

3D-LEBENSMITTELDRUCKTECHNOLOGIE: EINE EVALUATION DER AUSWIRKUNGEN AUF ÖKOLOGISCHE NACHHALTIGKEITSASPEKTE

Bachelor-Thesis

HWZ Hochschule für Wirtschaft Zürich

eingereicht bei:

Dr. Barrueto Andrea

Vorgelegt von:	Daniela Todaro
Matrikelnummer:	19-631-423
E-Mail-Adresse	daniela.todaro@hotmail.com
Studiengang:	Bachelor of Science in Business Information Technology
Ort, Datum:	Zürich, 20.05.2023

MANAGEMENT-SUMMARY

Die 3D-Lebensmitteldrucktechnologie ist eine der neusten Entwicklungen in der Nahrungsin-
dustrie, welche die Tür zu neuartigen Lebensmittelprodukten eröffnet. Das Potenzial dieser
Technologie liegt in der Art und Weise, wie wir unsere Lebensmittel produzieren und konsu-
mieren. Es stellt sich daher die Frage, inwiefern die Produktion von Lebensmitteln durch den
Einsatz der 3D-Drucktechnologie nachhaltig sein kann. Dieses Anliegen ist Gegenstand der
vorliegenden Arbeit, in welcher ökologische Nachhaltigkeitsaspekte in Bezug auf die Einfüh-
rung der 3D-Drucktechnologie in der Lebensmittelindustrie untersucht werden.

Um den Sachverhalt zu verstehen, wird die empirische Untersuchung mittels qualitativer Be-
fragungen von Fachleuten mit Kenntnissen im 3D-Lebensmitteldruck durchgeführt. Die Ana-
lyse ermöglicht ein umfangreicheres Gesamtbild dieser Technologie zu gewinnen.

Die Ergebnisse der Befragungen zeigen, dass die 3D-Drucktechnologie aufgrund der sorgfäl-
tigen Dosierung und Zubereitung der Zutaten für den Lebensmitteldruck dazu beitragen kann,
Lebensmittelverschwendungen zu reduzieren. Zudem gelangt das genutzte Pflanzenwasser
vollumfänglich in die 3D-gedruckte Speise, was zur Anwendung einer wassersparenden Tech-
nologie im Unternehmen führt. Auch können neuartige Lebensmittelprodukte hergestellt wer-
den, welche die Förderung von alternativen Nahrungsquellen steigern und zum Erhalt der
Biodiversität beitragen. Obwohl die Minimierung des Energieverbrauchs nicht als einer der
grössten Vorteile der 3D-Drucktechnologie erachtet wird, wird die Technologie gesamthaft als
energieeffizientes Werkzeug beurteilt. Dies stützt sich auf die Tatsache, dass niedrige bis
mittlere Temperaturen benötigt werden, um die Lebensmittel herzustellen.

Im Vergleich zu herkömmlichen Produktionsverfahren können diverse ökologische Vorteile
beim Einsatz des 3D-Lebensmitteldrucks identifiziert werden. Angesichts der erforschten
Nachhaltigkeitsaspekte kann die Anwendung der Technologie als potenzielles Werkzeug be-
trachtet werden, welches dazu beitragen kann, den ökologischen Fussabdruck in der Herstel-
lung von Lebensmitteln zu reduzieren. Insbesondere lässt sich diese Technologie an Unter-
nehmungen empfehlen, die personalisierte oder alternative Lebensmittelprodukte anbieten
und zugleich einen Beitrag zum Umweltschutz leisten möchten.

Die Ergebnisse stammen aus der Befragung von Teilnehmenden aus unterschiedlichen Le-
bensmittelbranchen. Für die weitere Forschung stellt sich daher die Frage, in welcher Lebens-
mittelbranche die Technologie den grössten ökologischen Nutzen hat.

INHALTSVERZEICHNIS

Management-Summary	2
Inhaltsverzeichnis	3
Glossar	6
1 Einleitung	7
1.1 Ausgangslage des 3D-Lebensmitteldrucks	7
1.2 Identifizierung der Forschungslücke.....	8
1.3 Formulierung der Forschungsfrage	8
1.4 Zielsetzung der Bachelorarbeit.....	9
1.5 Festlegung der inhaltlichen Abgrenzungen	10
1.6 Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit	10
2 Theoretische Grundlagen	12
2.1 Entwicklung der 3D-Druck Technologie	12
2.1.1 Historischer Fortschritt und Anwendungsbereiche	12
2.1.2 Aktuelle Marktbedingungen des 3D-Lebensmitteldrucks.....	13
2.2 Grundwissen zum 3D-Druck in der Lebensmittelproduktion	15
2.2.1 Modellierung und Grundprinzipien	15
2.2.2 Anwendungsmöglichkeiten des 3D-Lebensmitteldrucks.....	17
2.3 Übersicht der 3D-Lebensmitteldruckverfahren	18
2.3.1 Extrusion-based Printing: Funktionalität und Mechanismen	19
2.3.1.1 Hot-Melt-Extrusion	20
2.3.1.2 Cold-Extrusion	21
2.3.2 Selective-Sintering: Arbeitsansätze und Systemkomponenten.....	22
2.3.2.1 Selective-Laser-Sintering	23
2.3.2.2 Selective Hot Air Sintering and Melting	23
2.3.3 Inkjet-Printing: Funktionsmechanismen und Anwendungen	24
2.3.4 Binder-Jetting: Voraussetzungen und Ablaufstruktur.....	25
2.4 Das 3D-Bioprinting in der Lebensmittelindustrie.....	26

2.5	Ökologische Auswirkungen der additiven Fertigung.....	27
2.5.1	Umweltauswirkungen der 3D-Drucktechnologien.....	27
2.5.2	Zukunftsaussichten des 3D-Lebensmitteldrucks	28
3	Methodische Vorgehensweise	30
3.1	Thesen und Forschungsziel	30
3.2	Auswahl der Forschungsmethode.....	31
3.3	Aufbau der Befragungen.....	31
3.3.1	Vorstellung der Interviewpartnerinnen und -partner	31
3.3.2	Konzeption des Leitfadens für die Interviews	33
3.4	Ablauf der Interviews	33
3.4.1	Pretest	34
3.4.2	Durchführung der Interviews.....	34
3.5	Qualitative Inhaltsanalyse	35
3.5.1	Vorbereitung und Erhebung der Daten für die Analyse	35
3.5.2	Vorstellung des Code-Buches.....	36
4	Empirischer Teil	37
4.1	These 1: Nahrungsmittelressourcen	37
4.1.1	Ausgangslage und These	37
4.1.2	Empirische Erkenntnisse	37
4.1.3	Plausibilisierung der These 1	41
4.2	These 2: Wasserverbrauch	42
4.2.1	Ausgangslage und These	42
4.2.2	Empirische Erkenntnisse	43
4.2.3	Plausibilisierung der These 2	45
4.3	These 3: Erhalt der Biodiversität	46
4.3.1	Ausgangslage und These	46
4.3.2	Empirische Erkenntnisse	47
4.3.3	Plausibilisierung der These 3	49
4.4	These 4: Energieverbrauch.....	51

4.4.1	Ausgangslage und These	51
4.4.2	Empirische Erkenntnisse	51
4.4.3	Plausibilisierung der These 4	53
5	Schlussfolgerungen und Ausblick.....	55
5.1	Bewertung der Umweltauswirkungen	55
5.2	Empfehlungen und Einbindung der Technologie	57
5.2.1	Unternehmungen, die personalisierten Lebensmittelprodukten anbieten	58
5.2.2	Unternehmungen, die Ersatzprodukte anbieten	58
5.2.3	Unternehmungen mit Nachhaltigkeitswunsch.....	58
5.3	Kritische Würdigung der Arbeit.....	59
5.4	Ausblick und weitere Fragestellungen.....	60
6	Anhang.....	61
6.1	Quellenverzeichnis.....	61
6.2	Abbildungsverzeichnis	65
6.3	Tabellenverzeichnis	65
6.4	Abkürzungsverzeichnis	66
6.5	Interviewleitfaden.....	67
6.6	Code-Buch.....	68

GLOSSAR

B

Binder-Jetting

Additiver Fertigungsprozess, bei dem Bindemittel auf ein Pulverbett aufgebracht wird

Biotinte

Biologische Tinte mit Materialien wie Zellen

D

Direct-Energy-Deposition

Fertigungsprozess, in welcher ein Laser das Material beim Auftragen verschmilzt

E

Extrusion

Fertigungsverfahren, bei dem Material durch eine Düse gepresst wird

F

Fused-Deposition-Modeling

3D-Druckverfahren, welches eine erhitzte Düse für die Materialverschmelzung nutzt

G

Galvo-Spiegel

Beweglicher Spiegel der zur Lenkung des Laserstrahls eingesetzt wird

H

Hydrokolloide

Stoffe die in der Lebensmittelindustrie als Stabilisierungsmittel eingesetzt werden

I

Inkjet-Printing

Druckverfahren, bei dem kleine Tröpfchen auf einer Druckplatte aufgetragen werden

In-vitro-Fleisch

Kultiviertes Fleisch, welches aus tierischen Zellen im Glas gezüchtet wird

M

Material-Jetting

Additiver Fertigungsprozess, in welcher ein Laser oder Plasmastrahl verwendet wird

P

Powder-Bed-Fusion

Additiver Fertigungsprozess, welches ein Laser oder Elektronenstrahl nutzt

S

Selective-Laser-Sintering

Druckprozess, bei dem pulverförmiges Material mit einem Laser verschmolzen wird

Sheet-Lamination

Fertigungsverfahren, bei dem dünne Materialschichten verbunden werden

Slicing

Prozess bei dem ein 3D-Modell in dünne Schichten zerlegt wird

Stereolithografie-Verfahren

3D-Druckverfahren, bei dem ein Laserstrahl das Photopolymer aushärtet

V

Vat-Polymerization

Fertigungsverfahren, bei dem flüssiges Photopolymer ausgehärtet wird

1 EINLEITUNG

In diesem Kapitel werden die Ausgangssituation und die zugrundeliegende Forschungslücke erörtert, indem ein zusammenfassender Überblick über die relevanten Hintergrundinformationen bereitgestellt wird. Im Anschluss daran wird die Forschungsfrage formuliert, die als Leitfrage über die gesamte Arbeit hinweg dienen wird. Des Weiteren werden die Zielsetzungen und die inhaltlichen Abgrenzungen der Arbeit erläutert, sodass eine klare Festlegung der angestrebten Ziele veranschaulicht werden kann.

1.1 AUSGANGSLAGE DES 3D-LEBENSMITTELDRUCKS

«I had to radically change and transform in my mind what I thought sustainability could be and will be. I came to adopt and realize that the 3D food printer can be used as a tool, in which you can use sustainable raw and healthy ingredients.»

(Kristinsson Petty, 2019, o. S.)

Holly Kristinsson Petty, eine Nahrungswissenschaftlerin aus Alaska, präsentierte in ihrem TEDx-Fernsehvortrag im Jahr 2019 die vielversprechenden Möglichkeiten der 3D-Drucktechnologie zur Deckung des steigenden Bedarfs an Fisch als Nahrungsquelle (Kristinsson Petty, 2019, o. S.). In ihrer Präsentation erläuterte sie zudem, wie der Einsatz dieser Technologie dabei helfen kann, Umweltprobleme in der Fischwirtschaft zu lösen und deren Produktion nachhaltiger und effizienter zu gestalten. Dabei wurde die 3D-Drucktechnologie vorgestellt und mögliche Lösungen für Lebensmittelverschwendungen zur Diskussion gestellt, die zu einer tiefgehenden Reflektion anstossen.

Die additive Fertigung, auch als 3D-Drucktechnologie bezeichnet, ist unter dem englischen Begriff Additive Manufacturing (AM) bekannt und bezieht sich auf den dreidimensionalen Druck von Objekten (Morar, 2022). Dieses Produktionsverfahren gewinnt zunehmend an Relevanz in der Fertigungsindustrie. Im Jahr 2019 identifizierte eine Studie von Wohlers (2019) den Marktanteil der 3D-Drucktechnologie in vier Hauptindustrien (Wohlers Report, 2019 in Statista, 2022). Laut diesem Report liegt der grösste Marktwert an additiver Fertigung in der Automobil- und Herstellungsindustrie, aber auch in Raumfahrtanwendungen. Aufgrund der niedrigeren Anschaffungskosten von 3D-Druckern wird die additive Fertigung heute jedoch zunehmend in weiteren Anwendungsbereichen eingesetzt (Khan & Jappes, 2022). Zu diesen Einsatzgebieten gehören beispielsweise Bildungsinstitute und der persönliche Haushalt. Die

Anwendungsmöglichkeiten der 3D-Drucktechnologie erweitern sich allerdings auch in der Lebensmittelbranche und ihr Einsatz konnte als erstes im Bereich der Militär- und Weltraumnahrung registriert werden (Liu et al., 2017).

Obwohl die Anwendung des 3D-Drucks in der Verarbeitung von Lebensmitteln noch gering ist, wird erwartet, dass die Technologie in Zukunft eine zunehmende Ausbreitung erfahren wird (Nachal et al., 2019). Tatsächlich wird die 3D-Drucktechnologie in verschiedenen Bereichen der Lebensmittelindustrie intensiv erforscht und bietet bereits heute die Möglichkeit, personalisiert Nahrung in individuellem Design herzustellen (Nassar & Fouad, 2022). Bislang durchgeführte Studien zur 3D-Lebensmitteldrucktechnologie belegen insbesondere die Vielseitigkeit dieser Technik und untersuchen ihren Einsatz mit unterschiedlichen Lebensmittelmaterialien (Kewuyemi et al., 2022). Hierbei werden nicht nur herkömmliche Lebensmittel wie Schokolade, Teig und Pürees aus Frucht und Gemüse verwendet, sondern auch innovative Materialien, die auf pflanzlicher Basis hergestellt werden.

1.2 IDENTIFIZIERUNG DER FORSCHUNGSLÜCKE

Trotz technologischer Fortschritte im Bereich des 3D-Lebensmitteldrucks gibt es bis zum jetzigen Zeitpunkt nur wenige wissenschaftliche Untersuchungen zu dessen Nachhaltigkeit. Tatsächlich liegt der Fokus in der bisherigen Literatur hauptsächlich auf dem aktuellen Stand der Entwicklung des 3D-Lebensmitteldrucks und dem Potenzial zur Verbesserung der Druckqualität und -genauigkeit der erwünschten 3D-Lebensmittelobjekte. Weitere Aspekte im Zusammenhang mit ökologischen Nachhaltigkeitsfragen wurden bislang nur wenig erforscht.

Um diese Forschungslücke zu schliessen, wird in dieser Bachelorarbeit das Verhältnis zwischen dem 3D-Lebensmitteldruck und ausgewählten ökologischen Nachhaltigkeitsfaktoren untersucht. Dabei sollen mögliche ökologischen Aspekte in Zusammenhang mit Ressourcenverbrauch, Energiebedarf und Abfallproduktion bei der Herstellung von 3D-Lebensmittelprodukten erforscht werden.

1.3 FORMULIERUNG DER FORSCHUNGSFRAGE

Angesichts der wachsenden Bedeutung der 3D-Drucktechnologie in der Lebensmittelbranche und des Nachhaltigkeitsbewusstseins in der Gesellschaft stellt sich die Frage, in welchem Umfang die 3D-Lebensmitteldrucktechnologie aus einer ökologischen Perspektive bewertet werden kann.

Vor diesem Hintergrund lautet die zentrale Forschungsfrage dieser Bachelorarbeit wie folgt:

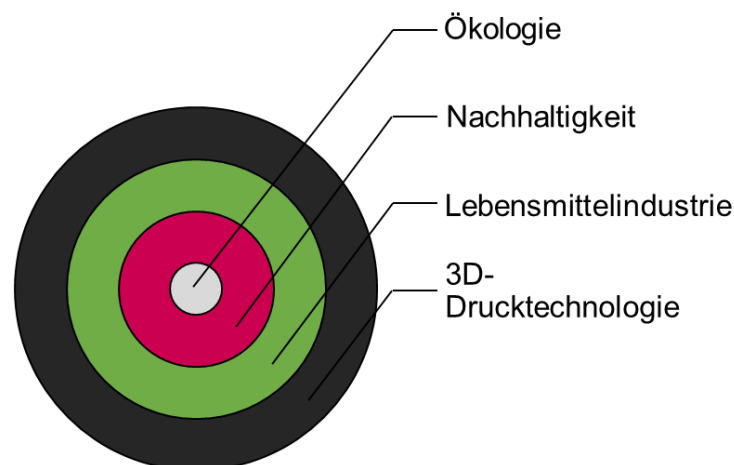
Wie wirkt sich der Einsatz von 3D-Drucktechnologien auf die Nachhaltigkeit der Lebensmittelindustrie aus, insbesondere in Bezug auf Wasser- und Energieverbrauch, Lebensmittelverschwendung und die Verwendung alternativer Rohstoffe?

1.4 ZIELSETZUNG DER BACHELORARBEIT

Wie in Kapitel 1.1 erläutert, hat die Anwendung der 3D-Drucktechnologie im Bereich der Herstellung von Lebensmitteln in den letzten Jahren stark zugenommen und sich in ein vielversprechendes und aufstrebendes Phänomen entwickelt. Da bisher nur wenige Forschungsarbeiten zu diesem Thema durchgeführt wurden, besteht ein begrenzter Umfang an verlässlichen Informationen über die ökologischen Auswirkungen der 3D-Drucktechnologie in der Lebensmittelindustrie. In Anbetracht der steigenden Besorgnis hinsichtlich des Klimawandels und der zunehmenden Notwendigkeit, nachhaltige Entscheidungen zu treffen, ist es von Bedeutung, weitere Untersuchungen über die Auswirkungen dieser Technologie auf die Umwelt durchzuführen.

Wie Abbildung 1 veranschaulicht, entwickelt sich der Forschungsansatz dieser Bachelorarbeit von der allgemeinen 3D-Drucktechnologie über ihre industrielle Anwendung in der Lebensmittelindustrie bis hin zum Nachhaltigkeitsaspekt mit Fokus auf vorausgewählten ökologischen Aspekten. Das Ziel dieser Bachelorarbeit ist es, die formulierte Forschungsfrage zu beantworten und einen Beitrag zur Erweiterung des Verständnisses der ökologischen Auswirkungen der 3D-Lebensmitteldrucktechnologie zu leisten.

Abbildung 1: Zielsetzung und Fokus der Arbeit



Des Weiteren ist es Zweck dieser Arbeit, die aus der qualitativen Forschung gewonnenen Informationen empirisch zu untersuchen und sorgfältig zu analysieren, sodass eine Wertsteigerung aus den erhobenen Daten erreicht werden kann. Die daraus resultierenden Erkenntnisse werden der bestehenden Literatur gegenübergestellt, um den Mehrwert der 3D-Lebensmitteldrucktechnologie aus einer ökologischen Perspektive abschätzen und aufzeigen zu können. Zudem soll die Wahrnehmung der Lesenden in Bezug auf den 3D-Druck in der Lebensmittelindustrie erweitert werden, indem ein umfassender Überblick über die Technologie gegeben wird.

1.5 FESTLEGUNG DER INHALTLICHEN ABGRENZUNGEN

Die vorliegende Arbeit beschränkt sich in Bezug auf ihre Nachhaltigkeitsaspekte ausschliesslich auf die ökologische Dimension. Hierbei wird bewusst auf eine Berücksichtigung der sozialen und wirtschaftlichen Dimensionen verzichtet, um den Umfang der Arbeit im Rahmen einer Bachelorarbeit angemessen zu halten. Während weitere Perspektiven wie die Akzeptanz der 3D-Lebensmitteldrucktechnologie durch Konsumenten nur in Anlehnung an die empirischen Erkenntnisse hervorgehoben werden.

Des Weiteren steht die Bewertung der Sicherheitsaspekte dieser Technologie nicht im Vordergrund der vorliegenden Arbeit und wird demzufolge nicht begutachtet. Zusätzlich zu den bereits erwähnten Limitationen sind weitere Beschränkungen in der Zusammenfassung der verschiedenen Verfahren zu berücksichtigen. Infolgedessen wird auf eine detaillierte Beschreibung mit Vor- und Nachteilen aller 3D-Druckmethoden verzichtet, um die wissenschaftliche Literaturrecherche in Grenzen zu halten. Es werden ausschliesslich Techniken und Verfahren erläutert, die derzeit in der Lebensmittelindustrie eingesetzt werden und eine wichtige Rolle in der Verarbeitung von 3D-Lebensmitteldruckobjekten spielen.

1.6 VORGEHENSWEISE UND AUFBAU DER ARBEIT

Um die Forschungsfrage dieser Bachelorarbeit bezüglich der Auswirkungen der 3D-Lebensmitteldrucktechnologie auf die Umwelt beantworten zu können, werden unterschiedliche Ansätze der Forschung einbezogen. Dazu gehören Studien und Recherchen aus der aktuellen Literatur, Interviews mit Expertinnen und Experten sowie empirische Untersuchungen.

Das theoretische Kapitel dieser Arbeit dient dazu, einen umfangreichen Überblick über den aktuellen Stand der wissenschaftlichen Literatur zum Thema 3D-Lebensmitteldruck zu gewinnen und die Ausrichtung dieser Forschung zu skizzieren. Darüber hinaus wird eine Zusammenfassung der Funktionsweise dieser innovativen Technologie als Kontext verwendet, um ein besseres Verständnis über deren mögliche Auswirkungen auf die Umwelt zu erlangen. In diesem Zusammenhang sollen das Konzept des 3D-Lebensmitteldrucks, dessen Eigenschaften und die am häufigsten verwendeten Lebensmittelmaterialien vorgestellt werden.

