an Phytaten oder Oxalaten, die die Eisenaufnahme hemmen könnten [111]. Dies führt zu einer hohen Bioverfügbarkeit, die bis zu 60 % über der von Eisen-sulfat liegt, einer häufig verwendeten Form in Nahrungsergänzungsmitteln [112]. Diese Eigenschaft macht *Limnospira* insbesondere für Bevölkerungsgruppen mit erhöhtem Eisenbedarf relevant, wie Vegetarier*innen, Veganer*innen, Schwangere und Kinder, bei denen Eisenmangelanämie häufig auftritt. Zudem weist das in *Limnospira* enthaltene Eisen im Gegensatz zu synthetischen Eisenpräparaten wie Eisensulfat keine toxischen Effekte auf und verursacht selbst in hohen Dosen weder bei Mensch noch Tier unerwünschte Nebenwirkungen wie Diarrhö [112].

Der Kalzium- und Phosphorgehalt von *Limnospira* beträgt bis zu 2502 mg [10] bzw. 339 mg pro 100 g TS [10]. Das ausgewogene Ca:P-Verhältnis unterstützt die Knochengesundheit und reduziert das Risiko einer Entkalkung. Zudem begünstigt das Fehlen von Oxalat die Kalziumaufnahme und verbessert so die Verwertbarkeit des Minerals [111]. Ein weiterer Vorteil von *Limnospira* ist ihr geringer Jodgehalt. Im Gegensatz zu vielen Meeresalgen besteht dadurch kein Risiko einer übermäßigen Jodaufnahme, sodass sie sicher als Nahrungsergänzungsmittel eingesetzt und flexibel in die Ernährung integriert werden kann, ohne negative Auswirkungen auf die Jodzufuhr oder die Schilddrüsenfunktion zu befürchten [8, 111].

Tabelle 14: Mineralstoff- und Spurenelementgehalt in *Limnospira* in mg/100g TS

Element	<i>Limnospira maxima</i>		<i>Limnospira platensis</i>			<i>Limnospira</i> (Stamm nicht näher bestimmt)						Tagesbedarf ¹	
	999	400	728	123	970	10088	2192	1918	1900	961	800	1000	
Phosphor	999	400	728	123	970	10088	2192	1918	1900	961	800	1000	550
Magnesium	328	100	486	-	320	100	119	148	138	319	400	370	350
Kalium	652	320	1675	170	1700	2502	2085	2186	2181	1660	1400	1600	4000
Natrium	1540	1540	2033	217	-	14004	1540	1510	1500	641	900	250	1500
Calcium	677	400	207	364	270	6000	922	1044	1043	468	700	1500	1000
Eisen	9	-	16	12	54	81	273	339	337	87	100	170	11
Zink	2,17	1,30	0,19	2,60	1,76	5,00	3,62	4,49	4,19	1,45	3,0	7,0	14
Selen	-	-	0,08	-	-	-	0,04	0,05	-	0,03	-	-	0,07
Jod	0,18	-	-	-	-	-	-	-	-	0,14	-	-	0,2
Flourid	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3,5
Chrom	-	-	-	-	-	-	0,33	0,40	-	< 0,4	0,28	-	0,03–0,1
Kupfer	2,48	1,9	-	-	0,09	1,22	1,22	1,51	1,40	0,47	1,2	-	1,0–1,5
Mangan	1,9	5,0	1,09	-	2,41	1,56	5,66	7,02	6,92	3,26	5,0	3,0	2,0–5,0
Molybdän	0,12	0,49	-	-	-	-	0,37	0,46	-	-	-	-	50–100
Bor	1,5	-	-	-	0,27	-	2,88	3,57	-	-	-	-	-
Referenz	[8]	[153]	[113]	[11]	[154]	[10]	[104]	[112]	[132]	[111]	[55]	[155]	[151]

1: Referenzwerte für Erwachsene im Alter vom 25 – 51 Jahre

3.1.2.6 Pigmente

Limnospira enthält eine Vielzahl natürlicher Pigmente, darunter Chlorophyll, β-Carotin und Phycobilin (Tabelle 15). Die wasserlöslichen, photosynthetisch aktiven Phycobilin, auch Phycobiliproteine genannt, setzen sich hauptsächlich aus Phycocyanin, Allophycocyanin und Phycoerythrin zusammen. Dabei gilt C-Phycocyanin als das dominante Pigment, das etwa 20 % der gesamten Proteinfraktionen ausmacht^[111]. Das Verhältnis von C-Phycocyanin zu Allophycocyanin liegt bei etwa 10:1^[111]. Zudem zählt *Limnospira* zu den chlorophyllreichsten Cyanobakterien mit einem Gesamtgehalt von 11,0 bis 15,6 mg/g, wobei sich dieser aus 5,4 bis 12,5 mg/g Chlorophyll-a und etwa 6,4 mg/g Chlorophyll-b zusammensetzt. Chlorophyll kann zudem in Chlorophyllin umgewandelt werden, ein wasserlösliches Natrium-Kupfer-Salz-Derivat, das vom menschlichen Körper besonders gut aufgenommen werden kann^[109, 154, 156, 157]. *Limnospira* enthält weiterhin Carotinoide, insbesondere β-Carotin, in Mengen von etwa 2,1 bis 2,7 mg/g. Nach Angaben der FAO steht eine tägliche Aufnahme von 6 mg β-Carotin im Zusammenhang mit einem verringerten Krebsrisiko^[4]. β-Carotin ist jedoch temperatur- und oxidationsempfindlich^[129]. Das Enzym Lipoxygenase katalysiert die Oxidation von β-Carotin durch Sauerstoff, wodurch die Moleküle zerstört werden. Zudem ist β-Carotin lichtempfindlich und unterliegt bei Temperaturen über 60 °C einer Isomerisierung, bei der trans-β-Carotin in die weniger stabile cis-Form umgewandelt wird^[158].

Tabelle 15: Pigmentgehalt in *Limnospira* in mg/g TS

Pigmente	<i>Limnospira maxima</i>		<i>Limnospira platensis</i>			<i>Limnospira</i> (Stamm nicht näher bestimmt)					
	1,8	2,2	4,4	1,7	3,8	5,0	5,7	5,5	5,5	3,7	6,0
Carotinoide	-	-	2,7	-	-	2,1	2,5	2,4	2,4	-	-
β-Carotinoide	-	-	-	-	-	12,0	15,6	14,7	14,7	10,0	11,0
Chlorophyll	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Chlorophyll a	5,4	6,1	10,8	7,4	12,5	-	-	-	-	-	-
Chlorophyll b	-	-	-	6,4	-	-	-	-	-	-	-
C-Phycocyanin	64,5	45,3	251,2	18,3	44,8	172,0	146,5	141,8	141,7	140,0	180,0
Allophycocyanin	27,8	-	-	5,3	18,9	-	-	-	-	-	-
Phycoerythrin	5,5	-	-	3,5	5,3	-	-	-	-	-	-
Xanthophylle	-	-	-	-	-	-	2,8	2,7	2,7	-	-
Zeaxanthin	-	-	1,3	-	-	1,0	1,3	1,3	1,3	-	-
Referenz	[109]	[156]	[157]	[154]	[159]	[111]	[104]	[112]	[132]	[55]	[155]

3.1.2.7 Weitere sekundäre Pflanzenstoffe

Limnospira besitzt neben den bereits genannten bioaktiven Verbindungen weitere sekundäre Pflanzenstoffe. Dazu zählen auch phenolische Verbindungen, welche sich in die zwei Untergruppen Phenolsäuren (ca. 11,91 bis 22,5 mg/g TS) und Flavonoide (ca. 4,31 bis 30,9 mg/g TS) unterteilen lassen [159]. Die beobachteten Schwankungen lassen sich sowohl auf die Anbaubedingungen als auch auf Unterschiede im Wassergehalt der Proben zurückführen [17]. Phenolische Verbindungen sind Stoffwechselnebenprodukte und tragen zum Schutz von Mikroalgen und Cyanobakterien gegen verschiedene Umweltfaktoren wie UV-Strahlung, Krankheitserreger und Mineralverschmutzung bei [142]. Aufgrund ihrer Redoxeigenschaften spielen sie eine wichtige Rolle bei der antioxidativen Aktivität und sind sehr effizient in der Neutralisation freier Radikale [129]. Zu den in *Limnospira* vorkommenden Phenolsäuren zählen Pyrogallol, Gallussäure, chlorogenes Koffein, Vanillinsäure, p-Cumarsäure. Quercitrin, Naringenin, Catechin, Epicatechin, Naringin, Hesperidin, Rutin, Hesperetin, Kaempferol und Apigenin gehören zu den in *Limnospira* enthaltenen Flavonoiden [17, 159].

3.1.2.8 Unterschiede in der frischen und getrockneten Biomasse von *Limnospira*

Herkömmliche thermische Verfahren können den Nährwert von Lebensmitteln erheblich beeinträchtigen, da viele essenzielle Nährstoffe, darunter Proteine, Pigmente, Vitamine und bioaktive Verbindungen, hitze- und oxidationsanfällig sind [129, 160]. Dies gilt auch für den traditionellen Produktionsprozess von *Limnospira*, bei dem die frisch geerntete Biomasse meist durch Trocknung haltbar gemacht wird. Dabei können empfindliche Nährstoffe abgebaut und Proteine sowie Lipide oxidiert oder denaturiert werden. Zudem treten Maillard-Reaktionen auf, die die Qualität und den ernährungsphysiologischen Wert der Biomasse weiter verringern [160].

Frische Biomasse von *Limnospira* ist eine neuartige Produktform, die sich von der getrockneten Biomasse unterscheidet und Vorteile in Bezug auf Nährstoffzusammensetzung und -gehalt sowie funktionelle Wirkungen bieten kann [56]. Die frische *Limnospira*-Biomasse ist ein konzentrierter Brei, der durch einfache Reinigung und Verarbeitung frischer Zellen aus geschlossenen Photobioreaktoren gewonnen wird. Er kann direkt verzehrt oder Speisen zugesetzt werden. Im Gegensatz zu der getrockneten Biomasse bleiben die Fasern der frischen *Limnospira* intakt, ohne offensichtliche Brüche, Beschädigungen oder Austritt von Inhaltsstoffen [56] (vgl. Abbildung 4).

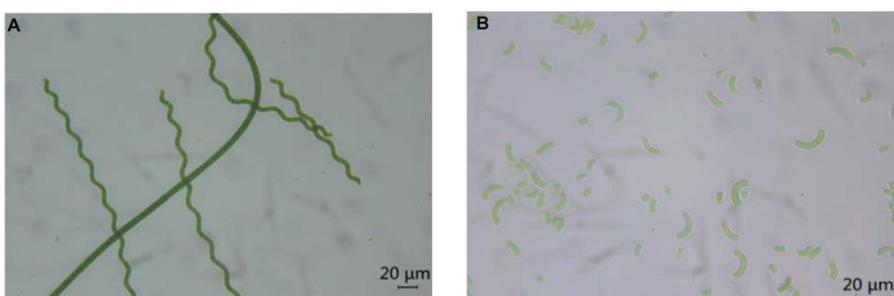


Abbildung 4: Lichtmikroskopische Aufnahme von *Limnospira* - frisch (A) und getrocknet (B)

Während der Trocknung gehen wichtige bioaktive Verbindungen wie Pigmente, Carotinoide und Enzyme in erheblichem Maße verloren, was die antioxidativen Eigenschaften der getrockneten Biomasse mindert [56, 105, 161]. Insbesondere Carotinoide und Phycocyanine sind hitzeempfindlich und können während des Prozesses stark reduziert werden [56, 105], mit Verlusten von über 20 % bei Carotinoiden [158] und 50 % bis 90 % bei Phycocyaninen [160]. Im Gegensatz dazu kann die vollständige Zellstruktur der frischen Biomasse beispielsweise den Verlust von Phycocyanin als natürliche Barriere wirksam verringern [56]. Dementsprechend konnte gezeigt werden, dass die Superoxiddismutase-Aktivität in der getrockneten Biomasse nicht mehr nachweisbar war, während sie in frischer Biomasse mit 167,7 U/g eine hohe antioxidative Kapazität aufwies [162]. Interessanterweise kam eine andere Studie zu dem Ergebnis, dass die getrocknete *Limnospira*-Biomasse im Vergleich zur frischen Probe mehr extrahierbare bioaktive Verbindungen enthält und folglich eine höhere antioxidative Aktivität besitzt [57]. Weiterhin enthält die frische *Limnospira*-Biomasse im Vergleich zur getrockneten eine höhere Konzentration an phenolischen und flavonoiden Verbindungen sowie eine insgesamt bessere Qualität dieser sekundären Pflanzenstoffe [57, 160]. So wurden für frische *Limnospira* 469,96 Quercetin/g extrahiertes Trockengewicht gemessen, während die getrocknete Biomasse lediglich 119,43 Quercetin/g enthielt [158].

Auch der Protein-, Kohlenhydrat- und Lipidgehalt wird durch den Trocknungsprozess signifikant verringert. Der Proteinabbau steigt mit zunehmender Temperatur an und kann bis zu 40 % betragen, wobei die Verluste bei 40 °C mit 10 % am geringsten sind und bereits bei 70 °C auf 20 % ansteigen [56, 160, 162, 163]. In ähnlicher Weise kann es je nach Trocknungsverfahren zu Kohlenhydratverlusten von etwa 10 % bis 30 % kommen [160, 163]. Darüber hinaus fördert die Trocknung die Oxidation und den Abbau bestimmter Lipide, was zu einer Verringerung des Gehalts an ungesättigten Fettsäuren in der getrockneten Biomasse führt [56]. Zudem konnte gezeigt werden, dass die in-vitro-Verdaulichkeit von frischer *Limnospira*-Biomasse höher ist als die von sonnen- oder gefriergetrockneter Biomasse, was auf strukturelle Veränderungen während der Verarbeitung zurückgeführt wird [164].

Basierend auf diesen Ergebnissen wurde die Idee entwickelt, frische *Limnospira*-Biomasse als Alternative zu herkömmlichen Trockenprodukten zu nutzen. Es ist allerdings wichtig, darauf hinzuweisen, dass bisher nur wenig darüber bekannt ist, wie sich die Nährstoffe in frischer *Limnospira* während der Lagerung verändern [160]. Außerdem gibt es keine umfassenden Erkenntnisse über die nutraceutischen Wirkungen frischer *Limnospira*-Biomasse auf die menschliche Gesundheit [160].

3.1.3 Potentielle nutrazeutische Eigenschaften von *Limnospira*

Aufgrund ihrer herausragenden Nährstoffzusammensetzung und der Vielzahl bioaktiver Verbindungen rückt *Limnospira* zunehmend in den Fokus der ernährungswissenschaftlichen Forschung. Das Cyanobakterium enthält unter anderem Polysaccharide, Carotinoide, Phycocyanin sowie antioxidativ wirkende Substanzen, die mit verschiedenen gesundheitlichen Vorteilen assoziiert werden [13, 94]. Studien deuten darauf hin, dass diese bioaktiven Inhaltsstoffe unter anderem positive Effekte auf das Immunsystem, den Stoffwechsel und die Regulation des Blutdrucks haben können. Tabelle 16 fasst die potenziellen gesundheitlichen Wirkungen von *Limnospira* zusammen.

Tabelle 16: Nutrazeutische Potentiale der bioaktiven Inhaltsstoffe in *Limnospira* [12-17, 165]

	ernährungsphysiologisch	ernährungstherapeutisch
Phycocyanin	Antioxidativ, entzündungshemmend, hypolipidämisch, hepatoprotektiv, neuroprotektiv, antiviral, kardioprotektiv	Antidiabetisch, antikanzerogen, entzündungshemmend, immunmodulierend, schützend vor Lebererkrankungen
Chlorophyll	Antioxidativ, entgiftend, Gallensekretion fördernd, antimutagen, gastroprotektiv	Schutz vor Karzinogenen, Unterstützung der Verdauung und Lebergesundheit, wundheilungsfördernd
Carotinoide	Antioxidativ, entzündungshemmend, neuroprotektiv	Schutz der Netzhaut, Tumorhemmung, Unterstützung des Immunsystems
Zeaxanthin	Antioxidativ, entzündungshemmend	Schutz der Augen vor altersbedingter Makuladegeneration, Prävention von Augenschäden
Polyphenole	Antioxidativ, entzündungshemmend, antimikrobiell, darmmikrobiommodulierend	Prävention von Herz-Kreislauf-Erkrankungen, antikanzerogen, antidiabetisch, neuroprotektiv, Veränderungen des Darmmikrobioms
Sulfatierte Polysaccharide	Antithrombisch, antiviral, gerinnungshemmend, antioxidativ, antimetastasierend, immunmodulierend	Schutz vor viralen Infektionen (z.B. HIV, Herpes), Verhinderung der Anheftung verschiedener Viren an die Wirtszelle, Prävention von Thrombosen, antioxidativer Zellschutz
Immulina	Immunmodulierend, antiviral, antimikrobiell, entzündungshemmend	Stärkung des Immunsystems, entzündungshemmend bei Autoimmunerkrankungen
Spirulan Polysaccharide	Immunmodulierend, antiviral	Hemmung der Virusvermehrung (z.B. HIV, Influenza), antioxidativ
Calcium-Spirulan	Antibakteriell, antiviral, entzündungshemmend	Unterstützung bei Infektionen (z.B. Herpes), antioxidativ
Provitamin A	Antioxidative, entzündungshemmend	Unterstützung der Augengesundheit, antikanzerogen
Vitamin B ₃ (Niacin)	Energieproduktionsfördernd, cholesterinsenkend, neuroprotektiv	Behandlung und Prävention von Dyslipidämien, Demenz und Depression
Vitamin B ₁₂ (Cobalamin)	Hämoglobinsynthese, neuroprotektiv, energieliefernd	Behandlung von Anämie, Unterstützung des Nervensystems, Prävention von Müdigkeit
Vitamin E	Antioxidativ, entzündungshemmend, neuroprotektiv, zellmembran-stabilisierend, chemoprotektiv	Herz-Kreislauf-Risiko-Reduktion, Schutz vor oxidativem Stress, Unterstützung bei Hauterkrankungen
Vitamin K	Blutgerinnungsfaktor-Syntheseregulation, entzündungshemmend	Unterstützung der Blutgerinnung, Prävention von Osteoporose, Schutz vor Arterienverkalkung (Gefäßschutz)
Selen	Antioxidativ, immunmodulierend	Schilddrüsengesundheit, Prävention von Zellschäden durch freie Radikale
Glykolipide (H-b2)	Antiviral, entzündungshemmend, Hemmung der Pankreaslipase-Aktivität	Blutdruck- und Blutfettregulierend, antidiabetisch, antiviral
Sulfolipide	Antiproliferativ, antiviral, entzündungshemmend, tumorprotektiv	Schutz des Darmmikrobioms, Prävention von Arteriosklerose und Tumorwachstum, blutfettregulierend
Linolsäure	Entzündungshemmend, fettsäuresyntheseregulierend	Herz-Kreislauf-Risiko-Reduktion, Unterstützung der Hautgesundheit
γ-Linolensäure	Antiinflammatorisch, entzündungshemmend, antioxidativ	Unterstützung der Hautgesundheit, Blutzuckerregulierend, Herz-Kreislauf-Risiko-Reduktion
Phenolsäuren	Antioxidativ, antimikrobiell, entzündungshemmend	Schutz vor Herz-Kreislauf-Erkrankungen, antikanzerogen, Förderung des Darmmikrobioms

Antioxidative Wirkung

Die antioxidative Kapazität von *Limnospira* (2101 mg bis 3720,67 mg Ascorbinsäureäquivalente pro 100 g [166, 167]) stellt einen zentralen gesundheitlichen Vorteil dar und unterstreicht ihr Potenzial als funktionelles Nahrungsergänzungsmittel. Diese antioxidative Aktivität beruht auf einer synergistischen Interaktion verschiedener bioaktiver Verbindungen, darunter Phenole, Phycocyanin, Carotinoide und Chlorophyll. Diese Substanzen wirken gemeinsam, um freie Radikale und reaktive Sauerstoffspezies zu neutralisieren und somit zelluläre Schäden durch oxidativen Stress zu minimieren. Zahlreiche In-vitro- und In-vivo-Studien belegen diese protektiven Eigenschaften [13, 166-168]. Darüber hinaus konnte eine Supplementierung mit *Limnospira* zu einer signifikanten Reduktion des Malondialdehyd-Spiegels im Plasma führen [169] führen, was auf eine verbesserte Balance zwischen oxidativen Belastungen und körpereigenen Schutzmechanismen hinweist. Aufgrund dieser antioxidativen Eigenschaften könnte *Limnospira* eine vielversprechende Rolle in der Prävention und unterstützenden Therapie von Erkrankungen spielen, die mit oxidativem Stress assoziiert sind. Dazu zählen neurodegenerative, entzündliche, gastrointestinale und kardiovaskuläre Erkrankungen [13, 168, 170]. Zusätzlich wurde gezeigt, dass die Einnahme von *Limnospira* die Stressresistenz und körperliche Leistungsfähigkeit nach sportlicher Belastung steigern kann [13, 165]. Darüber hinaus weisen sulfatierte Polysaccharide aus *Limnospira* antiatherogene, antithrombogene und gerinnungshemmende Eigenschaften auf, was weitere gesundheitsfördernde Effekte nahelegt [12, 165].

Antimikrobielle und antivirale Wirkung

Studien haben gezeigt, dass *Limnospira* antimikrobielle Eigenschaften gegenüber verschiedenen gram-positiven Bakterien aufweist [13, 94]. Diese hemmende Wirkung konnte sowohl in vitro auf Agarplatten als auch im Rahmen zellulärer Untersuchungen nachgewiesen werden. Die antibakterielle Aktivität geht dabei nicht von der gesamten Zelle aus, sondern von spezifischen Metaboliten, die entweder direkt in das Medium abgegeben oder aus der Biomasse extrahiert wurden [13, 94]. Darüber hinaus gibt es Hinweise auf eine antimykotische Wirkung von *Limnospira*. Zu den wichtigsten bioaktiven Bestandteilen mit vielversprechenden antiviralen Eigenschaften gehören Phycocyanin, sulfatierte Polysaccharide, γ-Linolensäure, Sulfolipide, Calcium-Spirulan und Allophycocyanin [171]. Diese Komponenten wirken synergistisch, indem sie die Immunantwort modulieren, die Virusreplikation hemmen und verschiedene Stadien des viralen Lebenszyklus stören. Dadurch tragen sie zur antiviralen Aktivität von *Limnospira* bei [171]. Zusätzlich wurde gezeigt, dass diese Inhaltsstoffe die Immunfunktion stärken, die Replikation umhüllter Viren hemmen [171] und deren Anheftung an Wirtszellen verhindern [13, 94]. Eine Meta-Analyse bestätigt die in randomisierten kontrollierten Studien (RCTs) beobachteten Verbesserungen virologischer und immunologischer Biomarker [171].

Immunmodulatorische und Antiinflammatorische Wirkung

Limnospira enthält eine Vielzahl an Vitaminen, Mineralstoffen und bioaktiven Verbindungen, die immunmodulatorische Effekte aufweisen. Studien zeigen, dass die Einnahme von Spirulina eine positive Wirkung auf Marker des Immunsystems hat, wobei insbesondere die Inhaltsstoffe Immulina und Phycocyanin zu dieser Immunstimulation beitragen [13, 94]. Darüber hinaus fördern Polysaccharide und Phycocyanine entzündungshemmende Prozesse, indem sie die Freisetzung proinflammatorischer Mediatoren regulieren [13, 166]. Neben ihren immunmodulatorischen Eigenschaften konnte *Limnospira* in Studien die Milchsäurebildung hemmen und so zur Verringerung körperlicher Ermüdung beitragen [172]. Zudem gibt es Hinweise darauf, dass *Limnospira* die Darmmikrobiota positiv beeinflussen und das Immunsystem aktivieren kann [173]. Aufgrund dieser Wirkungen wird ihr auch eine hepatoprotektive Funktion zugeschrieben. Weitere bioaktive Bestandteile wie γ -Linolensäure, Selen und Chlorophyll könnten ebenfalls zu dieser leberschützenden Wirkung beitragen [13, 173]. Besonders hervorzuheben ist der hohe Gehalt an Vitamin B₁₂ in *Limnospira*, dessen Supplementierung möglicherweise positive Effekte auf die Behandlung von Anämie und Immunstörungen haben könnte. Studien legen nahe, dass die tägliche Einnahme von *Limnospira* den Hämoglobinspiegel erhöhen und zur Prävention einer Hämoglobinämie beitragen kann [13]. Darüber hinaus weisen die antioxidativen und entzündungshemmenden Eigenschaften von *Limnospira* und ihren bioaktiven Komponenten darauf hin, dass sie die Expression entzündlicher Zytokine wie Interleukin-6 und Tumornekrosefaktor- α reduzieren und gleichzeitig entzündungshemmende Zytokine wie Adiponektin steigern könnten. Dies deutet auf eine Verringerung des oxidativen Stresses hin und unterstreicht das Potenzial von *Limnospira* als unterstützende Maßnahme bei entzündungsbedingten Erkrankungen [168].

Antitumorale Wirkung

Limnospira weist potenziell antitumorale Eigenschaften auf, die auf verschiedene bioaktive Komponenten zurückgeführt werden. β -Carotin, ein in der Mikroalge enthaltenes Carotinoid, hat sich in Studien als hemmend gegenüber der Tumorbildung und dem Wachstum maligner Gewebe erwiesen. In-vitro-Untersuchungen zeigen, dass *Limnospira*-Extrakte das Wachstum und die Proliferation von Darmkrebszellen signifikant reduzieren können [13]. Besonders Phycocyanin spielt eine zentrale Rolle in den beobachteten antitumoralen Effekten. Tiermodelle belegen, dass Phycocyanin das Wachstum verschiedener Krebszellen, darunter Plattenepithelkarzinome und die chronische myeloische Leukämie, wirksam hemmen kann [13]. Darüber hinaus zeigte C-Phycocyanin in weiteren Studien krebsemmende Effekte, insbesondere durch die Inhibition von Hepatokarzinomzellen. In Tierversuchen wurde zudem eine reduzierte Metastasenbildung bei Dickdarmkrebs und Melanomen beobachtet [168].

Lipidregulierende Wirkung

Limnospira zeigt vielversprechende Effekte auf den Fettstoffwechsel und weist eine cholesterinsenkende Wirkung auf. Klinische Studien belegen, dass der Konsum von *Limnospira* bei übergewichtigen Personen zu einer Verbesserung der Blutfettwerte führt. Zudem hemmte das wässrige Extrakt von *Limnospira* die intestinale Fettaufnahme, was bei adipösen Menschen zu einer Stärkung des Immunsystems und einer Verbesserung der antioxidativen Reaktionen führte [13, 166]. Die Ergebnisse der verfügbaren RCTs zeigen, dass der Verzehr von *Limnospira* die TC-, LDL-C- und TG-Konzentrationen senken und die HDL-C-Werte erhöhen kann (vgl. Tabelle 17). Eine Meta-Analyse bestätigt diese Effekte und berichtet über signifikante Reduktionen von LDL-C (SMD: 0,6; 95 % CI: 0,9 - 0,2; P < 0,05), TC (SMD: 0,6; 95 % CI: 0,9 - 0,2; P < 0,05) und TG (SMD: 0,6; 95 % CI: 0,96 - 0,25; P < 0,05), während HDL-C signifikant anstieg (SMD: 0,3; 95 % CI: 0,0008 - 0,6; P < 0,05). Allerdings wurde eine hohe Heterogenität zwischen den Studien beobachtet ($I^2 = 82,2\% - 97,1\%$, P < 0,001), was auf Unterschiede in Studiendesign und Dosierung hinweisen könnte [174]. Darüber hinaus konnte ein signifikanter Dosis-Wirkungs-Zusammenhang für die Auswirkungen der Supplementierung auf die Konzentrationen des Lipidprofils im Plasma festgestellt werden [174]. Eine weitere Meta-Analyse kam zu vergleichbaren Ergebnissen [175].

Der genaue Mechanismus der hypolipidämischen Wirkung von *Limnospira* ist noch nicht vollständig geklärt, jedoch gibt es Hinweise darauf, dass das Cyanobakterium die Cholesterinabsorption im Jejunum hemmt. Das Glykolipid H-b2 könnte zudem eine dosisabhängige Senkung der Triacylglyceride bewirken, während Phycocyanin über die Hemmung der Pankreaslipase zur cholesterinsenkenden Wirkung beiträgt. Insbesondere C-Phycocyanin wird eine Verbesserung des Lipidprofils zugeschrieben, indem es die Aktivität der Glutathionperoxidase und Superoxiddismutase steigert, freie Radikale neutralisiert und die Expression von NADPH-Oxidase sowie die Lipidperoxidation herunterreguliert. Außerdem wird eine Verringerung der Cholesterin- und Gallensäurerückresorption vermutet. Glykolipid H-b2 und Phycocyanin hemmen möglicherweise die Lipaseaktivität der Bauchspeicheldrüse, während γ -Linolensäure, α -Linolensäure, Linolsäure und Niacin eine Rolle bei der Regulation der Cholesterinsynthese spielen und zur hypolipidämischen Wirkung von *Limnospira* beitragen [173].

Blutzuckerregulation und Antidiabetische Wirkung

Limnospira zeigt potenzielle regulatorische Effekte auf den Kohlenhydratstoffwechsel und weist anti-hyperglykämische Eigenschaften auf [172]. Studien deuten darauf hin, dass die Supplementierung von *Limnospira* glykämische Marker positiv beeinflussen kann [13, 166]. Der blutzuckersenkende Effekt wird vermutlich durch eine Stimulation der β -Zell-Aktivität sowie eine gesteigerte Glukoseaufnahme in peripherem Gewebe vermittelt [173]. Zudem fördern in *Limnospira* enthaltene Polysaccharide und Phycocyanine insulinsensibilisierende Mechanismen, wodurch die Glukoseverwertung optimiert werden könnte [13, 166]. Darüber hinaus können Ballaststoffe sowie Peptide und Polypeptide, die während der Verdauung von Proteinen entstehen, die intestinale Glukoseabsorption reduzieren und somit postprandiale Blutzuckerspitzen abmildern [172]. Weiterhin ist *Limnospira* eine reichhaltige Proteinquelle, von denen

bekannt ist, dass deren Aufnahme die Insulinsekretion stimuliert [172]. Eine weitere mögliche Wirkweise ist die Erhöhung des Adiponectin-Spiegels im Plasma durch *Limnospira*-Supplementierung. Da Adiponectin mit einer gesteigerten Insulinsensitivität assoziiert ist, könnte dieser Mechanismus zur Verbesserung der Blutzuckerregulation beitragen [169]. Eine Metaanalyse bestätigte eine signifikante Reduktion des Nüchternblutzuckers (-17,88 mg/dl; 95 % CI: -26,99 bis -8,78; $I^2 = 25\%$) nach *Limnospira*-Supplementierung. Allerdings konnte kein statistisch signifikanter Einfluss auf den HbA1c-Wert (-0,12 %; 95 % CI: -0,70 bis 0,46; $I^2 = 84\%$) oder den postprandialen Blutzucker (-15,03 %; 95 % CI: -44,99 bis 14,92; $I^2 = 0\%$) festgestellt werden [175] (vgl. Tabelle 17).

Blutdruckregulierende Wirkung

Klinische Studien zeigen, dass *Limnospira* bei übergewichtigen Personen mit Hypertonie eine signifikante Senkung des systolischen Blutdrucks bewirken und gleichzeitig die Endothelfunktion verbessern kann [13, 166]. Diese blutdruckregulierenden Effekte werden teilweise auf das in *Limnospira* enthaltene C-Phycocyanin zurückgeführt, das antioxidative Eigenschaften besitzt und eine gefäßerweiternde Wirkung auf das Endothel ausüben kann [168]. Mehrere RCTs weisen auf eine positive Wirkung von *Limnospira* auf die Blutdruckregulation hin (vgl. Tabelle 17). Eine Metaanalyse bestätigte diese Effekte und ergab eine signifikante Reduktion des systolischen Blutdrucks (MD: -4,41 mmHg; 95 % CI: -6,74 bis -2,07; $p < 0,001$; $I^2 = 66,1\%$; $p = 0,003$) sowie des diastolischen Blutdrucks (MD: -2,84 mmHg; 95 % CI: -4,65 bis -1,03; $p = 0,002$; $I^2 = 62,3\%$; $p = 0,008$). Allerdings wurde eine hohe Heterogenität zwischen den Studien festgestellt, was auf unterschiedliche Studiendesigns, Dosierungen oder Probandencharakteristika zurückzuführen sein könnte [176].

Gewichtsregulierende Wirkung

Mehrere RCTs deuten darauf hin, dass *Limnospira* im Vergleich zu Placebo positive Effekte auf die Körperzusammensetzung haben könnte. Die Supplementierung führte zu einer signifikanten Reduktion des Körpergewichts (MD: -1,77 kg; 95 % CI: -2,77 [177]; MD: -1,76 kg; 95 % CI: -2,65 bis -0,88 [178]) des Körperfettanteils (MD: -1,02; 95 % CI: -1,49 bis -0,54 [177]) sowie des Taillenumfangs (MD: -1,40; 95 % CI: -1,40 bis -1,39 [177]) (vgl. Tabelle 17). Im Gegensatz dazu hatte *Limnospira* keinen signifikanten Einfluss auf den BMI (MD: -0,98, 95%; CI: -2,06 bis 0,18) und das Taillen-Hüft-Verhältnis (MD: -0,01, 95% CI: -0,02 bis 0,00) [177].

Obwohl Tabelle 16 einen Überblick über die ernährungsphysiologischen und ernährungs-therapeutischen Wirkungen von *Limnospira* bietet, muss die wissenschaftliche Evidenz kritisch hinterfragt werden. Ein Großteil der berichteten Wirkungen basiert auf Ergebnissen aus In-vitro- und In-vivo-Studien, die nicht ohne Weiteres auf den Menschen übertragbar sind [170].

Eine strukturiertere Literaturrecherche in der Datenbank PubMed mit den Suchbegriffen („Limnospira“ OR „Spirulina“) AND („therapeutic“ OR „health“) ergab für den Zeitraum von 2014 bis 2024 insgesamt 738 Publikationen. Nach Anwendung des Filters „Human“ reduzierte sich die Anzahl auf 267 Studien. Darunter befanden sich lediglich 34 RCTs, die gezielt die therapeutischen Wirkungen von Limnospira untersuchten. Darüber hinaus wurden nur 10 Metaanalysen und 15 systematische Reviews veröffentlicht, die diese Daten umfassend aufarbeiteten. Die verbleibenden Publikationen umfassten 76 narrative Reviews, 7 Vergleichsstudien und 125 experimentelle Forschungsartikel.

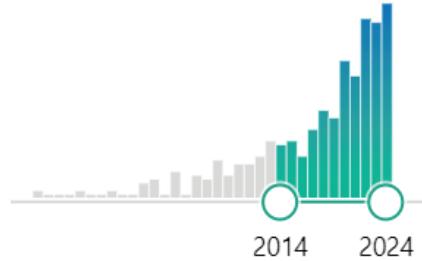


Abbildung 5: Ergebnisse der PubMed Suche zu Arthrosipa und Gesundheit

Diese Ergebnisse verdeutlichen, dass trotz des wachsenden wissenschaftlichen Interesses an *Limnospira* als potenzielle therapeutische Substanz bislang nur eine begrenzte Anzahl hochwertiger Humanstudien vorliegt. Tabelle 17 fasst die Ergebnisse der analysierten randomisierten kontrollierten Studien zu *Limnospira* zusammen und bietet einen systematischen Überblick über den aktuellen Forschungsstand.

Tabelle 17: Übersicht über randomisiert kontrollierte Studien zu *Limnospira*

	Referenz	Land	N	Zielgruppe	Mittleres Alter	Dauer (Wochen)	Dosis (g/d)	Wichtigste Ergebnisse
Gewichtsregulation	Szulinska et al 2017 [179]	Polen	50	Adipöse Personen	49	12	2	Signifikante Reduktion von KG, BMI und TU
	Zeinalian et al 2017 [180]	Iran	56	Adipöse Personen	35	12	1	Signifikante Reduktion von KG und BMI
	Yousefi et al 2018 [181]	Iran	52	Übergewichtige/ Adipöse Personen	40	12	2	Signifikante Reduktion KG, BMI, TU und KF
	Hernandez-Lepeet al 2018 [182]	Mexiko	57	Übergewichtige/ Adipöse Personen	26	6	4,5	Signifikante Reduktion von KG und KF
	Miczke et al 2016 [183]	Polen	40	hypertensive übergewichtige Personen	53	12	2	signifikante Reduktion von KG und BMI
Blutzuckerregulation	Alam et al. 2016 [172]	Indien	40	Patient*innen mit Typ-2- Diabetes	45	6	7	Signifikante Reduktion des NBZ und PPBZ, HbA1c und Urinzu- cker unverändert
	Beihaghi et al 2017 [184]	Iran	40	Patient*innen mit Typ-2- Diabetes	30-60	12	8	Signifikante Reduktion des NBZ, HbA1c n.s. gesunken
	Anitha et al. 2010 [185]	Indien	160	Männlich Patienten Typ- 2- Diabetes	45–60	12	1	Signifikante Reduktion des NBZ, HbA1c
	Lee et al. 2008 [169]	Korea	37	Patient*innen mit Typ-2- Diabetes	53	12	8	Signifikanter Anstieg des Adi- ponectin-Spiegels
Lipidregulation	Karizzi et al 2023 [186]	Iran	60	Patient*innen mit Typ-2- Diabetes	50	12	2	TC, TG, LDL-C signifikant reduziert, HDL-C signifikant erhöht
	Mazloomi et al 2022 [173]	Iran	46	Patient*innen mit NAFLD	39	8	2	TC, TG, LDL-C signifikant reduziert, HDL-C signifikant erhöht
	Koite et al 2022 [187]	USA	40	Metabolisches Syndrom	52	12	0,02 Spirulysat	TC, TG, LDL-C signifikant reduziert, HDL-C signifikant erhöht
	Golestan et al 2021 [188]	Iran	20	Übergewichtige Personen	22	4	1	TC, TG, LDL-C signifikant reduziert, HDL-C signifikant erhöht
	Van Den Driessche et al 2020 [189]	Nieder- lande	70	Gesunde Personen	40	2,4	4,8	TC, TG, LDL-C signifikant reduziert, HDL-C signifikant erhöht

Blutdruckregulation	Ghaem Far et al. 2021 [190]	Iran	41	Patient*innen mit Bluthochdruck	51	8	2	DBD u. SBD signifikant gesunken
	Mazloomi et al. 2022 [173]	Iran	46	Patient*innen mit NAFLD	39	8	2	DBD u. SBD unverändert
	Miczke et al. 2016 [183]	Polen	80	Übergewicht, Hypertonie	53	13	2	DBD u. SBD signifikant gesunken
	Lee et al. 2008 [169]	Korea	37	Patient*innen mit Typ-2- Diabetes	53	12	8	DBD signifikant gesunken, SBD unverändert
	Jensen et al., 2016 [191]	USA	24	Adipöse Personen	43	2	2,3	DBD u. SBD unverändert
	Moradi et al. 2021 [192]	Iran	73	Personen mit Colitis ulcerosa	n.b.	8	1	DBD u. SBD unverändert
	Martinez- Sámano et al. 2018 [193]	México	16	Personen mit arterieller Hypertonie	57	12	4,5	DBD u. SBD signifikant gesunken
Antivirale Wirkung	Aghasadeghi et al. 2024 [194]	Iran	168	hospitalisierte COVID-19 Patient*innen	49	1	15,2	Verbesserte Genesung im Vergleich zur Kontrolle
	Ngo-Matip et al. 2015 [195]	Kamerun	169	HIV-1-Patient*innen ohne antiretrovirale Behandlung	82	52	10	signifikanter Anstieg der T-Helferzellenzahl und des Hämoglobinvärte, signifikanter Rückgang der Viruslast
	Azabji et al. 2011 [196]	Kamerun	52	Unterernährte HIV-1-Patient*innen ohne antiretrovirale Behandlung	26	12	0,20 - 0,37 g/kg/KG/d	signifikanter Anstieg der T-Helferzellenzahl und des Hämoglobinvärte, signifikanter Rückgang der Viruslast
	Yakoot et al. 2012 [197]		59	Patient*innen mit Hepatitis-C-Virus-Infektion	47	26	1,5	80% hatten kein virologisches Ansprechen
Kognitive Leistung	Choi et al., 2022 [198]	Südkorea	80	Personen mit leichter kognitiver Beeinträchtigung	67	12	1	Signifikante Verbesserungen im visuellen Lern- und Arbeitsgedächtnistests und Wortschatz, keine signifikanten Biomarkerveränderungen
	Johnson, M., et al. 2016 [199]		17	Männliche gesunde Personen	30	8	3	verbesserten kognitiven Leistung innerhalb von 4 Stunden nach erster Supplementierung
Immunmodulation	Chaitanya et al., 2022 [200]	Indien	60	Erwachsene mit oralem Lichen planus	53	8	1	Signifikante Reduktion der Brennsymptome und der Läsionsgröße

n.B. nicht berichtet; KG: Körpergewicht; BMI: Body-Mass-Index; TU: Taillenumfang; KF: Körperfett; NAFLD: Nicht-alkoholische Fettlebererkrankung; NBZ: nüchterner Blutzucker, HbA1C: glykiertes Hämoglobin, PPBZ: postprandialer Blutzucker, GC: Gesamtcholesterin, TG: Triglyceride, HDL-C: High-Density Lipoprotein Cholesterin, LDL-C: Low-Density Lipoprotein Cholesterin; DBD: diastolischer Blutdruck; SBD: systolischer Blutdruck; n.s.: nicht signifikant

3.1.4 Marktpotenzial von „Spirulina“

In den vergangenen zwei Jahrzehnten hat sich die Produktion von Mikroalgen und Cyanobakterien mehr als verfünfacht, und derzeit werden diese in etwa 80 Ländern konsumiert. Laut Angaben der FAO wird Spirulina in mindestens 22 Ländern kommerziell produziert [96], wobei der europäische Markt mit einem Anteil von 32 % einen bedeutenden Teil des globalen Verbrauchs ausmacht [201]. Die industrielle Produktion von Spirulina ist global verteilt, mit den größten Produktionsstandorten in Amerika und Asien [201]. Die jährliche Biomasseproduktion variiert je nach Unternehmen zwischen 200 und 3.000 Tonnen. Schätzungen zufolge ist die kommerzielle Kultivierung von Spirulina die wirtschaftlich erfolgreichste unter den kommerziell genutzten Mikroalgen und Cyanobakterien [202]. Insbesondere in Europa sind derzeit etwa 150 Unternehmen in der Produktion tätig, wobei Deutschland, Frankreich und Spanien die führenden Standorte darstellen [18]. Der Großteil der produzierten Spirulina-Biomasse wird in der Lebensmittelindustrie, im Bereich der Nahrungsergänzungsmittel sowie für Nutrzutika eingesetzt, die zusammen etwa 75 % der Anwendungen ausmachen [203]. Der wirtschaftliche Wert der Biomasse wird durch verschiedene Faktoren bestimmt, darunter das verwendete Produktionssystem, die Produktionskosten, die geografische Herkunft, Zertifizierungssysteme sowie die Position innerhalb der

Wertschöpfungskette. Die Preise für getrocknete Spirulina-Biomasse variieren im B2B-Segment zwischen 30 und 70 €/kg, während sie im B2C-Segment zwischen 150 und 280 €/kg liegen [203].

Der globale Spirulina-Markt verzeichnete in den vergangenen Jahren ein signifikantes Wachstum, das insbesondere durch ein steigendes Gesundheitsbewusstsein, eine wachsende Nachfrage nach nachhaltigen Proteinquellen sowie den Trend zu funktionellen Lebensmitteln und natürlichen Inhaltsstoffen vorangetrieben wurde. Zwischen 2019 und 2023 betrug die durchschnittliche jährliche Wachstumsrate (Compound Annual Growth Rate (CAGR) 5,6 % [204]. Neben dem verstärkten Fokus auf präventive Gesundheit tragen auch Fortschritte in den Anbautechniken und -technologien zur Effizienzsteigerung der Produktion und damit zum Marktwachstum bei [204]. Für 2024 wird der globale Spirulina-Markt auf 619,0 Mio. USD geschätzt und soll bis 2031 auf 955,5 Mio. USD anwachsen, was einer CAGR von 6,4 % entspricht [204]. Prognosen von Media.market.us gehen sogar von einem Marktvolumen von 1.215,7 Mio. USD im Jahr 2031 aus [205]. Der europäische Markt, wird mit einer besonders hohen Wachstumsrate von 13,73 % CAGR zwischen 2024 und 2031 prognostiziert [204]. Die europäische Algenindustrie ist ein aufstrebender Sektor der Blauen Bioökonomie, der von steigenden Produktionskapazitäten und technologischen Marktentwicklungen profitiert. Innerhalb des europäischen Algensektors existieren derzeit 447 Produktionseinheiten für Makro- und Mikroalgen, von denen 222 (49,7 %) auf die Produktion von Spirulina spezialisiert sind. Die gesamte Spirulina-Produktionsmenge in Europa beläuft sich auf 142 Tonnen Trockengewicht pro Jahr. Frankreich ist mit einem Produktionsanteil von 65 % der führende Spirulina-Produzent in Europa, gefolgt von Deutschland und Spanien [203]. Neben Europa wird auch für den nordamerikanischen Spirulina-Markt ein starkes Wachstum erwartet, wobei insbesondere die USA und Kanada als Schlüsselmärkte gelten [204]. Der asiatisch-pazifische Raum weist mit einer CAGR von 15 % die höchste Wachstumsrate auf und gilt als der am schnellsten expandierende Markt für Spirulina [201].

Innerhalb der verschiedenen Darreichungsformen dominiert das Marktsegment „Pulver“ mit einem globalen Marktanteil von 45,21 % im Jahr 2024. Diese Präferenz ist vor allem auf die hohe Praktikabilität und die längere Haltbarkeit von Spirulina-Pulver zurückzuführen [204]. Ein weiteres bedeutendes Segment ist der Bereich Lebensmittel und Getränke, der im Jahr 2024 einen Marktanteil von 38,56 % erreichte. Die wachsende Nachfrage in diesem Sektor ist auf die vielseitigen Anwendungsmöglichkeiten sowie die ernährungsphysiologischen Vorteile von Spirulina zurückzuführen, die aktiv von Lebensmittelherstellern beworben werden [204]. Hersteller*innen integrieren Spirulina zunehmend in funktionelle Lebensmittel, die gezielt für gesundheitsbewusste Verbraucher*innen entwickelt werden. Besonders in Getränken und Snacks wird Spirulina als "Superfood"-Zutat eingesetzt, um das reichhaltige Nährstoffprofil zu nutzen. Die Produktpalette umfasst unter anderem angereicherte Säfte, Joghurts, Müsliriegel, extrudierte Snacks, Backwaren, Milchprodukte und Süßwaren. Die hohe Vielseitigkeit von Spirulina ermöglicht eine breite Anpassung an spezifische Marktanforderungen und eröffnet innovative Anwendungsmöglichkeiten in der Lebensmittelindustrie. Diese Flexibilität steigert die Attraktivität des Produkts weiter und trägt maßgeblich zur Expansion des Marktes bei [204].

3.2 Ergebnisse der Verbraucher*innen-Befragung

3.2.1 Grundcharakteristik der Stichprobe

An der Umfrage nahmen insgesamt 744 Personen teil. Unvollständig ausgefüllte Fragebögen ($n = 187$; 25,1 %) wurden von der Analyse ausgeschlossen, sodass die endgültige Stichprobe 557 Teilnehmende umfasste. Von diesen waren 66,3 % ($n = 368$) weiblich und 31,2 % ($n = 173$) männlich. Diese Verteilung weicht von der Geschlechterverteilung in Deutschland ab, in der der Anteil von Frauen bei 50,8 % und der Anteil von Männern bei 49,2 % liegt [206]. Auch die Altersstruktur der Stichprobe unterschied sich deutlich von der deutschen Gesamtbevölkerung. Die Altersgruppen 18 bis 24 Jahre sowie 25 bis 34 Jahre stellten gemeinsam 60,4 % ($n = 336$) der Befragten, während sie in der Gesamtbevölkerung lediglich 24,5 % ausmachen. Im Gegensatz dazu waren ältere Altersgruppen unterrepräsentiert: Die Gruppe der 45- bis 54-Jährigen war mit 10,6 % ($n = 59$) vertreten (Bevölkerungsanteil: 20,5 %), während die 55- bis 64-Jährigen 8,4 % ($n = 47$) der Stichprobe ausmachten (Bevölkerungsanteil: 20,5 %). Besonders stark unterrepräsentiert war die Altersgruppe ab 65 Jahren mit einem Anteil von nur 2,7 % ($n = 15$) in der Stichprobe, obwohl sie in der deutschen Bevölkerung 22,6 % ausmacht [206].

Auch hinsichtlich des Bildungsniveaus zeigten sich Abweichungen. Der Anteil der Hochschulabsolvent*innen in der Stichprobe war mit 25,3 % ($n = 141$) für einen Bachelor-Abschluss, 13,3 % ($n = 73$) für einen Master-Abschluss und 9,2 % ($n = 51$) für ein Diplom deutlich höher als in der Gesamtbevölkerung. In Deutschland liegt der Anteil der Personen mit einem akademischen Abschluss bei insgesamt 19,5 % [207]. Besonders auffällig war der Anteil der Promovierten in der Stichprobe, der mit 7,9 % ($n = 44$) mehr als fünfmal so hoch war wie in der deutschen Gesamtbevölkerung (1,5 %) [207]. Die Gruppe der Teilnehmenden mit einer abgeschlossenen oder laufenden Berufsausbildung war mit 19,9 % ($n = 111$) ebenfalls unterrepräsentiert, während dieser Anteil in der deutschen Bevölkerung bei 43 % liegt [207]. Auch ein Vergleich der Haushaltsnettoeinkommen aus der Umfrage mit der Einkommensverteilung in Deutschland zeigt klare Unterschiede. In der vorliegenden Stichprobe verfügten 29,8 % ($n = 183$) der Befragten über ein monatliches Nettoeinkommen von unter 1.500 €, was deutlich über dem Anteil in der Gesamtbevölkerung (18 %) liegt. Besonders Einkommen unter 1.000 € sind in der deutschen Bevölkerung seltener vertreten. Die Einkommensklasse zwischen 1.500 € und 2.500 € entsprach mit einem Anteil von 15 % weitgehend der allgemeinen Verteilung in Deutschland. Ebenso zeigten Haushalte mit einem Einkommen über 5.000 € eine ähnliche Verteilung wie in der Gesamtbevölkerung, da etwa 10-15 % der deutschen Haushalte in dieser Einkommensklasse liegen [207].

Im Hinblick auf die Ernährungsweise der Befragten gaben 40,4 % ($n = 225$) an, sich flexitarisch zu ernähren, was dem Anteil in der deutschen Bevölkerung entspricht. Der Anteil an Vegetarier*innen lag mit 10,2 % ($n = 57$) hingegen etwas höher als in der Gesamtbevölkerung (8 %). Ein noch deutlicherer Unterschied zeigte sich bei der Gruppe der Veganer*innen, die in Deutschland etwa 2 % ausmachen, während ihr Anteil in der Stichprobe mit 6,1 % ($n = 34$) mehr als dreimal so hoch war [208]. Weitere ausführliche Angaben zur Charakteristik der Stichprobe sind Tabelle 18 zu entnehmen.

Tabelle 18: Übersicht der Grundcharakteristika der untersuchten Stichprobe

Stichprobenmerkmal	Häufigkeit, n (%)	Stichprobenmerkmal	Häufigkeit, n (%)
Geschlecht		Bildungsstand	
männlich	173 (31,2)	ohne Abschluss	9 (1,6)
weiblich	368 (66,3)	in Ausbildung	35 (6,3)
divers	6 (1,1)	Ausbildung	76 (13,6)
keine Angabe	8 (1,4)	Meister	10 (1,8)
Ernährungsweise		Fachhochschule	73 (13,1)
Omnivor	195 (35)	Bachelor	141 (25,3)
Flexitarisch	225 (40,4)	Diplom	51 (9,2)
Pescetarisch	22 (3,9)	Master	74 (13,3)
Vegetarisch	57 (10,2)	Promotion	44 (7,9)
Vegan	34 (6,1)	Sonstige	30 (5,9)
Sonstiges	24 (4,3)	keine Angabe	14 (2)
Alter		Haushaltsgröße	
18 - 24 Jahre	168 (30,2)	1 Person	133 (23,9)
25 - 34 Jahre	168 (30,2)	2 Personen	205 (36,8)
35 - 44 Jahre	88 (15,8)	3 Personen	90 (16,2)
45 - 54 Jahre	59 (10,6)	4 Personen	94 (16,9)
55 - 64 Jahre	47 (8,4)	≤ 5 Personen	30 (5,4)
65 - 74 Jahre	14 (2,5)	keine Angabe	5 (0,9)
75 - 84 Jahre	1 (0,2)		
keine Angabe	12 (2,2)		
Haushaltsnettoeinkommen		Hauptwohnsitz nach Bundesland	
unter 500€	27 (4,8)	Baden-Württemberg	15 (2,7)
500€ - 1000€	98 (17,6)	Bayern	10 (1,8)
1000€ - 1250€	41 (7,4)	Berlin	20 (3,6)
1250€ - 1500€	17 (3,1)	Brandenburg	40 (7,2)
1500€ - 2000€	42 (7,5)	Bremen	1 (0,2)
2000€ - 2500€	44 (7,9)	Hamburg	27 (4,8)
2500€ - 3000€	41 (7,4)	Hessen	13 (2,3)
3000€ - 3500€	34 (6,1)	Mecklenburg-Vorpommern	265 (47,6)
3500€ - 4000€	39 (7)	Niedersachsen	29 (5,2)
4000€ - 5000€	45 (8,1)	Nordrhein-Westfalen	34 (6,1)
über 5000€	69 (12,4)	Rheinland-Pfalz	2 (0,4)
keine Angabe	60 (10,8)	Saarland	-
		Sachsen	55 (9,9)
		Sachsen-Anhalt	5 (0,9)
		Schleswig-Holstein	19 (3,4)
		Thüringen	9 (1,6)
		keine Angabe	13 (2,3)

LM: Lebensmittel

3.2.2 Einkaufsverhalten der Stichprobe

Die monatlichen Ausgaben für Lebensmittel der Befragten lagen überwiegend im mittleren Preissegment. Die Mehrheit der Teilnehmenden (38,2 %; n = 213) gab zwischen 201 € und 400 € pro Monat für Lebensmittel aus. Höhere Ausgabenkategorien wurden nur von einer Minderheit gewählt, was auf individuelle finanzielle Rahmenbedingungen oder unterschiedliche Ernährungsprioritäten hinweisen könnte (vgl. Abbildung 6).

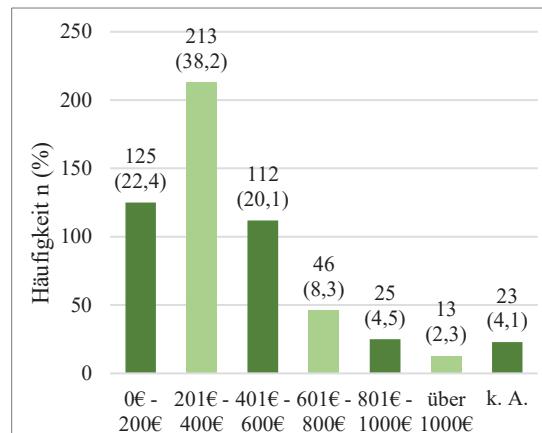


Abbildung 6: Verteilung der monatlichen Ausgaben für Lebensmittel in der Stichprobe

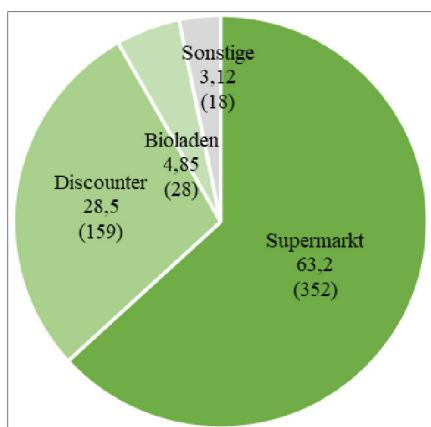


Abbildung 7: Präferierte Einkaufsorte für den Lebensmitteleinkauf in der Stichprobe

Die Untersuchung der bevorzugten Einkaufsstätten zeigte, dass Supermärkte mit einem Anteil von 63,2 % (n = 352) den dominierenden Einkaufsort darstellten, gefolgt von Discountern mit 28,5 % (n = 159). Bioläden nahmen mit 4,85 % (n = 28) eine untergeordnete, aber dennoch relevante Stellung ein. Alternative und nachhaltigere Einkaufsmodelle spielten hingegen eine geringe Rolle. Wochenmärkte wurden von 1,6 % (n = 9) der Befragten frequentiert, während Direktvermarktung durch landwirtschaftliche Betriebe lediglich 0,7 % (n = 4) ausmachte. Insgesamt zeigte sich, dass nur eine geringe Anzahl der Teilnehmenden auf alternative Einkaufsmodelle zurückgriff (vgl. Abbildung 7). Die Analyse ergab signifikante Zusammenhänge zwischen der Wahl des Einkaufsorts und dem Alter der Befragten ($p = 0,026$) sowie den monatlichen Ausgaben für Lebensmittel ($p < 0,001$) (vgl. Tabelle A.8). Der Post-hoc-Test zeigte, dass junge Erwachsene (18 - 24 Jahre) abweichende Einkaufspräferenzen aufwiesen im Vergleich zu älteren Altersgruppen (45 - 54 Jahre und 55 - 64 Jahre), insbesondere in Bezug auf den Einkauf in Naturkost- und Bioläden. Darüber hinaus zeigte der Post-hoc-Test, dass höhere Ausgaben für Lebensmittel mit einer erhöhten Wahrscheinlichkeit einhergingen, Wochenmärkte oder Direktvermarkter als Einkaufsquellen zu bevorzugen (vgl. Tabelle A.9).

Die Auswertung der Auswahlkriterien für Lebensmittel (Abbildung 8) ergab eine Dominanz sensorischer und preislicher Aspekte. Mit 77,6 % (n = 432) war der Geschmack das am häufigsten genannte Kriterium für die Auswahl von Lebensmitteln, gefolgt von einem günstigen Preis (54,4 %; n = 303) und einer ausgewogenen Ernährung (50,6 %; n = 282). Regionale Herkunft (44,0 %; n = 245), Gewohnheit (42,0 %; n = 234), und Saisonalität (40,2 %; n = 224) spielten ebenfalls eine bedeutende Rolle, ebenso wie Nachhaltigkeits- und Gesundheitsaspekte wie Bio-Qualität (36,3 %; n = 202), wenig Zusatzstoffe (32,7 %; n = 182), und Nährwert (30,7 %; n = 171). Umweltfaktoren (14,1 %; n = 134) und ethische Überlegungen (17,8 %; n = 99) spielten hingegen eine untergeordnete Rolle. Die Ergebnisse unterstreichen die zentrale Rolle geschmacklicher Präferenzen und ökonomischer Erwägungen, während

ökologische und ethische Aspekte im Entscheidungsprozess eine nachgeordnete Position einzunehmen scheinen. Es konnte nachgewiesen werden, dass insbesondere demografische und ökonomische Faktoren wie Geschlecht ($p = 0,034$), Alter ($p < 0,001$), Haushaltsnettoeinkommen ($p < 0,001$), Ausgaben für Lebensmittel ($p < 0,001$) und Ernährungsweise ($p = 0,001$) signifikanten Einfluss auf die Auswahlkriterien hatten (vgl. Tabelle A.10).

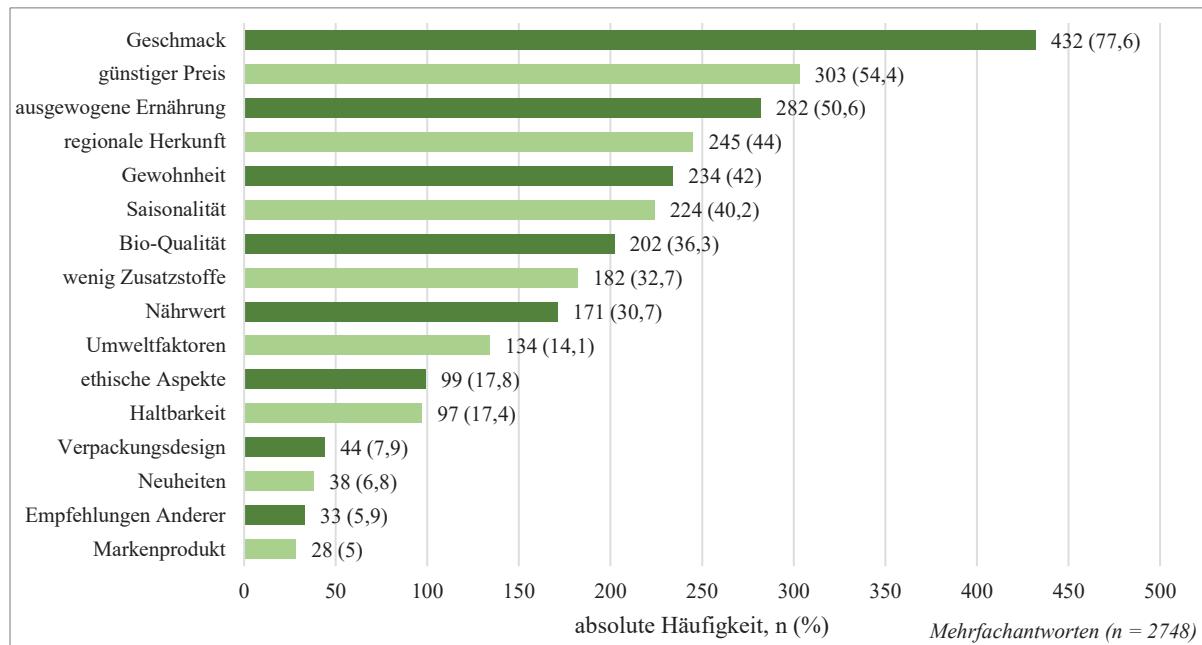


Abbildung 8: Auswahlkriterien für Lebensmittel in der Stichprobe

3.2.3 Wissen über Mikroalgen

In Bezug auf die Vertrautheit mit dem Thema gaben 75,9 % ($n = 423$) der Befragten an, bereits von Mikroalgen bzw. „Spirulina“ (72,9 %; $n = 406$) gehört zu haben. Dem gegenüber antworteten rund 50 % ($n = 281$) der Teilnehmenden auf die Frage ob sie wissen was Mikroalgen sind mit „Ja“. Auf die Frage, wie die Teilnehmenden ihr Wissen über Mikroalgen einschätzen würden, gab die Mehrheit (38,6 %; $n = 215$) die Antwort „schlecht“, gefolgt von „sehr schlecht“ (24,8 %; $n = 138$) und „mittel“ (24 %; $n = 134$). Lediglich 8,8 % bzw. 3,6 % der Befragten gaben an, dass sie ihr Wissen über Mikroalgen als „gut“ bzw. „sehr gut“ einschätzen würden (vgl. Abbildung 9 und Abbildung 10).

