

Von Biomasse zu Plastik ...



Matur-Arbeit von Palma Joos

Abgabe: 3. Januar 2022

Mentoriert von Stephanie Bircher

Liceo Artistico Zürich

... und wieder zurück.

Vielen Dank an alle, die mich unterstützt und zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

INHALTSVERZEICHNIS

1	ABSTRACT	4
2	VORWORT	5
3	EINFÜHRUNG	5
3.1	PROBLEMSTELLUNG	6
3.2	BESTEHENDE LÖSUNGSANSÄTZE	7
3.3	DEFINITION BIOPLASTIK	8
3.4	ZIEL, FRAGESTELLUNGEN UND METHODEN	9
3.4.1	ZIEL	9
3.4.2	FRAGESTELLUNGEN	9
3.4.3	VORGEHEN UND METHODEN	9
4	THEORIEBEARBEITUNG	10
4.1	KONVENTIONELLE KUNSTSTOFFE	10
4.1.1	STRUKTUR	10
4.1.2	VERHALTEN GEGENÜBER WASSER	12
4.2	BIOKUNSTSTOFFE	13
4.2.1	MOLEKULARE UND SUPRAMOLEKULARE STRUKTUR	14
4.2.2	VERHALTEN GEGENÜBER WASSER	14
4.3	BIODEGRADATION	14
4.3.1	HYDROPHILIE	14
4.3.2	SOLLBRUCHSTELLEN	15
4.3.3	UMWELTBEDINGUNGEN	16
4.3.4	ZIELKONFLIKT	16
4.3.5	DEKLARATION UND REGLEMENT	16
4.4	KRITERIEN FÜR DIE AUSWAHL DES AUSGANGSTOFFES	18
4.4.1	TECHNISCHE BEDINGUNGEN	18
4.4.2	ÖKOLOGISCHE BEDINGUNGEN	18
4.4.3	AUSWERTUNG	18

5	<u>ANWENDUNG IN DER PRAXIS</u>	19
5.1	VORVERSUCHE	19
5.1.1	MOLKE	19
5.1.2	HIRSEPELZEN	21
5.1.3	MAISSTÄRKE	23
5.1.4	FAZIT DER VORVERSUCHE	27
5.2	HERSTELLUNG DER FOLIEN	28
5.2.1	MATERIALIEN UND METHODEN	28
5.2.2	RESULTATE	30
5.2.3	DISKUSSION	31
5.3	QUELLVERSUCH	32
5.3.1	HYPOTHESE	32
5.3.2	MATERIALIEN UND METHODEN	32
5.3.3	RESULTATE	33
5.3.4	DISKUSSION	35
6	<u>FAZIT</u>	38
7	<u>AUSBLICK</u>	39
8	<u>VERZEICHNISSE</u>	41
8.1	LITERATURVERZEICHNIS	41
8.2	MATERIALVERZEICHNIS	44
8.3	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	45
8.4	TABELLENVERZEICHNIS	46
9	<u>ANHANG</u>	46
9.1	TRANSKRIPTION URS BAIER	46
9.2	TRANSKRIPTION LINDA GRIEDER	52
9.3	TRANSKRIPTION JUDITH WEMMER	57

1 ABSTRACT

In der vorliegenden Arbeit sollte durch biobasierte und bioabbaubare Lebensmittelverpackungen einen Materialkreislauf zu geschlossen werden. Verpackungsmaterial aus erneuerbaren Ressourcen soll durch den Abbau wieder als Rohstoff zu Verfügung stehen. Dafür wurde die Chemie der konventionellen Kunststoffe kurz zusammengefasst. Es folgte eine vertiefte Betrachtung der Biokunststoffe. Anschließend wurde ein nachwachsender Rohstoff gesucht, der sich als Ausgangsmaterial für eine Bioplastikfolie eignet. Er sollte ökologische sowie technische Bedingungen bestmöglich erfüllen. Dafür wurden Biopolymere aus einem ungenutzten Nebenprodukt der Lebensmittelindustrie auf ihre Verwendbarkeit untersucht. Die Kombination aus den Schalen des Hirsekorns und aus der Maisstärke stellte einen Kompromiss zwischen den ökologischen und technischen Anforderungen dar. Beim Verarbeiten von Getreide fallen grosse Mengen Getreidespelzen an, die aber in der Lebensmittelherstellung keine Verwendung finden. Die Verwertung von diesem industriellen Abfall in einem Verpackungsmaterial erscheint daher ökologisch sinnvoll. Ihre chemischen Eigenschaften erschweren allerdings eine direkte Verarbeitung zu dünnen, flexiblen und stabilen Folien. Maisstärke hingegen hat im Vergleich eine aufwändige Produktion und ist ein wertvoller Nährstoff. Dieses Stärkepolymer verfügt dafür über entscheidende chemische Vorteile, die es zu einem potentiellen Bestandteil von Biofolien machen.