Im darauffolgenden Kapitel ist eine qualitative Datenerhebung mittels Interviews vorgesehen. Hierbei werden Informationen von Expertinnen und Experten erhoben, indem gezielt offene Fragen gestellt werden. Dadurch wird den Interviewpartnerinnen und -partnern die Gelegenheit gegeben, ihre individuellen Perspektiven zu teilen und ihre persönlichen Erfahrungen zu schildern. Die im Rahmen der Datenerhebung erlangten Informationen und Einsichten werden einer umfangreichen Aufbereitung und Interpretation unterzogen, um ein umfassendes Bild möglicher ökologischer Auswirkungen der 3D-Lebensmitteldrucktechnologie wiedergeben zu können.

Abschliessend werden im dritten und letzten Kapitel dieser Arbeit die erreichten Ziele und Erkenntnisse zusammenfassend dargelegt und reflektiert. Dabei wird insbesondere auf den Mehrwert der 3D-Lebensmitteldrucktechnologie aus ökologischer Perspektive eingegangen und die Forschungsfrage dieser Bachelorarbeit wird beantwortet. Des Weiteren sollen mögliche Empfehlungen in Bezug auf die Einbindung der 3D-Drucktechnologie in der Lebensmittelindustrie identifiziert und erläutert werden. Schlussendlich wird die vorliegende Arbeit kritisch reflektiert, sodass ein Ausblick auf zukünftig möglichen Forschungsbedarf gegeben werden kann.

2 THEORETISCHE GRUNDLAGEN

In diesem Kapitel wird eine umfassende Darstellung der theoretischen Grundlagen des 3D-Lebensmitteldrucks präsentiert. Zusätzlich zu den in der Lebensmittelindustrie eingesetzten Druckverfahren werden aktuelle Studien und Recherchen zu den ökologischen Auswirkungen der additiven Fertigung resümiert. Diese Erkenntnisse bilden eine wesentliche Basis für die spätere Auswertung und Analyse der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten qualitativen Interviews.

2.1 ENTWICKLUNG DER 3D-DRUCK TECHNOLOGIE

Die additive Fertigung ist ein Prozess, der von der Internationalen Organisation für Normung (ISO) und der American Society for Testing and Materials (ASTM) als die schichtweise Herstellung eines 3D-Objekts durch die Anwendung eines am Computer entworfenen 3D-Modells definiert wird (Jiang et al., 2019). Auch der bekannte englische Begriff Rapid Prototyping (RP) wird für die Bezeichnung der additiven Fertigung verwendet und weist auf die ursprüngliche Herstellung von physischen Modelle hin, welche für Evaluations- und Optimierungszwecke verwendet werden (H. Singh & Bhattacharjee, 2022).

2.1.1 Historischer Fortschritt und Anwendungsbereiche

Die 3D-Drucktechnologie ist bereits seit mehreren Jahrzehnten bekannt und die ersten Anmeldungen von Patenten erfolgten in den 1970er und 1980er Jahren (Anandharamakrishnan et al., 2022). Seitdem hat sich die Technologie ständig weiterentwickelt und kann heute als wichtiger Bestandteil verschiedener Branchen angesehen werden. Ferner wurde ein bedeutender Meilenstein im Jahr 1986 erreicht, als Charles Chuck Hull das Stereolithografieverfahren (SLA) entwickelte, welches ein 3D-Druckverfahren ist, bei dem ein Laserstrahl für das Aushärten von Polymer eingesetzt wird. In den darauffolgenden Jahren wurden weitere 3D-Druckverfahren erarbeitet, darunter das Fused-Deposition-Modeling (FDM) und das Selective-Laser-Sintering (SLS). Schliesslich wird auch im SLS-Verfahren ein Laser für das Schmelzen von Materialien verwendet, während im FDM-Verfahren eine erhitzte Düse für die Realisierung von Objekten eingesetzt wird. Ab den frühen 2000er Jahren ereignete sich ein entscheidender Wandel in der Nutzung der 3D-Drucktechnologie, welcher deren Ausbreitung und Erweiterung im privaten Gebrauch ermöglichte.

In einer aktuellen Studie von Baiano (2022) wird die Entwicklung des 3D-Drucks in drei unterschiedliche Zeiträume unterteilt, nämlich von 1981 bis 1999, von 2000 bis 2010 und von 2010 bis heute (Baiano, 2022). Während der ersten Phase wurden hauptsächlich Prototypen und Modelle mit der 3D-Drucktechnologie hergestellt. Im zweiten Zeitraum hingegen verlagerte sich der Fokus auf die Herstellung von 3D-gedruckten Organen, welche durch die Anwendung von 3D-Biodrucktechnologien ermöglicht wurde. Schliesslich ist die letzte und aktuelle Phase des 3D-Drucks durch erschwinglichere und benutzerfreundlichere 3D-Drucker gekennzeichnet. Zudem ermöglicht die Verfügbarkeit kostenloser Software eine erhöhte Anwendung dieser Technologie und macht sie auch unerfahrenen Nutzern zugänglich.

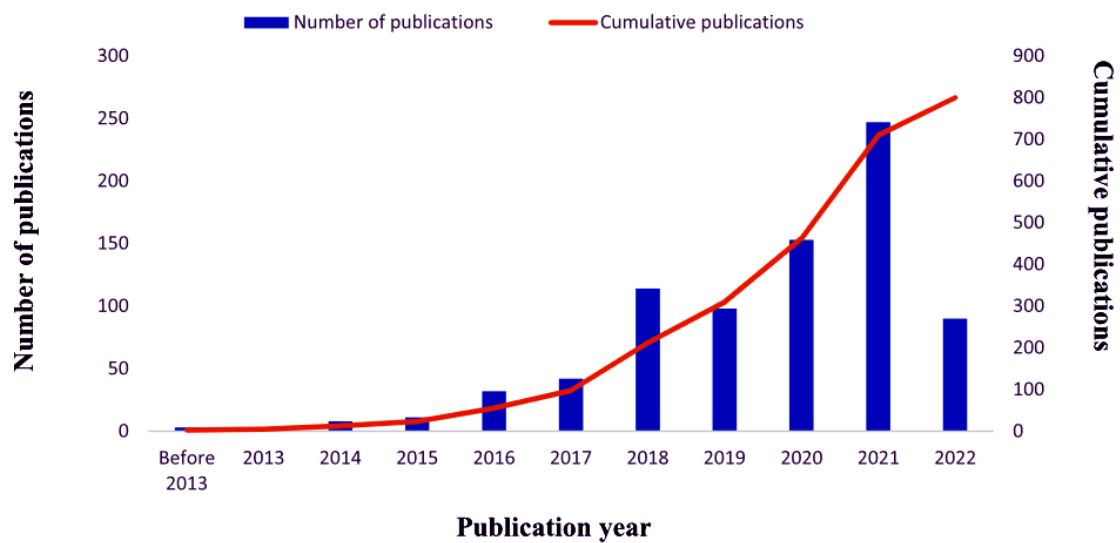
Heutzutage gibt es eine Vielzahl an 3D-Druckern auf dem Markt, die auf ein umfangreiches Angebot verarbeitbarer Materialien abgestimmt sind, darunter Kunststoffe, Metalle und Keramiken (Anandharamakrishnan et al., 2022). Dank dieser vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten lässt sich die 3D-Drucktechnologie in vielen Bereichen der Industrie aktiv einsetzen und hat sich in einigen Arbeitsfeldern als etabliertes Verfahren eingegliedert. Dazu zählen Automobilindustrie, Luft- und Raumfahrt, Modedesign, Bauwesen und Medizin. Allerdings befindet sich die Anwendung des 3D-Drucks in der Herstellung von Nahrungsmittelprodukten noch im frühen Entwicklungsstadium.

Laut Derossi et al. (2019) besitzt der 3D-Lebensmitteldruck dennoch ein hohes Marktpotenzial (Derossi et al., 2019). Grund dafür sind die Vorteile der Massenindividualisierung und der personalisierten Ernährung sowie die Anwendung von Nachhaltigkeitspraktiken, die im Vergleich zu herkömmlichen Verfahren der Lebensmittelherstellung beim 3D-Druck stärker genutzt werden können.

2.1.2 Aktuelle Marktbedingungen des 3D-Lebensmitteldrucks

Abbildung 2 veranschaulicht die Entwicklung des Interesses am Thema 3D-Lebensmitteldruck im Zeitraum von 2013 bis 2021 (Fasogbon & Adebo, 2022). Im Jahr 2014 wurde der erste Anstieg im Forschungsgebiet der 3D-Lebensmitteldrucktechnologie registriert und ab dem Jahr 2018 wurden zunehmend Publikationen protokolliert. Insbesondere im Jahr 2021 wurden insgesamt 247 Veröffentlichungen zu diesem Thema aufgezeichnet, was auf ein steigendes Interesse am 3D-Druck in der Lebensmittelindustrie hinweist. Zudem zeigt die kumulative Publikationslinie in Abbildung 2, dass die Anzahl der Veröffentlichungen im Bereich des 3D-Lebensmitteldrucks in Zukunft weiter ansteigen wird. Dies stellt ausserdem einen potenziellen Indikator für einen wachsenden Trend in der Lebensmittelindustrie dar.

Abbildung 2: Anzahl der Publikationen mit Vergleich zum Vorjahr



Quelle: Fasogbon & Adebo (2022, S. 3)

Des Weiteren und in Übereinstimmung mit den Ergebnissen von Fasogbon und Adebo (2022) zählen China, die USA, Australien, das Vereinigte Königreich und Indien zu den fünf produktivsten Nationen in der Erforschung und Entwicklung des 3D-Lebensmitteldrucks (Fasogbon & Adebo, 2022). Diese Länder haben sich als Vorreiter in der Untersuchung dieser Technologie etabliert und leisten einen bedeutenden Beitrag zu ihrer Weiterentwicklung und Implementierung in der Lebensmittelindustrie.

Darüber hinaus wird prognostiziert, dass der globale Markt für den 3D-Lebensmitteldruck bis 2027 ein beträchtliches Wachstum verzeichnen und einen geschätzten Wert von 1,941 Millionen United States Dollar erreichen wird (BIS Research, 2022). Diese Schätzung basiert auf einer jährlichen Wachstumsrate von 57,3 %. Die Gründe für das erwartete Wachstum können auf eine Kombination von Faktoren zurückgeführt werden, zum Beispiel die zunehmende Nachfrage nach personalisierten und individualisierten Lebensmitteln sowie technologische Fortschritte im Bereich des 3D-Drucks, die es ermöglichen, komplexe und einzigartige Lebensmittelkreationen für Konsumenten zu erstellen (Lee, 2021). Laut der Studie von BIS Research (2022) wird ausserdem prognostiziert, dass der Markt des 3D-Lebensmitteldrucks auf dem asiatischen Kontinent zwischen 2022 und 2027 das schnellste Wachstum weltweit verzeichnen wird (BIS Research, 2022). Begründung hierfür könnten die hohe Bevölkerungszahl und der schnelle technologische Fortschritt in Asien sein.

2.2 GRUNDWISSEN ZUM 3D-DRUCK IN DER LEBENSMITTELPRODUKTION

Wie bereits in Kapitel 2.1 erläutert, ist die additive Fertigungstechnik ein Verfahren, bei dem Materialien schichtweise aufeinander aufgetragen werden, um ein dreidimensionales Objekt herzustellen. Diese Methode ist auch unter der Bezeichnung ‹bottom-up› bekannt und beschreibt das Hinzufügen von Materialien, bis das gewünschte Endprodukt entstanden ist (Anandharamakrishnan et al., 2022). Somit wird das Rohmaterial bei unkonventionellen additiven Verfahren aufbauend aufgetragen, während bei herkömmlichen subtraktiven Verfahren Objekte durch das Abtragen von Material von einem massiven Rohmaterial hergestellt werden. Im Vergleich zur Top-down-Fertigungstechnik nutzt die additive Fertigung insofern einen innovativen Herstellungsprozess. In der Tat wird das verwendete Material schichtweise aufgetragen, was zu einem optimierten Materialverbrauch führt.

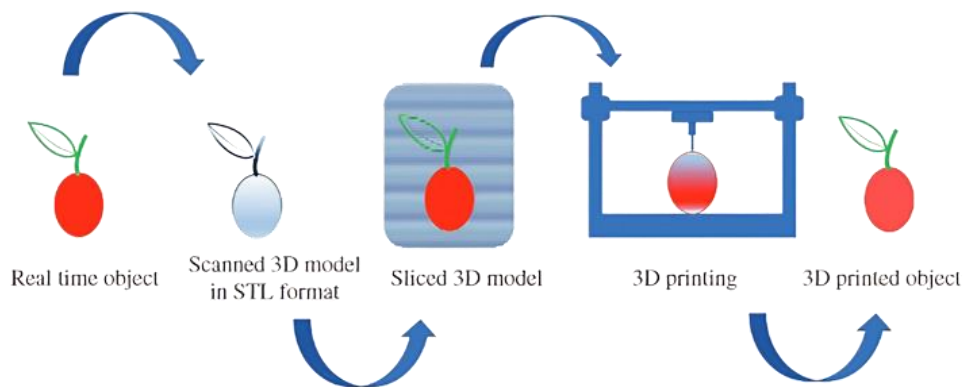
2.2.1 Modellierung und Grundprinzipien

Der 3D-Lebensmitteldruck ist unter anderem auch unter dem Fachbegriff Food Layered Manufacturing (FLM) bekannt, der die Technologie zur Herstellung von essbaren Konstrukten zusammenfasst, die durch den Einsatz von Computersoftware produziert werden (Anandharamakrishnan et al., 2022). Die mittels 3D-Druck aufeinander aufgetragenen Schichten von Lebensmittelmaterialien werden durch die Anwendung verschiedener Methoden, beispielsweise durch die Nutzung von Wärme, für die Erschaffung einer dreidimensionalen Form verwendet. Der Einsatz von Computersoftware ermöglicht zudem eine präzise Steuerung und Anpassung der Druckparameter und erlaubt die Herstellung von optimalen 3D-Nahrungsmittelkonstrukten. In der Forschung wird der 3D-Lebensmitteldruck aufgrund der Tatsache, dass die Zusammensetzung der Nährstoffe individuell auf die Bedürfnisse und Wünsche von Kunden angepasst werden kann, als vielversprechende Methode zur Personalisierung von Lebensmitteln angesehen.

In der Literatur wird das Verfahren des 3D-Lebensmitteldrucks in drei wesentliche Schritte unterteilt (Attarin & Attaran, 2020). Zunächst erfolgt der Entwurf des 3D-Modells mithilfe einer speziellen Computersoftware namens Computer Aided Design (CAD). Diese Software erlaubt es Nutzende, die gewünschten Formen zunächst digital festzulegen und ein virtuelles Modell zu erstellen. Neben der Erstellung von 3D-Modellen mittels CAD-Software kann die Konstruktion eines 3D-Modells auch durch das Scannen eines vorhandenen Objekts erfolgen (C. Guo et al., 2019). Dieser Ansatz wird in Abbildung 3 vorgestellt. Hierbei wird das Objekt mit einem

3D-Scanner erfasst und die dadurch ermittelten Daten in ein digitales 3D-Modell umgewandelt. Ist das 3D-Modell erstellt, wird es im nächsten Schritt in eine Standard-Triangle-Language (STL) Datei konvertiert (Attarin & Attaran, 2020). Es durchläuft daraufhin einen weiteren entscheidenden Prozess, das sogenannte «Slicing». Dabei wird das Modell in viele dünne Schichten zerlegt, um später eine schichtweise Druckbarkeit zu ermöglichen. Sobald das Modell in einer für den 3D-Drucker kompatiblen Format vorbereitet wurde, kann der eigentliche Druckprozess gestartet werden.

Abbildung 3: Arbeitsablauf des 3D-Druckverfahrens durch Scannen eines Objekts



Quelle: Anandharamakrishnan et al. (2022, S. 4)

Der Prozess des 3D-Lebensmitteldrucks umfasst jedoch einen weiteren Schritt, welcher die Nachbearbeitung des 3D-gedruckten Lebensmittelobjekts beinhaltet (Baiano, 2022; C.-F. Guo et al., 2019). Nachdem die Lebensmittelmaterialien Schicht für Schicht aufgetragen wurden, um das erwünschte 3D-Modell zu erstellen, kann das Objekte je nach Bedarf gekocht, gebacken, gebraten oder geschnitten werden, um das angestrebte Endprodukt zu erhalten.

Die Auswahl der Technik für die Nachbearbeitung des 3D-Lebensmittelprodukts ist eng mit den verwendeten Materialien verbunden und kann demzufolge stark variieren (Baiano, 2022; C.-F. Guo et al., 2019). Die Zutaten spielen aber nicht nur für die Nachbearbeitung des 3D-gedruckten Lebensmittelprodukts eine wichtige Rolle, sondern sind auch von entscheidender Bedeutung für den gesamten Prozess des 3D-Drucks von Lebensmitteln (Nachal et al., 2019). Die Auswahl der richtigen Zutaten ist ein wichtiger Faktor, der die Qualität und die Haltbarkeit des gedruckten Lebensmittelprodukts beeinflussen kann. Zudem ist zu beachten, dass einige Materialien von Natur aus für den Druckprozess geeignet sind, zum Beispiel Schokolade, Käse und Hummus, während andere ohne adäquate Vorbereitung nicht für den 3D-Druck genutzt werden können. Allerdings können auch Materialien wie Früchte, Reis und Gemüse durch Zugabe von Hydrokolloid, einem zur Lebensmittelstabilisierung verwendeten Stoff, für den Druckvorgang vorbereitet werden (Kaur et al., 2022).

2.2.2 Anwendungsmöglichkeiten des 3D-Lebensmitteldrucks

Wie in Kapitel 2.1.1 bereits verdeutlicht, hat sich der 3D-Druck in vielen Bereichen als nützliches Instrument zur schnellen, präzisen und effizienten Herstellung von Produkten etabliert. Insbesondere in der Lebensmittelproduktion eröffnen die Anwendung von 3D-Drucktechnologien und der Einsatz additiver Fertigungstechniken neue Möglichkeiten zur Herstellung von alternativen Produkten, welche aus pflanzlichen Nahrungsquellen hergestellt werden (Varvara et al., 2021). In diesem Sektor sind derzeit mehrere additive Fertigungsverfahren verfügbar, die als 3D-Drucktechniken bekannt sind und zur Herstellung von Lebensmittelprodukten eingesetzt werden können (Ling et al., 2022; Zhang & Liu, 2019). Diese werden in Kapitel 2.3 vorgestellt.

Durch den Einsatz von 3D-Lebensmitteldrucktechnologien werden heute vor allem personalisierte Nahrungsmittel geschaffen (Derossi et al., 2019). Die Herstellung von individuell anpassbaren Lebensmitteln kann insbesondere für spezifische Personengruppen von Bedeutung sein (Kaur et al., 2022). Beispielsweise sind Sporttreibende eine wichtige Zielgruppe, da sie bestimmte Nähr- und Mineralstoffe benötigen, um ihre Leistungsfähigkeit zu unterstützen. Auch ältere Menschen mit Dysphagie, welche Schwierigkeiten beim Schlucken von Nahrung aufgrund gesundheitlicher Probleme haben, sind auf spezielle Konsistenzen und Nährstoffe angewiesen, um eine ausgewogene Ernährung sicherzustellen (Gunjal et al., 2022).

Gleichwohl ergeben sich potenzielle Vorteile für die Umwelt, denn die durch additive Fertigung erzeugten Lebensmittelprodukte können mit hoher Präzision gedruckt werden (Derossi et al., 2019). Dadurch wird die Möglichkeit geschaffen, die Verschwendung von Lebensmitteln zu verringern und einen effizienteren Einsatz der Ressourcen zu gewährleisten. Insgesamt wird der 3D-Lebensmitteldruck somit als vielversprechende Technologie angesehen, die nicht nur die Ernährung personalisieren, sondern auch einen positiven Beitrag zum Umweltschutz leisten kann.

Dank dem technologischen Fortschritt im Bereich des 3D-Biodrucks ist es ausserdem heute schon möglich, Meeresfrüchte und Fleisch in einem laborgesteuerten Umfeld herzustellen (Derossi et al., 2019). Insbesondere 3D-gedrucktes Fleisch hat das Potenzial, hochwertige Proteine, ohne weitere Zunahme der Belastung von Ackerland und die damit verbundenen Umweltauswirkungen bereitzustellen. In Anbetracht des weltweit wachsenden Bedarfs an Nahrungsmitteln wird das 3D-Bioprinting als Schlüsselfaktor der zukünftigen Lebensmittelproduktion betrachtet und viele Unternehmen streben bereits heute danach, umweltfreundliches und biogedrucktes 3D-Fleisch herzustellen.

Des Weiteren entstehen während der konventionellen Verarbeitung von Lebensmitteln häufig unvermeidbare Mengen an Nahrungsabfällen, die als wertvolle Rohstoffe für den 3D-Lebensmitteldruck wiederverwendet werden können (Anandharamakrishnan et al., 2022). Durch die Nutzung von Lebensmittelabfällen stellt die 3D-Drucktechnologie eine innovative und nachhaltige Lösung zur Reduzierung von Abfällen und zur ressourceneffizienten Herstellung von Lebensmitteln dar. Einige Studien, darunter die von Nassar und Fouad (2022), befassen sich mit dem Potenzial der Anwendung der Technologie für die Kreation 3D-gedruckter Lebensmittel in Restaurants und untersuchen die Kaufabsichten der Kunden. Heute wird diese Technologie aktiv in einigen Restaurants verwendet, um aus den Lebensmittelabfällen der Küche essbare Dekorationen herzustellen (Nassar & Fouad, 2022).

Eine weitere vielversprechende Anwendungsmöglichkeit des 3D-Drucks ist die Nutzung neuartiger Proteinquellen wie Insekten (Anandharamakrishnan et al., 2022). Auf diese Weise können alternative Nahrungsmittel auf pflanzlicher Basis entwickelt werden, die nicht nur einen hohen Nährwert haben, sondern auch die Nachhaltigkeit in der Produktion von Lebensmitteln fördern. Sing et al. (2022) untersuchten den Einsatz von *Drosophila*, einer Gattung aus der Familie der Taufliegen, als alternative Proteinquelle im 3D-Lebensmitteldruck und stellten fest, dass deren Protein aufgrund seiner geschmacks- und geruchsneutralen Eigenschaften Vorteile gegenüber anderen Proteinquellen bietet (D. Singh et al., 2022).