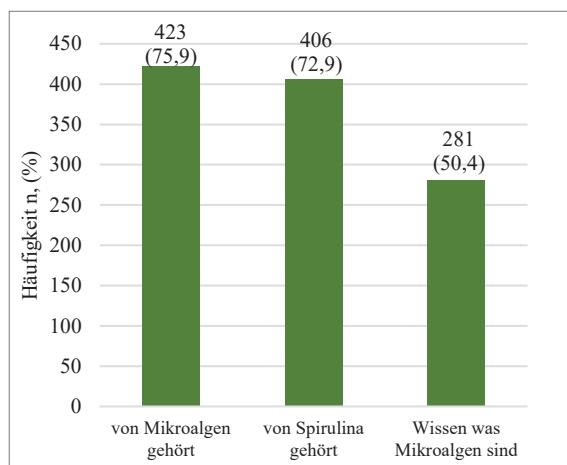


Abbildung 9: Vertrautheit mit Mikroalgen in der Stichprobe

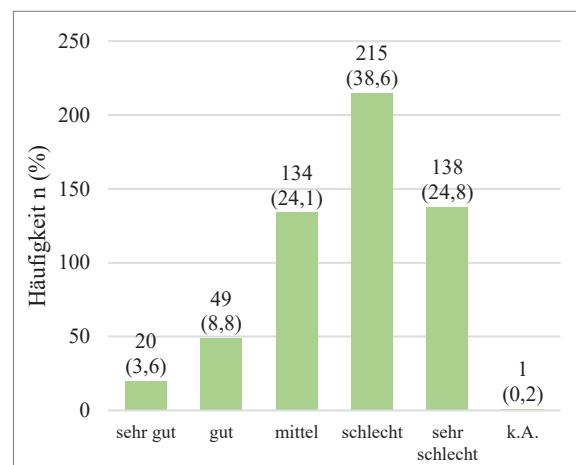


Abbildung 10: Selbsteinschätzung des Wissens über Mikroalgen in der Stichprobe

Das Geschlecht ($p < 0,001$) als auch das Alter ($p = 0,003$) zeigten einen signifikanten Einfluss auf die Bekanntheit von Spirulina. Der Post-Hoc-Test zeigte einen signifikanten Unterschied zwischen den Altersgruppen 18 - 24 Jahre und 25 - 34 Jahre ($p = 0,032$). Die Ernährungsweise wies ebenfalls einen signifikanten Zusammenhang mit der Bekanntheit von Spirulina auf ($p < 0,001$). Hier wurden signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen „Ich esse alles“ und „Vegan“ ($p = 0,002$) sowie „Flexitarier“ und „Ich esse alles“ ($p = 0,017$) festgestellt. Bezuglich des Wissens über Mikroalgen zeigten sich signifikante Unterschiede in Abhängigkeit vom Bildungsstand (Promotion vs. Ausbildung; $p = 0,035$) und den Ausgaben für Lebensmittel (0 - 200 € vs. 801 - 1000 €; $p = 0,014$). Schließlich zeigt die Einschätzung des eigenen Wissens über Mikroalgen, dass sowohl das Geschlecht ($p = 0,035$) als auch der Bildungsstand ($p < 0,001$) signifikante Einflussfaktoren sind (vgl. Tabelle A.11 und A.12).

3.2.4 Assoziation mit Mikroalgen bzw. Lebensmittel mit Mikroalgen

Die Assoziationen der Befragten mit Mikroalgen bzw. Lebensmitteln mit Mikroalgen zeigt (Abbildung 11), dass ernährungsphysiologische Aspekte mit 33,02 % ($n = 381$) der Nennungen die wichtigste Kategorie darstellte. Besonders häufig wurden Mikroalgen als gesund wahrgenommen (25,46 %; $n = 97$). Auch spezifische Inhaltsstoffe wie ungesättigte Fettsäuren (8,66 %; $n = 33$), Proteine (6,30 %; $n = 24$), Mineralstoffe und Spurenelemente (6,30 %; $n = 24$) oder ein hoher Nährstoffgehalt (5,25 %; $n = 20$) wurden mit Mikroalgen assoziiert, was die Wahrnehmung von Mikroalgen als gesundheitsfördernd und wertvollen Nahrungsbestandteile unterstreicht. Ihre Funktion als „Nahrungsergänzungsmittel“ (17,06 %; $n = 65$) sowie die Assoziation als „Superfood“ (6,82 %; $n = 26$) zeigen, dass Mikroalgen in aktuellen Ernährungstrends eine Rolle spielen. Sensorische Aspekte machten 13,86 % ($n = 160$) der Nennungen aus, wobei visuelle Eindrücke wie „grüne Farbe“ (52,5 %; $n = 84$) und maritime Geschmacksassoziationen wie „fischig“ (13,75 %; $n = 22$) und „Meer“ (5,0 %; $n = 8$) dominierten. Negative sensorische Assoziationen, etwa „nicht lecker/appetitlich“ (5,0 %; $n = 8$) und „schleimig“ (3,13 %; $n = 5$), spiegeln Vorbehalte gegenüber Geschmack und Konsistenz wider. Biologische Assoziationen (10,83 %; $n = 125$) zeigten eine starke Verbindung zu aquatischen Lebensräumen, wobei „Meer/See/Wasser“ mit 36,8 % ($n = 46$) die häufigste Nennung war. Begriffe wie „sehr kleine Algen“ (20,0 %; $n = 25$) und „Einzeller“ (2,4 %; $n = 3$) verdeutlichen das Verständnis ihrer mikroskopischen Natur. Einige Teilnehmende nannten zudem spezifische Gattungen wie „Spirulina“ (13,6 %; $n = 17$) und „Chlorella“ (1,6 %; $n = 2$), was auf ein vertieftes Wissen über wirtschaftlich genutzte Mikroalgen hinweist. Die Nachhaltigkeitsaspekte machten 6,07 % ($n = 70$) der Nennungen aus. Mikroalgen wurden als „nachhaltig“ (47,14 %; $n = 33$) und „umweltfreundlich“ (5,71 %; $n = 4$) wahrgenommen. Die „Fähigkeit zur Photosynthese“, genannt von 5,71 % ($n = 4$) der Teilnehmenden, und ihre Rolle als „Sauerstoffproduzenten“ (4,29 %; $n = 3$) sowie „Kohlenstoffbinder“ (4,29 %; $n = 3$) positionieren sie als klimafreundliche Ressource. Zudem wurde das Potenzial von Mikroalgen zur „Sicherung zukünftiger Nahrungsmittelressourcen“ erkannt (12,86 %; $n = 9$), was auf ihre Bedeutung in der globalen Ernährungssicherung hinweist. Alternative Ernährungskonzepte und Darreichungsformen (5,55 %; $n = 64$ bzw. 5,37 %; $n = 62$) zeigen, dass Mikroalgen zunehmend als Teil einer zukunftsorientierten Ernährung

wahrgenommen werden. Besonders hervorzuheben ist die Assoziation mit veganer Ernährung und einer pflanzlichen Herkunft, mit 34,4 % (n = 22) bzw. 20,3 % (n = 13) der Nennungen in der Kategorie. Sie wurden auch als ein alternatives Nahrungsmittel (23,4 %; n = 15) und Ersatz für tierische Produkte (15,2 %; n = 11) gesehen. Lebensmitteltechnologische Aspekte machten 7,8 % (n = 90) der Nennungen aus. Mikroalgen wurden hier insbesondere mit „natürlichen Farbstoffen“ (26,67 %; n = 24) und Lebensmittelzusatzstoffe (22,22 %; n = 20) assoziiert. Weitere Assoziationen betrafen Ernährungslösungen der Zukunft (3,21 %; n = 37), Aspekte der Esskultur (2,34 %; n = 27) und Non-Food-Anwendungen (1,65 %; n = 19). Ein kleinerer Teil der Befragten (3,81 %; n = 44) äußerte Zweifel und Misstrauen, was eine kritische Haltung gegenüber Mikroalgen widerspiegeln. Assoziationen mit „unseriösen Marketingversprechen“ (25,00 %; n = 11), „hohe Preise“ (20,45 %; n = 9), „Ekel“ (11,36 %; n = 5), oder auch „Schadstoffe/Toxine“ (15,91 %; n = 7) verstärken die Skepsis. Weitere Informationen zu den Assoziationen mit Mikroalgen bzw. Mikroalgen in Lebensmitteln sind der Tabelle A.13 zu entnehmen.

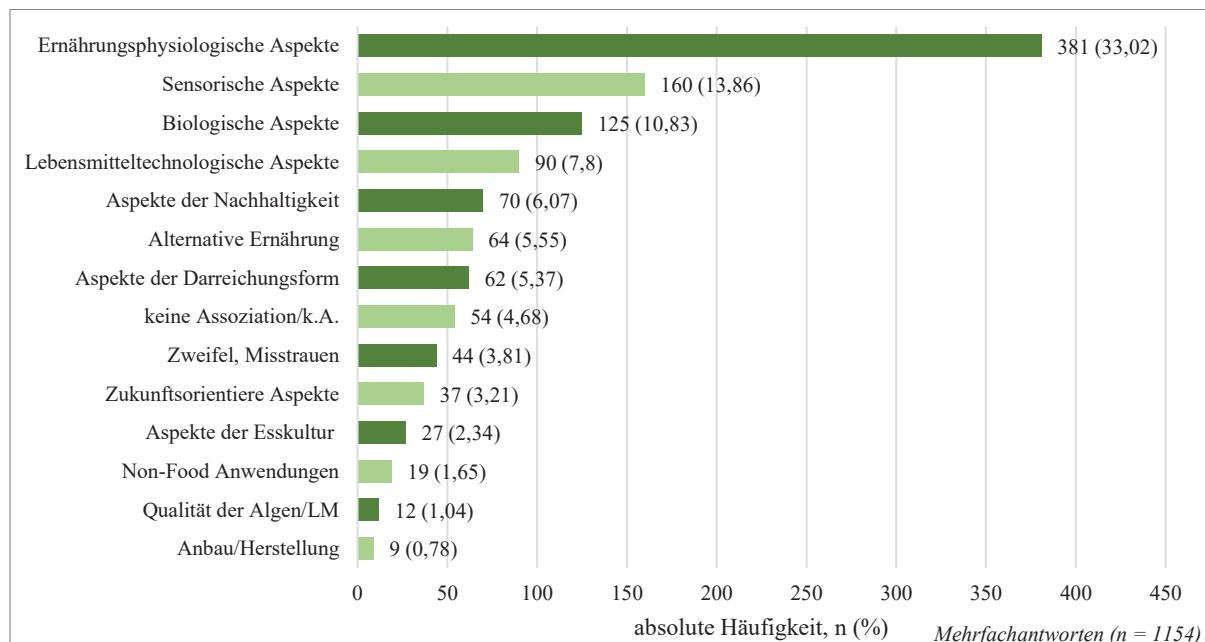


Abbildung 11: Assoziationen mit Mikroalgen bzw. Lebensmittel mit Mikroalgen in der Stichprobe

3.2.5 Einstellung gegenüber Mikroalgen

Die generelle Einstellung der Teilnehmenden gegenüber Mikroalgen wurde mit einem Mittelwert von $1,72 \pm 1,12$ erfasst. Dieser Wert verdeutlicht eine eher neutrale bis leicht positive Einstellung. Die Analyse der Einstellung gegenüber Mikroalgen zeigt vor allem einen signifikanten Zusammenhang mit dem Bildungsstand (Ausbildung vs. Promotion; $p = 0,045$) (vgl. Tabelle A.14 und Tabelle A.15).

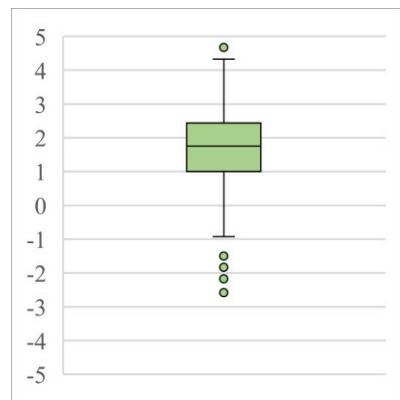


Abbildung 12: Generelle Einstellung gegenüber Mikroalgen in der Stichprobe

Die Ergebnisse der Einstellungsmessung zeigen eine differenzierte Einschätzung der Mikroalgen durch die Befragten (Abbildung 13). Die Teilnehmenden bewerteten Mikroalgen als proteinreich ($1,66 \pm 2,58$). Zudem bewerteten die Teilnehmenden die Mikroalgen als fettarm ($-2,73 \pm 2,38$) und ein Nahrungsmittel mit hohem Nährwert ($1,78 \pm 2,63$). Auch die Einschätzungen bezüglich Umwelt ($2,63 \pm 2,29$), Innovativität ($2,54 \pm 2,11$) und Gesundheit ($2,73 \pm 1,91$) fielen überwiegend positiv aus. Dies deutet darauf hin,

dass Mikroalgen als zukunftsträchtige, innovative Lebensmittelquelle wahrgenommen werden, die insbesondere im Kontext von Nachhaltigkeit und alternativen Nahrungsmitteln an Bedeutung gewinn. In ähnlicher Weise wurden Natürlichkeit ($3,54 \pm 1,92$), Sicherheit ($1,7 \pm 2,31$) und Vertrauenswürdigkeit ($1,77 \pm 2,20$) positiv bewertet. Die Merkmale Nährwert ($p = 0,016$), Preis ($p < 0,001$), Geschmack ($p = 0,022$) und Gesundheit ($p = 0,019$) zeigten signifikante Unterschiede in Abhängigkeit vom Geschlecht. Weitere Unterschiede hinsichtlich der soziodemografischen Daten sind Tabelle A.14 und Tabelle A.15 zu entnehmen.

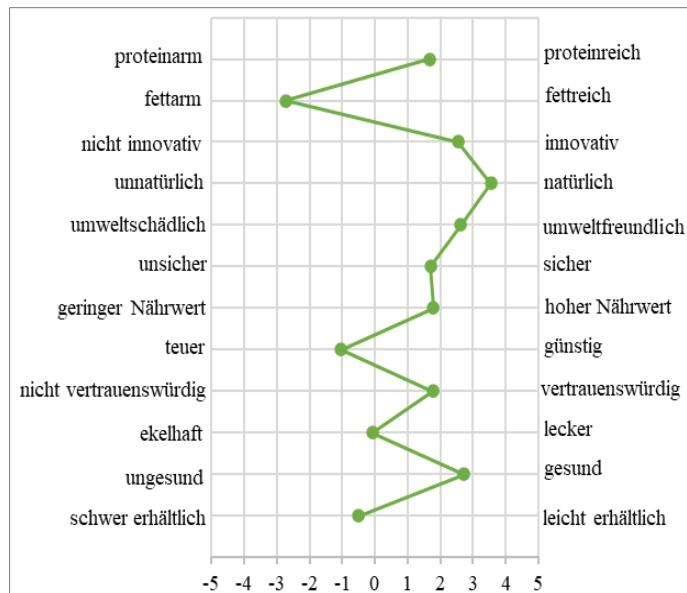


Abbildung 13: Wahrnehmung von Mikroalgen in der Stichprobe

3.2.6 Bereitschaft zum Verzehr von Mikroalgen bzw. Lebensmittel mit Mikroalgen

Von den insgesamt 557 Befragten gaben 40,2 % ($n = 224$) an, bereits einmal Mikroalgen konsumiert zu haben (Abbildung 14). Ein Großteil der Befragten, 58,5 % ($n = 326$), hatte hingegen noch keine Erfahrung mit dem Verzehr von Mikroalgen. Lediglich 1,3 % ($n = 7$) machten keine Angabe. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass Mikroalgen für die Mehrheit der Befragten noch keine etablierte Lebensmittelquelle darstellen, jedoch bereits ein erheblicher Anteil erste Berührungs-punkte mit ihnen hatte. Es wurde ein signifikanter Zusammenhang zwischen dem Alter der Teilnehmenden und dem bereits verzehrten Lebensmittel festgestellt ($p = 0,015$). Ein signifikanter Zusammenhang wurde auch in Bezug auf die Ernährungsweise festgestellt ($p < 0,001$). Hier zeigten sich signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen „Ich esse alles“ und „Flexitarier“ ($p = 0,036$) sowie zwischen „Ich esse alles“ und „Vegan“ ($p = 0,002$) (vgl. Tabelle A.16 und Tabelle A. 17).

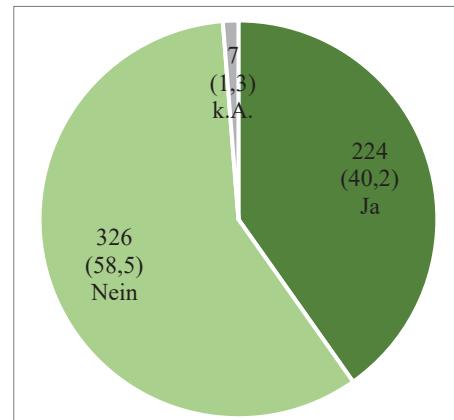


Abbildung 14: Erfahrungen mit dem Verzehr von Mikroalgen in der Stichprobe

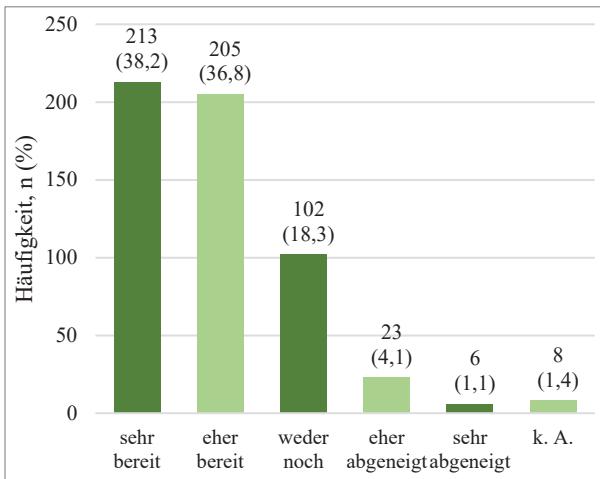


Abbildung 15: Bereitschaft zum Verzehr von Mikroalgen bzw. Lebensmittel mit Mikroalgen

Auf die Frage, wie bereit die Befragten wären, Mikroalgen zu verzehren, signalisierten insgesamt 75,0 % (n = 418) der Teilnehmenden eine positive Bereitschaft. Ein neutraler Standpunkt wurde von 18,3 % (n = 102) der Teilnehmenden vertreten. Nur ein kleiner Anteil von 5,2 % (n = 29) zeigte sich ablehnend. Zudem machten 1,4 % (n = 8) keine Angabe. Diese Ergebnisse verdeutlichen, dass die Mehrheit der Befragten eine positive Einstellung gegenüber dem Verzehr von Mikroalgen hatte, während nur eine Minderheit ablehnend eingestellt war (Abbildung 15). Die Analyse der Konsumbereitschaft zeigte lediglich einen signifikanten Zusammenhang mit den Lebensmittelausgaben ($p = 0,006$). Der Post-Hoc-Test zeigte signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen mit Ausgaben von 0 - 200 € und über 1000 € ($p = 0,002$) sowie von 201 - 400 € und über 1000 € ($p = 0,003$) (vgl. Tabelle A.16 und Tabelle A. 17).

Auf die Frage, was die Befragten zum Verzehr von Mikroalgen motivieren würde, wurden verschiedene Faktoren genannt (Abbildung 16). Der häufigste genannte Grund war die Verbesserung der Gesundheit: 16,9 % (n = 382) gaben an, dass sie Mikroalgen konsumieren würden, wenn diese ihre Ernährung gesünder machen. Zudem spielt eine einfache Verfügbarkeit für einen Großteil der Befragten eine wichtige Rolle (14,1 %; n = 317). Auch die Sicherheit des Lebensmittels war für 12,9 % (n = 292) entscheidend: Sie würden Mikroalgen konsumieren, wenn diese als sicher eingestuft würden. Ähnlich bedeutsam war die Umweltfreundlichkeit, die von 12,1 % (n = 273) als Grund genannt wurde. Das äußere Erscheinungsbild der Mikroalgen war für 10,6 % (n = 239) entscheidend, gefolgt von der Bedeutung des Tierschutzes (10,0 %; n = 225). Weitere wichtige Aspekte waren die ordnungsgemäße Regulierung (6,2 %, n = 139) und ein günstiger Preis (5,3 %, n = 120). Persönliche Einflüsse wie das Verhalten von Verwandten oder Freunden (5,1 %, n = 115) oder der Ratschlag eines Experten (3,2 %, n = 72) spielten eine geringere Rolle und 0,8 % (n = 18) wussten nicht, was sie überzeugen würde. Die Empfehlung durch Prominente oder Influencer hatte mit 0,4 % (n = 9) kaum Einfluss, und nur 0,3 % (n = 6) gaben an, dass sie nichts dazu bewegen könnte, Mikroalgen zu konsumieren. Die Ergebnisse zeigen, dass gesundheitliche Vorteile, Verfügbarkeit und Sicherheit die zentralen Anreize für den Konsum von Mikroalgen darstellen, während soziale und preisliche Faktoren eine untergeordnete Rolle spielen. Die Angaben der Teilnehmenden zu weiteren Beweggründen sind in Tabelle A.19 aufgeführt. Es wurde signifikante Zusammenhänge zwischen dem Alter ($p < 0,001$), dem Bildungsstand ($p = 0,010$) dem Haushaltseinkommen ($p = 0,003$), der Lebensmittelausgaben ($p = 0,001$) und der Ernährungsweise ($p < 0,001$) mit den angegebenen Beweggründen festgestellt (vgl. Tabelle A.16. Detaillierte entsprechende Paarvergleiche befinden sich in Tabelle A.18).

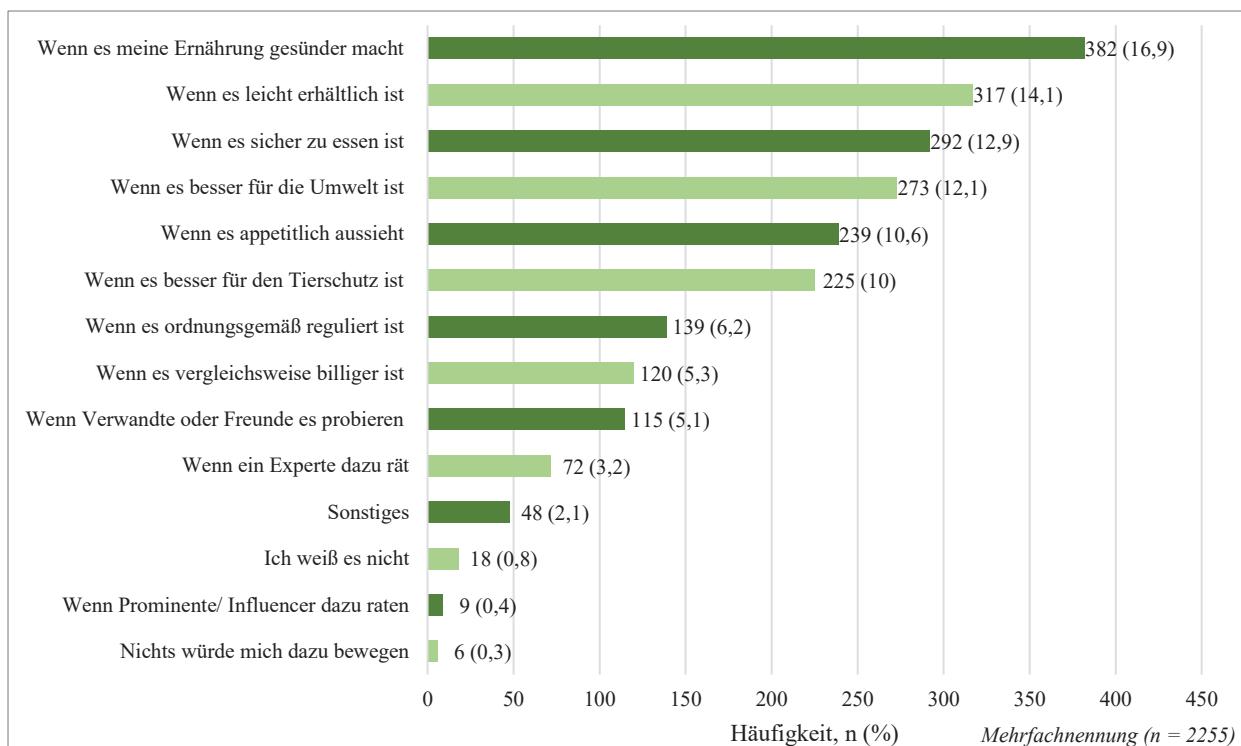


Abbildung 16: Motivationsfaktoren für den Verzehr von Mikroalgen/-produkte

3.2.7 Konsumformen und Präferenzen für Mikroalgenprodukte

Auf die Frage, in welcher Form Mikroalgen konsumiert wurden, zeigt sich, dass Mikroalgen vor allem als Lebensmittel (52,03 %, n = 141) und Nahrungsergänzungsmittel (46,12 %, n = 125) konsumiert wurden, während ihre Nutzung als Zusatzstoff (1,85 %, n = 5) selten war. (Abbildung 17). Pulver war die häufigste Form von Mikroalgen-Nahrungsergänzungsmitteln (30,4 %, n = 38), gefolgt von Tabletten (16,8 %, n = 21) und Kapseln (13,6 %, n = 17).

Seltener wurden frische Mikroalgen sowie Öl oder Tropfen (je 6,4 %, n = 8) genannt. Ein nicht unerheblicher Anteil von 26,4 % (n = 33) machte allerdings keine nähere Bestimmung zu der konsumierten Form. Die weiteren ließen sich in 8 Kategorien unterteilen: Getränke (n = 76; 28,5 %), Backwaren (n = 12; 4,5 %), Snacks/Süßigkeiten (n = 11; 4,1 %), Milchprodukte (n = 9; 3,4 %), Teigwaren (n = 6; 2,3 %) und Ersatzprodukte (n = 6; 2,3 %), Zusatzstoffe (n = 5; 1,9 %) und Sonstiges (n = 17; 6,4 %). Weitere Informationen über die Zusammensetzung der einzelnen Kategorien sind der Tabelle A. 20 zu entnehmen.

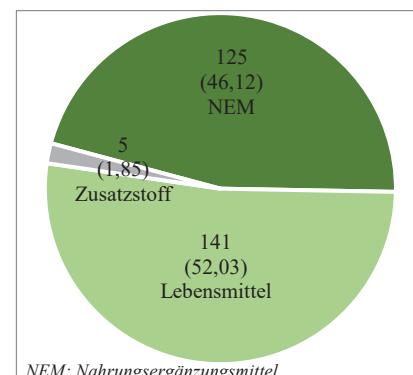


Abbildung 17: Darreichungsform von Mikroalgen in der Stichprobe

Auf die Frage, in welchen Produkten sich die Befragten Mikroalgen besonders gut vorstellen könnten, nannten 24,4 % (n = 487) vegetarische/vegane Produkte am häufigsten. Ebenfalls beliebt waren Teigwaren mit 14,5 % (n = 290) sowie Getränke, die 14,2 % (n = 283) der Befragten als geeignete Kategorie ansahen. Snacks und Süßigkeiten wurden von 12,6 % (n = 252) der Teilnehmenden favorisiert, gefolgt von frischen Mikroalgen, die sich 11,3 % (n = 226) gut vorstellen konnten. Brot- und Backwaren wurden

von 9,8 % (n = 196) der Teilnehmenden genannt. Fleischprodukte (6,2 %, n = 124) und Milchprodukte (5,7 %, n = 113) wurden hingegen seltener als geeignete Einsatzbereiche angesehen. Nur 1,2 % (n = 23) machten andere Vorschläge. Die Angaben der Teilnehmenden zu „Sonstigen“ Produkten können den Rohdaten entnommen werden. Diese Ergebnisse zeigen, dass befragten Personen Mikroalgen vor allem in pflanzenbasierten und kohlenhydrathaltigen Produkten wie vegetarischen/veganen Alternativen, Teigwaren und Getränken als passend erachteten, während tierische Produkte wie Fleisch oder Milch seltener in Betracht gezogen wurden (Abbildung 18). Unterschiede in der Eignung von Mikroalgen für verschiedene Produktkategorien sowie hinsichtlich demografischer Variablen sind in Tabelle A.21 und Tabelle A.22 zu finden.

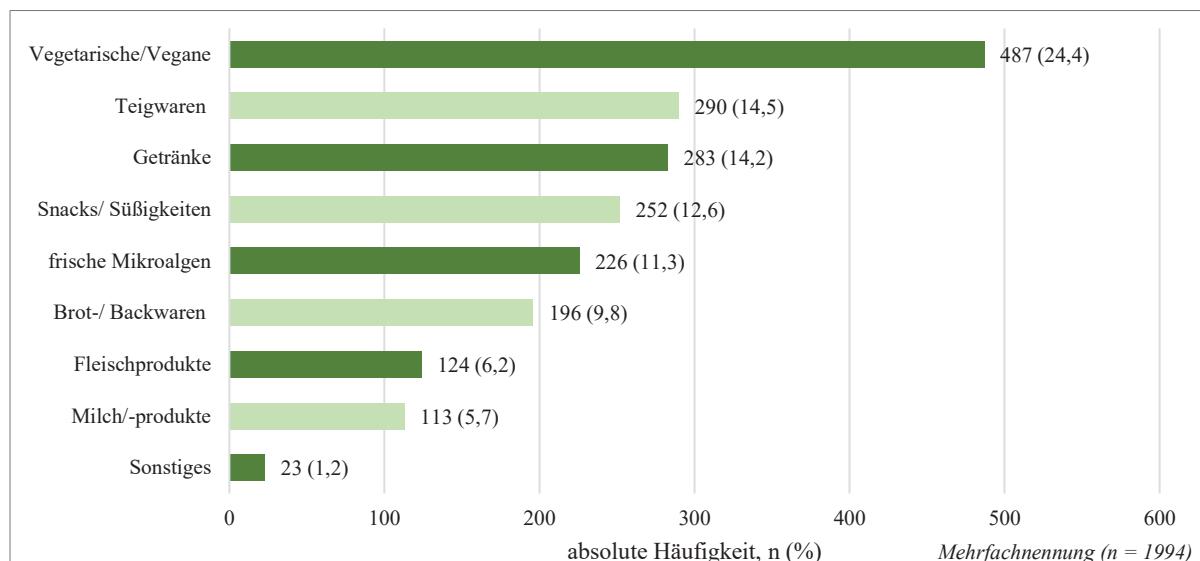


Abbildung 18: Angaben zu der Eignung von Mikroalgen in verschiedenen Produktkategorien

Die Befragung ergab weiterhin, dass den Befragten unterschiedliche Aspekte im Zusammenhang mit Lebensmitteln aus Mikroalgen wichtig sind (Abbildung 19). Insgesamt hielten 81,2 % (n = 450) der Teilnehmenden die Umweltfreundlichkeit der Produktion als einen wichtigen Faktor bei der Bewertung von Mikroalgenprodukten. Auch gesundheitliche Vorteile und die Förderung der Leistungsfähigkeit von Mikroalgenprodukten wurden stark gewichtet: 36,1 % (n = 200) der Befragten hielten diesen Aspekt für „sehr wichtig“, während weitere 47,7 % (n = 264) ihn als „eher wichtig“ einschätzten. Die Teilnehmenden hatten unterschiedliche Ansichten zum Preis von Mikroalgenprodukten. Für 49,5 % (n = 274) war es wichtig, dass sie nicht teurer als herkömmliche Lebensmittel sind, während 33,9 % (n = 188) den Preis als mittelmäßig relevant betrachteten. 16,1 % (n = 89) hielten ihn für (eher) unwichtig. Dies deutet darauf hin, dass der Preis eine moderate, jedoch nicht ausschlaggebende Rolle für die Akzeptanz von Mikroalgen spielt. Der Geschmack von Mikroalgenprodukten wurde ebenfalls untersucht, wobei zwei Aspekte analysiert wurden. Zum einen, ob diese Produkte ein außergewöhnlich gutes Geschmackserlebnis bieten sollten, und zum anderen, ob der Geschmack dem von bekannten Lebensmitteln ähnelt sollte. Im Hinblick auf ein außergewöhnlich gutes Geschmackserlebnis stuften 11,2 % (n = 62) diesen Aspekt als „sehr wichtig“ und 35,6 % (n = 197) als „eher wichtig“ ein. Gleichzeitig zeigte ein großer

Anteil (34,4 %; n = 190) eine neutrale Haltung („teils/teils“). Die Meinungen zur geschmacklichen Ähnlichkeit mit bekannten Lebensmitteln waren gespalten: 35,5 % (n = 197) hielten sie für wichtig, während 35,9 % (n = 19) sie als unwichtig einstuften, was darauf hindeutet, dass sowohl Offenheit für neue Geschmackserlebnisse als auch Präferenzen für vertraute Aromen bestehen. Dies verdeutlicht, dass die geschmacklichen Erwartungen stark variieren, wobei sowohl Offenheit für neue Geschmackserlebnisse als auch Präferenzen für vertraute Aromen vorhanden sind. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Akzeptanz von Mikroalgenprodukten stark von deren Umweltfreundlichkeit und gesundheitlichen Vorteilen abhängt, während Aspekte wie Preis und Geschmack von den Teilnehmenden unterschiedlich gewichtet werden. Hersteller sollten daher unterschiedliche Zielgruppenbedürfnisse berücksichtigen, um eine möglichst breite Akzeptanz zu erreichen (Abbildung 19).

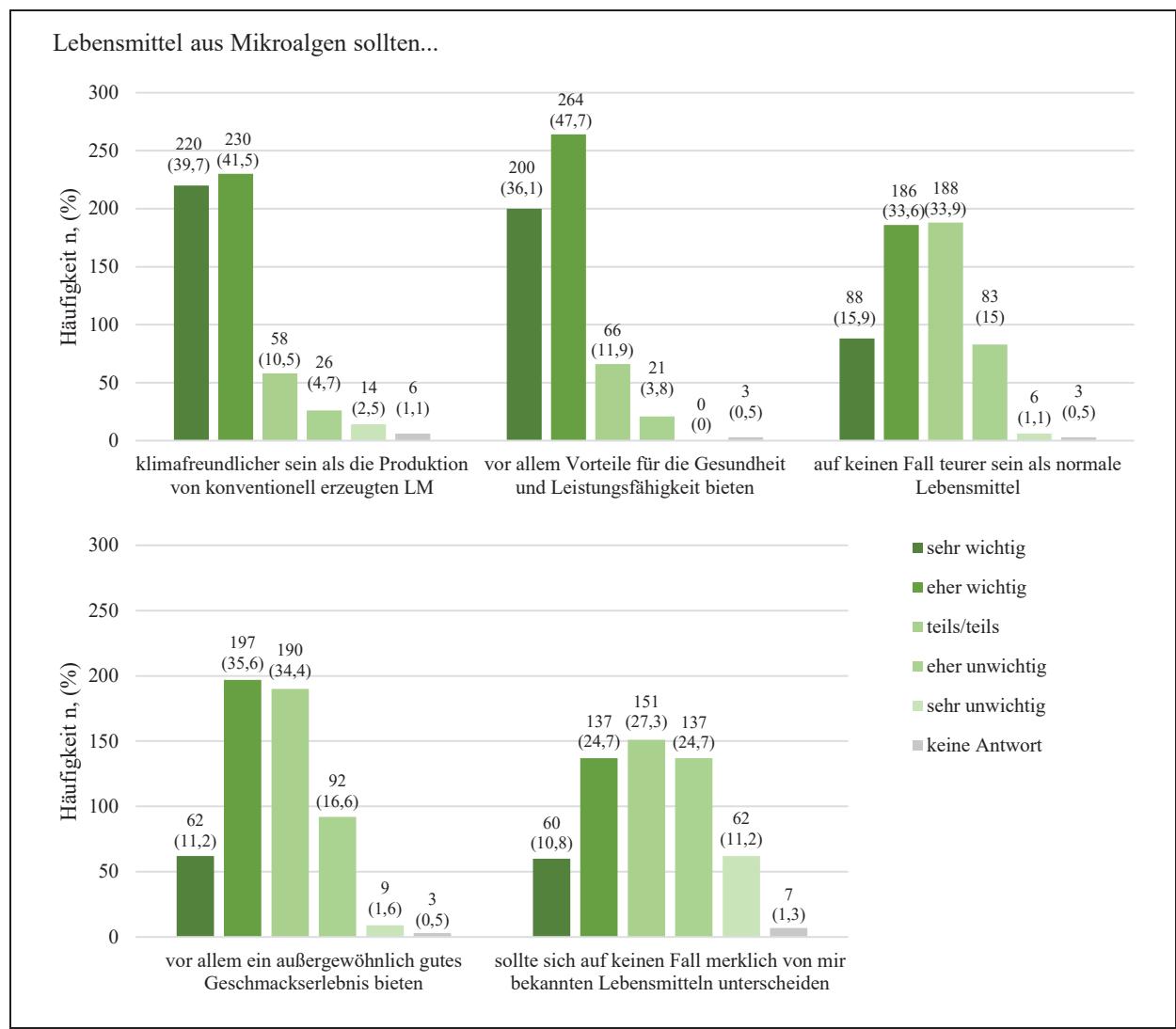


Abbildung 19: Wichtige Aspekte bei der Bewertung von Mikroalgenprodukten in der Stichprobe

3.2.8 Kaufbereitschaft gegenüber Produkten mit Mikroalgen

Die Kaufwahrscheinlichkeit mikroalgenhaltiger Produkte wurde signifikant unterschiedlich bewertet ($p < 0,001$). Nudeln und Smoothies erzielten die höchste Akzeptanz, während Kekse und Wiener Würstchen weniger Zustimmung fanden. Nudeln erreichten mit 69,9 % (n = 386) die höchste Kaufbereitschaft, wobei 22,1 % (n = 123) den Kauf als „sehr wahrscheinlich“ und 47,8 % (n = 266) als „wahrscheinlich“ einstuften. Smoothies folgten mit 59,3 % (n = 330) Zustimmung. Frischkäse zeigte ebenfalls hohe Akzeptanzwerte (59,5 %; n = 331). Die Ablehnung war bei diesen Produkten moderat. Eiscreme und vegetarische Burger erhielten 45,9 % (n = 255) bzw. 47,7 % (n = 266) Zustimmung. Kekse und Wiener Würstchen fanden eine geringere Akzeptanz und wurden häufiger abgelehnt. Die Kaufbereitschaft für frische Mikroalgen war besonders gering. Nur 28,0 % (n = 156) bewerteten den Kauf als wahrscheinlich, während 52,4 % (n = 292) ihn ablehnten. Dies könnte auf Unsicherheiten hinsichtlich des Geschmacks, der Anwendungsmöglichkeiten oder der allgemeinen Akzeptanz hin deuten (Abbildung 20). Unterschiede hinsichtlich der Eignung von Mikroalgen in verschiedenen Produktkategorien und verschiedenen demografischen Variablen sind Tabelle A. 23 und Tabelle A.24 im Anhang zu entnehmen.

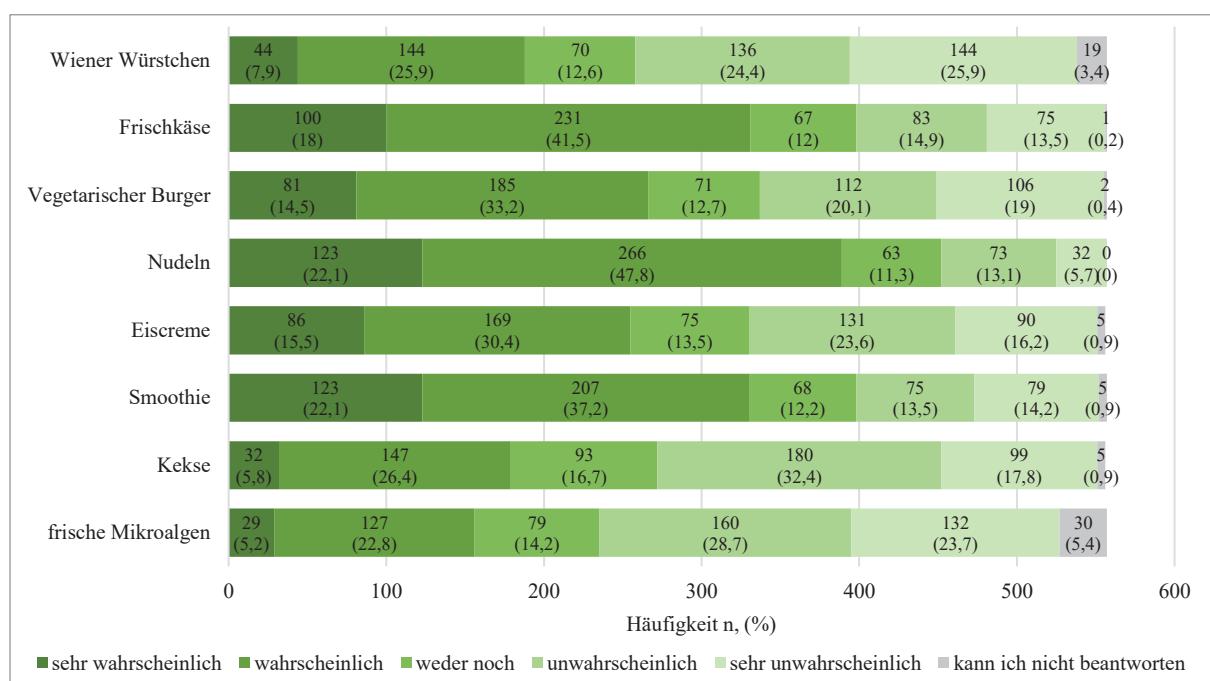


Abbildung 20: Kaufbereitschaft gegenüber Produkten mit Mikroalgen in der Stichprobe

3.2.9 Zahlungsbereitschaft für mikroalgenhaltige Produkte

Die Zahlungsbereitschaft für mikroalgenhaltige Produkte variiert je nach Produktkategorie erheblich. Am häufigsten waren die Teilnehmenden bereit, für Nudeln einen höheren Preis zu zahlen (40,8 %, n = 224). Auch bei Frischkäse (36,2 %, n = 198) und Smoothies (34,0 %, n = 186) war die Zustimmung hoch. Vegetarische Burger erzielten eine etwas geringere Akzeptanz (32,1 %, n = 176), während Würstchen (22,5 %, n = 124) und Eiscreme (22,0 %, n = 121) weniger Zustimmung fanden. Kekse wiesen mit 14,2 % (n = 78) die niedrigste Zahlungsbereitschaft auf. Diese Ergebnisse verdeutlichen, dass die Zahlungsbereitschaft stark von der Produktkategorie abhängt. Grund-nah-rungsmittel oder als gesund wahrgenommene Produkte wie Nudeln und Smoothies scheinen einen höheren Preis eher zu rechtfertigen, während Genussmittel wie Kekse oder Eiscreme seltener akzeptiert werden. Dies deutet darauf hin, dass die wahrgenommenen gesundheitlichen und funktionalen Vorteile von Mikroalgen eine zentrale Rolle für die Zahlungsbereitschaft spielen. (Abbildung 21). Unterschiede hinsichtlich der Eignung von Mikroalgen in verschiedenen Produktkategorien und verschiedenen demografischen Variablen sind Tabelle A.25 und A.26 zu entnehmen.

Die Ergebnisse zur Zahlungsbereitschaft für Lebensmittel mit Mikroalgen zeigen eine deutliche Zurückhaltung. 51,2 % (n = 285) der Befragten würden maximal 1–10 % mehr zahlen, während 28,2 % (n = 157) einen Aufpreis von 11–20 % akzeptieren würden. Preisaufschläge von 21–30 % (3,4 %, n = 19) oder 41–50 % (0,7 %, n = 4) fanden nur geringe Zustimmung. Zudem lehnten 13,8 % (n = 77) einen höheren Preis gänzlich ab (Abbildung 22). Ein moderater Preisaufschlag für Mikroalgenprodukte wird somit akzeptiert wird, während höhere Steigerungen nur begrenzt Zustimmung finden. Die Analyse der Preissteigerung für Lebensmittel mit Mikroalgen zeigte einen signifikanten Zusammenhang mit dem Geschlecht ($p = 0,027$) (Tabelle A.27 und A.28).

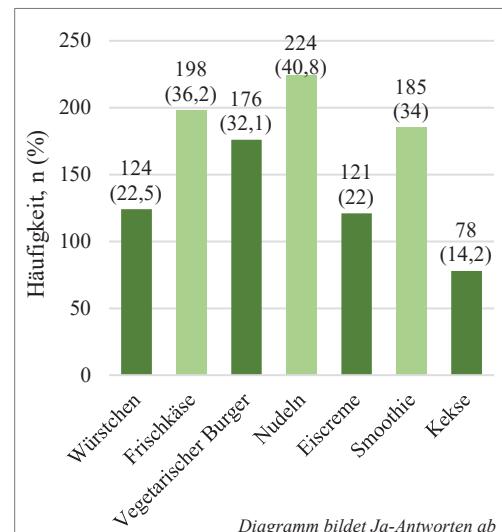


Abbildung 21: Zahlungsbereitschaft gegenüber Mikroalgenprodukte in der Stichprobe

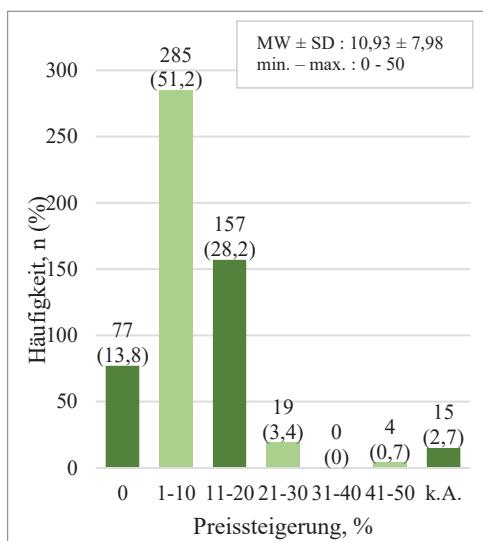


Abbildung 22: Preisakzeptanz für Mikroalgenprodukte in der Stichprobe

In ähnlicher Weise verhielt sich die Zahlungsbereitschaft für frische Mikroalgen. 42,7 % (n = 238) der Befragten wären bereit, 1 € bis 5 € zu zahlen, während 33 % (n = 184) 6 € bis 10 € akzeptieren würden. Höhere Preise wurden seltener genannt: 6,1 % (n = 34) für 11 € bis 15 € und 3,2 % (n = 18) für 16 € bis 20 €. Zudem lehnten 7,9 % (n = 44) eine Zahlung vollständig ab, und 7 % (n = 39) machten keine Angabe (Abbildung 23). Die Ergebnisse zeigen, dass Mikroalgenprodukte insbesondere im mittleren Preissegment bis 10 € auf die größte Akzeptanz stoßen. In höheren Preisklassen bleibt die Zustimmung hingegen begrenzt. Die Analyse der Zahlungsbereitschaft für frische Mikroalgen ergab ebenfalls einen signifikanten Zusammenhang mit dem Geschlecht ($p = 0,005$) (vgl. Tabelle A.27 und A.28).

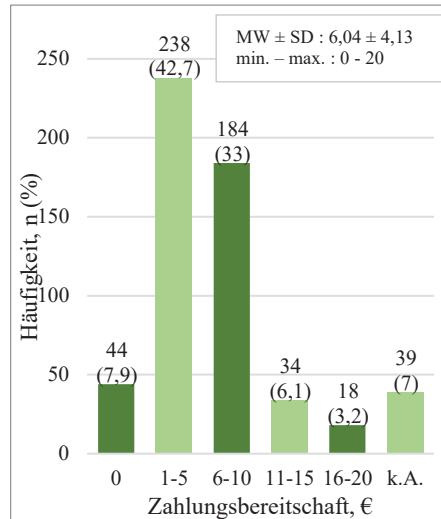


Abbildung 23: Preisakzeptanz für frische Mikroalgen in der Stichprobe

3.2.10 Akzeptanz gegenüber Mikroalgen bzw. Mikroalgen in Lebensmitteln

Die Akzeptanz verarbeiteter Mikroalgen wurde mit einem Mittelwert von $3,58 \pm 0,75$ bewertet. Dies zeigt, dass die Teilnehmenden verarbeiteten Mikroalgen insgesamt eine moderate bis hohe Akzeptanz entgegenbringen. Für frische Mikroalgen lag der Mittelwert bei $3,30 \pm 0,94$. Im Vergleich zur Akzeptanz verarbeiteter Mikroalgen ist der Wert hier niedriger. Der signifikante Unterschied ($p < 0,001$) deutet darauf hin, dass verarbeitete Mikroalgen besser akzeptiert werden als frische. Zudem konnte ein Einfluss des Alters auf die Akzeptanz festgestellt werden (55 - 64 Jahre vs. 25 - 34 Jahre ($p = 0,001$) und 65 - 74 Jahre vs. 25 - 34 Jahre ($p = 0,019$)) (Tabelle A.31 und Tabelle A.32).

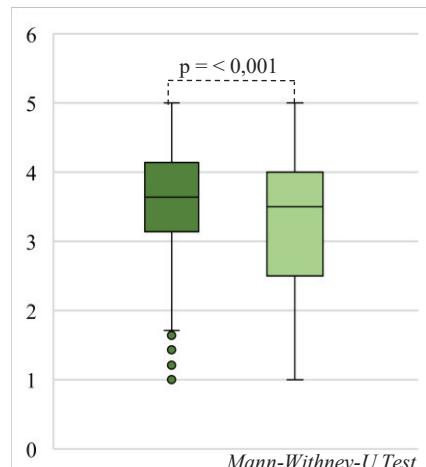


Abbildung 24: Akzeptanz von frischen und verarbeiteten Mikroalgen in der Stichprobe

3.2.11 Gesundheitsinteresse und Nachhaltigkeitsbewusstsein

Bei 43,1 % (n = 240) der Befragten konnte das Gesundheitsinteresse als moderat eingestuft werden, gefolgt von 30,9 % (n = 172), deren Gesundheitsinteresse als gering eingestuft wurde. Ein erhöhtes Gesundheitsinteresse wurde lediglich bei 22,8 % (n = 127) festgestellt. Für einen kleinen Anteil der Teilnehmenden (3,2 %, n = 18) konnte das Gesundheitsinteresse aufgrund fehlender Antworten in den einzelnen Subskalen nicht berechnet werden (Abbildung 25). Diese Verteilung zeigt, dass ein Großteil der Teilnehmenden zumindest ein gewisses Bewusstsein für gesundheitliche Aspekte hat, wobei die Mehrheit

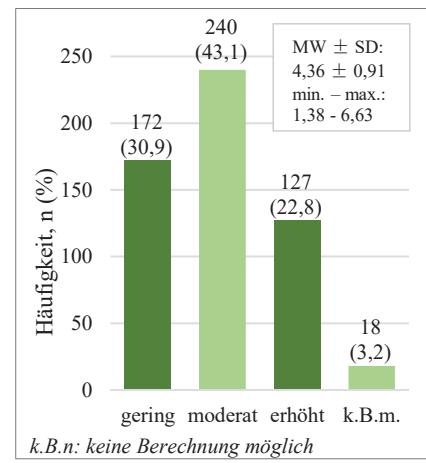


Abbildung 25: Kategorisierte Einteilung der Stichprobe nach Gesundheitsinteresse

im moderaten Bereich liegt. Das könnte darauf hindeuten, dass potenzielle Gesundheitsvorteile von Mikroalgenprodukten gezielt kommuniziert werden sollten, um eine breite Akzeptanz zu erreichen, insbesondere bei den Gruppen mit moderatem oder erhöhtem Gesundheitsinteresse. Signifikante Zusammenhänge zeigten sich mit dem Geschlecht ($p = 0,018$), dem Alter ($p < 0,001$), dem Bildungsstand ($p < 0,001$), dem Haushaltsnettoeinkommen ($p = 0,007$), dem Wohnort ($p = 0,034$) und der Ernährungsweise ($p < 0,001$) (Tabelle A.29 und A.30).

Die allgemeine Einstellungsmessung zum Thema Nachhaltigkeit zeigte eine insgesamt positive Tendenz ($2,76 \pm 1,96$) (Abbildung 26, A). Auch beim Nachhaltigkeitsbewusstsein zeigte sich eine erhöhte Sensibilität für dieses Thema (Abbildung 26, B). Bei 80,4 % ($n = 448$) der Befragten wurde ein erhöhtes Nachhaltigkeitsbewusstsein festgestellt. 14,4 % ($n = 80$) wurden der Kategorie moderat eingeordnet, während lediglich 1,6 % ($n = 9$) ein geringes Bewusstsein aufwiesen. Es zeigte sich ein signifikanter Zusammenhang zwischen der Ernährungsweise und der Einstellung zur Nachhaltigkeit ($p < 0,001$). Bezogen auf das allgemeine Nachhaltigkeitsbewusstsein zeigten sich zudem signifikante Unterschiede hinsichtlich des Geschlechts ($p < 0,001$), des Alters ($p = 0,025$) sowie der Ernährungsweise ($p < 0,001$) (vgl. Tabelle A.29 und A.30).

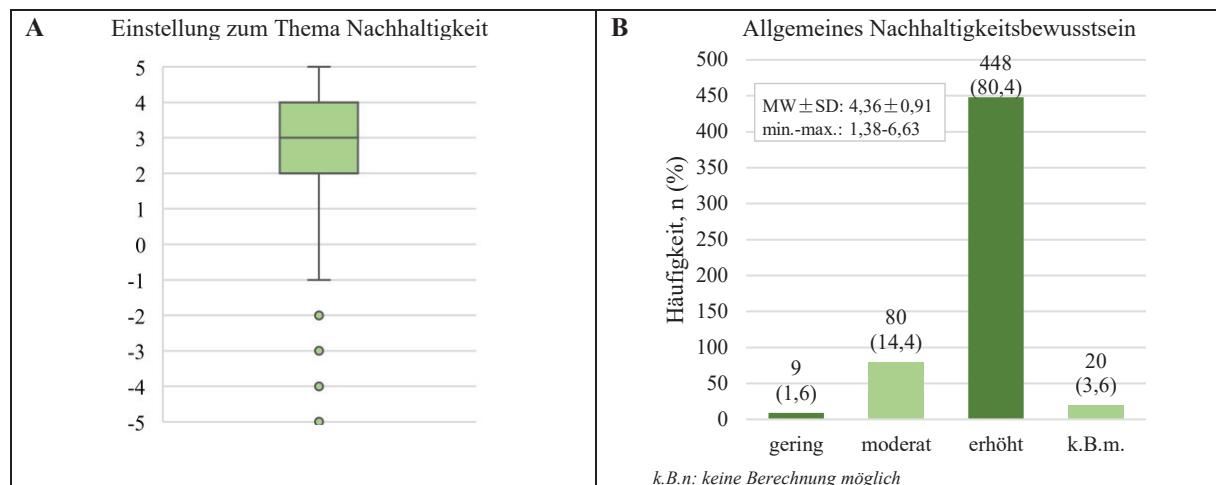


Abbildung 26: Einstellung zum Thema Nachhaltigkeit (A) und Kategorisierung anhand des Nachhaltigkeitsbewusstseins (B)

3.2.12 Einstellung gegenüber neuen Lebensmittel/-technologien

Die Mehrheit der Befragten (64,1 %, $n = 357$) zeigte eine moderate Neophobie, 16,5 % ($n = 92$) eine geringe und 14,2 % ($n = 79$) eine erhöhte Zurückhaltung gegenüber neuen Lebensmitteln. (Abbildung 27). Es zeigten sich signifikanten Unterschieden bei den Variablen Geschlecht ($p = 0,001$), Alter ($p = 0,006$) und Bildungsstand ($p < 0,001$). Hinsichtlich des Bildungsstandes gab es insbesondere signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen „Ausbildung“ und „Promotion“ ($p < 0,001$), „Ausbildung“ und „Master“ ($p = 0,011$) sowie „Fachhochschule“ und „Promotion“ ($p = 0,044$) (vgl. Tabelle A.29 und A.30).

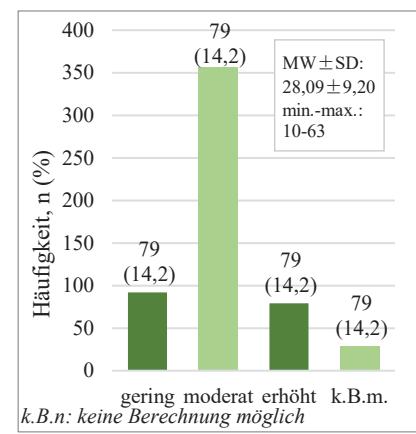


Abbildung 27: Einteilung der Stichprobe anhand der Food Neophobia Scale

Die Einstellung gegenüber neuen Lebensmitteltechnologien wurde zunächst mit einer allgemeinen Skala gemessen ($2,81 \pm 2,12$) (Abbildung 28, A). Die Frage zielte hier konkret auf neue Lebensmitteltechnologien im Zusammenhang mit Mikroalgen ab. Insbesondere wurde ein hochsignifikanter Zusammenhang für das Geschlecht ($p < 0,001$) sowie signifikante Effekte für das Alter ($p = 0,006$) und den Bildungsstand ($p = 0,022$) festgestellt (vgl. Tabelle A.29 und A.30). Zusätzlich wurde die Einstellung gegenüber neuen Lebensmitteltechnologien anhand der FTNS erfasst. Die Mehrheit der Befragten (62,7 %; $n = 349$) wies eine moderate Neophobie gegenüber neuen Lebensmitteltechnologien auf. Ein kleinerer Anteil von 16,3 % ($n = 91$) zeigte eine geringe Neophobie und 9,9 % ($n = 55$) wiesen eine erhöhte Tendenz zur Neophobie auf, was auf Skepsis oder Vorsicht gegenüber neuen Ansätzen in der Lebensmittelherstellung hinweist. Allerdings konnte für einen vergleichsweise hohen Anteil von 11,1 % ($n = 62$) aufgrund fehlender Angaben bei einzelnen Items keine Berechnung vorgenommen werden. Dies könnte auf Unsicherheiten oder ein geringes Interesse an dieser Fragestellung hindeuten (Abbildung 28, B). Ein signifikanter Zusammenhang wurde für das Alter ($p = 0,016$), den Bildungsstand ($p = 0,019$) und das Haushaltsnettoeinkommen ($p = 0,007$) festgestellt. Auch die Ernährungsweise zeigte einen signifikanten Einfluss ($p = 0,020$) (Tabelle A.29 und A.30).

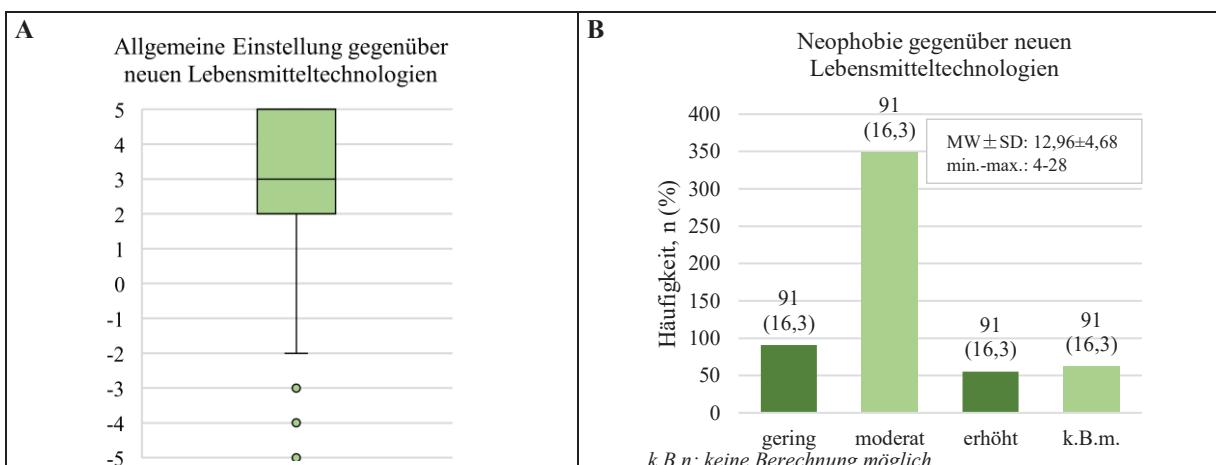


Abbildung 28: Einstellung gegenüber neuen Lebensmitteltechnologien (A) und Kategorisierung anhand der FTNS (B)

3.2.13 Korrelationen zwischen der Einstellung, der Akzeptanz und weiteren Variablen

Im Rahmen der Erhebung zur Einstellung und Akzeptanz von Mikroalgen und mikroalgenbasierten Lebensmitteln wurde die Beziehung zwischen verschiedenen Variablen untersucht, um die Einflussfaktoren der Akzeptanz detaillierter zu erfassen. Die Ergebnisse der Spearman-Rho-Korrelationen sind in Tabelle 19 dargestellt, wobei die variierenden Stichprobengrößen (n) auf den paarweisen Fallausschluss zurückzuführen sind. Die Analyse zeigt eine positive Korrelation zwischen der Akzeptanz verarbeiteter und frischer Mikroalgen ($r = 0,783$, $p < 0,001$). Dies deutet darauf hin, dass Personen, die verarbeitete Produkte akzeptieren, auch frische Mikroalgen positiv bewerten. Eine signifikante Korrelation besteht zudem zwischen der allgemeinen Einstellung zu Mikroalgen und der Akzeptanz verarbeiteter ($r = 0,515$, $p < 0,001$) sowie frischer Mikroalgen ($r = 0,495$, $p < 0,001$). Die Einstellung zur Nachhaltigkeit korreliert positiv sowohl mit der allgemeinen Einstellung zu Mikroalgen ($r = 0,288$, $p < 0,001$) als auch mit der Akzeptanz verarbeiteter ($r = 0,327$, $p < 0,001$) und frischer Mikroalgen ($r = 0,341$, $p < 0,001$). Dies

unterstreicht die Bedeutung von Nachhaltigkeit als Motivationsfaktor für die Akzeptanz dieser Lebensmittel. Ebenso zeigt das Gesundheitsinteresse schwache, aber signifikante positive Korrelationen mit der Akzeptanz frischer Mikroalgen ($r = 0,226$, $p < 0,001$) und verarbeiteter Produkte ($r = 0,164$, $p < 0,001$). Die FNS zeigt erwartungsgemäß negative Korrelationen mit der Akzeptanz verarbeiteter ($r = -0,368$, $p < 0,001$) und frischer Mikroalgen ($r = -0,317$, $p < 0,001$) sowie mit der allgemeinen Einstellung zu Mikroalgen ($r = -0,235$, $p < 0,001$). Die Einstellung gegenüber neuen Technologien zeigt positive Korrelationen mit der allgemeinen Einstellung ($r = 0,361$, $p < 0,001$) und der Akzeptanz verarbeiteter Mikroalgen ($r = 0,457$, $p < 0,001$), jedoch eine negative Beziehung zur Akzeptanz frischer Mikroalgen ($r = -0,356$, $p < 0,001$). Die FTNS zeigt sowohl positive als auch negative Korrelationen mit den untersuchten Variablen. Eine starke negative Beziehung besteht zur Akzeptanz verarbeiteter Mikroalgen ($r = -0,473$, $p < 0,001$).