Ein reines Maizenaprodukt und ein Komposit aus Stärke und Spelzen wurden im Rahmen dieser Arbeit fabriziert. Die Massenzunahme von der trockenen zur in Wasser gequollenen Folie wurde bei den beiden verschiedenen Materialien gemessen und verglichen. Die geringere Quellbarkeit des cellulosebasierten Spelzes wurde mit einer dichteren Anordnung der Moleküle erklärt. Die Wassermoleküle finden weniger Platz, zwischen den Cellulosemolekülen einzudringen. Dass beide Folien im Vergleich zu konventionell verwendetem Kunststoff deutlich mehr aufgequollen sind, deutet auf eine hohe Durchlässigkeit von Wasserdampf hin. Diese Eigenschaft schränkt die Einsetzbarkeit als Verpackungsmaterial stark ein. Sie eignen sich nicht für feuchte, sondern nur für trockene, allenfalls fettige Nahrungsmittel. Dieses hydrophile Verhalten begünstigt andererseits eine schnelle Biodegradation. Das Beispiel betont den Zielkonflikt im Anspruch eines stabilen und gleichzeitig biologisch abbaubaren Materials.

Recherche und Experimente trugen zum Schluss, dass der Ansatz nur teilweise ökologisch sinnvoll ist. Es kommt auf den gewählten Ausgangsstoff an, ob das Material wirklich nachhaltiger sein kann als ein fossilbasierter Kunststoff. Die biologische Abbaubarkeit steht im Widerspruch zur gewünschten Beständigkeit in der Anwendung. Weil durch die Verbrennung eines biobasierten Plastiks gleich viel CO₂ freigesetzt wird wie beim natürlichen Abbau würde auch so der Materialkreislauf geschlossen werden. Aktuell überzeugt das Biomaterial sowohl technisch als auch ökonomisch noch nicht: Das zeigt sein extrem geringer Anteil am Plastikweltmarkt. Trotz der weiteren Erforschung von Plastikalternativen ist ein vermehrtes ökologisches Bewusstsein in der Gesellschaft gefragt. Für einem gänzlichen Verzicht auf die Verpackung braucht es weniger wissenschaftliche und politische Arbeit, sondern vielmehr die Eigenverantwortung der Konsumierenden. Nur so können unverpackte Lebensmittel verkauft werden, ohne dass sie verderben.

2 VORWORT

Da Umweltschutz ein Thema ist, welches mich interessiert und beschäftigt, zerlege ich einen Joghurtbecher vor der Entsorgung in drei Teile: Alu, Karton und Plastik. Die ersten beiden sind in ihrer Sammlung scheinbar gut aufgehoben und können in einen Kreislauf zurückgeführt werden. Für den Plastikbecher bleibt hingegen nur der Abfallsack. Wenn man allerlei Verpackungen mehrmals in den Händen dreht, nur um festzustellen, dass jeglicher Recyclinghinweis fehlt, so fragt man sich irgendwann, ob es nicht auch anders geht.

Diese Arbeit findet ihre Inspiration schliesslich in einem Ei – ein Lebensmittel, welches natürlicherweise als Portion abgepackt vorliegt und dessen Schale bedenkenlos auf dem Kompost entsorgt werden kann. Ein geniales Produkt, doch man bedenke, wie fragil Eier sind. Könnte stattdessen die Schale eines anderen Naturproduktes, einer Frucht, einer Nuss oder einer Gemüseart, zur Inspiration oder zum Bestandteil einer Lebensmittelverpackung werden?

Durch einen Zeitungsartikel über das Jungunternehmen *RethinkResource*^{1,2} hat meine Idee Gestalt angenommen. Nach dem Konzept der Kreislaufwirtschaft versucht diese Firma, industriellen Nebenprodukten einen neuen, innovativen Nutzen zu geben. Mit dieser Arbeit möchte ich mir Gedanken machen, inwiefern nicht verwertbare Nebenprodukte der Lebensmittelindustrie für die Herstellung einer Bioplastikverpackung eingesetzt werden können. Im Idealfall könnte beispielsweise die ungeniessbare Schale, welche bei der Produktion notwendigerweise anfällt, gleich zur Schutzhülle des dazugehörigen Produktes umfunktioniert werden.