2.3 ÜBERSICHT DER 3D-LEBENSMITTELDRUCKVERFAHREN

In der Norm ISO/ASTM 52900:2015 werden die einzelnen Verfahren der additiven Fertigung in sieben Kategorien eingeteilt (Anandharamakrishnan et al., 2022). Diese umfassen Material-Extrusion (ME), Powder-Bed-Fusion (PBF), Material-Jetting (MJ), Binder-Jetting (BJ), Vat-Polymerization (VP), Sheet-Lamination (SL) und Direct-Energy-Deposition (DED). Nicht alle Kategorien der additiven Fertigung sind aber für die Herstellung von Lebensmittelprodukten geeignet. Angesichts der Tatsache, dass im Lebensmittelbereich spezielle Anforderungen gelten, um die Gesundheit der Konsumierenden zu schützen, können nur bestimmte AM-Technologien in der Herstellung essbarer Produkte eingesetzt werden.

In der wissenschaftlichen Literatur werden verschiedene 3D-Druckverfahren gegenübergestellt und miteinander verglichen, um bestimmte Eigenschaften der Druckparameter zu ermitteln und Richtlinien zu erstellen. Studien haben beispielsweise gezeigt, dass die Art des Nahrungsmittels, seine Textur und Konsistenz sowie die gewünschte Form und Grösse des Produkts einen erheblichen Einfluss auf die Wahl der Technologie haben (Marinova & Bogueva,

2022). Deswegen werden nur Technologien zur Erstellung von 3D-Lebensmittelmodellen eingesetzt, deren Anwendung durch bestehende Erkenntnisse und Erfahrungen gestützt wird. Diese Druckverfahren werden im vorliegenden Kapitel dargestellt und ihre wichtigsten Eigenschaften erläutert.

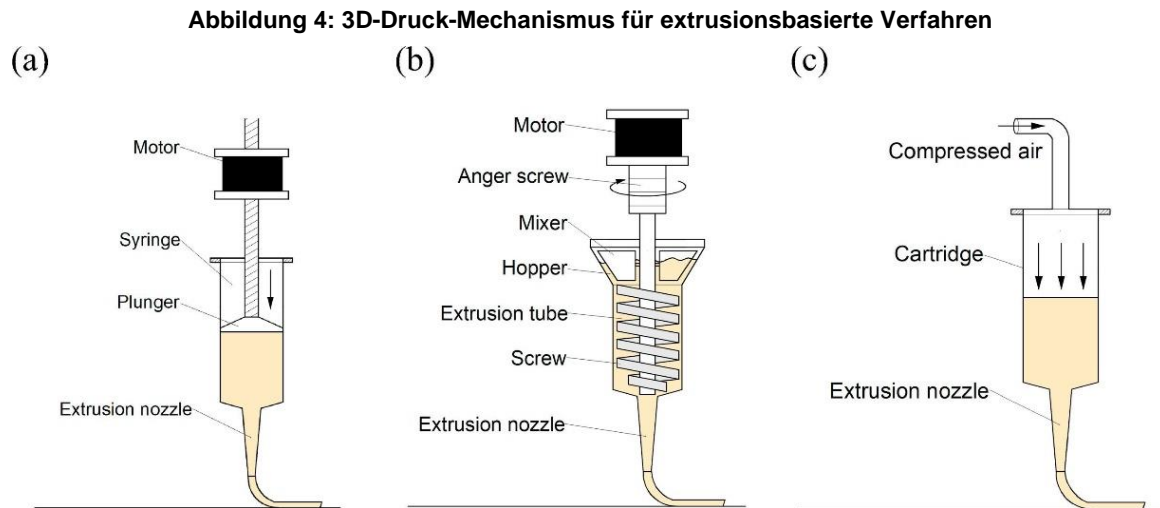
2.3.1 Extrusion-based Printing: Funktionalität und Mechanismen

Der extrusionsbasierte Prozess zählt zu einer der vier Arten des 3D-Drucks im Lebensmittelbereich (Anandharamakrishnan et al., 2022). Die 3D-Modelle werden in diesem Verfahren durch das Extrudieren von Lebensmitteln und mithilfe einer Düse Schicht für Schicht hergestellt (Pitayachaval et al., 2018). Dabei wird das gewählte Material unter hohem Druck und hoher Temperatur durch die Spitze der Düse des 3D-Druckers gepresst, sodass ein dreidimensionales Objekt aufgebaut werden kann. Das extrudierte Material verschweisst sich beim Abkühlen und ermöglicht die Verfestigung mit den darunterliegenden Schichten, ohne dass weitere Handlungen vorgenommen werden müssen (Zhang & Liu, 2019).

Die extrusionsbasierte Technologie eignet sich insbesondere für weiche Materialien und ermöglicht demzufolge den 3D-Druck einer Vielzahl von Nahrungsmitteln (Varvara et al., 2021). Infolgedessen wird dieser Prozess im industriellen Lebensmittelbereich am häufigsten angewendet. Dennoch spielt die Konsistenz der verwendeten Materialien eine wichtige Rolle für den erfolgreichen Einsatz der extrusionsbasierten Technologie (Anandharamakrishnan et al., 2022). Zu den am meisten verwendeten Lebensmitteln gehören Schokolade, Käse, Teig und Pürees (H. Singh & Bhattacharjee, 2022). Die Qualität des 3D-Lebensmitteldrucks hängt zudem von Faktoren wie der Konzentration der Inhaltsstoffe, dem Düsendurchmesser und der Geschwindigkeit der Düsenbewegung ab (Pitayachaval et al., 2018). Auch die Temperatur der eingesetzten Materialien spielt eine relevante Rolle bei der Konstruktion von 3D-Lebensmittelmodellen (Zhang & Liu, 2019). Zwar ist dieses Verfahren eine der einfachsten Druckmethoden im Lebensmittelbereich, dennoch bestehen diverse Herausforderungen bei der Herstellung komplexer Strukturen (H. Singh & Bhattacharjee, 2022).

Die drei Mechanismen, welche im extrusionsbasierten Druck verwendet werden, sind in Abbildung 4 einzusehen. Sie umfassen die spritzenbasierte Extrusion (a), die schneckenbasierte Extrusion (b) und die luftdruckbasierte Extrusion (c) (C.-F. Guo et al., 2019; Hussain et al., 2022). Zwar ändert sich die Art und Weise, auf die das Material innerhalb der Kartusche des 3D-Druckers aus der Düse gepresst wird, jedoch nicht das Ergebnis (Hussain et al., 2022). Beispielsweise wird im spritzenbasierten Extrusionsverfahren ein programmierter Motor verwendet, um den Kolben am Ende der Spritze anzutreiben und das Ausfließen des Materials

aus der Düse zu ermöglichen (C.-F. Guo et al., 2019). Die Menge an Material, die aus der Düse gepresst wird, kann zudem durch Variation der Geschwindigkeit angepasst werden und eine erhöhte Leistung des Motors fordern, sollte die Konsistenz des verwendeten Materials zu dickflüssig sein.



Quelle: C.-F. Guo et al. (2019, S. 398)

Die schneckenbasierte Extrusion verwendet hingegen eine motorgetriebene Schraube, damit das pürierte Lebensmittel kontinuierlich aus der Kartusche extrudiert werden kann (C.-F. Guo et al., 2019). Dieses Verfahren wird vor allem für die Konstruktion von 3D-Modellen aus Nahrungsmitteln wie Teig und Kartoffelpüree bevorzugt. Ist jedoch die Viskosität des verwendeten Materials zu hoch, eignet sich auch dieses Verfahren nicht für die Produktion der gewünschten 3D-Lebensmittel. Schliesslich ermöglicht die luftdruckbasierte Extrusion das Extrudieren von Material durch die Anwendung von Luftdruck, der als treibende Kraft wirkt. Dieses Verfahren wird in der Literatur aufgrund der ähnlichen Mechanismen vor allem der spritzenbasierten Extrusion gegenübergestellt.

2.3.1.1 Hot-Melt-Extrusion

Der extrusionsbasierte Prozess kann in zwei Kategorien unterteilt werden, welche von der benötigten Temperatur abhängen (Anandharamakrishnan et al., 2022). Die Hot-Melt-Extrusion (HME) wird insbesondere in Anbetracht des Schmelz- und Erstarrungsverhaltens der verwendeten Lebensmittelmaterialien eingesetzt. Diese Materialien müssen für den Druckprozess auf einen geschmolzenen oder halbfesten Zustand gebracht werden. Das Ende der Düsenspitze des 3D-Druckers muss zudem während dem Druckprozess stets auf eine kontrollierte Temperatur aufgeheizt sein, damit sich das extrudierte Lebensmittelmaterial beim

Abkühlen mit den vorherigen Schichten verbinden kann. Die Hot-Melt-Extrusion ist beispielsweise für die Realisierung von 3D-Konstrukten aus Schokolade geeignet und wird insbesondere für die Herstellung kundenspezifischer 3D-Schokoladenprodukte eingesetzt (Le-Bail et al., 2020; Zhang & Liu, 2019). Ein Beispiel einer solchen Kreation wird in Abbildung 5 dargestellt. Dennoch müssen Kombinationen der Materialeigenschaften wie Zucker und Kakaofett berücksichtigt werden, um das Fliesen der Schokolade aus der Düse zu erleichtern (Anandharamakrishnan et al., 2022). Schliesslich ist die Anwendung der korrekten Temperatur ein zentrales Element für die Verfestigung des Materials zum richtigen Zeitpunkt der Extrusion.

Abbildung 5: Hot-Melt extrusionsbasierter Prozess mit Schokolade



Quelle: Anandharamakrishnan et al. (2022, S. 40)

2.3.1.2 Cold-Extrusion

Die Cold-Extrusion ist ein raumtemperaturbasiertes Verfahren und ist unter dem englischen Begriff Room-Temperature-Extrusion (RTE) bekannt (Anandharamakrishnan et al., 2022). In diesem extrusionsbasierten Prozess können eine Vielzahl von Lebensmittelmaterialien für den Druck verwendet werden. Zugleich stellt dieses Verfahren ein druckbares Umfeld für alternative Nahrungsquellen dar. Dazu gehören beispielsweise Mikroalgen, winzige pflanzliche Organismen, welche nur durch ein Mikroskop sichtbar sind. Ausserdem bietet das RTE-Verfahren die Möglichkeit 3D-Lebensmittelprodukte zu realisieren, welche mit herkömmlichen Produktionsverfahren schwer zu produzieren sind. Beispielsweise kann diese Technologie für die Realisierung von Nudelprodukte mit neuartigem 3D-Design für die Massenproduktion verwendet werden.

Das RTE-Verfahren kann schliesslich für die Füllung von Oberflächen unterschiedlicher Nahrungsmitteln verwendet werden (Le-Bail et al., 2020). Dabei muss das für den Druck verwendete Lebensmittelmaterial in einem halbfesten Zustand sein, damit es sich an die angewandte

Technologie aneignen kann (Anandharamakrishnan et al., 2022). Damit sie verzehrbar sind, müssen jedoch die meisten Lebensmittelprodukte, die mit diesem Verfahren hergestellt werden, einen Nachbearbeitungsprozess wie Braten oder Backen folgen.

2.3.2 Selective-Sintering: Arbeitsansätze und Systemkomponenten

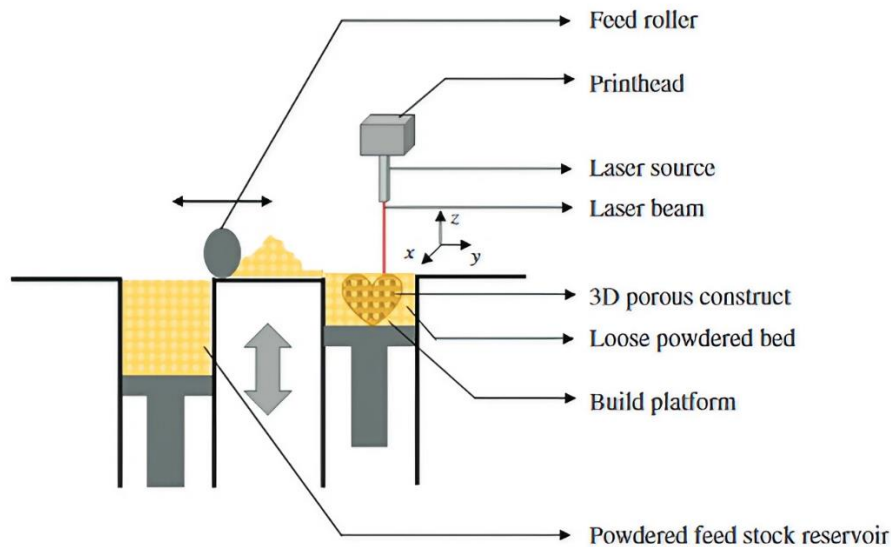
Das Selective-Sintering-Verfahren gehört zu den pulverbasierten 3D-Drucktechniken der additiven Fertigung (Anandharamakrishnan et al., 2022). Dieses Verfahren erlaubt die Konstruktion einer festen 3D-Struktur mit Unterstützung eines Laserstrahls, der das Modell selektiv Schicht für Schicht aufbaut. Zu Beginn wird eine Schicht aus Pulver auf die Bauplattform aufgebracht und mithilfe eines Rollers glattgestrichen (Jonkers et al., 2022). Die durch die Wärme des Lasers verschmolzenen Pulverpartikel erlauben anschliessend die Realisierung des gewünschten 3D-Objektes.

Auch hier sind Prozessvariablen wie die Art der Energiequelle, Strahldurchmesser, Strahlleistung und Scangeschwindigkeit entscheidend für die Präzision der gedruckten dreidimensionalen Kreationen und dürfen nicht ausser Acht gelassen werden (Anandharamakrishnan et al., 2022). Die Druckbarkeit von Pulvermaterialien wird zudem von den Eigenschaften der verwendeten Materialien beeinflusst. In der Regel werden für diese Art von 3D-Lebensmittel-Druck diverse Mischungen aus pulverförmigen Komponenten wie Weizenstärke, Palmölpulver oder Zucker als Druckmaterialien verwendet (Varvara et al., 2021). Obwohl sich mit dem Selective-Sintering-Verfahren stabile und komplexe 3D-Strukturen aus Lebensmitteln realisieren lassen, ist die Anzahl an verwendbaren Lebensmittelmaterialien limitiert (H. Singh & Bhattacharjee, 2022).

Die grundlegenden Systemkomponenten des Selective-Sintering-Prozesses werden in Abbildung 6 illustriert und beinhalten eine Bauplattform, eine thermische Energiequelle, einen Galvo-Spiegel, einen Vorratsbehälter, eine mechanische Walze und einen Behälter für die Reserve pulverförmiger Materialien (Anandharamakrishnan et al., 2022). Zu Beginn des Druckprozesses wird das Hochfahren der Bauplattform auf die oberste Position veranlasst. Damit das 3D-Lebensmittelobjekt erzeugt werden kann, wird das pulverförmige Material, welches der Materialreserve entnommen wird, von einer Walze zu einer gleichmässigen Schicht glattgestrichen. Die im Druckkopf integrierte thermische Energiequelle dient zur Schmelzung der pulverförmigen Mischung und erlaubt zugleich die Realisierung des gewünschten 3D-Lebensmittelobjektes. Liegt eine Schicht des Modells vor, senkt sich die Bauplattform, sodass ausreichender Platz für die Bildung der nachfolgenden Schicht gegeben ist. In der Zwischenzeit wird die nächste Materialschicht bereitgestellt, indem der Behälter mit der pulverförmigen

Materialreserve hochgefahren wird. Der geschilderte Verlauf wiederholt sich, bis die gewünschte Speise erstellt worden ist.

Abbildung 6: Selektives Lasersintering-System



Quelle: Anandharamakrishnan et al. (2022, S. 44)

2.3.2.1 Selective-Laser-Sintering

Zum Verschmelzen der Schichten wird im Selective-Sintering-Verfahren entweder Heissluft oder ein Laser verwendet (Soni et al., 2022). Abbildung 6 veranschaulicht konkret das Selective-Laser-Sintering-Verfahren (SLS), welche die am häufigsten verwendete Methode für die Realisierung von 3D-Lebensmittelkonstrukten mittels pulverförmige Materialien ist (Anandharamakrishnan et al., 2022). Wie der Name impliziert, verwendet diese Technologie ein Laserstrahl als Wärmequelle für die Agglomeration von Partikeln. Dabei werden nur die gewünschten Partikeln mit dem Laser beleuchtet die zu verfestigen sind (Lee, 2021). Die 3D-Lebensmittelkonstrukte können zudem ohne Verwendung flüssiger Bindemittel realisiert werden. Insbesondere wird diese Technologie für die Realisierung komplexer Zuckerstrukturen eingesetzt (Soni et al., 2022). Das SLS-Verfahren ist jedoch für schmelzempfindliche Lebensmittelmaterialien sowie frische Zutaten ungeeignet (Varvara et al., 2021). Aufgrund ihrer geringen Produktionszeit wird das SLS-Verfahren in der Lebensmittelindustrie für die Bearbeitung von Materialien wie Zucker eingesetzt.

2.3.2.2 Selective Hot Air Sintering and Melting

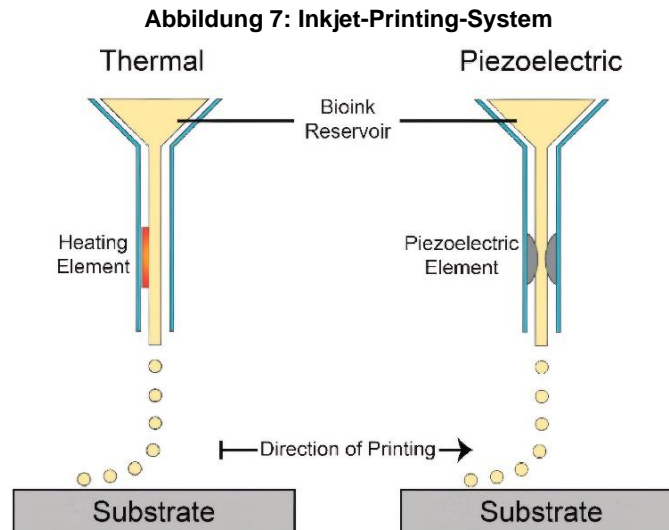
Eine weitere Selective-Sintering-Variante ist das Selective Hot Air Sintering and Melting Verfahren (SHASAM) (Anandharamakrishnan et al., 2022). Dabei wird als Energiequelle nicht

Laserstrahl, sondern Heissluft für den Druckprozess verwendet. Die verwendete Heissluft ermöglicht das Schmelzen der pulverförmigen Materialien, in vergleichbarer Weise wie beim SLS-Verfahren. Da das verwendete Pulver ausreichend klebrig sein muss, um die Realisierung von 3D-Konstruktionen zu ermöglichen, eignet sich dieses Verfahren vor allem für Materialien mit Zuckerbasis (Soni et al., 2022). Die erfolgreiche Herstellung der 3D-Konstrukten wird dennoch von der verwendeten Pulverdichte erheblich beeinflusst (Anandharamakrishnan et al., 2022). Schliesslich ist der Herstellungsprozess aufgrund der unterschiedlichen Variablen eine Herausforderung für viele Unternehmungen die diese Technologie anwenden (Morya et al., 2022).

2.3.3 Inkjet-Printing: Funktionsmechanismen und Anwendungen

Das Inkjet-Printing (IJP) ist ein Verfahren, bei dem ein Materialstrom aus Tröpfchen von einem thermischen Druckkopf abgegeben wird, um Lebensmittel zu dekorieren oder deren Oberflächen zu füllen (Pitayachaval et al., 2018). In der Regel wird dieses Verfahren für Materialien mit niedriger Viskosität verwendet (H. Singh & Bhattacharjee, 2022). Dazu gehören Schokolade, flüssiger Teig, Käse, Konfitüre und ähnliche Nahrungsmittel. Druckgeschwindigkeit, Düsendurchmesser, Druckhöhe und Drucktemperatur sind für die Genauigkeit der zu erschaffenden Dekorationen relevante Faktoren (Varvara et al., 2021). Hinzu kommt, dass das tröpfchenweise Aufbringen von Materialien nicht nur eine präzise Dekoration von Lebensmitteloberflächen erlaubt, sondern auch die Materialverschwendung minimiert (Anandharamakrishnan et al., 2022). Das Inkjet-Printing-Verfahren kann jedoch nur für dekorative Zwecke eingesetzt werden und ist somit in seiner Anwendbarkeit limitiert (H. Singh & Bhattacharjee, 2022).

Um den Fluss der Tröpfchen auslösen zu können, wird, wie in Abbildung 7 erkennbar, ein thermischer oder ein piezoelektrischer Mechanismus verwendet (Anandharamakrishnan et al., 2022). Im thermischen System wird Wärme durch einen im Druckkopf des 3D-Druckers positionierten Widerstand erzeugt, welches zugleich ein Mass für die Messung und Begrenzung des Stromflusses ist. Diese Wärme erlaubt es, das verwendete Material, welches sich in der Kartusche des Druckers befindet, durchgängig und in kleinen Mengen durch die Düse auszustossen. Im piezoelektrischen System hingegen wird elektrische Energie in mechanische Energie umgewandelt. Dabei wird das tröpfchenweise Fließen von Material mithilfe eines piezoelektrischen Elements ermöglicht. Letzteres wird jedoch vorwiegend in pharmazeutischen Anwendungen eingesetzt und nicht in der Lebensmittelindustrie.