Tabelle 19: Korrelationen zwischen Einstellung bzw. Akzeptanz und weiteren Variablen

	Einstellung	Akzeptanz verarbeitet	Akzeptanz frisch	GI	Einstellung Nachhaltigkeit	SC	FNS	Einstellung Technologien	FTNS
Einstellung	1,00	n = 431	n = 433	n = 448	n = 458	n = 444	n = 435	n = 458	n = 412
Akzeptanz verarbeitet	$r = 0,515$ $p = < 0,001$	1,00	n = 500	n = 509	n = 525	n = 508	n = 502	n = 525	n = 468
Akzeptanz frische	$r = 0,495$ $p = < 0,001$	$r = 0,783$ $p = < 0,001$	1,00	n = 509	n = 527	n = 509	n = 503	n = 527	n = 472
GI	$r = 0,110$ $p = 0,019$	$r = 0,164$ $p = < 0,001$	$r = 0,226$ $p = < 0,001$	1,00	n = 539	n = 521	n = 512	n = 539	n = 483
Einstellung Nachhaltigkeit	$r = 0,288$ $p = < 0,001$	$r = 0,327$ $p = < 0,001$	$r = 0,341$ $p = < 0,001$	$r = 0,226$ $p = < 0,001$	1,00	n = 537	n = 528	n = 557	n = 495
SC	$r = 0,176$ $p = < 0,001$	$r = 0,168$ $p = < 0,001$	$r = 0,173$ $p = < 0,001$	$r = 0,283$ $p = < 0,001$	$r = 0,498$ $p = < 0,001$	1,00	n = 512	n = 537	n = 480
FNS	$r = -0,235$ $p = < 0,001$	$r = -0,368$ $p = < 0,001$	$r = -0,317$ $p = < 0,001$	$r = -0,101$ $p = 0,022$	$r = -0,151$ $p = < 0,001$	$r = 0,022$ $p = 0,618$	1,00	n = 528	n = 475
Einstellung Technologien	$r = 0,361$ $p = < 0,001$	$r = 0,457$ $p = < 0,001$	$r = -0,356$ $p = < 0,001$	$r = 0,025$ $p = 0,568$	$r = 0,270$ $p = < 0,001$	$r = 0,14$ $p = 0,745$	$r = 0,259$ $p = < 0,001$	1,00	n = 495
FTNS	$r = 0,389$ $p = < 0,001$	$r = -0,473$ $p = < 0,001$	$r = -0,384$ $p = < 0,001$	$r = -0,114$ $p = 0,015$	$r = -0,254$ $p = < 0,001$	$r = -0,062$ $p = 0,178$	$r = 0,352$ $p = < 0,001$	$r = -0,521$ $p = < 0,001$	1,00

Korrelation nach Spearmann-Rho; Monte-Carlo-Signifikanz; Unterschiedliches n aufgrund paarweisen Fallausschluss bei der Korrelationsberechnung durch die Antwortoption „keine Angabe“ bzw. „ich weiß es nicht“

Neben der Signifikanz der Korrelationen ist die Betrachtung der Effektstärken entscheidend für die Einschätzung ihrer praktischen Relevanz. Die meisten der in Tabelle 19 dargestellten Korrelationen zeigen nur schwache bis moderate Effektstärken. Bei den stärksten Korrelationen, wie zwischen der Akzeptanz frischer und verarbeiteter Mikroalgen ($r = 0,783$) oder zwischen der allgemeinen Einstellung und der Akzeptanz verarbeiteter Mikroalgen ($r = 0,515$), handelt es sich um Ausnahmen, während der Großteil der Werte unterhalb von $r = 0,5$. Dies verdeutlicht, dass die beobachteten Zusammenhänge zwar statistisch signifikant sind, ihre praktische Bedeutung jedoch eher gering ist. Insgesamt spiegeln die Ergebnisse die Komplexität der Faktoren wider, die die Einstellung und Akzeptanz von Mikroalgen und mikroalgenbasierten Lebensmitteln beeinflussen. Die geringe Effektstärke deutet zudem darauf hin, dass weitere, nicht in der Umfrage erfasste Faktoren wie persönliche Vorlieben, Geschmack oder kulturelle Einflüsse eine zentrale Rolle bei der Akzeptanz von Mikroalgen spielen. Um die Relevanz der identifizierten Variablen besser zu bewerten, sollten die Ergebnisse im Kontext eines umfassenderen Modells betrachtet werden, das auch weitere Einflussgrößen berücksichtigt.

3.3 Ergebnisse der lebensmitteltechnologischen Untersuchungen

3.3.1 Bestimmung der flüchtigen Verbindungen mittels GC-MS-Analyse

3.3.1.1 VOC-Profile der frischen Biomasse unter verschiedenen Temperaturbedingungen

In den verschiedenen Proben der frischen Biomasse von *L. maxima* unter verschiedenen Temperaturbedingungen (-18 °C, +4 °C, +20 °C und +99 °C) konnten insgesamt 17 Substanzen mit einer Qualität von ≥ 80 nachgewiesen werden. Es wurden 13 Peaks im Chromatogramm (vgl. Anhang D) detektiert, was darauf hinweist, dass einige Peaks von der Stoffdatenbank mit mehr als einer potenziellen Substanz in Verbindung gebracht wurden. Tabelle 20 enthält eine detaillierte Auflistung der identifizierten Verbindungen, ihre chemische Formel, CAS-Nummer, Retentionszeit, relative Häufigkeit und Geruchsbeschreibungen, die auf spezifischen Datenbanken und wissenschaftlichen Quellen beruhen.

Tabelle 20: Relative Häufigkeiten und Geruchsbeschreibungen der nachgewiesenen VOCs in der frischen Biomasse unter verschiedenen Temperaturbedingungen

Peak	Verbindung	Formel	CAS-Nummer	t _R (min)		relative Häufigkeit (%)			p-Wert	Geruchsbeschreibung
					-18 °C	+4 °C	+20 °C	+99 °C		
1	Ethylacetat	C ₄ H ₈ O ₂	141-78-6	2,251	9,31±0,39	n.n.	10,23±3,22	6,47±0,08	0,564 ^a	fruchtig ^{1,3}
	Hydroxyaceton	C ₄ H ₈ O ₂	590-90-9	2,245-2,251	9,31±0,39	n.n.	10,23±3,22	6,59±0,21	0,153 ^b	-
2	Isopropylacetat	C ₅ H ₁₀ O ₂	108-21-4	2,355	2,71±0,02	n.n.	n.n.	n.n.	-	fruchtig ¹
3	Isopropylalkohol	C ₃ H ₈ O	67-63-0	2,758-2,764	30,23±12,79	5,65±0,23	10,26±12,40	4,17±0,49	0,578 ^a	alkoholartig ¹ , scharf muffig
4	Ethanol	C ₂ H ₆ O	64-17-5	2,840	39,21±5,11	49,77±9,17	39,08±4,93	40,89±1,59	0,306 ^a	weinartig ³
5	2,3-Butandion	C ₄ H ₆ O ₂	431-03-8	3,424	n.n.	n.n.	n.n.	20,98±0,00	-	unangenehm, stechend ¹ , butterartig ² , chlorhaltig ³
6	2-Butanol	C ₄ H ₁₀ O	78-92-2	4,449-4,455	2,35±0,25	n.n.	n.n.	n.n.	-	alkoholartig ^{1,3}
7	Hexanal	C ₆ H ₁₂ O	66-25-1	5,557	n.n.	n.n.	n.n.	1,31±0,20	-	stechend ¹ , fettig-grün, grasig ²
8	Acetoin	C ₄ H ₈ O ₂	513-86-0	10,941-10,947	1,68±0,15	1,99±1,08	9,66±4,60	6,77±0,25	0,033 ^{a,c}	butterartig ²
9	Hexanol	C ₆ H ₁₄ O	111-27-3	13,042	n.n.	n.n.	n.n.	4,91±0,24	-	süßlich ¹ , grün ²
	Hexylformiat	C ₇ H ₁₄ O ₂	629-33-4	13,042	n.n.	n.n.	n.n.	4,91±0,24	-	ätherisch, fruchtig, blättrig, grün ²
	Oxiran	C ₃ H ₆ O	53229-39-3	13,042	n.n.	n.n.	n.n.	4,91±0,24	-	-
10	Essigsäure	C ₂ H ₄ O ₂	64-19-7	15,464-15,551	1,80±1,07	n.n.	6,43±2,10	1,74±0,00	0,094 ^b	stechend, beißender Essigeruch ^{1,3} , scharf ²
11	Pentadecan	C ₁₅ H ₃₂	629-62-9	16,658	n.n.	n.n.	n.n.	1,28±0,13	-	benzinartig ¹
12	Ethylhydroxybutyrat	C ₆ H ₁₂ O ₃	5405-41-4	17,155	n.n.	n.n.	1,75±0,25	n.n.	-	-
13	Phytan	C ₂₀ H ₄₂	638-36-8	21,355	n.n.	4,30±0,55	n.n.	13,39±3,04	0,053 ^a	-
	Heptadecan	C ₁₇ H ₃₆	629-78-7	21,355-21,361	0,92±2,75	4,68±0,76	5,21±0,47	14,96±3,46	0,075 ^a	-

tR(min): Retentionszeit; n.n.: nicht nachweisbar; a: Kruskal-Wallis-Test; b: Einfaktorielle Varianzanalyse (ANOVA); c: Post-Hoc-Test mit angepasster Signifikanz nicht signifikant; *p<0,05; **p<0,01; ***p<0,001; 1: GESTIS-Stoffdatenbank, Institut für Arbeitsschutz der deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (IFA); 2: Specifications for Flavourings, Food and Agriculture Organization (FAO); 3: PubChem, National Library of Medicine (NIH)

Die Zusammensetzung und Häufigkeit der VOC-Verbindungen zeigte temperaturabhängige Unterschiede, jedoch ohne statistisch signifikante Evidenz für einen Einfluss der Lagertemperatur. Ethanol wurde unter allen Temperaturbedingungen nachgewiesen und erreichte bei +4 °C mit $49,77 \pm 9,17\%$ die höchste relative Häufigkeit. Der weinartige Geruch von Ethanol blieb unabhängig von der Temperatur konstant. Eine ähnliche Beständigkeit zeigte Isopropylalkohol, dessen Konzentration bei -18 °C mit $30,23 \pm 12,79\%$ am höchsten war. Sein alkoholischer, scharfer und muffiger Geruch schien bei höheren Temperaturen abzunehmen. Ethylacetat wurde unter allen Temperaturen außer +4 °C nachgewiesen. Die höchste relative Häufigkeit trat bei +20 °C mit $10,23 \pm 3,22\%$ auf. Diese Substanz besitzt einen fruchtigen Geruch und wurde besonders in Proben nachgewiesen, die bei Raumtemperatur gelagert wurden.

Eine auffällige Verbindung war 2,3-Butandion, dass nur bei +99 °C in erhöhter Konzentration ($20,98 \pm 0,00\%$) auftrat. Der butterartige Geruch dieser Verbindung lässt vermuten, dass sie durch thermische Prozesse gebildet wurde. Auch Hexanal, bekannt für seinen stechend-grasigen Geruch, wurde nur bei +99 °C in geringen Mengen ($1,31 \pm 0,20\%$) nachgewiesen. Weitere temperaturabhängige Unterschiede zeigten sich bei Hexanol und Hexylformiat, die erst bei +99 °C nachgewiesen wurden und einen süßlichen, grünen sowie fruchtigen Geruch aufweisen. Sie traten mit $4,91 \pm 0,24\%$ relativ häufig auf. Acetoin wurde unter allen Temperaturbedingungen außer -18 °C nachgewiesen, insbesondere bei +20 °C ($9,66 \pm 4,60\%$) und +99 °C ($6,77 \pm 0,25\%$). Es verleiht der Biomasse butterartige Geruchsnoten. Essigsäure, mit ihrem stechenden, essigsäureartigen Geruch, trat vor allem bei +20 °C ($6,43 \pm 2,10\%$) auf. Neben den typischen VOCs wurden auch langkettige Kohlenwasserstoffe wie Phytan und Heptadecan identifiziert. Sie traten vor allem bei +99 °C in höheren Konzentrationen auf. Phytan wurde mit $13,39 \pm 3,04\%$ relativ häufig nachgewiesen, während Heptadecan mit $14,96 \pm 3,46\%$ die höchste Konzentration erreichte. Beide Substanzen sind für benzinartige und leicht wachsartige Geruchsnoten bekannt. Einige Verbindungen wurden nur sporadisch oder in sehr geringen Mengen nachgewiesen. Isopropylacetat trat ausschließlich bei -18 °C auf ($2,71 \pm 0,02\%$), wobei sein fruchtiger Geruch kaum wahrnehmbar war. 2-Butanol wurde ebenfalls nur bei -18 °C nachgewiesen ($2,35 \pm 0,25\%$), während Pentedecan lediglich bei +20 °C ($1,28 \pm 0,13\%$) vorkam.

Abbildung 29 zeigt die relative Häufigkeit der 12 geruchsbestimmenden VOCs in der frischen Biomasse von *L. maxima* unter verschiedenen Temperaturbedingungen (-18 °C, +4 °C, +20 °C und +99 °C). Obwohl sich temperaturabhängige Trends in der VOC-Zusammensetzung abzeichnen, konnten keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen den Lagerbedingungen nachgewiesen werden.

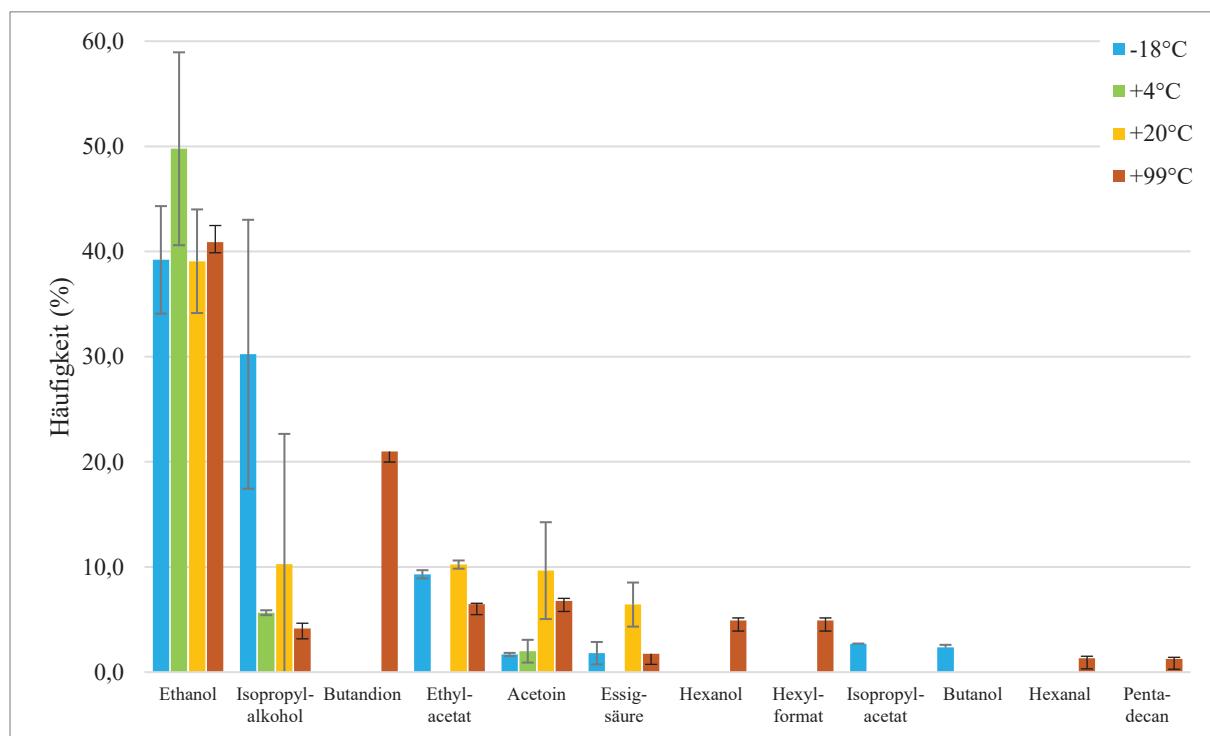


Abbildung 29: Relative Häufigkeit der geruchsgebenden VOCs in der frischen Biomasse unter verschiedenen Temperaturbedingungen

3.3.1.2 VOC-Profile in der frischen und der getrockneten Biomasse

Die Zusammensetzung und relative Häufigkeit der identifizierten VOCs in der frischen Biomasse *L. maxima* zeigte im Vergleich zur getrockneten Biomasse teils signifikante Unterschiede (Tabelle 21). Insgesamt wurden 18 Peaks und 18 Substanzen detektiert, wobei einige Verbindungen nur in einer der beiden Biomasseformen nachgewiesen wurden.

Ethanol, das in der frischen Biomasse mit einem Anteil von $49,77 \pm 9,17\%$ am häufigsten vorkam, war in der getrockneten Biomasse mit nur $5,12 \pm 0,09\%$ deutlich seltener vertreten ($p = 0,007$). Ein weiteres auffälliges Ergebnis betrifft Heptadecan, das in der getrockneten Biomasse mit $22,15 \pm 3,42\%$ relativ häufig vorkam, während es in der frischen Biomasse nur mit $4,68 \pm 0,76\%$ nachgewiesen wurde ($p = 0,046$). Darüber hinaus wurden Verbindungen wie Dimethyldisulfid und Hexanal nur in der getrockneten Biomasse nachgewiesen, was auf chemische Veränderungen während des Trocknungsprozesses hinweist. Dimethyldisulfid ist für seinen zwiebelartigen Geruch bekannt und könnte die Geruchs-wahrnehmung der getrockneten Biomasse beeinflussen. Hexanal, das grasige und fettig-grüne Geruchsnoten aufweist, ist ein typisches Oxidationsprodukt ungesättigter Fettsäuren und unterstreicht die mögliche Lipidoxidation während der Trocknung. Weitere Unterschiede zeigten sich bei der Gesamtvielfalt der VOCs: Während einige Verbindungen wie 2,5-Dimethylpyrazin oder Essigsäure ausschließlich in der getrockneten Biomasse vorkamen, wurden andere Substanzen wie Ethylhydroxybutyrat oder Benzaldehyd nur in der frischen Biomasse nachgewiesen. Diese Unterschiede spiegeln die komplexen chemischen und physikalischen Veränderungen wider, die während des Trocknungsprozesses auftreten.

Tabelle 21: Relative Häufigkeiten und Geruchsbeschreibungen der nachgewiesenen VOCs – Vergleich der frischen und getrockneten Biomasse

Peak	Bezeichnung	Formel	CAS-Nummer	t _R (min)	relative Häufigkeit (%) frisch	relative Häufigkeit (%) getrocknet	p-Wert	Geruchsbeschreibung
1	Hydroxyaceton	C ₄ H ₈ O ₂	590-90-9	2,245 - 2,251	n.n.	5,89 ± 0,16	-	-
2	2-Formylbutan	C ₅ H ₁₀ O	96-17-3	2,491 - 2,496	n.n.	2,35 ± 0,18	-	-
3	Isopentanal	C ₅ H ₁₀ O	590-86-3	2,540 - 2,545	n.n.	4,56 ± 0,26	-	unangenehm ¹ , fruchtig, fettig, mandelartig ²
4	Ethanol	C ₂ H ₆ O	64-17-5	2,840	49,77 ± 9,17	5,12 ± 0,09	0,007**a	weinartig ³
5	Isopropylalkohol	C ₃ H ₈ O	67-63-0	2,758 - 2,764	5,65 ± 0,23	5,51 ± 0,26	0,177 ^a	alkoholartig ¹ , scharf-muffig,
6	Toluol	C ₇ H ₈	108-88-3	4,553	n.n.	0,81 ± 0,07	-	aromatisch ³
7	Dimethyldisulfid	C ₂ H ₆ S ₂	624-92-0	5,289	n.n.	1,53 ± 1,23	-	unangenehm ¹ , zwiebelartig ¹ , knoblauchartig ³
8	Hexanal	C ₆ H ₁₂ O	66-25-1	5,557	n.n.	13,11 ± 0,62	-	stechend ¹ , fettig-grün, grasig ²
9	2-Isooctanon	C ₈ H ₁₆ O	928-68-7	9,714	n.n.	0,55 ± 0	-	-
10	Acetoin	C ₄ H ₈ O ₂	513-86-0	10,941 - 10,947	1,99 ± 1,08	3,33 ± 0,05	0,094 ^a	butterartig ²
11	2,5-Dimethylpyrazin	C ₆ H ₈ N ₂	123-32-0	12010 - 12011	n.n.	2,78 ± 0,39	-	erdig, kartoffelartig ²
12	Essigsäure	C ₂ H ₄ O ₂	64-19-7	15,464 - 15,551	n.n.	7,66 ± 1,84	-	stechend, beißender Essigeruch ^{1,3} , scharf ^c
13	Eicosan	C ₂₀ H ₄₂	112-95-8	16,664	n.n.	3,44 ± 0,68	-	-
14	Pentadecan	C ₁₅ H ₃₂	629-62-9	16,658	n.n.	3,44 ± 0,68	-	benzinartig ¹
15	Benzaldehyd	C ₇ H ₆ O	100-52-7	17,062	n.n.	2,61 ± 0,2	-	bittermandelartig ¹ , süß, stark mandelartig ²
16	Ethylhydroxybutyrat	C ₆ H ₁₂ O ₃	5405-41-4	17,155	n.n.	1,01 ± 0,1	-	benzinartig ¹
17	Hexadecan	C ₁₆ H ₃₄	544-76-3	19,062 - 19,070	n.n.	4,65 ± 0	-	-
18	Heptadecan	C ₁₇ H ₃₆	629-78-7	21,355 - 21,361	4,68 ± 0,76	22,15 ± 3,42	0,046* ^b	-

tR(min): Retentionszeit; n.n.: nicht nachweisbar; a: T-Test; b: Mann-Withney-U-Test; *p<0,05; **p<0,01; ***p<0,001; 1: GESTIS-Stoffdatenbank, Institut für Arbeitsschutz der deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (IFA); 2: Specifications for Flavourings, Food and Agriculture Organization (FAO); 3: PubChem, National Library of Medicine (NIH)

3.3.1.2 VOC-Profile in den Spirulina- und Chlorella-Pulvern unterschiedlicher Herkunft

Die GC-MS-Analyse der verschiedenen Pulverproben zeigt eine umfassende Vielfalt an VOCs. In den Proben der verschiedenen Pulver konnten insgesamt 40 Substanzen mit einer Qualität von ≥ 80 nachgewiesen werden, welche sich auf 37 Peaks verteilten (vgl. Tabelle 22).

Tabelle 22: Relative Häufigkeiten und Geruchsbeschreibungen der nachgewiesenen VOCs in Spirulina- und Chlorella-Pulvern unterschiedlicher Herkunft

Peak	Bezeichnung	Formel	CAS-Nummer	t _R (min)	relative Häufigkeit (%)				p-Wert ⁴	Geruchsbeschreibung
					Spirulina Algenwerk	Spirulina Bio	Spirulina Raab	Chlorella		
1	Hydroxyaceteton	C ₄ H ₈ O ₂	590-90-9	2,250	5,89±0,16	n.n.	n.n.	n.n.	-	-
2	Silvan/ 2-Methylfuran	C ₅ H ₆ O	534-22-5	2,316	n.n.	0,71±0,00	1,13±0,12	0,90±0,02	0,027* ^a	ätherisch ^{1,2} , würzig-rauchig ²
	3-Methylfuran	C ₅ H ₆ O	930-27-8	2,316	n.n.	0,71±0,00	1,13±0,12	0,90±0,02	0,027* ^a	-
3	2-Butanon	C ₄ H ₈ O	78-93-3	2,365	n.n.	n.n.	n.n.	3,31±0,78	-	mäßig scharf, wohlriechend, minz- oder acetonartig ¹ , ätherisch, ekelregend ² , angenehm stechend ³
4	2-Formylbutan	C ₅ H ₁₀ O	96-17-3	2,491-2,496	2,35±0,18	1,73±0,31	2,27±0,17	5,59±0,37	0,018* ^a	-
6	Isopentanal	C ₅ H ₁₀ O	590-86-3	2,540-2,546	4,56±0,26	4,52±0,80	4,70±0,32	6,59±0,45	0,093 ^a	unangenehm ¹ , fruchtig, fettig, tierisch, mandelartig ²
7	Isopropylalkohol	C ₃ H ₈ O	67-63-0	2,758	5,51±0,26	n.n.	n.n.	n.n.	-	alkoholartig ¹ , scharf muffig, wie Reingungskalkohol ³
8	Ethanol	C ₂ H ₆ O	64-17-5	2,834-2,840	5,12±0,09	n.n.	n.n.	n.n.	-	weinartig ³
	Benzol	C ₆ H ₆	71-43-2	2,834-2,840	n.n.	n.n.	0,50±0,13	1,28±0,18	0,007** ^b	petroleumartig ³
9	4-Methylcyclohexen	C ₇ H ₁₂	591-47-9	3,031	n.n.	n.n.		6,13±0,37	-	-
	2-Ethylfuran	C ₆ H ₈ O	3208-16-0	3,031	n.n.	n.n.	n.n.	6,13±0,37	-	kräftiges, rauchig-verbrann ²
10	Pentanal	C ₅ H ₁₀ O	110-62-3	3,424	n.n.	4,18±0,56	4,59±0,37	7,74±1,33	0,004** ^b	stechend ¹ ,
11	2-Isopropyl-2-methyloxiran	C ₆ H ₁₂ O	72221-03-5	3,625	n.n.	n.n.	n.n.	1,64±0,08	-	-
12	Toluol	C ₇ H ₈	108-88-3	4,553-4,559	0,81±0,07	0,79±0,09	0,80±0,01	1,91±0,29	0,080 ^a	aromatisch ³
13	Dimethyl-disulfid	C ₂ H ₆ S ₂	624-92-0	5,289	1,53±1,23	n.n.	n.n.	n.n.	-	unangenehm ¹ , zwiebelartig ² , knoblauchartig ³
14	Hexanal	C ₆ H ₁₂ O	66-25-1	5,562-5,568	13,11±0,62	34,19±4,59	38,20±1,37	24,95±2,09	0,021* ^a	stechend ¹ , fettig-grün, grasisch ²
15	2-Heptanon	C ₇ H ₁₄ O	110-43-0	8,186	n.n.	n.n.	n.n.	1,54±0,04	-	fruchtig ^{1,2} , würzig ²
16	Heptanal	C ₇ H ₁₄ O	111-71-7	8,252-8,257	n.n.	1,92±0,20	1,87±0,02	n.n.	0,681 ^b	unangenehm ¹ , durchdringend, ölig ²
17	2-Pentylfuran	C ₉ H ₁₄ O	3777-69-3	9,555-9,567	n.n.	1,35±0,24	1,18±0,19	5,66±2,38	0,012* ^b	fruchtig ²
18	2-Isooctanon	C ₈ H ₁₆ O	928-68-7	9,714	n.n.	1,16±0,01	1,12±0,08	n.n.	0,563 ^b	-
19	1-Pentanol	C ₅ H ₁₂ O	71-41-0	10,259	n.n.	0,92±0,14	1,01±0,13	2,21±0,49	0,004** ^b	mäßig stark ³
20	Acetoin	C ₄ H ₈ O ₂	513-86-0	10,947	3,33±0,05	n.n.	n.n.	n.n.	-	butterartig ²
21	2,2,6-Trimethylcyclohexanon	C ₉ H ₁₆ O	2408-37-9	11,727-11,732	n.n.	2,38±0,17	1,96±0,02	1,26±0,14	0,001*** ^b	kampferartig Tabaknote; thujunähnlich ²
22	2,5-Dimethylpyrazin	C ₆ H ₈ N ₂	123-32-0	12,010-12,016	2,78±0,39	2,33±0,16	1,94±0,45	n.n.	0,059 ^a	erdig, kartoffelartig ²
23	Sulcaton	C ₈ H ₁₄ O	110-93-0	12,436-12,441	n.n.	2,25±0,13	2,05±0,17	1,06±0,05	0,001*** ^b	süßlich ¹ , stark fettig, grün, zitrusartig ²
24	1-Hexanol	C ₆ H ₁₄ O	111-27-3	13,047	n.n.	1,93±0,24	1,19±0,10	n.n.	0,007** ^b	süßlich ¹ , grün ²
	Hexylformiat	C ₇ H ₁₄ O ₂	629-33-4	13,047	n.n.	-	1,24±0,01	n.n.	-	ätherisch, fruchtig, blättrig, grün ²
25	Isophoron	C ₉ H ₁₄ O	78-59-1	14,056	n.n.	0,80±0,07	n.n.	0,50±0,06	0,006** ^b	pfefferminzartig ^{1,2} , kampferartig ³
26	3-Ethyl-2,5-dimethylpyrazin	C ₈ H ₁₂ N ₂	13360-65-1	15,280-15,295	n.n.	1,38±0,06	0,74±0,05	n.n.	0,001*** ^b	-
27	Essigsäure	C ₂ H ₄ O ₂	64-19-7	15,513-15,496	7,66±1,84	n.n.	n.n.	n.n.	-	stechend, beißender Essigeruch ^{1,3} , scharf ²
28	Vinylhexanol (1-Octen-3-ol)	C ₈ H ₁₆ O	3391-86-4	15,562-15,567	n.n.	1,60±0,93	2,89±0,05	n.n.	0,054 ^b	kräftiger, süßlich-erdig mit starker Kräuternote, die an

									Lavendel-Lavadin, Rose und Heu erin- nert ²
29	Eicosan	C ₂₀ H ₄₂	112-95-8	16,664	3,44±0,68	n.n.	n.n.	n.n.	-
	Pentadecan	C ₁₅ H ₃₂	629-62-9	16,664	3,44±0,68	n.n.	n.n.	0,076 ^a	benzinartig ¹
30	Benzaldehyd	C ₇ H ₆ O	100-52-7	17,057-17,062	2,61±0,20	3,15±0,33	2,94±0,48	5,66±0,48	0,057 ^a
31	3,5-Octadienon	C ₈ H ₁₂ O	30086-02-3	18,311	n.n.	n.n.	n.n.	0,70±0,10	bittermandelartig ¹ , süß, mandelartig ²
32	Hexadecan	C ₁₆ H ₃₄	544-76-3	19,062-19,070	1,01±0,10	n.n.	n.n.		stechend krautig ²
33	β-Cyclocitral	C ₁₀ H ₁₆ O	432-25-7	19,441	n.n.	2,06±0,20	1,88±0,18	0,49±0,00	benzinartig ¹
34	Safranal	C ₁₀ H ₁₄ O	116-26-7	20,013-20,019	n.n.	n.n.	n.n.	0,64±0,07	süßlich-tabakartig ²
35	Heptadecan	C ₁₇ H ₃₆	629-78-7	21,366-21,372	22,15±3,42	6,49±6,06	5,92±2,80	n.n.	kräftig, süßlich grün- blumig und etwas ta- bakig-krautig ²
36	β-Ionon	C ₁₃ H ₂₀ O	79-77-6	26,162-26,167	n.n.	1,47±0,76	1,52±0,47	n.n.	0,933 ^b

tR(min): Retentionszeit; n.n.: nicht nachweisbar; a: Kruskal-Wallis-Test ;b: Einfaktorielle Varianzanalyse (ANOVA); *p<0,05; **p<0,01;
***p<0,001; 1: GESTIS-Stoffdatenbank, Institut für Arbeitsschutz der deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (IFA); 2: Specifications for Flavourings, Food and Agriculture Organization (FAO); 3: PubChem, National Library of Medicine (NIH); 4: Die Ergebnisse der Post-hoc-Testung sind dem Tabelle A. 38 zu entnehmen

Die Spirulina-Algenwerk-Probe zeichnet sich durch eine einzigartige Zusammensetzung aus, darunter Methylolacetone, das ausschließlich in dieser Probe mit einer relativen Häufigkeit von $5,89 \pm 0,16\%$ nachgewiesen wurde. Diese Substanz trägt durch ihre fruchtigen Noten zu einem angenehmen Geruchsprofil bei. Ebenso wurde Isopropylalkohol und Ethanol ($5,51 \pm 0,26\%$ bzw. $5,12 \pm 0,09\%$) ausschließlich in der Algenwerk-Probe nachgewiesen. Eine der prominentesten Verbindungen in allen Proben war Hexanal, wobei die höchsten relativen Häufigkeiten in den Spirulina-Bio ($34,19 \pm 4,59\%$) und Spirulina-Raab-Proben ($38,20 \pm 1,37\%$) gemessen wurden. Diese hohe Konzentration könnte auf Unterschiede in der Verarbeitung oder Lagerung der Proben hinweisen. In der Chlorella-Probe war Hexanal mit $24,95 \pm 2,09\%$ ebenfalls deutlich vertreten, jedoch weniger dominant. Heptadecan wurde vor allem in der Spirulina-Algenwerk-Probe in hoher Konzentration ($22,15 \pm 3,42\%$) nachgewiesen. Diese Verbindung war in den Bio- ($6,49 \pm 6,06\%$) und Raab-Proben ($5,92 \pm 2,80\%$) deutlich weniger vertreten, während sie in der Chlorella-Probe nicht nachweisbar war. Isopentanal, eine Verbindung mit einem unangenehmen, fruchtig-mandelartigen Geruch, wurde in allen Proben nachgewiesen. Die höchsten Werte wurden in der Chlorella-Probe gemessen ($6,59 \pm 0,45\%$), gefolgt von den Spirulina-Bio- ($4,52 \pm 0,80\%$) und Raab-Proben ($4,70 \pm 0,32\%$). Auch Benzaldehyd bekannt für seinen süßlichen, bittermandelartigen Geruch und Toluol, eine aromatische Verbindung, wurde in allen Proben identifiziert, allerdings in geringen bis sehr geringen Konzentrationen.

Einige Verbindungen traten nur in spezifischen Proben auf. 2-Butanon, das für seinen minzig-stechen-den Geruch bekannt ist, wurde ausschließlich in der Chlorella-Probe mit einer relativen Häufigkeit von $3,31 \pm 0,78\%$ gefunden. Auch 2-Ethylfuran, das kräftige, rauchig-verbrannte Noten liefert, wurde nur in dieser Probe ($6,13 \pm 0,37\%$) nachgewiesen. Seltene Verbindungen wie 2-Pentylfuran, 2,5-Dimethylpyrazin und β-Ionon wurden in einzelnen Proben gefunden. 2-Pentylfuran, das fruchtige Noten beisteuert, war in der Chlorella-Probe am stärksten vertreten ($5,66 \pm 2,38\%$). 2,5-Dimethylpyrazin, erdig und kartoffelartig im Geruch, zeigte sich besonders in der Algenwerk-Probe ($2,78 \pm 0,39\%$). β-Ionon, das warm und holzig duftet, war vor allem in Bio- ($1,47 \pm 0,76\%$) und Raab-Proben ($1,52 \pm 0,47\%$) präsent.

Die GC-MS-Analyse offenbart eine komplexe und diversifizierte Zusammensetzung der flüchtigen organischen Verbindungen in den analysierten Pulvern. Während die Spirulina-Proben von Algenwerk, Bio und Raab teils ähnliche, teils spezifische Profile aufweisen, unterscheidet sich die Chlorella-Probe durch ihre Vielzahl einzigartiger Verbindungen mit intensiven Geruchsprofilen. Die sensorischen Eigenschaften der Pulver werden durch die Balance zwischen angenehm wahrgenommenen Verbindungen wie Hexanal und Benzaldehyd und unangenehmen Substanzen wie Isopentanal und 2-Butanon geprägt.

Von den 40 nachgewiesenen Substanzen konnten 31 als geruchsbildend identifiziert werden. Abbildung 30 und 31 zeigt die Mittelwerte und Standartabweichungen der relativen Häufigkeiten (%) der verschiedener geruchsbindenden VOCs, der analysierten Pulver (Spirulina Algenwerk, Spirulina Bio, Spirulina Raab und Chlorella).

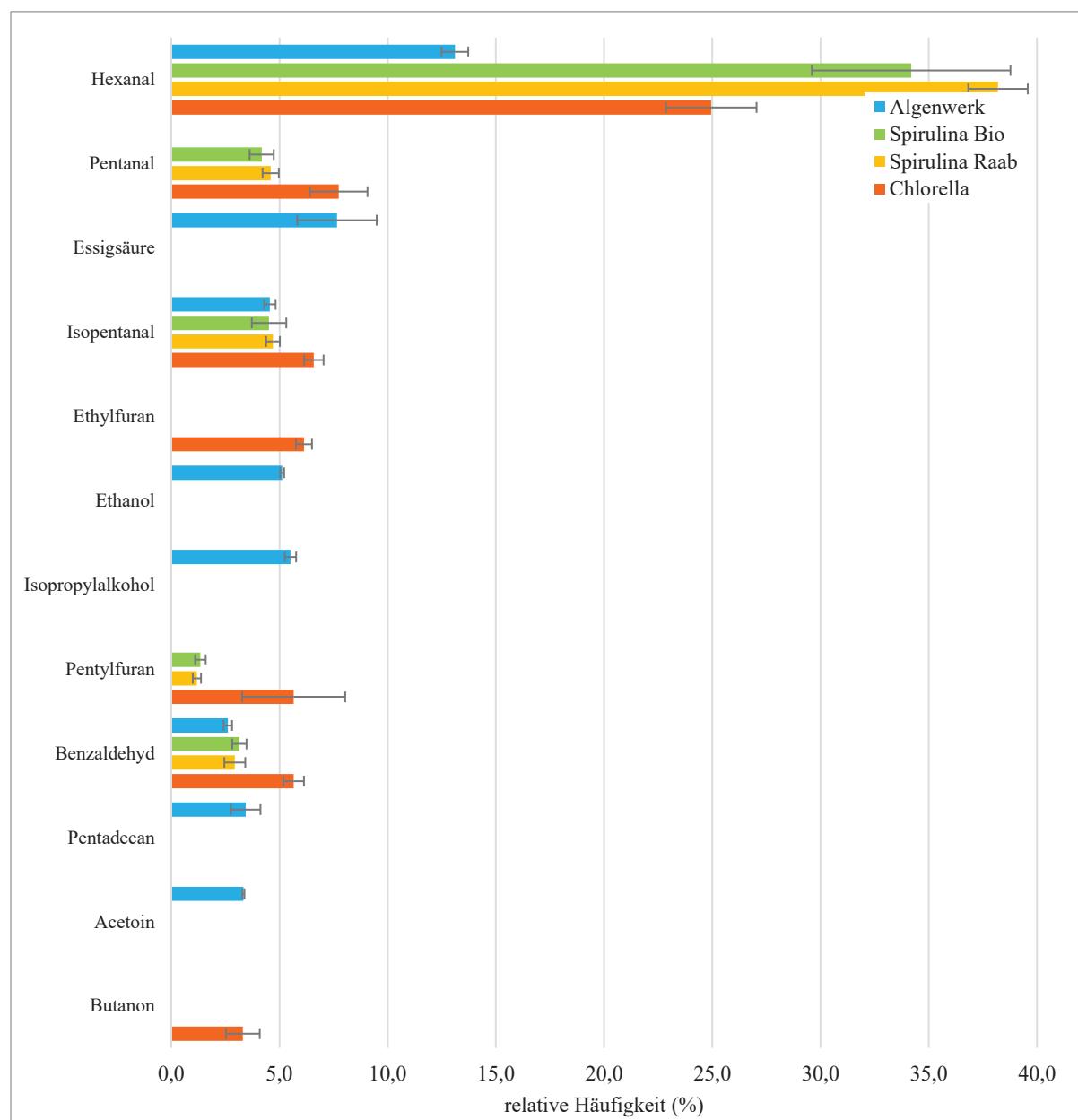


Abbildung 30: Relative Häufigkeit der geruchsgebenden VOCs in Spirulina- und Chlorella-Pulvern unterschiedlicher Herkunft, Teil 1



Abbildung 31: Relative Häufigkeit der geruchsgebenden VOCs in Spirulina- und Chlorella-Pulvern unterschiedlicher Herkunft, Teil 2

3.3.2 Ergebnisse der humansensorischen Analyse

3.3.2.1 Check-all-that-apply und Rate-all-that-apply

Die Resultate des 1. Replikats waren weitestgehend mit denen des 2. Replikats vergleichbar. Lediglich für die +20 °C-Probe zeigten sich signifikante Unterschiede zwischen dem ersten und dem zweiten Durchlauf. Für diese Probe unterschied sich zum einen die Anzahl der Nennungen für das Attribut „joghurtartig/buttermilchartig“ ($\Delta: 5; p = 0,037$). Zum anderen kam es zu einem signifikanten Unterschied in den RATA-Einstufungen für die Attribute „metallisch“ ($\Delta: 1,3; p = 0,013$) und „schwefelartig“ ($\Delta: 1,19; p = 0,021$) (vgl. Tabelle A.33). Abbildung 32 zeigt die Häufigkeiten der ausgewählten Attribute unter den unterschiedlichen Temperaturbedingungen (-18 °C, +4 °C, +20 °C und +99 °C). Die Ausprägungen dieser Attribute wurden in Form eines Radardiagramms dargestellt, um die Unterschiede zwischen den Proben hervorzuheben.

Das Attribut „frisch“ wurde bevorzugt bei niedrigen Temperaturen (-18 °C und +4 °C) wahrgenommen, mit einer Häufigkeit von 54,2 % (n = 13) bzw. 66,7 % (n = 16). Bei +99 °C sank die Wahrnehmung dieses Attributs auf 25 % (n = 6). „joghurtartig/buttermilchartig“ wurde am häufigsten bei +4 °C genannt (n = 21; 87,5 %), gefolgt von -18 °C und +20 °C mit jeweils 19 Nennungen (78,2 %) sowie 14 Nennungen (58,3 %) bei +99 °C. Das Attribut „weinig/alkoholisch“ wurde insgesamt selten vergeben, zeigte jedoch eine leicht steigende Tendenz bei +20 °C und +99 °C (jeweils n = 6; 25,0 %), während der Mittelwert über die Temperaturen hinweg relativ konstant blieb. Die Wahrnehmung von „essigartig“ war am stärksten bei -18 °C (n = 14; 58,3 %) und +20 °C (n = 13; 54,2 %), während dieses Attribut bei +99 °C nur selten wahrgenommen wurde (n = 4; 16,7 %). „butterartig/fettig“ wurde mit Abstand am häufigsten bei +99 °C (n = 21; 87,5 %) wahrgenommen, während die Häufigkeit mit sinkender Temperatur abnahm. Das Attribut „aligig“ wurde von rund der Hälfte der Panelist*innen in den -18 °C- und +20 °C-Proben genannt, während es in den +4 °C- und +99 °C-Proben seltener auftrat. Die Wahrnehmung von „muffig“ war bei +20 °C am ausgeprägtesten (n = 12; 79,2 %), trat aber auch unter den anderen Temperaturbedingungen mit einer Häufigkeit von 45,8 % bis 50,0 % auf. „erdig“ zeigte bei +20 °C (n = 6; 25,0 %) eine geringere Häufigkeit im Vergleich zu den anderen Temperaturbedingungen, bei denen dieses Attribut mit 45,8 % bis 50,0 % relativ konstant blieb. Das Attribut „metallisch“ blieb über alle Temperaturen hinweg weniger stark ausgeprägt. „Schwefelig“ wurde am häufigsten bei -18 °C wahrgenommen (n = 15; 62,5 %) und nahm mit steigender Temperatur an Häufigkeit ab. Das Attribut „benzinartig“ spielte insgesamt keine oder nur eine untergeordnete Rolle. Die genauen Antworthäufigkeiten sind Tabelle A.33 und Tabelle A.34 im Anhang zu entnehmen.

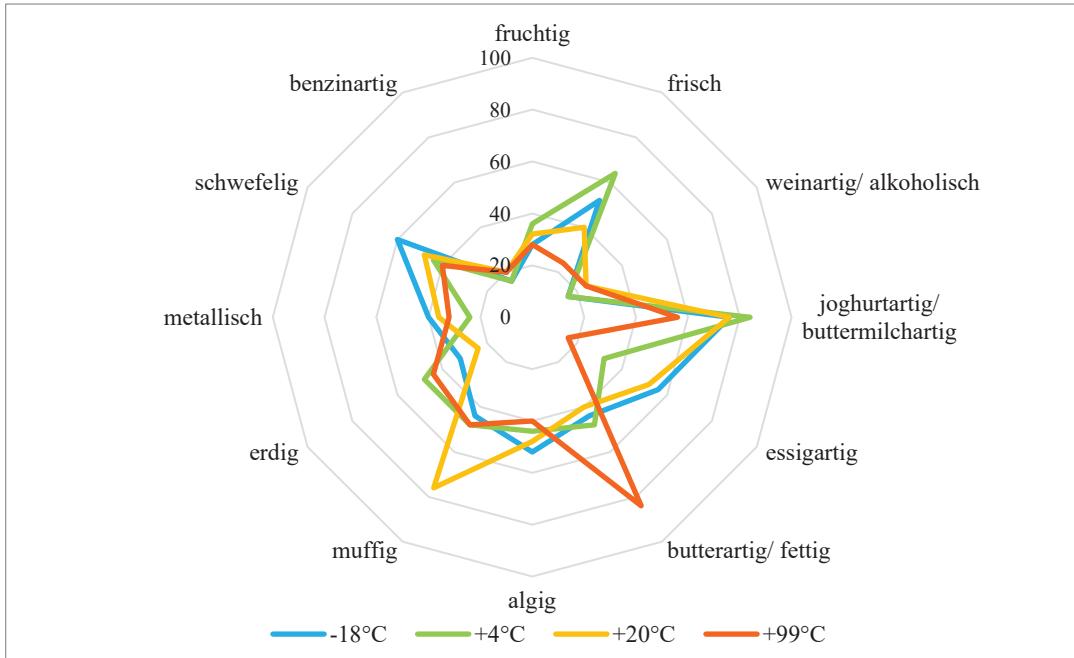


Abbildung 32: Häufigkeit der ausgewählten Attribute (%) unter den verschiedenen Temperaturbedingungen

In der statistischen Analyse der sensorischen Attribute zeigten sich signifikante Unterschiede in den Häufigkeiten der Attribute frisch ($p = 0,029$), essigartig ($p = 0,010$) und butterartig/fettig ($p = 0,005$). Die anschließenden Post-hoc-Tests ermöglichen eine detaillierte Betrachtung der Unterschiede zwischen den Temperaturbedingungen: Für das Attribut „frisch“ wurde ein signifikanter Unterschied zwischen $+4^{\circ}\text{C}$ und $+99^{\circ}\text{C}$ ($p = 0,023$) festgestellt. Das Attribut essigartig zeigte einen signifikanten Unterschied zwischen -18°C und $+99^{\circ}\text{C}$ ($p = 0,017$). Besonders auffällig waren die Ergebnisse für das Attribut butterartig/fettig, bei den signifikanten Unterschieden zwischen -18°C und $+99^{\circ}\text{C}$ ($p = 0,013$), $+4^{\circ}\text{C}$ und 99°C ($p = 0,030$) sowie $+20^{\circ}\text{C}$ und $+99^{\circ}\text{C}$ ($p = 0,005$) festgestellt wurden. Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass sich die wahrgenommenen sensorischen Eigenschaften der Proben deutlich in Abhängigkeit von den Temperaturbedingungen verändern. Insbesondere die Erhitzung auf $+99^{\circ}\text{C}$ führte zu einer stärkeren Abweichung in der Wahrnehmung der untersuchten Attribute (Tabelle A.35).

Abbildung 33 zeigt die Ergebnisse der RATA-Daten. Zusammenfassend zeigten sich auch hier Unterschiede in den sensorischen Wahrnehmungen in Abhängigkeit von der Temperatur. Einige Attribute wie „butterartig/fettig“ und „muffig“ nahmen mit steigender Temperatur zu, während andere, wie „frisch“ und „algig“, abnahmen. Attribute wie „metallisch“ und „benzinartig“ blieben unabhängig von der Temperatur gering ausgeprägt. In der statistischen Analyse waren diese Unterschiede allerdings nicht signifikant (vgl. Tabelle A.36).

Das Attribut „fruchtig“ zeigte insgesamt geringe Mittelwerte, die zwischen $1,37 \pm 0,55$ ($+99^{\circ}\text{C}$) und $1,79 \pm 0,82$ ($+20^{\circ}\text{C}$) lagen. Der höchste Wert wurde bei $+20^{\circ}\text{C}$ beobachtet. Für das Attribut „frisch“ nahmen die Intensität mit steigender Temperatur ab. Die höchste Intensität wurde bei $+4^{\circ}\text{C}$ ($1,85 \pm 0,92$) und die niedrigste bei $+99^{\circ}\text{C}$ ($1,53 \pm 0,79$) verzeichnet. Das Attribut „weinartig/alkoholisch“ zeigte geringe Unterschiede zwischen den Temperaturen, mit Mittelwerten, zwischen $1,90 \pm 0,14$

($+4^{\circ}\text{C}$) und $2,60 \pm 0,46$ (-18°C). Für „joghurtartig/buttermilchartig“ waren die Intensität bei $+4^{\circ}\text{C}$ ($3,03 \pm 1,014$) und $+20^{\circ}\text{C}$ ($2,94 \pm 1,01$) am höchsten. Der niedrigste Wert wurde bei -18°C ($2,63 \pm 0,93$) festgestellt. Das Attribut „essigartig“ zeigte eine steigende Geruchswahrnehmung mit der Temperatur. Der höchste Wert trat bei $+99^{\circ}\text{C}$ ($2,83 \pm 0,84$) und der niedrigste bei -18°C ($2,47 \pm 0,90$) auf. Auch für „butterartig/fettig“ war ein Anstieg der Intensität mit steigender Temperatur erkennbar, von $2,21 \pm 1,00$ bei -18°C auf $3,05 \pm 0,91$ bei $+99^{\circ}\text{C}$. Das Attribut „aligig“ war hingegen bei niedrigen Temperaturen stärker ausgeprägt ($2,25 \pm 1,06$ bei -18°C und $1,89 \pm 0,94$ bei $+99^{\circ}\text{C}$). „Muffig“ zeigte bei $+99^{\circ}\text{C}$ die höchste Ausprägung ($3,28 \pm 1,16$) und bei -18°C die niedrigste ($2,52 \pm 1,06$). Das Attribut „erdig“ hatte bei -18°C den höchsten Mittelwert ($2,38 \pm 0,92$) und bei $+20^{\circ}\text{C}$ den niedrigsten ($2,29 \pm 0,76$). Die Werte für das Attribut „metallisch“ blieben über alle Temperaturen hinweg gering, mit Mittelwerten zwischen $1,75 \pm 0,94$ ($+4^{\circ}\text{C}$) und $1,91 \pm 1,00$ ($+99^{\circ}\text{C}$). Das Attribut „schwefelig“ war bei -18°C am höchsten ausgeprägt ($2,17 \pm 0,8$) und nahm bei $+4^{\circ}\text{C}$ ab, bevor es bei $+99^{\circ}\text{C}$ auf $2,33 \pm 1,45$ anstieg. „Benzinartig“ zeigte insgesamt geringe Mittelwerte, die zwischen $1,13 \pm 0,19$ (-18°C) und $1,32 \pm 0,38$ ($+99^{\circ}\text{C}$) lagen.

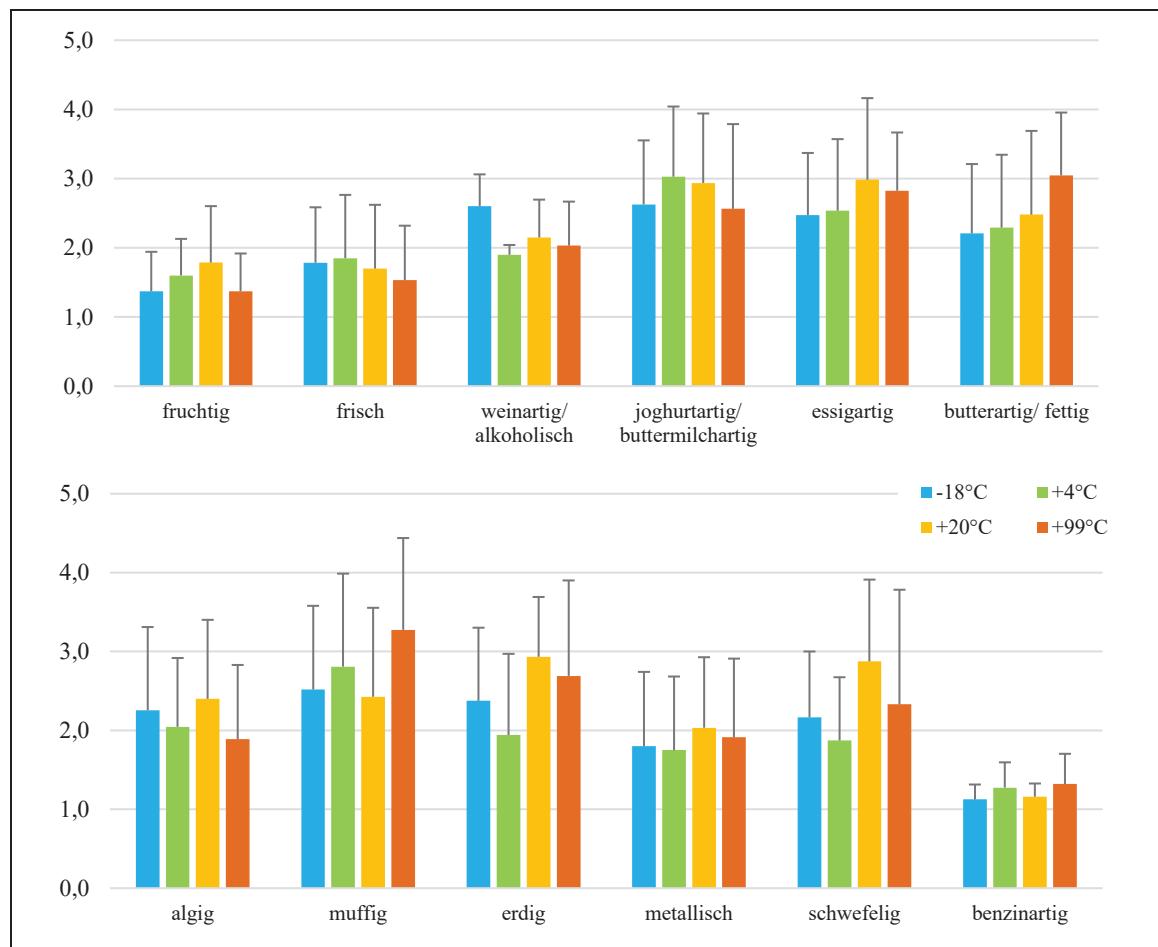


Abbildung 33: Intensitätsbewertung der sensorischen Attribute unter verschiedenen Temperaturbedingungen (MW \pm SD)

Anmerkungen zu den Proben

Während der sensorischen Testung hatten die Teilnehmenden zusätzlich die Möglichkeit, ihre Eindrücke zu den einzelnen Proben in Form von Anmerkungen zu teilen und möglicherweise weitere Attribute zu nennen, die im Rahmen des Fragebogens nicht erfasst wurden. Dabei wurden sowohl spezifische Wahrnehmungen zu einzelnen Proben als auch allgemeine Eindrücke berichtet. Probe 853 (+4 °C) wurde von einem Teilnehmenden als grasartig im Geruch beschrieben. Probe 982 (+99 °C) wurde hingegen sehr unterschiedlich wahrgenommen und erhielt vielfältige Beschreibungen. Einige Teilnehmende empfanden den Geruch als sehr unangenehm, während andere ihn als würzig beschrieben. Zusätzlich wurden milchig-sahnige Noten wahrgenommen, die möglicherweise eine cremige oder milde Charakteristik andeuten. Manche fanden den Geruch sogar sehr angenehm und beschrieben ihn als „sehr lecker“. Außerdem wurde bei dieser Probe explizit der Geruch von gekochtem Ei festgestellt, was möglicherweise einen leicht schwefelhaltigen oder proteinartigen Duft impliziert. Eine weitere, detaillierte Wahrnehmung war der Geruch von frischem, warmem Käsekuchen, der teilweise durch eine Röstnote ergänzt wurde. Dies zeigt, wie unterschiedlich diese Probe wahrgenommen wurde. In den allgemeinen Eindrücken wurde erwähnt, dass einige Proben eher fischig als algig rochen. Diese Beschreibung hebt hervor, dass der Geruch weniger typisch für Algen, sondern stärker fischig wahrgenommen wurde. Probe 546 (+99 °C) wies mehrere auffällige Eigenschaften auf. Zum einen wurde bemerkt, dass diese Probe Schaum bildete, was eine physikalische Besonderheit darstellt. Darüber hinaus wurde sie als etwas wärmer im Vergleich zu den anderen Proben beschrieben, was auf eine mögliche Temperaturdifferenz oder eine veränderte Haptik hindeutet. Der Geruch dieser Probe wurde als teigartig oder keksartig charakterisiert, was eine süßliche, backartige Note suggeriert und sie von den anderen Proben klar unterscheidet. Insgesamt spiegeln die Anmerkungen eine breite Vielfalt an Wahrnehmungen wider, die von unangenehmen bis hin zu leckeren Eindrücken reichen. Jede Probe hatte dabei ihre individuellen Charakteristika, die von den Teilnehmenden unterschiedlich intensiv und detailliert beschrieben wurden. Weitere Anmerkungen sind Tabelle A.37 zu entnehmen.

3.3.2.2 Geruchsbewertung mittels Skalenbewertung und freier Attributnennung

Die Intensität der Geruchswahrnehmung der Proben wurde anhand einer 10-stufigen Skala beurteilt. Dabei wurde die Intensität I (direkt nach dem Öffnen des Glases) signifikant höher bewertet als Intensität II (nach 15 Minuten Offenstand) ($7,74 \pm 0,78$ vs. $4,53 \pm 0,81$; $p = 0,004$) (vgl. Abbildung 34). Dies bedeutet, dass die Differenz in der wahrgenommenen Geruchsintensität zwischen den beiden Zeitpunkten nicht zufällig ist, sondern mit hoher Wahrscheinlichkeit auf systematische Unterschiede zurückzuführen ist. Während der Offenstandzeit verflüchtigte sich der Geruch, was zu einer geringeren Geruchswahrnehmung führte.

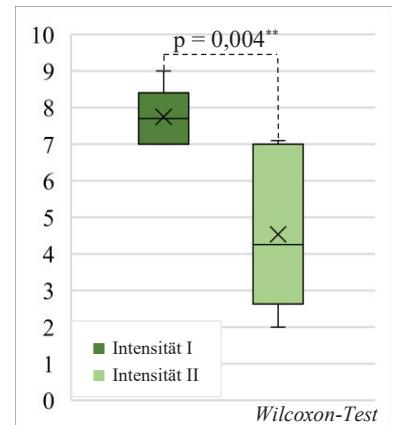


Abbildung 34: Differenz zwischen den wahrgenommenen Geruchsintensitäten

Zusätzlich zur Bewertung der Geruchsintensität konnten die Panelist*innen frei Attribute benennen (Abbildung 35). Die Ergebnisse zeigen Unterschiede zwischen den beiden Zeitpunkten. Direkt nach öffnen des Glases wurden „muffig“ (58,3 %), „schwefelig“ (41,7 %), „frisch“, „alig“ und „eiartig“ (je 33,3 %) häufiger genannt, gefolgt von „erdig“, „moderig“ und „fischig“ (je 25 %). Einzelne Nennungen gab es für „essigartig“, „grasig“, „fermentiert“ oder „gemüseartig“. Vereinzelt wurden negative Begriffe wie „Abwasser“, „verdorben“ oder „sumpfig“ erwähnt, während positivere Attribute wie „joghurtartig“, „süßlich“ oder „butterartig“ nicht genannt wurden. 15 Minuten nach Offenstand dominierte „joghurtartig“ (41,7 %), gefolgt von „muffig“ und „frisch“ (je 33,3 %) sowie „erdig“ und „säuerlich“ (je 25 %). „Schwefelig“, „alig“, „moderig“, „fischig“ und „essigartig“ wurden jeweils zweimal erwähnt. Negativ konnotierte Begriffe wie „verdorben“ oder „sumpfig“ fehlten hier, ebenso Attribute wie „eiartig“, „stechend“ oder „salzartig“. Die Ergebnisse zeigen, dass direkt nach dem Öffnen des Glases negative Assoziationen präsenter waren, während nach 15 Minuten Offenstand mildere und positivere Attribute wahrgenommen wurden.