3 EINFÜHRUNG

In den 1950ern erlangte Plastik rasant globale Bedeutung.³ Auch für die Lebensmittelverpackungstechnologie war die Erfindung revolutionär. In der Entwicklungsgeschichte wurden sowohl die Produkte als auch der Produktionsprozess laufend optimiert. Heute ist dieses künstliche Material äusserst vielfältig und lässt sich dadurch vorzüglich an die Bedürfnisse und Ansprüche der Hersteller sowie der Verbraucher anpassen. Die perfekte Funktionalität geben dem Plastik seine Unscheinbarkeit im Alltag. Ausgeklügelte Eigenschaften wie die Kontrolle der Atmosphäre innerhalb der Verpackung oder das inaktive Verhalten gegenüber Geschmackskomponenten werden gar nicht mehr bewusst wahrgenommen. Die vielseitigen Eigenschaften des Materials können sogar die Haltbarkeit von Lebensmitteln maximieren. So wird mit einer Kunststoffverpackung meist einen kleineren ökologischen Fussabdruck hinterlassen, als wenn der Inhalt ungeschützt verkauft und verderben würde. Dies scheinen optimale Argumente zu sein, sich nicht die Mühe eines Plastikverzichtes zu machen.^{4,5,6,7,8}

¹ RethinkResource, 2021

² Morgenthaler, 2020, S. 11

³ Griffin, 1994, S. 97

⁴ Jenkins & Harrington, 1992, S. 25f

⁵ Schmid, 2019, S. 8

⁶ Griffin, 1994, S. 97

⁷ Grabuschnig, 2020

⁸ Jenkins & Harrington, 1992, S. 19 ff

3.1 Problemstellung

Seit nun rund 70 Jahren werden nicht erneuerbare Rohstoffquellen für die Kunststoffherstellung ausgebeutet. 2020 überstieg der weltweite Plastikbedarf 360 Millionen Tonnen.⁹ In der Schweiz sind es über 100 kg Plastikmüll pro Kopf und Jahr. Mehr als drei Viertel davon sind Einwegverpackungen.¹⁰ Vorsichtige Studien rechnen damit, dass in einem halben Jahrtausend gerade mal die Hälfte des Mikroplastiks abgebaut werden kann, der heute Luft und Boden belastet oder in den Meeren schwimmt.¹¹ Bei der Verbrennung von diesen fossilbasierten Erzeugnissen wird Kohlenstoff emittiert, der nur über mehrere Millionen Jahre in der Erde eingelagert werden konnte.¹² Er steht anschliessend nicht mehr in seiner ursprünglichen Form als fossiler Energieträger zur Verfügung, sondern erhöht stattdessen den CO₂-Gehalt in der Atmosphäre.¹³

Herstellung und Entsorgung von diesen künstlichen Materialien hinterlassen Spuren, die ernst zu nehmen sind. Ressourcenknappheit sowie die Umweltverschmutzung durch Mikroplastik sind Probleme, welche den zukünftigen Plastikverbrauch unmittelbar in Frage stellen. Abbildung 1 verdeutlicht, dass Anfang und Ende nicht nur an und für sich problematisch sind. Sie geben dem Lebensweg der Einwegverpackung eine lineare Struktur. Konsequenz der einmaligen Verwendung ist der hohe Plastikverbrauch. Von entsprechendem Ausmass sind die Nachfrage fossiler Rohstoffe sowie die Umweltbelastung durch das Wegwerfen.^{14, 15}