Quelle: Kumar et al. (2021, S. 2)

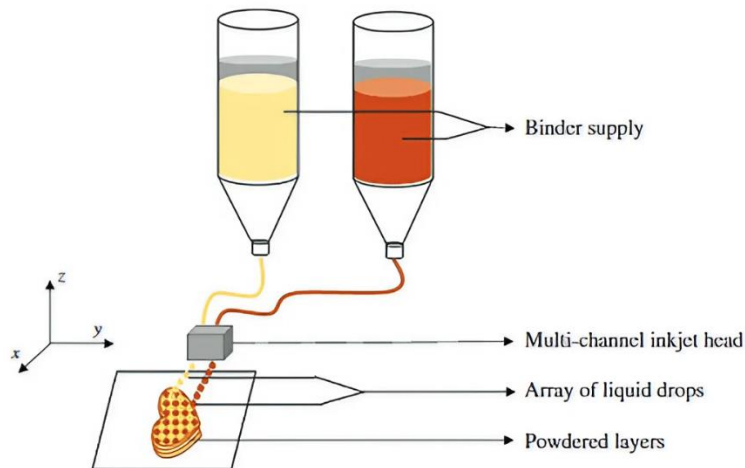
2.3.4 Binder-Jetting: Voraussetzungen und Ablaufstruktur

Eine weitere Technologie der additiven Fertigung, welche in der Lebensmittelindustrie eingesetzt wird, ist unter dem Namen Binder-Jetting bekannt. In diesem 3D-Druckverfahren kommt ein flüssiges Bindemittel zum Einsatz, um pulverförmiges Material Schicht für Schicht zu verbinden, bis das gewünschte Modell realisiert ist (Pitayachaval et al., 2018). Das Binder-Jetting-Verfahren ist jedoch lediglich für die Verarbeitung von Lebensmitteln geeignet, bei denen ein essbares Bindemittel verwendet werden kann (Anandharamakrishnan et al., 2022). Aufgrund dieser Voraussetzung und der Beschränkung auf pulverförmige Materialien wird diese Technik im Lebensmittelbereich kaum eingesetzt. In der Tat werden für die Konstruktion von 3D-Lebensmittelmodellen zumeist extrusionsbasierte sowie Selective-Sintering-Verfahren eingesetzt. Dennoch erlaubt das Binder-Jetting die Realisierung komplexer Strukturen sowie die Kombination von Materialien unterschiedlicher Textur (H. Singh & Bhattacharjee, 2022). Die Präzision des Drucks wird von mehreren Gegebenheiten beeinflusst (Varvara et al., 2021). Zu berücksichtigen sind auch hier Faktoren wie die Eigenschaften der verwendeten Materialien sowie Aspekte der Ver- und Nachbearbeitung. Viskosität, Dichte und Feuchtigkeitsgehalt der pürierten Lebensmitteln sind Beispiele wichtiger Parameter für einen erfolgreichen 3D-Druck mit dem Binder-Jetting-Verfahren (Anandharamakrishnan et al., 2022).

Der beschriebene Binder-Jetting-Prozess wird in Abbildung 8 veranschaulicht. Bei diesem Verfahren wird eine Schicht Pulver auf der Plattform des 3D-Druckers einheitlich verteilt und gleichzeitig mit einem flüssigen Bindemittel tröpfchenweise besprüht, um das Verschmelzen der Pulverschicht zu ermöglichen (Anandharamakrishnan et al., 2022). Das vorherige Aufsprühen von Wassernebel auf die Plattform des Druckers verhindert, dass Verformungen

beim Bilden der Schichten entstehen. In der Lebensmittelindustrie wird dieses Verfahren vor allem für die Herstellung komplexer Torten verwendet und stellt eine alternative Vorgehensweise zur Verwendung essbarer Stoffe als Bindemittel in der Herstellung von 3D-Lebensmittelmodellen dar.

Abbildung 8: Binder-Jetting-System



Quelle: Anandharamakrishnan et al. (2022, S. 51)

2.4 DAS 3D-BIOPRINTING IN DER LEBENSMITTELINDUSTRIE

Gemäss den Informationen aus Kapitel 2.1.1 beinhaltet die Geschichte des 3D-Drucks die Herstellung von Organen durch das 3D-Bioprinting. Dabei handelt es sich um ein Verfahren, bei dem mithilfe der 3D-Drucktechnologie biologische Materialien wie Zellen in Schichten kombiniert werden, um gewebeähnliche Strukturen beispielsweise für medizinische Zwecke herzustellen (Soni et al., 2022). Die Technologie wird folglich für die Herstellung biologischer Gewebe verwendet und dient gleichzeitig zur Entwicklung neuer Medikamente (Chameettachal et al., 2019; Soni et al., 2022). Auch hier sind verschiedene Prozessparameter entscheidend für die erfolgreiche Herstellung von 3D-Geweben. Dazu zählen die Grösse der Düse, die Geschwindigkeit der Extrusion und die eingesetzte Drucktemperatur.

Im Hinblick auf die steigende Nachfrage nach Fleisch und die damit verbundenen ökologischen Auswirkungen gewinnt die Entwicklung dieser Technologie unter anderem in der Herstellung alternativer Lebensmittel zunehmend an Bedeutung (Marinova & Bogueva, 2022). In diesem Kontext erweist sich der 3D-Biodruck als innovatives Verfahren und vielversprechende Technik, um den ökologischen Fussabdruck von Fleischprodukten zu reduzieren und alternative Nahrungsquellen anzubieten. Bioprinting wird bereits für die Herstellung von In-

vitro-Fleisch eingesetzt (Soni et al., 2022). Die Technologie nimmt somit nicht nur in der Medizin, sondern auch in der Lebensmittelindustrie einen immer höheren Stellenwert ein. Insbesondere in der Produktion pflanzlicher Lebensmittel hat Bioprinting das Potenzial, komplexe und heterogene Produkte für Konsumenten herzustellen (Kaur et al., 2022). Aufgrund ethischer und kultureller Bedenken tendieren Forscher dennoch dazu, die Entwicklung von Fleischersatzprodukten auf pflanzlicher Basis und ohne tierische Zellen voranzutreiben (Anandharamakrishnan et al., 2022; Soni et al., 2022).

2.5 ÖKOLOGISCHE AUSWIRKUNGEN DER ADDITIVEN FERTIGUNG

Die Zunahme der Weltbevölkerung wird von einem unvermeidlichen Klimawandel begleitet und führt zugleich zu einem Engpass verfügbarer Ressourcen wie Wasser und Nahrung (Derossi et al., 2019; United Nations Department of Economic and Social Affairs, 2022). Daraus resultieren Herausforderungen in Bezug auf die globale Ernährungssicherheit. Insbesondere unterstreicht die alarmierende Verschwendung von Lebensmitteln die dringende Notwendigkeit, Massnahmen zu ergreifen, um der wachsende Bedrohung der Nahrungsknappheit entgegenzuwirken (Gordon et al., 2019).

2.5.1 Umweltauswirkungen der 3D-Drucktechnologien

Otcu et al. (2019) identifizierten 15 akademische Untersuchungen, die sich mit den Auswirkungen der 3D-Drucktechnologie auf die Umwelt auseinandersetzen (Otcu et al., 2019). Diese Forschungsarbeiten beschäftigen sich hauptsächlich mit der Analyse des Energie-, Wasser- und Ressourcenverbrauchs im Zusammenhang mit der Anwendung der 3D-Drucktechnologie. Dabei wurde festgestellt, dass eine Korrelation zwischen Energieverbrauch und eingesetzter Druckgeschwindigkeit besteht. Weitere Forschungen ergaben, dass die Anwendung des 3D-Drucks zur Senkung des Energieverbrauchs bei der Herstellung von Leichtbaukomponenten in der Automobilindustrie beitragen kann (Khosravani & Reinicke, 2020). Nichtsdestotrotz hängen Energie- und Ressourceneinsparungen von einer korrekten Auswahl der eingesetzten Verfahren der additiven Fertigung und deren eingestellter Prozessparameter ab (Kellens et al., 2017).

Im Vergleich zu herkömmlichen Fertigungsverfahren identifizieren diverse Analysen einen geringeren Kohlenstoffussabdruck und eine Reduktion des Abfalls während der Herstellung komplex strukturierter Produkte mittels 3D-Druck (Otcu et al., 2019). Darüber hinaus können die Abfallstoffe, welche während der Herstellung eines Objekts entstehen, wiederverwendet

werden (Khosravani & Reinicke, 2020). Dadurch werden nicht nur Ressourcen effizienter eingesetzt, sondern zugleich die ökologischen Auswirkungen des Abfalls reduziert. Ausserdem führt die Anwendung des 3D-Drucks zur verstärkten Verwendung lokaler Materialien und somit zu einer Kürzung der Lieferkette sowie zur Reduktion der notwendigen Transporte (Otcu et al., 2019). Indem benötigte Produkte und Komponenten in der Nähe des Kunden hergestellt werden, kann die beim Transport verursachte Luftverschmutzung verringert werden, was einen Beitrag zum Erhalt der Umwelt leistet (Khosravani & Reinicke, 2020). Aufgrund der Tatsache, dass während des 3D-Druck-Prozesses für Mensch und Umwelt schädliche Feinstäube entstehen können, spielt die Auswahl der Rohmaterialien eine wesentliche Rolle in Bezug auf Nachhaltigkeitsaspekte in Zusammenhang mit AM-Technologien (Otcu et al., 2019).

2.5.2 Zukunftsaussichten des 3D-Lebensmitteldrucks

Die Lebensmittelversorgungskette ist für etwa 25–30 % der Treibhausgasemissionen verantwortlich und verbraucht eine erhebliche Menge an Energie, Wasser, Land und weiterer Ressourcen (Ritchie, 2021; Rogers & Srivastava, 2021). Jedoch kann die Produktion von Nahrungsmitteln durch das Verwenden von 3D-Drucktechnologien effizienter und nachhaltiger gestaltet werden (Nachal et al., 2019). In diversen Studien wurde argumentiert, dass der Kohlendioxidausstoss in Lebensmittelherstellung und -verarbeitung durch die Nutzung der 3D-Drucktechnologie reduziert werden könnte. Ausserdem kann gemäss Attarin und Attaran (2020) die Nutzung der 3D-Drucktechnologie zu einer erheblichen Zeiteinsparung führen, vor allem wenn es darum geht, komplizierte Konstruktionen von Nahrungsmitteln herzustellen (Attarin & Attaran, 2020). Darüber hinaus werden die Reduzierung von Abfällen und die Minimierung des Überkonsums als positive Eigenschaften des 3D-Drucks in der industriellen Verarbeitung beurteilt (Attarin & Attaran, 2020). Aufgrund der vielen Einflussfaktoren werden die möglichen Auswirkungen des 3D-Lebensmitteldrucks auf die Umwelt als komplexes Thema empfunden (Burke-Shyne et al., 2020). Dennoch besteht weitgehende Einigkeit darüber, dass die Verschwendung von Nahrungsmitteln mittels dieser Technologie stark reduziert werden kann. Erklärungen hierfür könnten die personalisierte Produktion und das optisch ansprechendere Design der Lebensmittel sein.

Ausserdem demonstrieren diverse Studienergebnisse, dass der Energieverbrauch der fleischherstellenden Industrie durch die Erzeugung von künstlichem Fleisch um bis zu 45 % reduziert werden kann (Keppner et al., 2018). Im Gegensatz zur herkömmlichen Fleischproduktion können ferner die Freisetzung von Treibhausgasen um bis zu 96 % und der Verbrauch von Ackerland um bis zu 99 % verringert werden. Schliesslich wäre auch von einer Reduzierung des

Wasserkonsums um bis zu 96 % auszugehen. Die Verwendung lokaler Lebensmittelmaterialien kann zudem zu Transportsenkungen und zur Reduktion weiterer Treibhausgasemissionen beitragen (Portanguen et al., 2019). Insgesamt erlaubt die 3D-Drucktechnologie einen geringeren Verbrauch von Rohstoffen und Energie und bietet somit die Möglichkeit, den ökologischen Fussabdruck in der Lebensmittelindustrie zu reduzieren (Dankar et al., 2018).

Darüber hinaus hat der Prozess des Lebensmitteldrucks keinen hohen Energiebedarf (Kaur et al., 2022; Portanguen et al., 2019). Der Verbrauch an Energie ist zudem mit der Art der in Gebrauch genommenen Materialien verbunden (Ramachandraiah, 2021). Werden für die Herstellung der Lebensmittelprodukte Materialien eingesetzt, die hohe Temperaturanforderungen aufweisen, ist folglich auch beim 3D-Druck dieser Materialien mehr Energie erforderlich. Gemäss Almeida et al. (2022) kann der Energieverbrauch in drei Hauptkategorien unterteilt werden, die den verschiedenen AM-Verfahren zugeordnet sind (Almeida et al., 2022). Zu den Segmenten zählen hoher, mittlerer und niedriger Energiebedarf. Dementsprechend können die Verfahren des 3D-Lebensmitteldrucks der Kategorie mit geringem Energiekonsum zugeteilt werden. Ausgeschlossen ist jedoch das Selective-Sintering-Verfahren, welches aufgrund seiner Zuordnung zur Powder-Bed-Fusion-Kategorie einen höheren Energiebedarf aufweist. Der Energieverbrauch der einzelnen Druckverfahren kann ausserdem aufgrund diverser Faktoren variieren (Keppner et al., 2018). Dazu zählen beispielsweise die Dauer des 3D-Drucks und die Länge der Leerlaufzeiten. Wird der Drucker etwa nur selten genutzt, kann sich der Verbrauch an Energie pro Produkt sogar verzehnfachen.

3 METHODISCHE VORGEHENSWEISE

In diesem Kapitel wird die methodische Vorgehensweise dieser Bachelorarbeit vorgestellt. Im ersten Schritt werden die Thesen formuliert, die als Unterstützung zur Beantwortung der formulierten Forschungsfrage dienen. Des Weiteren werden die ausgewählte Forschungsmethode erläutert und die relevanten Schritte für die empirische Untersuchung präsentiert. Dabei soll vor allem Transparenz bezüglich der Herangehensweise im Rahmen dieser Arbeit geschaffen werden.

3.1 THESEN UND FORSCHUNGSZIEL

In der empirischen Untersuchung werden die von der Theorie abgeleiteten Zukunftsperspektiven des 3D-Lebensmitteldrucks im Hinblick auf dessen industrielle Auswirkungen auf die Umwelt überprüft, welche in Kapitel 2.5.2 beschrieben wurden. Nachdem die theoretischen Erkenntnisse gemäss der wissenschaftlichen Literatur dargestellt wurden, wird das bestehende Wissen durch die Perspektiven von Expertinnen und Experten erweitert. Die erhaltenen qualitativen Daten ermöglichen die Schliessung der identifizierten Forschungslücke im Bereich der 3D-Lebensmitteldrucktechnologie, indem unterschiedliche Thesen ausformuliert und geprüft werden. Dadurch wird die Beantwortung der folgenden Forschungsfrage angestrebt:

Wie wirkt sich der Einsatz von 3D-Drucktechnologien auf die Nachhaltigkeit der Lebensmittelindustrie aus, insbesondere in Bezug auf Wasser- und Energieverbrauch, Lebensmittelverschwendung und die Verwendung alternativer Rohstoffe?

Mithilfe der erarbeiteten wissensbasierten Theorie wurden vier Thesen ausformuliert, die zur Vertiefung und Erläuterung der oben erwähnten Forschungsfrage dienen. Diese Thesen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

These 1: Wenn die Menge erforderlicher Zutaten für die Zubereitung der Nahrungsmittel durch den Einsatz von 3D-Drucktechnologien akkurat gemessen werden kann, dann ist aufgrund des reduzierten Abfalls von Lebensmitteln eine effizientere Nutzung der Nahrungsmittelressourcen möglich.

These 2: Wenn der Wasserverbrauch durch den Einsatz von 3D-Drucktechnologien reduziert werden kann, dann entsteht während der Herstellung von Lebensmitteln weniger Abwasser.

These 3: Je mehr alternative Nahrungsquellen in der Herstellung von 3D-gedruckten Lebensmitteln integriert werden können, desto eher kann die Technologie dazu beitragen, die Degradation der Biodiversität zu verringern.

These 4: Wenn für die Fertigung der 3D-Lebensmittelprodukte geringe Temperaturen zum Einsatz kommen, dann kann der Bedarf an Energie im Vergleich zu herkömmlichen Produktionsverfahren verringert werden.

3.2 AUSWAHL DER FORSCHUNGSMETHODE

Für die Erhebung der Informationen wird die empirische Methode der qualitativen Befragung angewendet, mit der Begründung, dass Expertinnen und Experten mit fundiertem Wissen im Bereich der 3D-Lebensmitteldrucktechnologie gezielt kontaktiert werden können. Das Ziel der Interviews besteht darin, gewonnene Erkenntnisse und persönliche Meinungen bezüglich der Technologie den zusammengefassten Thesen gegenüberzustellen. Ausserdem ermöglichen die empirischen Untersuchungen, welche in Kapitel 4 beschrieben werden, die Plausibilisierung der formulierten Thesen. Darüber hinaus stellt die Befragung von Expertinnen und Experten im untersuchten Bereich sicher, dass die Analyse der gewonnenen Daten auf deren Erfahrungen basiert und somit einen fundierten Nutzen zur Beurteilung der ökologischen Auswirkungen der 3D-Lebensmitteldrucktechnologie mit sich bringt.

3.3 AUFBAU DER BEFRAGUNGEN

Für die Erhebung der qualitativen Daten wird die Methode des leitfadengestützten Interviews angewendet. Dabei wird das Interview anhand eines im Vorhinein aufgestellten Leitfadens organisiert, welcher auf die Theorie gestützte Fragestellungen beinhaltet (Meier et al., 2020). Diese Fragen werden anhand theoretischer Überlegungen aufgebaut und stehen mit den in Kapitel 3.1 formulierten Thesen in Verbindung.

3.3.1 Vorstellung der Interviewpartnerinnen und -partner

In der empirischen Forschung dieser Bachelorarbeit wird das Ziel verfolgt, die Einsichten von Expertinnen und Experten aus unterschiedlichen Berufsfeldern und Tätigkeitsbereichen zu gewinnen, die ihre Expertise aus Unternehmungen erworben haben, welche die 3D-Drucktechnologie einsetzen. Um die Bandbreite an potenziellen Interviewpartnerinnen und -part-

nen zu erhöhen, wurden keine geografischen Einschränkungen festgelegt. Ausserdem wurden für die erfolgreiche Durchführung der angestrebten Anzahl an Interviews potenzielle Interviewpartnerinnen und -partner kontaktiert, die in Unternehmungen tätig waren, welche die 3D-Drucktechnologie nur als Entwicklungstool oder für die komplette Herstellung der Endprodukte verwendeten. Beispielsweise wurde die Technologie von einigen der ausgewählten Interviewpartnerinnen und -partner ausschliesslich für das Testen neuer Rezepturen genutzt mit dem Vorhaben, durch die unterschiedlichen Versuche neues Wissen zu generieren und weiterzugeben. Andere konzentrierten sich hingegen auf die Herstellung der zu verkaufenden Endprodukte mit dem Ziel, 3D-gedruckte Lebensmittel in grösserem Massstab produzieren zu können. Weitere der untersuchten Unternehmungen verkauften mehrheitlich Produkte auf dem Markt, die ohne 3D-Drucker hergestellt werden können, und verwendeten die Technologie ausschliesslich für die Produktion komplexer Strukturen der Produkte. Um möglichst unterschiedliche Einsichten zu erhalten, wurden ausserdem keine spezifischen Branchen innerhalb der Lebensmittelindustrie berücksichtigt, sondern es wurden auch Expertinnen und Experten einbezogen, die sich in der Vergangenheit stark mit der untersuchten Technologie auseinandergesetzt hatten und einen wertvollen Beitrag zu dieser Arbeit leisten konnten.

Potenzielle Interviewpartnerinnen und -partner wurden zunächst über einen bekannten Webdienst für soziale Netzwerke kontaktiert. Nach der ersten Kontaktaufnahme und allfälligen inhaltlichen Abklärungen wurden mit den zu befragenden Personen Online-Termine vereinbart. Die Interviewpartnerinnen und -partner sind in teilweise anonymisierter Form in Tabelle 1 zusammengefasst, sodass keine Rückschlüsse auf die Identität der Beteiligten gezogen werden können.

Tabelle 1: Übersicht der Interviewpartnerinnen und -partner

Interview	Profession
1	Food Scientist
2	Food Researcher
3	Food Product Development Specialist
4	VP R&D System
5	R&D Control and Motion Engineer
6	Food Specialist
7	CEO & Co-Founder
8	Food Technologist
9	Head of 3D Bioprinting R&D

3.3.2 Konzeption des Leitfadens für die Interviews

Wie bereits erwähnt, wurde die Zusammenstellung des Interviewleitfadens anhand der Theorie und der daraus hergeleiteten Thesen realisiert. Dabei wurden vier Themenblöcke gebildet, die der Zuordnung der einzelnen Thesen dienen. Für jede These wurden zwei Hauptfragen formuliert, welche allenfalls durch zusätzliche Nebenfragen ergänzt werden können. Insgesamt wurden für den Interviewleitfaden acht offene Fragen formuliert. Um die Ergebnisse quantitativ darstellen zu können, wurden die Fragen mit einer ordinal skalierten Antwortmöglichkeit ausgestattet. Die quantitativen Fragen ermöglichen die systematische Sammlung der sich aus den Antworten ergebenden Daten. Die begrenzte Anzahl der Antwortmöglichkeiten bewirkt ausserdem, dass die Forschungsfrage anhand der empirischen Untersuchung einfacher evaluiert werden kann. Dadurch lässt sich zudem analysieren, ob die befragten Personen eher positive, geringfügige oder keine Auswirkungen hinsichtlich des Einflusses der 3D-Lebensmitteldrucktechnologie auf die Umwelt wahrnehmen.