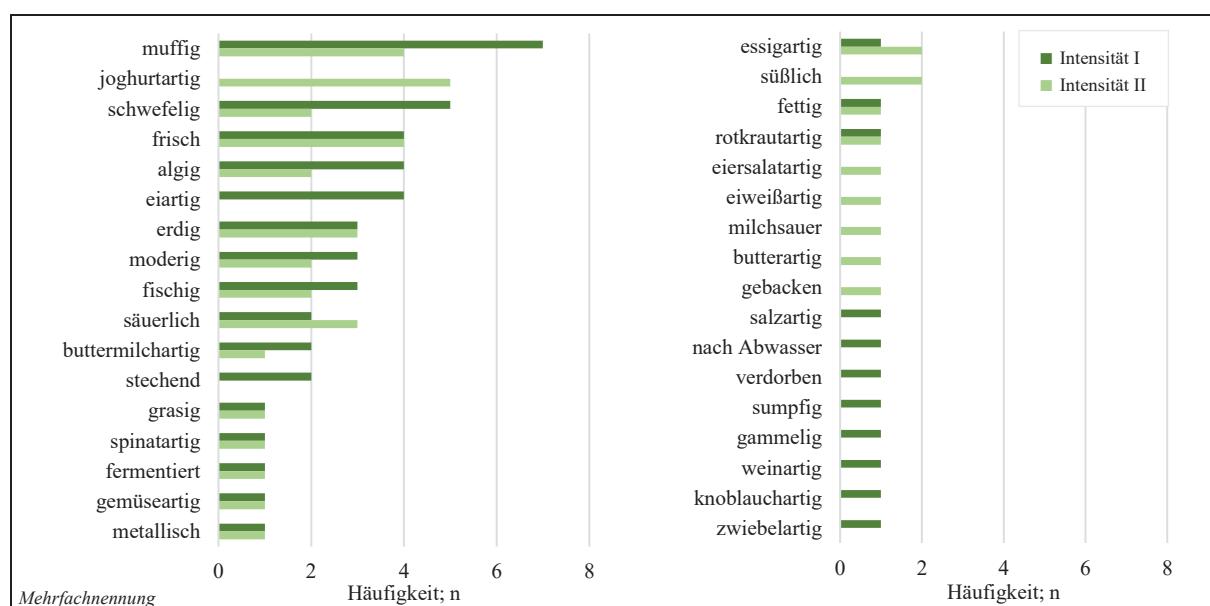


Abbildung 35: Absolute Antworthäufigkeiten der freien Attributnennung

3.3.3 Zusammenhang zwischen den identifizierten VOCs und Geruchsattributen

Die Hauptkomponentenanalyse verdeutlicht mögliche Zusammenhänge zwischen den in der GC-MS-Analyse identifizierten flüchtigen Verbindungen und den sensorisch wahrgenommenen Geruchsein-drücken. Besonders auffällig ist die Verbindung von Aldehyden wie Hexanal, Hexanol und Butandion mit butterartigen und fettigen Noten. Zudem stehen Isopropylalkohol, Isopropylacetat und Butanol in Zusammenhang mit algigen, schwefeligen und essigartigen Gerüchen, während Essigsäure und Ethylhydroxybutyrat eher metallische und muffige Eindrücke hervorrufen. Joghurtartige, buttermilchartige sowie frische Noten zeigen hingegen keine klare Verbindung zu den erfassten VOCs (vgl. Abbildung 36).

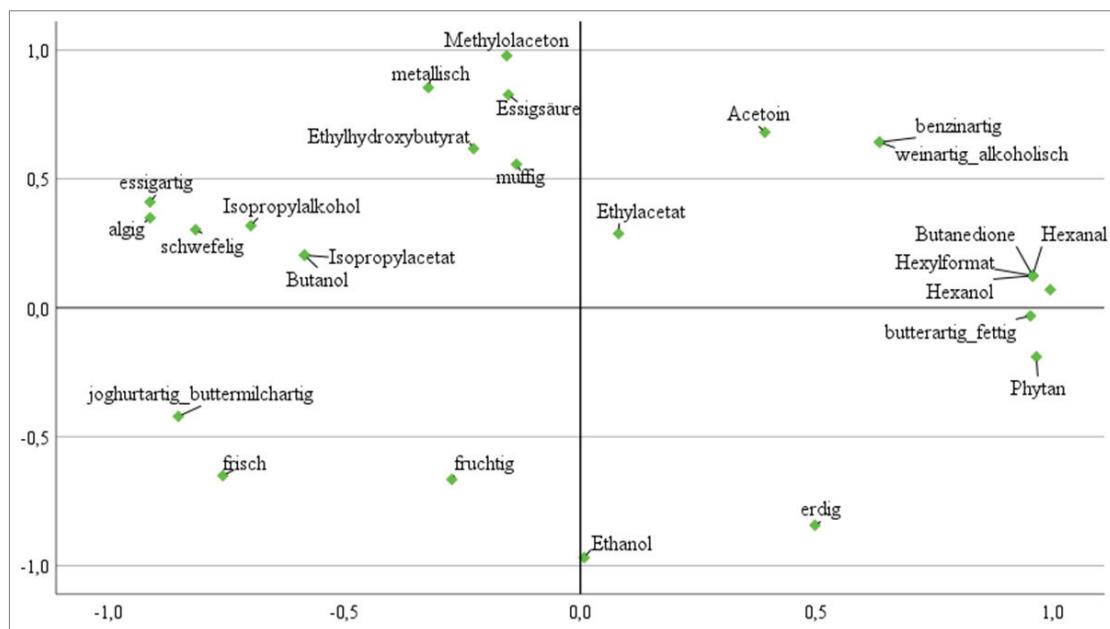


Abbildung 36: Ergebnisse der Hauptkomponentenanalyse zwischen den identifizierten VOCs und Geruchsattributen

Die Korrelationsmatrix bestätigt mehrere dieser Zusammenhänge durch statistisch signifikante Korrelationen. Die butterartige/fette Wahrnehmung zeigte eine starke positive Korrelation mit Hexanal, Butandion, Hexanol, Hexylformiat, Oxiran und Pentadecan (jeweils $r = 0,987$; $p = 0,007$), während diese VOCs negativ mit joghurt-/buttermilchartig assoziiert waren ($r = -0,987$; $p = 0,007$). Die weinartige/alkoholische sowie die benzinartige Wahrnehmung korrelierten signifikant mit Acetoin ($r = 0,952$; $p = 0,024$). Schwefelige Noten standen in positiver Beziehung zu Isopropylacetat ($r = 0,926$; $p = 0,037$), während essigartig und algig negativ mit Phytan korrelierten ($r = -0,961$; $p = 0,020$ bzw. $r = -0,909$; $p = 0,045$). Muffig zeigte eine positive Korrelation mit Essigsäure ($r = 0,925$; $p = 0,038$) und Ethylhydroxybutyrat ($r = 0,992$; $p = 0,004$). Metallisch war positiv mit Methylolaceton ($r = 0,943$; $p = 0,029$) und negativ mit Ethanol ($r = -0,931$; $p = 0,034$) verknüpft. Zusätzlich wiesen schwefelige Noten signifikante Korrelationen mit Isopropylacetat ($r = 0,926$; $p = 0,037$), Isopropylalkohol ($r = 0,982$; $p = 0,009$) und Butanol ($r = 0,926$; $p = 0,037$) auf. Für die Attribute fruchtig, frisch und erdig konnten hingegen keine signifikanten Korrelationen festgestellt werden. Weitere sensorische Attribute wie algig, muffig oder essigartig zeigten zwar Korrelationen mit bestimmten VOCs, jedoch ohne statistische Signifikanz (vgl. Tabelle A. 39).

4. Diskussion der Ergebnisse

4.1. Literaturrecherche

Ein zentraler Fokus der Literaturrecherche lag auf der umfassenden Analyse der Nährstoff-zusammensetzung von *Limnospira*. Die Ergebnisse zeigen jedoch eine erhebliche Variabilität der in den untersuchten Publikationen angegebenen Nährwerte. Diese Schwankungen lassen sich auf mehrere Faktoren zurückführen. Ein entscheidender Einflussfaktor sind die Anbaubedingungen, da Parameter wie Lichtintensität, Nährstoffzusammensetzung des Mediums und Kultivierungstemperatur maßgeblich die Nährstoffprofile beeinflussen können [165]. Darüber hinaus führen Unterschiede zwischen verschiedenen Stämmen und Arten innerhalb der Gattung *Limnospira* zu weiteren Variationen, da genetische Diversität eine unterschiedliche metabolische Zusammensetzung begünstigen kann [53]. Neben biologischen und umweltbedingten Faktoren spielt auch die Verarbeitungsmethode eine wesentliche Rolle. Verfahren wie Sprüh- oder Gefriertrocknung sowie Lagerbedingungen können die Stabilität und Konzentration bestimmter Nährstoffe signifikant verändern [56, 160, 162, 163]. Zudem tragen methodische Unterschiede in der Nährwertanalyse zur Datenvariabilität bei [105, 111]. Die hohe Variabilität der Ergebnisse erschwert eine konsistente Bewertung des ernährungsphysiologischen Potenzials von *Limnospira* und unterstreicht die Notwendigkeit standardisierter Methoden zur Analyse und Dokumentation der Nährstoffzusammensetzung. Für zukünftige Forschungsarbeiten und die Entwicklung von Lebensmitteln wäre es daher hilfreich, diese Variabilität systematisch zu erfassen. Eine präzisere Dokumentation der Anbaubedingungen und Verarbeitungsprozesse könnte dazu beitragen, die Qualität und Konsistenz der Produkte besser nachzuvollziehen. Zudem könnten einheitliche Kultivierungs- und Verarbeitungstechniken sowie standardisierte Analysemethoden helfen, Schwankungen der Nährstoffwerte zu reduzieren um eine bessere Vergleichbarkeit der Daten zu ermöglichen.

Ein weiterer zentraler Aspekt der Literaturrecherche befassete sich mit den ernährungsphysiologischen und potenziell gesundheitsfördernden Eigenschaften von *Limnospira*, da dieses Cyanobakterium sowohl in der öffentlichen Wahrnehmung als auch in wissenschaftlichen Publikationen häufig als „Superfood“ mit vielfältigen gesundheitlichen Vorteilen beschrieben wird [131, 155, 209]. Eine kritische Analyse der vorhandenen Literatur zeigte jedoch, dass einige dieser Aussagen mit Vorsicht zu interpretieren sind. Ein Großteil der Erkenntnisse basiert auf in vitro- und in vivo-Studien, die zwar wertvolle Hinweise auf biologische Mechanismen liefern, aber nur eingeschränkt auf den Menschen übertragbar sind [210, 211]. In vitro-Studien ermöglichen Einblicke in zelluläre Prozesse, berücksichtigen jedoch nicht die komplexen Wechselwirkungen im menschlichen Organismus. Ähnlich verhält es sich mit in vivo-Studien an Tiermodellen, die unter kontrollierten Bedingungen durchgeführt werden und daher nur bedingt Rückschlüsse auf den menschlichen Stoffwechsel zulassen [212]. Einige der beworbenen Vorteile von *Limnospira* als Superfood stützten sich daher auf experimentelle Ergebnisse, die zwar mechanistische Grundlagen aufzeigen, aber keine direkte klinische Relevanz garantieren [210, 211].

Zwar existieren klinische Studien am Menschen, doch ist die Anzahl hochwertiger RCTs, die als Goldstandard in der klinischen Forschung gelten, bislang begrenzt. Noch seltener sind systematische Übersichtsarbeiten und Metaanalysen, die die Ergebnisse mehrerer qualitativ hochwertiger Studien zusammenführen und bewerten. Die wenigen verfügbaren RCTs weisen zwar vielversprechende Ansätze auf, beispielsweise hinsichtlich der Senkung von Cholesterinwerten oder der Verbesserung des antioxidativen Status, doch sind weitere methodisch robuste Untersuchungen erforderlich, um die tatsächlichen gesundheitlichen Effekte von *Limnospira* fundiert zu belegen [210, 211].

Hinzukommt, dass die Aussagekraft der vorliegenden RCTs durch methodische Schwächen gemildert wird [177]. Eine der zentralen Einschränkungen liegt in der geringen Stichprobengröße vieler Studien. Kleine Stichproben reduzieren die statistische Aussagekraft und erhöhen die Wahrscheinlichkeit, dass beobachtete Effekte zufällig sind [90]. Zudem erschweren sie die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die Gesamtbevölkerung. Ein weiterer kritischer Punkt ist die kurze Dauer vieler Studien, die häufig zwischen 1 und 12 Wochen liegt [178]. Dies ist insbesondere problematisch, da Langzeiteffekte, wie beispielsweise Veränderungen der HbA1c-Werte, oft nicht adäquat erfasst werden können, sodass kurze Studiendauern möglicherweise nicht ausreichen, um die tatsächliche Wirksamkeit von *Limnospira* in diesem Kontext zu bewerten. Zudem könnten kurzfristige Interventionen positive Effekte überbewerten, die langfristig nicht stabil bleiben [175]. In einigen Studien wurde *Limnospira* nicht isoliert untersucht, sondern in Kombination mit anderen Interventionen, wie einer Energieeinschränkung, verhaltens-orientierter Unterstützung oder der Gabe von Medikamenten wie Triamcinolon. Diese methodische Schwäche erschwert die eindeutige Zuordnung der beobachteten Effekte. Es bleibt unklar, ob die Ergebnisse auf *Limnospira* selbst, die ergänzenden Maßnahmen oder mögliche synergistische Wechselwirkungen zurückzuführen sind. Die mangelnde Fokussierung auf die isolierte Wirkung von *Limnospira* beeinträchtigt die Vergleichbarkeit und die Interpretation der Studienergebnisse somit erheblich [177, 200]. Zusätzlich zeigen viele Studien eine ungleiche Geschlechterverteilung. In einigen Fällen wurden nur Männer oder nur Frauen eingeschlossen, oder die Geschlechterverteilung war unausgewogen, wie etwa 9 Frauen gegenüber 47 Männern [180, 181]. Diese Ungleichheit schränkt die Aussagekraft der Ergebnisse ein, da physiologische Unterschiede zwischen den Geschlechtern die Wirkung von *Limnospira* beeinflussen könnten. Eine repräsentative Verteilung ist notwendig, um geschlechtsspezifische Effekte zu erfassen und allgemeingültige Aussagen zu ermöglichen. Die fehlende Verblindung in einigen Studien stellt eine weitere Schwäche dar [194], da sie das Risiko von Verzerrungen durch subjektive Wahrnehmungen erhöht. Ohne Verblindung könnten Teilnehmende oder Forschende die Ergebnisse unbewusst beeinflussen, etwa durch übermäßig positive oder negative Bewertungen der Intervention. Diese Verzerrungen können die Validität der Studienergebnisse beeinträchtigen [213]. Ein weiteres methodisches Problem ist die Heterogenität der Studienpopulationen. Die eingeschlossenen Teilnehmenden unterscheiden sich teils erheblich in ihren Ausgangsparametern, wie Alter, Gesundheitszustand und Begleiterkrankungen [174]. Diese Variabilität erschwert die Interpretation und Übertragbarkeit der Ergebnisse. Eine hohe Heterogenität erschwert zudem eine verlässliche Schlussfolgerung aus den gepoolten

Ergebnissen der Meta-Analysen zu ziehen [174, 175]. Ein weiteres Problem, das im vor allem Zusammenhang mit klinischen Studien angesprochen werden sollte, ist die klinische Zielsetzung der RCTs. Obwohl in einigen Studien eine statistisch signifikante Verbesserung der verschiedenen Messwerte festgestellt wurde, können die Ergebnisse klinisch nicht signifikant sein. Dies bedeutet, dass die Intervention das klinische Ziel nicht erreichen konnte. Beispielsweise sollte bei der Behandlung der Adipositas das Körperfett signifikant reduziert werden (5 % des aktuellen Körpergewichts) und der/die Patient*in sollte in der Lage sein, langfristig normalgewichtig zu bleiben. In vielen der Studien wurde das Erreichen des klinischen Ziels jedoch nicht diskutiert [178].

Die Studienlage zur Wirkung von *Limnospira* ist derzeit uneinheitlich und lässt keine allgemeingültigen Schlussfolgerungen zu. Viele der untersuchten Erkrankungen sind komplex und multifaktoriell bedingt, sodass die Ergebnisse nicht ohne Weiteres auf die breite Bevölkerung übertragbar sind. Zudem erschweren methodische Unterschiede in Studiendesign, Stichprobengröße, Dosierungen und Dauer der Interventionen eine verlässliche Interpretation der Befunde. Um die gesundheitlichen Effekte und potenziellen Langzeitwirkungen von *Limnospira* fundiert zu bewerten, sind weitere qualitativ hochwertige Studien erforderlich. Besonders RCTs mit größeren Stichproben, längeren Interventionszeiträumen und Verblindung könnten zur Stärkung der Evidenzlage beitragen. Ebenso sind weitere systematische Übersichtsarbeiten und Metaanalysen notwendig, um die bestehende Datenlage zu konsolidieren und Inkonsistenzen zwischen den Studien zu analysieren. Bis weitere robuste wissenschaftliche Belege vorliegen, sollten die gesundheitlichen Vorteile von *Limnospira* nicht überbewertet werden. Die aktuelle Studienlage weist vielversprechende Ansätze auf, ist jedoch noch nicht ausreichend, um belastbare gesundheitliche Empfehlungen abzuleiten, sodass weitere Forschung mit robusten methodischen Ansätzen erforderlich ist.

4.2. Verbraucher*innen Befragung

Die Ergebnisse der durchgeführten Verbraucher*innen-Befragung geben Einblicke in die Akzeptanz, das Wissen und die Wahrnehmung von Mikroalgen und mikroalgenbasierten Lebensmitteln. Obwohl diese Arbeit auf deutsche Verbraucher*innen beschränkt ist, liefert sie Hinweise auf wichtigste Faktoren, die die Akzeptanz beeinflussen. Die Einordnung der Ergebnisse in den bestehenden wissenschaftlichen Kontext zeigt sowohl Übereinstimmungen mit der Literatur als auch neue Perspektiven auf.

Bekanntheit und Wissen über Mikroalgen

In der vorliegenden Studie gaben 75,9 % der Befragten an, bereits von Mikroalgen gehört zu haben. Im Vergleich dazu zeigen frühere Untersuchungen, dass 51,9 % bzw. 47 % der Befragten mit Lebensmitteln auf Mikroalgenbasis nicht vertraut waren^[214, 215]. Zudem wurde ein signifikanter Zusammenhang zwischen der Ernährungsweise und der Bekanntheit von Mikroalgen festgestellt ($p = 0,004$). In der Literatur werden darüber hinaus Bildungsniveau, Alter und individuelle Präferenzen als weitere relevante Einflussfaktoren beschrieben^[31]. Hinsichtlich der Bekanntheit von Spirulina gaben 72,9 % der Teilnehmenden an, bereits davon gehört zu haben. Dieser Wert liegt deutlich über dem in der Literatur berichteten Anteil von 37,8 %^[31]. Die Bekanntheit von Spirulina war sowohl in dieser als auch in früheren Untersuchungen signifikant mit Geschlecht ($p < 0,001$) und Alter ($p = 0,003$) assoziiert. Zudem bestätigten frühere Studien, dass Frauen häufiger von Spirulina gehört haben als Männer (69,9 % vs. 54,5 %)^[31]. Auch die Ernährungsweise zeigte einen signifikanten Einfluss auf die Bekanntheit von Spirulina ($p < 0,001$), wobei insbesondere vegane und flexitarische Ernährungsformen mit einer höheren Vertrautheit assoziiert waren. Neben dem Einfluss dieser Faktoren legen frühere Studien nahe, dass die Vertrautheit mit Mikroalgen die Akzeptanz und Präferenz für Lebensmittel mit Spirulina positiv beeinflussen kann^[216]. Eine höhere Bekanntheit korrelierte zudem signifikant mit einer erhöhten Verzehrswahrscheinlichkeit^[217]. Während sich die vorliegende Untersuchung auf deutsche Verbraucher*innen konzentrierte, weisen frühere Arbeiten darauf hin, dass der Bekanntheitsgrad von Mikroalgen, insbesondere Spirulina, länderspezifisch variiert. So ist Spirulina in Frankreich unter Verbraucher*innen deutlich stärker verbreitet als in Deutschland und den Niederlanden^[27].

Trotz des hohen Bekanntheitsgrades gaben 50 % der Befragten an, nicht genau zu wissen, was Mikroalgen sind. Die Mehrheit der Teilnehmenden schätzte ihr eigenes Wissen als „schlecht“ (38,6 %) oder „sehr schlecht“ (24,8 %) ein. Dabei zeigten sich signifikante Unterschiede im Wissen über Mikroalgen in Abhängigkeit von Bildungsniveau ($p = 0,017$), den Ausgaben für Lebensmittel ($p = 0,024$) und dem Wohnort ($p = 0,039$), was die multidimensionale Natur dieser Wissensverteilung verdeutlicht. Frühere Studien bestätigen, dass insbesondere jüngere (18 - 24 Jahre) sowie ältere (über 65 Jahre) Personen ein geringes Wissen über Mikroalgen aufweisen. Zudem wird das Bildungsniveau als zentraler Einflussfaktor für das Wissen über Mikroalgen beschrieben^[31]. Ein unzureichendes Informationsniveau kann die Akzeptanz neuartiger Lebensmittel negativ beeinflussen. Daher ist eine gezielte Wissensvermittlung über Mikroalgen essenziell, um deren Potenzial als Lebensmittelzutat zu erhöhen und die Verbraucherakzeptanz zu verbessern^[27].

Assoziationen mit Mikroalgen

Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die wahrgenommenen gesundheitlichen und ernährungsphysiologischen Vorteile eines Produkts auf Mikroalgenbasis für die Akzeptanz relevant sein könnten. So zeigte die Assoziationsaufgabe, dass einige der am häufigsten genannten Assoziationen mit Mikroalgen bzw. Lebensmitteln auf Mikroalgenbasis mit der menschlichen Gesundheit und Ernährung zusammenhingen. Die Umfrage zeigte, dass Mikroalgen vor allem mit positiven ernährungsphysiologischen Aspekten wie einem hohen Proteingehalt, ungesättigten Fettsäuren und ihrer Gesundheitsförderung assoziiert wurden. Mehrere Studien haben ebenfalls gezeigt, dass die wahrgenommenen potenziellen Gesundheits- und Ernährungsvorteile von Mikroalgen die Akzeptanz dieses neuartigen Lebensmittels erhöhen können [27, 218]. Gleichzeitig wurden negative Assoziationen wie ein „fischiger“ Geschmack und eine „schleimige“ Konsistenz genannt, die als sensorische Barrieren für die Akzeptanz wirken können. Diese Ergebnisse unterstreichen die zentrale Bedeutung sensorischer Eigenschaften für die Akzeptanz von Lebensmitteln, insbesondere neuartiger Produkte. Ein Großteil der Verbraucher*innen äußerte Zweifel an der Schmackhaftigkeit mikroalgenhaltiger Lebensmittel, was mit früheren Studien übereinstimmt [218-220]. Diese zeigen, dass algenbasierte Lebensmittel häufig mit negativen Assoziationen verknüpft werden, die die Bereitschaft zum Verzehr verringern, insbesondere im Hinblick auf die Erwartungen an die „Essbarkeit“ als Schlüsselfaktor für die Akzeptanz [221]. Besonders im Kontext von Fleischalternativen auf Mikroalgenbasis weisen frühere Untersuchungen darauf hin, dass Verbraucher*innen geringe geschmackliche Erwartungen an diese Produkte haben [218]. Europäische Studien haben auch die Eignung von Mikroalgen für die Herstellung vegetarischer und veganer Produkte hervorgehoben. In Deutschland, Frankreich und dem Vereinigten Königreich wurde festgestellt, dass Verbraucher*innen mit einer positiveren Einstellung zu vegetarischer und veganer Lebensweise Burger auf Algenbasis als schmackhafter, gesünder und umweltfreundlicher wahrnehmen [222].

Wahrnehmung und Einstellung

Die Wahrnehmung von Mikroalgen als gesund war mit einem Mittelwert von $2,73 \pm 1,91$ überwiegend positiv. Dies deckt sich mit der Literatur, in der die Mehrheit der Verbraucher*innen Mikroalgen ebenfalls als gesunde Option betrachtet [31]. Hinsichtlich des Proteingehalts bewerteten die Teilnehmenden Mikroalgen mit einem Mittelwert von $1,66 \pm 2,58$, was auf eine weitgehende Anerkennung als proteinreiche Nahrungsquelle hinweist. Ähnlich kamen Van der Stricht et al. zu dem Schluss, dass 60,8 % der Befragten Lebensmittel mit Mikroalgen als proteinreich wahrnehmen [214]. Im Gegensatz dazu zeigte eine andere Studie, dass ein Großteil der Verbraucher*innen den Proteingehalt von Mikroalgen unterschätzen [31]. Frühere Untersuchungen beschreiben Mikroalgen zudem als innovative, nachhaltige und zukunftsweisende Lebensmittelquelle, insbesondere im Zusammenhang mit alternativen Proteinen und ökologischer Nachhaltigkeit [31, 214]. Auch in der vorliegenden Studie wurden Mikroalgen als nachhaltig ($2,63 \pm 2,29$) und innovativ ($2,54 \pm 2,11$) eingestuft. Darüber hinaus wurden sie als eher teuer (- $1,03 \pm 2,60$) und natürlich ($3,54 \pm 1,92$) wahrgenommen, was mit früheren Untersuchungen übereinstimmt [214].

Einstellungen spielen eine zentrale Rolle bei der Vorhersage des Verbraucherverhaltens. Zahlreiche Studien belegen, dass die Einstellung gegenüber einem Lebensmittel sowohl dessen Gesamtbewertung als auch die Kauf- und Verzehrswahrscheinlichkeit maßgeblich beeinflusst. Verbraucher*innen mit einer positiven Einstellung zu (funktionellen) Lebensmitteln tendieren eher dazu, diese zu konsumieren als Personen mit einer neutralen oder negativen Einstellung^[223]. In der vorliegenden Studie wurde die Einstellung zu Mikroalgen mit einem Mittelwert von $1,72 \pm 1,12$ als neutral bis leicht positiv eingestuft. Frühere Untersuchungen berichten hingegen von etwas positiveren Einstellungen (3,38 bzw. 3,65 auf einer Skala von 1 bis 5)^[224]. Zudem konnte ein signifikanter Zusammenhang zwischen dem Bildungsniveau und der Einstellung zu Mikroalgen ($p = 0,044$) festgestellt werden. Allerdings stehen diese Ergebnisse im Widerspruch zu den Befunden von Weinrich und Elshiewy^[224], die zeigten, dass Verbraucher*innen mit höherem Bildungsniveau eine weniger positive Einstellung gegenüber Mikroalgen in Lebensmitteln haben. Diese Diskrepanz verdeutlicht die vielschichtigen und komplexen Einflüsse von Bildung auf die Akzeptanz mikroalgenbasierter Produkte. Auch das Haushaltseinkommen und die Ernährungsweise zeigte keine signifikanten Auswirkungen auf die Bereitschaft, Lebensmittel mit Mikroalgenproteinen zu probieren^[224]. Es konnte ein schwacher positiver Zusammenhang zwischen Gesundheitsinteresse und Einstellung zu Mikroalgen ($r = 0,110$; $p = 0,019$) nachgewiesen werden. Dies steht im Einklang mit der Literatur, die ebenfalls Gesundheitsinteresse und Umweltbewusstsein als entscheidende Faktoren für positive Einstellungen hervorhebt^[223, 224]. Zudem zeigen Verbraucher*innen mit einer positiven Einstellung gegenüber bestimmten Lebensmitteln eine höhere Verzehrs- und Kaufbereitschaft und sind eher bereit, einen Aufpreis für diese Produkte zu zahlen^[223].

Verzehrbereitschaft von Mikroalgen

Die Ergebnisse zeigen, dass 40,2 % der Teilnehmenden bereits Mikroalgen konsumiert haben. Ein signifikanter Zusammenhang bestand zwischen dem Alter ($p = 0,015$) und der Ernährungsweise ($p < 0,001$), wobei insbesondere Veganerinnen und Flexitarierinnen häufiger Mikroalgen verzehrt hatten. Im Vergleich dazu berichten andere Studien deutlich niedrigere Werte. Nur 14,1 %^[214] bzw. 8 %^[31] der Befragten hatten bereits Lebensmittel mit Mikroalgen probiert, während regelmäßiger Konsum mit 0,1 % äußerst selten war^[31]. Insgesamt zeigte sich in der aktuellen Studie eine hohe Bereitschaft zum Verzehr von Mikroalgen, wobei 75 % der Teilnehmenden eine positive Einstellung signalisierten. Diese Offenheit bestätigt auch die Studie von Lucas et al., in der Verbraucher*innen ebenfalls eine hohe Akzeptanz für Lebensmittel mit Mikroalgenzusatz äußerten (Mittelwert $> 4,0$ auf einer Skala von 6)^[225]. Allerdings übersteigt dieser Wert andere in der Literatur berichtete Ergebnisse, in denen 42,7 % der Befragten eine Bereitschaft zum Verzehr von Mikroalgen angaben^[31]. Zudem waren Flexitarier*innen 1,56-mal eher bereit, entsprechende Produkte zu probieren^[214].

Weitere psychologische Einflussgrößen wurden in der Studie von Van der Stricht et al. untersucht. Ein Anstieg GHI um einen Punkt führte zu einer 50 % höheren Bereitschaft, Lebensmittel mit Mikroalgenproteinen zu probieren, während eine Erhöhung der FNS um einen Punkt mit einem Rückgang der Bereitschaft um 58 % assoziiert war. Ein Anstieg der FTNS um eine Einheit senkte die Bereitschaft um

10 %, wohingegen eine Erhöhung des SC um eine Einheit zu einer 38 % höheren Bereitschaft führte [214]. Die häufigsten Gründe für den Verzehr von Mikroalgen in der vorliegenden Studie waren gesundheitliche Vorteile (16,9 %), leichte Verfügbarkeit (14,1 %) und Sicherheit (12,9 %). Auch die Literatur nennt Gesundheit und Nachhaltigkeit als Hauptgründe für den Konsum von Mikroalgen [31]. Weitere Aspekte wie Tierschutz, Umweltfreundlichkeit und ein gutes Preis-Leistungs-Verhältnis wurden ebenfalls als relevante Faktoren identifiziert [31]. Hinsichtlich geschlechtsspezifischer Unterschiede ergaben sich in der vorliegenden Untersuchung keine signifikanten Differenzen in der Bereitschaft, Mikroalgen zu probieren, was mit früheren Studien übereinstimmt [31]. Ein Ergebnis, das im Gegensatz zur Studie von Weinrich und Elshiewy steht, die geschlechtsspezifische Unterschiede aufzeigen [224].

Schließlich zeigen Studien, dass gezielte Wissensvermittlung über die Nährstoffzusammensetzung und Nachhaltigkeitsaspekte von Mikroalgen die Akzeptanz signifikant steigern kann. In einer Untersuchung konnte durch die Bereitstellung entsprechender Informationen die Bereitschaft zum Verzehr von Mikroalgen verdoppelt werden [31]. Dies unterstreicht die Bedeutung einer effektiven Verbraucher-aufklärung, um die Markteinführung und Akzeptanz mikroalgenbasierter Lebensmittel zu fördern. Eine weitere in der Literatur diskutierte Strategie zur Steigerung der Produktattraktivität ist die Verwendung von Mikroalgen innerhalb anderer Lebensmittelprodukte, die dem/der Verbraucher*in vertraut sind [223]. Die „verdeckten“ Verwendung von Mikroalgen in bereits bekannten Produkten könnte somit eine geeignete Marketingstrategien sein, um die Akzeptanz der Verbraucher*innen zu steigern [221].

Die vorliegende Studie zeigt, dass vegane Produkte auf Mikroalgenbasis (24,4 %) am ehesten den Erwartungen der Verbraucher*innen entsprechen, gefolgt von Teigwaren (14,5 %) und Getränken (14,2 %). Auffällig ist die generelle Offenheit der Teilnehmenden gegenüber einer Vielzahl von mikroalgenhaltigen Lebensmitteln, darunter sowohl süße als auch herzhafte Speisen, Snacks und Getränke. Diese Ergebnisse stehen im Einklang mit früheren Untersuchungen, die eine ähnlich breite Akzeptanz für verschiedene mikroalgenbasierte Produkte feststellen konnten. Allerdings weisen quantitative Studien darauf hin, dass bestimmte Produktkategorien weniger akzeptiert werden als andere [221]. Besonders Kekse und Wiener Würstchen stoßen auf größere Ablehnung, was auf sensorische Erwartungen der Verbraucher*innen zurückgeführt werden könnte. Im Gegensatz dazu zeigen Produkte, die sich stärker in etablierte Konsummuster einfügen, wie Nudeln oder Smoothies, eine höhere Akzeptanz.

Neben der Integration in bestehende Ernährungsgewohnheiten bleibt der (erwartete) Geschmack eines Produkts ein entscheidender Faktor für die Akzeptanz [221]. Gleichzeitig sollten mikroalgenbasierte Lebensmittel als nachhaltig, innovativ und gesund positioniert werden, um das Kaufinteresse zu steigern [31]. Es ist zudem entscheidend zu untersuchen, ob diese Produkttypen die sensorischen Eigenschaften von Mikroalgen harmonisch ergänzen. Besonders bei der Verwendung gesundheitsfördernder Mengen ist zu berücksichtigen, dass eine zu intensive sensorische Ausprägung von Verbraucher*innen häufig als weniger attraktiv empfunden wird [221]. Dies stellt eine wesentliche Herausforderung für die Produktentwicklung dar, da eine ausgewogene sensorische Anpassung entscheidend für die Marktakzeptanz ist.

Kaufbereitschaft und Zahlungsbereitschaft

In Bezug auf die Kaufbereitschaft fanden Nudeln, Smoothies und Frischkäse eine breite Zustimmung unter den Befragten, während Kekse und Wiener Würstchen weniger Anklang fanden. Die Kaufbereitschaft für frische Mikroalgen hingegen wurde vergleichsweise zurückhaltend bewertet. Ähnlich berichtet die Literatur Backwaren, Getränke und Teigwaren als bevorzugte Kategorien, wobei Präferenzen alters- und bildungsabhängig variieren [31]. Insgesamt scheinen die Verbraucher*innen offen zu sein für den Kauf von Lebensmitteln, denen Mikroalgen zugesetzt wurden ($MW > 4,0$; max. = 6), wobei hohe Werte im Nachhaltigkeitsbewusstsein mit einer höheren Bereitschaft Lebensmittel auf Mikroalgenbasis zu kaufen und zu verzehren verbunden ist [225].

Neben der Kaufbereitschaft stellt der Preis einen entscheidenden Faktor für die Akzeptanz von Mikroalgen und mikroalgenbasierten Lebensmitteln dar. Die Erschwinglichkeit dieser Produkte könnte ein wesentliches Hindernis für ihre Marktdurchdringung darstellen, da viele Verbraucher*innen zögern, für Mikroalgen als neuartiges Lebensmittel höhere Ausgaben zu tätigen [221]. In der vorliegenden Arbeit gab die Mehrheit der Befragten (51,2 %, n = 285) an, maximal 1 - 10 % mehr für mikroalgenhaltige Produkte bezahlen zu wollen. Ähnliche Ergebnisse zeigt die Literatur, in der Verbraucher*innen kaum bzw. gar nicht (8,9 % [31]) bereit sind, mehr für Produkte mit Mikroalgen zu bezahlen [31, 225]. Die Ergebnisse zeigen, dass Lebensmittel auf Mikroalgenbasis preislich mit pflanzlichen Alternativen und Fleischprodukten konkurrieren sollten, um Verbraucher*innen anzusprechen. Eine ähnliche Schlussfolgerung ziehen Weinrich et al., die betonen, dass der Preis wettbewerbsfähig sein sollte [224]. Darüber hinaus ist das Nachhaltigkeitsbewusstsein ein wichtiger Prädiktor für die Kaufbereitschaft mikroalgenhaltiger Lebensmittel. Studien zeigen, dass europäische Verbraucher*innen mit stärkerem Umweltbewusstsein eher bereit sind, Produkte mit Mikroalgenproteinen zu probieren [214, 226]. Ebenso steht Umweltbesorgnis in positivem Zusammenhang mit der Einstellung und Kaufabsicht gegenüber diesen Lebensmitteln [27]. Wassmann et al. unterstreichen zudem, dass Umweltfreundlichkeit eine der überzeugendsten Eigenschaften mikroalgenbasierter Produkte ist [226]. Die gezielte Information der Verbraucher*innen über die Nachhaltigkeitsvorteile mikroalgenhaltiger Lebensmittel kann somit nachhaltige Kaufentscheidungen fördern [225]. Allerdings zeigen Studien, dass selbst ein ausgeprägtes Bewusstsein für klimafreundliche Ernährung nicht immer zu entsprechendem Kaufverhalten führt [227].

Nachhaltiger Konsum wird maßgeblich von sozialen Normen beeinflusst, was darauf hindeutet, dass Vermarkter*innen gezielt Meinungsführer*innen und Bezugsgruppen ansprechen sollten, um die Nachfrage nach mikroalgenbasierten Lebensmitteln zu steigern. Die Förderung von Wissen über gesundheitliche Vorteile und Umweltauswirkungen kann nicht nur die Kauf- und Verzehrbereitschaft erhöhen, sondern auch die Zahlungsbereitschaft der Verbraucher*innen steigern. So zeigt eine Studie, dass die meisten Verbraucher*innen nach einer gezielten Aufklärung bereit waren, 6 - 10 % mehr für ein mikroalgenhaltiges Produkt zu zahlen [31]. García-Segovia et al. untersuchten die Verbraucher-akzeptanz eines mikroalgenhaltigen Brotstangenprodukts und kamen zu dem Schluss, dass höhere Preise akzeptiert werden, wenn das Produkt als gesundheitsfördernd wahrgenommen wird [219]. Darüber hinaus zeigte eine

europeweite Studie, dass Verbraucher*innen eine höhere Zahlungsbereitschaft für mikroalgenhaltige Lebensmittel aufwiesen, wenn diese als vegan gekennzeichnet waren [214]. Zudem bevorzugt die Zielgruppe für mikroalgenbasierte Lebensmitteleinen einen gesunden Lebensstil und ist offen, neue Lebensmittel und Rezepte auszuprobieren Diese Verbraucher*innen legen Wert auf ökologische Lebensmittelproduktion und zeigen großes Interesse an Informationen zu Lebensmittelprodukten [224].

Die Ergebnisse dieser Studie liefern wertvolle Erkenntnisse für Lebensmittelhersteller*innen und -vermarkter*innen, insbesondere im Hinblick auf die Erweiterung des Marktanteils mikroalgenbasierter Lebensmittel. Die Vielzahl untersuchter Einflussfaktoren und deren komplexe Wechselwirkungen erschweren zwar die Identifikation allgemeiner Trends, verdeutlichen jedoch zugleich die Herausforderungen bei der Entwicklung und Markteinführung dieser Produkte [223]. Ein zentraler Aspekt ist die Preisgestaltung, da mikroalgenhaltige Lebensmittel mit etablierten pflanzlichen und tierischen Alternativen konkurrieren müssen. Gleichzeitig befindet sich das Bewusstsein für Mikroalgen als Lebensmittelzutat noch in einem frühen Stadium. Studien berichten, dass 85 % der Verbraucher*innen einen Mangel an Informationen über Mikroalgen beklagen [31, 228]. Daher sind gezielte Informationsstrategien essenziell, um Vertrauen zu schaffen und die Kaufbereitschaft zu erhöhen. Dabei sollten insbesondere die gesundheitsfördernden und nachhaltigen Eigenschaften von Mikroalgen hervorgehoben werden [221, 229]. Studien zeigen, dass eine klare Kennzeichnung ernährungs- und umweltbezogener Vorteile auf Produktverpackungen die Akzeptanz erhöhen kann. Verbraucher*innen sind eher bereit, mikroalgenhaltige Produkte zu kaufen, wenn diese beispielsweise als „lokal“ oder „nachhaltig“ gekennzeichnet sind [221]. Zusätzlich könnte die Integration von Mikroalgen in vertraute Lebensmittel den Einstieg in den Konsum erleichtern und Hemmschwellen abbauen.

Zusammenfassend zeigen die aktuellen Ergebnisse, dass der Erfolg von mikroalgenbasierten Lebensmitteln von einer Kombination aus sensorischer Attraktivität, gesundheitsbezogenen Vorteilen, Preisgestaltung und gezielten Informationsstrategien abhängt. Die Schaffung von Transparenz, insbesondere in Bezug auf Nährwert, Herkunft und Nachhaltigkeit, kann dabei eine zentrale Rolle spielen, um das Vertrauen der Verbraucher*innen zu stärken und die Marktdurchdringung mikroalgenbasierter Produkte zu fördern.

4.3 Lebensmitteltechnologische Untersuchung

4.3.1 Bestimmung der flüchtigen Verbindungen mittels Analyse GC-MS-Analyse

Die umfassende GC-MS-Analyse der VOCs in der frischen und getrockneten Biomasse von *L. maxima* sowie in verschiedenen getrockneten Proben verdeutlicht die chemische Komplexität und die erheblichen Einflüsse der Verarbeitungsbedingungen auf die VOC-Zusammensetzung. In Spirulina wurden bisher ca. 50 verschiedene Arten an VOC-Komponenten entdeckt, von denen einige für das spezifische Aroma verantwortlich sind [48]. Diese natürlichen Sekundärmetaboliten lassen sich verschiedenen chemischen Gruppen zuordnen. Die Anzahl der in der Literatur beschriebenen VOCs variiert jedoch stark [53]. In dieser Arbeit wurden in der Biomasse von *L. maxima* 17 Substanzen identifiziert.

Die Aromavielzahl von Mikroalgen und Cyanobakterien hängt von der komplexen Mischung flüchtiger Verbindungen, ihrer relativen Konzentration und ihrem jeweiligen Beitrag zur sensorischen Gesamtwahrnehmung ab [230, 231]. Mehrere Molekülklassen, die ein breites Spektrum an Düften abdecken, waren in den Proben vertreten. Darunter Aldehyde, Ketone, Alkohole, schwefelhaltige Verbindungen und Terpene bzw. Norisoprenoide. Diese Verbindungen zeichnen sich durch niedrige Geruchsschwellenwerte aus, was sie zu wichtigen Aromastoffen machen [52]. Die Geruchsschwelle ist die Mindestkonzentration, bei der 50 % eines menschlichen Panels das Vorhandensein eines Geruchs oder Geruchsstoffs erkennen können, ohne den Reiz zu charakterisieren. Je niedriger die Geruchsschwelle, desto mehr Einfluss hat die Verbindung auf das Gesamtaroma [231].

In den getrockneten Pulvern von *L. maxima* wurden deutlich mehr Aldehyde ($n = 10$) nachgewiesen als in der frischen Biomasse ($n = 1$). Eine große Anzahl der identifizierten Aldehyde entsteht durch Autoxidation oder enzymatischen Abbau aus PUFAAs [52, 231]. Im Allgemeinen kann durch die Oxidation von Lipiden und anderen Fetten ein ranziger, oxidierter Geruch entstehen [232]. Die Lipidoxidation beeinträchtigt die Qualität natürlicher Matrices erheblich und führt zu unerwünschten Effekten wie Fehlgerüchen, Farbveränderungen, Geschmacksveränderungen, Texturveränderungen [233] sowie einer Verringerung der funktionellen Eigenschaften und der Bioverfügbarkeit von Nährstoffen. Sie verkürzen die Haltbarkeit und verursachen den Verderb von Lebensmitteln, was ein wichtiger Faktor für die Lebensmittelsicherheit ist. Die Anfälligkeit von Fettsäuren für die Lipidoxidation nimmt mit dem Grad der Sättigung ab [48]. Fehlgerüche in lipidhaltigen Proben, die oxidiert wurden, sind hauptsächlich auf lineare Aldehyde zurückzuführen, insbesondere Pentanal, Hexanal und Heptanal [48]. Arten mit niedrigen PUFA-Konzentrationen (darunter auch *L. maxima*) enthalten im Vergleich zu Arten mit hohen PUFA-Konzentrationen (z.B. Chlorella) deutlich weniger Aldehyde [232]. Aldehyde vermitteln einen frischgrasig/grünen bis fettgrünen/wachsartigen Geruch (C_6 - C_9 -Aldehyde) bzw. einen „algigen“ Geruch (C_{15} - C_{17} -Aldehyde) [231]. Sie tragen auch zu anderen Noten bei wie holzig, fettig, nussig, blumig, zitrusartig, wachsartig und süß [52].

Weitere Verbindungen, die bei dem Abbau von Fettsäuren entstehen sind Carbonsäuren, Alkohole und Ketone. Sie haben aufgrund ihres Geruchsschwellenwerts und ihrer Flüchtigkeit unterschiedliche Auswirkungen auf die Biomasse [230]. Zu den Ketonen in Cyanobakterien und Mikroalgen, die im Zusammenhang mit der Fettsäureoxidation stehen zählen Isophoron, Sulcaton und 2-Isooctanon. Diese Verbindungen konnten auch in den untersuchten Pulver-Proben identifiziert werden, in den frischen Proben unter verschiedenen Temperaturbedingungen hingegen nicht. Heptadecan und Pentadecan waren die wichtigsten Alkane, die sowohl in der frischen Biomasse als auch in den Pulvern identifiziert wurden. In den Pulvern konnte zusätzlich Hexadecan nachgewiesen werden. Diese Ergebnisse stimmen mit früheren Arbeiten überein, die mittelkettige Alkane in großen Mengen in Spirulina-Proben nachweisen konnten [82, 234].

Ein Terpenoid das in der frischen Biomasse nachgewiesen werden konnten war Phytan (-18 °C-Probe $4,30 \pm 0,55\%$ und +99 °C-Probe $13,39 \pm 3,04\%$). In den Pulvern waren es β -Cyclocitral ($0,49 \pm 0,00\%$ bis $2,06 \pm 0,20\%$), Safranal ($0,64 \pm 0,07\%$), α -Ionon ($0,41 \pm 0,17\%$) Sulcaton ($1,06 \pm 0,05\%$ bis $2,25 \pm 0,13\%$) und β -Ionon (Spirulina Bio: $1,47 \pm 0,76\%$ bis $1,52 \pm 0,47\%$). Diese Terpenoide sind typische Verbindungen, die bereits in Spirulina-Proben nachgewiesen wurden. [82, 235]. Andere typische in Mikroalgen und Cyanobakterien nachgewiesene Terpenoide wie Isopren, α -Pinen, d-Limonen, Linalool, Sylvestren oder Thujon [232] konnten in der vorliegenden Arbeit nicht nachgewiesen werden. Genauso wenig wie die sehr charakteristischen Terpene Geosmin und Methylisoborneol welche einen erdig-matschig-muffigen Geruch aufweisen. Geosmin, dass durch den Abbau von Aminosäuren oder anderen organischen Stoffen entsteht [232], ist zusammen mit dem Methylisoborneol ausschlaggebend für Fehlaromen. β -Cyclocitral, Safranal, α -Ionon und β -Ionon können weiterhin den Norisoprenoide zuordnet werden, einer Untergruppe der Terpenoide. Sie entstehen bei dem Abbau von Tetraterpen-Carotinoiden. α -Ionon ist ein spezifisches Abbauprodukt der α -Carotin-Endspaltung, während β -Ionon sowohl aus der α - als auch der β -Carotin-Endspaltung entstehen kann. β -Cyclocitral, α -Ionon, β -Ionon sind bekannte in Cyanobakterien und Mikroalgen vorkommende Norisoprenoide [52]. Es ist jedoch noch nicht vollständig geklärt, ob diese Verbindungen von lebenden Mikroalgen bzw. Cyanobakterien selbst produziert werden oder ob sie durch die Spaltung von Carotinoiden während der Extraktionsprozesse entstehen [231]. Das Auftreten von Safranal ist eher untypisch und könnte auf Verunreinigungen zurückzuführen sein.

Eine schwefelhaltige Verbindung, Dimethyldisulfid, wurde ausschließlich in der getrockneten Algenwerk-Spirulina-Probe in einer sehr geringen Konzentration ($1,53 \pm 1,23\%$) nachgewiesen. Dies könnte darauf hinweisen, dass die Verbindung in den anderen Proben unterhalb der Nachweisgrenze lag. Zudem sind Schwefelverbindungen aufgrund ihrer Instabilität schwer zu messen [236]. Cyanobakterien emittieren normalerweise kein Dimethyldisulfid, jedoch kann es unter bestimmten Bedingungen dennoch entstehen [235]. Diese Verbindungen sind eher charakteristisch für Mikroalgen und erzeugen eine breite Palette an Gerüchen, die von einer „frischen Meeresbrise“ bis hin zu einem intensiven Schwefelgeruch reichen, wie er bei verrottenden Algen vorkommt [231]. Schwefelhaltige Verbindungen haben eine sehr

niedrige Geruchsschwelle (0,3 bis 1 µg/L) [52, 237, 238], weshalb sie selbst in geringen Konzentrationen erheblich zum Aromaprofil beitragen können [231]. Dimethyldisulfid entsteht durch eine enzymatische Reaktion aus seinem Vorläufer, Dimethylsulfonylpropionat. Obwohl dieser Abbau ein natürlicher Prozess ist, kann die Freisetzung durch Zerkleinerung verursacht oder sogar künstlich durch thermische Zersetzung erzeugt werden [237].

Vinylhexanol konnte in zwei der Pulverproben nachgewiesen werden (Spirulina-Bio: $2,89 \pm 0,05\%$; Spirulina-Raab: $1,60 \pm 0,93\%$), ebenso wie 1-Hexanol (Spirulina-Bio: $1,93 \pm 0,24\%$; Spirulina Raab: $1,19 \pm 0,10\%$). Sie haben ebenfalls eine sehr geringe Geruchsschwelle und sind bei den meisten Arten geruchsaktiv [237]. Andere Alkohole weisen im Allgemeinen eine relativ hohe Geruchsschwelle auf und werden daher nicht als Hauptverursacher des Aromas von Mikroalgen und Cyanobakterien angesehen [237]. Flüchtige Alkohole entstehen im Allgemeinen als Produkte der sekundären oxidativen Fettsäurezersetzung. Andere Entstehungswege ergeben sich aus dem Vorhandensein von Kohlenhydraten über die Glykolyse-Reaktion oder aus Aminosäuren [237]. Eine weitere häufig in Mikroalgen und Cyanobakterien vorkommende Stoffgruppe sind Ester. Ester entstehen aus der Reaktion eines Alkohols mit einer Carbonsäure. Neben Fettsäuren können auch andere Verbindungen wie Ketone und Aldehyde als Vorläufer dienen [237]. In der frischen Biomasse konnten die Ester Ethylacetat, Isopropylacetat, Hexylformiat und Ethylhydroxybutyrat nachgewiesen werden, in den Pulvern lediglich Hexylformiat. In Übereinstimmung mit vorherigen Arbeiten konnten auch zwei geruchsaktive flüchtige Stoffe aus der Furanklasse identifiziert werden [235]. 2-Pentylfuran konnte in allen Pulvern, außer dem Spirulinapulver vom Algenwerk nachgewiesen werden. Wobei die Konzentration bei Chlorella am höchsten war ($5,66 \pm 2,38\%$; $p = 0,012$). 2-Ethylfuran wurde lediglich in der Chlorella-Probe ($6,13 \pm 0,37\%$) nachgewiesen. Es wird vermutet, dass 2-Pentylfuran und 2-Ethylfuran bei der Lipoxygenase-katalysierten Oxidation von Linolsäure gebildet werden [237]. Weiterhin konnten in Übereinstimmung mit früheren Studien [53, 239] 2,5-Dimethylpyrazin, einem Pyrazine, in geringen Konzentrationen ($1,94 \pm 0,45\%$ bis $2,78 \pm 0,39\%$) identifiziert werden. In der frischen Biomasse ließ sich 2,5-Dimethylpyrazin hingegen nicht identifizieren. Pyrazine tragen zu nussigen und/oder gerösteten Noten bei und werden durch die Maillard-Reaktion oder durch Fermentationsprozesse gebildet, die in aminosäure- und zuckerhaltigen Matrices stattfinden.

Einfluss von Lagerung und Verarbeitung auf die VOC-Profile der frischen Biomasse

Die chemische Zusammensetzung der VOCs in der frischen Biomasse veränderte sich deutlich in Abhängigkeit von der Lagertemperatur (-18 °C, +4 °C, +20 °C und +99 °C). Gleiches gilt für den Vergleich zwischen der frischen und getrockneten Biomasse von *L. maxima*. Während der Lagerung und Verarbeitung können die Zellen von Mikroalgen und Cyanobakterien natürliche, aber unerwünschte Veränderungen erfahren, die das Aromaprofil der Biomasse beeinflussen [240, 241], wobei steigende Temperaturen chemische Reaktionen begünstigen, die die Zusammensetzung und Konzentration flüchtiger Aromastoffe verändern. Die thermische Verarbeitung kann Abbaureaktionen, Oxidation oder die Umlagerung temperaturempfindlicher Verbindungen auslösen [239]. Zudem scheint *Limnospira* auch empfindlich gegenüber Kälte bzw. Gefrieren zu sein [235].

Ethanol gehörte unter allen Temperaturbedingungen zu den dominierenden Verbindungen, wobei die höchste relative Häufigkeit in den +4 °C-Proben gemessen wurde ($49,77 \pm 9,17\%$). Die erhöhten Konzentrationen in diesen Proben könnten auf eine gesteigerte mikrobielle Aktivität bei moderaten Temperaturen zurückzuführen sein. Zudem bleibt die Stoffwechselaktivität der Zellen in der frischen Biomasse nach der Ernte häufig erhalten, da sie noch intakt sind [240, 241]. In der getrockneten Probe reduzierte sich die Konzentration (5,12 %) signifikant ($p = 0,007$). Diese Unterschiede sind auf physikalisch-chemische Veränderungen während des Trocknungsprozesses zurückzuführen, die direkte Auswirkungen auf die sensorischen Eigenschaften der Biomasse haben können. Zudem kann die Verarbeitung der getrockneten Biomasse in einer sauerstoffhaltigen Atmosphäre das Risiko unerwünschter Produktveränderungen erhöhen [242]. Die Konzentration von Essigsäure war in der +20 °C-Probe signifikant erhöht, was ebenfalls auf die verstärkte mikrobielle Aktivität bei Raumtemperatur zurückzuführen ist.

Aufgrund des hohen Feuchtigkeitsgehalts von Cyanobakterien- und Mikroalgenbiomasse ist das mikrobielle Wachstum kaum zu vermeiden. Dies erfordert den Einsatz geeigneter Konservierungsmethoden, die den Zustand der Biomasse berücksichtigen, sei es in frischer oder getrockneter Form [237]. Ein entscheidender Aspekt bei der Auswahl der Konservierungsmethoden ist die Erhaltung der Aromaeigenschaften, die eng mit ihren flüchtigen Verbindungen verknüpft sind. Eine gängige Methode ist unter anderem das Einfrieren, was sich unterschiedlich auf die flüchtigen Stoffe auswirkt. Während der Gehalt an Alkanen, aromatischen Kohlenwasserstoffen, Pyranonen und Terpenen/Terpenoiden abnimmt, steigt der Anteil von Aldehyden, Halogenalkanen und Thiazolen [243]. Daraus lässt sich erklären, dass Phytan (Terpenoid) und Heptadecan (Alkan), in den +99 °C-Proben in hohen Konzentrationen auftraten. In der -18 °C-Probe hingegen dominierte Isopropylalkohol mit $30,23 \pm 12,79\%$, während dessen Konzentration bei höheren Temperaturen abnahm. Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass das Einfrieren der Biomasse zu einem Aufbrechen der Zellwände führt, wodurch intrazelluläre Enzyme wie Alkoholdehydrogenasen freigesetzt werden [237]. Weiterhin können niedrige Temperaturen (-18 °C) enzymatische Prozesse zwar verlangsamen, während des Auftauens oder bei Temperaturfluktuationen finden diese Prozesse aber dennoch statt. So wird beispielsweise beim Auftauen das Enzym Lipoxygenase freigesetzt, das mit PUFAs reagieren kann, was zur Bildung von grasartigen Aromastoffen führt [237].

Es ist weiterhin bekannt, dass Aromakomponenten in Mikroalgen und Cyanobakterien durch Hitzeanwendungen verändert werden können, was sich auf die organoleptischen Eigenschaften auswirkt [237]. So hat das Kochen der Biomasse, unabhängig von der Kochzeit, einen signifikanten Einfluss auf das flüchtige Profil. Zudem führt der Erhitzungsprozess auch zu einer veränderten Farbe und Textur [237]. Es konnte beobachtet werden, dass Isopropylalkohol in der +99 °C-Probe signifikant reduziert war ($p = 0,578$). Isopropylalkohol hat einen Siedepunkt von ca. 82,5 °C, wodurch es bei Erhitzung stark flüchtig ist. Besonders auffällig war das Auftreten von 2,3-Butandion (Keton), das ausschließlich in der +99 °C-Probe nachgewiesen wurde. 2,3-Butandion, das für seinen butterartigen Geruch bekannt ist, entsteht typischerweise durch thermische Prozesse wie Maillard-Reaktionen oder die Zersetzung von

Lipiden. Auch Hexanol, Hexylformiat, Oxiran, Acetoin, Phytan und Heptadecan welche durch thermische Prozesse entstehen können traten lediglich in der +99 °C -Probe auf bzw. waren deutlich erhöht.

Das Auftreten von Hexanal, Pentanal und Heptanal könnte einerseits auf Maillard-Reaktionen während des Trocknungsprozesses hinweisen, bei denen diese Verbindungen durch den Strecker-Abbau der Aminosäuren Alanin, Valin, Isoleucin und Leucin entstehen. Andererseits könnten sie durch die Lipidoxidation entstanden sein [239]. Hexanal wurde ausschließlich in der +99 °C-Probe ($1,31 \pm 0,20\%$) sowie in deutlich höheren Konzentrationen in den Pulverproben nachgewiesen, von $13,11 \pm 0,62\%$ (Spirulina Algenwerk) bis $38,20 \pm 1,37\%$ (Spirulina Raab). Nach ihrer Bildung reagieren die Strecker-Aldehyde weiter und bilden ihre entsprechenden Alkohole [239]. Diese Alkohole können auch durch die Lipidperoxidation gebildet werden. Die unterschiedlichen Konzentrationen von Hexanal, Pentanal und Heptanal in den Pulvern können auf unterschiedliche Trocknungs- und Lagerungsmethoden zurückzuführen sein. Für die Strecker-Degradation ist bei ofengetrockneten Proben ein stärkerer Anstieg der Strecker-Aldehyde als bei sprühgetrockneten Proben zu beobachten. Luftgetrocknete Proben weisen geringere oder gar keine Strecker-Aldehyde auf [239]. Bei der Oxidation von Fettsäuren weisen luftgetrocknete Proben beispielsweise einen höheren Hexanal-, Pentanal und Heptanal-Gehalt auf, was auf einen erhöhten oxidativen Stress der Lipide aufgrund des verstärkten Luftkontakts hinweist. Darüber hinaus steigt der Hexanal-Gehalt bei sprühgetrockneten und ofengetrockneten Proben im Laufe der Lagerung tendenziell an [239].

In der vorliegenden Arbeit wurden die Alkohole 1-Pentanol und 1-Hexanol ausschließlich in den gekauften, bereits länger gelagerten Pulverproben nachgewiesen, jedoch nicht in den frisch hergestellten Proben aus dem Algenwerk. Ähnliche Beobachtungen machten Ughetti et al., die diese Verbindungen hauptsächlich in gelagerten Proben nachweisen konnten [239]. Ein weiterer Unterschied zwischen den verschiedenen Temperaturbedingungen sowie den Pulverproben war die Essigsäurekonzentration. Die Bildung von Essigsäure ist eng mit Fermentationsprozessen verbunden, an denen Hefen und Bakterien, wie z.B. Essigsäurebakterien, beteiligt sind [239]. Die Essigsäurekonzentration war dementsprechend bei der +20 °C-Probe am höchsten ($6,43 \pm 2,10\%$; $p = 0,094$). Bei den Pulvern wurde Essigsäure jedoch nur in den Proben vom Algenwerk nachgewiesen. Dies könnte durch unterschiedliche Trocknungsprozesse der Proben erklärt werden. Während die anderen Pulver vermutlich direkt nach der Ernte unter Wärmeeinwirkung getrocknet wurden, wodurch die Gärung effektiv gehemmt wird, wurde die Biomasse aus dem Algenwerk erst etwa eine Woche nach der Lieferung getrocknet. Dieser verzögerte Trocknungszeitpunkt könnte die Bildung von Essigsäure begünstigt haben, da die Biomasse während der Lagerung mikrobiellen Abbauprozessen ausgesetzt war. Das Fehlen von organischen Säuren und anderen fermentativen Verbindungen in thermisch behandelten Proben unterstreicht die Bedeutung einer thermischen Behandlung für die Gewährleistung einer langen Haltbarkeit von Spirulina-Pulver [239].

Ein weiterer Faktor, der die Zusammensetzung flüchtiger Verbindungen während der Lagerung erheblich beeinflussen kann, sind die Lichtbedingungen. Unter dunklen Lagerungsbedingungen wurde eine Zunahme schwefelhaltiger Verbindungen beobachtet, die vermutlich auf die Algenatmung zurückzuführen ist. Schwefelhaltige flüchtige Verbindungen können zudem durch den mikrobiellen Abbau schwefelhaltiger Aminosäuren entstehen. Solche Prozesse werden durch Lagerung bei -18 °C oder darunter verlangsamt [237]. Stoffe deren Emission durch Licht gefördert werden sind Monoterpenoide wie β-Cyclocitral, Safranal, α-Ionon und β-Ionon [244].