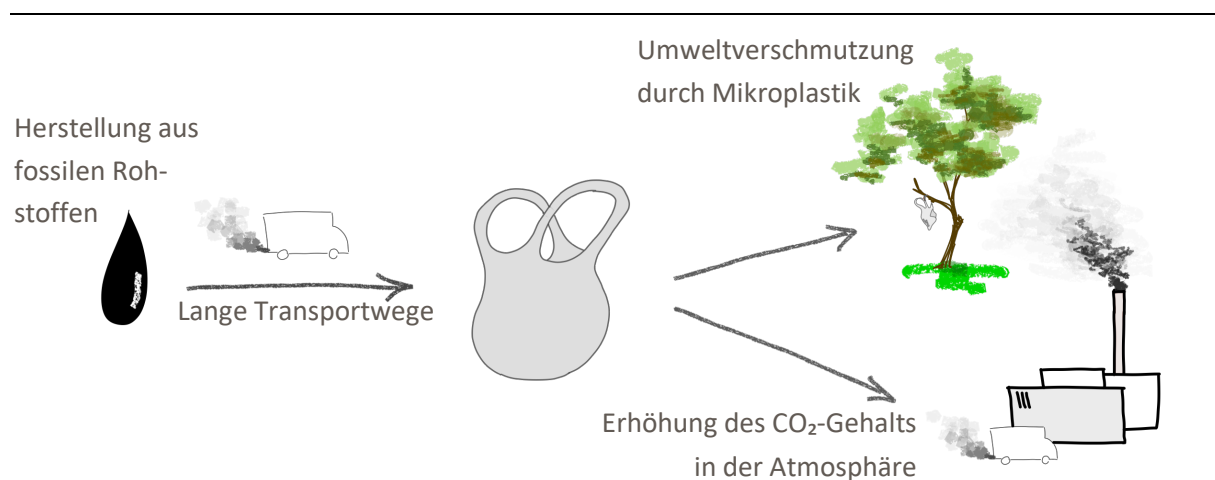


Abbildung 1: Der lineare Lebensweg von konventionellem Plastik. Vor und nach der Verwendung hinterlässt das Produkt seine Spuren in der Umwelt. Das lineare System fördert die stetige Neuproduktion und hat eine entsprechend grosse Abfallmenge zufolge.

⁹ Tiseo, 2021

¹⁰ Misicka, 2018

¹¹ Griffin, 1994, S. 97

¹² Lesch, 2021

¹³ Vergl. Transkription Urs Baier, Kapitel 9.1, S. 48

¹⁴ Kabasci, 2014, S. 1f

¹⁵ Schweizer Radio und Fernsehen, 2021

3.2 Bestehende Lösungsansätze

Zurzeit behandeln verschiedene Lösungsansätze das Problem. Dabei steht das Konzept der Kreislaufwirtschaft im Vordergrund. Ziel ist es, den linearen Verlauf in einen Zyklus umzugestalten. Durch Materialkreisläufe sollen der Ressourcenverbrauch sowie die Abfallproduktion minimiert werden.¹⁶

Abbildung 2 zeigt verschiedene Alternativen zu Abbildung 1 auf. Durch das Wiederverwenden oder Rezyklieren der Verpackung kann ein solcher Kreislauf geschlossen werden. Auch wenn aus biologischen Ressourcen ein abbaubares Material entsteht, zirkuliert die Materie in einem Kreis. Während des Pflanzenwachstums wird CO₂ aus der Atmosphäre gebunden. Die gleiche Stoffmenge wird bei der Kompostierung des Bioplastiks wieder freigesetzt. Somit bleibt der CO₂-Gehalt in der Atmosphäre über den ganzen Zyklus hinweg konstant. Die Materie erlangt wieder ihren ursprünglichen Zustand, sie steht erneut als Rohstoff für das Pflanzenwachstum zur Verfügung. Durch die Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen werden nicht erneuerbare Rohstoffquellen geschont. Dennoch ist diese Art von Kreislauf deutlich länger und dadurch meist auch aufwändiger als bei einer Wiederverwendung oder Rezyklierung. Das Wegwerfen und Neuproduzieren wird nicht umgangen.^{17, 18}