Die Einstiegsfragen des Interviewleitfadens haben den Zweck, den Einsatz der 3D-Drucktechnologie im Unternehmen nachzuvollziehen, sodass die darauffolgenden Fragen korrekt formuliert werden können. Der erste Themenblock des Interviews konzentriert sich auf die effiziente Nutzung der Ressourcen. Dabei ist insbesondere die Lebensmittelverschwendung Gegenstand der Diskussion. Im zweiten Themenblock steht der Wasserverbrauch während der Herstellung der 3D-Lebensmittelprodukte im Vordergrund, wobei hier auch versucht wird, zu verstehen, ob bestimmte Kontrollmechanismen im Unternehmen eingesetzt werden. Im dritten Themenblock wird der Einsatz alternativer Nahrungsquellen diskutiert, während im vierten und letzten Themenblock der Energieverbrauch im Fokus steht. In diesem Zusammenhang werden auch die eingesetzten Temperaturen besprochen, welche für die Produktion der 3D-Lebensmittelkonstrukte notwendig sind.

3.4 ABLAUF DER INTERVIEWS

Nach der Fertigstellung des Interviewleitfadens wurden die Fragen einer inhaltlichen Prüfung unterzogen und anhand eines durchgeführten Pretests verfeinert (Meier et al., 2020). Um die Authentizität der Antworten sicherzustellen, wurden die Teilnehmenden im Vorfeld über die vertrauliche Behandlung der bereitgestellten Informationen in Kenntnis gesetzt.

3.4.1 Pretest

Vor der Durchführung der Interviews fand ein Pretest statt, dessen Ziel die Beurteilung der im Leitfaden formulierten Fragen war. Dabei wurde das erste durchgeführte Interview gleichzeitig als Pretest verwendet. Insbesondere wurde auf die verständliche Formulierung der gestellten Fragen geachtet. Zudem wurde während des Interviews berücksichtigt, ob die Reihenfolge der einzelnen Fragestellungen angemessen und sinnvoll geplant wurde. Zuletzt wurde der zeitliche Ablauf des Interviews überprüft, um sicherzustellen, dass die vorgesehene Zeit korrekt eingeschätzt wurde.

Der Pretest ergab, dass die gestellten Fragen für die interviewte Person verständlich formuliert waren. Die eingeplante Zeit konnte ebenfalls eingehalten werden. Um zusätzliche Informationen zu gewinnen, mussten jedoch die Reihenfolge der Fragen angepasst und zusätzliche Einstiegsfragen in den Leitfaden eingebaut werden, um ein Basisverständnis über das Unternehmen und dessen Einsatz der 3D-Drucktechnologie zu erlangen. Aufgrund der daraus erhaltenen wertvollen Einsichten wurde beschlossen, das Interview, welches als Pretest funktionierte, ebenfalls im Rahmen der empirischen Untersuchung zu berücksichtigen.

3.4.2 Durchführung der Interviews

Damit die Antworten der Teilnehmenden während der Interviews durch allfällige Nachfragen oder zusätzliche Informationen ergänzt werden konnten, musste für jedes Interview ein Basiswissen über die Haupttätigkeit des Unternehmens vorliegen. Aufgrund der Tatsache, dass nicht immer deutlich war, inwieweit 3D-Drucktechnologie verwendet wurde, wurden zu Beginn der Interviews zusätzliche Einstiegsfragen eingebaut, sodass die Nutzung der Technologie für jedes an der Befragung beteiligte Unternehmen deutlich wurde.

Die Interviews wurden aufgrund der geografischen Distanz online in Form einer Videokonferenz durchgeführt. Nach einer kurzen Einführung und der erneuten Erläuterung der Zielsetzung der Interviews wurde die Einwilligung der Interviewpartnerinnen und -partner zur Audioaufzeichnung eingeholt. Während der Interviews wurden die Fragen gemäss dem Interviewleitfaden gestellt und die Teilnehmenden hatten die Möglichkeit, allfällige Nachfragen zu stellen.

3.5 QUALITATIVE INHALTSANALYSE

Die qualitative Inhaltsanalyse erfolgt mittels systematischer Vorgehensweise nach Philipp Mayring. Hierbei werden im Vorfeld bestimmte Regeln anhand der theoretischen Erkenntnisse definiert und dem Inhalt der durchgeführten Interviews gegenübergestellt, sodass ein tiefes Verständnis des analysierten Textes erreicht werden kann (Mayring, 2015 in Meier et al., 2020).

3.5.1 Vorbereitung und Erhebung der Daten für die Analyse

Die Audioaufnahmen der Interviews, welche online per Videokonferenz durchgeführt wurden, wurden anschliessend transkribiert, um den Inhalt im nächsten Arbeitsschritt auswerten zu können. Ausserdem kann durch das Transkribieren der Audioaufnahmen eine genaue und vollständige Erfassung der Aussagen der Expertinnen und Experten gewährleistet werden. Die Daten, welche aus den Interviews hervorgehoben wurden, werden nachfolgend in den im Codebuch definierten Haupt- und Unterkategorien für die Analyse bereitgestellt. Durch die Anwendung dieser Methode wird eine umfassende und strukturierte Analyse der Daten sichergestellt, welche eine fundierte Beantwortung der Forschungsfrage ermöglicht.

Um die Plausibilisierung der Thesen und die Beantwortung der Forschungsfrage zu vereinfachen, wurden die qualitativen Fragestellungen mit ordinal skalierte Antwortmöglichkeiten erweitert. In diese Fragestellungen wird das Ziel verfolgt, die Meinungen der Interviewpartnerinnen und -partner in Kategorien zuzuordnen, welche Stufenbereiche in etwa gleich grossen Abständen unterteilt werden können. Auch wenn die Aufteilung nicht äquidistant ist, da der erste Bereich grösser ist als der zweite, können drei Kategorien definiert werden. Die Bedeutung der genannten Kategorien werden folglich zusammenfassend beschrieben:

- 1. Keine Auswirkungen:** In dieser Kategorie werden die Einschätzungen von Personen gruppiert, die keine wesentlichen Auswirkungen der 3D-Lebensmitteldrucktechnologie auf die Umwelt erkennen und keinen signifikanten Unterschied durch den Einsatz der Technologie wahrnehmen. Werden von den Befragten Beurteilungen zwischen 1 und 3.3 gegeben, werden sie dieser Kategorie zugeordnet.
- 2. Geringfügige Auswirkungen:** In dieser Gruppe werden die Meinungen der Interviewten aufgenommen, die zwar glauben, dass die 3D-Lebensmitteldrucktechnologie Auswirkungen auf die Umwelt haben kann, aber nur geringfügig. Auch werden im Vergleich zu

herkömmlichen Technologien keine wesentlichen Beiträge anerkannt. Dieser Kategorie werden Einschätzungen von 3.4 bis 6.6 zugeteilt.

- 3. Positive Auswirkungen:** In diese Kategorie gehören die Ansichten befragter Personen, die glauben, dass die 3D-Lebensmitteldrucktechnologie einen positiven Einfluss auf die Umwelt haben kann. Dazu gehören hohe Bewertungen, nämlich von 6.7 bis 10.

3.5.2 Vorstellung des Code-Buches

Das Code-Buch dieser Bachelorarbeit besteht aus vier Hauptkategorien. Diese Hauptkategorien entsprechen den in Kapitel 3.1 vorgestellten vier Thesen. Jede Hauptkategorie wird demnach in Unterkategorien aufgeteilt, sodass eine Unterscheidung innerhalb der übergeordneten Kategorie und auf Basis bestimmter Eigenschaften vorliegen kann. Dementsprechend erhalten die Unterkategorien detaillierte Codier-Regeln, um ihre Abgrenzung zu den anderen untergeordneten Kategorien zu spezifizieren. Auch werden Ankerbeispiele aus den transkribierten Interviews als Referenz für die Veranschaulichung der Codier-Regeln aufgeführt. Die dabei erhaltenen Haupt- und Unterkategorien bilden zusammen mit den Codier-Regeln und Ankerbeispielen das Code-Buch, welches im Anhang dieser Bachelorarbeit zur besseren Nachvollziehbarkeit bereitgestellt wird. Die Ergebnisse aus dem Code-Buch dienen zudem der empirischen Untersuchung der Forschungsfrage.

4 EMPIRISCHER TEIL

Im vorliegenden Kapitel wird die inhaltliche Analyse der Interviews anhand der im Vorfeld formulierten Thesen durchgeführt. In der empirischen Untersuchung werden die Thesen durch Interpretierung der erhobenen Daten geprüft. Insgesamt erlaubt dieses Kapitel eine Zusammenfassung der gewonnenen Erkenntnisse und die Überprüfung der vier Thesen, welche abschliessend zur Beantwortung der untersuchten Forschungsfrage dient.

4.1 THESE 1: NAHRUNGSMITTELRESSOURCEN

4.1.1 Ausgangslage und These

In der akademischen Literatur wird der Einsatz der 3D-Drucktechnologie in der Herstellung von Nahrungsmitteln als innovative Möglichkeit angesehen, die Abfälle verschiedener Lebensmittel zu reduzieren. Auch lassen sich aus den Schnittresten, die während des Kochens entstehen, essbare Dekorationen kreieren. Eine personalisierte Ernährung kann ausserdem einen Beitrag dazu leisten, die Gesundheit der Konsumenten durch ein auf sie zugeschnittenes Nahrungsangebot zu steigern. Des Weiteren bietet die 3D-Lebensmitteldrucktechnologie die Möglichkeit, diverse Nahrungsmittel trotz abnehmender Frische appetitlicher aussehen zu lassen. Die geschilderten Potenziale lassen jedoch eine unklare Vorstellung darüber, inwieweit Lebensmittelabfälle auf industrieller Ebene und mithilfe des 3D-Drucks reduziert werden können. Daher wird in diesem Abschnitt folgende These untersucht:

These 1: Wenn die Menge erforderlicher Zutaten für die Zubereitung der Nahrungsmittel durch den Einsatz von 3D-Drucktechnologien akkurat gemessen werden kann, dann ist aufgrund des reduzierten Abfalls von Lebensmitteln eine effizientere Nutzung der Nahrungsmittelressourcen möglich.

4.1.2 Empirische Erkenntnisse

Der 3D-Drucker wurde in den befragten Unternehmungen unterschiedlich genutzt. Einige der interviewten Personen setzten die Technologie beispielsweise ein, um neuartige Zutaten auszuprobieren oder unkonventionelle Geschmacksrichtungen zu testen (Interview 1). Auf diese Weise werden geringere Mengen an Lebensmittelzutaten benötigt, um neue Rezepturen testhalber zuzubereiten. Würde das Unternehmen nicht über einen 3D-Drucker disponieren, müssten andernfalls grössere Industrieanlagen für die Vorbereitung der Testrezepturen ver-

wendet werden. Diese Fertigungseinrichtungen verfügen zwar über höhere Produktionskapazitäten, stellen jedoch eine unvermeidlich hohe Menge an Lebensmittelprodukten her, die für den Forschungszweck nicht von Bedeutung sind. Der 3D-Drucker kann somit zur Verhinderung von Lebensmittelverschwendungen bei der Entwicklung neuer Rezepturen verwendet werden. Dies erlaubt eine Reduzierung der Menge an notwendigen Zutaten von mehreren Kilos auf wenige Gramm. Infolgedessen lässt sich behaupten, dass das Nutzen eines 3D-Druckers für Forschungszwecke zur Senkung der Lebensmittelabfälle beiträgt, da die Menge an Zutaten für die Zubereitung neuer Formeln auf die erforderliche Mengeneinheit reduziert wird.

Eine weitere befragte Person erklärte ausserdem, dass während der Nutzung der 3D-Drucktechnologie keine weitere Lebensmittelabfälle entstehen können, da die in diesem Fall verwendete Biotinte in einem bereits vorbereiteten Zustand zum Drucker gelangt (Interview 2). Dabei wird die gesamte Menge an präparierter Biotinte für die Realisierung der Lebensmittelprodukte verwendet, ungeachtet der Tatsache, ob es um das Testen einer neuen Formel oder die Herstellung eines zu verkaufenden Endproduktes geht. Da sich viele der befragten Unternehmen noch in der Forschungs- und Entwicklungsphase befanden und ihre Produkte noch nicht in grossen Mengen gefertigt wurden, konnten die aktuellen Abfallströme nicht mit konkreten Zahlen bemessen werden. Dennoch erklärte eine interviewte Person:

«The waste streams are very, very minimal right now [...]. 3D food printing has very little waste because it is very precisely [...]. It can be very interesting to see how it has potential of turning certain waste streams into more valuable products» (Interview 3).

Des Weiteren betonten einige der Interviewten, dass die Reduzierung der Abfälle in der Lebensmittelbranche nicht besonders stark vom 3D-Drucker, sondern vielmehr von anderen nachgelagerten Produktionsprozessen abhinge (Interview 8). Die nachgelagerten Prozesse in der Fertigung umfassen beispielsweise die Verarbeitung, Verpackung und Verteilung der Lebensmittelprodukte nach der Ernte, Produktion oder Herstellung. Nichtsdestotrotz wird der Einsatz des 3D-Lebensmitteldrucks, insbesondere im Vergleich zu den herkömmlichen Fertigungstechnologien für Fleisch- und Meeresfrüchtealternativen, als potenzielles Instrument für die Reduzierung der Menge an Abfällen in der Lebensmittelindustrie angesehen. Betrachtet man ausserdem die 3D-Lebensmitteldrucktechnologie isoliert von nachgelagerten Prozessen, empfanden einige der Befragten, dass trotz der geringen Lebensmittelabfälle wohlmöglich weitere Verbesserungspotenziale im Zusammenhang mit der Technologie vorhanden sind:

«Generally, food waste is maybe the biggest issue in the production. I think that it is a main problem of all productions and this is something that definitely the 3D food printing reduces but still could improve» (Interview 8).

Einige der Befragten äusserten des Weiteren Bedenken gegenüber herkömmlichen Vorbereitungsmethoden der Nahrungsmittel in diversen Speiselokalen. Gemäss einer der Interviewten führten diese Methoden zu Lebensmittelverschwendung, die mit anderen Verfahren oder Technologien nicht entstände (Interview 4). Bei der Zubereitung von Speisen in Restaurants wird beispielsweise oft ein grösseres Volumen vorbereitet, als von den Gästen konsumiert werden kann. Während der Anwendung der 3D-Lebensmitteldrucktechnologie, werden hingegen warme Speisen nur auf Bestellung für den Kunden vorbereitet.

Zudem erklärte eine weitere interviewte Person, dass die Verringerung der Lebensmittelverschwendung nicht direkt mit dem Konzept der Produktion von kultiviertem Fleisch in Beziehung steht (Interview 9). Dennoch bieten sich auch hier diverse Möglichkeiten an, die Verschwendungen von Lebensmitteln zu reduzieren, indem ein Anteil der Biotinte mit Produkten aus der konventionellen Landwirtschaft oder Fleischproduktion zubereitet werden könnte. Auf diese Weise wäre es möglich, zusätzliche Ressourcen zu nutzen und potenzielle Verschwendungen aus Landwirtschaft oder Fleischproduktion zu verhindern:

«As far as I see there shouldn't be such wastes because we insert only the materials that are needed for the product itself [...]. When we are cultivating the cells, we're also working on solution like recycling of the media [...]. We're looking on the whole supply and production chain [...]» (Interview 9).

Weitere Befragte erklärten, dass es derzeit unterschiedliche Arten von Lebensmittelabfällen gebe und dass deren Minimierung deswegen von der Natur der Nahrungsmittel abhängig sei. Werden beispielsweise tierische Lebensmittelabfälle betrachtet, könnte die Reduzierung viel höher sein als diejenigen der Landwirtschaft (Interview 6). Es gibt bereits einige Unternehmen, die an Produkten arbeiten, für deren Fertigung mindere Fleischteile des Tieres verwendet werden. Wird dazu die Technologie des 3D-Drucks kombiniert, können kostbare Güter hergestellt werden, die den unedlen Tierteilen mehr Wert verleihen. Bei der Betrachtung tierischer Abfälle kamen viele der Befragten zu dem Ergebnis, dass die 3D-Drucktechnologie ein besonders nützliches Instrument darstellen könne. Zwar kann die Technologie des 3D-Drucks auch zur Minimierung landwirtschaftlicher Lebensmittelabfälle geeignet sein, allerdings nicht mit demselben Potenzial:

«Any technology at this point will help to reduce the amount of food waste that we have right now [...]. We use our product like 100 %. We mix it with other ingredients, but here [in the 3D printing process] I wouldn't say that we would help the food waste» (Interview 6).

Einige der befragten Personen betonten zudem, dass die Reduzierung der Lebensmittelverschwendung durch den Einsatz der 3D-Drucktechnologie auf industrieller Ebene keine signifikante Wirkung haben werde (Interview 7). Stattdessen wird die Nutzung dieser Technologie durch Verbraucher im persönlichen Haushalt als vielversprechendere Herangehensweise angesehen, um die Reduzierung von Lebensmittelverschwendungen zu verwirklichen. Angesichts der Tatsache, dass Individuen im persönlichen Haushalt dazu neigen, eine hohe Menge an Lebensmitteln wie etwa Brot und Gemüse zu verschwenden, wird die Reduzierung der Lebensmittelabfälle durch die Nutzung der 3D-Drucktechnologie als positiv erachtet. Dagegen wird dieses Potenzial auf industrieller Ebene weniger stark erkannt:

«There's such a larger scale of potential food waste that can come from production unless the 3D food printers are large, and I think it's just not feasible. But at a retailer level, like grocery stores or something like that, I can see that being something that's really helpful [...]. It's a really good tool to emphasize food waste, what it is and how detrimental it can be [...].» (Interview 7).

Erweiterten die Befragten ihren Blickwinkel auf weitere Ressourcen, die eingespart werden könnten, kam die Verringerung von Verpackungsmaterialien zur Sprache. Durch die Verwendung von 3D-Druckmaschinen für die Herstellung von Esswaren könne eine grosse Menge an Plastik reduziert oder sogar eliminiert werden (Interview 4). Bei einem eingekauften Burger wird beispielsweise eine grosse Menge an Plastik verwendet, damit die Verpackung für den Verkauf des Burgers realisiert werden kann. Durch die Verwendung von 3D-Druckern kann somit auch die Menge an Verpackungsmaterialien reduziert werden, da die Lebensmittelprodukte nach vervollständigtem Druck unmittelbar verzehrfertig sind.

Darüber hinaus betonten weitere Befragte, dass bezüglich einer effizienteren Ressourcennutzung die gesamte Produktionslieferkette betrachtet werden müsse (Interview 9). Dabei gebe es gemäss einer der Interviewten noch viel Potenzial, Ressourcen einzusparen und somit schädliche Auswirkungen der Lebensmittelherstellung auf die Umwelt zu verringern.

4.1.3 Plausibilisierung der These 1

Die Analyse der vorliegenden Interviews ergibt im Allgemeinen eine positive Betrachtung der möglichen Reduzierung von Lebensmittelabfällen durch den Einsatz der 3D-Drucktechnologie. In den Interviews wurde nicht nur diskutiert, wie Zutaten in exakter Quantität für den Druck vorbereitet werden, sondern es wurden weitere Perspektiven aufgezeigt, welche positive Auswirkungen auf die verwendeten Ressourcen haben können. Beispielsweise kann ein 3D-Drucker auch für Forschungszwecke genutzt werden, um die benötigte Menge an Lebensmitteln zu reduzieren.

Ferner sind einige der Befragten der Meinung, dass die meiste Lebensmittelverschwendung nicht während des Druckprozesses, sondern in den nachgelagerten Prozessen der Fertigung entsteht. Ausserdem werden durch den Einsatz von 3D-Druckern nicht nur nahezu keine Abfälle während der Herstellung von Lebensmitteln produziert, sondern es bietet sich auch die Möglichkeit, bestehende Lebensmittelabfälle aus Landwirtschaft und Fleischproduktion für die Erzeugung der gedruckten Lebensmittelprodukte zu verwerten. Dadurch können weitere Produkte hergestellt werden, die nicht nur für den Menschen verzehrbar sind, sondern auch schmackhaft aussehen. Auch wenn die 3D-Lebensmitteldrucktechnologie nur einen begrenzten Einfluss auf die Reduzierung von Nahrungsmittelverschwendung in der Lebensmittelindustrie hat, kann These 1 aufgrund der vorliegenden empirischen Ergebnisse als plausibel angesehen werden.

Die Ergebnisse der Analyse werden in der Tabelle 2 veranschaulicht. Wie es aus der Darstellung zu entnehmen ist, sehen die Mehrheit der befragten Teilnehmenden den Einsatz der 3D-Lebensmitteldrucktechnologie in der Lebensmittelbranche mit positiven Auswirkungen auf die Minimierung von Lebensmittelverschwendung. Andererseits haben einige der Befragten eine geringfügige Auswirkung der Technologie auf die Minimierung der Lebensmittelabfälle attribuiert. Grund hierfür ist die Betrachtung der nachgelagerten Prozesse in der Produktion. Die niedrigste Bewertung beruht hingegen auf der Überlegung, dass das grösste Minimierungspotenzial der Lebensmittelverschwendung durch Nutzung von 3D-Drucktechnologie durch Personen im persönlichen Haushalt existiert, und weniger in der Lebensmittelindustrie zu verorten ist.

Tabelle 2: Auswirkungen des 3D-Lebensmitteldrucks auf die Minimierung von Lebensmittelverschwendung

Interview	Lebensmittelverschwendung
1	10
2	8
3	8
4	8
5	9
6	8.5
7	2.5
8	5
9	9.5

Keine Auswirkungen
 Positive Auswirkungen
 Geringfügige Auswirkungen

Quelle: In Anlehnung an Keppner et al. (2018, S. 27)

4.2 THESE 2: WASSERVERBRAUCH

4.2.1 Ausgangslage und These

Laut wissenschaftlichen Veröffentlichungen erfordert die Herstellung von Lebensmitteln einen hohen Wasserverbrauch. Dennoch kann der Einsatz von 3D-Drucktechnologien in der Lebensmittelbranche die für die Produktion benötigte Wassermenge verringern. Insbesondere wird dokumentiert, dass die Herstellung von Fleischprodukten eine hohe Menge an Wasser verbraucht und mithilfe der 3D-Drucktechnologie verschiedene Ersatzprodukte gefertigt werden können. Folglich lässt sich der Wasserkonsum in der Lebensmittelindustrie reduzieren. In der Tat haben Studien demonstriert, dass die Erzeugung von künstlichem Fleisch weniger Wasser verbraucht als die Herstellung herkömmlicher Fleischprodukte. Es stellt sich daher die Frage, ob weitere mögliche Zusammenhänge bestehen, die zur Verringerung des Wasserkonsums durch die Anwendung dieser Technologie in der Lebensmittelindustrie führen könnten. Angesichts dessen wurde folgende These formuliert:

These 2: Wenn der Wasserverbrauch durch den Einsatz von 3D-Drucktechnologien reduziert werden kann, dann entsteht während der Herstellung von Lebensmitteln weniger Abwasser.