Unterschiede zwischen Spirulina- und Chlorella-Pulvern verschiedener Herkunft

Die Analyse verschiedener Spirulina- und Chlorella-Proben offenbarte ebenfalls signifikante Unterschiede in den VOC-Profilen. Die Gesamtzahl der VOCs variierte zwar erheblich zwischen den untersuchten Stämmen [53], jedoch sind nicht nur Unterschiede zwischen Arten und Gattungen von Mikroalgen und Cyanobakterien relevant. Auch externe Faktoren wie geografische Herkunft, Saisonalität und Wachstumsbedingungen, darunter Wachstumsphase, Salzgehalt, pH-Wert, Temperatur, Nährstoffverfügbarkeit, Lichtexposition, Gaszusammensetzung und Belüftung, beeinflussen das Aromaprofil maßgeblich. Zusätzlich spielen Verarbeitungsmethoden wie Lagerung, Trocknung, Kochen oder Fermentation eine entscheidende Rolle für die Zusammensetzung der VOCs [51, 237, 244, 245]. Zudem kann das flüchtige Profil ein Indikator für die Qualität der Biomasse sein. Mikroalgen und Cyanobakterien reagieren auf abiotischen Stress, wie hohe Lichtintensität, extreme Temperaturen, Schwankungen im Nährstoffgehalt oder pH-Wert-Veränderungen, mit einer Anpassung ihrer VOC-Synthese und einer gesteigerten Emission [51, 237]. Das Spirulina-Pulver aus dem Algenwerk wird in geschlossenen Bioreaktoren kultiviert, während das Raab-Spirulina-Pulver in offenen Ponds angebaut wird. Für das Bio-Spirulina- und Chlorella-Pulver fehlen detaillierte Angaben zu den Anbaubedingungen. Es ist jedoch anzunehmen, dass die unterschiedlichen Pulver unter jeweils verschiedenen Bedingungen kultiviert wurden, was die Unterschiede in ihrer VOC-Zusammensetzung und deren Ausprägung erklären könnte [244]. Unterschiedliche Anbaubedingungen haben einen erheblichen Einfluss auf die VOC-Emissionen von Mikroalgen und können zur Vielfalt der chemischen Profile beitragen [51, 237, 244, 245].

Die Spirulina-Algenwerk-Probe zeigte spezifische Verbindungen wie Hydroxyaceton ($5,89 \pm 0,16\%$), Isopropylalkohol ($5,51 \pm 0,26\%$) und Ethanol ($5,12 \pm 0,09\%$), die zu einem weinartigen und fruchtigen Geruchsprofil beitragen. Im Gegensatz dazu zeichnete sich die Chlorella-Probe durch eine größere Vielfalt intensiver Verbindungen wie 2-Butanon ($3,31 \pm 0,78\%$) und 2-Ethylfuran ($6,13 \pm 0,37\%$) aus, die rauchige oder verbrannte Noten aufweisen und typisch für fermentative oder thermische Prozesse sind. Hexanal, ein Indikator für oxidative Prozesse, war in allen Proben nachweisbar, jedoch in den Spirulina-Bio-Proben ($34,19 \pm 4,59\%$) und den Spirulina-Raab-Proben ($38,20 \pm 1,37\%$) am stärksten vertreten. Diese hohen Werte könnten auf Unterschiede in der Verarbeitung oder Lagerung hinweisen, die oxidativen Abbau begünstigen.

Die Ergebnisse betonen die zentrale Rolle von Verarbeitungs- und Lagerbedingungen für die chemische und sensorische Qualität der Biomasse von *L. maxima* sowie allgemein für die Biomasse von Cyanobakterien und Mikroalgen. Um unerwünschten Effekten während der Lagerung oder Verarbeitung entgegenzuwirken, ist eine schnelle Verarbeitung der Biomasse entscheidend. Zusätzlich können gezielte Maßnahmen wie die Reduktion der Lipaseaktivität oder die Zugabe von Antioxidantien zur nassen Biomasse vor der Verarbeitung genutzt werden, um die Stabilität und Qualität der Produkte zu verbessern [232, 246]. Die Wahl geeigneter Konservierungsmethoden und Lagerbedingungen ist weiterhin entscheidend, um die Qualität und die sensorischen Eigenschaften von Mikroalgenbiomasse zu erhalten. Die gezielte Optimierung dieser Bedingungen kann dazu beitragen, unerwünschte VOCs zu minimieren und gleichzeitig attraktive Geruchsprofile zu fördern.

4.3.2 Humansensorische Analyse

Die humansensorische Untersuchung der Biomasse von *L. maxima* bei unterschiedlichen Temperaturbedingungen (-18 °C, +4 °C, +20 °C, +99 °C) liefert wertvolle Erkenntnisse über die temperaturabhängigen Veränderungen ihrer sensorischen Eigenschaften. Durch die Kombination von CATA- und RATA-Methoden sowie die freie Attributnennung konnte ein detailliertes Geruchsprofil erstellt werden.

Wahrgenommene Geruchsprofile in *L. maxima*

Es ist bekannt, dass thermische Prozesse die organoleptischen Eigenschaften von Mikroalgen und Cyanobakterien erheblich modifizieren. Die Erhitzung auf +99 °C führte zu einer ausgeprägten Wahrnehmung butterartiger und fetiger Noten, was auf thermisch induzierte chemische Reaktionen zurückzuführen ist [237] und durch die Ergebnisse der GC-MS-Analyse gestützt wird. So wurde 2,3-Butandion, eine Verbindung mit charakteristischem butterartigem Aroma, ausschließlich in der +99 °C-Probe nachgewiesen. Dieses Molekül entsteht typischerweise durch thermische Prozesse wie die Maillard-Reaktion oder den Abbau von Lipiden [239]. Bei Raumtemperatur (+20 °C) wurde die Geruchsqualität als verstärkt „muffig“ wahrgenommen. Diese Wahrnehmung könnte durch das Zusammenspiel von Isopropylalkohol, Acetoin und Essigsäure begünstigt worden sein, da diese Verbindungen in relevanten Konzentrationen detektiert wurden und für oxidative, fermentative sowie leicht buttrige Noten bekannt sind [237, 239]. Im Gegensatz dazu dominierten bei niedrigen Temperaturen (-18 °C und +4 °C) frischere, algigere Attribute. Diese Beobachtung könnte auf eine reduzierte Freisetzung volatiler Verbindungen zurückzuführen sein, die erst bei höheren Temperaturen stärker wahrgenommen werden [82]. Bemerkenswert ist, dass das Attribut „weinig/alkoholisch“ unter allen Temperaturbedingungen auftrat. Die GC-MS-Analyse bestätigte diesen Befund durch den Nachweis von Ethanol als dominante Verbindung in sämtlichen Proben. Allerdings wurde die alkoholische Note in der sensorischen Bewertung nur schwach ausgeprägt wahrgenommen, was vermutlich auf die vergleichsweise hohe Geruchsschwelle von Ethanol zurückzuführen ist. Im Vergleich dazu besitzen stärker riechende Verbindungen wie 2,3-Butandion deutlich niedrigere Geruchsschwellen [247], wodurch sie sensorisch wesentlich dominanter erscheinen.

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass die sensorische Wahrnehmung von *L. maxima* maßgeblich durch Temperaturbedingungen sowie die Art der Probenverarbeitung beeinflusst wird [82]. Die signifikanten Unterschiede zwischen den untersuchten Temperaturbedingungen zeigen, dass sowohl die Freisetzung spezifischer Aromakomponenten als auch deren sensorische Wahrnehmung temperaturabhängig sind. Insbesondere die Erhitzung auf +99 °C führte zu einer verstärkten Wahrnehmung butterartiger und fetiger Attribute, was für Anwendungen in der Lebensmittelverarbeitung und Produktentwicklung von Relevanz sein könnte. Diese Erkenntnisse liefern wertvolle Ansätze für die gezielte Modulation des Aromaprofils von Mikroalgen in verschiedenen Verarbeitungsschritten und könnten zur Optimierung von sensorischen Eigenschaften in funktionellen Lebensmitteln beitragen.

Geruchsbewertung mittels Skalenbewertung und freier Attributnennung

Die Ergebnisse der Geruchswahrnehmung zeigen signifikante Unterschiede zwischen den beiden Messzeitpunkten, sowohl in der Intensität als auch in der sensorischen Zuordnung der Attribute. Die wahrgenommene Geruchsintensität war unmittelbar nach dem Öffnen des Glases signifikant höher als nach einem 15-minütigen Offenstand ($7,74 \pm 0,78$ vs. $4,53 \pm 0,81$; $p = 0,004$). Auch die freie Attributnennung zeigte deutliche Unterschiede. Zu Beginn dominierten Begriffe wie „muffig“, „schwefelig“, „frisch“, „alig“ und „eiartig“, teils begleitet von negativ konnotierten Assoziationen wie „verdorben“ oder „sumpfig“. Nach 15 Minuten wurden hingegen überwiegend mildere und positivere Attribute wie „joghurtartig“, „muffig“ und „frisch“ genannt, während negative Assoziationen vollständig ausblieben. Diese Abnahme der wahrgenommenen Geruchsintensität als auch die freie Attributnennung deuten auf eine schnelle Freisetzung und Verdünnung der VOCs hin, die sich unmittelbar nach dem Öffnen des Glases konzentrieren und sich mit der Zeit im Raum verteilen [82]. Dabei werden störende Geruchskomponenten mit hoher Flüchtigkeit und niedriger Geruchsschwelle rasch freigesetzt und verflüchtigt, während milder Verbindungen länger präsent bleiben und die spätere Wahrnehmung prägen [247] und die Geruchswahrnehmung nach 15 Minuten prägten. Diese Veränderung ist somit systematisch auf das Verhalten der VOCs im geschlossenen und offenen System zurückzuführen.

Die intensive Wahrnehmung negativer Attribute unmittelbar nach dem Öffnen des Glases könnte die Akzeptanz bei Verbraucher*innen beeinträchtigen und zu Zurückhaltung beim Verzehr führen. Ungewohnte oder starke Geruchseindrücke könnten das Produkt vorschnell als unangenehm erscheinen lassen, obwohl sich das Aromaprofil nach kurzer Zeit verändert. Ein Hinweis auf der Verpackung könnte Verbraucher*innen darauf vorbereiten, dass der Geruch zunächst intensiver ist, sich jedoch nach kurzer Zeit mildert. Dies könnte dazu beitragen, eine vorschnelle Ablehnung zu vermeiden und eine neutralere Beurteilung des Produkts nach einer kurzen Standzeit zu ermöglichen. Zusätzlich könnten produkt- und verpackungstechnische Maßnahmen in Betracht gezogen werden, um anfänglich störende Geruchskomponenten zu reduzieren, ohne die Haltbarkeit der frischen Biomasse zu beeinträchtigen. Dies könnte durch den Einsatz von geruchsbindenden Substanzen oder eine Optimierung des Verpackungsmaterials erreicht werden.

4.3.3 Zusammenhang zwischen VOCs und Geruchsattributen

Die durchgeführte PCA ermöglichte eine differenzierte Betrachtung der Zusammenhänge zwischen den mittels GC-MS identifizierten VOCs und den sensorisch wahrgenommenen Geruchsattributen aus der CATA-Analyse. Während die PCA die Assoziation bestimmter VOCs mit spezifischen sensorischen Attributen bestätigte, offenbarten sich auch unerwartete Korrelationen. Insbesondere wichen die sensorische Wahrnehmung der Panelist*innen teils deutlich von den in der Literatur beschriebenen Geruchseigenschaften der identifizierten VOCs ab (vgl. Tabelle 20).

So zeigte sich beispielsweise eine signifikante Korrelation zwischen Butanol und dem Attribut „schwefelig“ ($r = 0,926$, $p = 0,037$), obwohl Butanol in der Literatur primär als „alkoholartig“ beschrieben wird [248-250]. Ein ähnliches Muster wurde bei Isopropylalkohol beobachtet, der ebenfalls mit „schwefelig“ assoziiert war ($r = 0,982$, $p = 0,009$), während er üblicherweise als „alkoholartig, scharf, muffig“ charakterisiert wird [248-250]. Auch Isopropylacetat, das typischerweise als „fruchtig“ klassifiziert wird, zeigte in der durchgeföhrten PCA eine unerwartete Korrelation mit „schwefelig“ ($r = 0,926$, $p = 0,037$). Des Weiteren wurde Essigsäure mit „muffig“ in Verbindung gebracht ($r = 0,925$, $p = 0,038$), obwohl sie in der Literatur als „stechend, beißend, scharf“ beschrieben wird [248-250]. Besonders bemerkenswert ist die Assoziation von Ethylhydroxybutyrat mit „muffig“ ($r = 0,992$, $p = 0,004$), obwohl diese Verbindung laut Literatur weitgehend geruchslos ist [248-250]. Die starke Korrelation von Aldehyden wie Hexanal und 2,3-Butandion mit butterartigen und fettigen Wahrnehmungen ($r = 0,987$; $p = 0,007$) unterstreicht deren Relevanz für das Aromenprofil der Probe. Zudem zeigte sich eine signifikante negative Korrelation zwischen Hexanal und dem Attribut „joghurtartig/buttermilchartig“ ($r = -0,949$; $p = 0,026$) sowie zwischen 2,3-Butandion und derselben Wahrnehmung ($r = -0,949$; $p = 0,026$). Aldehyde sind aufgrund ihrer niedrigen Geruchsschwellenwerte entscheidende Aromakomponenten [251]. Während 2,3-Butandion in der Literatur sowohl als „butterartig“ als auch als „unangenehm, stachend, chlorartig“ beschrieben wird [248-250], wird Hexanal typischerweise als „fettig-grün, grasig“ wahrgenommen. Andere sensorische Attribute wie „erdig“, „fruchtig“ oder „frisch“ zeigten zwar Korrelationen mit verschiedenen VOCs, erreichten jedoch keine statistische Signifikanz, was auf eine hohe individuelle Variabilität in der Wahrnehmung dieser Attribute hindeuten könnte.

Die beobachteten Diskrepanzen zwischen den sensorischen Wahrnehmungen und den in der Literatur dokumentierten Geruchseigenschaften der VOCs könnten auf mehrere Faktoren zurückzuföhren sein. Ein wesentlicher Einflussfaktor sind Matrixeffekte, da der Geruch einer isolierten Substanz häufig von ihrer Wahrnehmung innerhalb einer komplexen biologischen Matrix abweicht. Das Aroma von *L. maxima* resultiert nicht aus einer einzelnen Verbindung, sondern aus der Wechselwirkung einer Vielzahl geruchsaktiver VOCs. Frühere Studien zeigen, dass eine breite Palette von VOCs für das Gesamtaroma verantwortlich ist [251, 252]. Ein weiterer relevanter Aspekt sind interaktive Effekte zwischen den Verbindungen, bei denen bestimmte Substanzen die Wahrnehmung anderer modifizieren oder überlagern können [231]. Die sensorische Wahrnehmung eines VOCs hängt zudem von seinen physikalisch-

chemischen Eigenschaften, seiner relativen Konzentration sowie seiner Geruchsschwelle ab. Je niedriger die Geruchsschwelle, desto größer ist der Einfluss der Verbindung auf das Gesamtaroma [230, 231]. In der Regel sind nur wenige VOCs für die Gesamtgeruchscharakteristik eines Lebensmittels entscheidend, da sie in Konzentrationen vorliegen, die über ihren individuellen Geruchsschwellenwerten liegen [48]. Allerdings können auch VOCs, die unter diesen Schwellenwerten vorkommen, zur Geruchsbildung beitragen, wenn sie in Kombination mit anderen Verbindungen die Wahrnehmungsschwelle überschreiten [231, 252].

Insgesamt verdeutlichen die Ergebnisse, dass die sensorische Wahrnehmung der Biomasse von *L. maxima* nicht ausschließlich durch die chemische Identifikation der flüchtigen Verbindungen erklärt werden kann. Weitere Untersuchungen sind erforderlich, um die komplexen Wechselwirkungen zwischen den nachgewiesenen Aromastoffen und der Matrix besser zu verstehen. Darüber hinaus könnte die Auswahl der sensorischen Attribute eine Rolle gespielt haben. Es ist möglich, dass die gewählten Deskriptoren nicht alle relevanten Wahrnehmungen abgedeckt haben oder dass einzelne Panelist*innen Schwierigkeiten hatten, bestimmte Geruchseindrücke eindeutig zuzuordnen. Insbesondere bei komplexen Aromaprofilen, die durch eine Vielzahl von VOCs geprägt sind, kann eine Begrenzung auf vorab definierte Attribute dazu führen, dass bestimmte sensorische Eindrücke nicht vollständig erfasst werden. Eine Erweiterung des Attributkatalogs oder der ergänzende Einsatz frei formulierter Beschreibungen in zukünftigen Untersuchungen könnte daher zu einer präziseren Charakterisierung der sensorischen Wahrnehmung beitragen [86]. Zudem stellte die sensorische Beurteilung für die Panelist*innen eine besondere Herausforderung dar, da die vier untersuchten Proben sensorisch äußerst ähnlich waren. Diese geringe Differenzierung erschwerte die Unterscheidung und könnte dazu geführt haben, dass feine Nuancen in der Wahrnehmung schwerer zu erfassen waren [71].

5. Stärken und Limitationen der vorliegenden Arbeit

5.1 Literaturrecherche

Die durchgeführte Literaturrecherche folgte einer strukturierten und gezielten Suchstrategie, die mehrere Datenbanken und spezifische Suchstrings berücksichtigte. Dadurch wurde eine umfassende und methodisch transparente Erhebung relevanter Studien sichergestellt. Durch den Einsatz präziser Suchstrings und die Nutzung etablierter Datenbanken konnte eine schnelle und gezielte Identifikation relevanter Literatur sichergestellt werden, die den Fokus dieser Arbeit abdeckt. Ein weiterer methodischer Vorteil war die sorgfältige Definition von Einschluss- und Ausschlusskriterien. Diese klare Abgrenzung der Auswahlkriterien, insbesondere die Fokussierung auf methodisch transparente und qualitativ hochwertige Studien, erhöhte die Verlässlichkeit der verwendeten Daten. Die transparente Dokumentation der Suchstrings und Auswahlkriterien ermöglicht eine einfache Reproduzierbarkeit der Recherche. Zudem wurde versucht möglichst aktuelle Literatur zu verwenden. Diese Begrenzung stellt sicher, dass die Arbeit den aktuellen Stand der Wissenschaft widerspiegelt und zeitgemäße Erkenntnisse berücksichtigt. Dies ist besonders relevant, um die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf aktuelle Fragestellungen sicherzustellen und die Forschung auf einem hohen wissenschaftlichen Niveau zu halten.

Trotz der methodischen Stärken weist die Literaturrecherche einige Limitationen auf, die bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden sollten. Eine wesentliche Einschränkung ist die Begrenzung der Datenbasis auf spezifische Datenbanken wie PubMed und SpringerLink. Diese Auswahl könnte dazu geführt haben, dass relevante Quellen ausgeschlossen wurden, da weitere etablierte Datenbanken wie Scopus oder Web of Science nicht einbezogen wurden. Eine breitere Datenbasis hätte möglicherweise zusätzliche wertvolle Informationen geliefert und die Aussagekraft der Recherche erhöht. Eine weitere Limitation liegt im Verzicht auf eine quantitative Analyse der identifizierten Studien. Eine Meta-Analyse der Primärstudien hätte dazu beitragen können, widersprüchliche Ergebnisse zu klären und die Evidenzbasis zu stärken. Dieser methodische Schritt hätte einen quantitativen Vergleich der identifizierten Studien ermöglicht und zu einem robusteren Gesamteindruck der untersuchten Thematik beigetragen. Da die Literaturrecherche lediglich einen Teil dieser Arbeit darstellte, hätte eine quantitative Analyse den Umfang dieser Arbeit jedoch überschritten. Bei der Auswahl der Studien für therapeutische Fragestellungen wurden ausschließlich RCTs und Meta-Analysen berücksichtigt. Dies garantiert eine hohe methodische Qualität der eingeschlossenen Arbeiten. Gleichzeitig besteht jedoch die Gefahr, dass potenziell wichtige Erkenntnisse aus Studien mit alternativen Designs übersehen wurden. Insbesondere subtilere Effekte, die in weniger standardisierten Studiendesigns erfasst wurden, könnten unterrepräsentiert sein und somit die Vollständigkeit der Evidenz einschränken.

Zusammenfassend weist die Literaturrecherche eine hohe methodische Qualität und Transparenz auf, sollte jedoch im Hinblick auf die begrenzte Datenbasis und den Verzicht auf eine quantitative Synthese der Ergebnisse kritisch betrachtet werden. Diese Aspekte sollten in zukünftigen Arbeiten adressiert werden, um die Aussagekraft der Ergebnisse weiter zu optimieren.

5.2 Verbraucher*innen Befragung

Durch die Online-Durchführung der Umfrage konnte eine große und heterogene Stichprobe von 557 Teilnehmenden erreicht werden, wodurch differenzierte Analysen nach soziodemografischen Merkmalen wie Geschlecht, Alter und Bildungsgrad ermöglicht wurden. Die breite Streuung der Teilnehmenden bietet eine solide Grundlage, um vielfältige Perspektiven und Einstellungen zu erfassen. Ein weiterer wesentlicher Vorteil war die Standardisierung und Validität der Datenerhebung. Durch den Einsatz wissenschaftlich validierter Instrumente, wie der General Health Interest Scale, der Sustainability Consciousness Scale, der Food Neophobia Scale und der Food Technology Neophobia Scale wurde eine hohe Qualität der erhobenen Daten sichergestellt. Zudem ermöglichte die Verwendung verschiedener Skalenformate, darunter die Likert-Skala und das semantische Differenzial, eine präzisere und differenziertere Erfassung von Wahrnehmungen und Einstellungen der Teilnehmenden. Ein besonderer methodischer Vorteil liegt in der Kombination qualitativer und quantitativer Elemente. Die Integration von Freitextfeldern ergänzte die standardisierten Daten um tiefere Einsichten in die individuellen Assoziationen und Meinungen der Befragten. Diese Methodenkombination trägt zu einem fundierten Verständnis der Ergebnisse bei und erweitert die Perspektive auf die untersuchten Themen. Zudem trug ein vorab durchgeführter Pretest erheblich dazu bei, potenzielle Schwächen im Fragebogendesign zu identifizieren und zu minimieren. Der Pretest stellte sicher, dass die Hauptbefragung präzise auf die Forschungsziele abgestimmt war und damit eine hohe Zuverlässigkeit und Gültigkeit der Ergebnisse gewährleistet wurde.

Trotz ihrer Stärken weist die Methodik der Umfrage einige Schwächen und Limitationen auf, die bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden sollten. Die Stichprobe basiert auf einer freiwilligen Teilnahme und ist somit nicht repräsentativ für die deutsche Bevölkerung. Insbesondere jüngere und höher gebildete Personen sind in der Stichprobe überrepräsentiert, was die Generalisierbarkeit der Ergebnisse einschränken könnte. Darüber hinaus wurde festgestellt, dass ältere Menschen, insbesondere über 80-Jährige, sowie Personen mit niedrigem Bildungsniveau unterrepräsentiert waren. Diese Ungleichverteilung könnte zu einer verzerrten Darstellung von Wahrnehmungen und Einstellungen führen, da diese Gruppen andere Perspektiven oder Gewohnheiten im Umgang mit den untersuchten Themen haben könnten. Die Rekrutierung der Befragungspersonen erfolgte über ein Schneeballverfahren. Dabei kann es, abhängig von der Auswahl der ersten Kontaktpersonen und der Zusammensetzung ihres Netzwerks, zu Verzerrungen kommen^[35]. Bei der Schneeballstichprobe handelt es sich um eine willkürliche, nicht-probabilistische Stichprobe, deren Repräsentativität für die Zielpopulation unbekannt ist^[35]. Weiterhin kann nicht genau kontrolliert werden, wer den Fragebogen ausfüllt und die Rücklaufquote ist somit ebenfalls nicht bekannt^[33]. Zudem war die Stichprobe selbstselektierend, da sie auf freiwilliger Teilnahme beruhte und nicht durch aktive Rekrutierung erfolgte. Dies könnte dazu geführt haben, dass ein Teil der potenziellen Teilnehmenden bereits im Vorfeld eine Teilnahme verweigerte oder den Fragebogen währenddessen abbrach. Zudem nehmen bei freiwilligen Studien überwiegend besonders motivierte Personen aus eigenem Antrieb teil (z.B. aufgrund ihres besonderen Interesses am Thema)^[35, 253].

Da die Umfrage nur mithilfe eines internetfähigen Mediums beantwortet werden konnte und nicht alle Menschen der Bevölkerung gleichermaßen online erreichbar sind, kann das Kriterium der Repräsentativität ausschließlich auf die Gesamtheit der Internet-Nutzer beschränkt werden. Die Ergebnisse spiegeln somit vor allem die Perspektiven der internetnutzenden Bevölkerung wider [253, 254]. Darüber hinaus könnte die Verwendung ungerader Skalenformate dazu beigetragen haben, dass Teilnehmende verstärkt neutrale Positionen wählten, was die Differenzierbarkeit der Ergebnisse einschränken könnte. Ein weiteres methodisches Limit liegt in der Analyse der Freitextantworten, die aufgrund ihres aufwändigen und interpretationsabhängigen Charakters potenziell zu Verzerrungen führen können. Auch die Länge des Fragebogens erwies sich als Herausforderung. Sie könnte eine erhöhte Abbrecherquote verursacht haben und möglicherweise die Datenqualität negativ beeinflusst haben, da einige Teilnehmende den Fragebogen unter Zeitdruck oder mit Verständnisproblemen ausgefüllt haben könnten. Angesichts dessen, dass die Befragung nicht unter der Kontrolle des Studienteams stattgefunden hat, sind die Umstände unter denen die Befragten an der Umfrage teilgenommen haben, weitgehend unklar [255]. So besteht z.B. die Möglichkeit, dass die Befragten den Fragebogen unter Zeitdruck ausgefüllt haben oder sich Verständnisprobleme während der Befragung entwickelten und die Teilnehmenden keine Rückfragen stellen konnten [254]. Trotz der Möglichkeit, „weiß ich nicht“ oder „keine Antwort“ als Antwortoption anzukreuzen, trat in dieser Befragung ein hoher Anteil an Item-Non-Response auf. Dies deutet darauf hin, dass einige Teilnehmende Schwierigkeiten hatten, bestimmte Fragen zu beantworten, obwohl ihnen eine neutrale oder ausweichende Antwortoption zur Verfügung stand. Mögliche Gründe hierfür könnten in der Komplexität oder Unklarheit einzelner Fragen, in einem mangelnden Interesse an spezifischen Themen oder in der Ermüdung der Teilnehmenden während des Ausfüllens des Fragebogens liegen. Besonders bei sensiblen oder persönlichen Themen könnte eine bewusste Verweigerung der Antwort ebenfalls eine Rolle gespielt haben [256]. Der hohe Anteil an Item-Non-Response unterstreicht die Notwendigkeit, die Gestaltung des Fragebogens und die Verständlichkeit der Fragen zu überprüfen, um in zukünftigen Untersuchungen die Antwortquote zu verbessern. Zusätzlich könnten detaillierte Instruktionen oder eine gezielte Motivation der Teilnehmenden dazu beitragen, die Anzahl unbeantworteter Fragen zu reduzieren [256].

5.3 Lebensmitteltechnologische Untersuchungen

5.3.1 Bestimmung der flüchtigen Verbindungen mittels GC-MS-Analyse

Die in dieser Masterarbeit entwickelte GC-MS-Methodik zur Analyse von VOCs wurde gezielt an die spezifischen Herausforderungen der frischen *L. maxima*-Biomasse angepasst. Durch umfangreiche Methodenoptimierungen, konnte eine robuste und empfindliche Analysemethode entwickelt werden. Diese Anpassungen ermöglichen eine hochwertige Identifikation flüchtiger Verbindungen, jedoch mit gewissen Limitationen, insbesondere in Bezug auf die Quantifizierung und die Erfassung extrem flüchtiger VOCs.

Die Verwendung frischer Biomasse als Ausgangsmaterial für die GC-MS-Analyse weicht von gängigen Methoden ab, die meist auf getrocknete oder vorbehandelte Proben fokussiert sind. Durch ihre komplexe Matrix und den hohen Feuchtigkeitsgehalt kann die Analyse frischer Biomasse die Detektion von VOCs erschweren. Zur besseren Vergleichbarkeit mit bestehenden Studien wurden ergänzende Analysen mit getrockneter Biomasse durchgeführt, die eine differenzierte Betrachtung der VOCs ermöglichten und zeigten, wie die Probenvorbereitung das VOC-Profil beeinflusst. Viele in der frischen Biomasse nachgewiesene Verbindungen wurden bestätigt, während in den getrockneten Proben bestimmte Substanzen deutlicher nachweisbar waren. Die Entscheidung, frische Biomasse zu verwenden, hatte das Ziel, die natürlichen VOCs im ursprünglichen Zustand zu erfassen und ein realistisches Geruchsprofil der Mikroalgen darzustellen. Dies ermöglicht eine direkte Anwendung in sensorischen Untersuchungen und eröffnet neue Perspektiven für die Charakterisierung von *L. maxima*. Allerdings erschwert dieser Ansatz die Vergleichbarkeit mit bestehenden Studien, da detaillierte Untersuchungen zu VOCs in frischer Biomasse bislang selten sind. Die fehlenden Referenzwerte und der hohe Feuchtigkeitsgehalt der Proben stellen zusätzliche Herausforderungen bei der Interpretation der gewonnenen Daten dar.

Eine zentrale Stärke dieser Arbeit liegt in der umfassenden Methodenoptimierung der GC-MS-Analyse. Durch gezielte Anpassungen, wie die Zugabe von NaCl zur Erhöhung der Analytkonzentration im Headspace, sowie die Variation von Temperaturprogrammen und Trägergasflüssen, wurde eine robuste, an die spezifische Probenmatrix angepasste Methodik entwickelt. Diese Optimierungen verbesserten die Qualität und Aussagekraft der erzielten Ergebnisse. Ein bewusster methodischer Ansatz war der Verzicht auf Lösungsmittel während der GC-MS-Analyse, um Verluste oder chemische Veränderungen der flüchtigen Verbindungen zu vermeiden. Stattdessen wurden die VOCs direkt aus der Biomasse mittels HS-SPME extrahiert. Dies könnte erklären, warum einige Verbindungen, die in lösungsmittelbasierten Studien nachgewiesen wurden, in dieser Untersuchung nicht oder nur in geringerer Intensität detektiert wurden. Die hohe Feuchtigkeitskonzentration der frischen Biomasse erforderte zudem eine Anpassung der Extraktionsbedingungen. Die Zugabe von NaCl reduzierte die Wassermatrix und erhöhte die Sensitivität der Detektion, wodurch die Analyse trotz der Herausforderungen erfolgreich umgesetzt werden konnte. Dennoch bleibt die qualitative Natur der Analyse eine Einschränkung, da die Konzentrationen der VOCs nicht quantifiziert wurden. Dies erschwert eine präzise Bewertung und Interpretation des

Einflusses einzelner Verbindungen auf das Geruchsprofil. Trotz der umfangreichen Optimierung der HS-SPME-Methodik besteht die Einschränkung, dass extrem flüchtige Verbindungen möglicherweise vor der Extraktion entweichen. Dies wurde durch den intensiven Geruch der frischen Biomasse beim Öffnen der Probenbehälter deutlich, der nicht vollständig im Analysenverfahren erfasst werden konnte.

Ein weiteres methodisches Problem ist, dass mehr Substanzen als Peaks identifiziert wurden. Dies deutet darauf hin, dass die Übereinstimmung zwischen den gemessenen Spektren und den in der Datenbank gespeicherten Referenzspektren in einigen Fällen nicht eindeutig war. Diese Unsicherheiten können verschiedene Ursachen haben. Zum einen erschwert die Ähnlichkeit der Massenspektren strukturell verwandter Verbindungen eine präzise Zuordnung. Zum anderen könnten Limitierungen der genutzten Datenbank eine Rolle spielen, beispielsweise wenn relevante Referenzspektren fehlen oder unvollständig sind. Darüber hinaus wurde die Identifikation der Verbindungen nicht durch den Einsatz von Referenzsubstanzen bestätigt, was die Zuverlässigkeit der Ergebnisse einschränken könnte.

Zusammenfassend verdeutlicht die vorliegende Untersuchung sowohl die Potenziale als auch die Herausforderungen bei der Analyse von VOCs in frischer *L. maxima*-Biomasse. Die entwickelte Methodik zeigt innovative Ansätze und eine hohe Anpassungsfähigkeit an die spezifischen Herausforderungen der Probenmatrix. Sie ermöglicht eine qualitativ hochwertige Identifikation flüchtiger Verbindungen, weist jedoch Limitationen auf, insbesondere hinsichtlich der Quantifizierung, der Erfassung extrem flüchtiger Verbindungen und der Vergleichbarkeit mit Literaturdaten. Die gewonnenen Erkenntnisse bieten eine wichtige Grundlage für zukünftige Forschungen, die auf die Integration von Referenzstandards, die Entwicklung quantitativer Analyseverfahren und die Untersuchung sensorischer Korrelationen abzielen sollten. Diese Ansätze könnten nicht nur die Genauigkeit der Ergebnisse weiter verbessern, sondern auch ein tiefergehendes Verständnis der chemischen Prozesse fördern, die die Zusammensetzung und Dynamik der VOCs in der frischen Biomasse beeinflussen. Optimierungen in diesen Bereichen könnten die Aussagekraft und Anwendbarkeit der Methode weiter steigern.

5.3.2 Humansensorische Analyse

Die humansensorische Analyse von *L. maxima* wurde mit einem breiten methodischen Ansatz durchgeführt. Durch die Kombination dieser Methoden konnte eine umfassende Bewertung der sensorischen Eigenschaften von *L. maxima* erfolgen. Ein wesentlicher Vorteil lag in der Kombination qualitativer und quantitativer Ansätze. Diese erlaubten es, sowohl objektive als auch subjektive sensorische Eigenchaften zu erfassen. Die Analyse lieferte somit reproduzierbare Daten zum Geruchsprofil von *L. maxima*, also auch individuellen sensorischen Assoziationen der Panelist*innen.

Die CATA- und RATA-Methoden sind etablierte, valide Verfahren der sensorischen Forschung. Sie erlauben eine systematische Erfassung sensorischer Merkmale, wobei RATA zusätzlich eine Differenzierung der Intensität einzelner Attribute ermöglicht. Ergänzend erlaubte die freie Attributnennung eine unvoreingenommene Erfassung zusätzlicher sensorischer Merkmale, die durch die CATA- und RATA-Methoden nicht vollständig erfasst wurden. Dies war besonders wichtig, da einige spezifische Gerüche wie der intensive und unangenehme Geruch beim Öffnen des Probenbehälters durch die GC-MS-Analyse nicht erfasst wurden. Vor den Analysen wurden die Panelist*innen in einer kurzen Schulung mit den verwendeten Attributen vertraut gemacht und ihr Verständnis überprüft. Besonders hervorzuheben ist die standardisierte Durchführung der Analyse. Die Proben wurden unter standardisierten Bedingungen gemäß ISO-Normen vorbereitet und getestet, was die Vergleichbarkeit zwischen den Replikaten sicherstellte. Die zufällige Probenreihenfolge minimierte Reihenfolgeeffekte, während der Einsatz geschulter Panelist*innen mit lebensmitteltechnologischem Hintergrund die Validität der Ergebnisse erhöhte. Die Integration der GC-MS-Ergebnisse diente zudem als fundierte Grundlage für die Auswahl relevanter Attribute und erleichterte die Interpretation sensorischer Wahrnehmungen. Trotz dieser Stärken zeigt die Methodik auch spezifische Limitationen. Priming-Effekte durch vorgegebene RATA-Attribute könnten die freie Attributnennung beeinflusst und die Vielfalt der Angaben eingeschränkt haben. Darüber hinaus konzentrierte sich die Analyse ausschließlich auf den Geruch, sodass andere sensorische Dimensionen wie Geschmack, Textur oder visuelle Wahrnehmungen nicht berücksichtigt wurden. Ein potenzielles Problem ist der Verlust flüchtiger Verbindungen vor der sensorischen Bewertung, insbesondere hochflüchtiger Substanzen, die bereits beim Öffnen der Probenbehälter entweichen könnten.

Zusammenfassend bietet die gewählte Methodik eine solide Grundlage für die sensorische Analyse von *L. maxima*. Die Kombination qualitativer und quantitativer Ansätze sowie die Integration der GC-MS-Daten ermöglichte eine detaillierte Erfassung der Geruchsprofile. Gleichzeitig bieten die identifizierten Limitationen Ansatzpunkte für Optimierungen, um die Aussagekraft und Anwendbarkeit zukünftiger Studien zu verbessern.

6. Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Die vorliegende Masterarbeit untersuchte die Potenziale und Herausforderungen von Mikroalgen und Cyanobakterien als funktionelle Lebensmittel anhand einer umfassenden Literaturrecherche, einer Verbraucher*innen-Umfrage und experimenteller Analysen am Beispiel von *Limnospira maxima*. Die Ergebnisse zeigen, dass Mikroalgen und Cyanobakterien ein vielversprechender Bestandteil einer nachhaltigen und gesundheitsfördernden Ernährung sein können. Dennoch müssen technische, sensorische und gesellschaftliche Hürden überwunden werden, um ihre Akzeptanz und Marktfähigkeit zu steigern.

Die Literaturrecherche zeigt, dass *L. maxima* eine nährstoffreiche Zusammensetzung mit hohem Proteingehalt, essenziellen Fettsäuren, Vitaminen und bioaktiven Verbindungen aufweist. Allerdings unterliegt diese Zusammensetzung erheblichen Schwankungen, die durch Anbaubedingungen, genetische Variabilität und Verarbeitungsmethoden beeinflusst werden. Obwohl *L. maxima* häufig als gesundheitsförderndes Superfood beschrieben wird, basiert die wissenschaftliche Evidenz überwiegend auf in vitro- und in vivo-Studien, während belastbare klinische Untersuchungen bislang begrenzt sind. Dennoch könnten Mikroalgen und Cyanobakterien aufgrund ihres nährstofflichen Potenzials und ihrer nachhaltigen Kultivierbarkeit eine bedeutende Rolle in der zukünftigen Ernährung spielen.

Die Umfrage untersuchte die Bekanntheit, Wahrnehmung und Akzeptanz von Mikroalgen als Lebensmittel sowie die Einflussfaktoren auf die Einstellung und Konsumbereitschaft der Teilnehmenden. Die Ergebnisse zeigen, dass die Mehrheit der Befragten bereits von Mikroalgen gehört hatte, jedoch ein begrenztes Wissen über ihre Eigenschaften und Anwendungsmöglichkeiten bestand. Besonders vegan und flexitarisch lebende Personen waren mit Mikroalgen vertrauter und offener für deren Konsum. Die Wahrnehmung von Mikroalgen als gesund und nachhaltig war weit verbreitet, allerdings wurden sensorische Aspekte, insbesondere der Geruch und Geschmack, teils kritisch bewertet. Zudem zeigte sich, dass eine gezielte Wissensvermittlung über gesundheitliche und ökologische Vorteile die Akzeptanz erhöhen könnte. Die Zahlungsbereitschaft für mikroalgenhaltige Lebensmittel war moderat, wobei eine klare Kennzeichnung der ernährungsphysiologischen Vorteile die Kaufbereitschaft steigern könnte. Zusammenfassend verdeutlichen die Ergebnisse, dass Aufklärung und gezielte Kommunikation entscheidend für die Markteinführung und Akzeptanzsteigerung von Mikroalgen sind.

Die lebensmitteltechnologischen Analysen von *L. maxima* wurden durch eine Kombination aus GC-MS-Analysen und humansensorischen Tests durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass sowohl die Lagerbedingungen als auch die Trocknung der Biomasse maßgeblich die Konzentration und Zusammensetzung der VOCs sowie die sensorischen Eigenschaften beeinflussen. Die temperaturbedingten Veränderungen in der chemischen Zusammensetzung hatten einen direkten Einfluss auf die Wahrnehmung der frischen Biomasse von *L. maxima*. Ein zentraler methodischer Ansatz der lebensmitteltechnologischen Untersuchung war die Untersuchung frischer Biomasse, die von gängigen Methoden abweicht. Diese Herangehensweise ermöglichte eine verbrauchernahe Erfassung der Aromaprofils, erschwerte jedoch die Vergleichbarkeit mit bestehenden Studien.

Die Ergebnisse dieser Masterarbeit zeigen das große Potenzial von Cyanobakterien und Mikroalgen für eine gesunde und nachhaltige Ernährung, erfordern jedoch gezielte Maßnahmen zur Steigerung der Akzeptanz und Marktchancen. Dazu zählen die Optimierung sensorischer Eigenschaften durch geeignete Verarbeitungstechniken, eine gezielte Verbraucher*innenaufklärung über gesundheitliche und ökologische Vorteile sowie die Integration in vertraute Lebensmittel. Besonders die schonende Verarbeitung frischer Biomasse bietet eine vielversprechende Alternative zur herkömmlichen Trocknung. Dies könnte nicht nur die Nährstoffqualität, sondern auch die sensorische Wahrnehmung und Akzeptanz von Mikroalgenprodukten verbessern. Die gewonnenen Erkenntnisse liefern zudem wertvolle Impulse für die Lebensmittelindustrie sowie angrenzende Bereiche, in denen chemische und sensorische Eigenschaften eine zentrale Rolle spielen. Durch eine Kombination aus strategischer Produktentwicklung, nachhaltiger Verarbeitung und gezielter Verbraucherkommunikation kann langfristig die Marktfähigkeit von Mikroalgen und Cyanobakterien verbessert werden.

7. Literaturverzeichnis

1. United Nations. (n.d.). *The 17 goals: Sustainable development*. [Internet]. Zuletzt geändert 2023. [letzter Zugriff 22.02.2025]. URL: <https://sdgs.un.org/goals>
2. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). *Dietary Guidelines and Sustainability*. 2010. [Internet]. Zuletzt geändert 2025. [letzter Zugriff 22.02.2025]. URL <https://www.fao.org/nutrition/education/food-dietary-guidelines/background/sustainable-dietary-guidelines/en/>
3. Club of Rome. *Earth4All – Ein Survival Guide für unseren Planeten*. Oekom. 202
4. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). *Sustainable Food and Agriculture*. 2024. [Internet]. Zuletzt geändert 2025. [letzter Zugriff 22.02.2025]. URL <https://www.fao.org/home/en/>.
5. Willett, W., Rockström, J., Loken, B., Springmann, M., Lang, T., Vermeulen, et al. (2019). *Food in the Anthropocene: the EAT–Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems*. *The lancet*, 393(10170), 447-492.
6. Acateca-Hernández, M. I., Hernández-Cázares, A. S., Hidalgo-Contreras, J. V., Jiménez-Munguía, M. T., & Ríos-Corripio, M. A. (2024). *Evaluation of the functional properties of a protein isolate from Arthrospira maxima and its application in a meat sausage*. *Heliyon*, 10(13).
7. Torres-Durán, P. V., Paredes-Carbajal, M. C., Mascher, D., Zamora-González, J., Díaz-Zagoya, J. C., & Juárez-Oropeza, M. A. (2006). *Protective effect of Arthrospira maxima on fatty acid composition in fatty liver*. *Archives of medical research*, 37(4), 479-483.
8. Fernández-Corte, B., Hernández-Cázares, A. S., Gómez-Merino, F. C., de Cangas, R., Rodríguez-Palacio, M., García-Gómez, O., & Ríos-Corripio, M. A. (2022). *Effect of NaCl concentration on the production of Arthrospira maxima cultivated in the humid tropics*. *Agrociencia*.
9. Manrich, A., de Oliveira, J. E., Martins, M. A., & Mattoso, L. H. C. (2020). *Physicochemical and Thermal Characterization of the Spirulina platensis*. *J. Agric. Sci. Technol. B*, 10, 298-307.
10. Seghiri, R., Kharbach, M., & Essamri, A. (2019). *Functional composition, nutritional properties, and biological activities of Moroccan Spirulina microalga*. *Journal of food quality*, 2019(1), 3707219.
11. El-Moataaz, S., Ismael, H., & Aborhyem, S. (2019). *Assessment of chemical composition of Spirulina platensis and its effect on fasting blood glucose and lipid profile in diabetic Rats*. *Journal of High Institute of Public Health*, 49(3), 199-211.
12. Jung, F., Braune, S., Jung, C. H., Krüger-Genge, A., Waldeck, P., Petrick, I., & Küpper, J. H. (2022). *Lipophilic and hydrophilic compounds from Arthrospira platensis and its effects on tissue and blood cells—an overview*. *Life*, 12(10), 1497.
13. Gentscheva, G., Nikolova, K., Panayotova, V., Peycheva, K., Makedonski, L., Slavov, P., et al. (2023). *Application of Arthrospira platensis for medicinal purposes and the food industry: a review of the literature*. *Life*, 13(3), 845.
14. Jung, F., Krüger-Genge, A., Waldeck, P., & Küpper, J. H. (2019). *Spirulina platensis, a super food?*. *Journal of Cellular Biotechnology*, 5(1), 43-54.
15. Koyande, A. K., Chew, K. W., Rambabu, K., Tao, Y., Chu, D. T., & Show, P. L. (2019). *Microalgae: A potential alternative to health supplementation for humans*. *Food Science and Human Wellness*, 8(1), 16-24.
16. Fawzy M, Mohamed M. (2008). *Functional bioactive compounds and biological activities*. *Czech J. Food Sci. Vol*, 26(3), 211-222.
17. AlFadhlly, N. K., Alhelfi, N., Altemimi, A. B., Verma, D. K., Cacciola, F., & Narayanankutty, A. (2022). *Trends and technological advancements in the possible food applications of Spirulina and their health benefits: A Review*. *Molecules*, 27(17), 5584.
18. Mendes, M. C., Navalho, S., Ferreira, A., Paulino, C., Figueiredo, D., Silva, D et al. (2022). *Algae as food in Europe: An overview of species diversity and their application*. *Foods*, 11(13), 1871.
19. Lafarga, T. (2019). *Effect of microalgal biomass incorporation into foods: Nutritional and sensorial attributes of the end products*. *Algal Research*, 41, 101566.
20. Sinetova, M. A., Kupriyanova, E. V., Los, D. A. (2024). *Spirulina/Arthrospira/Limnospira—Three names of the single organism*. *Foods*, 13(17), 2762.
21. Nowicka-Krawczyk, P., Mühlsteinová, R., & Hauer, T. (2019). *Detailed characterization of the Arthrospira type species separating commercially grown taxa into the new genus Limnospira (Cyanobacteria)*. *Scientific reports*, 9(1), 694.
22. Roussel, T., Halary, S., Duval, C., Piquet, B., Cadoret, J. P., Vernès, L., et al. (2023). *Monospecific renaming within the cyanobacterial genus Limnospira (Spirulina) and consequences for food authorization*. *Journal of Applied Microbiology*, 134(8), lxad159
23. AlgaeBase - *Limnospira maxima* (Setchell & N.L.Gardner) Nowicka-Krawczyk, Mühlsteinová & Hauer. 2019. [Internet]. Zuletzt geändert 2025. [letzter Zugriff 22.02.2025]. URL https://www.algaebase.org/search/species/detail/?species_id=171390.
24. Mordor Intelligence. *Marktgrößen- und Marktanteilsanalyse für funktionelle Lebensmittel – Wachstumstrends und -prognosen (2024 – 2029) 2023*. [Internet]. Zuletzt geändert 2025. [letzter Zugriff 22.02.2025]. URL Available from: <https://www.mordorintelligence.com/de/industry-reports/global-functional-food-market>.
25. Fortune Business Insights. *Marktgröße, Anteil und Branchenanalyse für funktionelle Lebensmittel und Getränke, nach Typ, 2024-2032. 2024*; [Internet]. Zuletzt geändert 2025. [letzter Zugriff 22.02.2025]. URL <https://www.fortunebusinessinsights.com/de/markt-f-r-funktionelle-lebensmittel-102269>.
26. Mordor Intelligence. *Marktgrößen- und Marktanteilsanalyse für Algenprodukte – Wachstumstrends und Prognosen (2024 – 2029). 2024*. [Internet]. Zuletzt geändert 2025. [letzter Zugriff 22.02.2025]. URL <https://www.mordorintelligence.com/de/industry-reports/algae-products-market>.
27. Maehle, N., & Skjeret, F. (2022). *Microalgae-based food: Purchase intentions and willingness to pay*. *Future Foods*, 6, 100205.

28. Barrios, E. X., Bayarri, S., Carbonell, I., Izquierdo, L., & Costell, E. (2008). Consumer attitudes and opinions toward functional foods: A focus group study. *Journal of sensory studies*, 23(4), 514-525.
29. Pagiaslis, A. and A.K. Krontalis, Green consumption behavior antecedents: Environmental concern, knowledge, and beliefs. *Psychology & Marketing*, 2014. 31(5): p. 335-348.
30. Kriwy, P. and R.A. Mecking, Health and environmental consciousness, costs of behaviour and the purchase of organic food. *International journal of consumer studies*, 2012. 36(1): p. 30-37.
31. Lafarga, T., Rodríguez-Bermúdez, R., Morillas-España, A., Villaró, S., García-Vaquero, M., Morán, L., et al. (2021). Consumer knowledge and attitudes towards microalgae as food: The case of Spain. *Algal Research*, 54, 102174.
32. Pliner, P. and K. Hobden, Development of a scale to measure the trait of food neophobia in humans. *Appetite*, 1992. 19(2): p. 105-120.
33. Altobelli, C. F. (2023). *Marktforschung: Methoden-Anwendungen-Praxisbeispiele*. Utb.
34. Porst, R., *Ein Arbeitsbuch*. 2014, Springer.
35. Döring, N. (2023). Bestimmung von Teststärke, Effektgröße und optimalem Stichprobenumfang. In *Forschungsmethoden und Evaluation in den Sozial- und Humanwissenschaften* (pp. 789-846). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
36. Mossig, I. (2012). *Stichproben, Stichprobenauswahlverfahren und Berechnung des minimal erforderlichen Stichprobenumfangs* (No. 1-2012). *Beiträge zur Wirtschaftsgeographie und Regionalentwicklung*.
37. Statistisches Bundesamt (Destatis). Pressemitteilung Nr. 035 vom 25. Januar 2024. 2024, [Internet]. Zuletzt geändert 2025. [letzter Zugriff 22.02.2025]. URL <https://www.destatis.de/>.
38. Schäfer, B. (1983). *Semantische Differential Technik. Themenbereich B: Datenerhebung, Methodologie und Methoden*. Göttingen: Hogrefe, 154-221.
39. Roininen, K., L. Lähteenmäki, and H. Tuorila, Quantification of consumer attitudes to health and hedonic characteristics of foods. *Appetite*, 1999. 33(1): p. 71-88.
40. Grunert, K.G., S. Hieke, and J. Wills, Sustainability labels on food products: Consumer motivation, understanding and use. *Food policy*, 2014. 44: p. 177-189.
41. Siegrist, M., C. Hartmann, and C. Keller, Antecedents of food neophobia and its association with eating behavior and food choices. *Food Quality and Preference*, 2013. 30(2): p. 293-298.
42. Guzek, D., Głabska, D., Lange, E., & Jezewska-Zychowicz, M. (2017). A Polish study on the influence of food neophobia in children (10–12 years old) on the intake of vegetables and fruits. *Nutrients*, 9(6), 563.
43. Guzek, D., Głabska, D., Mellová, B., Zadka, K., Żywczyk, K., & Gutkowska, K. (2018). Influence of food neophobia level on fruit and vegetable intake and its association with urban area of residence and physical activity in a nationwide case-control study of Polish adolescents. *Nutrients*, 10(7), 897.
44. Cox, D. N., & Evans, G. (2008). Construction and validation of a psychometric scale to measure consumers' fears of novel food technologies: The food technology neophobia scale. *Food quality and preference*, 19(8), 704-710.
45. Ullmann, L. M. (2020). Akzeptanz von Insekten als Nahrungsmittel in Deutschland: Soziodemografische, ernährungs- und umweltpsychologische Einflussfaktoren. Springer-Verlag.
46. Lucas, B.F. and T.A. Brunner, Attitudes and perceptions towards microalgae as an alternative food: A consumer segmentation in Switzerland. *Algal Research*, 2024. 78: p. 103386.
47. Verbeke, W., Profiling consumers who are ready to adopt insects as a meat substitute in a Western society. *Food quality and preference*, 2015. 39: p. 147-155.
48. Prasetyo, H., Purwaningsih, S., Setyaningsih, I., Nurilmala, M., Uju, U., & Tarman, K. (2024). Off-odour identification from volatile organic compounds (VOCs) of Spirulina. In *BIO Web of Conferences* (Vol. 92, p. 02006). EDP Sciences.
49. Grácio, M., Ferreira, J., Steinrücken, P., Kleinegris, D. M., Sousa, I., Nunes, M. C., & Raymundo, A. (2024). The Volatile Composition and the Potential Health Benefits of Different Microalgae Strains. *Foods*, 13(14), 2174.
50. Nader, C., Cella, H., Lopes, R. G., Oliveira, C. Y. B., D'Alessandro, E. B., Filho, N. R. A., & Derner, R. B. (2022). Effect of different cultivation conditions on the production of volatile organic compounds by the microalgae *Arthrospira platensis* and *Chlorella* sp. *Journal of Applied Phycology*, 1-15.
51. Prasetyo, H., Purwaningsih, S., Setyaningsih, I., Nurilmala, M., Uju, U., & Tarman, K. (2024). Off-odour identification from volatile organic compounds (VOCs) of Spirulina. In *BIO Web of Conferences* (Vol. 92, p. 02006). EDP Sciences.
52. Van Durme, J., Goiris, K., De Winne, A., De Cooman, L., & Muylaert, K. (2013). Evaluation of the volatile composition and sensory properties of five species of microalgae. *Journal of agricultural and food chemistry*, 61(46), 10881-10890.
53. Moran, L., Bou, G., Aldai, N., Ciardi, M., Morillas-España, A., Sánchez-Zurano, A., et al. (2022). Characterisation of the volatile profile of microalgae and cyanobacteria using solid-phase microextraction followed by gas chromatography coupled to mass spectrometry. *Scientific reports*, 12(1), 3661.
54. Lasta, P., Vieira, K. R., Pinheiro, P. N., Wagner, R., Zepka, L. Q., & Jacob-Lopes, E. (2021). Volatile fraction and aroma properties of microalgae *Scenedesmus obliquus*. *Scientia Plena*, 17(8).
55. Anvar, A. and B. Nowruzi, Bioactive properties of spirulina: A review. *Microb. Bioact*, 2021. 4: p. 134-142.
56. Luo, G., Liu, H., Yang, S., Sun, Z., Sun, L., & Wang, L. (2024). Manufacturing processes, additional nutritional value and versatile food applications of fresh microalgae Spirulina. *Frontiers in Nutrition*, 11, 1455553.
57. Agustini, T. W., Suzery, M., Sutrisnanto, D., & Ma'ruf, W. F. (2015). Comparative study of bioactive substances extracted from fresh and dried Spirulina sp. *Procedia Environmental Sciences*, 23, 282-289.

58. Chambers, E. and K. Koppel, *Associations of Volatile Compounds with Sensory Aroma and Flavor: The Complex Nature of Flavor*. Molecules, 2013. 18(5): p. 4887-4905.
59. Hosoglu, M.I., Y. Karagul-Yuceer, and O. Guneser, *Aroma characterization of heterotrophic microalgae Cryptothecodium cohnii using solid-phase microextraction and gas chromatography–mass spectrometry/olfactometry during different growth phases*. Algal research, 2020. 49: p. 101928.
60. Agilent Technologies. Westland J. (2021). Use of salt to increase analyte concentration in SPME headspace applications.
61. Algenwerk. DIE ERSTE FRISCHE SPIRULINA IN GANZ DEUTSCHLAND. 2025. [Internet]. Zuletzt geändert 2025. [letzter Zugriff 22.02.2025]. URL <https://algenwerk.de/>
62. borchers fine food GmbH & Co. KG - Produkte. [Internet]. Zuletzt geändert 2025. [letzter Zugriff 22.02.2025]. URL <https://www.borchers-group.de/startseite/produkte/>.
63. raabvitalfood. Natürlich. Gut. Versorgt. [Internet]. Zuletzt geändert 2025. [letzter Zugriff 22.02.2025]. URL <https://www.raabvitalfood.de/>.
64. MySuperfoods. [Internet]. Zuletzt geändert 2025. [letzter Zugriff 22.02.2025]. URL <https://mysuperfoods.com>.
65. Gujar, A., Anderson, T., Cavagnino, D., & Patel, A. (2018). Comparative analysis of mass spectral matching for confident compound identification using the advanced electron ionization source for GC-MS. Thermoscientific, 10598, 1-7.
66. National Institute of Standards and Technology (NIST). Basis for Interpretation of the Library Search Results. NIST/EPA/NIH Mass Spectral Library (NIST 17) and NIST Mass Spectral Search Program (Version 2.3) User's Guide, p. 41, National Institute of Standards and Technology, 2017.
67. Lawless, H.T. and H. Heymann, *Sensory evaluation of food: principles and practices*. 2010: Springer Science & Business Media.
68. Delwiche, J., *The impact of perceptual interactions on perceived flavor*. Food Quality and preference, 2004. 15(2): p. 137-146.
69. Asioli, D., Varela, P., Hersleth, M., Almli, V. L., Olsen, N. V., & Næs, T. (2017). A discussion of recent methodologies for combining sensory and extrinsic product properties in consumer studies. Food Quality and Preference, 56, 266-273.
70. Varela, P. and G. Ares, *Sensory profiling, the blurred line between sensory and consumer science. A review of novel methods for product characterization*. Food Research International, 2012. 48(2): p. 893-908.
71. Ares, G. and S. Jaeger, *Check-all-that-apply (CATA) questions with consumers in practice: Experimental considerations and impact on outcome*, in *Rapid sensory profiling techniques*. 2015, Elsevier. p. 257-280.
72. Jaeger, S. R., Chheang, S. L., Yin, J., Bava, C. M., Gimenez, A., Vidal, L., & Ares, G. (2013). Check-all-that-apply (CATA) responses elicited by consumers: Within-assessor reproducibility and stability of sensory product characterizations. Food Quality and Preference, 30(1), 56-67.
73. Alexi, N., Nanou, E., Lazo, O., Guerrero, L., Grigorakis, K., & Byrne, D. V. (2018). Check-All-That-Apply (CATA) with semi-trained assessors: Sensory profiles closer to descriptive analysis or consumer elicited data?. Food Quality and Preference, 64, 11-20.74.
74. Ares, G. and P. Varela, *Trained vs. consumer panels for analytical testing: Fueling a long lasting debate in the field*. Food Quality and Preference, 2017. 61: p. 79-86.
75. Alcantara, M.d. and D.D.G.C. Freitas-Sá, *Rapid and versatile sensory descriptive methods—an updating of sensory science*. Brazilian Journal of Food Technology, 2018. 21: p. e2016179.
76. Ares, G., Dauber, C., Fernández, E., Giménez, A., & Varela, P. (2014). Penalty analysis based on CATA questions to identify drivers of liking and directions for product reformulation. Food Quality and Preference, 32, 65-76.
77. Ares, G., Bruzzone, F., Vidal, L., Cadena, R. S., Giménez, A., Pineau, B., et al. (2014). Evaluation of a rating-based variant of check-all-that-apply questions: Rate-all-that-apply (RATA). Food quality and preference, 36, 87-95.
78. Oppermann, A. K. L., De Graaf, C., Scholten, E., Stieger, M., & Piqueras-Fiszman, B. (2017). Comparison of Rate-All-That-Apply (RATA) and Descriptive sensory Analysis (DA) of model double emulsions with subtle perceptual differences. Food Quality and Preference, 56, 55-68.
79. Antúnez, L., Machin, L., Ares, G., & Jaeger, S. R. (2019). Visual attention to rate-all-that-apply (RATA) questions: A case study with apple images as food stimuli. Food Quality and Preference, 72, 136-142.
80. Vidal, L., Ares, G., Hedderley, D. I., Meyners, M., & Jaeger, S. R. (2018). Comparison of rate-all-that-apply (RATA) and check-all-that-apply (CATA) questions across seven consumer studies. Food Quality and Preference, 67, 49-58.
81. Sidel, J. L., Bleibaum, R. N., Tao, K. W. C., Kemp, S., Hort, J., & Hollowood, T. (2018). Descriptive analysis in sensory evaluation. Quantitative Descriptive Analysis, 287-318.
82. Paraskevopoulou, A., et al., *Volatile Profiling of Spirulina Food Supplements*. Foods, 2024. 13(8): p. 1257.
83. Magpusao, J., I. Oey, and B. Kebede, *Changes in volatile and fatty acid compositions of selected microalgal suspensions with high pressure homogenization*. Algal Research, 2022. 67: p. 102867.
84. Milovanović, I., Mišan, A., Simeunović, J., Kovač, D., Jambrec, D., & Mandić, A. (2015). Determination of volatile organic compounds in selected strains of cyanobacteria. Journal of Chemistry, 2015(1), 969542.
85. Magpusao, J., I. Oey, and B. Kebede, *Chemical, rheological, and volatile profiling of microalgae Arthrospira, Isochrysis, Nannochloropsis, and Tetraselmis species*. Food Innovation and Advances, 2024. 3(2): p. 75-87.
86. Ares, G., Jaeger, S. R., Bava, C. M., Chheang, S. L., Jin, D., Gimenez, A., et al. (2013). CATA questions for sensory product characterization: Raising awareness of biases. Food Quality and Preference, 30(2), 114-127.
87. Civille, G. V., Carr, B. T., & Osdoba, K. E. (2024). *Sensory evaluation techniques*. CRC press.