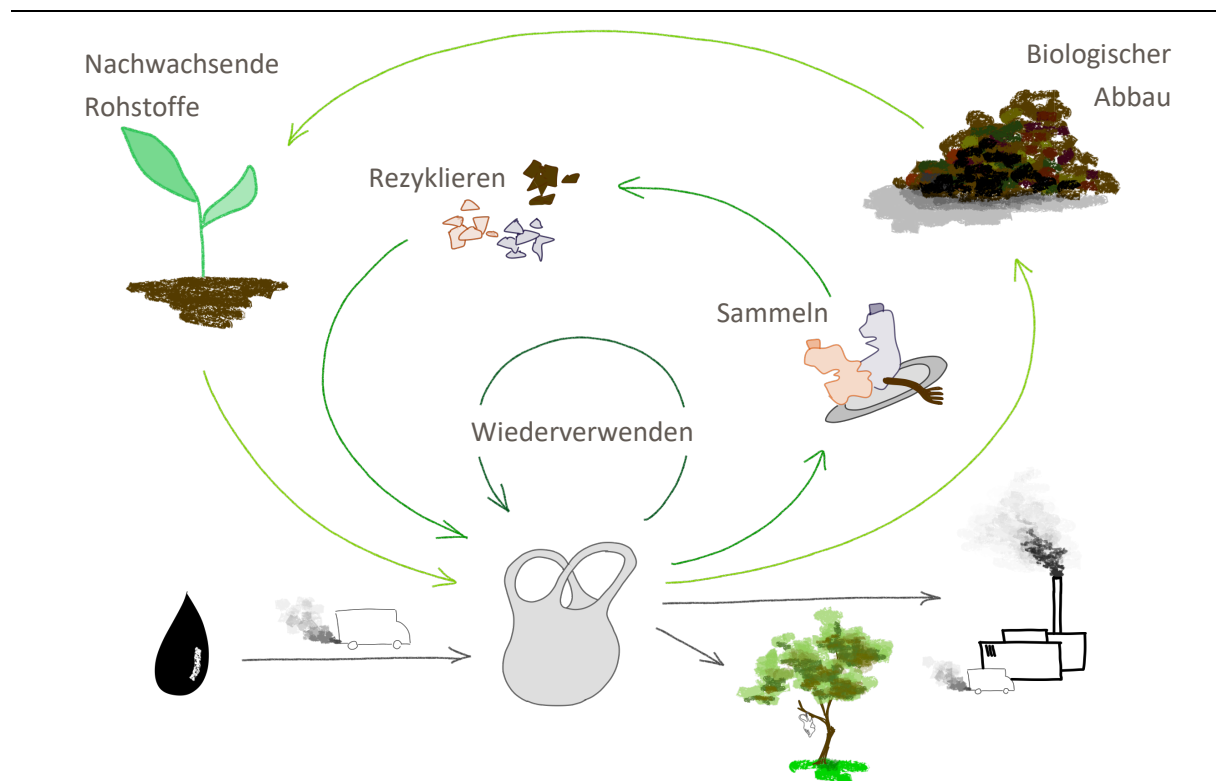


Abbildung 2: Alternative Materialkreisläufe. Durch das Umgestalten des linearen zum zyklischen System können die negativen Auswirkungen auf die Umwelt verringert werden, welche bei der Produktion und der Entsorgung entstehen.

¹⁶ Wikipedia, *Kreislaufwirtschaft*, 2021

¹⁷ Schweizer Radio und Fernsehen, 2021

¹⁸ Lemcke & Rietz, 2021

3.3 Definition Bioplastik

Konventioneller Plastik basiert auf fossilen Rohstoffen und ist nicht biologisch abbaubar. Weniger als 1 % der heute produzierten Kunststoffe besteht aus nachwachsenden Ressourcen oder kann biologisch abgebaut werden.¹⁹ Solche Materialien werden umgangssprachlich als Bioplastik bezeichnet. Der Sammelbegriff wird ebenfalls für Produkte verwendet, auf die beide Merkmale zutreffen. Abbildung 3 zeigt neben dem konventionellen Plastik alle drei Unterkategorien des Bioplastiks auf.^{20, 21, 22, 23}

Was nach einem Widerspruch klingen mag, ist mittlerweile zum etablierten Begriff geworden. Funktionalität und Nachhaltigkeit scheinen in einem Wort zusammengefasst. Aber kann Plastik wirklich 'Bio' sein?

Verpackungen, die sowohl biobasiert als auch bioabbaubar sind, mögen als grünste Variante von Bioplastik erscheinen. Solch ein Material entspricht dem Bild der Kreislaufwirtschaft und soll im Fokus dieser Arbeit stehen. Wenn nicht anders angegeben, ist im Weiteren mit den als Synonyme verwendeten Begriffen 'Bioplastik' oder 'Biokunststoff' nur biobasiertes und bioabbaubares Material gemeint.²⁴

Für die Bearbeitung des Themas wird das Konzept von Bioplastik als ökologisch sinnvoll angenommen. Anhand der Resultate soll diese Annahme im Fazit (Kapitel 6) kritisch bewertet werden.