4.2.2 Empirische Erkenntnisse

Der Wasserverbrauch bei der Herstellung von Lebensmitteln mit einem 3D-Drucker wird von den interviewten Personen grundsätzlich als gering angesehen. Dennoch gelangt das Wasser, welches sich in den Kartuschen des 3D-Druckers befindet, im Gegensatz zur herkömmlichen Produktion vollumfänglich in das hergestellte Endprodukt (Interview 1). Dies bedeutet, dass es während der Erstellung von Produkten mittels eines 3D-Druckers grundsätzlich nicht zu Wasserverlusten und -verschwendung kommt. Einige der Befragten betonten ausserdem, dass für die Herstellung pflanzlicher Fleischalternativen im Allgemeinen weniger Wasser benötigt wird als für die Fertigung konventioneller Fleischprodukte, welche eine erhebliche Menge an Wasser verbraucht (Interview 6). Ausserdem erklärten weitere teilnehmende Personen, dass bei der Herstellung alternativer Fleischprodukte der Wasserverbrauch ohnehin schon reduziert ist, da die Fütterung der Tiere vollständig entfällt (Interview 8). Obwohl das für die Produktion verwendete Wasser gänzlich in das Endprodukt einfließt, waren manche Befragte der Meinung, dass die 3D-Drucktechnologie keinen wesentlichen Beitrag zur Minderung des Wasserverbrauchs leistet:

«I don't think there is much difference between the 3D printed and the not 3D printed meat. I don't think the 3D printing itself saves water» (Interview 5).

Ausserdem muss bei der Verwendung von 3D-Drucktechnologien generell darauf geachtet werden, dass die Konsistenz der Lebensmittel nicht zu wässrig ist, da sonst Probleme beim Druckvorgang entstehen könnten (Interview 7). Daher ist es hilfreich, wenn die eingesetzten Zutaten wenig Wasser enthalten. Dabei kann es sogar vorkommen, dass Wasser aus der Mischung entfernt werden muss, damit eine gute Druckqualität gewährleistet werden kann. Die Verwendung von Wasser für die Produktion 3D-gedruckter Lebensmittel ist somit abhängig von der zu nutzenden 3D-Druckpaste (Interview 6). Tendenziell benötigen die Rezepturen dafür wenig Wasser. Ist der Feuchtigkeitsgehalt der verwendeten Zutaten bereits hoch, muss der Mischung nur noch eine geringe Menge Wasser beigefügt werden:

«When we do the recipes for the 3D printing, that's really set, like you add this amount of water and normally you don't add more or less. You have to be really precise because then the product will change a lot [...]. We like to compare our product to soy, because to produce our protein, we basically use around 80 % less water than soy. So, we already start with this advantage» (Interview 6).

Zudem wurde der Wasserverbrauch für die tägliche Reinigung des Druckers von den Befragten beleuchtet. Werden beispielsweise kleine Kapseln für den Druck von Lebensmitteln verwendet, ist keine grosse Wassermenge für die Säuberung erforderlich. Nichtsdestotrotz verwendeten einige der Befragten Heissdampf für das Entfernen von Verunreinigungen, um gleichzeitig eine sterilisierende Wirkung sicherzustellen. Des Weiteren versuchen einige Unternehmen, das für die Reinigung genutzte sterile Wasser wiederzuverwenden (Interview 2). Dennoch hängen der Reinigungsvorgang und somit die Menge an erforderlichem Wasser stark vom eingesetzten 3D-Drucker ab. Werden komplexe Systeme genutzt, ist in der Regel eine umfangreiche Reinigung der Drucker erforderlich (Interview 3). Darüber hinaus wurde ergänzt, dass der Wasserverbrauch nicht nur von der Art des 3D-Druckers, sondern auch von der eingesetzten Reinigungsmethode abhängt sei (Interview 8). Trotzdem wird der Wasserverbrauch für die Produktion von Nahrungsmitteln mittels 3D-Drucktechnologie als sehr gering beurteilt:

«We are using just like the most necessary to keep our machines clean as in every process for example mixers or whatever type of machine you are using. You're always looking to just minimize the water consumption as much as possible but also to properly have the machines cleaned. So, I don't know if we can reduce there that much. But I think that in comparison to other conventional productions it is already reduced a lot» (Interview 8).

Weitere Befragte waren der Meinung, dass der Wasserverbrauch generell reduziert werden kann, wenn man den Einsatz von 3D-Lebensmitteldruckern in Gastronomiebetrieben betrachtet (Interview 4). Wird eine 3D-Druckmaschine für das Produzieren von Lebensmitteln verwendet, wird weniger Geschirr benötigt, welches danach gereinigt werden muss. Dadurch verringert sich der Wasserverbrauch für die Säuberung der Utensilien. Die Befragten betonten zudem, dass bei der Herstellung von Lebensmitteln mittels 3D-Drucktechnologie kein Wasser verwendet wird und dass das System daher keinen Wasseranschluss benötigt. Dennoch wird für die Reinigung der Maschine nach jedem Druck Wasser verwendet, um Gesundheitsrichtlinien einzuhalten. Wasser wird also genutzt, um alle Teile der Maschine zu säubern, die mit Lebensmitteln in Berührung kommen.

Des Weiteren erklärte eine andere befragte Person, dass der eingesetzte 3D-Drucker an sich nicht viel Wasser verbrauche, weil die Technik der Luftkompression zum Drucken genutzt werde (Interview 2). Vielmehr wurde der grösste Wasseranteil in einigen der befragten Unternehmen für die Erzeugung der Biotinte verwendet, um Zellen zu kultivieren (Interview 9).

Obwohl die Zellen viel Wasser als Nahrung benötigen, ist gemäss der Befragten der Wasserverbrauch nach wie vor niedriger gegenüber der Verpflegung von Tieren. Schliesslich bleibt das Wasser, welches zur Kultivierung verwendet wird, in den Zellen erhalten und steht vollumfänglich für den menschlichen Verzehr zur Verfügung:

«The 3D printer doesn't use a lot of water, because it uses air. We use air compression to print, and the only water we use is to clean the system actually. So, it's almost none. [...] Most of the water consumption that we have is in the biology team, when we grow the cells, because the cells need to have lots of water» (Interview 2).

Einige der Befragten sahen keinen Nutzen darin, den Wasserverbrauch in der Herstellung von 3D-gedruckten Lebensmitteln zu kontrollieren, da vordefinierte Wassermengen für die Produktion eingesetzt werden (Interview 1). Andere Befragte arbeiteten an der Entwicklung von Reinigungssystemen, um sie in Zukunft an einen industriellen Massstab adaptieren zu können (Interview 3). Letztlich waren sich jedoch alle Befragten einig, dass bei der Analyse des Wasserverbrauchs in der Lebensmittelproduktion die gesamte Prozesskette in Betracht gezogen werden sollte und der Lebensmitteldruck nicht als eigenständiger Prozess angesehen werden kann (Interview 9).

4.2.3 Plausibilisierung der These 2

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die befragten Personen unterschiedliche Ansichten bezüglich der möglichen Reduktion des Wasserverbrauchs in der Lebensmittelproduktion durch den Einsatz von 3D-Drucktechnologien hatten. Dennoch empfanden sie den Wasserverbrauch während der Lebensmittelherstellung mittels 3D-Druck als peripheren Aspekt des Prozesses. In der Tat gelangt das Wasser, welches für die Erzeugung der Lebensmittel benötigt wird, vollumfänglich in das 3D-gedruckte Produkt. Da während des Drucks tendenziell keine Wasserverluste auftreten und die Rezepturen üblicherweise wenig Wasser benötigen, kann der 3D-Lebensmitteldruck als wassersparende Technologie betrachtet werden.

Ausserdem ist die benötigte Menge an Wasser für die Herstellung der Produkte bereits in den verwendeten wasserreichen Zutaten enthalten. Auch für die Reinigung der Drucker wird generell wenig Wasser verbraucht, da nur die Druckkomponenten gesäubert werden müssen, die mit Lebensmitteln in Berührung kommen. Obwohl der Umfang des Beitrags dieser Technologie zur Minderung des Wasserverbrauchs nicht eindeutig ist, kann dem 3D-Druckprozess ein positiver Einfluss zugeschrieben werden. Tatsächlich liegt eine effektive Nutzung des zur Herstellung der 3D-Konstrukte benötigten Wassers vor. Aufgrund der Tatsache, dass der

Wasserverbrauch bei der Produktion 3D-gedruckter Lebensmittel durch die präzise Dosierung des Wassers reduziert werden kann, wird These 2 als plausibel beurteilt.

Die genaue Kontribution der 3D-Lebensmitteldrucktechnologie zur Minimierung des Wasserverbrauchs ist schwer zu definieren. Deren Bedeutung ist in der Tat anhand des Gesamtergebnisses in Tabelle 3 nicht eindeutig erkennbar. Obwohl die Mehrheit der teilnehmenden Personen zwar eine positive Auswirkung des 3D-Lebensmitteldrucks auf die Minimierung des Wasserverbrauchs wahrnehmen konnte, gibt es drei von neun Befragten, die nicht ganz davon überzeugt waren. Zwar gaben auch diese Interviewten an, dass der Wasserverbrauch höchstwahrscheinlich im Vergleich zur traditionellen Lebensmittelherstellung reduziert werden könne, sahen jedoch das grösste Potenzial zur Wasserersparnis generell in der Herstellung alternativer Fleischprodukte, unabhängig vom Einsatz der 3D-Lebensmitteldrucktechnologie. Schliesslich wurde die niedrigste Bewertung aufgrund der Tatsache gegeben, dass der 3D-Lebensmitteldruck wenig Wasser in der verwendeten Mischung benötigt und daher kein Potenzial zur Minimierung des Wasserverbrauchs existieren kann.

Tabelle 3: Auswirkungen des 3D-Lebensmitteldrucks auf die Minimierung des Wasserverbrauchs

Interview	Wasserverbrauch
1	10
2	8
3	8
4	5.5
5	5
6	8.5
7	2
8	5
9	9

■ Keine Auswirkungen
 ■ Positive Auswirkungen
 ■ Geringfügige Auswirkungen

Quelle: In Anlehnung an Keppner et al. (2018, S. 27)

4.3 THESE 3: ERHALT DER BIODIVERSITÄT

4.3.1 Ausgangslage und These

Die 3D-Drucktechnologie wird für die Entwicklung alternativer und neuartiger Lebensmittel verwendet und bietet einen grossen Mehrwert für die Erstellung komplexer 3D-Konstrukte. Nicht nur können Produkte auf pflanzlicher Basis erzeugt werden, sondern auch das Herstellen von In-vitro-Fleisch wird durch den Einsatz des 3D-Biodrucks ermöglicht. Infolgedessen

wird die Anwendung der 3D-Drucktechnologie in der Lebensmittelbranche als vielversprechendes Instrument zum Bereitstellen alternativer Nahrungsquellen gesehen, was dazu beitragen kann, den ökologischen Fussabdruck zu verringern. Auf Basis dieser Erkenntnisse wurde folgende These formuliert:

These 3: Je mehr alternative Nahrungsquellen in der Herstellung von 3D-gedruckten Lebensmitteln integriert werden können, desto eher kann die Technologie dazu beitragen, die Degradation der Biodiversität zu verringern.

4.3.2 Empirische Erkenntnisse

Durch den Einsatz der 3D-Lebensmitteldrucktechnologie wurde die Möglichkeit geschaffen, verschiedene Arten von Lebensmittelprodukten zu konzipieren, die es vorher auf dem Markt nicht gab (Interview 5). Damit Konsumenten nachhaltigere Entscheidungen treffen können, versuchen eine Vielzahl von Unternehmen alternative Fleisch- und Fischprodukte zu entwickeln, die in Konsistenz und Geschmack den herkömmlichen tierischen Produkten entsprechen. Eine befragte Person erklärte, dass vor allem die dreidimensionale Struktur der Muskeln komplex zu entwickeln sei und dass der 3D-Drucker die einzige Technologie auf dem Markt sei, die diese Komplexität überwinden könne (Interview 3). Dank dem Einsatz der 3D-Drucktechnologie in der Lebensmittelbranche können Ersatzprodukte eine Textur erhalten, die sie beim Kochvorgang und Verzehr natürlich wirken lässt. Daher leistet diese Technologie einen signifikanten Beitrag zur Nutzung alternativer Nahrungsquellen. Infolgedessen versuchen verschiedene Unternehmungen aus der pflanzenbasierten Industrie, die Textur herkömmlichen tierischen Fleisches in ihren Ersatzprodukten zu imitieren, indem Fleischfasern mithilfe der 3D-Drucktechnologie nachgebildet werden (Interview 6). Obwohl der Einsatz dieser Technologie einen grossen Beitrag zur Realisierung verschiedener Ersatzprodukte leisten kann, konzentrieren sich derzeit viele Unternehmungen aufgrund der unterschiedlichen Herausforderungen bei der Verwirklichung der zu imitierenden Muskelstrukturen auf die Umsetzung einzelner Produkte (Interview 3):

«I'm very optimistic on this because these alternative foods, they require a lot of different formulations and research and development to really best determine the textures. So, taste is one thing, but texture is critical to people adopting these alternative meats. [...] Consumers and people in general may have a hard time just adopting the concept and this is a very good educational tool that opens up food sustainability, but also digital tools» (Interview 7).

Darüber hinaus verwenden einige der befragten Unternehmungen kultivierte Zellen aus Muskel- und Fettgewebe, um ihre Produkte herzustellen. Einerseits gibt es viele Technologien, mit denen alternative Protein- oder Fleischprodukte hergestellt werden können, andererseits lassen sich mit 3D-Bioprinting komplexere Strukturen mit vaskulären Systemen und Gewebe produzieren und die Zellen und Materialien exakt an der gewünschten Stelle positionieren (Interview 9). Mithilfe von Bioprinting kann somit eine Vielfalt an Produkten zubereitet werden. Dadurch lässt sich eine grössere Auswahl alternativer Nahrungsmitteln anbieten, die eine bessere Imitation tierischer Produkte sind.

«*Cultured meat is very hot right now*» (Interview 2). Mit dieser Aussage aus einem Interview lässt sich veranschaulichen, dass derzeit unterschiedliche Regelungen in verschiedenen Ländern vorliegen. Beispielsweise verzichteten einige der befragten Unternehmungen auf die Einbindung erlaubter Nahrungsquellen wie Insekten, um nicht mit komplexer Bürokratie konfrontiert werden zu müssen (Interview 1). In Anbetracht dieser Herausforderungen müssen Unternehmen bei der Entwicklung neuer Produkte die rechtlichen Rahmenbedingungen der verschiedenen Länder berücksichtigen und für viele der Befragten schien diese Thematik ein wichtiges Anliegen zu sein. In der Tat erklärte eine der befragten Personen, dass das Unternehmen erst seit kurzer Zeit die Erlaubnis habe, die bislang nicht zugelassenen Mikroalgen als Nahrungsquelle für die Herstellung seiner Produkte zu verwenden (Interview 3):

«*We are super happy that [...] microalgae is being allowed in our category of products, because that's just since recently that we can use it. It was not allowed yet in the plant-based food. So, we're really happy because the microalgae is very good for the Omega Complex [...]. You can really use [this technology] to make products that can convince the consumer [...] to save our oceans a little bit*» (Interview 3).

Abgesehen davon verwendete die Mehrheit der befragten Unternehmungen alle Arten pflanzlicher Proteinquellen. Allerdings hängt die endgültige Wahl der Nahrungsquellen stark von den verschiedenen herzustellenden Produkten ab (Interview 3). Andere Unternehmungen versuchten nicht nur, Produkte herzustellen, sondern strebten zugleich nach neuem Wissen, um den Einsatz alternativer Proteinquellen auf Pilzbasis in der Lebensmittelindustrie zu expandieren (Interview 6). Für die Erzeugung alternativer Lebensmittelprodukte entwickelten diverse Unternehmungen zudem 3D-Druckmaschinen, welche in der Lage sind, Bestellungen direkt von Konsumenten entgegenzunehmen (Interview 4). Konsumenten können folglich ihre Burger über ein Smartphone konfigurieren, indem sie Fett- und Proteingehalt, Grösse und Garstufe selbst bestimmen:

«We believe that the future is over there, in the plant-based meat replacements [...] and this is the reason why we didn't even start with using animal sources. [...] The advantage of this machine is that [...] it allows personalization of the food that we consume, and different people consume different types of food. So, the personalization is very, very important. We call it the ‹Spotify of food›, anyone can personalize his own dish» (Interview 4).

Des Weiteren erhofften sich einige der Befragten, dass ihre Produkte in Zukunft mit teilweise pflanzlichem und teilweise kultiviertem Fleisch kombiniert werden können (Interview 3). Dadurch soll Verbrauchern eine grössere Anzahl nachhaltiger Lebensmittelalternativen angeboten werden, sodass sie umweltfreundlichere Entscheidungen treffen können. Obwohl die 3D-Lebensmitteldrucktechnologie die Chance bietet, besser strukturierte Produkte zu erschaffen, waren nicht alle der Befragten damit einverstanden, dass alle Unternehmungen aus der 3D-Drucktechnologie Nutzen ziehen werden, da die Technologie für die Erstellung einiger Produkte irrelevant ist und nicht der Vision der Unternehmungen entspricht (Interview 8).

Gemäss einigen der befragten Personen muss beim Einsatz der 3D-Drucktechnologie schliesslich ein strukturelles Problem mit dem Produkt vorliegen, das nicht auf andere Art gelöst werden kann, denn es gibt eine Vielzahl an alternative Lebensmittelprodukten auf dem Markt, die mit anderen Fertigungstechnologien hergestellt werden können. Infolgedessen sehen nicht alle Interviewten einen wesentlichen Beitrag im Einsatz dieser Technologie zur Steigerung der Biodiversität, da für die Produktion unterschiedliche Methoden eingesetzt werden können. Würden hingegen mehrere Konsumenten nach besser strukturierten Alternativprodukten streben, könnte der Einsatz der 3D-Lebensmitteldrucktechnologie einen wertvollen Beitrag zum Erhalt der Biodiversität leisten:

«Our mission is to find an alternative solution to the crisis that is about to come with the growing population and the increased demand for meat. So, we're trying to find solutions. Bioprinting is one solution, but I'm sure there are more possible solutions. [...] I hope people will recognize the potential in this technology» (Interview 9).

4.3.3 Plausibilisierung der These 3

Die inhaltliche Auswertung der Interviews ergibt, dass die Befragten hauptsächlich der Meinung waren, dass der 3D-Lebensmitteldruck dazu beitragen kann, verschiedene neuartige Lebensmittel zu erschaffen, die es bislang auf dem Markt nicht gab. Insbesondere können alternative Fleisch- und Fischprodukte konzipiert werden, die den traditionellen Lebensmitteln

in hohem Mass ähneln. Nicht nur kann mit dem 3D-Drucker das äusserliche Erscheinungsbild der Speisen imitiert, sondern auch dessen Konsistenz und Geschmack nachproduziert werden. Dadurch wird die Möglichkeit erschaffen, neue Produkte zu lancieren, die den Bedürfnissen verschiedener Kundensegmente entsprechen. Da das Angebot an nachhaltigen Lebensmittelalternativen durch die Anwendung der 3D-Lebensmitteldrucktechnologie gesteigert werden kann, kann eine erhöhte Absicherung des Erhalts der Biodiversität in Zukunft geschaffen werden. Auch wenn die meisten Unternehmungen sich derzeit auf die Entwicklung einzelner Produkte konzentrierten, kann These 3 aufgrund des grossen Beitrags dieser Technologie zur Realisierung innovativer Ersatzprodukte als plausibel beurteilt werden.

Die Plausibilisierung der These wird zudem in Tabelle 4 verdeutlicht. Sieben von neun der Befragten waren damit einverstanden, dass der Einsatz der 3D-Lebensmitteldrucktechnologie dazu beitragen kann, die Herstellung von Lebensmitteln mit alternativen Nahrungsquellen zu fördern. Dies wurde vor allem in Anbetracht der Tatsache erkannt, dass der 3D-Drucker die Möglichkeit bietet, die Konsistenz der Lebensmittelprodukte zu verbessern. Auf der anderen Seite gab es jedoch zwei Teilnehmende, die das Potenzial zwar erkannten, aber nicht der Meinung waren, dass alle Unternehmungen daraus einen Nutzen ziehen könnten. Einerseits müsse die Anwendung der 3D-Drucktechnologie ein strukturelles Problem beseitigen können und andererseits führen strenge Regelungen dazu, dass die Technologie nicht vollumfänglich für die Herstellung neuartiger Produkte eingesetzt werden kann.