88. Stone, H., R.N. Bleibaum, and H.A. Thomas, *Sensory evaluation practices*. 2020: Academic press.
89. International Organization for Standardization (ISO). *General Guidance for the Design of Test Rooms (ISO 8589:2007)*. ISO, 2007, Geneva, Switzerland.
90. Bortz, J. and C. Schuster, *Statistik für human- und sozialwissenschaftler: limitierte sonderausgabe*. 2011: Springer-Verlag.
91. Bender, R., S. Lange, and A. Ziegler, *Multiples testen. DMW-Deutsche Medizinische Wochenschrift*, 2007. 132(S 01): p. e26-e29.
92. Chorus, I., & Welker, M. (2021). *Toxic cyanobacteria in water: a guide to their public health consequences, monitoring and management (p. 858)*. Taylor & Francis.
93. Komárek, J. (2014). *Taxonomic classification of cyanoprokaryotes (cyanobacterial genera), using a polyphasic approach*. Preslia, 86
94. Kothari, V., S. Ray, and P. Kumar, *Microbial Products for Health and Nutrition*. 2024, Springer.
95. Sasson, A., *Microalgal biotechnologies: Recent developments and prospects for developing countries*. 1999.
96. Habib, M. A. B., Parvin, M., Huntington, T. C., & Hasan, M. R. (2008). *A review on culture, production and use of Spirulina as food for humans and feeds for domestic animals*.
97. Farrar, W., *Tecuitlatl; a glimpse of Aztec food technology*. 1966.
98. Stizenberger, E. (1852). *Spirulina und Arthrospira (nov. gen.)*. Hedwigia, 1, 32-34.
99. Geitler, L. (1932). *Cyanophyceae. Kryptogamen-Flora von Deutschland, Österreich und der Schweiz*, 14.
100. Schopf, J.W., *Microfossils of the Early Archean Apex chert: new evidence of the antiquity of life*. Science, 1993. 260(5108): p. 640-646.
101. Papapanagiotou, G., & Gkelis, S. (2019). *Taxonomic revision of commercially used Arthrospira (Cyanobacteria) strains: a polyphasic approach*. European Journal of Phycology, 54(4), 595-608..
102. Ali, S.K. and A.M. Saleh, *Spirulina-an overview*. International journal of Pharmacy and Pharmaceutical sciences, 2012. 4(3): p. 9-15.
103. Komarek, J., *Cyanobacterial taxonomy: current problems and prospects for the integration of traditional and molecular approaches*. Algae, 2006. 21(4): p. 349-375.
104. Sharoba, A.M., *Nutritional value of spirulina and its use in the preparation of some complementary baby food formulas*. Journal of food and dairy sciences, 2014. 5(8): p. 517-538.
105. Dewi, E.N., U. Amalia, and M. Mel, *The Effect of different treatments to the amino acid contents of micro algae Spirulina sp*. Aquatic Procedia, 2016. 7: p. 59-65.
106. El-Anany, A. M., Althwab, S. A., Alhomaid, R. M., Ali, R. F., & Mousa, H. M. (2023). *Effect of spirulina (Arthrospira platensis) powder addition on nutritional and sensory attributes of chicken mortadella*. Italian Journal of Food Science, 35(4), 1.
107. Falquet, J. and J. Hurni, *The nutritional aspects of Spirulina*. Antenna Foundation, 1997.
108. Morsy, O. M., Sharoba, A. M., El-Desouky, A. I., Bahlol, H. E. M., & Abd El Mawla, E. M. (2014). *Production and evaluation of some extruded food products using spirulina algae*. Annals of Agricultural Science, Moshtohor, 52(4), 329-342.
109. Ryu, Y. K., Lee, W. K., Choi, W. Y., Kim, T., Lee, Y. J., Park, A., et al. (2024). *Potential of a chicken manure concentrate additive for Arthrospira maxima (Cyanophyceae): biochemical characterization and phycocyanin production*. Phycologia, 63(2), 158-169.
110. Soma, K., Kals, J., Opiyo, M. A., Ndambi, A., García-Cubero, R., Barbosa, M. J., et al. (2024). *Toward sustainable food systems: can spirulina (Arthrospira platensis) become a sustainable source of protein to enhance the nutritional benefits of cultured Nile tilapia (Oreochromis niloticus)?* Frontiers in Sustainable Food Systems, 8, 1283150.
111. Salmeán, G. G., Castillo, L. H. F., & Chamorro-Cevallos, G. (2015). *Nutritional and toxicological aspects of Spirulina (Arthrospira)*. Nutrición hospitalaria: Organo oficial de la Sociedad española de nutrición parenteral y enteral, 32(1), 34-40.
112. Bahlol, H., *Utilization of Sprulina Algae to improve the nutritional value of kiwifruits and cantaloupe nectar blends*. Annals of Agricultural Science, Moshtohor, 2018. 56(4th ICBAA): p. 315-324.
113. Ramírez-Rodrigues, M. M., Estrada-Beristain, C., Metri-Ojeda, J., Pérez-Alva, A., & Baigts-Allende, D. K. (2021). *Spirulina platensis protein as sustainable ingredient for nutritional food products development*. Sustainability, 13(12), 6849.
114. Bhakar, R., R. Kumar, and S. Pabbi, *Total lipids and fatty acid profile of different Spirulina strains as affected by salinity and incubation time*. Vegetos, 2013. 26(2s): p. 148-54.
115. Neumann, C., *Ernährungsphysiologische Bewertung von Spirulina platensis für den Einsatz in nachhaltig ressourcenschonenden Ernährungskonzepten der Schweine- und Hähnchenmast: The nutritional-physiological evaluation of Spirulina platensis in sustainable resource-saving nutritional concepts for fattening pigs and chickens*. 2018, Georg-August-Universität Göttingen.
116. Tarantino, L., *Agency Response Letter GRAS Notice No. GRN000127*. FDA Home page, 2003.
117. Europäische Behörde für Lebensmittelsicherheit (EFSA). [Internet]. Zuletzt geändert 2025. [letzter Zugriff 22.02.2025]. URL: <https://www.efsa.europa.eu/de>.
118. Thangsiri, S., Inthachat, W., Temviriyankul, P., Sahasakul, Y., Trisonthi, P., Pan-Utai, W., et al. (2024). *Bioactive compounds and in vitro biological properties of Arthrospira platensis and Athrospira maxima: a comparative study*. Scientific Reports, 14(1), 23786.
119. Sotiroudis, T.G. and G.T. Sotiroudis, *Health aspects of Spirulina (Arthrospira) microalga food supplement*. Journal of the Serbian Chemical Society, 2013. 78(3): p. 395-405.
120. Marles, R. J., Barrett, M. L., Barnes, J., Chavez, M. L., Gardiner, P., Ko, R., et al. (2011). *United States pharmacopeia safety evaluation of Spirulina*. Critical reviews in food science and nutrition, 51(7), 593-604.

121. Le, T.-M., A.C. Knulst, and H. Röckmann, *Anaphylaxis to Spirulina confirmed by skin prick test with ingredients of Spirulina tablets*. *Food and chemical toxicology*, 2014. 74: p. 309-310.
122. Ladjal-Etoumi, Y., Douik, L. H., Hamadi, M., Abdullah, J. A. A., Cherifi, Z., Keddar, M. N., et al. (2024). *Physicochemical and functional properties of spirulina and chlorella proteins obtained by iso-electric precipitation*. *Food Biophysics*, 19(2), 439-452.
123. Tibbetts, S.M., J.E. Milley, and S.P. Lall, *Chemical composition and nutritional properties of freshwater and marine microalgal biomass cultured in photobioreactors*. *Journal of Applied Phycology*, 2015. 27: p. 1109-1119.
124. Elmada, I. (2011). *Die große GU Nährwert-Kalorien-Tabelle 2012/13*. Gräfe und Unzer.
125. Marín-Marín, C. A., Estrada-Peláez, J. A., Delgado Naranjo, J. M., & Zapata Ocampo, P. A. (2024). *Increasing concentrations of Arthrospira maxima sonicated biomass yields enhanced growth in basil (*Ocimum basilicum*, Lamiaceae) seedlings*. *Horticulturae*, 10(2).
126. Andreeva, A., Budenkova, E., Babich, O., Sukhikh, S., Ulrikh, E., Ivanova, S., et al. (2021). *Production, purification, and study of the amino acid composition of microalgae proteins*. *Molecules*, 26(9), 2767.
127. WHO, J., *Protein and amino acid requirements in human nutrition*. *World Health Organization technical report series*, 2007(935): p. 1.
128. Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union. *Verordnung (EU) Nr. 1169/2011 des Europäischen Parlaments und des Rates über die Information der Verbraucher über Lebensmittel*. *Amtsblatt der Europäischen Union*, vol. L 304, 2011, pp. 18-63
129. Stehle, P. and S. Ellinger, *Einführung in die Humanernährung: Physiologische Grundlagen, Nährstoffe, Ernährungsformen*. 2024: Springer-Verlag.
130. Volkmann, H., Imianovsky, U., Oliveira, J. L., & Sant'Anna, E. S. (2008). *Cultivation of Arthrospira (Spirulina) platensis in desalinator wastewater and salinated synthetic medium: protein content and amino-acid profile*. *Brazilian Journal of Microbiology*, 39, 98-101.
131. Seyidoglu, N., S. Inan, and C. Aydin, *A Prominent Superfood: Spirulina platensis*. 2017, InTech.
132. Abd El-Salam, A., O. Morsy, and E. Abd El Mawla, *Production and evaluation crackers and instant noodles supplement with spirulina algae*. *Curr. Sci. Int.*, 2017. 6(4): p. 908-919.
133. Vonshak, A., *Spirulina platensis arthrospira: physiology, cell-biology and biotechnology*. 1997: CRC press.
134. Passos, L. S., de Freitas, P. N. N., Menezes, R. B., de Souza, A. O., Silva, M. F. D., Converti, A., & Pinto, E. (2023). *Content of lipids, fatty acids, carbohydrates, and proteins in continental cyanobacteria: A systematic analysis and database application*. *Applied Sciences*, 13(5), 3162.
135. Hu, H., Li, Y., Yin, C., & Ouyang, Y. (2011). *Isolation and characterization of a mesophilic Arthrospira maxima strain capable of producing docosahexaenoic acid*. *Journal of microbiology and biotechnology*, 21(7), 697-702.
136. Palanisamy, K. M., Paramasivam, P., Jayakumar, S., Maniam, G. P., Rahim, M. H. A., & Govindan, N. (2021, February). *Economical cultivation system of microalgae Spirulina platensis for lipid production*. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 641, No. 1, p. 012022). IOP Publishing.
137. Bahrioglu, E. and E. Ercan, *Replacement of dried freshwater alga Arthrospira maxima with marine diatom *Schizochytrium limacinum* in a diet of freshwater mussel *Unio crassus* (Philipsson, 1788)*. *Aquaculture International*, 2022. 30(2): p. 999-1010.
138. Rachidi, F., Benhima, R., Kasmi, Y., Sbabou, L., & Arroussi, H. E. (2021). *Evaluation of microalgae polysaccharides as biostimulants of tomato plant defense using metabolomics and biochemical approaches*. *Scientific reports*, 11(1), 930.
139. Liu, Y., Wang, Y., Cao, L., Huang, Z., Zhou, Y., Fan, R., & Li, C. (2023). *Preparation and characterization of intracellular and exopolysaccharides during cycle cultivation of Spirulina platensis*. *Foods*, 12(5), 1067.
140. Cuellar Bermudez, S.P., *The cyanobacterium Limnospira: carbohydrates production, photosynthetic activity, and biomass harvesting*. 2022.
141. Podgórska-Kryszczuk, I., *Spirulina—An Invaluable Source of Macro- and Micronutrients with Broad Biological Activity and Application Potential*. *Molecules*, 2024. 29(22): p. 5387.
142. Pugh, N., Ross, S. A., ElSohly, H. N., ElSohly, M. A., & Pasco, D. S. (2001). *Isolation of three high molecular weight polysaccharide preparations with potent immunostimulatory activity from Spirulina platensis, Aphanizomenon flos-aquae and Chlorella pyrenoidosa*. *Planta medica*, 67(08), 737-742.
143. Markou, G., Eliopoulos, C., Argyri, A., & Arapoglou, D. (2021). *Production of Arthrospira (Spirulina) platensis enriched in β-glucans through phosphorus limitation*. *Applied Sciences*, 11(17), 8121.
144. Al-Badwy, A. H., Khalil, A. M., Bashal, A. H., & Kebeish, R. (2023). *Polysaccharides from Spirulina platensis (PSP): promising biostimulants for the green synthesis of silver nanoparticles and their potential application in the treatment of cancer tumors*. *Microbial Cell Factories*, 22(1), 247.
145. van den Oever, S.P. and H.K. Mayer, *Biologically active or just “pseudo”-vitamin B12 as predominant form in algae-based nutritional supplements?* *Journal of Food Composition and Analysis*, 2022. 109: p. 104464.
146. Wells, M. L., Potin, P., Craigie, J. S., Raven, J. A., Merchant, S. S., Hellwell, K. E., et al. (2017). *Algae as nutritional and functional food sources: revisiting our understanding*. *Journal of applied phycology*, 29, 949-982.
147. Tzachor, A., van den Oever, S. P., Mayer, H. K., Asfur, M., Smidt-Jensen, A., Geirsdóttir, M., et al. (2024). *Photonic management of Spirulina (Arthrospira platensis) in scalable photobioreactors to achieve biologically active unopposed vitamin B12*. *Discover Food*, 4(1), 69.
148. Fernández-Cárdenas, T., H. GONZÁLEZ-SAN MIGUEL, and L. Travieso, *Determinación de vitaminas del Complejo B en Arthrospira maxima por cromatografía líquida de alta resolución*. *Ars Pharmaceutica (Internet)*, 2001. 42(3-4): p. 171-183.
149. Parra, J., Torres, A., Rojas, D., Arredondo, B. O., Sena, L., & Perdomo, T. (2019). *Comparación nutricional entre dos cepas de Arthrospira maxima de origen geográfico incierto*. *Revista Latinoamericana de Biotecnología Ambiental y Algal*, 10(2), 45-60.

150. Andrade, L.M., Chlorella and Spirulina Microalgae as Sources of Functional Foods, Nutraceuticals, and Food Supplements; an Overview. *MOJ Food Processing & Technology*, 2018. 6(1).
151. Deutsche Gesellschaft für Ernährung (DGE). (2024). Referenzwerte – Die DGE/ÖGE-Referenzwerte für die Nährstoffzufuhr sind die Basis für die praktische Umsetzung einer vollwertigen Ernährung. [Internet]. Zuletzt geändert 2025. [letzter Zugriff 22.02.2025]. URL: <https://www.dge.de/wissenschaft/referenzwerte/?L=0>
152. Becker, E.W., Microalgae for human and animal nutrition. *Handbook of microalgal culture: applied phycology and biotechnology*, 2013
153. Gaytán, K. S. H., García Gómez, C., Vázquez, S. I. S., de Jesús Carballo Méndez, F., Reyes, J. M. M., & Santoscoy, R. A. C. (2024). Food waste leachate valorization for sustainable biomass production from *Arthrospira maxima*. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 43(3), e14327.
154. Rahim, A., Çakir, C., Ozturk, M., Şahin, B., Soulaimani, A., Sibaouieh, M., et al. (2021). Chemical characterization and nutritional value of *Spirulina platensis* cultivated in natural conditions of Chichaoua region (Morocco). *South African Journal of Botany*, 141, 235-242.
155. Liestianty, D., Rodianawati, I., Arfah, R. A., Assa, A., Patimah, Sundari, & Muliadi. (2019, May). Nutritional analysis of spirulina sp to promote as superfood candidate. In *IOP conference series: materials science and engineering* (Vol. 509, p. 012031). IOP Publishing.
156. Lamela, T. and F. Márquez-Rocha, Phycocyanin production in seawater culture of *Arthrospira maxima*. *Ciencias Marinas*, 2000. 26(4).
157. Park, W. S., Kim, H. J., Li, M., Lim, D. H., Kim, J., Kwak, S. S., et al. (2018). Two classes of pigments, carotenoids and c-phycocyanin, in spirulina powder and their antioxidant activities. *Molecules*, 23(8), 2065.
158. Agustini, T. W., Maâ, W. F., Widayat, W., Suzery, M., Hadiyanto, H., & Benjakul, S. (2016). Application of *Spirulina platensis* on ice cream and soft cheese with respect to their nutritional and sensory perspectives. *Jurnal Teknologi (Sciences & Engineering)*, 78(4-2).
159. Papalia, T., R. Sidari, and M.R. Panuccio, Impact of different storage methods on bioactive compounds in *Arthrospira platensis* biomass. *Molecules*, 2019. 24(15): p. 2810.
160. Bumandalai, O., K.L. Bayliss, and N.R. Moheimani, Innovative processes for combating contaminants in fresh *Spirulina*. *Algal Research*, 2024. 78: p. 103397.
161. Desmorieux, H. and F. Hernandez. Biochemical and physical criteria of *Spirulina* after different drying processes. in *Proceedings of the 14th International Drying Symposium (IDS)*, B. 2004.
162. Stunda-Zujeva, A., Berele, M., Lece, A., & Škesters, A. (2023). Comparison of antioxidant activity in various spirulina containing products and factors affecting it. *Scientific reports*, 13(1), 4529.
163. Papadaki, S., Kyriakopoulou, K., Stramarkou, M., Tzovenis, I., & Krokida, M. (2017). Environmental assessment of industrially applied drying technologies for the treatment of *Spirulina platensis*. *IOSR J Environ Sci Toxicol Food Technol*, 11(1), 41-46.
164. Devi, M. A., Subbulakshmi, G., Devi, K. M., & Venkataraman, L. V. (1981). Studies on the proteins of mass-cultivated, blue-green alga (*Spirulina platensis*). *Journal of agricultural and food chemistry*, 29(3), 522-525.
165. Amin, M., ul Haq, A., Shahid, A., Boopathy, R., & Syafuddin, A. (2024). *Spirulina* as a Food of the Future. In *Pharmaceutical and Nutraceutical Potential of Cyanobacteria* (pp. 53-83). Cham: Springer International Publishing.
166. A El-Chaghaby, G., Rashad, S., F Abdel-Kader, S., A Rawash, E. S., & Abdul Moneem, M. (2019). Assessment of phytochemical components, proximate composition and antioxidant properties of *Scenedesmus obliquus*, *Chlorella vulgaris* and *Spirulina platensis* algae extracts. *Egyptian Journal of Aquatic Biology and Fisheries*, 23(4), 521-526.
167. Blagojević, D., Babić, O., Rašeta, M., Šibil, F., Janjušević, L., & Simeunović, J. (2018). Antioxidant activity and phenolic profile in filamentous cyanobacteria: The impact of nitrogen. *Journal of applied phycology*, 30, 2337-2346.
168. Citi, V., Torre, S., Flori, L., Usai, L., Aktay, N., Dunford, N. T., et al. (2024). Nutraceutical features of the phycobiliprotein c-phycocyanin: Evidence from *Arthrospira platensis* (*Spirulina*). *Nutrients*, 16(11), 1752.
169. Lee, E. H., Park, J. E., Choi, Y. J., Huh, K. B., & Kim, W. Y. (2008). A randomized study to establish the effects of spirulina in type 2 diabetes mellitus patients. *Nutrition Research and Practice*, 2(4), 295-300.
170. Sorrenti, V., Castagna, D. A., Fortinguerra, S., Buriani, A., Scapagnini, G., & Willcox, D. C. (2021). *Spirulina* microalgae and brain health: A scoping review of experimental and clinical evidence. *Marine drugs*, 19(6), 293.
171. McKinley, L., Acen, I. K., Alshannaq, A., Christensen, L., Dolan, K., Kates, A., et al. (2024). Antiviral potential of spirulina in individuals with human immunodeficiency virus or Hepatitis C virus infections: A systematic review and meta-analysis. *Clinical Nutrition ESPEN*, 63.
172. Alam, A., Siddiqui, M. A., Quamri, A., Fatima, S., Rogaiya, M., & Ahmad, Z. (2016). Efficacy of *Spirulina* (Tahlab) in patients of type 2 diabetes mellitus (Zabetus Shakri): A randomized controlled trial. *Journal of Diabetes & Metabolism*, 7(10), 1-5.
173. Mazloomi, S. M., Samadi, M., Davarpanah, H., Babajafari, S., Clark, C. C., Ghaemfar, Z., et al. (2022). The effect of *Spirulina* sauce, as a functional food, on cardiometabolic risk factors, oxidative stress biomarkers, glycemic profile, and liver enzymes in nonalcoholic fatty liver disease patients: A randomized double-blinded clinical trial. *Food Science & Nutrition*, 10(2), 317-328.
174. Rahnama, I., Arabi, S. M., Chambari, M., Bahrami, L. S., Hadi, V., Mirghazanfari, S. M., et al. (2023). The effect of *Spirulina* supplementation on lipid profile: GRADE-assessed systematic review and dose-response meta-analysis of data from randomized controlled trials. *Pharmacological Research*, 193, 106802.
175. Hatami, E., Ghalishourani, S. S., Najafgholizadeh, A., Pourmasoumi, M., Hadi, A., Clark, C. C., et al. (2021). The effect of *Spirulina* on type 2 diabetes: a systematic review and meta-analysis. *Journal of Diabetes & Metabolic Disorders*, 20, 883-892.
176. Shiri, H., Yasbolaghi Sharahi, J., Alizadeh Sani, M., Mousavi, S. M. J., Nematollahi, M. H., Soleimani, A. A., et al. (2025). The Effect of *Spirulina* Supplementation on Blood Pressure in Adults: A GRADE-Assessed Systematic Review and Meta-Analysis of Randomized Clinical Trials. *Phytotherapy Research*, 39(1), 397-412.

177. Shahinfar, H., Jayedi, A., Torabynasab, K., Payandeh, N., Martami, F., Moosavi, H., et al. (2023). Comparative effects of nutraceuticals on body weight in adults with overweight or obesity: A systematic review and network meta-analysis of 111 randomized clinical trials. *Pharmacological Research*, 196, 106944.
178. Moradi, S., Ziae, R., Foshati, S., Mohammadi, H., Nachvak, S. M., & Rouhani, M. H. (2019). Effects of Spirulina supplementation on obesity: A systematic review and meta-analysis of randomized clinical trials. *Complementary therapies in medicine*, 47, 102211.
179. Szulinska, M., Gibas-Dorna, M., Miller-Kasperek, E., Suliburska, J., Miczke, A., Walczak-Galewska, M., et al. (2017). Spirulina maxima improves insulin sensitivity, lipid profile, and total antioxidant status in obese patients with well-treated hypertension: a randomized double-blind placebo-controlled study. *European Review for Medical & Pharmacological Sciences*, 21(10).
180. Zeinalian, R., Farhangi, M. A., Shariat, A., & Saghafi-Asl, M. (2017). The effects of Spirulina Platensis on anthropometric indices, appetite, lipid profile and serum vascular endothelial growth factor (VEGF) in obese individuals: A randomized double blinded placebo controlled trial. *BMC complementary and alternative medicine*, 17, 1-8.
181. Yousefi, R., A. Mottaghi, and A. Saidpour, Spirulina platensis effectively ameliorates anthropometric measurements and obesity-related metabolic disorders in obese or overweight healthy individuals: A randomized controlled trial. *Complement Ther Med*, 2018. 40
182. Hernández-Lepe, M. A., López-Díaz, J. A., Juárez-Oropeza, M. A., Hernández-Torres, R. P., Wall-Medrano, A., & Ramos-Jiménez, A. (2018). Effect of Arthrospira (Spirulina) maxima supplementation and a systematic physical exercise program on the body composition and cardiorespiratory fitness of overweight or obese subjects: a double-blind, randomized, and crossover controlled trial. *Marine drugs*, 16(10), 364.
183. Miczke, A., Szulinska, M., Hansdorfer-Korzon, R., Kręgielska-Narożna, M., Suliburska, J., Walkowiak, J., & Bogdański, P. (2016). Effects of spirulina consumption on body weight, blood pressure, and endothelial function in overweight hypertensive Caucasians: a doubleblind, placebo-controlled, randomized trial. *European Review for Medical & Pharmacological Sciences*, 20(1).
184. Beihaghi, M. and Z. Taherzadeh, The effects of oral administration of spirulina platensis (cultured iranian) on blood glucose and glycosylated hemoglobin blood in type ii diabetes mellitus patients. *Iranian Journal of Diabetes and Metabolism*, 2017. 16(3)
185. Anitha, L. and K. Chandrasekha, Effect of supplementation of spirulina on blood glucose, glycosylated hemoglobin and lipid profile of male non-insulin dependent diabetics. 2010.
186. Karizi, S. R., Armanmehr, F., Azadi, H. G., Zahroodi, H. S., Ghalibaf, A. M., Bazzaz, B. S. F., et al. (2023). A randomized, double-blind placebo-controlled add-on trial to assess the efficacy, safety, and anti-atherogenic effect of Spirulina platensis in patients with inadequately controlled type 2 diabetes mellitus. *Phytotherapy Research*, 37(4), 1435-1448.
187. Koite, N. D. L. N., Sanogo, N. G. I., Lépine, O., Bard, J. M., & Ouguerram, K. (2022). Antioxidant efficacy of a spirulina liquid extract on oxidative stress status and metabolic disturbances in subjects with metabolic syndrome. *Marine drugs*, 20(7), 441.
188. Golestan, F., Mogharnasi, M., Erfani-Far, M., & Abtahi-Eivari, S. H. (2021). The effects of spirulina under high-intensity interval training on levels of nesfatin-1, omentin-1, and lipid profiles in overweight and obese females: A randomized, controlled, single-blind trial. *Journal of Research in Medical Sciences*, 26(1), 10.
189. van den Driessche, J. J., Plat, J., Konings, M. C., & Mensink, R. P. (2020). Effects of spirulina and wakame consumption on intestinal cholesterol absorption and serum lipid concentrations in non-hypercholesterolemic adult men and women. *European Journal of Nutrition*, 59, 2229-2236.
190. Ghaem Far, Z., Babajafari, S., Kojuri, J., Mohammadi, S., Nouri, M., Rostamizadeh, P., et al. (2021). Antihypertensive and antihyperlipemic of spirulina (Arthrospira platensis) sauce on patients with hypertension: A randomized triple-blind placebo-controlled clinical trial. *Phytotherapy Research*, 35(11), 6181-6190.
191. Jensen, G. S., Drapeau, C., Lenninger, M., & Benson, K. F. (2016). Clinical safety of a high dose of phycocyanin-enriched aqueous extract from Arthrospira (Spirulina) platensis: results from a randomized, double-blind, placebo-controlled study with a focus on anticoagulant activity and platelet activation. *Journal of Medicinal Food*, 19(7), 645-653.
192. Moradi, S., Zobairi, M., Feizi, A., Clark, C. C., & Entezari, M. H. (2021). The effects of spirulina (Arthrospira platensis) supplementation on anthropometric indices, blood pressure, sleep quality, mental health, fatigue status and quality of life in patients with ulcerative colitis: a randomised, double-blinded, placebo-controlled trial. *International journal of clinical practice*, 75(10), e14472.
193. Martínez-Sámano, J., Torres-Montes de Oca, A., Luqueño-Bocard, O. I., Torres-Durán, P. V., & Juárez-Oropeza, M. A. (2018). Spirulina maxima decreases endothelial damage and oxidative stress indicators in patients with systemic arterial hypertension: Results from exploratory controlled clinical trial. *Marine drugs*, 16(12), 496.
194. Aghasadeghi, M. R., Zaheri Birgani, M. A., Jamalimoghadasiyahkali, S., Hosamirudsari, H., Moradi, A., Jafari-Sabet, M., et al. (2024). Effect of high-dose Spirulina supplementation on hospitalized adults with COVID-19: a randomized controlled trial. *Frontiers in Immunology*, 15, 1332425.
195. Ngo-Matip, M. E., Pieme, C. A., Azabji-Kenfack, M., Moukette, B. M., Korosky, E., Stefanini, P., et al. M. (2015). Impact of daily supplementation of Spirulina platensis on the immune system of naïve HIV-1 patients in Cameroon: a 12-months single blind, randomized, multicenter trial. *Nutrition Journal*, 14, 1-7.
196. Azabji-Kenfack, M., Dikosso, S. E., Loni, E. G., Onana, E. A., Sobngwi, E., Gbaguidi, E., et al. (2011). Potential of spirulina platensis as a nutritional supplement in malnourished HIV-infected adults in Sub-Saharan Africa: a randomised, single-blind study. *Nutrition and Metabolic Insights*, 4, NMI-S5862.
197. Yakoot, M. and A. Salem, Spirulina platensis versus silymarin in the treatment of chronic hepatitis C virus infection. A pilot randomized, comparative clinical trial. *BMC Gastroenterology*, 2012. 12(1): p. 32.
198. Choi, W. Y., Lee, W. K., Kim, T. H., Ryu, Y. K., Park, A., Lee, Y. J., et al. (2022). The effects of spirulina maxima extract on memory improvement in those with mild cognitive impairment: A randomized, double-Blind, placebo-controlled clinical trial. *Nutrients*, 14(18)
199. Johnson, M., Hassinger, L., Davis, J., Devor, S. T., & DiSilvestro, R. A. (2016). A randomized, double blind, placebo controlled study of spirulina supplementation on indices of mental and physical fatigue in men. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 67(2), 203-206.

200. Chaitanya, N. C., Chikte, D., Kumar, Y. P., Komali, G., Yellarthi, S. P., Reddy, C. S., ... & Panta12, P. (2022). Efficacy of spirulina 500 mg vs triamcinolone acetonide 0.1% for the treatment of oral lichen planus: A randomized clinical trial. *The Journal of Contemporary Dental Practice*, 23(5), 553.
201. Costa, J. A. V., Freitas, B. C. B., Rosa, G. M., Moraes, L., Morais, M. G., & Mitchell, B. G. (2019). Operational and economic aspects of Spirulina-based biorefinery. *Bioresource technology*, 292, 121946.
202. Benemann, J. *Microalgae for biofuels and animal feeds*. Energies, 2013. 6(11): p. 5869-5886.
203. Araújo, R., Vázquez Calderón, F., Sánchez López, J., Azevedo, I. C., Bruhn, A., Fluch, S., ... & Ullmann, J. (2021). Current status of the algae production industry in Europe: an emerging sector of the blue bioeconomy. *Frontiers in Marine Science*, 7, 626389.
204. Persistence Market Research. (n.d.). Spirulina market size, share and growth forecast for 2024 - 2031. [Internet]. Zuletzt geändert 2025. [letzter Zugriff 22.02.2025]. URL: <https://www.persistencemarketresearch.com>.
205. Market.us. (2024). Spirulina statistics 2024 by nature, benefits, health. [Internet]. Zuletzt geändert 2025. [letzter Zugriff 22.02.2025]. URL: <https://media.market.us/spirulina-statistics/>.
206. Statistisches Bundesamt (Destatis). Statistisches Bundesamt. [Internet]. Zuletzt geändert 2025. [letzter Zugriff 22.02.2025]. URL: <https://www.destatis.de>.
207. Bundeszentrale für politische Bildung (bpb). Sozialbericht 2024. 2024.
208. Ernährungsreport 2024. Bundesinstitut für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL).
209. Allied Market Research. (n.d.). Spirulina market size, share, competitive landscape and trend analysis report, by type, application and formulation: Global opportunity analysis and industry forecast, 2020-2027. [Internet]. Zuletzt geändert 2025. [letzter Zugriff 22.02.2025]. URL: <https://www.alliedmarketresearch.com/spirulina-market>
210. Karkos, P. D., Leong, S. C., Karkos, C. D., Sivaji, N., & Assimakopoulos, D. A. (2011). Spirulina in clinical practice: evidence-based human applications. *Evidence-based complementary and alternative medicine*, 2011(1), 531053.
211. Spinola, M.P., A.R. Mendes, and J.A.M. Prates. Chemical Composition, Bioactivities, and Applications of Spirulina (*Limnospira platensis*) in Food, Feed, and Medicine. *Foods*, 2024. 13(22).
212. Raspe, H., Klinische Medizin, klinische Forschung und klinische Epidemiologie. *Medizinische Klinik*, 2004. 99: p. 97-103.
213. Buchberger, B., von Elm, E., Gartlehner, G., Huppertz, H., Antes, G., Wasem, J., & Meerpohl, J. J. (2014). Bewertung des Risikos für Bias in kontrollierten Studien. *Bundesgesundheitsblatt-Gesundheitsforschung-Gesundheitsschutz*, 57(12), 1432-1438.
214. Van der Stricht, H., Hung, Y., Fischer, A. R., & Verbeke, W. (2024). Consumer segments less or more willing to adopt foods with microalgae proteins. *Food Quality and Preference*, 113, 105047
215. Roßmann, M. and C. Rösch, Key-Narratives of Microalgae Nutrition: Exploring futures through a public Delphi survey in Germany. *Science and Public Policy*, 2019. 47(1): p. 137-147.
216. Onwezen, M. C., Bouwman, E. P., Reinders, M. J., & Dagevos, H. (2021). A systematic review on consumer acceptance of alternative proteins: Pulses, algae, insects, plant-based meat alternatives, and cultured meat. *Appetite*, 159, 105058.
217. Birch, D., K. Skallerud, and N. Paul, Who eats seaweed? An Australian perspective. *Journal of International Food & Agribusiness Marketing*, 2019. 31(4): p. 329-351.
218. Grahl, S., Strack, M., Weinrich, R., & Mörlein, D. (2018). Consumer-oriented product development: The conceptualization of novel food products based on spirulina (*Arthrospira platensis*) and resulting consumer expectations. *Journal of Food Quality*, 2018(1), 1919482.
219. García-Segovia, P., García Alcaraz, V., Tárrega, A., & Martínez-Monzó, J. (2020). Consumer perception and acceptability of microalgae based breadstick. *Food science and technology international*, 26(6), 493-502.
220. Hernández-López, I., Valdés, J. R. B., Castellari, M., Aguiló-Aguayo, I., Morillas-España, A., Sánchez-Zurano, A., et al. (2021). Utilisation of the marine microalgae *Nannochloropsis* sp. and *Tetraselmis* sp. as innovative ingredients in the formulation of wheat tortillas. *Algal Research*, 58, 102361.
221. Mellor, C., Embling, R., Neilson, L., Randall, T., Wakeham, C., Lee, M. D., & Wilkinson, L. L. (2022). Consumer knowledge and acceptance of "algae" as a protein alternative: A UK-based qualitative study. *Foods*, 11(12), 1703.
222. Michel, F., Knaapila, A., Hartmann, C., & Siegrist, M. (2021). A multi-national comparison of meat eaters' attitudes and expectations for burgers containing beef, pea or algae protein. *Food Quality and Preference*, 91, 104195.
223. Baker, M. T., Lu, P., Parrella, J. A., & Leggette, H. R. (2022). Consumer acceptance toward functional foods: A scoping review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(3), 1217.
224. Weinrich, R. and O. Elshiewy, A cross-country analysis of how food-related lifestyles impact consumers' attitudes towards microalgae consumption. *Algal Research*, 2023. 70: p. 102999.
225. Lucas, B.F. and T.A. Brunner, Factors influencing the willingness to purchase and consume microalgae-based foods: An exploratory consumer study. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 2024: p. 100974.
226. Wassmann, B., C. Hartmann, and M. Siegrist, Novel microalgae-based foods: What influences Singaporean consumers' acceptance? *Food Quality and Preference*, 2024. 113: p. 105068.
227. Ran, Y., Lewis, A. N., Dawkins, E., Grah, R., Vanhuyse, F., Engström, E., Lambe, F. (2022). Information as an enabler of sustainable food choices: A behavioural approach to understanding consumer decision-making. *Sustainable Production and Consumption*, 31
228. Lafarga, T., Pieroni, C., D'Imporzano, G., Maggioni, L., Adani, F., & Acién, G. (2021). Consumer Attitudes towards Microalgae Production and Microalgae-Based Agricultural Products: The Cases of Almería (Spain) and Livorno (Italy). *ChemEngineering*, 5(2), 27.

229. Mosibo, O., G. Ferrentino, and C. Udenigwe, *Microalgae Proteins as Sustainable Ingredients in Novel Foods: Recent Developments and Challenges*. *Foods*, 2024. 13: p. 733.
230. Coleman, B., Van Poucke, C., Dewitte, B., Ruttens, A., Moerdijk-Poortvliet, T., Latsos, C., et al. (2022). *Potential of microalgae as flavoring agents for plant-based seafood alternatives*. *Future Foods*, 5, 100139.
231. Francezon, N., Tremblay, A., Mouget, J. L., Pasetto, P., & Beaulieu, L. (2021). *Algae as a source of natural flavors in innovative foods*. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 69(40), 11753-11772.
232. Colonia, B. S. O., de Melo Pereira, G. V., de Carvalho, J. C., Karp, S. G., Rodrigues, C., Soccol, V. T., et al. (2023). *Deodorization of algae biomass to overcome off-flavors and odor issues for developing new food products: innovations, trends, and applications*. *Food Chemistry Advances*, 2, 100270.
233. Barden, L. and E.A. Decker, *Lipid oxidation in low-moisture food: A review*. *Critical reviews in food science and nutrition*, 2016. 56(15): p. 2467-2482.
234. Kumar, M., J. Kulshreshtha, and G.P. Singh, *Growth and biopigment accumulation of cyanobacterium Spirulina platensis at different light intensities and temperature*. *Brazilian Journal of Microbiology*, 2011. 42: p. 1128-1135.
235. Álvarez, J.D., *Volatile compounds and associated genes in Cyanobacteria*.
236. McGorrin, R.J., *The significance of volatile sulfur compounds in food flavors: An overview*. *Volatile sulfur compounds in food*, 2011: p. 3-31.
237. Urlass, S., Wu, Y., Nguyen, T. T., Winberg, P., Turner, M. S., & Smyth, H. (2023). *Unravelling the aroma and flavour of algae for future food applications*. *Trends in Food Science & Technology*, 138, 370-381.
238. Jeleń, H. and A. Gracka, *Characterization of aroma compounds: Structure, physico - chemical and sensory properties*. *Flavour: From food to perception*, 2016: p. 126-153.
239. Ughetti, A., D'Eusanio, V., Strani, L., Russo, A. L., & Roncaglia, F. (2024). *Influence of Drying and Storage Conditions on the Volatile Organic Compounds Profile of Spirulina Platensis*. *Separations*, 11(6), 180.
240. Balduyck, L., Stock, T., Bijtebier, S., Bruneel, C., Jacobs, G., Voorspoels, S., et al. (2017). *Integrity of the microalgal cell plays a major role in the lipolytic stability during wet storage*. *Algal research*, 25, 516-524.
241. Nelson, J.A., *Postharvest degradation of microalgae: effect of temperature and water activity*. 2015: Utah State University.
242. Nouri, E. and H. Abbasi, *Effects of different processing methods on phytochemical compounds and antioxidant activity of Spirulina platensis*. *Applied Food Biotechnology*, 2018. 5(4): p. 221-232.
243. López-Pérez, O., del Olmo, A., Picon, A., & Nuñez, M. (2020). *Volatile compounds and odour characteristics during long-term storage of kombu seaweed (*Laminaria ochroleuca*) preserved by high pressure processing, freezing and salting*. *Lwt*, 118, 108710.
244. Zuo, Z., *Why Algae Release Volatile Organic Compounds—The Emission and Roles*. *Frontiers in Microbiology*, 2019. 10.
245. Achyuthan, K. E., Harper, J. C., Manginell, R. P., & Moorman, M. W. (2017). *Volatile metabolites emission by in vivo microalgae—an overlooked opportunity?*. *Metabolites*, 7(3), 39.
246. Dalheim, L., Svenning, J. B., Eilertsen, H. C., Vasskog, T., & Olsen, R. L. (2021). *Stability of lipids during wet storage of the marine diatom *Porosira glacialis* under semi-preserved conditions at 4 and 20 C*. *Journal of Applied Phycology*, 33, 385-395.
247. Leonardos, G., D. Kendall, and N. Barnard, *Odor Threshold Determinations of 53 Odorant Chemicals*. *Journal of the Air Pollution Control Association*, 1969. 19(2): p. 91-95.
248. Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA). (n.d.). *GESTIS-Stoffdatenbank* [Internet]. Zuletzt geändert 2025. [letzter Zugriff 22.02.2025]. URL: <https://gestis.dguv.de/search>.
249. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2024). *Food safety and quality online edition: Specifications for flavourings*. [Internet]. Zuletzt geändert 2025. [letzter Zugriff 22.02.2025]. URL: <https://www.fao.org/food/food-safety-quality/scientific-advice/jecfa/jecfa-flav/en/>.
250. National Library of Medicine (NLM). (n.d.). *PubChem*. Internet]. Zuletzt geändert 2025. [letzter Zugriff 22.02.2025]. URL: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/>.
251. Jacob-Lopes, E., Maroneze, M. M., Deprá, M. C., Sartori, R. B., Dias, R. R., & Zepka, L. Q. (2019). *Bioactive food compounds from microalgae: An innovative framework on industrial biorefineries*. *Current Opinion in Food Science*, 25, 1-7.
252. Moran, L., Bou, G., Aldai, N., Ciardi, M., Morillas-España, A., Sánchez-Zurano, A., ... & Lafarga, T. (2022). *Characterisation of the volatile profile of microalgae and cyanobacteria using solid-phase microextraction followed by gas chromatography coupled to mass spectrometry*. *Scientific reports*, 12(1), 3661.
253. Baur, N. and J. Blasius, *Handbuch methoden der empirischen sozialforschung*. Vol. 13. 2014: Springer.
254. Theobald, A., *Praxis Online-Marktforschung: Grundlagen–Anwendungsbereiche–Durchführung*. 2016: Springer.
255. Heidig, W. and T. Doppelstein, *Wahl und Gestaltung des Fragebogens*, in *Quick Guide Marktforschung im Mittelstand: Wie Sie Ihre Kunden und Märkte besser verstehen*, W. Heidig and T. Doppelstein, Editors.2021, Springer Fachmedien Wiesbaden. p.75-102.
256. Dillman, D.A., J.D. Smyth, and L.M. Christian, *Internet, phone, mail and mixed-mode surveys: the tailored design method*. *Reis*, 2016. 154: p. 161-176.

8. Danksagung

Mit großer Dankbarkeit möchte ich allen Personen danken, die mich während der Anfertigung meiner Masterarbeit unterstützt haben. Mein besonderer Dank gilt vor allem Herrn Prof. Michael Sandmann, der mich mit wertvollen Anregungen und fachlicher Expertise begleitet hat. Ein besonderer Dank gilt auch Gunnar Mühlstädt, der mir die Möglichkeit gegeben hat, meine Forschung in Zusammenarbeit mit dem Algenwerk durchzuführen. Die wöchentlichen Meetings mit Antonia Bätzold waren zudem für den Fortschritt meiner Arbeit sehr wertvoll und haben mich umfassend unterstützt. Die freundliche und offene Kommunikation sowie die fachliche Unterstützung haben wesentlich zum Gelingen meiner Arbeit beigetragen. Ein herzlicher Dank gilt auch Sabrina Scharf, die mich bei den Analysen unterstützt hat. Ihre Expertise und Geduld waren eine große Hilfe während der praktischen Arbeiten. Ebenso danke ich Frau Kulik, Frau Dörnbrack und Frau Sauermilch für ihre Unterstützung in den Laboren. Schlussendlich möchte ich meiner Familie und meinen Freunden danken, die mir während dieser Zeit stets Rückhalt gegeben haben. Ihr Beistand und Ermutigung haben mir geholfen, mich auf die Arbeit zu konzentrieren.

9. Anhang

Anhangsverzeichnis

Anhang-Tabellenverzeichnis	120
Anhang-Abbildungsverzeichnis	120
A1 Online-Fragebogen der Verbraucher*innen Befragung	121
A2 Zusammenfassende Übersicht der verwendeten Messinstrumente und Items.....	133
A3 Ablaufplan zur Planung der GC-MS- und Sensorik-Analysen.....	134
A4 Zusammenfassung der Vorversuche und methodischen Anpassungen	135
A5 Fragebogen der Humansensorische Analyse Replikat I – Probe 853.....	137
Anhang B: Überprüfung der Normalverteilungsannahme	139
Anhang C: Ergebnisse - Ergänzende Statistische Berechnungen	140
C1 Verbraucher*innen-Befragung	140
C2 Humansensorische Analyse	152
C3 GC-MS-Analyse	154
C4 Hauptkomponentenanalyse (PCA)	155
Anhang D: Chromatogramme	156
D1 Chromatogramme der frischen Biomasse.....	156
D2 Chromatogramme der Pulver.....	157

Anhang-Tabellenverzeichnis

Tabelle A. 1: Tabellarische Übersicht der verwendeten Messinstrumente und Items	133
Tabelle A.2: Koordination der GC-MS- und humansensorischen Analyse	134
Tabelle A.3: Zusammenfassung der Vorversuche und methodischen Anpassungen	135
Tabelle A.4: Verteilungsmuster der Items und Skalen aus der Verbraucher*innen-Befragung	139
Tabelle A.5: Verteilungsmuster der Substanzen in der frischen Biomasse.....	139
Tabelle A.6: Verteilungsmuster der Substanzen in den Spirulina- und Chlorella-Pulvern.....	140
Tabelle A.7: Verteilungsmuster der RATA-Daten.....	140
Tabelle A.8: Zusammenhänge zwischen Einkaufsort bzw. Auswahlkriterien für Lebensmittel und soziodemografischen Daten	140
Tabelle A.9: Post-Hoc Ergebnisse: Einkaufsort & soziodemografische Faktoren.....	140
Tabelle A.10: Post-Hoc Ergebnisse: Auswahlkriterien & soziodemografische Daten	141
Tabelle A.11: Zusammenhänge zwischen Wissen über Mikroalgen & soziodemografische Daten ...	142
Tabelle A. 12: Post-Hoc Ergebnisse: Wissen über Mikroalgen & soziodemografische Daten.....	142
Tabelle A.13: Auswertung der Freitextantwortender genannten Assoziationen zu Mikroalgen.....	143
Tabelle A.14: Zusammenhänge zwischen Einstellungen & soziodemografische Daten	144
Tabelle A.15 Post-Hoc Ergebnisse: Einstellungen & soziodemografische Daten	144
Tabelle A.16: Zusammenhänge zwischen Verzehrbereitschaft & soziodemografische Daten	145
Tabelle A. 17: Post-Hoc Ergebnisse: Verzehrbereitschaft & soziodemografische Daten.....	145
Tabelle A.18: Post-Hoc Ergebnisse: Beweggründen zum Verzehr & soziodemografische Daten	145
Tabelle A.19: Angaben zu sonstigen Beweggründen für den Verzehr von Mikroalgen.....	146
Tabelle A. 20: Häufigkeiten und prozentuale Verteilung der genannten Produktkategorien.....	146
Tabelle A.21: Zusammenhänge zwischen Produktkategorien & soziodemografische Daten	147
Tabelle A.22: Post-Hoc Ergebnisse: Produktkategorien & soziodemografische Daten.....	147
Tabelle A. 23: Zusammenhänge zwischen Kaufbereitschaft & soziodemografische Daten.....	148
Tabelle A.24: Post-Hoc Ergebnisse: Kaufbereitschaft & soziodemografische Daten	148
Tabelle A.25: Zusammenhänge zwischen der Zahlungsbereitschaft für Lebensmittel mit Mikroalgen & soziodemografische Daten	148
Tabelle A.26: Post-Hoc Ergebnisse: Zahlungsbereitschaft für Lebensmittel mit Mikroalgen & soziodemografische Daten	149
Tabelle A.27: Zusammenhänge zwischen Preissteigerung bzw. Zahlungsbereitschaft für frische Mikroalgen & soziodemografische Daten.....	149
Tabelle A.28: : Post-Hoc Ergebnisse: Preissteigerung bzw. Zahlungsbereitschaft für frische Mikroalgen & soziodemografische Daten.....	149
Tabelle A.29: Zusammenhänge zwischen GI, SC, FNS, FTNS & soziodemografische Daten	150
Tabelle A.30: Post-Hoc Ergebnisse: GI, SC, FNS, FTNS & soziodemografische Daten.....	150
Tabelle A.31: Zusammenhänge zwischen Akzeptanz von Mikroalgen & soziodemografische Daten	151
Tabelle A.32: Post-Hoc Ergebnisse: Akzeptanz von Mikroalgen & soziodemografische Daten	151
Tabelle A.33: Unterschiede in den CATA und RATA-Daten zwischen Replikat I und II	152
Tabelle A.34: Verteilung der CATA und RATA-Daten über beide Replikate	153
Tabelle A.35: Unterschiede in den CATA-Daten zwischen den Lagertemperaturen	153
Tabelle A.36: Unterschiede in den RATA-Daten zwischen den Lagertemperaturen	153
Tabelle A.37: Angaben der Panelist*innen zu den Proben	154
Tabelle A. 38: Post-Hoc Ergebnisse: VOCs und Spirulina- bzw. Chlorella-Pulver	154
Tabelle A. 39: Korrelations-Matrix der Hauptkomponentenanalyse inklusive Signifikanzniveau....	155

Anhang-Abbildungsverzeichnis

Abbildung A. 1: Gesamtionenchromatogramm der GC-MS-Analyse von L. maxima bei -18 °C....	156
Abbildung A. 2: Gesamtionenchromatogramm der GC-MS-Analyse von L. maxima bei +4 °C.....	156
Abbildung A. 3: Gesamtionenchromatogramm der GC-MS-Analyse von L. maxima bei +20 °C....	156
Abbildung A. 4: Gesamtionenchromatogramm der GC-MS-Analyse von L. maxima bei +99 °C....	157
Abbildung A. 5: Gesamtionenchromatogramm der GC-MS-Analyse Spirulina-Pulver Algenwerk ..	157
Abbildung A. 6: Gesamtionenchromatogramm der GC-MS-Analyse Spirulina-Pulver Bio	157
Abbildung A. 7: Gesamtionenchromatogramm der GC-MS-Analyse Spirulina-Pulver Raab.....	158
Abbildung A. 8: Gesamtionenchromatogramm der GC-MS-Analyse Chlorella-Pulver.....	158

Anhang A: Methodik

A1 Online-Fragebogen der Verbraucher*innen Befragung

Kopie: Verbraucher*innen-Umfrage zum Thema Mikroalgen bzw. Mikroalgen in Lebensmitteln

Verbraucher*innen-Umfrage zum Thema Mikroalgen bzw. Mikroalgen in Lebensmitteln

Herzlich Willkommen!

Vielen Dank, dass Sie an der Befragung teilnehmen möchten. Mein Name ist Yvonne Thomas und ich bin Studierende der Hochschule Neubrandenburg. Im Rahmen meiner Masterarbeit führe ich eine Befragung über den **Konsum und die Akzeptanz von Mikroalgen bzw. Mikroalgen in Lebensmitteln** durch. Ihre Meinung ist dabei besonders wichtig. Bitte versuchen Sie den Fragebogen **vollständig auszufüllen**, es gibt **weder richtige noch falsche Antworten**. Die Befragung dauert ca. **20 Minuten**. Ihre Angaben sind völlig **anonym** und können mit Ihrer Person im Nachhinein nicht in Verbindung gebracht werden. Die Umfrage dient ausschließlich wissenschaftlichen Zwecken.



Quelle: Algenwerk.de

Ich habe die Datenschutzerklärung zur Kenntnis genommen
[Datenschutzerklärung anzeigen](#)

Weiter

Datenschutzerklärung

X

Die erhobenen Daten sind anonymisiert und werden durch die studien-durchführende Person Yvonne Thomas weiterverarbeitet. Ausschließlich die Studienmitarbeitenden haben Einsicht in die Weiterverarbeitung der anonymisierten Daten. Sämtliche Personen, die Zugang zu den anonymisierten Daten erhalten unterliegen im Umgang mit den Daten dem deutschen Datenschutzgesetz in seiner gültigen Fassung sowie der Datenschutz-Grundverordnung (DSGVO). Die Verwendung der Daten erfolgt ausschließlich nach den gesetzlichen Bestimmungen der DSGVO. Die Teilnahme an der Studie setzt keine Einwilligungserklärung voraus. Die für die Datenverarbeitung verantwortliche Stelle ist die Hochschule Neubrandenburg. Die anonymisierten Daten werden insbesondere für Veröffentlichungen der Ergebnisse in Fachjournals, auf wissenschaftlichen Fachtagungen und allen sonstigen wissenschaftlichen Formaten sowie einem Projektbericht genutzt.

[Akzeptieren](#)

[Schließen](#)

Haben Sie schon einmal von Mikroalgen gehört?

Ja

Nein

Wissen Sie was Mikroalgen sind?

<input checked="" type="checkbox"/> Ja	<input type="checkbox"/> Nein
--	-------------------------------

Wie würden Sie Ihr Wissen über Mikroalgen einschätzen?

- sehr gut
- gut
- mittel
- schlecht
- sehr schlecht

Haben Sie schon einmal von Spirulina (*Arthrospira platensis*) gehört?

<input checked="" type="checkbox"/> Ja	<input type="checkbox"/> Nein
--	-------------------------------

Was assoziieren/verbinden Sie gedanklich mit dem Wort "Mikroalgen" bzw. "Lebensmittel mit Mikroalgen"?

Bei den folgenden Aussagen geht es um Ihre Wahrnehmung von Mikroalgen.

Bitte geben Sie mit Hilfe des Schiebereglers an, inwieweit Sie den folgenden Aussagen zustimmen.



Mikroalgen haben einen		geringen Nährwert	hohen Nährwert	
Mikroalgen sind		teuer	günstig	
Mikroalgen sind		nicht vertrauenswürdig	vertrauenswürdig	
Mikroalgen sind		ekelhaft	lecker	
Mikroalgen sind		ungesund	gesund	
Mikroalgen sind		schwer erhältlich	leicht erhältlich	

Haben Sie schon einmal Mikroalgen bzw. Lebensmittel mit Mikroalgen gegessen?

Ja	Nein

Wie bereit wären Sie, Mikroalgen bzw. Lebensmittel mit Mikroalgen zu essen?

- Sehr bereit
- Eher bereit
- Weder bereit noch abgeneigt
- Eher abgeneigt
- Sehr abgeneigt
- Kann ich nicht beantworten

Was hat Sie dazu ermutigt, Mikroalgen zu verzehren bzw. was, wenn überhaupt, würde Sie dazu ermutigen, Mikroalgen in Ihrer Ernährung auszuprobieren?

Bitte wählen Sie alle zutreffenden Optionen aus

- Wenn ich weiß, dass es meine Ernährung gesünder macht
- Wenn es für mich leicht erhältlich ist
- Wenn es appetitlich aussieht
- Wenn andere Menschen in meinem Haushalt oder meine Freunde es probieren
- Wenn Prominente oder Influencer dazu raten, es zu probieren
- Wenn es ordnungsgemäß reguliert ist
- Wenn ich weiß, dass es sicher zu essen ist
- Wenn ein Experte dazu rät, es zu probieren
- Wenn es billiger ist als herkömmliches vergleichbares Produkt

- Wenn ich weiß, dass es besser für die Umwelt ist
- Wenn ich weiß, dass es besser für den Tierschutz ist
- Nichts würde mich dazu bewegen, es zu probieren
- Ich weiß es nicht
- Andere Gründe:

In welchen der folgenden Produkte könnten Sie sich Mikroalgen als Zutat gut vorstellen?

Bitte wählen Sie alle zutreffenden Optionen aus

- Fleischprodukte (z.B. Frikadellen, Wurst-/waren)
- Milch- und Milchprodukte (z.B. Joghurt, Milchgetränke)
- vegetarische/vegane Produkte (z.B. Gemüsebällchen, pflanzliche Fleischersatzprodukte)
- Teigwaren (z.B. Nudeln, Teigtaschen)
- Snacks und Süßigkeiten (z.B. Eis, Riegel)
- Getränke (z.B. Säfte, Smoothies, Bier)
- Brot- und Backwaren (z.B. Brötchen, Kekse)
- frische Mikroalgen als Rohprodukt
- Sonstiges

Wie wichtig sind/wären Ihnen die folgenden Aspekte bei einem Produkt mit Mikroalgen?

	sehr wichtig	eher wichtig	teils/teils	eher unwichtig	sehr unwichtig	keine Antwort
Die Produktion von Lebensmitteln aus Mikroalgen soll vor allem klimafreundlicher sein als die Produktion von konventionell erzeugten Lebensmitteln	<input type="radio"/>					
Lebensmittel aus Mikroalgen sollten vor allem Vorteile für die Gesundheit und Leistungsfähigkeit bieten	<input type="radio"/>					
Lebensmittel aus Mikroalgen dürfen auf keinen Fall teurer sein als normale Lebensmittel	<input type="radio"/>					
Lebensmittel aus Mikroalgen sollten vor allem ein außergewöhnlich gutes Geschmackserlebnis bieten	<input type="radio"/>					
Der Geschmack von Lebensmitteln aus Mikroalgen sollte sich auf keinen Fall merklich von mir bekannten Lebensmitteln unterscheiden	<input type="radio"/>					

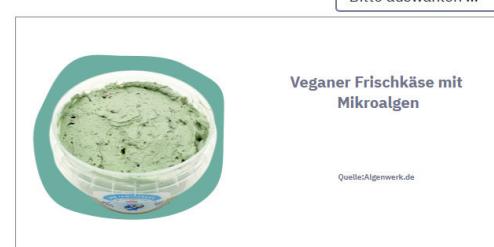
Wären Sie bereit eines der folgenden Produkte zu kaufen bzw. einen höheren Preis für dieses zu zahlen?

Wie wahrscheinlich ist es, dass Sie dieses Produkt kaufen würden?

Wären Sie bereit mehr für ein solches Produkt zu bezahlen (im Vergleich zu einem herkömmlichen Produkt ohne Mikroalgen)?

Bitte auswählen ...

Bitte auswählen ...



Bitte auswählen ... ▾

Smoothie mit Mikroalgen

Quelle: Algenwerk.de

Bitte auswählen ... ▾

Kekse mit 2% Mikroalgen

Quelle: Batiste et al., 2019

Beispiel: Wenn eine Packung 5€ kostet (Inhalt 500g), dann würde eine 10%ige Preissteigerung zu einem Preis von 5,50€, 20% zu 6€ und 50% zu 7,50€ führen.

%

Würden Sie das folgende Produkt kaufen?

Frische Mikroalgen im Glas, 200 Gramm



Quelle: Algenwerk.de

- sehr wahrscheinlich
- wahrscheinlich
- weder noch
- unwahrscheinlich
- sehr unwahrscheinlich
- kann ich nicht beantworten

Frische Mikroalgen im Glas, 200 Gramm



Quelle: Algenwerk.de

Wieviel Euro wären Sie bereit für ein solches Produkt zu bezahlen?

30 €

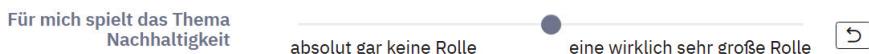
Bei den folgenden Aussagen geht es um Ihre Einstellung gegenüber einer gesunden Ernährung.

Bitte geben Sie an, inwieweit Sie den folgenden Aussagen zustimmen.

	stimme voll und ganz zu	stimme zu	stimme eher zu	teils/tei- ls	stimme nicht zu	stimme nicht zu	stimme über- haupt nicht zu	keine Ant- wort
Der Gesundheitswert von Lebensmitteln hat wenig Einfluss auf meine Lebensmittelauswahl	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich achte sehr auf den gesundheitlichen Wert der Lebensmittel, die ich esse	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich esse, was ich mag, und mache mir keine großen Gedanken über den Gesundheitswert von Lebensmitteln	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Für mich ist es wichtig, dass meine Ernährung fettarm ist	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich ernähre mich immer gesund und ausgewogen	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Für mich ist es wichtig, dass meine tägliche Ernährung viele Vitamine und Mineralstoffe enthält	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Der Gesundheitswert von Snacks spielt für mich keine Rolle	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich meide keine Lebensmittel, auch wenn diese z.B. meinen Cholesterinspiegel erhöhen können	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Die Anzucht von Mikroalgen in technischen Anlagen zeichnet sich durch eine geringe Belastung natürlicher Ressourcen und einem potenziellen Beitrag zum ökologischen Gleichgewicht aus. Mikroalgen können auf nicht landwirtschaftlich nutzbaren Böden gezüchtet werden, wodurch eine weitere Ausdehnung landwirtschaftlicher Flächen lasten natürlicher Ökosysteme reduziert werden kann. Weiterhin kann die Anzucht innerhalb geschlossener Wasser- und Nährstoffkreisläufe ohne den Einsatz von Pflanzenschutzmitteln erfolgen. Mikroalgen sind in der Lage CO₂ zu binden bzw. in wertvolle Ressourcen umzuwandeln (wie z.B. Nährstoffe). Durch die Fixierung von CO₂ können sie dazu beitragen die Treibhausgasemissionen zu reduzieren. Mikroalgen können auch als alternative Nährstoffquelle für die menschliche Ernährung eingesetzt werden und so die Ausbeutung natürlicher Ressourcen verringern und zur Erhaltung der biologischen Vielfalt beitragen.

Wie ist Ihre Einstellung zum Thema Nachhaltigkeit im Allgemeinen?



Bei den folgenden Aussagen geht es um Aspekte der Nachhaltigkeit im Zusammenhang mit Lebensmitteln.

Bitte geben Sie an, inwieweit Sie über die folgenden Aussagen besorgt sind.

Ich bin besorgt über....

	über-haupt nicht besorgt	ehrer nicht besorgt	wenig besorgt	weder noch	ehrer besorgt	besorgt	sehr besorgt	keine Antwort
die Abholzung des Regenwaldes	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
den Einsatz von Pestiziden in der Lebensmittelproduktion	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
die Umweltschäden durch die menschliche Nutzung von Land und Wasser	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
die Menge der verschwendeten Lebensmittel	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
den übermäßigen Verbrauch der natürlichen Ressourcen der Welt für die Nahrungsmittelproduktion	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
nicht wiederverwertbare Verpackungen	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
die Menge der für Produkte verwendeten Verpackungen	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
durch die Lebensmittelproduktion verursachte Kohlenstoffemissionen	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
den Energieaufwand für den Transport von Lebensmitteln	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
den Energieaufwand für die Zubereitung von Lebensmitteln	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Bei den folgenden Aussagen geht es um Ihre Einstellungen gegenüber neuen Lebensmitteln.