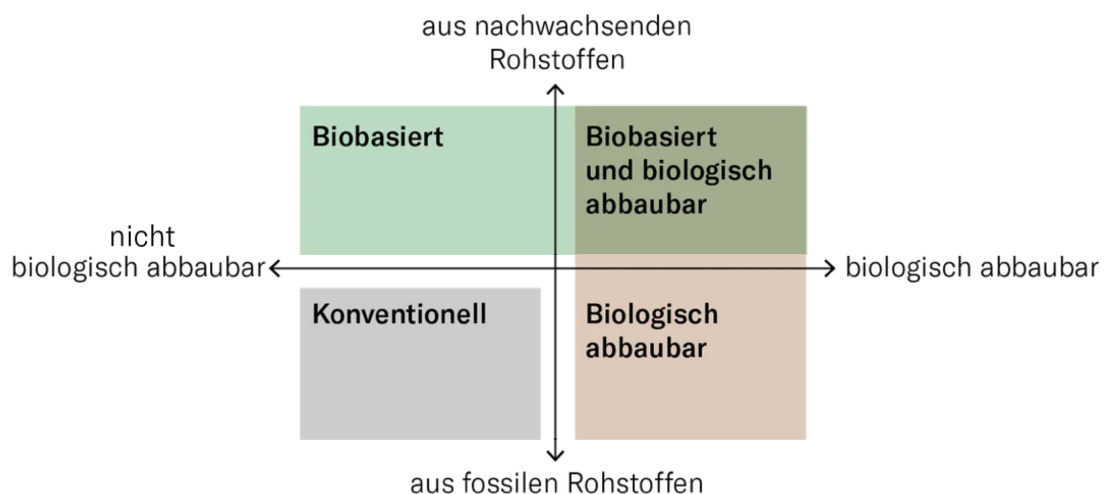


Abbildung 3: Unterkategorien des Bioplastiks. Der Sammelbegriff «Bioplastik» beinhaltet Kunststoffe, die biobasiert, bioabbaubar oder beides zu gleich sind. Fossilbasierte und nicht biologisch abbaubare Kunststoffe werden als oft als konventionell oder handelsüblich bezeichnet.²⁵

¹⁹ Lemcke & Rietz, 2021

²⁰ Ebd.

²¹ Behr & Seidensticker, 2018, S. 318

²² Vergl. Transkription Urs Baier, Kapitel 9.1, S. 48

²³ Schweizer Radio und Fernsehen, 2021

²⁴ Vergl. Transkription Linda Grieder, Kapitel 9.2, S. 55

²⁵ Die Abbildung wurde übernommen von Lemcke & Rietz, 2021 und nachbearbeitet

3.4 Ziel, Fragestellungen und Methoden

3.4.1 Ziel

Im Rahmen dieser Arbeit soll ein Ausgangsmaterial biologischen Ursprungs als Alternative zu fossilen Rohstoffen gefunden werden. Vorbild für den Biokunststoff ist eine handelsübliche Plastikfolie. Das Basismaterial muss technische Bedingungen erfüllen, damit es zu einer plastikähnlichen Folie verarbeitet werden kann. Gleichzeitig soll die Herstellung möglichst umweltschonend sein und einen biologischen Abbau gewährleisten. Das Resultat sollte in den Eigenschaften dem konventionellen Kunststoff so nahe wie möglich kommen, damit es ebenso vielseitig einsetzbar ist.

Ziel der Arbeit ist das Zusammenbringen von Funktionalität und Nachhaltigkeit in einer Lebensmittelverpackung aus biobasiertem und biologisch abbaubarem Plastik. So soll ein geschlossener Materialkreislauf entstehen.

3.4.2 Fragestellungen

Wie sind die technischen und ökologischen Bedingungen, welche das Ausgangsmaterial erfüllen sollte, zu definieren? Welches Material kann die Ansprüche beider Seiten abdecken?

Könnte ein Bioplastik mit den Eigenschaften und Funktionalitäten handelsüblicher Verpackungen konkurrenzieren? Ist gleichzeitig eine Erfüllung der Voraussetzungen für die Biodegradation möglich? Bis hier wurde vorangestellt, dass bei idealem Ausgangsstoff, Funktionalität und biologischer Abbaubarkeit das Konzept des Bioplastiks nachhaltig ist. Diese Annahme soll abschliessend im Hinblick auf die erarbeiteten Resultate kritisch betrachtet werden. Somit gilt es abschliessend zu beantworten, ob der Lösungsansatz wirklich eine sinnvolle und nachhaltige Alternative darstellt.