Tabelle 4: Auswirkungen des 3D-Lebensmitteldrucks auf die Förderung alternativer Nahrungsquellen

Interview	Alternative Nahrungsquellen
1	2
2	10
3	9
4	9.5
5	10
6	10
7	10
8	2
9	8

Keine Auswirkungen
 Positive Auswirkungen
 Geringfügige Auswirkungen

Quelle: In Anlehnung an Keppner et al. (2018, S. 27)

4.4 THESE 4: ENERGIEVERBRAUCH

4.4.1 Ausgangslage und These

Diverse Studienergebnisse haben gezeigt, dass die Anfertigung von künstlichem Fleisch den Energieverbrauch erheblich verringern kann, insbesondere im Vergleich zur herkömmlichen Produktion von tierischem Fleisch. Darüber hinaus hängt der Energieverbrauch mit den eingesetzten Materialien zusammen. Werden Lebensmittelquellen verwendet, die hohe Temperaturen erfordern, ist ein erhöhter Energieverbrauch zu erwarten. Dennoch wird in der Literatur berichtet, dass die 3D-Lebensmitteldrucktechnologie an sich keinen hohen Energiebedarf hat. Demzufolge wurde nachstehende These formuliert:

These 4: Wenn für die Fertigung der 3D-Lebensmittelprodukte geringe Temperaturen zum Einsatz kommen, dann kann der Bedarf an Energie im Vergleich zu herkömmlichen Produktionsverfahren verringert werden.

4.4.2 Empirische Erkenntnisse

Im Vergleich mit anderen Fertigungsverfahren beurteilten einige der befragten Personen den 3D-Lebensmitteldruck als energieeffizientes Instrument (Interview 8). Dabei wurde die Energie berücksichtigt, welche traditionelle Fertigungsverfahren für die Erhitzung der Maschinen und die Herstellung der Produkte benötigen, und die bei der Anwendung der 3D-Lebensmitteldrucktechnologie nicht zum Einsatz kommt. Des Weiteren erkannten einige der Befragten den Vorteil dieser Technologie insbesondere in der Verwendung niedriger Temperaturen (Interview 1). Einerseits erlauben die niedrigen Temperaturen, den Energieverbrauch zu reduzieren. Andererseits wird eine bessere Qualität der im Produkt verarbeiteten Proteine und Aminosäure gewährleistet, welche mit klassischen Technologien bislang nicht erzielt werden konnte.

Ausserdem bevorzugten andere befragte Unternehmungen nicht nur Raumtemperaturen, sondern auch kältere Bedingungen für die Vorbereitung der Mischungen, um eine längere Haltbarkeit der 3D-gedruckten Produkte sicherzustellen (Interview 6). Des Weiteren sind gemäss einigen der Interviewten auch für das Züchten von Zellen keine hohen Temperaturen erforderlich (Interview 2). Zwar werden die Zellen, um ihr Wachstum zu fördern, in Brutschränken mit kontrollierter Temperatur und Luftfeuchtigkeit gelagert, während des eigentlichen Prozesses des 3D-Drucks werden jedoch keine hohen Temperaturen benötigt:

«This is one of our main goals, to be as eco-friendly as possible. This is one of the reasons why we do what we do. To reduce any kind of green gas omissions and all kinds of food waste, and of course, the slaughter of animals» (Interview 2).

Auch wenn die Technologie in der Lebensmittelherstellung noch nicht lange eingesetzt wird und daher noch viel Spielraum für Weiterentwicklungen und Optimierungen besteht, gaben die Befragten an, dass der Energieverbrauch der 3D-Drucktechnologie nicht höher ist als der anderer Technologien, welche in der Lebensmittelindustrie eingesetzt werden (Interview 6). Ausserdem meinten einige der befragten Personen, dass der Energieverbrauch reduzierter sei, da die Maschinen nicht sehr gross seien und an verschiedenen Orten eingesetzt werden könnten, an denen sie benötigt würden (Interview 5):

« [...] you can put [the machine] actually anywhere because you don't need any special infrastructure and you don't need a kitchen. So, you can cook hot dishes such as petty burger even in the office environment [...]. You just put this machine, put the power plug in place and all you need is an Internet connection such as Wi-Fi or anything else, and you can create your own orders» (Interview 4).

Ausserdem erklärte eine der befragten Personen, dass die von ihnen entwickelten 3D-Druckmaschinen mit intelligenten Systemen ausgestattet seien, welche es ermöglichten, die enthaltenen Öfen automatisch auszuschalten, sobald sie nicht mehr in Verwendung seien (Interview 4). Dadurch könne der Energieeinsatz effizienter gestaltet werden, denn die Maschine werde lediglich in Abhängigkeit von den eingehenden Bestellungen aktiviert und müsse demzufolge nicht dauernd aufgeheizt werden. Auf dieser Weise würde unnötiger Energieverbrauch vermieden. Darüber hinaus sei die Temperatur in der Maschine je nach Produkt unterschiedlich und hänge von der gewünschten benutzerdefinierten Zubereitung ab. Würden ausserdem in traditionellen Fertigungsverfahren hohe Temperaturen für die Erzeugung der Lebensmittelprodukte eingesetzt werden, überschreite die 3D-Drucktechnologie die mittleren Temperaturen nicht. Dennoch glaubten nicht alle Befragten, dass die Nutzung der 3D-Lebensmitteldrucktechnologie zu einer erheblichen Verringerung des Energieverbrauchs in der Lebensmittelindustrie führen könne (Interview 7):

« [...] a 3D food printer could control how quickly things could be made and potentially how quickly they could be cooked [...]. It could save you some energy, but I would say that realistically, it's not going to make a huge global impact» (Interview 7).

In der Tat ist der Energieverbrauch vom korrekten Einsatz der 3D-Lebensmitteldrucktechnologie abhängig (Interview 3). Wird die Technologie effizient genutzt, ist davon auszugehen, dass viel Energie eingespart werden kann. Wird die Maschine hingegen während des Druckvorgangs ständig aufgeheizt, wird mehr Energie benötigt. Dies ist vor allem der Fall, wenn viele kleine Heizelemente benötigt werden. Entwickeln Unternehmen hingegen Produkte, die kalt gedruckt werden können, ist der 3D-Drucker für die Herstellung der Lebensmittel bedeutend energieeffizienter. Die Befragten gaben ausserdem an, dass die konzipierten Lebensmittelmischungen geringe oder mittlere Temperaturen beim Druckprozess benötigten. Auch versuchten einige der Teilnehmenden, neue Formulierungen zu entwickeln, die während des Drucks keine erhöhten Temperaturen erfordern. Demzufolge kann der Energieverbrauch des 3D-Drucks als variabler Parameter betrachtet werden, der nicht von allen interviewten Personen als grösster Vorteil der Technologie angesehen wurde:

«The 3D food printing, depending on how you use it, can be more or less energy efficient. If you use a lot of heating within the process of the printing, then it takes a lot more energy, especially if a lot of small heaters are needed to be heated. But if you print it cold, then it's way more energy efficient. So, it's still quite variable, but it's not like the 3D printing biggest advantage [...]» (Interview 3).

4.4.3 Plausibilisierung der These 4

Resümierend ergab die Untersuchung der Befragungen, dass alle interviewten Personen damit einverstanden waren, dass die Anwendung der 3D-Lebensmitteldrucktechnologie zur Minimierung des Energieverbrauchs in der Lebensmittelbranche führen kann. Angesichts dessen wird die 3D-Drucktechnologie als energieeffizientes Instrument eingeschätzt. Tatsächlich erfordern 3D-Lebensmitteldrucker nicht dieselben Temperaturen wie traditionelle Fertigungsverfahren. Ausserdem wird die Technologie nicht nur aufgrund der geringen verwendeten Temperaturen geschätzt, sondern auch für die Erhaltung der Qualität der verwendeten Nahrungsquellen. Obwohl davon ausgegangen werden kann, dass die 3D-Drucktechnologie in der Lebensmittelindustrie weiterentwickelt wird, konnten die Befragten bereits einen geringen Energiebedarf dieser Technologie feststellen. In Anbetracht der erhaltenen Informationen zu den Temperaturen, die für die Herstellung der Lebensmittel verwendet werden, kann These 4 als plausibel erachtet werden.

Tabelle 5 zeigt eine klare Übereinstimmung der Ansichten der involvierten Befragten. Auch wenn der Energieverbrauch nicht von allen Interviewten als grösster Vorteil der Technologie erachtet wurde, waren alle damit einverstanden, dass die 3D-Lebensmitteldrucktechnologie

zur Reduzierung des Energiekonsums beitragen kann. Insbesondere sahen zwei der befragten Personen einen direkten Zusammenhang zwischen dem Energieverbrauch und einer korrekten Nutzung der 3D-Drucktechnologie. Abhängig von der angemessenen Anwendung der Technologie kann der Energieverbrauch dennoch variabel sein.

Tabelle 5: Auswirkungen des 3D-Lebensmitteldrucks auf die Minimierung des Energieverbrauchs

Interview	Energieverbrauch
1	10
2	9
3	5
4	7
5	8
6	8
7	3.5
8	7.5
9	8.5

Keine Auswirkungen
 Positive Auswirkungen
 Geringfügige Auswirkungen

Quelle: In Anlehnung an Keppner et al. (2018, S. 27)

5 SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK

Das Hauptanliegen dieser Arbeit ist die Beantwortung der vorliegenden Forschungsfrage:

Wie wirkt sich der Einsatz von 3D-Drucktechnologien auf die Nachhaltigkeit der Lebensmittelindustrie aus, insbesondere in Bezug auf Wasser- und Energieverbrauch, Lebensmittelverschwendung und die Verwendung alternativer Rohstoffe?

In diesem Kapitel werden daher die plausibilisierten Thesen aus dem vorherigen Abschnitt besprochen und interpretiert. Dabei wird Rückgriff auf die theoretischen Betrachtungen genommen, um das bestehende Wissen zu erweitern und angemessene Empfehlungen für den Anwendungsbereich abgeben zu können. Des Weiteren werden die Limitationen dieser Arbeit offen diskutiert und ein Ausblick auf mögliche weiterführende Forschungsprojekte gegeben.

5.1 BEWERTUNG DER UMWELTAUSWIRKUNGEN

Die 3D-Lebensmitteldrucktechnologie ist ein kreatives und innovatives Werkzeug, welches vorwiegend in der pflanzenbasierten Lebensmittelindustrie zur Anwendung kommt. Damit erforscht werden kann, inwieweit der Einsatz dieser Technologie die Nachhaltigkeit der Lebensmittelindustrie beeinflussen kann, müssen die beim 3D-Druckprozess verwendeten Ressourcen umfassend betrachtet werden.

Die 3D-Lebensmitteldrucktechnologie ist eine neue Methode zur Herstellung von Produkten in der Lebensmittelbranche. Daher gibt es nahezu keine umfassenden Bewertungen über der Nachhaltigkeit dieser Technologie. Dennoch können diverse Faktoren analysiert werden, um die Auswirkungen des 3D-Drucks auf die Lebensmittelindustrie und das Ökosystem beurteilen zu können. Durch effizienten und präzisen Einsatz der verwendeten Zutaten lassen sich beispielsweise die Verschwendung von Lebensmitteln reduzieren und zugleich der Erhalt der Biodiversität fördern. Darüber hinaus kann der 3D-Lebensmitteldruck dazu beitragen, Wasser- und Energieverbrauch während der Lebensmittelproduktion zu senken.

Schliesslich kann die 3D-Lebensmitteldrucktechnologie in der Nahrungsmittelindustrie zur Vermeidung von Lebensmittelabfällen eingesetzt werden, da die Zutaten genau abgemessen werden müssen, um das gewünschte Produkt in der richtigen Form zuzubereiten. Insbesondere kann diese Technologie für die Forschung und Entwicklung neuer Formeln eingesetzt werden, um Rezepturen in kleineren Mengen zu testen. Obwohl sich die Lebensmittelabfälle

von Verbrauchern in grösserer Menge wiederverwenden lassen, können auch in der Lebensmittelindustrie Nahrungsmittelabfälle aus Landwirtschaft und Fleischproduktion verarbeitet werden, um essbare Produkte herzustellen. Ferner gelangt die natürlich vorkommende Menge an Wasser von Früchten und Gemüse vollumfänglich in die gedruckte 3D-Speise, ohne dass wertvolle Nährstoffe verloren gehen. Da die Rezepturen das Pflanzenwasser umfassend verwenden, kann der 3D-Lebensmitteldruck als wassersparende Technologie angesehen werden. Ausserdem müssen 3D-Druckmaschinen nicht mit Wasser versorgt werden und auch während des Reinigungsprozesses ist wenig Wasser erforderlich, um Komponenten zu säubern und Gesundheitsrichtlinien einzuhalten. Vielmehr wird aber das Potenzial dieser Technologie in der Förderung alternativer Nahrungsquellen gesehen, da neuartige Lebensmittelprodukte auf dem Markt verkauft werden könnten, die zum Erhalt der Biodiversität beitragen. Schliesslich kann die 3D-Lebensmitteldrucktechnologie als energieeffizientes Werkzeug beurteilt werden, da für die Realisierung der Produkte niedrige bis mittlere Temperaturen benötigt werden. Aufgrund der Tatsache, dass der Energiebedarf stark variieren kann, wird die Minimierung des Energieverbrauchs mittels 3D-Drucktechnologie in der Lebensmittelindustrie nicht als grösster Vorteil dieser Technologie anerkannt.

Obwohl es zurzeit keine umfassenden Bewertungen der Auswirkungen des 3D-Lebensmitteldrucks auf die Nachhaltigkeit gibt, lässt sich anhand der beurteilten Faktoren sagen, dass im Vergleich zu herkömmlichen Lebensmittelproduktionsverfahren diverse potenzielle Vorteile in Bezug auf Nachhaltigkeit bestehen. Es wurde gezeigt, dass nicht alle vier Thesen von den Befragten gleich stark gestützt werden. Tabelle 6 stellt jedoch insgesamt eine positive Auswirkung der 3D-Lebensmitteldrucktechnologie auf vereinzelte ökologische Faktoren dar.

Tabelle 6: Auswirkungen des 3D-Lebensmitteldrucks auf ökologische Faktoren

Interview	Lebensmittelverschwendung	Wasserverbrauch	Alternative Nahrungsquellen	Energieverbrauch
1	10	10	2	10
2	8	8	10	9
3	8	8	9	5
4	8	5.5	9.5	7
5	9	5	10	8
6	8.5	8.5	10	8
7	2.5	2	10	3.5
8	5	5	2	7.5
9	9.5	9	8	8.5

Keine Auswirkungen
 Positive Auswirkungen
 Geringfügige Auswirkungen

Quelle: In Anlehnung an Keppner et al. (2018, S. 27)

Wie es aus der Darstellung zu entnehmen ist, ist die am deutlichsten unterstützte These der Erhalt der Biodiversität durch den Einsatz der 3D-Drucktechnologie in der Lebensmittelindustrie. Einerseits kann das auf personalisierbare Ernährung mit pflanzenbasierten Ersatzprodukten zurückgeführt werden, andererseits auf die Integration neuartiger Nahrungsquellen. Des Weiteren wird die These der Reduzierung von Lebensmittelabfällen gestützt. Der Mehrwert besteht vor allem darin, dass für die Erzeugung der 3D-Lebensmittelkonstrukte präzise Mengen an Zutaten verwendet werden müssen, damit die gewünschte Form und Konsistenz bewahrt werden kann. Zudem wird die These gestützt, die von einer Reduzierung des Energiebedarfs durch den Einsatz der 3D-Drucktechnologie ausgeht. Obwohl der Energiebedarf im Vergleich zu konventionellen Fertigungsverfahren geringer scheint, hängen viele Faktoren damit zusammen. Zum Beispiel sind die verwendeten Zutaten oder der korrekte Einsatz der Maschine wesentliche Aspekte. Schliesslich kann die Reduzierung des Wasserverbrauchs in der Lebensmittelindustrie mittels 3D-Drucktechnologie als am schwächsten gestützte These erachtet werden. Zwar werden zur Herstellung von Lebensmittelprodukten mit der 3D-Drucktechnologie nur geringfügige Menge an Wasser verwendet, jedoch liegt das grösste Potenzial der Wasserersparnis in der Realisierung alternativer Fleischprodukte, ungeachtet der eingesetzten Technologie.

Zusammenfassend lässt sich dennoch sagen, dass sich die 3D-Lebensmitteldrucktechnologie positiv auf die Nachhaltigkeit in der Lebensmittelindustrie auswirken kann, insbesondere in Bezug auf die Verwendung alternativer Rohstoffe und die Reduzierung von Lebensmittelverschwendung. Darüber hinaus kann sie Energie- und Wasserersparnisse ermöglichen. Insgesamt kann der Einsatz der 3D-Drucktechnologie in der Lebensmittelbranche also dazu beitragen, den ökologischen Fussabdruck zu senken.

5.2 EMPFEHLUNGEN UND EINBINDUNG DER TECHNOLOGIE

Der Einsatz des 3D-Drucks in der Lebensmittelbranche kann als nachhaltige Technologie beurteilt werden. Im Hinblick auf die gewonnenen Erkenntnisse werden in diesem Kapitel drei Unternehmungstypen identifiziert, die durch den Einsatz der 3D-Drucktechnologie einen Mehrwert erzielen könnten.

5.2.1 Unternehmungen, die personalisierten Lebensmittelprodukten anbieten

Personalisierte Produkte erfordern in der Regel eine individuelle Produktion. Die 3D-Drucktechnologie kann jedoch kundenspezifische Präferenzen bei der Herstellung von Lebensmitteln berücksichtigen und zugleich eine beständige Geschmacks- und Texturkonsistenz erreichen, ohne dass für jede Geschmacksänderung eine massgeschneiderte Produktion nötig ist. Der 3D-Druck bietet die Möglichkeit, spezifische Eigenschaften in einem digitalen Tool zu programmieren, sodass jede Speise an persönliche Vorlieben angepasst werden kann. Nicht nur können durch die Anwendung der 3D-Drucktechnologie Nahrungsmittel auf den Einzelnen zugeschnitten, sondern auch Wettbewerbsvorteile erzielt werden. Aufgrund der Tatsache, dass der 3D-Druck eine skalierbare Produktion ermöglicht, können Ressourcen effizient genutzt werden.

5.2.2 Unternehmungen, die Ersatzprodukte anbieten

In der Lebensmittelindustrie gibt es zunehmend Unternehmungen, die alternative Fisch- und Fleischprodukte anbieten. Die pflanzenbasierte Lebensmittelindustrie bezieht sich auf Unternehmungen, die pflanzenbasierte Zutaten für die Herstellung von Lebensmittelprodukten verwenden. Diese Unternehmungen richten sich vor allem an Konsumierende, die sich für eine pflanzenbasierte Ernährung entschieden haben. Die 3D-Drucktechnologie bietet in diesem Zusammenhang die Möglichkeit, eine grössere Anzahl an Kundensegmenten anzusprechen, da Produkte angeboten werden können, die den herkömmlichen Fisch- und Fleischprodukten in Geschmack und Konsistenz sehr ähnlich sind. Werden mehrere Zielgruppen angesprochen, kann insbesondere der ökologische Fussabdruck von Fleisch stark reduziert werden.

5.2.3 Unternehmungen mit Nachhaltigkeitswunsch

Für Unternehmungen, die das Ziel verfolgen, nachhaltigere Fertigungsverfahren in ihre Lebensmittelproduktion zu integrieren, kann die Einbindung der 3D-Drucktechnologie in Erwägung gezogen werden. Unternehmungen, die 3D-Druck in der Produktion von Lebensmitteln nutzen, haben bereits diverse damit einhergehende Herausforderungen überwunden. Um marktfähig zu bleiben, müssen viele Unternehmungen ihre Produkte ständig weiterentwickeln. Dabei kann die 3D-Drucktechnologie während der Formulierung neuer Testrezepturen nachhaltiger und kosteneffizienter als herkömmliche Produktionsverfahren sein. Somit kann die 3D-Drucktechnologie von Lebensmittelunternehmungen als etabliertes Instrument für die Forschung und Entwicklung neuartiger Produkte verwendet werden. Dabei können Ressourcen effizient genutzt und Lebensmittelabfälle minimiert werden.

5.3 KRITISCHE WÜRDIGUNG DER ARBEIT

In der vorliegenden Arbeit werden einzelne ökologische Nachhaltigkeitsaspekte in Bezug auf die 3D-Drucktechnologie in der Lebensmittelindustrie analysiert. Diese Betrachtungen erfolgen anhand einer qualitativen Untersuchung mittels Interviews und beziehen sich auf die Interpretation nicht numerischer Daten. Dadurch wird insbesondere darauf abgezielt, Erfahrungen und Einblicke bezüglich der 3D-Drucktechnologie aus Sicht von Expertinnen und Experten zu gewinnen. Damit aber ein umfassenderes Verständnis der Auswirkungen dieser Technologie auf die Umwelt gewonnen werden kann, müssen historische Daten vorliegen, um sie anderen Fertigungsverfahren in der Lebensmittelindustrie gegenüberstellen zu können.

Die Resultate der empirischen Untersuchung ergeben sich aus der Befragung von Teilnehmenden aus unterschiedlichen Lebensmittelbranchen und können nicht verallgemeinert werden. Dadurch liessen sich eine ausreichende Anzahl an Interviewpartnerinnen und -partnern erreichen und diverse Perspektiven und Einsichten erheben. Dennoch hätte eine fokussierte Analyse einer spezifischen Lebensmittelbranche ausführlichere Erkenntnisse liefern können. Darüber hinaus hätten auch detailliertere und zielspezifischere Empfehlungen ausgesprochen werden können.

Die ausgewählte Methodik erlaubte es, die Zielvorgaben dieser Arbeit einzuhalten und die Forschungsfrage anhand der ausgesprochenen Thesen zu beantworten. Nichtsdestotrotz mussten die Interviews teilweise individuell angepasst werden, da eine unterschiedliche Nutzungsweise der 3D-Drucktechnologie je nach Unternehmen vorlag. Dies hatte zur Folge, dass die gestellten Fragen nicht von allen Teilnehmenden gleich interpretiert oder gewichtet werden konnten, da die Sichtweisen bezüglich der Nutzung der untersuchten Technologie unternehmensabhängig und somit unterschiedlich waren.