Bitte geben Sie an, inwieweit Sie den folgenden Aussagen zustimmen.

	voll und ganz zu	stimme zu	stimme eher zu	teils/teil ls	stimme eher nicht zu	stimme nicht zu	über-haupt nicht zu	keine Antwort
Ich probiere ständig neue und verschiedene Lebensmittel aus	<input type="radio"/>							
Ich traue neuen Lebensmitteln nicht	<input type="radio"/>							
Wenn ich nicht weiß, was in einem Lebensmittel enthalten ist, probiere ich es auch nicht	<input type="radio"/>							
Ich mag Essen aus unterschiedlichen Kulturen	<input type="radio"/>							
Ich esse fast alles	<input type="radio"/>							
Das Essen aus anderen Kulturen sieht eigenartig aus, so dass ich es nicht esse	<input type="radio"/>							
An sozialen Anlässen (wie Feiern oder Restaurantbesuchen) probiere ich neue Speisen aus	<input type="radio"/>							
Ich fürchte mich davor, Speisen zu essen, die ich nie vorher gegessen habe	<input type="radio"/>							
Ich gehe gerne an Orte, wo Essen aus anderen Kulturen serviert wird	<input type="radio"/>							
Ich bin sehr wählerisch in Bezug auf Essen	<input type="radio"/>							

Mikroalgen werden in Deutschland fast ausschließlich in Photobioreaktoren gezüchtet, also in einer künstlichen technischen Umgebung unter kontrollierten Bedingungen in einem geschlossenen System. Das Ziel einer solchen Anlage ist die Schaffung eines Lebensraums, der für die Mikroalgen die optimalen Lebensbedingungen bietet. Diese Anlagen ermöglichen deutlich höhere Wachstumsraten und Reinheiten, als es in einer natürlichen Umgebung der Fall wäre.



Quelle: Prof. Sandmann, Hochschule Neubrandenburg

Wie ist Ihre Einstellung gegenüber solchen Technologien im Allgemeinen?

Ich bin neuen Technologien gegenüber sehr offen ↶

Im Folgenden geht es um Ihre Einstellung gegenüber neuen Verarbeitungstechnologien zur Lebensmittelherstellung (wie z.B. neue Verfahren zur Keimabtötung).

Bitte geben Sie an, inwieweit Sie den folgenden Aussagen zustimmen.

	stimme voll und ganz zu	stimme zu	stimme eher zu	teils/teils	stimme eher nicht zu	stimme nicht zu	stimme überhaupt nicht zu	keine Antwort
Es gibt bereits viele schmackhafte Lebensmittel, so dass wir keine neuen Verarbeitungstechnologien brauchen, um mehr zu produzieren	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Vorteile neuer Technologien werden häufig übertrieben dargestellt	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Neue Verarbeitungstechnologien mindern die natürliche Qualität von Lebensmitteln	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Es macht keinen Sinn, Hightech-Lebensmittel auszuprobieren, weil die, die ich esse, bereits gut genug sind	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Wo tätigen Sie den **größten Teil** (über 50%) Ihres Lebensmitteleinkaufes?

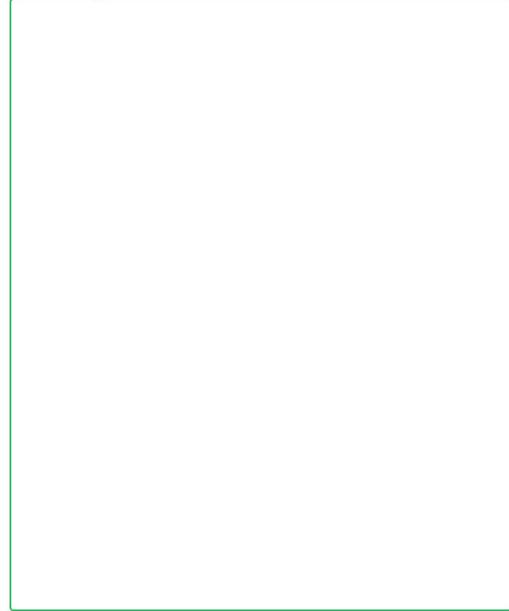
- Discounter (z.B. Lidl, Netto, Aldi,...)
- Supermarkt (z.B. Rewe, Edeka, Kaufland, Globus, ...)
- Wochenmarkt
- Naturkost/-Bioladen
- Direktvermarktung
- Online-Shop
- Sonstiges:

Wonach wählen Sie Ihre Lebensmittel aus?

Wählen Sie die für Sie 5 wichtigsten Kriterien aus und ordnen Sie diese auf der rechten Seite gemäß Ihrer Wichtigkeit ein (höchste Bewertung oben). Ziehen Sie dafür die Begriffe mit der linken Maustaste in die rechte Spalte.

Verfügbare Einträge

günstiger Preis
Markenprodukt
wenig Zusatzstoffe
Nährwert
Verpackungsdesign
regionale Herkunft
Bio-Qualität
Geschmack
Gewohnheit
Umweltfaktoren
ausgewogene Ernährung
Neuheiten
ethische Aspekte
Empfehlungen von anderen Personen
Saisonalität
Haltbarkeit

Ihr Ranking**Welchem Geschlecht ordnen Sie sich zu?**

- Männlich
- Weiblich
- Divers
- möchte ich nicht beantworten

Wie alt sind Sie? Jahre**Wie viele Personen leben in Ihrem Haushalt?** Personen

Welchen höchsten Bildungsabschluss haben Sie?

- Lehre/Berufsausbildung
- Meister
- Fachhochschulabschluss
- Bachelor
- Master
- Diplom
- Promotion
- ohne beruflichen Bildungsabschluss aber in schulischer oder beruflicher Ausbildung
- ohne beruflichen Bildungsabschluss
- möchte ich nicht beantworten
- Sonstiges:

Wie hoch ist Ihr durchschnittliches monatliches Haushaltsnettoeinkommen?

- unter 500 €
- 500 € - 1000€
- 1000€ - 1250€
- 1250€ - 1500€
- 1500€ - 2000€
- 2000€ - 2500€
- 2500€ - 3000€
- 3000€ - 3500€
- 3500€ - 4000€
- 4000€ - 5000€
- über 5000€
- möchte ich nicht beantworten

Wie hoch schätzen Sie Ihre monatlichen Haushaltsausgaben für Lebensmittel?

€

In welchem Bundesland wohnen Sie derzeit hauptsächlich?

- Mecklenburg-Vorpommern
- Schleswig-Holstein
- Brandenburg
- Berlin
- Bremen
- Hamburg
- Thüringen
- Sachsen
- Sachsen-Anhalt
- Nordrhein-Westfalen
- Bayern
- Baden-Württemberg
- Hessen
- Rheinland-Pfalz
- Niedersachsen
- Saarland
- möchte ich nicht beantworten

Wie würden Sie Ihre Ernährungsweise am ehesten einstufen?

- Ich esse alles
- Flexitarier (Ich esse bewusst weniger Fleisch)
- Pescetarier (Ich esse Fisch, aber kein Fleisch)
- Vegetarisch (Ich esse kein Fisch und kein Fleisch)
- Vegan (Ich esse keine tierischen Produkte)
- Etwas Anderes

Möchten Sie uns zum Thema „Mikroalgen bzw. Lebensmittel auf Mikroalgenbasis“ noch etwas mitteilen oder haben Sie noch Anmerkungen zum Fragebogen?

Absenden

A2 Zusammenfassende Übersicht der verwendeten Messinstrumente und Items

Tabelle A. 1: Tabellarische Übersicht der verwendeten Messinstrumente und Items

Themenblock	Code	Beschreibung/Methode	Itemanzahl	Antwortformat	Cronbach's α	Quelle
Wissen Mikroalgen	MA1	Bekanntheit Mikroalgen	1	Dichotom Ja/Nein-Frage	-	Porst R, 2014 [34]
	MA2	Wissen über Mikroalgen	1	Dichotom Ja/Nein-Frage	-	Porst R, 2014 [34]
	MA3	Einschätzung des eigenen Wissens	1	geschlossen 5-Punkte Likert-Skala	-	Porst R, 2014 [34]
	MA4	Bekanntheit Spirulina	1	Dichotom Ja/Nein-Frage	-	Porst R, 2014 [34]
Wahrnehmung/ Einstellung Mikroalgen	MA5	Assoziation mit „Mikroalgen“ bzw. Lebensmittel auf Mikroalgenbasis“	1	offen Freitext	-	Porst R, 2014 [34]
	MA6	Wahrnehmung von Mikroalgen	10	Semantisches Differenzial	-	Porst R, 2014 [34]
Generelles gesundheitsinteresse	GI1	General health interest scale (GHI) Einstellung gegenüber gesunder Ernährung	8	geschlossen 7-Punkte Likert-Skala	0,89	Roininen et al, 1999 [39]
Lebensmittel-einkauf	LM1	Einkaufort	1	geschlossen Ein-fachnennung	-	Porst R, 2014 [34]
	LM2	Kriterien Lebensmittelauswahl	1	geschlossen Mehr-fachnennung (Rating)	-	Porst R, 2014 [34]
Verzehr von Mikroalgen	MV1	Verzehr Mikroalgen	1	Dichotom Ja/Nein-Frage	-	Porst R, 2014 [34]
	MV2	Verzehrtes Produkt	1	offen Freitext	-	Porst R, 2014 [34]
	MV3	Bereitschaft Verzehr	1	geschlossen 5-Punkte Likert-Skala	-	Porst R, 2014 [34]
	MV4	Faktoren zur Ermutigung	1	geschlossen Mehr-fachnennung	-	Porst R, 2014 [34]
	MV5	mögliche Produktkategorien für Mikroalgen	1	geschlossen Mehr-fachnennung	-	Porst R, 2014 [34]
	MV6	wichtige Produktaspekte	5	geschlossen 5-Punkte Likert-Skala	-	Porst R, 2014 [34]
Kauf- und Zah-lungs-bereit-schaft	WTB1	Bereitschaft Lebensmittel mit Mikroalgen zu kaufen	7	geschlossen 5-Punkte Likert-Skala	-	Porst R, 2014 [34]
	WTP1	Zahlungsbereitschaft für Lebensmittel mit Mikroalgen	7	Dichotom Ja/Nein-Frage	-	Porst R, 2014 [34]
	WTP1.1	Zahlungsbereitschaft für Lebensmittel mit Mikroalgen (quantitativ)	1	offen Freitext	-	Porst R, 2014 [34]
	WTB2	Bereitschaft frische Mikroalgen zu kaufen	1	Dichotom Ja/Nein-Frage	-	Porst R, 2014 [34]
	WTP2	Zahlungsbereitschaft für frische Mikroalgen (quantitativ)	1	Visuelle Analog Skala	-	Porst R, 2014 [34]
Einstellung ge-gegenüber neuem Lebensmittel	FNS	Food Neophobia Scale (FNS)	10	geschlossen 7-Punkte Likert-Skala	0,79	Siegrist et al, 2013 [41],
Einstellung ge-gegenüber neuem Lebensmittel-technologien	FTNS	Allgemeine Einstellung gegenüber neuen Lebensmitteltechnologien	1	Visuelle Analog Skala	-	Porst R, 2014 [34]
	FTNS	Food technology neophobia Scale (FTNS)	4	geschlossen 7-Punkte Likert-Skala	0,77	Cox & Evans 2008 [44]
Nachhaltigkeits-bewusstsein	SC1	Allgemeine Einstellung gegenüber Nachhaltigkeit	1	Visuelle Analog Skala	-	Porst R, 2014 [34]
	SC2	Besorgnis über Fragen der Nachhaltigkeit von Lebensmitteln	10	geschlossen 7-Punkte Likert-Skala	0,95	Grunert et al, 2014 [40]
Sozio-demogra-fische Daten	SDD1	Geschlecht	1	geschlossen Ein-fachnennung	-	Porst R, 2014 [34]
	SDD2	Alter	1	offen Zahleneingabe	-	Porst R, 2014 [34]
	SDD3	Bildungsabschluss	1	geschlossen Ein-fachnennung	-	Porst R, 2014 [34]
	SDD4	monatliches Haushaltsnettoeinkommen	1	geschlossen Ein-fachnennung	-	Porst R, 2014 [34]
	SDD5	Ausgaben Lebensmittel	1	offen Zahleneingabe	-	Porst R, 2014 [34]
	SDD6	Haushaltsgröße	1	offen Zahleneingabe	-	Porst R, 2014 [34]
	SDD7	Bundesland	1	geschlossen Ein-fachnennung	-	Porst R, 2014 [34]
	SDD8	Ernährungsweise	1	geschlossen Ein-fachnennung	-	Porst R, 2014 [34]
Abschlussfrage	AF	Anmerkungen, Feedback	1	offen Freitext	-	Porst R, 2014 [34]

A3 Ablaufplan zur Planung der GC-MS- und Sensorik-Analysen

Tabelle A.2: Koordination der GC-MS- und humansensorischen Analyse

11.10 - Lieferdatum		
- Liefertemperatur messen - Gläser direkt in die Hochschule bringen - Gläser entsprechend beschriften und entsprechend lagern (Lagerung im EG) → TK-Probe mit losem Deckel		
14.10 – Vorbereitung 1 Tag zuvor		
- Sequenzen für GC-MS anlegen und für 1. Messung entsprechend beschriften - alle Einwegbecher mit Probennummer beschriften → 12 x 8 (96 Stk.) - alle Vials mit 1,5g NaCl vorbereiten und mit Probennummer versehen → 12 Stk. → in die Sensorik bringen		
Uhrzeit	Sensorik: 2 Replikate	GC-MS: 3 Replikate
8:00		Faser ausbacken (10 min.)
8:05 – 8:35		+4°C-Proben vorbereiten → je 1 Lösung von Probenrn: 853, 167, 961 → jeweils 54,35g BM + 25ml H ₂ O → davon je 5ml in Vials abfüllen → Glas wieder in Kühlschrank → Vials nach oben bringen
8:40		1. Messung: +4°C-Probe (8:40 – 12:05)
8:45 – 9:15		-18 °C-Proben vorbereiten → je 1 Lösung von Probenrn: 452, 651, 485 → jeweils 54,35g BM + 25ml H ₂ O → davon je 5ml in Vials abfüllen → Glas wieder in Kühlschrank → Vials nach oben bringen
9:30	Einweisung Sensorik-Labor mit Frau Sauermilch	
12:00		Sequenz laden und Namen für 2.Mesusng ändern
12:10		2. Messung: -18°C-Probe (12:10 – 15:35)
12:15 – 12:45		+20°C-Proben vorbereiten → je 1 Lösung von Probenrn: 275, 179, 316 → jeweils 54,35g BM + 25ml H ₂ O → davon je 5ml in Vials abfüllen → Glas in Kühlschrank → Vials nach oben bringen
12:50 – 13:10	→ Tablets vorbereiten	
13:45 - 14:15	Ankunft + Einweisung Panelist*innen Währenddessen: → Probenrn. 982 → 20g in 300ml H ₂ O für 1 min bei +99°C erhitzen im Wasserbad → Probenrn: 853, 275, 452 → je 12 x 9g in Einwegbecher → auf Tablets verteilen + Probenrn.519 → Fragebögen austeilen	
14:15 - 14:55	1. Durchlauf Sensorik → zuerst RATA (30 min) → dann einfach beschreibende Prüfung (10min)	
14:55 - 15:25	30 min Pause für Panelist*innen → Tablets vorbereiten → Probenrn. 546 → 20g in 300ml H ₂ O für 1 min bei +99°C erhitzen im Wasserbad → Probenrn: 167, 179, 651 → je 12 x 9g in Bechergläser → auf Tablets verteilen + Probenrn. 519 → Fragebögen austeilen	
15:30 – 16:10	2. Durchlauf Sensorik	Sequenz laden und Namen für 3. Messung ändern 3.Messung: 20°C Probe (15:40 – 19:05)
16:10 - 16:20	Bedanken + Getränk als Dankeschön	
16:25 – 17:00	Aufräumen	
17:05		Wasserbad einschalten
17:10 – 18:00		+99°C-Proben vorbereiten → je 20g in 300ml H ₂ O für 1 min bei +99°C erhitzen im Wasserbad (Probenrn: 982, 546, 637) → davon je 5ml in Vials abfüllen → Glas in Kühlschrank → Vials nach oben bringen
19:00		Sequenz laden und Namen für 4. Messung ändern
19:10		4.Messung: 99°C Probe (19:10 – 22:35)
Nächster Tag		Reste von Messung 4 Aufräumen Und Daten Checken

A4 Zusammenfassung der Vorversuche und methodischen Anpassungen

Tabelle A.3: Zusammenfassung der Vorversuche und methodischen Anpassungen

Versuch Nr	1	2	3	4	5	6
Anmerkung	In Anlehnung an [52]	Splitmodus	Endtemperatur und Temperaturanstieg reduziert	Erhöhung der Biomasse, Split-Reduzierung	Erhöhung der Biomasse	Suspension der Biomasse
Probe	1,5g frische Biomasse + 5mL destilliertes H ₂ O	(“)	(“)	0,5g frische Biomasse + 4,5 mL destilliertes H ₂ O	2,5g frische Biomasse + 2,5 mL destilliertes H ₂ O	5mL Suspension ¹
Injectionszeit	8 min.	(“)	(“)	(“)	(“)	(“)
Head-Space-Extraktion	15 min bei 40 °C	(“)	(“)	(“)	(“)	(“)
Splitmodus	Nein	20:1	50:1	20:1	(“)	(“)
Temperaturen	<ul style="list-style-type: none"> - Starttemperatur: 40 °C, 5 min gehalten - Dann 5 °C min⁻¹ auf 250 °C und 5 min gehalten - Analysezeit: 60 min 	(“)	<ul style="list-style-type: none"> - Starttemperatur: 40 °C, 5 min gehalten - Dann 5 °C min⁻¹ auf 150 °C und 0 min gehalten - Dann 15 °C min⁻¹ auf 200 und 5 min gehalten - Analysezeit: 36 min 	(“)	(“)	(“)
Ergebnis	<ul style="list-style-type: none"> - Versuch vorzeitig abgebrochen - keine klaren Peaks - mangelnde Trennleistung - Minimale Signale deuteten, auf unzureichende Probenkonzentration oder Probleme mit den Instrumenteneinstellungen hin - zu geringer Split Modus 	<ul style="list-style-type: none"> - Zu hohe Temperaturen (ab 35 min.) - Hoher Faseranteile - Wenig Peaks 	<ul style="list-style-type: none"> - Ein wenig mehr Peaks aber immer noch sehr wenig und schlecht ausgeprägt - Hohe Basislinie, geringe Konzentrationen - Hohe Faseranteile 	<ul style="list-style-type: none"> - Geringere Faseranteile - Geringere Basislinie - noch sehr wenig Peaks 	<ul style="list-style-type: none"> - etwas bessere Peak Auflösung, höhere Konzentrationen und geringere Basislinie - aber insgesamt noch sehr gering 	<ul style="list-style-type: none"> - Konzentrationen minimal gestiegen, ansonsten keine Verbesserung
Versuch Nr	7	8	9	10	11	12
Anmerkung	Ethanol als Lösungsmittel	Hinzugabe von NaCl und Ethanol	Wiederholung von Versuch Nr. 7	In Anlehnung an [59]	verringerte Endtemperatur	leichte Temperaturerhöhung
Probe	5mL Suspension ¹ + 1mL Ethanol	5mL Suspension ¹ + 0,25mL Ethanol + 1,5g NaCl	5mL Suspension ¹ + 0,25mL Ethanol + 1,5g NaCl	5mL Suspension ¹ + 1,5g NaCl	(“)	(“)
Injectionszeit	(“)	(“)	(“)	20 min bei 40 Grad	(“)	(“)
Head-Space-Extraktion	(“)	(“)	(“)	(“)	(“)	(“)
Splitmodus	(“)	(“)	(“)	(“)	(“)	(“)
Temperaturen	(“)	(“)	(“)	<ul style="list-style-type: none"> - Starttemperatur: 40 °C, 3 min gehalten - Dann 5 °C min⁻¹ auf 150 °C - Dann 10 °C min⁻¹ auf 230 °C und 15min gehalten - Analysezeit: 35min 	<ul style="list-style-type: none"> - Starttemperatur: 40 °C, 3 min gehalten - Dann 5 °C min⁻¹ auf 210 ° - Dann 10 °C min⁻¹ auf 250 und 5 min gehalten - Analysezeit: 30,33 min 	<ul style="list-style-type: none"> - Starttemperatur: 40 °C, 3 min gehalten - Dann 5 °C min⁻¹ auf 210 ° - Dann 10 °C min⁻¹ auf 250 und 5 min gehalten

						- Analysezeit: 46 min.
Ergebnis	<ul style="list-style-type: none"> - Schlechtere Ergebnisse als zuvor - Minimal höhere Peaks, aber weniger Peaks 	<ul style="list-style-type: none"> - Gerät hat die Messung aus unklarem Grund abgebrochen 	<ul style="list-style-type: none"> - Leichte Verbesserung zu Versuch 12 - Dennoch scheint die Zugabe von Ethanol nicht zielführend 	<ul style="list-style-type: none"> - Mehr und besser aufgelöste Peaks - Zu hohe Temperatur zum Ende der Retentionszeit und zu lange Rampe 	<ul style="list-style-type: none"> - Klare Peaks, geringe Basislinie, viele Peaks - Höhere Konzentrationen - Gute Ergebnisse! 	<ul style="list-style-type: none"> - Wieder zu hohe Temperaturen ab 30. Minute
Versuch Nr	13	14	15	16	17	18
Anmerkung	Analyse der Pulver mit Einstellungen von Versuch Nr. 11	Versuch mit einem anderen Pulver + geringere Menge	(“)	geringere Menge	(“)	(“)
Probe	1,0g Algenwerg-Pulver + 1,5g NaCl + 5mL H ₂ O	50mg Spirulina BIO-Pulver + 1,5g NaCl + 5mL H ₂ O	50mg Chlorella-Pulver + 1,5g NaCl + 5mL H ₂ O	0,250mg Spirulina BIO-Pulver + 1,5g NaCl + 5mL H ₂ O	0,250mg Chlorella Pulver + 1,5g NaCl + 5mL H ₂ O	0,250mg Spirulina Raab-Pulver + 1,5g NaCl + 5mL H ₂ O
Injektionszeit	siehe Versuch 11	(“)	(“)	(“)	(“)	(“)
Head-Space-Extraktion	siehe Versuch 11	(“)	(“)	(“)	(“)	(“)
Split Modus	siehe Versuch 11	(“)	(“)	(“)	(“)	(“)
Temperaturen	siehe Versuch 11	(“)	(“)	(“)	(“)	(“)
Ergebnis	<ul style="list-style-type: none"> - Schlechte Peak Auflösung - Liegt es an der Menge oder am Algenwerktpulver selber? 	<ul style="list-style-type: none"> - Schlechte Peak Auflösung - Vermutlich immer noch zu hohe Pulvermenge 	(“)	<ul style="list-style-type: none"> - Klare Peaks, geringe Basislinie, viele Peaks - Höhere Konzentrationen - Gute Pulvermenge! 	(“)	(“)
Versuch Nr	19	20	21	22		
Anmerkung	(“)	Versuch die VOCs direkt aus dem Glas mit einer Spritze zu extrahieren. Diese wurde dann mit der Spritze durch das Septum in Vial injiziert	<ul style="list-style-type: none"> - Wie Versuch 20, zuvor wurde aber die Luft aus dem Vial entfernt 			
Probe	0,250mg Algenwerg-Pulver + 1,5g NaCl + 5mL H ₂ O	Nur Gas + 1,5g NaCl	Nur Gas + 1,5g NaCl + 5mL H ₂ O	5mL Biomasse direkt aus Kopfraum des Glases + 1,5g NaCl		
Injektionszeit	(“)	(“)	(“)	(“)		
Head-Space-Extraktion	(“)	(“)	(“)	(“)		
Splitmodus	(“)	(“)	(“)	(“)		
Temperaturen	(“)	(“)	(“)	(“)		
Ergebnis	(“)	<ul style="list-style-type: none"> - Analyse ohne Erfolg - Ggf. weil NaCl nicht gelöst war und kein Dampf entstehen kann ohne H₂O? - Ggf. war vorher schon Luft im Vial, sodass nicht genügend von dem Gas injiziert werden konnte? 	<ul style="list-style-type: none"> - Analyse ohne Erfolg 	<ul style="list-style-type: none"> - Analyse ohne Erfolg 		

I: 10,87g Biomasse + 5mL destilliertes H₂O → entspricht 1g Trockenmasse auf 5mL H₂O; BM: Biomasse

A5 Fragebogen der Humansensorische Analyse Replikat I – Probe 853

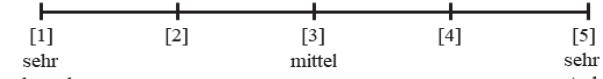
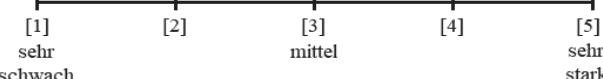
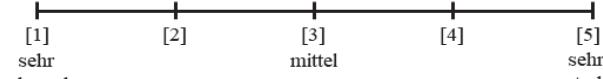
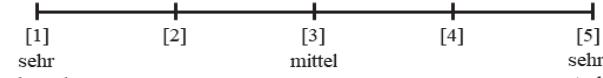
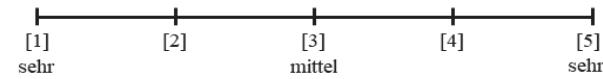
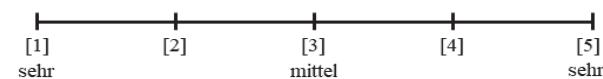
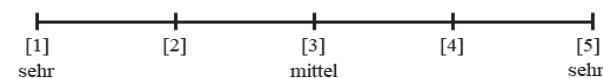
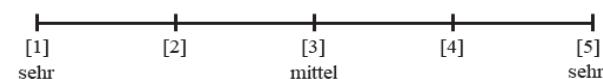
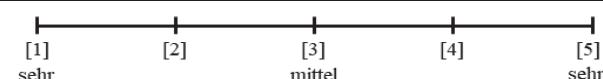
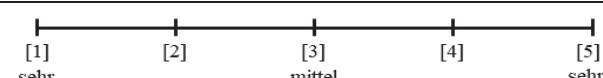
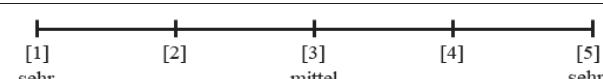
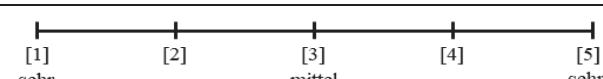
Kabinen-Nr.: _____

Replikat-Nummer: **1**

1. Check and Rate all that apply (CATA/RATA)

Bitte riechen Sie an den vorliegenden Proben. Kreuzen Sie aus allen gegebenen Attributien die zutreffenden an (CATA). Bewerten Sie anschließend, jeweils die Intensität der ausgewählten Attribute auf einer Skala von 1 (= sehr schwach) bis 5 (= sehr stark) (RATA).

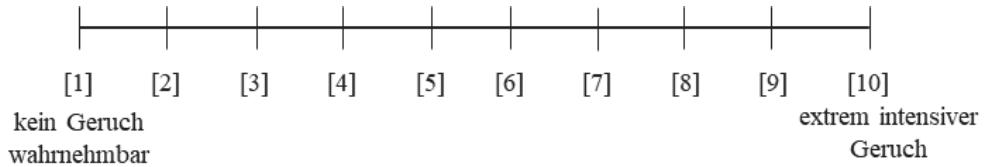
Probe: 853

Attribut	Intensität				
<input type="checkbox"/> fruchtig	 [1] sehr schwach	[2]	[3] mittel	[4]	[5] sehr stark
<input type="checkbox"/> frisch	 [1] sehr schwach	[2]	[3] mittel	[4]	[5] sehr stark
<input type="checkbox"/> weinartig/alkoholisch	 [1] sehr schwach	[2]	[3] mittel	[4]	[5] sehr stark
<input type="checkbox"/> joghurtartig/buttermilchartig	 [1] sehr schwach	[2]	[3] mittel	[4]	[5] sehr stark
<input type="checkbox"/> essigartig	 [1] sehr schwach	[2]	[3] mittel	[4]	[5] sehr stark
<input type="checkbox"/> butterartig/fettig	 [1] sehr schwach	[2]	[3] mittel	[4]	[5] sehr stark
<input type="checkbox"/> algig	 [1] sehr schwach	[2]	[3] mittel	[4]	[5] sehr stark
<input type="checkbox"/> muffig	 [1] sehr schwach	[2]	[3] mittel	[4]	[5] sehr stark
<input type="checkbox"/> erdig	 [1] sehr schwach	[2]	[3] mittel	[4]	[5] sehr stark
<input type="checkbox"/> metallisch	 [1] sehr schwach	[2]	[3] mittel	[4]	[5] sehr stark
<input type="checkbox"/> schwefelartig	 [1] sehr schwach	[2]	[3] mittel	[4]	[5] sehr stark
<input type="checkbox"/> benzinartig	 [1] sehr schwach	[2]	[3] mittel	[4]	[5] sehr stark

2. Einfach beschreibende Prüfung

→ Probe: 519

Unmittelbar nach dem Öffnen des Glases mit der frischen Spirulina-Biomasse kann ein intensiver dominanter Geruch wahrgenommen werden. Bitte öffnen Sie das Glas mit der frischen Spirulina-Biomasse und riechen Sie direkt nach dem Öffnen an der Probe. Bewerten Sie die Intensität des Geruchs auf einer Skala von 1 (= kein Geruch wahrnehmbar) bis 10 (= extrem dominanter Geruch). Lassen Sie das Glas bis zum 2. Durchlauf offenstehen.



Denken Sie nun darüber nach, welche Attribute oder Assoziationen Ihnen beim Riechen dieser Probe in den Sinn kommen. Schreiben Sie bitte **4 bis 5 Attribute** auf, die den Geruch Ihrer Meinung nach am besten beschreiben.

3. Haben Sie sonstige Anmerkungen zu den Proben?

4. Demografische Angaben:

→ Bitte geben Sie Ihr Geschlecht an:

Männlich Weiblich Divers

→ Wie alt sind Sie? : _____ Jahre

Anhang B: Überprüfung der Normalverteilungsannahme

Tabelle A.4: Verteilungsmuster der Items und Skalen aus der Verbraucher*innen-Befragung

Items und Skalen	Normalverteilung
Von Mikroalgen gehört	Nein
Von Spirulina gehört	Nein
Wissen was Mikroalgen sind	Nein
Einschätzung Wissen über Mikroalgen	Nein
Einstellung gegenüber Mikroalgen	Nein
Gesundheitsinteresse	Ja
Gesundheitsinteresse Kategorien	Nein
Ort für den Lebensmitteleinkauf	Nein
Auswahlkriterien LM-Einkauf	Nein
Bereits Mikroalgen verzehrt	Nein
Bereitschaft zum Verzehr	Nein
Beweggründe zum Verzehr	Nein
Mögliche Produkte für Mikroalgen als Zutat	Nein
Wichtigkeit verschiedener Aspekte für LM mit Mikroalgen	Nein
Kaufbereitschaft Lebensmittel mit Mikroalgen	Nein
Zahlungsbereitschaft Lebensmittel mit Mikroalgen	Nein
Akzeptanz Lebensmittel mit Mikroalgen	Nein
Kaufbereitschaft frische Mikroalgen	Nein
Zahlungsbereitschaft frische Mikroalgen	Nein
Akzeptanz frische Mikroalgen	Nein
Einstellungen gegenüber neuen Lebensmitteln (FNS)	Nein
Allgemeine Einstellung gegenüber neuen Technologien	Nein
Einstellung gegenüber neuen Lebensmitteltechnologien (FTNS)	Nein
Allgemeine Einstellung gegenüber Nachhaltigkeit	Nein
Nachhaltigkeitsbewusstsein	Nein
Geschlecht	Nein
Alter	Nein
Wie viele Personen leben in Ihrem Haushalt	Nein
Welchen höchsten Bildungsabschluss haben Sie	Nein
Monatliches Haushaltsnettoeinkommen	Nein
Monatlichen Haushaltsausgaben	Nein
Bundesland	Nein
Ernährungsweise	Nein

Shapiro-Wilk-Test

Tabelle A.5: Verteilungsmuster der Substanzen in der frischen Biomasse

Substanz	Normalverteilung	Substanz	Normalverteilung
Ethylacetat	-	Hexanol	-
Methylolaceton	Ja	Hexylformiat	-
Isopropylacetat	-	Oxiran	-
Isopropylalkohol	Nein	Essigsäure	Ja
Ethanol	Nein	Pentadecan	-
2,3-Butandion	-	Ethylhydroxybutyrat	-
2-Butanol	-	Phytan	Ja
Hexanal	Ja	Heptadecan	Nein
Acetoin	Nein		

Shapiro-Wilk-Test; -: Test auf Normalverteilung entfällt aufgrund der geringen Datenbasis von zwei gültigen Werten

Tabelle A.6: Verteilungsmuster der Substanzen in den Spirulina- und Chlorella-Pulvern

Substanz	Normalverteilung	Substanz	Normalverteilung
Hydroxyaceton	Nein	2,2,6-Trimethyl-cyclohexanon	Ja
Silvan/ 2-Methylfuran	Nein	2,5-Dimethyl-pyrazin	Nein
3-Methylfuran	Nein	Sulcaton	Ja
2-Butanon	Ja	1-Hexanol	Ja
2-Formylbutan	Nein	Hexylformiat	-
Isopentanal	Nein	Iso phoron	Ja
Benzol	Ja	3-Ethyl-2,5-dimethylpyrazine	Ja
4-Methylcyclohexen	Ja	Essigsäure	Nein
2-Ethylfuran	Ja	Vinylhexanol	Ja
Pentanal	Ja	Eicosan	Nein
2-Isopropyl-2-methyloxiran	Ja	Pentadecan	Nein
Toluol	Nein	Benzaldehyd	Nein
Dimethyldisulfid	Nein	3,5-Octadienon	Ja
Hexanal	Nein	Hexadecan	Nein
2-Heptanon	Ja	p-Tolualdehyd	-
Heptanal	Ja	β-Cyclocitral	Nein
2-Pentylfuran	Ja	3-Methylbenzaldehyd	-
2-Isooctanon	Ja	Safranal	Ja
1-Pentanol	Ja	Heptadecan	Ja
Acetoin	-	α-Ionon	Ja
2-Ethylpyridin	-	β-Ionon	Ja
Ethanol	Nein	Isopropylalkohol	Nein

Shapiro-Wilk-Test; -: Test auf Normalverteilung entfällt aufgrund der geringen Datenbasis von zwei gültigen Werten

Tabelle A.7: Verteilungsmuster der RATA-Daten

Attribut	- 18°C		+ 4°C		+ 20°C		+ 99°C		Overall			
	452	651	853	167	275	179	982	546	- 18°C	+ 4°C	+ 20°C	+ 99°C
fruchtig	Nein	Nein	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Nein	Nein	Ja	Ja	Nein
frisch	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein
weinartig/ alkoholisch	Nein	Nein	Nein	Nein	Ja	Ja	Ja	Ja	Nein	Ja	Ja	Ja
joghurtartig/ buttermilchartig	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Nein	Ja	Ja	Ja	Nein
essigartig	Ja	Ja	Ja	Nein	Ja	Ja	Nein	Nein	Ja	Ja	Ja	Ja
butterartig/ fettig	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Nein	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
aligig	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
muffig	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
erdig	Ja	Ja	Ja	Ja	Nein	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
metallisch	Ja	Nein	Nein	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
schwefelartig	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
benzinartig	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Ja	Nein	Ja	Ja	Ja	Ja

Shapiro-Wilk-Test

Anhang C: Ergebnisse - Ergänzende Statistische Berechnungen

C1 Verbraucher*innen-Befragung

Tabelle A.8: Zusammenhänge zwischen Einkaufsort bzw. Auswahlkriterien für Lebensmittel und soziodemografischen Daten

	Geschlecht	Alter	Bildung	Einkommen	Ausgaben für LM	Wohnort	Ernährung
Einkaufsort	0,699 ¹	0,026*²	0,053 ²	0,248 ²	< 0,001*** ²	0,059 ²	0,298 ²
Auswahlkriterien	0,034*³	< 0,001*** ³	0,101 ³	< 0,001*** ³	< 0,001*** ³	0,463 ³	< 0,001*** ³

LM: Lebensmittel; 1: Exakte Signifikanz nach Pearson-Chi-Quadrat; 2: Monte-Carlo Signifikanz nach Pearson-Chi-Quadrat 3: Chi-Quadrat-Test für Mehrfachantwortsets; *p<0,05; **p<0,01; ***p<0,001

Tabelle A.9: Post-Hoc Ergebnisse: Einkaufsort & soziodemografische Faktoren

	Discounter	Super-markt	Wochen-markt	Naturkost-/Bi-oladen	Direktver-marktung	Online-Shop	Sonstige
Alterskategorien							
18 - 24 Jahre (A)							
25 - 34 Jahre (B)							
35 - 44 Jahre (C)							
45 - 54 Jahre (D)			B (0,007)	A (0,018)			
55 - 64 Jahre (E)				A (< 0,001)			
65 - 74 Jahre (F)						A (0,013)	
75 - 84 Jahre (G)							
Ausgaben für Lebensmittel							
0€ - 200€ (A)							
201€ - 400€ (B)							
401€ - 600€ (C)							
601€ - 800€ (D)							
801€ - 1000€ (E)			B (0,021)				
über 1000€ (F)					C (0,001)		

Hinweis: Es werden ausschließlich signifikante Ergebnisse des Post-Hoc-Tests dargestellt, um die Übersichtlichkeit zu gewährleisten.

Tabelle A.10: Post-Hoc Ergebnisse: Auswahlkriterien & soziodemografische Daten

	Auswahlkriterien Lebensmitteleinkauf															
	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p
Geschlecht																
Männlich (A)		B 0,004														
Weiblich (B)			A 0,044									C 0,004				
Divers (C)												A 0,009				
Alterskategorien																
18 - 24 Jahre (A)	C 0,026			E <0,001		D <0,001	E <0,001	F <0,001	E0,009	E 0,001	F 0,018				C <0,001	
	D <0,001											D 0,002			F 0,003	
	F 0,034															
25 - 34 Jahre (B)	E 0,014		E 0,004		E <0,001				E 0,024						B <1,001	
35 - 44 Jahre (C)					F 0,019	A 0,011									B 0,001	
45 - 54 Jahre (D)	B 0,017				B 0,000											
55 - 64 Jahre (E)	A <0,001				C 0,016											
65 - 74 Jahre (F)					B <0,001										B 0,002	
75 - 84 Jahre (G)																
Bildungsabschluss																
Ausbildung (A)																
Meister (B)																
FH (C)																
Bachelor (D)																
Master (E)	H 0,047															
Diplom (F)	H 0,003															
Promotion (G)																
in Ausbildung (H)	G 0,015															
ohne Abschluss (I)																
Sonstige (J)																
Haushaltsnettoeinkommen																
unter 500€ (A)	I 0,040															
500€ - 1000€ (B)	I <0,001						I 0,002									
1000€ - 1250€ (C)	K 0,030						I 0,003									
1250€ - 1500€ (D)																
1500€ - 2000€ (E)	I 0,006										B 0,050					
2000€ - 2500€ (F)																
2500€ - 3000€ (G)																
3000€ - 3500€ (H)	B 0,005															
3500€ - 4000€ (I)	C 0,003						C 0,012									
4000€ - 5000€ (J)	B 0,007															
über 5000€ (K)	B <0,001						C 0,008						B 0,008			
Ausgaben für Lebensmittel																
0€ - 200€ (A)						E <0,001										
201€ - 400€ (B)	A 0,021					E 0,004		E 0,013								
401€ - 600€ (C)	A 0,001					E 0,027	A 0,020									
601€ - 800€ (D)	A <0,001					A <0,001							A 0,003			
801€ - 1000€ (E)	A 0,004															
über 1000€ (F)																
Ernährungsweise																
Omnivor (A)	B <0,001							E 0,042					E <0,001		B 0,001	
Flexitarier (B)		A 0,004							A <0,001				A 0,049			
Pescetarier (C)													A <0,001			
Vegetarier (D)							A 0,017			A <0,001			A <0,001	B <0,001	A 0,045	
Veganer (E)							A 0,004			A <0,001			B <0,001			

Hinweis: Es werden ausschließlich signifikante Ergebnisse des Post-Hoc-Tests dargestellt, um die Übersichtlichkeit zu gewährleisten.

a: günstiger Preis; b: Markenprodukt; c: wenig Zusatzstoffe; d: Nährwert; e: Verpackungsdesign; f: regionale Herkunft; g: Bio-Qualität; h: Geschmack; i: Gewohnheit; j: Umweltfaktoren; k: ausgewogene Ernährung; l: Neuheiten; m: ethische Aspekte; n: Empfehlungen von anderen Personen; o: Saisonalität; p: Haltbarkeit; Mit Hilfe der Bonferroni-Korrektur werden die Tests an alle paarweisen Vergleiche innerhalb einer Zeile der jeweils innersten Untertabelle angepasst; *p<0,05; **p<0,01; ***p<0,001, Mehrfachantwortset; FH: Fachhochschulabschluss

Tabelle A.11: Zusammenhänge zwischen Wissen über Mikroalgen & soziodemografische Daten

	Geschlecht	Alter	Bildung	Einkommen	Ausgaben für LM	Wohnort	Ernährung
Von MA gehört	0,136 ¹	0,346 ¹	0,095 ²	0,940 ²	0,205 ¹	0,170 ²	0,004**^{1,3}
Von SP gehört	< 0,001*** ¹	0,003**¹	0,141 ²	0,774 ²	0,640 ¹	0,058 ²	< 0,001***
Wissen was MA sind	0,557 ¹	0,082 ¹	0,017**²	0,186 ²	0,024 ¹	0,039**^{2,3}	0,722 ¹
Einschätzung des Wissens	0,035*¹	0,367 ²	< 0,001*** ²	0,388 ²	0,379 ²	0,054 ²	0,163 ²

MA: Mikroalgen; SP: Spirulina; 1: Exakte Signifikanz nach Pearson-Chi-Quadrat, zweiseitig (Erwartete Häufigkeit in mindestens 1 Zeile kleiner als 5); 2: Monte-Carlo Signifikanz nach Pearson-Chi-Quadrat, zweiseitig, basierend auf 10000 Stichprobentabellen (Erwartete Häufigkeit in mindestens 1 Zeile kleiner als 5, Datensatz aber zu groß ist, um die exakte Signifikanz zu berechnen); *p<0,05; **p<0,01; ***p<0,001; 3: Post-hoc-Test nicht signifikant aufgrund des angepassten Signifikanten

Tabelle A. 12: Post-Hoc Ergebnisse: Wissen über Mikroalgen & soziodemografische Daten

	Von MA gehört	Von SP gehört	Wissen was MA sind	Einschätzung des Wissens				
				Sehr gut	Gut	Mittel	Schlecht	Sehr schlecht
Geschlecht								
Männlich (A)				B (0,006)				
Weiblich (B)		B < 0,001			A (0,043)			
Divers (C)		A 0,041		B (0,006)				
Alterskategorien								
18 - 24 Jahre (A)		B 0,032						
25 - 34 Jahre (B)								
35 - 44 Jahre (C)								
45 - 54 Jahre (D)								
55 - 64 Jahre (E)								
65 - 74 Jahre (F)								
75 - 84 Jahre (G)								
Bildungsabschluss								
Ausbildung (A)				G (0,005)				
Meister (B)								
FH (C)				G (0,007)				
Bachelor (D)						G (0,038)		
Master (E)								
Diplom (F)								
Promotion (G)		A 0,035	D (<0,001)					
in Ausbildung (H)								
ohne Abschluss (I)								
Sonstige (J)								
Ausgaben für Lebensmittel								
0€ - 200€ (A)			E 0,014					
201€ - 400€ (B)								
401€ - 600€ (C)								
601€ - 800€ (D)								
801€ - 1000€ (E)								
über 1000€ (F)								
Ernährungsweise								
Ich esse alles (A)		E 0,002						
Flexitarier (B)		A 0,017						
Pescetarier (C)								
Vegetarisch (D)								
Vegan (E)								

Hinweis: Es werden ausschließlich signifikante Ergebnisse des Post-Hoc-Tests dargestellt, um die Übersichtlichkeit zu gewährleisten.

*p<0,05; **p<0,01; ***p<0,001; MA: Mikroalgen; SP: Spirulina; FH: Fachhochschule

Tabelle A.13: Auswertung der Freitextantwortender genannten Assoziationen zu Mikroalgen

Kategorie	n (%)	Kategorie	n (%)
Ernährungsphysiologische Aspekte	381 (33,02)	Aspekte der Nachhaltigkeit	70 (6,07)
Gesund	97 (25,46)	Nachhaltig	33 (47,14)
Nahrungsergänzung (-smittel)	65 (17,06)	Positiver Beitrag zur zukünftigen Ernährung der Bevölkerung/Sicherung von Nahrungsmittelknappheit	9 (12,86)
ungesättigte Fettsäuren	33 (8,66)	Bio	
Superfood	26 (6,82)	umweltfreundlicher	4 (5,71)
Mineralstoffe und Spurenelemente	24 (6,3)	Chlorophyll	4 (5,71)
Proteinquelle	24 (6,3)	O ₂ -Produzent	4 (5,71)
gesunde Ernährung	20 (5,25)	CO ₂ -Abbau	3 (4,29)
Nährstoffreich	20 (5,25)	klimafreundlich	3 (4,29)
Gesundheit	15 (3,94)	regional	3 (4,29)
Gesundheitsfördernd	15 (3,94)	Nachhaltige Ernährung	2 (2,86)
Iod	8 (2,1)	Photosynthese	2 (2,86)
Vitamine	6 (1,57)	grüner Energiespeicher	2 (2,86)
Bindet Schadstoffe/Entgiftung	5 (1,31)		1 (1,43)
Vitamin B12	4 (1,05)	Lebensmitteltechnologische Aspekte	90 (7,8)
hoher Nährwert	4 (1,05)	Farbstoff	24 (26,67)
Interessant für menschliche Ernährung	3 (0,79)	Lebensmittelzusatz	20 (22,22)
Ballaststoffe	3 (0,79)	kleine Algen in kleinen Mengen in LM/NEM	19 (21,11)
Antioxidativ	3 (0,79)	Bestandteil vom LM	8 (8,89)
Eisen	2 (0,52)	Neue LM/-produkte	8 (8,89)
Polysaccharide	1 (0,26)	Im Labor/synthetisch hergestellt	6 (6,67)
Magnesium	1 (0,26)	Verdickungsmittel	3 (3,33)
hoher Purin gehalt	1 (0,26)	hochverarbeitet	2 (2,22)
Carotinoide	1 (0,26)	Zweifel, Misstrauen	44 (3,81)
Biologische Aspekte	125 (10,83)	unseriöse (Marketing-)versprechen	11 (25)
(Kommt aus dem) Meer/See/Wasser	46 (36,8)	Teuer/Höherpreisig	9 (20,45)
sehr kleine Algen	25 (20)	Schadstoffe/Toxine	7 (15,91)
Spirulina	17 (13,6)	Ekel	5 (11,36)
Nahrunggrundlage für Lebewesen/Tierfutter	12 (9,6)	Unsicherheit/Irrtum bei Deklaration	4 (9,09)
Mikroorganismen		Will ich nicht	3 (6,82)
(phyto)Plankton	8 (6,4)	überflüssig	2 (4,55)
Einzeller	5 (4)	wenig erforscht	1 (2,27)
von äußerster Wichtigkeit im Ökosystem	3 (2,4)	rechtliche Unsicherheiten	1 (2,27)
Algen	3 (2,4)	Hexenwerk	1 (2,27)
Chlorella	3 (2,4)		
ubiquitär in der Umwelt	2 (1,6)		
	1 (0,8)		
Sensorische Aspekte	160 (13,86)	Aspekte der Darreichungsform	62 (5,37)
Grün/Grüne Farbe	84 (52,5)	Smoothies	13 (20,97)
Fischig	22 (13,75)	Pulver	12 (19,35)
Blaue/ Blaue Farbe	11 (6,88)	Nori Blätter	9 (15,52)
Meer	8 (5)	Ersatzprodukt	5 (8,06)
nicht lecker/appetitlich	8 (5)	Kapseln /Tablette	4 (6,45)
neutral	5 (3,13)	Nudeln	3 (4,84)
schleimig	5 (3,13)	Paste	3 (4,84)
Salzig	3 (1,88)	Salat	3 (4,84)
lecker	3 (1,88)	Algenbier	2 (3,23)
Modrig/muffig	3 (1,88)	Gewürz	2 (3,23)
seltsam	3 (1,88)	Gummibärchen	1 (1,61)
glitschig	2 (1,25)	Matcha-Tee	1 (1,61)
weich	1 (0,63)	Reismilch	1 (1,61)
klebrig	1 (0,63)	Wakame	1 (1,61)
püreeartig	1 (0,63)	Algenchips	1 (1,61)
		Porridge	1 (1,61)
Alternative Ernährung	64 (5,55)	Non-Food Anwendungen	19 (1,65)
Vegane Ernährung	22 (34,38)	Kosmetik	6 (31,58)
Alternatives Nahrungsmittel	15 (23,44)	Biotechnologie/Bioprozesstechnik	4 (12,05)
pflanzlich	13 (20,31)	Öle	3 (15,79)
Fleischersatz/-produkte	6 (9,38)	Bioreaktoren	3 (15,79)
Fischersatz-/Produkte	5 (7,81)	Enzyme	1 (5,26)
Alternative Nährstoffquelle	3 (4,69)	Dünger	1 (5,26)
		günstiger Füllstoff	1 (5,26)
Aspekte der Esskultur	27 (2,34)	Zukunftsorientierte Aspekte	37 (3,21)
Asiatische/Japanische Küche/Kultur	9 (33,33)	Innovativ	14 (37,84)
Essen/LM	7 (25,93)	Zukunft	11 (29,73)
Positiv	6 (22,22)	Food-Trend	7 (18,92)
Ungewöhnlich	4 (14,81)	Entwicklung, Forschung	3 (8,11)
moderne Küche	1 (3,7)	zukunftsfähige Landwirtschaft	2 (5,41)
Anbau/Herstellung	9 (0,78)	Qualität der Algen/LM	12 (1,04)
Algen-Zuchtanlagen	6 (66,67)	natürlich	6 (50)
gutem Reproduktionsrate	1 (11,11)	wertvolle Inhaltsstoffe	3 (25)
wird kultiviert	1 (11,11)	Lebensmittel mit weniger Chemie	2 (16,67)
Komplizierte Weiterverarbeitung	1 (11,11)	frei von Verunreinigungen	1 (8,33)
keine Assoziation/Angabe	54 (4,68)		

Mehrfachnennung n = 1083

Tabelle A.14: Zusammenhänge zwischen Einstellungen & soziodemografische Daten

	Geschlecht	Alter	Bildung	Einkommen	Ausgaben für LM	Wohnort	Ernährung
Gesamteinstellung	0,101	0,055	0,044*	0,365	0,040*¹	0,383	0,613
proteinarm vs. proteinreich	0,572	0,108	0,022*	0,670	0,147	0,225	0,848
fettarm vs. fettreich	0,156	0,68	0,824	0,012*¹	0,671	0,907	0,627
nicht innovativ vs. innovativ	0,652	0,092	0,641	0,167	0,174	0,84	0,061
unnatürlich vs. natürlich	0,095	0,378	0,695	0,993	0,043*	0,77	0,339
umweltschädlich vs. umweltfreundlich	0,907	0,276	0,788	0,419	0,092	0,423	0,701
unsicher vs. sicher	0,07	0,351	0,213	0,601	0,347	0,431	0,191
geringer Nährwert vs. hoher Nährwert	0,016*	0,208	0,152	0,109	0,299	0,888	0,127
teuer vs. günstig	<0,001***	0,644	0,741	0,518	0,749	0,195	0,051
nicht vertrauenswürdig vs. vertrauenswürdig	0,171	0,084	0,117	0,460	0,012*	0,500	0,060
ekelhaft vs. lecker	0,022*	0,025*	0,258	0,408	0,190	0,211	0,279
ungesund vs. gesund	0,019*	0,033*¹	0,732	0,116	0,018*	0,586	0,014*¹
schwer erhältlich vs. leicht erhältlich	0,212	0,193	0,196	0,483	0,714	0,137	0,601

Kruskal-Wallis-Test; asymptotische Signifikanz: * $p<0,05$; ** $p<0,01$; *** $p<0,001$; I: Post-hoc-Test nicht signifikant aufgrund des angepassten Signifikanten

Tabelle A.15 Post-Hoc Ergebnisse: Einstellungen & soziodemografische Daten

	Gesamt-einstellung	fettarm vs. fettreich	unnatürlich vs. natürlich	Nährwert ↓ vs. Nährwert ↑	teuer vs. günstig	nicht vertrauenswürdig vs. vertrauenswürdig	ekelhaft vs. lecker	ungesund vs. gesund
Geschlecht								
Männlich (A)								
Weiblich (B)				A 0,020	A <0,001		A 0,033	A 0,015
Divers (C)								
Alterskategorien								
18 - 24 Jahre (A)							D 0,045	
25 - 34 Jahre (B)								
35 - 44 Jahre (C)								
45 - 54 Jahre (D)								
55 - 64 Jahre (E)								
65 - 74 Jahre (F)								
Bildungsabschluss								
Ausbildung (A)	G 0,045							
Meister (B)								
FH (C)								
Bachelor (D)		G 0,015						
Master (E)								
Diplom (F)								
Promotion (G)								
in Ausbildung (H)		G 0,027						
ohne Abschluss (I)								
Sonstige (J)								
Ausgaben für Lebensmittel								
0€ - 200€ (A)								F 0,014
201€ - 400€ (B)			F 0,047			F 0,018		F 0,019
401€ - 600€ (C)						F 0,042		F 0,004
601€ - 800€ (D)								F 0,046
801€ - 1000€ (E)			F 0,046					
über 1000€ (F)								

Hinweis: Es werden ausschließlich signifikante Ergebnisse des Post-Hoc-Tests dargestellt, um die Übersichtlichkeit zu gewährleisten.
 Paarweise Vergleich; Zur vereinfachten Darstellung wurden lediglich signifikante Paarvergleiche gelistet; Angepasste Signifikanz: Signifikanzwerte werden von der Bonferroni-Korrektur für mehrere Tests angepasst; * $p<0,05$; ** $p<0,01$; *** $p<0,001$; FA: Fachhochschule

Tabelle A.16: Zusammenhänge zwischen Verzehrbereitschaft & soziodemografische Daten

	Geschlecht	Alter	Bildung	Einkommen	Ausgaben für LM	Wohnort	Ernährung
Bereits Verzehrt	0,192 ¹	0,015**¹	0,054 ¹	0,377 ²	0,383 ¹	0,175 ²	<0,001***¹
Bereitschaft	0,808 ¹	0,120 ²	0,421 ²	0,238 ²	0,006** ²	0,117 ²	0,221 ²
Gründe	0,259 ³	<0,001***³	0,010**³	0,003**³	0,001**	0,853 ³	<0,001***³

1: Exakte Signifikanz nach Pearson-Chi-Quadrat, zweiseitig (Erwartete Häufigkeit in mindestens 1 Zeile kleiner als 5); 2: Monte-Carlo Signifikanz nach Pearson-Chi-Quadrat; zweiseitig, basierend auf 10000 Stichprobentabellen. (Erwartete Häufigkeit in mindestens 1 Zeile kleiner als 5, Datensatz aber zu groß ist, um die exakte Signifikanz zu berechnen); 3: Chi-Quadrat-Test für Mehrfachantwortsets; *p<0,05; **p<0,01; ***p<0,001

Tabelle A. 17: Post-Hoc Ergebnisse: Verzehrbereitschaft & soziodemografische Daten

	MA bereits Verzehrt	Bereitschaft zum Verzehr von MA		MA bereits Verzehrt	Bereitschaft zum Verzehr von MA
Alterskategorien					
18 - 24 Jahre (A)	B 0,019		Omnivor (A)		
25 - 34 Jahre (B)			Flexitarisch (B)	A 0,036	
35 - 44 Jahre (C)			Pescetarisch (C)		
45 - 54 Jahre (D)			Vegetarisch (D)		
55 - 64 Jahre (E)			Vegan (E)	A 0,002	
65 - 74 Jahre (F)					
75 - 84 Jahre (G)					
Ausgaben für Lebensmittel					
0€ - 200€ (A)		F 0,002			
201€ - 400€ (B)		F 0,003			
401€ - 600€ (C)					
601€ - 800€ (D)					
801€ - 1000€ (E)					
über 1000€ (F)					

Hinweis: Es werden ausschließlich signifikante Ergebnisse des Post-Hoc-Tests dargestellt, um die Übersichtlichkeit zu gewährleisten; MA: Mikroalgen

Tabelle A.18: Post-Hoc Ergebnisse: Beweggründen zum Verzehr & soziodemografische Daten

	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m
Alterskategorien													
18 - 24 Jahre (A)	F 0,003		E 0,009						C 0,025				
25 - 34 Jahre (B)	F 0,011								D 0,024 E 0,042		D 0,009		
35 - 44 Jahre (C)	F 0,047												
45 - 54 Jahre (D)									A <0,001				
55 - 64 Jahre (E)									A 0,001				
65 - 74 Jahre (F)												B 0,020	
75 - 84 Jahre (G)													
Bildungsabschluss													
Ausbildung (A)									I 0,001				
Meister (B)													
FH (C)													
Bachelor (D)									F <0,001				
Master (E)									I <0,001				
Diplom (F)													
Promotion (G)													
in Ausbildung (H)			G 0,022	D 0,0100									
ohne Abschluss (I)									G <0,001				
Sonstige (J)													
Haushaltsnettoeinkommen													
unter 500€ (A)													
500€ - 1000€ (B)	C 0,006								K 0,039				
1000€ - 1250€ (C)													
1250€ - 1500€ (D)									I 0,040				
1500€ - 2000€ (E)													
2000€ - 2500€ (F)													
2500€ - 3000€ (G)													
3000€ - 3500€ (H)													
3500€ - 4000€ (I)									B 0,021				
4000€ - 5000€ (J)													
über 5000€ (K)													
Ausgaben für Lebensmittel													
0€ - 200€ (A)	F 0,006	D 0,035					E 0,0310						
201€ - 400€ (B)	F 0,012												
401€ - 600€ (C)													

601€ - 800€ (D)									
801€ - 1000€ (E)									
über 1000€ (F)									
Ernährungsweise									
Omnivor (A)							D <0,001		
Flexitarier (B)							A <0,001	A <0,001	
Pescetarier (C)								A <0,001	
Vegetarier (D)							A <0,001	B 0,012	
Veganer (E)							A <0,001	A <0,001	

Hinweis: Es werden ausschließlich signifikante Ergebnisse des Post-Hoc-Tests dargestellt, um die Übersichtlichkeit zu gewährleisten;
a: Wenn ich weiß, dass es meine Ernährung gesünder macht; b: Wenn es für mich leicht erhältlich ist; c: Wenn es appetitlich aussieht; d: Wenn andere Menschen in meinem Haushalt oder meine Freunde es probieren; e: Wenn Prominente oder Influencer dazu raten, es zu probieren; f: Wenn es ordnungsgemäß reguliert ist; g: Wenn ich weiß, dass es sicher zu essen ist; h: Wenn ein Experte dazu rät, es zu probieren; i: Wenn es billiger ist als herkömmliches vergleichbares Produkt; j: Wenn ich weiß, dass es besser für die Umwelt ist; k: Wenn ich weiß, dass es besser für den Tierschutz ist; l: Nichts würde mich dazu bewegen, es zu probieren; m: Ich weiß es nicht; Angepasste Signifikanz: Signifikanzwerte werden von der Bonferroni-Korrektur für mehrere Tests angepasst; *p<0,05; **p<0,01; ***p<0,001; Mehrfachantwortset; FH: Fachhochschule

Tabelle A.19: Angaben zu sonstigen Beweggründen für den Verzehr von Mikroalgen

Beweggrund	Häufigkeit n (%)
Wenn es gut schmeckt	14 (27,45)
Neugier/Interesse	12 (23,53)
Aufklärung über Mikroalgen (Herkunft, Qualität)	4 (7,84)
Ansprechendes Aussehen	3 (5,88)
Als Proteinalternative	2 (3,92)
Mehrwert für meinen Körper	2 (3,92)
Wenn der Preis angemessen ist.	2 (3,92)
Wenn es sich ohne zusätzlichen Mehraufwand zubereiten lässt.	2 (3,92)
Als Zusatz-/Ersatzzutat in meinen "gewohnten" Lebensmitteln	2 (3,92)
Gleichpreisig zu herkömmlichen Lebensmitteln	2 (3,92)
Als "Zusatz" zur herkömmlichen Ernährung	1 (1,96)
Wenn es besser verträglich ist als andere Lebensmittel	1 (1,96)
Wenn es eine Rezeptmöglichkeit dazu gibt,	1 (1,96)
Wenn es kulinarisch Reizvoll ist	1 (1,96)
Wenn es hochwertig zubereitet ist	1 (1,96)
Wenn es keine langfristigen negativen Auswirkungen auf meinen Körper hat	1 (1,96)

N=48; Mehrfachnennung (n = 51)

Tabelle A. 20: Häufigkeiten und prozentuale Verteilung der genannten Produktkategorien