3.4.3 Vorgehen und Methoden

Im ersten Teil wird die Theorie bearbeitet. Um die technischen Anforderungen des Ausgangsstoffes herauszuarbeiten hilft ein Einblick in die Chemie der konventionellen Kunststoffe. Der Fokus soll auf die molekulare Struktur und die damit verbundene Wasserresistenz gelegt werden. Wo möglich werden die erlangten Kenntnisse auf den Biokunststoff übertragen und so die technischen Rahmenbedingungen für die Auswahl des Ausgangsstoffes bestimmt. Ebenfalls werden die Voraussetzungen für die Zersetzung eines Polymermaterials herausgearbeitet. Durch Gespräche mit Fachpersonen entsteht ein Eindruck über die ökologischen Vor- und Nachteile von verschiedenen Biomaterialien.

Der zweite Teil stützt sich auf die theoretischen Erkenntnisse und behandelt die praktische Umsetzung. Ausgangsstoffe, welche die Anforderungen beider Seiten genügend erfüllen, werden in Vorversuchen getestet. Im tatsächlichen Experiment soll das beste Resultat nochmals hergestellt und auf die Eigenschaft der Wasserresistenz getestet werden. Die Massenzunahme nach einer Quellung im Wasser bestimmt, wie viele H₂O-Moleküle sich im Material einlagern konnten. Die bearbeitete Theorie hilft beim Verständnis des Vorgangs und soll die Resultate des Experiments erklären. Die Ergebnisse ermöglichen einen Vergleich mit den theoretisch beschriebenen Eigenschaften konventioneller Kunststoffe. Es können Rückschlüsse auf mögliche Anwendungsbereiche sowie die Biodegradation gezogen werden.

4 THEORIEBEARBEITUNG

4.1 Konventionelle Kunststoffe

Ein Einblick in den molekularen Aufbau der konventionellen Kunststoffe und die daraus resultierende Wasserresistenz soll für das spätere Verständnis der Biokunststoffe hilfreich sein. Für Lebensmittelverpackungen werden heute die Kunststoffe Polypropylen (PP), Polyethylen (PE) und Polyvinylchlorid (PVC) mit Abstand am meisten verwendet. Über 99 % der Verpackungsmaterialien sind petrochemisch.²⁶ Damit werden synthetische Erzeugnisse aus fossilen Rohstoffen bezeichnet. Meist dient Erdöl oder Erdgas als Ausgangsmaterial.^{27, 28, 29}

4.1.1 Struktur

Molekulare Struktur

Kunststoffe besteht aus langen Molekülketten, auch Polymere genannt. Sie sind aus kleineren, sich wiederholenden Einheiten zusammengesetzt, den sogenannten Monomeren. Typisch ist das hohe Molekulargewicht. Wie die meisten Kunststoffe in der Lebensmittelverpackungsindustrie weisen auch PP, PE und PVC in der Hauptkette nur Kohlenstoff-Kohlenstoff-Bindungen auf (Abbildung 4). Diese sind unpolar und deshalb sehr stabil. Da sie auch ansonsten wenig bis gar keine polaren Bindungen haben, können sich aus Ermangelung von aktiven und passiven Stellen keine Wasserstoffbrücken bilden. Sie halten ausschliesslich durch Van-der-Waals-Kräfte zusammen und sind bei Raumtemperatur fest.^{30, 31}

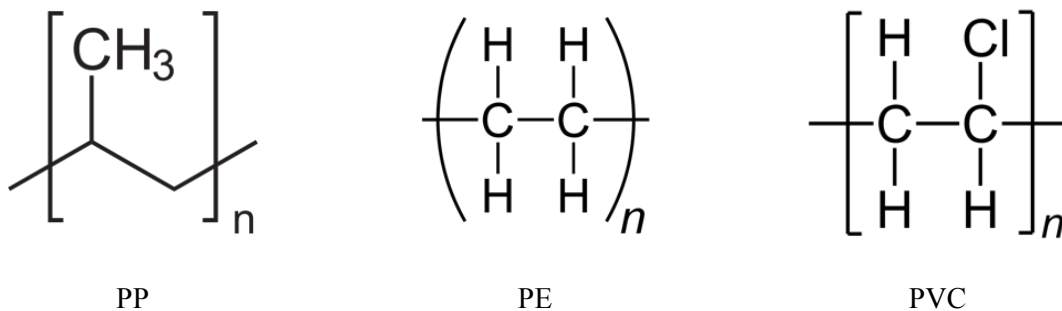


Abbildung 4: Polypropylen, Polyethylen und Polyvinylchlorid. Die molekularen Strukturen der drei meist verwendeten, petrochemischen Verpackungsmaterialien.^{32, 33, 34}

²⁶ Lemcke & Rietz, 2021

²⁷ Wikipedia, *Erdöl*, 2021

²⁸ Wikipedia, *Petrochemie*, 2021

²⁹ Wikipedia, *Kunststoff*, 2021

³⁰ Ebd.