Des Weiteren kann diese Arbeit als einfallsreiche Herangehensweise zur Beurteilung einer neuartigen Technologie aus einzelnen ökologischen Perspektiven betrachtet werden. Nicht nur wurden durch die Interviews qualitative Informationen gewonnen, sondern es konnten auch Daten auf systematische Weise gesammelt werden, um die persönlichen Meinungen der Interviewpartnerinnen und -partner in Kategorien zusammenzufassen. Dadurch liessen sich die Ergebnisse entsprechend auswerten und ein umfassendes Bild gewinnen.

5.4 AUSBLICK UND WEITERE FRAGESTELLUNGEN

Im Rahmen dieser Thesis wurden einzelne ökologische Aspekte der 3D-Lebensmitteldrucktechnologie in Unternehmungen aus unterschiedlichen Lebensmittelbranchen untersucht. Um ein umfangreicheres Gesamtbild dieser Technologie zu gewinnen, empfiehlt es sich, weitere Nachhaltigkeitsaspekte zu integrieren und zu berücksichtigen. Beispielsweise könnten soziale oder ökologische Aspekte die Anwendung und Empfehlung dieser Technologie fördern oder beeinträchtigen. Des Weiteren wurde in dieser Arbeit der Fokus auf die 3D-Drucktechnologie gesetzt, ohne dass nachgelagerte Prozesse wie Vorbereitung und Verpackung berücksichtigt wurden. Interessant wäre es zu erforschen, wie sich diese Prozesse durch Anwendung der 3D-Drucktechnologie in der Lebensmittelbranche beeinflussen lassen.

Es bietet sich ausserdem an, weitere Forschungen auf eine spezifische Lebensmittelbranche auszurichten, um Unternehmungen aus derselben Branchen vergleichen und eine einheitliche Perspektive gewinnen zu können. Darüber hinaus könnte eine quantitative Analyse zugänglicher numerischer Daten die Möglichkeit einer konkreten Gegenüberstellung von 3D-Drucktechnologie und herkömmlichen Fertigungsverfahren bieten. Dadurch könnten Hinweise darauf gewonnen werden, in welchen Lebensmittelbranchen 3D-Drucktechnologie besonders nachhaltig ist.

6 ANHANG

6.1 QUELLENVERZEICHNIS

- Almeida, H., Pei, E., & Vitorino, L. (2022). Sustainability for 3D Printing. In K. Sandhu, S. Singh, C. Prakash, K. Subburaj, & S. Ramakrishna (Hrsg.), *Sustainability for 3D Printing* (S. 1–14). Springer International Publishing.
- Anandharamakrishnan, C., Moses, J. A., & Anukiruthika, T. (2022). *3D Printing of Foods* (1. Aufl.). John Wiley & Sons.
- Attarin, S., & Attaran, M. (2020). Food Printing: Evolving Technologies, Challenges, Opportunities, and Best adoption Strategies. *Journal of International Technology and Information Management*, 29(1), 25–55.
- Baiano, A. (2022). 3D Printed Foods: A Comprehensive Review on Technologies, Nutritional Value, Safety, Consumer Attitude, Regulatory Framework, and Economic and Sustainability Issues. *Food Reviews International*, 38(5), 986–1016.
- BIS Research. (2022). *Global 3D Food Printing Market by Vertical (Government, Commercial, and Residential), Technique (Extrusion Based Printing, Selective Laser Sintering, Binder Jetting and Inkjet Printing), Ingredient and Geography-Forecast to 2027*. <https://www.researchandmarkets.com/reports/5585399/global-3d-food-printing-market-by-vertical>
- Burke-Shyne, S., Gallegos, D., & Williams, T. (2020). 3D food printing: Nutrition opportunities and challenges. *British Food Journal*, 123(2), 649–663.
- Chameettachal, S., Yeleswarapu, S., Sasikumar, S., Shukla, P., Hibare, P., Bera, A. K., Bojedla, S. S. R., & Pati, F. (2019). 3D Bioprinting: Recent Trends and Challenges. *Journal of the Indian Institute of Science*, 99(3), 375–403.
- Dankar, I., Haddarah, A., Omar, F. E. L., Sepulcre, F., & Pujolà, M. (2018). 3D printing technology: The new era for food customization and elaboration. *Trends in Food Science & Technology*, 75, 231–242.
- Derossi, A., Caporizzi, R., Ricci, I., & Severini, C. (2019). Critical Variables in 3D Food Printing. In F. C. Godoi, B. Bhandari, S. Prakash, & M. Zhang (Hrsg.), *Fundamentals of 3D food printing and applications* (S. 41–88). Academic Press.
- Fasogbon, B. M., & Adebo, O. A. (2022). A bibliometric analysis of 3D food printing research: A global and African perspective. *Future Foods*, 6, 1–13.
- Gordon, W., Gantori, S., Gordon, J., Leemann, R., & Boer, R. (2019). *The food revolution – The future of food and the challenges we face* (S. 1–72). UBS.

- Gunjal, M., Rasane, P., Singh, J., Kaur, S., & Kaur, J. (2022). Three-Dimensional (3D) Food Printing: Methods, Processing and Nutritional Aspects. In K. Sandhu & S. Singh (Hrsg.), *Food Printing: 3D Printing in Food Industry* (S. 65–80). Springer Singapore.
- Guo, C., Zhang, M., & Bhandari, B. (2019). Model Building and Slicing in Food 3D Printing Processes: A Review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 18(4), 1052–1069.
- Guo, C.-F., Zhang, M., & Bhandari, B. (2019). A comparative study between syringe-based and screw-based 3D food printers by computational simulation. *Computers and Electronics in Agriculture*, 162, 397–404.
- Hussain, S., Malakar, S., & Arora, V. K. (2022). Extrusion-Based 3D Food Printing: Technological Approaches, Material Characteristics, Printing Stability, and Post-processing. *Food Engineering Reviews*, 14(1), 100–119.
- Jiang, J., Xu, X., & Stringer, J. (2019). Optimization of process planning for reducing material waste in extrusion based additive manufacturing. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 59, 317–325.
- Jonkers, N., van Dommelen, J. A. W., & Geers, M. G. D. (2022). Selective Laser Sintered food: A unit cell approach to design mechanical properties. *Journal of Food Engineering*, 335, 1–9.
- Kaur, J., Bhadariya, V., Singh, J., Gupta, P., Rasane, P., & Sharma, K. (2022). Materials for Food Printing. In K. Sandhu & S. Singh (Hrsg.), *Food Printing: 3D Printing in Food Industry* (S. 1–18). Springer Singapore.
- Kellens, K., Baumers, M., Gutowski, T. G., Flanagan, W., Lifset, R., & Duflou, J. R. (2017). Environmental Dimensions of Additive Manufacturing: Mapping Application Domains and Their Environmental Implications: Environmental Dimensions of Additive Manufacturing. *Journal of Industrial Ecology*, 21(1), 1–20.
- Keppner, B., Kahlenborn, W., Richter, S., Jetzke, T., Lessmann, A., & Bovenschulte, M. (2018). *Die Zukunft im Blick: 3D-Druck Trendbericht zur Abschätzung der Umweltwirkungen*. 1–64.
- Kewuyemi, Y. O., Kesa, H., & Adebo, O. A. (2022). Trends in functional food development with three-dimensional (3D) food printing technology: Prospects for value-added traditionally processed food products. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 62(28), 7866–7904.
- Khan, M. A., & Jappes, J. T. W. (2022). *Innovations in Additive Manufacturing* (1. Aufl.). Springer Cham.
- Khosravani, M. R., & Reinicke, T. (2020). On the environmental impacts of 3D printing technology. *Applied Materials Today*, 20, 1–11.
<https://doi.org/10.1016/j.apmt.2020.100689>

- Kristinsson Petty, H. (2019). *Sustainable Seafood 3D-Printed, Really?* TEDx.
https://www.ted.com/talks/holly_kristinsson_sustainable_seafood_3d_printed_really
- Kumar, P., Ebbens, S., & Zhao, X. (2021). Inkjet printing of mammalian cells – Theory and applications. *Bioprinting*, 23, 1–18.
- Le-Bail, A., Maniglia, B. C., & Le-Bail, P. (2020). Recent advances and future perspective in additive manufacturing of foods based on 3D printing. *Current Opinion in Food Science*, 35, 54–64.
- Lee, J. (2021). A 3D Food Printing Process for the New Normal Era: A Review. *Processes*, 9(9), 1–21.
- Ling, K. C. L., Yee, A. Z. H., Leo, C. H., & Chua, C. K. (2022). Understanding 3D food printing technology: An affordance approach. *Materials Today: Proceedings*, 70, 622–626.
- Liu, Z., Zhang, M., Bhandari, B., & Wang, Y. (2017). 3D printing: Printing precision and application in food sector. *Trends in Food Science & Technology*, 69, 83–94.
- Marinova, D., & Bogueva, D. (2022). *Food in a Planetary Emergency* (1. Aufl.). Springer Singapore.
- Meier, C., Polfer, L., & Ulrich, G.-S. (2020). *Wissenschaftsmethodik. Das 1x1 für Business-Studierende* (1. Aufl.). Verlag SKV.
- Morar, D. (2022). *Additive Manufacturing (AM): Entwicklung eines Informationsversorgungskonzepts zur Unterstützung des AM-Produktentstehungsprozesses* (1. Aufl.). Springer Gabler Wiesbaden.
- Morya, S., Kumari, J., Kumar, D., Syed, A., & Godswill Awuchi, C. (2022). Three-Dimensional (3D) Printing Technology: 3D Printers, Technologies, and Application Insights in the Food Diligence. In K. Sandhu & S. Singh (Hrsg.), *Food Printing: 3D Printing in Food Industry* (S. 81–100). Springer Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-16-8121-9>
- Nachal, N., Moses, J. A., Karthik, P., & Anandharamakrishnan, C. (2019). Applications of 3D Printing in Food Processing. *Food Engineering Reviews*, 11, 123–141.
- Nassar, M., & Fouad, A. (2022). Tomorrow Taste Comes Today: Exploring Customers' Intention to Buy 3D Printed Food in Egyptian Restaurants. *Pharos International Journal of Tourism and Hospitality*, 1(1), 31–48.
- Otcu, G. B., Ramundo, L., & Terzi, S. (2019). State of the Art of Sustainability in 3D Food Printing. *2019 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC)*, 1–8.
- Pitayachaval, P., Sanklong, N., & Thongrak, A. (2018). A Review of 3D Food Printing Technology. *MATEC Web of Conferences*, 213, 1–5.

- Portanguen, S., Tournayre, P., Sicard, J., Astruc, T., & Mirade, P.-S. (2019). Toward the design of functional foods and biobased products by 3D printing: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 86, 188–198.
- Ramachandraiah, K. (2021). Potential Development of Sustainable 3D-Printed Meat Analogues: A Review. *Sustainability*, 13(2), 1–20.
- Ritchie, H. (2021). *How much of global greenhouse gas emissions come from food? Our Word in Data*. <https://ourworldindata.org/greenhouse-gas-emissions-food>
- Rogers, H., & Srivastava, M. (2021). Emerging Sustainable Supply Chain Models for 3D Food Printing. *Sustainability*, 13(21), 1–18.
- Singh, D., Ramniwas, S., & Kumar, R. (2022). Development of Cost-Effective and Sustainable Alternative Protein from Drosophila and Consumer Acceptability of Drosophila Protein Using 3D Printing. In K. Sandhu & S. Singh (Hrsg.), *Food Printing: 3D Printing in Food Industry* (S. 141–154). Springer Singapore.
- Singh, H., & Bhattacharjee, S. (2022). Fundamentals of Food Printing. In K. Sandhu & S. Singh (Hrsg.), *Food Printing: 3D Printing in Food Industry* (S. 19–34). Springer Singapore.
- Soni, R., Ponappa, K., & Tandon, P. (2022). A review on customized food fabrication process using Food Layered Manufacturing. *LWT*, 161, 1–8.
- Statista. (2022). *Distribution of sales revenue of the additive manufacturing market worldwide in 2019, by industry*. <https://www.statista.com/statistics/1268618/share-sales-revenue-of-additive-manufacturing-by-industry/>
- United Nations Department of Economic and Social Affairs, P. D. (2022). *World Population Prospects 2022: Summary of Results*. 1–52.
- Varvara, R.-A., Szabo, K., & Vodnar, D. C. (2021). 3D Food Printing: Principles of Obtaining Digitally-Designed Nourishment. *Nutrients*, 13(10), 1–21.
- Zhang, M., & Liu, Z. (2019). 3D Food Printing Technologies and Factors Affecting Printing Precision. In F. C. Godoi, B. Bhandari, S. Prakash, & M. Zhang (Hrsg.), *Fundamentals of 3D food printing and applications* (S. 19–40). Academic Press.

6.2 ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Zielsetzung und Fokus der Arbeit	9
Abbildung 2: Anzahl der Publikationen mit Vergleich zum Vorjahr.....	14
Abbildung 3: Arbeitsablauf des 3D-Druckverfahrens durch Scannen eines Objekts	16
Abbildung 4: 3D-Druck-Mechanismus für extrusionsbasierte Verfahren	20
Abbildung 5: Hot-Melt extrusionsbasierter Prozess mit Schokolade	21
Abbildung 6: Selektives Lasersintering-System.....	23
Abbildung 7: Inkjet-Printing-System	25
Abbildung 8: Binder-Jetting-System	26

6.3 TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Übersicht der Interviewpartnerinnen und -partner	32
Tabelle 2: Auswirkungen des 3D-Lebensmitteldrucks auf die Minimierung von Lebensmittelverschwendung.....	42
Tabelle 3: Auswirkungen des 3D-Lebensmitteldrucks auf die Minimierung des Wasserverbrauchs	46
Tabelle 4: Auswirkungen des 3D-Lebensmitteldrucks auf die Förderung alternativer Nahrungsquellen.....	50
Tabelle 5: Auswirkungen des 3D-Lebensmitteldrucks auf die Minimierung des Energieverbrauchs	54
Tabelle 6: Auswirkungen des 3D-Lebensmitteldrucks auf ökologische Faktoren.....	56

6.4 ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

AM	.....	<i>Additive Manufacturing</i>
BJ	.....	<i>Binder-Jetting</i>
CAD	.....	<i>Computer Aided Design</i>
DED	.....	<i>Direct-Energy-Deposition</i>
FDM	.....	<i>Fused-Deposition-Modeling</i>
FLM	.....	<i>Food Layered Manufacturing</i>
HME	.....	<i>Hot-Melt-Extrusion</i>
IJP	.....	<i>Inkjet-Printing</i>
ME	.....	<i>Material-Extrusion</i>
MJ	.....	<i>Material-Jetting</i>
PBF	.....	<i>Powder-Bed-Fusion</i>
RP	.....	<i>Rapid Prototyping</i>
RTE	.....	<i>Room-Temperature-Extrusion</i>
SHASAM	.....	<i>Selective Hot Air Sintering and Melting</i>
SL	.....	<i>Sheet-Lamination</i>
SLA	.....	<i>Stereolithography</i>
SLS	.....	<i>Selective-Laser-Sintering</i>
STL	.....	<i>Standard Triangle Language</i>
VP	.....	<i>Vat-Polymerization</i>

6.5 INTERVIEWLEITFADEN

Structure	Content	Time
Introduction	<ul style="list-style-type: none"> Greeting and brief introduction Explain the purpose and objectives of the interview Obtain permission to record the interview <p>Switch on audio device: official start of the interview</p>	2'
Opening questions	<ul style="list-style-type: none"> What does your company produce? For what purpose does your company use 3D food printing technology? How often does your company use it? 	3'
Topic block I: food resources	<ul style="list-style-type: none"> On a scale of 1-10, how much do you think companies would be able to reduce material consumption by using 3D food printing technology? <i>(Why do you think so?)</i> On a scale of 1-10, how much do you think companies would be able to reduce food waste by using 3D food printing technology? <i>(Why do you think so?)</i> 	5'
Topic block II: water consumption	<ul style="list-style-type: none"> On a scale of 1-10, how much do you think companies could be able to reduce the water consumption by using 3D food printing technology? <i>(Why do you think so?)</i> <i>How does your company measure and control the water consumption of the 3D food printer?</i> 	5'
Topic block III: biodiversity	<ul style="list-style-type: none"> On a scale of 1-10, how much do you think companies could benefit of the use of alternative foods by using 3D food printing technology? <i>(Why do you think so?)</i> <i>Which raw materials does your company use to produce 3D-printed foods?</i> 	5'
Topic block IV: power consumption	<ul style="list-style-type: none"> On a scale of 1-10, how much do you think companies would be able to reduce energy resources by using 3D printing technology? <i>(Why do you think so?)</i> <i>What temperature does your company use to produce the products with the 3D food printer?</i> 	5'
Closing questions	<ul style="list-style-type: none"> How do you evaluate the contribution of 3D food printing technology in promoting sustainability in the food industry? Is there anything else you would like to say in conclusion? 	3'
Conclusion	<ul style="list-style-type: none"> Express thanks Additional information of the next steps Clarify the confidentiality of the interview Closing the interview 	2'

Gray: additional questions if the reason is not mentioned

Blue: follow-up questions for companies who use the technology quite often

6.6 CODE-BUCH

Hauptcode	Untercode	Definition	Codierregeln	Ankerbeispiele
Lebensmittelressourcen	Reduzierung der Lebensmittelverschwendungen	Durch den Einsatz der 3D-Drucktechnologie werden weniger Lebensmittel weggeworfen	Diese Codierregel verwenden, wenn positive Aussagen gemacht werden.	«We don't have any food waste when we use the printer because it uses all the bioink. [...] the printer definitely helps with the food waste in the industry point of view» (Interview 2).
				«As far as I see there shouldn't be such waste because we insert only the materials that are needed for the product itself» (Interview 9).
	Keine Reduzierung der Lebensmittelverschwendungen	Der Einsatz der 3D-Drucktechnologie ergibt keine wesentliche Reduzierung der Lebensmittelverschwendungen	Diese Codierregel verwenden, wenn keine positive Aussagen gemacht werden.	«Any technology at this point will help to reduce the amount of food waste that we have right now. [...] We use our product like 100 %. We mix it with other ingredients but here [in the printing process] I wouldn't say that we would help the food waste» (Interview 6).
Wasserverbrauch	Reduzierung des Wasserverbrauchs	Durch den Einsatz der 3D-Drucktechnologie wird weniger Wasser für die Produktion von Lebensmitteln verwendet	Diese Codierregel verwenden, wenn positive Aussagen gemacht werden.	«The 3D printer doesn't use a lot of water because it uses air. We use air compression to print and the only water we use is to clean the system. So, it's almost none» (Interview 2).
				«We use some water when we do our 3D printing paste, and we use little amounts because our product is already wet. It's not a powder like most of them. So, we use less water than other companies would. I would say that all the water we put in the recipe goes in the final product. So, there is no waste there» (Interview 6).

	Keine Reduzierung des Wasserverbrauchs	Der Einsatz der 3D-Drucktechnologie ergibt keine wesentliche Reduzierung des Wasserverbrauchs in der Produktion	Diese Codierregel verwenden, wenn keine positive Aussagen gemacht werden.	«I don't think there is much difference between the 3D printed and the not 3D printed meat. I don't think the 3D printing itself saves water» (Interview 5).
	Reinigungssysteme	Die 3D-Druckmaschinen müssen bereinigt werden, um die Gesundheitsrichtlinien einhalten zu können	Diese Codierregel verwenden, wenn Aussagen über die Säuberung der 3D-Drucker gemacht werden.	«It's very controlled [...] and I think they can reduce it already at the minimum. Most of the water consumption that we have is in the biology team when we grow the cells, because the cells need to have lots of water» (Interview 2).
				«It has to be food safe. So, you clean [the 3D printer] every day and the cleaning system is one of the things that we are developing now, because that's also new to do that in an industrial scale» (Interview 3).
Biodiversität	Pflanzenbasierte Lebensmittel	Fleisch- oder Fischersatzprodukte die mit alternativen Nahrungsquellen produziert werden	Diese Codierregel verwenden, wenn Aussagen über pflanzenbasierte Zutaten gemacht werden.	«We are using only plant-based meat replacement. We don't use real beef. We believe that the future is over there, in the plant-based meat replacements [...] and this is the reason why we didn't even start with using animal source» (Interview 4).
				«We are super happy that now for example micro algae is being allowed in our category of products, because that's just since recently that we can use it. [...] We have some products on the market right now that contain a lot of pea protein. But we're also open to use other proteins» (Interview 3).

	Fleisch aus dem Labor	Fleischersatzprodukte die mit kultivierte Zellen aus dem Labor hergestellt werden	Diese Codierregel verwenden, wenn Aussagen über künstliches Fleisch gemacht werden.	«Some of the percentage in the bioinks are from the cultivated cells that we grow [...] but the rest of the hydrogel, meaning the bioink, is water and all kinds of plant-based materials» (Interview 2).
Energieverbrauch	Einsatz der Temperaturen	Die eingesetzten Temperaturen während dem 3D-Druckprozess der Lebensmittel bestimmen den Energieverbrauch	Diese Codierregel verwenden, wenn Aussagen über die Temperaturen gemacht werden.	«We use room temperature, at least for our paste. We don't need to have any warm conditions or anything like that [...]. So ideally it should be like colder conditions [...]. So, when we do our trials, we do it at room temperature, but I think it would also be easy to be done in colder conditions» (Interview 6).
				«The 3D food printing, depending on how you use it, can be more or less energy efficient. If you use a lot of heating within the process of the printing, then it takes a lot more energy, especially if a lot of small heaters are needed to be heated. But if you print it cold, then it's way more energy efficient. So, it's still quite variable, but it's not like the 3D printing biggest advantage [...]» (Interview 3).
	Temperatursysteme	Die 3D-Druckmaschinen verfügen über Systeme, welche die Temperaturen messen und überwachen	Diese Codierregel verwenden, wenn Aussagen über Systeme gemacht werden, die den Energieverbrauch kontrollieren.	«We have a smart algorithm in the machine. When some ovens are not necessary, they're just turned off and according to the orders, we turn on the heaters. So, we can save a lot of energy in comparison to a large plancha, where you turn off the whole plancha when you even want to make one burger» (Interview 4).