Produktkategorie	n (%)
Nahrungsergänzungsmittel	125 (46,81)
Pulver	38 (30,40)
Tabletten	21 (16,80)
Kapseln	17 (13,60)
Frische BM	8 (6,40)
Tropfen	7 (5,60)
Öl	1 (0,80)
n.n.b.	33 (26,40)
Backwaren	12 (4,49)
Brot	2 (16,67)
Brötchen	2 (16,67)
Kuchen	1 (8,33)
Muffin	1 (8,33)
Kekse	1 (8,33)
Pancakes	1 (8,33)
Müsli	1 (8,33)
Pizza	1 (8,33)
n.n.b.	2 (16,67)
Teigwaren	6 (2,25)
Nudeln	5 (83,33)
n.n.b.	1 (16,67)
Ersatzprodukte	6 (2,25)
Tofu	1 (16,67)
Fischersatz	2 (33,33)
Burgerpattie	1 (16,67)
veganer Frischkäse	1 (16,67)
Würstchen	1 (16,67)
Zusatzstoff	5 (1,87)
Agar Agar	2 (40,00)
Carrageen	1 (20,00)
Phycocianin	1 (20,00)
Astaxanthien	1 (20,00)
Produktkategorie	n (%)
Getränke	76 (28,46)
Bier	10 (13,16)
Saft	8 (10,53)
Brause	2 (2,63)
Smoothie	42 (55,26)
Reismilch	1 (1,32)
Gin	1 (1,32)
n.n.b.	12 (15,79)
Snacks/Süßigkeiten	11 (4,12)
Gummibärchen	3 (27,27)
Schokolade	1 (9,09)
Pudding	1 (9,09)
Riegel	3 (27,27)
Cracker/Chips	1 (9,09)
n.n.b.	2 (18,18)
Milchprodukte	9 (3,37)
Frischkäse	3 (33,33)
Weichkäse	1 (11,11)
Joghurt	1 (11,11)
Eiscreme	4 (44,44)
Sonstiges	17 (3,37)
Salat	4 (23,53)
Honig	1 (5,88)
Kräutersalz	2 (11,76)
Mayonnaise	1 (5,88)
Aufstrich	1 (5,88)
Sushi	2 (11,76)
Nori-Blätter	5 (29,41)
Kombu	1 (5,88)
Misosuppe	1 (5,88)
Wakame	2 (11,76)

n.n.b.: nicht näher bezeichnet; BM: Biomasse; Mehrfachnennung (n = 267)

Tabelle A.21: Zusammenhänge zwischen Produktkategorien & soziodemografische Daten

	Geschlecht	Alter	Bildung	Einkommen	Ausgaben für LM	Wohnort	Ernährung
Fleischprodukte	0,015*¹	0,003**¹	0,322 ²	0,019*²	0,447 ¹	0,198 ²	0,003**¹
Milch-/produkte	0,135 ¹	0,229 ¹	0,357 ²	0,746 ²	0,673 ¹	0,304 ²	0,170 ¹
Vegetarisch/Vegane	0,664 ¹	<0,001*** ¹	0,629 ²	0,895 ²	0,044*¹	0,271 ²	0,002**²
Teigwaren	0,347 ¹	0,329 ¹	0,752 ²	0,752 ²	0,958 ¹	0,446 ²	0,906 ¹
Brot-/Backwaren	0,011*¹	0,376 ¹	0,177 ²	0,400 ²	0,128 ¹	0,359 ²	0,317 ¹
Snacks/ Süßigkeiten	0,042*¹	0,002**¹	0,40*²	0,998 ²	0,841 ¹	0,708 ²	0,186 ¹
Getränke	0,015*¹	0,011*¹	0,179 ²	0,213 ²	0,076 ¹	0,582 ²	0,079 ¹
Frische Mikroalgen	0,693 ¹	0,965 ¹	0,429 ²	0,023²	0,493 ¹	0,093 ²	0,609 ¹

1: Exakte Signifikanz nach Pearson-Chi-Quadrat, zweiseitig (Erwartete Häufigkeit in mindestens 1 Zeile kleiner als 5); 2: Monte-Carlo Signifikanz nach Pearson-Chi-Quadrat; zweiseitig, basierend auf 10000 Stichprobentabellen. (Erwartete Häufigkeit in mindestens 1 Zeile kleiner als 5, Datensatz aber zu groß ist, um die exakte Signifikanz zu berechnen); *p<0,05; **p<0,01; ***p<0,001; LM: Lebensmittel

Tabelle A.22: Post-Hoc Ergebnisse: Produktkategorien & soziodemografische Daten

	Fleischprodukte	Milchprodukte	Pflanzliche Ersatzprodukte	Teigwaren	Brot-/Backwaren	Snacks/ Süßwaren	Getränke	Frische Mikroalgen
Geschlecht								
Männlich (A)	B 0,013				B 0,010			
Weiblich (B)							A 0,021	
Divers (C)								
Alterskategorien								
18 - 24 Jahre (A)	C 0,002		F <,001					
25 - 34 Jahre (B)			F 0,001			E 0,004		
35 - 44 Jahre (C)	B 0,036							
45 - 54 Jahre (D)								
55 - 64 Jahre (E)								
65 - 74 Jahre (F)								
75 - 84 Jahre (G)								
Bildungsabschluss								
Ausbildung (A)								
Meister (B)								
FH (C)								
Bachelor (D)								
Master (E)						A 0,028		
Diplom (F)								
Promotion (G)								
in Ausbildung (H)								
ohne Abschluss (I)								
Sonstige (J)								
Haushaltsnettoeinkommen								
unter 500€ (A)								
500€ - 1000€ (B)								
1000€ - 1250€ (C)								
1250€ - 1500€ (D)								
1500€ - 2000€ (E)								
2000€ - 2500€ (F)								
2500€ - 3000€ (G)								
3000€ - 3500€ (H)								
3500€ - 4000€ (I)								
4000€ - 5000€ (J)								
über 5000€ (K)	C 0,016							
Ausgaben für Lebensmittel								
0€ - 200€ (A)			F 0,012					
201€ - 400€ (B)								
401€ - 600€ (C)								
601€ - 800€ (D)								
801€ - 1000€ (E)								
über 1000€ (F)								
Ernährungsweise								
Omnivor (A)	D 0,070							
Flexitarier (B)								
Pescetarier (C)								
Vegetarier (D)			A 0,013 C 0,043					
Veganer (E)								

Hinweis: Es werden ausschließlich signifikante Ergebnisse des Post-Hoc-Tests dargestellt, um die Übersichtlichkeit zu gewährleisten; Mit Hilfe der Bonferroni-Korrektur werden die Tests an alle paarweisen Vergleiche innerhalb einer Zeile der jeweils innersten Untertabelle angepasst; *p<0,05; **p<0,01; ***p<0,001, Mehrfachantwortset: FH: Fachhochschule

Tabelle A. 23: Zusammenhänge zwischen Kaufbereitschaft & soziodemografische Daten

	Geschlecht	Alter	Bildung	Einkommen	Ausgaben für LM	Wohnort	Ernährung
Wiener Würstchen	0,013*	0,394	0,923	0,518	0,624	0,212	0,151
Frischkäse	0,407	0,420	0,130	0,041*	0,878	0,078	0,002**
Veget. Burger	0,817	<,001***	0,040*²	0,303	0,003**	0,436	<,001***
Nudeln	0,947	0,020*	0,570	0,088	0,504	0,610	0,818
Eiscreme	0,013*	0,109	0,145	0,154	0,039*	<,001***	0,204
Smoothie	0,258	0,011*²	0,743	0,360	0,032*	0,828	0,009**
Kekse	0,029*	0,553	0,669	0,777	0,362	0,919	0,534
Frische Mikroalgen	0,658	0,344	0,893	0,019	0,624	0,382	0,019*

1: Kruskal-Wallis-Test; Monte-Carlo-Signifikanz; Teststatistik wurde für Bindungen angepasst; *p<0,05; **p<0,01; ***p<0,001; LM: Lebensmittel; 2: Post-hoc-Test nicht signifikant aufgrund des angepassten Signifikanten

Tabelle A.24: Post-Hoc Ergebnisse: Kaufbereitschaft & soziodemografische Daten

	Wiener Würstchen	Frischkäse	Veget. Burger	Nudeln	Eiscreme	Smoothie	Kekse	Frische Mikroalgen
Geschlecht								
Männlich (A)	B 0,014				B 0,023		B 0,032	
Weiblich (B)								
Divers (C)								
Alterskategorien								
18 - 24 Jahre (A)								
25 - 34 Jahre (B)			C 0,010					
35 - 44 Jahre (C)								
45 - 54 Jahre (D)								
55 - 64 Jahre (E)								
65 - 74 Jahre (F)			B 0,023					
75 - 84 Jahre (G)								
Haushaltsnettoeinkommen								
unter 500€ (A)								
500€ - 1000€ (B)								
1000€ - 1250€ (C)								
1250€ - 1500€ (D)								
1500€ - 2000€ (E)								
2000€ - 2500€ (F)								
2500€ - 3000€ (G)		C 0,046						
3000€ - 3500€ (H)								
3500€ - 4000€ (I)								
4000€ - 5000€ (J)								
über 5000€ (K)								
Ausgaben für Lebensmittel								
0€ - 200€ (A)								
201€ - 400€ (B)			F 0,005					
401€ - 600€ (C)								
601€ - 800€ (D)								
801€ - 1000€ (E)								
über 1000€ (F)								
Ernährungsweise								
Omnivor (A)								
Flexitarier (B)		A 0,026	A <,001			A 0,020		
Pescetarier (C)			A 0,001					
Vegetarier (D)			A <,001					
Veganer (E)		A 0,012						

Hinweis: Es werden ausschließlich signifikante Ergebnisse des Post-Hoc-Tests dargestellt, um die Übersichtlichkeit zu gewährleisten; Paarweise Chi-Quadrat; Signifikanzwerte werden von der Bonferroni-Korrektur für mehrere Tests angepasst; *p<0,05; **p<0,01; ***p<0,001, Mehrfachantwortset

Tabelle A.25: Zusammenhänge zwischen der Zahlungsbereitschaft für Lebensmittel mit Mikroalgen & soziodemografische Daten

	Geschlecht	Alter	Bildung	Einkommen	Ausgaben für LM	Wohnort	Ernährung
Wiener Würstchen	0,267 ¹	0,481 ²	0,094 ²	0,184 ²	0,925 ¹	0,567 ²	0,140 ¹
Frischkäse	0,794 ¹	0,839 ²	0,040*²	0,316 ²	0,477 ¹	0,499 ²	0,041*¹
Veget. Burger	0,972 ¹	0,654 ²	0,801 ²	0,154 ²	0,020*^{1,3}	0,361 ²	0,027*¹
Nudeln	0,187 ¹	0,161 ²	0,026*^{2,3}	0,791 ²	0,762 ¹	0,805 ²	0,730 ¹
Eiscreme	0,223 ¹	0,857 ²	0,540 ²	0,028*²	0,430 ¹	0,650 ²	0,195 ¹
Smoothie	0,099 ¹	0,255 ²	0,233 ²	0,392 ²	0,100 ¹	0,863 ²	0,468 ¹
Kekse	0,237 ¹	0,805 ²	0,354 ²	0,108 ²	0,323 ¹	0,792 ²	0,356 ¹

1: Exakte Signifikanz nach Pearson-Chi-Quadrat, zweiseitig (Erwartete Häufigkeit in mindestens 1 Zeile kleiner als 5); 2: Monte-Carlo Signifikanz nach Pearson-Chi-Quadrat; zweiseitig, basierend auf 10000 Stichprobentabellen. (Erwartete Häufigkeit in mindestens 1 Zeile kleiner als 5, Datensatz aber zu groß ist, um die exakte Signifikanz zu berechnen); *p<0,05; **p<0,01; ***p<0,001; 3: Post-hoc-Test nicht signifikant aufgrund des angepassten Signifikanten

Tabelle A.26: Post-Hoc Ergebnisse: Zahlungsbereitschaft für Lebensmittel mit Mikroalgen & soziodemografische Daten

	Wiener Würstchen	Frischkäse	Veget. Burger	Nudeln	Eiscreme	Smoothie	Kekse	Frische Mikroalgen
Bildungsabschluss								
Ausbildung (A)								
Meister (B)								
FH (C)								
Bachelor (D)								
Master (E)								
Diplom (F)	H 0,032							
Promotion (G)								
in Ausbildung (H)								
ohne Abschluss (I)								
Sonstige (J)								
Haushaltsnettoeinkommen								
unter 500€ (A)								
500€ - 1000€ (B)								
1000€ - 1250€ (C)								
1250€ - 1500€ (D)								
1500€ - 2000€ (E)					J 0,034			
2000€ - 2500€ (F)								
2500€ - 3000€ (G)								
3000€ - 3500€ (H)								
3500€ - 4000€ (I)								
4000€ - 5000€ (J)								
über 5000€ (K)								
Ausgaben für Lebensmittel								
0€ - 200€ (A)								
201€ - 400€ (B)								
401€ - 600€ (C)								
601€ - 800€ (D)								
801€ - 1000€ (E)								
über 1000€ (F)								
Ernährungsweise								
Omnivor (A)					D 0,047			
Flexitarier (B)								
Pescetarier (C)	D 0,038							
Vegetarier (D)								
Veganer (E)								

Hinweis: Es werden ausschließlich signifikante Ergebnisse des Post-Hoc-Tests dargestellt, um die Übersichtlichkeit zu gewährleisten; Paarweise Chi-Quadrat; Mit Hilfe der Bonferroni-Korrektur werden die Tests an alle paarweisen Vergleiche innerhalb einer Zeile der jeweils innersten Untertabelle angepasst; *p<0,05; **p<0,01; ***p<0,001; FH: Fachhochschule; MA: Mikroalgen

Tabelle A.27: Zusammenhänge zwischen Preissteigerung bzw. Zahlungsbereitschaft für frische Mikroalgen & soziodemografische Daten

	Geschlecht	Alter	Bildung	Einkommen	Ausgaben für LM	Wohnort	Ernährung
Preissteigerung für LM mit Mikroalgen	0,027*	0,920	0,726	0,659	0,791	0,257	0,154
WTP für frische Mikroalgen	0,005**	0,172	0,279	0,300	0,508	0,261	0,051

1: Kruskal-Wallis-Test; Monte-Carlo-Signifikanz; Teststatistik wurde für Bindungen angepasst; *p<0,05; **p<0,01; ***p<0,001; WTP: Zahlungsbereitschaft

Tabelle A.28: Post-Hoc Ergebnisse: Preissteigerung bzw. Zahlungsbereitschaft für frische Mikroalgen & soziodemografische Daten

	Preissteigerung für LM mit Mikroalgen	Zahlungsbereitschaft für frische Mikroalgen
Geschlecht		
Männlich (A)	B 0,023	B 0,009
Weiblich (B)		
Divers (C)		

Hinweis: Es werden ausschließlich signifikante Ergebnisse des Post-Hoc-Tests dargestellt, um die Übersichtlichkeit zu gewährleisten; Signifikanzwerte wurden von der Bonferroni-Korrektur für mehrere Tests angepasst; *p<0,05; **p<0,01; ***p<0,001,

Tabelle A.29: Zusammenhänge zwischen GI, SC, FNS, FTNS & soziodemografische Daten

	Geschlecht	Alter	Bildung	Einkommen	Ausgaben für LM	Wohnort	Ernährung
GI	0,018*	<,001***	<,001***	0,007***	0,288	0,034*	<,001***
Einstellung Nachhaltigkeit	0,330	0,490	0,347	0,080	0,561	0,795	<,001***
SC	<,001***	0,025*	0,247	0,080	0,940	0,839	<,001***
FNS	0,001**	0,006**¹	<,001***	0,270	0,949	0,153	0,439
Einstellung LM-Technologie	<,001***	0,006**	0,022*	0,668	0,181	0,101	0,062
FTNS	0,629	0,016*¹	0,019*¹	0,007**¹	0,136	0,069	0,020*

Kruskal-Wallis-Test bei unabhängigen Stichproben; Teststatistik wurde für Bindungen angepasst; *p<0,05; **p<0,01; ***p<0,001; GI: Gesundheitsinteresse; SC: Nachhaltigkeitsbewusstsein; FNS: Einstellung gegenüber neuen Lebensmitteln (Food Neophobia Scale); FTNS: Einstellung gegenüber neuen Lebensmitteltechnologien (Food Technology Neophobia Scale); 1: Post-hoc-Test nicht signifikant aufgrund des angepassten Signifikanten

Tabelle A.30: Post-Hoc Ergebnisse: GI, SC, FNS, FTNS & soziodemografische Daten

	GI	Allgemeine Einstellung gegenüber Nachhaltigkeit	SC	FNS	Allgemeine Einstellung gegenüber neuen Lebensmitteltechnologien	FTNS
Geschlecht						
Männlich (A)						
Weiblich (B)	A 0,014	A <0,001	A <0,001	B 0,003	A <0,001	
Divers (C)						
Alterskategorien						
18 - 24 Jahre (A)	E 0,001					
25 - 34 Jahre (B)	E 0,026					
35 - 44 Jahre (C)						
45 - 54 Jahre (D)						
55 - 64 Jahre (E)					B 0,003	
65 - 74 Jahre (F)						
75 - 84 Jahre (G)						
Bildungsabschluss						
Ausbildung (A)	F 0,040			G <0,001		
Meister (B)						
FH (C)						
Bachelor (D)	E 0,003					
Master (E)	I 0,018			A 0,011		
Diplom (F)	J 0,001					
Promotion (G)				C 0,044		
in Ausbildung (H)						
ohne Abschluss (I)	F 0,002					
Sonstige (J)	E 0,038					
Haushaltsnettoeinkommen						
unter 500€ (A)	G 0,033					
500€ - 1000€ (B)						
1000€ - 1250€ (C)						
1250€ - 1500€ (D)						
1500€ - 2000€ (E)						
2000€ - 2500€ (F)	G 0,018					
2500€ - 3000€ (G)						
3000€ - 3500€ (H)						
3500€ - 4000€ (I)						
4000€ - 5000€ (J)						
über 5000€ (K)						
Ernährungsweise						
Omnivor (A)		E <0,001	D 0,003			B 0,048
Flexitarier (B)	A <0,001	A <0,001	A <0,001			
Pescetarier (C)	A <0,001		A 0,003			
Vegetarier (D)	C 0,037	A <0,001				
Veganer (E)	A 0,002	B 0,023	A <0,001			

Hinweis: Es werden ausschließlich signifikante Ergebnisse des Post-Hoc-Tests dargestellt, um die Übersichtlichkeit zu gewährleisten; GI: Gesundheitsinteresse; SC: Nachhaltigkeitsbewusstsein; FNS: Einstellung gegenüber neuen Lebensmitteln (Food Neophobia Scale); FTNS: Einstellung gegenüber neuen Lebensmitteltechnologien (Food Technology Neophobia Scale); Signifikanzwerte werden von der Bonferroni-Korrektur für mehrere Tests angepasst; *p<0,05; **p<0,01; ***p<0,001

Tabelle A.31: Zusammenhänge zwischen Akzeptanz von Mikroalgen & soziodemografische Daten

	Geschlecht	Alter	Bildung	Einkommen	Ausgaben für LM	Wohnort	Ernährung
Akzeptanz LM mit Mikroalgen	0,251	<0,001***	0,814	0,631	0,102	0,610	0,047*¹
Akzeptanz frische Mikroalgen	0,495	0,035*¹	0,780	0,079	0,269	0,335	0,005**¹

LM: Lebensmittel; Kruskal-Wallis-Test bei unabhängigen Stichproben; Teststatistik wurde für Bindungen angepasst; *p<0,05; **p<0,01;

***p<0,001; 1: Post-hoc-Test nicht signifikant aufgrund des angepassten Signifikanten

Tabelle A.32: Post-Hoc Ergebnisse: Akzeptanz von Mikroalgen & soziodemografische Daten

	Akzeptanz Lebensmittel mit Mikroalgen	Akzeptanz frische Mikroalgen
Alterskategorien		
18 - 24 Jahre (A)		
25 - 34 Jahre (B)		
35 - 44 Jahre (C)		
45 - 54 Jahre (D)		
55 - 64 Jahre (E)	B 0,001	
65 - 74 Jahre (F)	B 0,019	
75 - 84 Jahre (G)		

Hinweis: Es werden ausschließlich signifikante Ergebnisse des Post-Hoc-Tests dargestellt, um die Übersichtlichkeit zu gewährleisten; Mann-Whitney-U-Tests Signifikanzwerte werden von der Bonferroni-Korrektur für mehrere Tests angepasst; *p<0,05; **p<0,01; ***p<0,001

C2 Humansensorische Analyse

Tabelle A.33: Unterschiede in den CATA und RATA-Daten zwischen Replikat I und II

Attribute	CATA RATA	-18 °C			+ 4 °C	+ 20 °C			+ 99 °C			
		452	651	p-Wert		853	167	p-Wert		982	546	p-Wert
fruchtig												
Häufigkeit, n (%)	3 (25,00)	4 (33,33)		1,000 ¹	5 (41,70)	4 (33,33)		1,000 ¹	4 (33,33)	3 (25,00)		1,000 ¹
Mw ± Sw	1,40 ± 0,69	1,35 ± 0,57		1,000 ²	1,76 ± 0,49	1,40 ± 0,57		0,343 ³	1,88 ± 0,80	1,70 ± 0,95		0,787 ³
Min. – Max.	1,0 - 2,2	1,0 - 2,2			1,0 - 2,2	1,0 - 2,2			1,0 - 2,9	1,0 - 3,0		
frisch												
Häufigkeit, n (%)	8 (66,6)	5 (41,66)		0,414 ¹	7 (58,33)	9 (75,00)		0,667 ¹	4 (33,33)	4 (33,33)		1,000 ¹
Mw ± SD	2,06 ± 0,90	1,34 ± 0,32		0,067 ³	1,96 ± 1,20	1,77 ± 0,69		0,694 ³	1,45 ± 0,57	1,87 ± 1,12		0,258 ³
Min. – Max.	1,0 - 3,3	1,0 - 1,7			1,0 - 4,2	1,0 - 3,0			1,0 - 2,2	1,0 - 3,5		
weinartig/ alkoholisch												
Häufigkeit, n (%)	2 (16,66)	2 (16,66)		1,000 ¹	2 (16,66)	2 (16,66)		1,000 ¹	3 (25,00)	3 (25,00)		1,000 ¹
Mw ± Sw	2,60 ± 0,57	2,60 ± 0,57		1,000 ²	1,86 ± 0,21	1,95 ± 0,07		1,000 ²	2,23 ± 0,25	2,07 ± 0,81		0,376 ³
Min. – Max.	2,2 - 3,0	2,2 - 3,0			1,7 - 2,0	1,9 - 2,0			2,0 - 2,5	1,5 - 3,0		
joghurtartig/buttermilchartig												
Häufigkeit, n (%)	10 (83,33)	9 (75,00)		1,000 ¹	11 (91,66)	10 (83,33)		1,000 ¹	7 (58,33)	12 (100,00)		0,037* ¹
Mw ± SW	2,43 ± 1,00	2,84 ± 0,84		0,172 ³	3,28 ± 1,05	2,75 ± 0,94		0,120 ³	2,93 ± 1,12	2,94 ± 0,98		0,490 ³
Min. – Max.	1,0 - 3,9	1,5 - 4,1			1,30 - 5,00	1,4 - 4,0			1,6 - 4,6	1,0 - 4,5		
essigartig												
Häufigkeit, n (%)	8 (66,66)	6 (50,00)		0,680 ¹	3 (25,00)	5 (41,70)		0,667 ¹	7 (58,33)	6 (50,00)		1,000 ¹
MW ± SW	2,44 ± 1,02	2,52 ± 0,80		0,439 ³	2,50 ± 1,45	2,56 ± 0,90		1,000 ²	3,14 ± 1,24	2,80 ± 1,19		0,311 ³
Min. – Max.	1,1 - 4,0	1,5 - 3,5			1,0 - 3,9	1,0 - 3,2			1,0 - 4,3	1,0 - 4,5		
butterartig/ fettig												
Häufigkeit, n (%)	5 (41,70)	6 (50,00)		1,000 ¹	6 (50,00)	6 (50,00)		1,000 ¹	6 (50,00)	4 (33,33)		0,680 ¹
MW ± SW	2,28 ± 1,22	2,15 ± 0,90		0,422 ³	2,60 ± 1,20	1,98 ± 0,89		0,167 ³	2,80 ± 1,12	2,00 ± 1,34		0,476 ²
Min. – Max.	1,1 - 4,0	1,0 - 3,2			1,2 - 4,0	1,0 - 3,1			1,1 - 4,0	1,2 - 4,0		
algig												
Häufigkeit, n (%)	5 (41,70)	8 (66,66)		0,414 ¹	5 (41,66)	6 (50,00)		1,000 ¹	7 (58,33)	5 (41,66)		1,000 ¹
Mw ± Sw	2,04 ± 1,28	2,39 ± 0,96		0,309 ³	1,90 ± 0,72	2,17 ± 1,03		0,320 ³	2,66 ± 0,96	2,04 ± 1,05		0,158 ³
Min. – Max.	1,0 - 4,2	1,0 - 3,5			1,0 - 3,0	1,0 - 3,5			1,2 - 4,0	1,0 - 3,2		
muffig												
Häufigkeit, n (%)	4 (33,33)	7 (58,33)		0,414 ¹	6 (50,00)	6 (50,00)		1,000 ¹	10 (83,33)	9 (75,00)		1,000 ¹
MW ± SW	2,55 ± 1,37	2,50 ± 0,97		0,472 ³	3,2 ± 1,2	2,42 ± 1,12		0,269 ³	2,70 ± 1,31	2,12 ± 0,86		0,139 ³
Min. – Max.	1,0 - 4,2	1,4 - 4,0			1,0 - 4,2	1,0 - 4,2			1,0 - 4,5	1,0 - 3,2		
erdig												
Häufigkeit, n (%)	3 (25,00)	5 (41,70)		0,667 ¹	6 (50,00)	6 (50,00)		1,000 ¹	3 (25,00)	3 (25,00)		1,000 ¹
MW ± SW	2,60 ± 1,25	2,24 ± 0,81		0,317 ³	2,02 ± 1,09	1,87 ± 1,06		0,407 ³	3,13 ± 0,23	2,73 ± 1,12		1,000 ²
Min. – Max.	1,2 - 3,6	1,5 - 3,2			1,0 - 3,7	1,0 - 3,9			3,0 - 3,4	1,5 - 3,7		
metallisch												
Häufigkeit, n (%)	5 (41,66)	5 (41,66)		1,000 ¹	2 (16,66)	4 (33,33)		0,640 ¹	3 (25,00)	6 (50,00)		0,400 ¹
MW ± SW	2,18 ± 1,09	1,42 ± 0,67		0,222 ²	1,6 ± 0,85	1,83		0,857 ²	2,90 ± 0,79	1,60 ± 0,59		0,013* ³
Min. – Max.	1,0 - 3,4	1,0 - 2,6			1,0 - 2,2	1,0 - 3,4			2,0 - 3,5	1,0 - 2,7		
schwefelartig												
Häufigkeit, n (%)	6 (50,00)	9 (75,00)		0,400 ¹	4 (33,33)	7 (58,33)		0,414 ¹	7 (58,33)	5 (41,66)		0,684 ¹
MW ± SW	2,18 ± 1,12	2,16 ± 0,66		0,476 ³	1,83 ± 0,95	1,90 ± 0,78		0,445 ³	3,37 ± 0,94	2,18 ± 0,77		0,021* ³
Min. – Max.	1,0 - 4,0	1,0 - 3,0			1,0 - 3,0	1,2 - 3,0			2,2 - 5,0	1,0 - 3,0		
benzinartig												
Häufigkeit, n (%)	2 (16,66)	2 (16,66)		1,000 ¹	2 (16,66)	2 (16,66)		1,000 ¹	2 (16,66)	5 (41,66)		1,000 ¹
MW ± SW	1,05 ± 0,07	1,20 ± 0,28		1,000 ²	1,0 - 1,6	1,25 ± 0,35		0,667 ²	1,20 ± 0,28	1,13 ± 0,12		0,800 ²
Min. – Max.	1,0 - 1,1	1,0 - 1,4			1,30 ± 0,42	1,0 - 1,5			1,0 - 1,4	1,0 - 1,2		

1: CATA (Exakter Test nach Fischer); 2: RATA (Mann-Whitney-U-Test); 3: RATA unverbundener t-Test; Exakte Signifikanz; *p<0,05; **p<0,01; ***p<0,001

Tabelle A.34: Verteilung der CATA und RATA-Daten über beide Replikate

Attribute	CATA RATA	- 18 °C	+ 4 °C	+ 20 °C	+ 99 °C	Attribute	CATA RATA	- 18 °C	+ 4 °C	+ 20 °C	+ 99 °C
fruchtig						aligig					
Häufigkeit, n (%)	7 (29,2)	9 (37,5)	8 (33,3)	7 (29,2)		Häufigkeit, n (%)	13 (54,2)	11 (45,8)	12 (50,0)	10 (41,7)	
Mw ± Sw	1,37 ± 0,57	1,60 ± 0,53	1,79 ± 0,82	1,37 ± 0,55		Mw ± Sw	2,25 ± 1,06	2,05 ± 0,87	2,40 ± 1,00	1,89 ± 0,94	
Min. – Max.	1,0 - 2,2	1,0 - 2,20	1,0 - 3,0	1,0 - 2,40		Min. – Max.	1,0 - 4,2	1,0 - 3,5	1,0 - 4,0	1,0 - 3,7	
frisch						muffig					
Häufigkeit, n (%)	13 (54,2)	16 (66,7)	10 (41,7)	6 (25,0)		Häufigkeit, n (%)	11 (45,8)	12 (50,0)	19 (79,2)	12 (50,0)	
Mw ± SD	1,78 ± 0,80	1,85 ± 0,92	1,70 ± 0,92	1,53 ± 0,79		MW ± SW	2,52 ± 1,06	2,81 ± 1,18	2,43 ± 1,13	3,28 ± 1,16	
Min. – Max.	1,0 - 3,3	1,0 - 4,2	1,0 - 3,5	1,0 - 3,0		Min. – Max.	1,0 - 4,2	1,0 - 4,2	1,0 - 4,5	1,1 - 4,6	
weinartig/ alkoholisch						erdig					
Häufigkeit, n (%)	4 (16,7)	4 (16,7)	6 (25,0)	6 (25,0)		Häufigkeit, n (%)	8 (33,3)	12 (50,0)	6 (25,0)	11 (45,8)	
Mw ± Sw	2,60 ± 0,46	1,90 ± 0,14	2,15 ± 0,55	2,03 ± 0,64		MW ± SW	2,38 ± 0,93	1,94 ± 1,03	2,93 ± 0,76	2,69 ± 1,21	
Min. – Max.	2,2 - 3,0	1,7 - 2,0	1,5 - 3,0	1,2 - 3,0		Min. – Max.	1,2 - 3,6	1,0 - 3,9	1,5 - 3,7	1,0 - 4,2	
joghurtartig/buttermilchartig						metallisch					
Häufigkeit, n (%)	19 (79,2)	21 (87,5)	19 (78,2)	14 (58,3)		Häufigkeit, n (%)	10 (41,7)	6 (25,0)	9 (37,5)	8 (33,3)	
Mw ± SW	2,63 ± 0,93	3,03 ± 1,01	2,937 ± 1,01	2,56 ± 1,22		MW ± SW	1,80 ± 0,94	1,75 ± 0,9	2,03 ± 0,89	1,91 ± 1,00	
Min. – Max.	1,0 - 4,1	1,3 - 5,0	3,6 - 4,6	1,0 - 4,0		Min. – Max.	1,0 - 3,4	1,0 - 3,4	2,5 - 3,5	1,0 - 3,5	
essigartig						schwefelartig					
Häufigkeit, n (%)	14 (58,3)	8 (33,3)	13 (54,2)	4 (16,7)		Häufigkeit, n (%)	15 (62,5)	11 (45,8)	12 (50,0)	10 (41,7)	
MW ± SW	2,47 ± 0,90	2,54 ± 1,03	2,98 ± 1,18	2,83 ± 0,84		MW ± SW	2,17 ± 0,83	1,87 ± 0,80	2,88 ± 1,04	2,33 ± 1,45	
Min. – Max.	1,1 - 4,0	1,0 - 3,9	1,0 - 4,5	2,0 - 4,0		Min. – Max.	1,0 - 4,0	1,0 - 3,0	1,0 - 5,0	1,0 - 5,0	
butterartig/ fettig						benzinartig					
Häufigkeit, n (%)	11 (45,8)	12 (50,0)	10 (41,7)	21 (87,5)		Häufigkeit, n (%)	4 (16,7)	4 (16,7)	5 (20,8)	5 (20,8)	
MW ± SW	2,21 ± 1,00	2,29 ± 1,05	2,48 ± 1,21	3,05 ± 0,91		MW ± SW	1,13 ± 0,19	1,28 ± 0,32	1,16 ± 0,17	1,32 ± 0,38	
Min. – Max.	1,0 - 4,0	1,0 - 4,0	1,1 - 4,0	1,4 - 4,5		Min. – Max.	1,0 - 1,4	1,0 - 1,6	1,0 - 1,4	1,0 - 1,9	

Tabelle A.35: Unterschiede in den CATA-Daten zwischen den Lagertemperaturen

	p-Wert		Post Hoc Test				
	1. Replikat	2. Replikat		A	B	C	D
fruchtig	0,973	1,000					
frisch	0,184	0,124					
weinartig/ alkoholisch	1,000	1,000					
joghurtartig/ buttermilchartig	0,192	0,097					
essigartig	0,041**	0,324					
butterartig/ fettig	0,066	0,111					
aligig	0,738	0,741					
muffig	0,111	0,696					
erdig	0,491	0,728					
metallisch	0,716	0,915					
schwefelartig	0,768	0,351					
benzinartig	1,000	1,000					

Hinweis: Es werden ausschließlich signifikante Ergebnisse des Post-Hoc-Tests dargestellt, um die Übersichtlichkeit zu gewährleisten; Exakte Signifikanz nach Pearson Chi-Quadrat, Post-Hoc-Tests wurden mit Hilfe der Bonferroni-Korrektur angepasst. 1: Post-hoc-Test nicht signifikant aufgrund der angepassten Signifikanz

Tabelle A.36: Unterschiede in den RATA-Daten zwischen den Lagertemperaturen

	1. Replikat	2. Replikat	Overall
fruchtig	0,829 ¹	0,884 ¹	0,645 ¹
frisch	0,781 ²	0,401 ¹	0,805 ¹
weinartig/ alkoholisch	0,270 ¹	0,601 ¹	0,201 ¹
joghurtartig/ buttermilchartig	0,177 ²	0,990 ¹	0,485 ¹
essigartig	0,696 ¹	0,835 ¹	0,587 ²
butterartig/ fettig	0,655 ²	0,106 ¹	0,088 ²
aligig	0,611 ²	0,639 ¹	0,626 ²
muffig	0,792 ²	0,125 ¹	0,220 ²
erdig	0,314 ¹	0,712 ²	0,201 ¹
metallisch	0,605 ¹	0,801 ¹	0,821 ¹
schwefelartig	0,121 ²	0,931 ²	0,192 ¹
benzinartig	0,862 ¹	0,958 ¹	0,697 ¹

Hinweis: Es werden ausschließlich signifikante Ergebnisse des Post-Hoc-Tests dargestellt, um die Übersichtlichkeit zu gewährleisten; 1: Kruskal-Wallis-Test, Asymptotische Signifikanz. (zweiseitiger Test); 2: Univariate Varianzanalyse (ANOVA)

Tabelle A.37: Angaben der Panelist*innen zu den Proben

	1. Replikat	2. Replikat
Probe 853: grasartiger Geruch	1	
Probe 982: sehr unangenehmer Geruch	1	
Probe 982: würzig	1	
Probe 982: milchig, sahnig	1	
Probe 982: riecht sehr lecker	1	
Geruch von gekochtem Ei wahrnehmbar	1	1
Proben rochen nach frischem, warmem Käsekuchen, teilweise auch mit einer Röstnote (982)	1	
Proben eher fischig als algig		1
Probe 546 bildet Schaum		1
Probe 546 etwas wärmer als die anderen		1
Probe 546: teigartiger/keksartiger Geruch		1

C3 GC-MS-Analyse

Tabelle A. 38: Post-Hoc Ergebnisse: VOCs und Spirulina- bzw. Chlorella-Pulver

	Spirulina Algenwerk (A)	Spirulina Bio (B)	Spirulina Raab (C)	Chlorella (D)
2-Formylbutan		D 0,013*		
Silvan/ 2-Methylfuran			B 0,022*	
3-Methylfuran			B 0,022*	
Heptadecan	C 0,023*			
2,2,6-Trimethylcyclohe- xanon			D 0,021*	B 0,002**
Sulcaton		D 0,002	D 0,011	

Hinweis: Es werden ausschließlich signifikante Ergebnisse des Post-Hoc-Tests dargestellt, um die Übersichtlichkeit zu gewährleisten; Signifikanzwerte werden von der Bonferroni-Korrektur für mehrere Tests angepasst; * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$

C4 Hauptkomponentenanalyse (PCA)

Tabelle A. 39: Korrelations-Matrix der Hauptkomponentenanalyse inklusive Signifikanzniveau

	Ethyl-acetat	Methylo-laceton	Isopropyl-acetat	Ethanol	Isopropyl-alkohol	Butandion	Butanol	Hexanal	Acetoin	Hexanol	Hexyl-format	Oxiran	Essigsäure	Penta-decan	Ethylhyd-roxybuty-rat	Phytan	Hepta-decan
fruchtig	r = -0.877 p = 0.062	r = -0.706 p = 0.147	r = -0.522 p = 0.239	r = 0.815 p = 0.093	r = -0.467 p = 0.266	r = -0.522 p = 0.239	r = -0.522 p = 0.239	r = -0.522 p = 0.239	r = -0.129 p = 0.435	r = -0.522 p = 0.239	r = -0.522 p = 0.239	r = -0.522 p = 0.239	r = -0.132 p = 0.434	r = -0.522 p = 0.239	r = 0.174 p = 0.413	r = -0.257 p = 0.371	r = -0.276 p = 0.362
frisch	r = -0.293 p = 0.353	r = -0.525 p = 0.237	r = 0.273 p = 0.363	r = 0.636 p = 0.182	r = 0.292 p = 0.354	r = -0.819 p = 0.090	r = 273 p = 0.363	r = -0.819 p = 0.090	r = -0.710 p = 0.145	r = -0.819 p = 0.090	r = -0.819 p = 0.090	r = -0.819 p = 0.090	r = -0.397 p = 0.301	r = -0.819 p = 0.090	r = -0.195 p = 0.402	r = 0.616 p = 0.192	r = -0.797 p = 0.101
Weinartig alkoholisch	r = -0.174 p = 0.413	r = 0.469 p = 0.265	r = -0.577 p = 0.211	r = -0.511 p = 0.244	r = -0.514 p = 0.243	r = 0.577 p = .211	r = -0.577 p = 0.211	r = 0.577 p = 0.211	r = 0.952 p = 0.024	r = 0.577 p = 0.211	r = 0.577 p = 0.211	r = 0.577 p = 0.211	r = 0.668 p = 0.166	r = 0.577 p = 0.211	r = 0.577 p = 0.211	r = 0.416 p = 0.292	r = 0.702 p = 0.149
Joghurt-/but-termilchartig	r = -0.487 p = 0.256	r = -0.323 p = 0.339	r = 0.167 p = 0.416	r = 0.478 p = 0.261	r = 0.261 p = 0.369	r = -0.949 p = 0.026	r = 0.167 p = 0.416	r = -0.949 p = 0.026	r = -0.427 p = 0.287	r = -0.949 p = 0.026	r = -0.949 p = 0.026	r = -0.949 p = 0.026	r = -0.050 p = 0.475	r = -0.949 p = 0.026	r = 0.167 p = 0.416	r = -0.797 p = 0.101	r = -0.859 p = 0.070
essigartig	r = 0.036 p = 0.482	r = 0.542 p = 0.229	r = 0.610 p = 0.195	r = -0.403 p = 0.299	r = 0.762 p = 0.119	r = -0.825 p = 0.087	r = 0.610 p = 0.195	r = -0.825 p = 0.087	r = -0.072 p = 0.464	r = -0.825 p = 0.087	r = -0.825 p = 0.087	r = -0.825 p = 0.087	r = 0.483 p = 0.259	r = -0.825 p = 0.087	r = 0.466 p = 0.267	r = -0.961 p = 0.020	r = -0.879 p = 0.061
Butterartig fettig	r = 0.353 p = 0.323	r = -0.137 p = 0.431	r = -0.329 p = 0.036	r = -0.036 p = 0.482	r = -0.484 p = 0.258	r = 0.987 p = 0.007	r = -0.329 p = 0.336	r = 0.987 p = 0.007	r = 0.166 p = 0.417	r = 0.987 p = 0.007	r = 0.987 p = 0.007	r = 0.987 p = 0.007	r = -0.333 p = 0.333	r = 0.987 p = 0.007	r = -0.461 p = 0.270	r = 0.979 p = 0.010	r = 0.930 p = 0.035
alig	r = 0.234 p = 0.383	r = 0.514 p = 0.243	r = 0.775 p = 0.113	r = -0.399 p = 0.300	r = 0.887 p = 0.057	r = -0.775 p = 0.113	r = 0.775 p = 0.113	r = -0.775 p = 0.113	r = -0.254 p = 0.373	r = -0.775 p = 0.113	r = -0.775 p = 0.113	r = -0.775 p = 0.113	r = 0.310 p = 0.345	r = -0.775 p = 0.113	r = 0.258 p = 0.371	r = -0.909 p = 0.045	r = -0.986 p = 0.052
muffig	r = -0.633 p = 0.184	r = 0.451 p = 0.275	r = -0.451 p = 0.275	r = -0.338 p = 0.331	r = -0.253 p = 0.373	r = -0.271 p = 0.365	r = -0.451 p = 0.275	r = -0.271 p = 0.365	r = 0.834 p = 0.083	r = -0.271 p = 0.365	r = -0.271 p = 0.365	r = -0.271 p = 0.365	r = 0.925 p = 0.038	r = -0.271 p = 0.365	r = 0.992 p = 0.004	r = -0.379 p = 0.310	r = -0.047 p = 0.477
erdig	r = -0.008 p = 0.496	r = -0.874 p = 0.263	r = -0.303 p = 0.257	r = -0.771 p = 0.115	r = -0.485 p = 0.257	r = 0.424 p = 0.288	r = -0.303 p = 0.349	r = 0.424 p = 0.288	r = -0.506 p = 0.247	r = 0.424 p = 0.288	r = 0.424 p = 0.288	r = 0.424 p = 0.288	r = -0.833 p = 0.058	r = 0.424 p = 0.288	r = -0.787 p = 0.107	r = 0.676 p = 0.162	r = 0.424 p = 0.288
metallisch	r = 0.609 p = 0.195	r = 0.943 p = 0.029	r = 0.683 p = 0.158	r = -0.931 p = 0.034	r = 0.759 p = 0.121	r = -0.098 p = 0.451	r = 0.683 p = 0.158	r = -0.098 p = 0.451	r = 0.202 p = 0.399	r = -0.098 p = 0.451	r = -0.098 p = 0.451	r = -0.098 p = 0.451	r = 0.534 p = 0.233	r = -0.098 p = 0.451	r = 0.293 p = 0.354	r = -0.403 p = 0.299	r = -0.285 p = 0.357
schwefelig	r = 0.492 p = 0.254	r = 0.493 p = 0.237	r = 0.926 p = 0.037	r = -0.422 p = 0.289	r = 0.982 p = 0.009	r = -0.617 p = 0.191	r = 0.926 p = 0.037	r = -0.617 p = 0.191	r = -0.418 p = 0.291	r = -0.617 p = 0.191	r = -0.617 p = 0.191	r = -0.617 p = 0.191	r = 0.108 p = 0.446	r = -0.617 p = 0.191	r = 0.000 p = 0.500	r = -0.760 p = 0.120	r = 0.820 p = 0.090
benzinartig	r = -0.174 p = 0.413	r = 0.469 p = 0.265	r = -0.577 p = 0.211	r = -0.511 p = 0.244	r = -0.514 p = 0.243	r = 0.577 p = 0.211	r = -0.577 p = 0.211	r = 0.577 p = 0.211	r = 0.952 p = 0.024	r = 0.577 p = 0.211	r = 0.577 p = 0.211	r = 0.577 p = 0.211	r = 0.688 p = 0.166	r = 0.577 p = 0.211	r = 0.577 p = 0.211	r = 0.416 p = 0.292	r = 0.702 p = 0.149

Anhang D: Chromatogramme

D1 Chromatogramme der frischen Biomasse

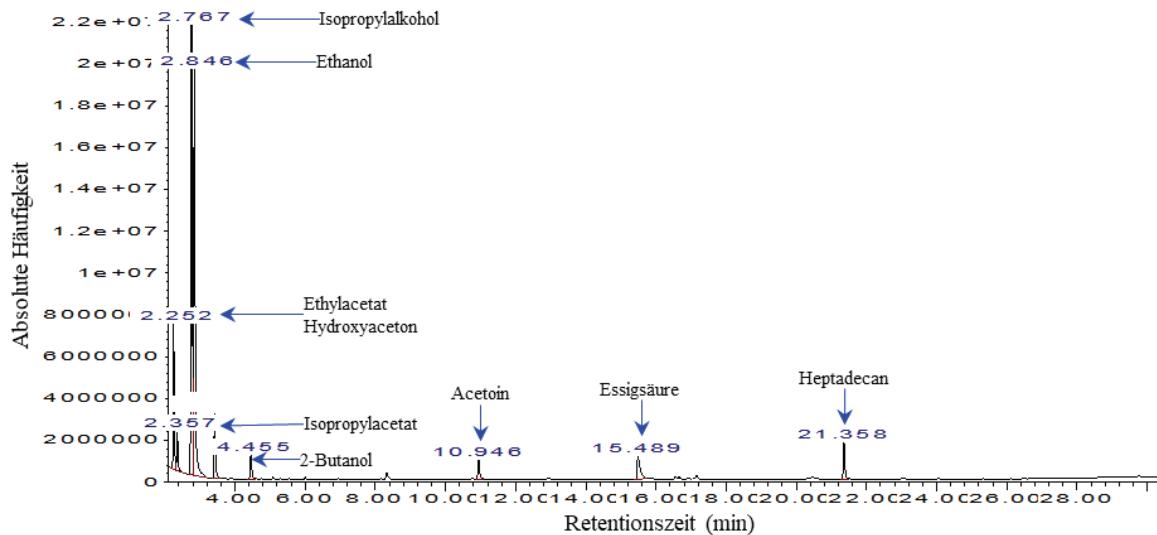


Abbildung A. 1: Gesamtionenchromatogramm der GC-MS-Analyse von L. maxima bei -18 °C

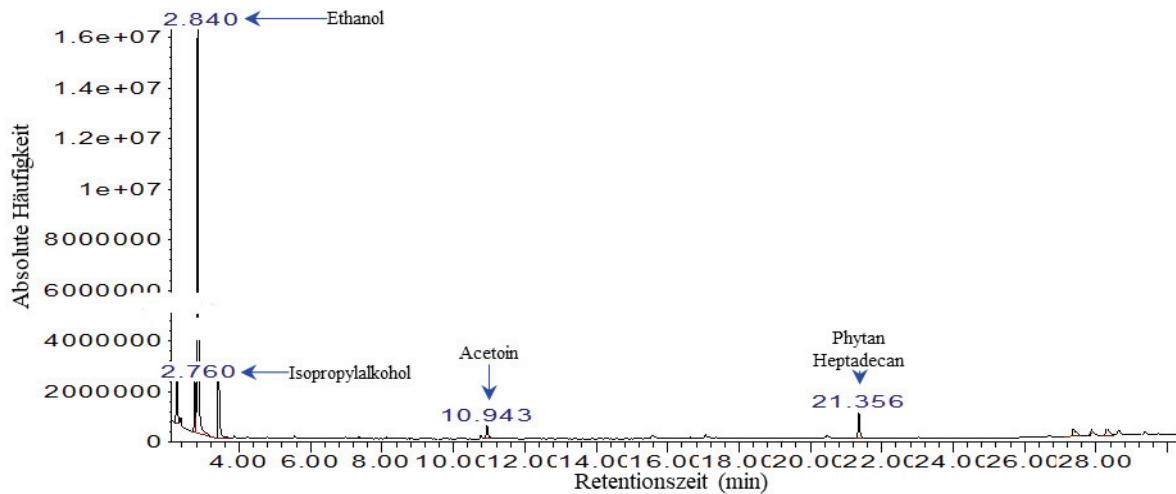


Abbildung A. 2: Gesamtionenchromatogramm der GC-MS-Analyse von L. maxima bei +4 °C

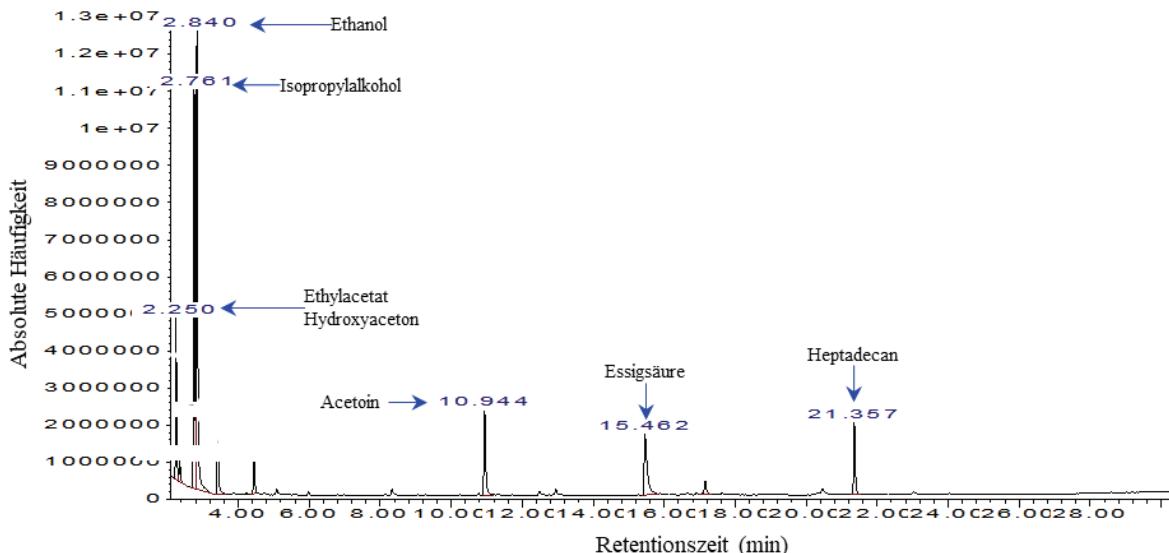


Abbildung A. 3: Gesamtionenchromatogramm der GC-MS-Analyse von L. maxima bei +20 °C

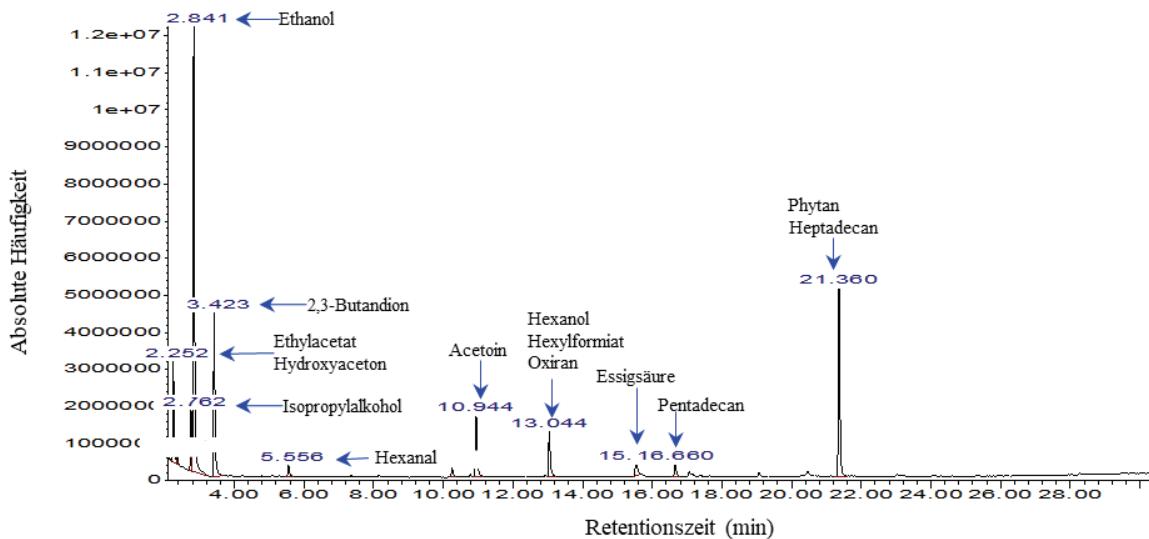


Abbildung A. 4: Gesamtionenchromatogramm der GC-MS-Analyse von L. maxima bei +99 °C

D2 Chromatogramme der Pulver

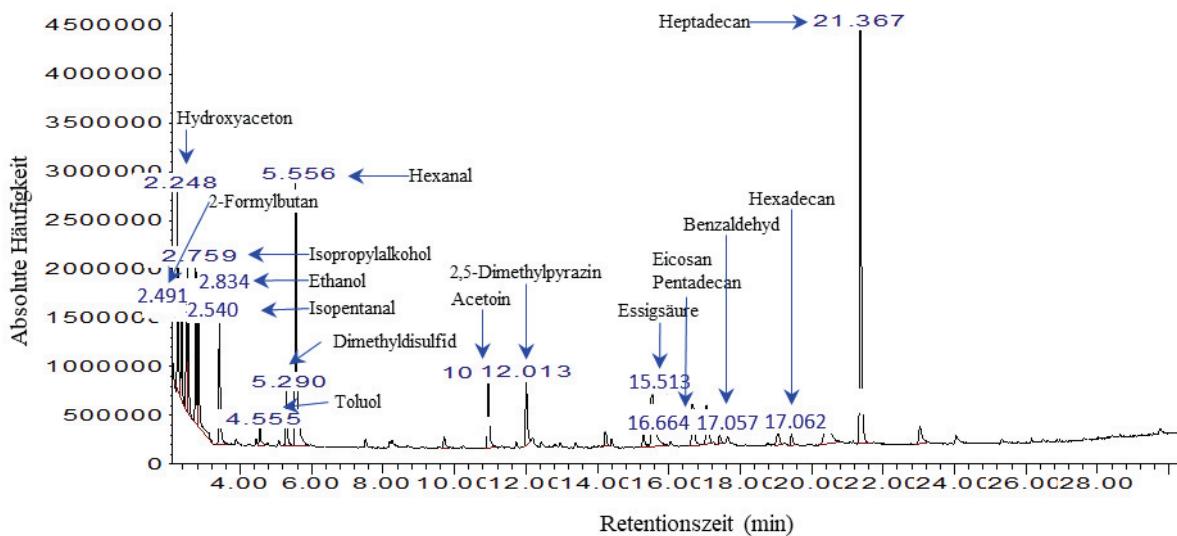


Abbildung A. 5: Gesamtionenchromatogramm der GC-MS-Analyse Spirulina-Pulver Algenwerk

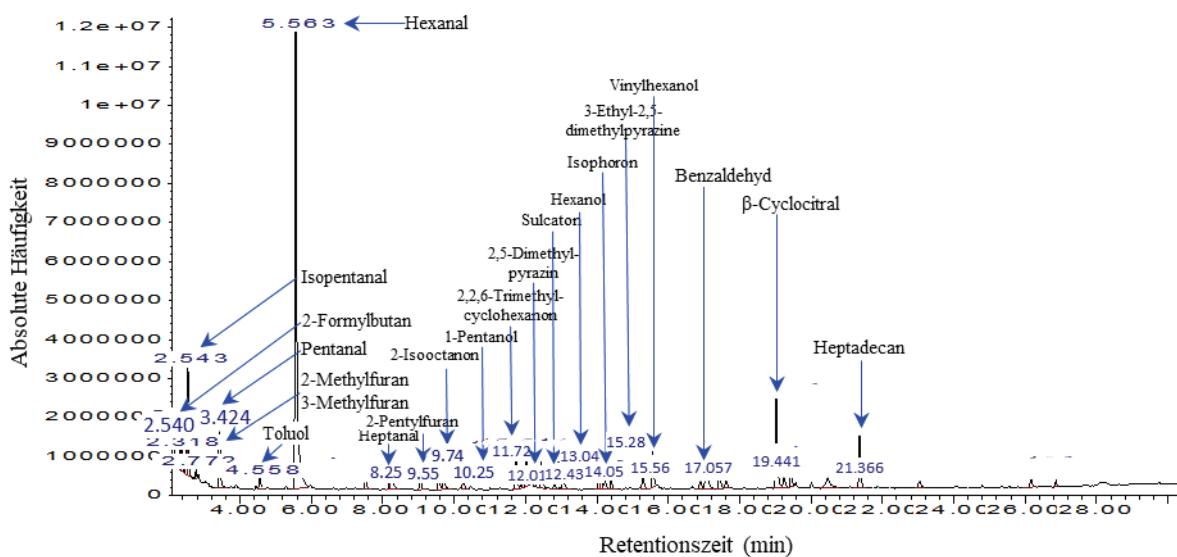


Abbildung A. 6: Gesamtionenchromatogramm der GC-MS-Analyse Spirulina-Pulver Bio

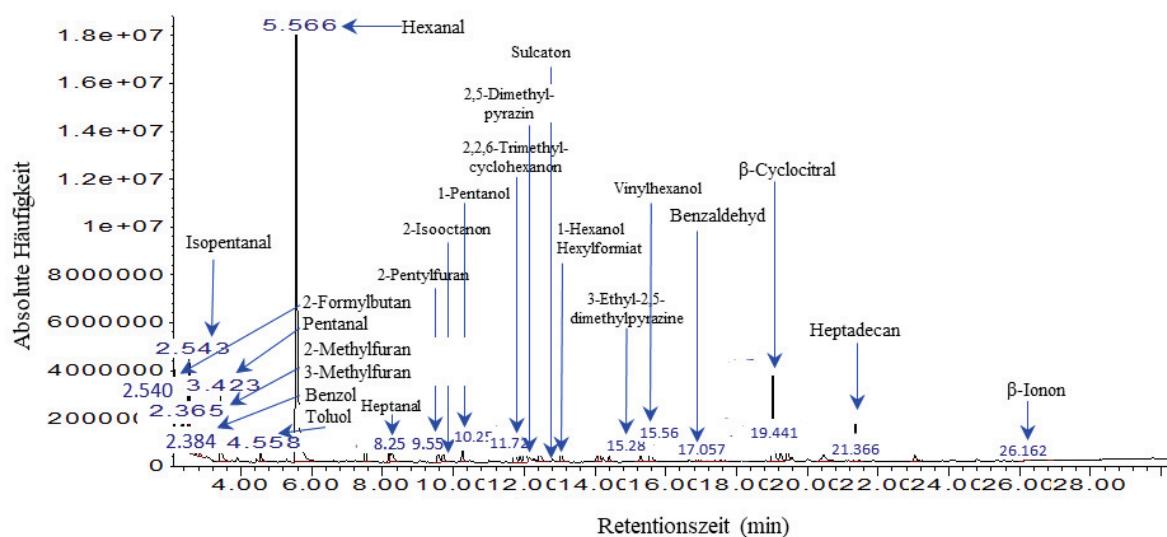


Abbildung A. 7: Gesamtionenchromatogramm der GC-MS-Analyse Spirulina-Pulver Raab

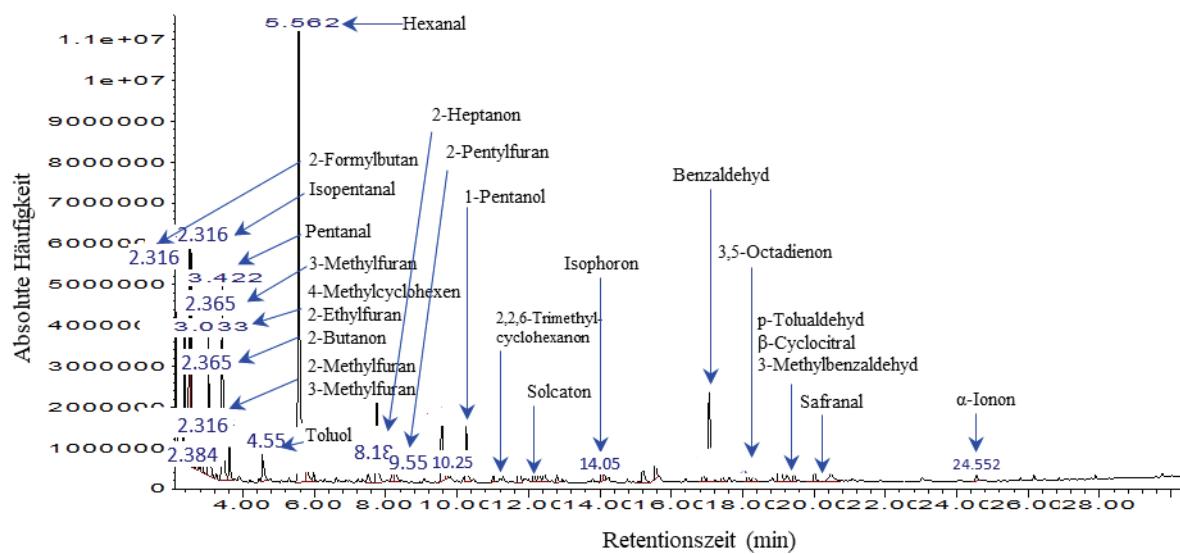


Abbildung A. 8: Gesamtionenchromatogramm der GC-MS-Analyse Chlorella-Pulver

10. Eidesstattliche Versicherung

Hiermit erkläre ich, Yvonne Thoms, dass die vorliegende Masterarbeit mit dem Titel: „**Kunden-Akzeptanz-Studie von Mikroalgen als Lebensmittel und lebensmitteltechnologische Untersuchungen am Beispiel roh-veganer Spirulina**“ von mir eigenständig und ohne unerlaubte Hilfsmittel erbracht wurde. Ich versichere, dass ich keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt und die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken als solche kenntlich gemacht habe. Die Arbeit habe ich in gleicher oder ähnlicher Form oder auszugsweise noch keiner Prüfungsbehörde zu Prüfungszwecken vorgelegt. Ich erkläre weiterhin, dass die schriftliche und die elektronische Version der Arbeit identisch sind. Mir ist bekannt, dass Zu widerhandlungen gegen den Inhalt dieser Erklärung einen Täuschungsversuch darstellen, der grundsätzlich das Nichtbestehen der Prüfung zur Folge hat.

Neubrandenburg, den 25.02.2025

Ort, Datum

—
Unterschrift