³¹ Jenkins & Harrington, 1992, S. 29

³² Wikipedia, *Polypropylen*, 2021

³³ Wikipedia, *Polyethylen*, 2021

³⁴ Wikipedia, *Polyvinylchlorid*, 2021

Supramolekulare Struktur

Die oben aufgezeigten petrochemischen Erzeugnisse können aufgrund ihrer kettenartigen Struktur kristalline Bereiche bilden (Abbildung 5 a). Diese zeichnen sich durch ihre geordnete Überstruktur aus parallelen Strängen aus. Das Ausmass der Kristallinität ist für viele Eigenschaften von Bedeutung. Schmelzpunkt, Dichte, Flexibilität aber auch das Quellverhalten (vergl. Kapitel 4.1.2, Quellverhalten) und die Durchlässigkeit von Wasserdampf (vergl. Kapitel 4.1.2, Permeabilität) sind zu einem Teil vom Kristallinitätsgrad abhängig.^{35, 36}

Bei verzweigten und quervernetzten Ketten entstehen hingegen ungeordnete Bereiche, die als amorph bezeichnet werden (Abbildung 5 b). Die Anzahl der Verzweigungen und der Vernetzungsgrad zwischen den Polymeren kann dabei variieren.

Durch unterschiedliche supramolekulare Strukturen können aus ein und derselben Polymerart harte Schalen (Abbildung 6 a) oder knisternde Folien (Abbildung 6 b) entstehen.³⁷

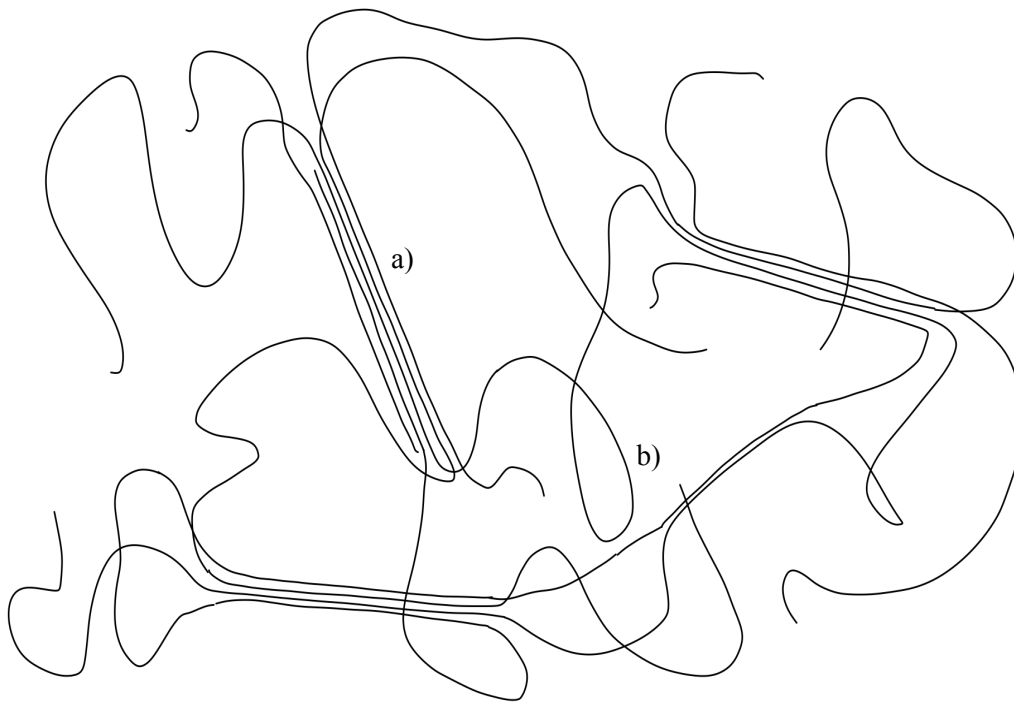


Abbildung 5: Teilkristalline Struktur mit a) kristallinen und b) amorphen Bereichen.

³⁵ Kabasci, 2014, S. 10ff

³⁶ Wikipedia, *Kristallisation (Polymer)*, 2021

³⁷ Jenkins & Harrington, 1992, S.29

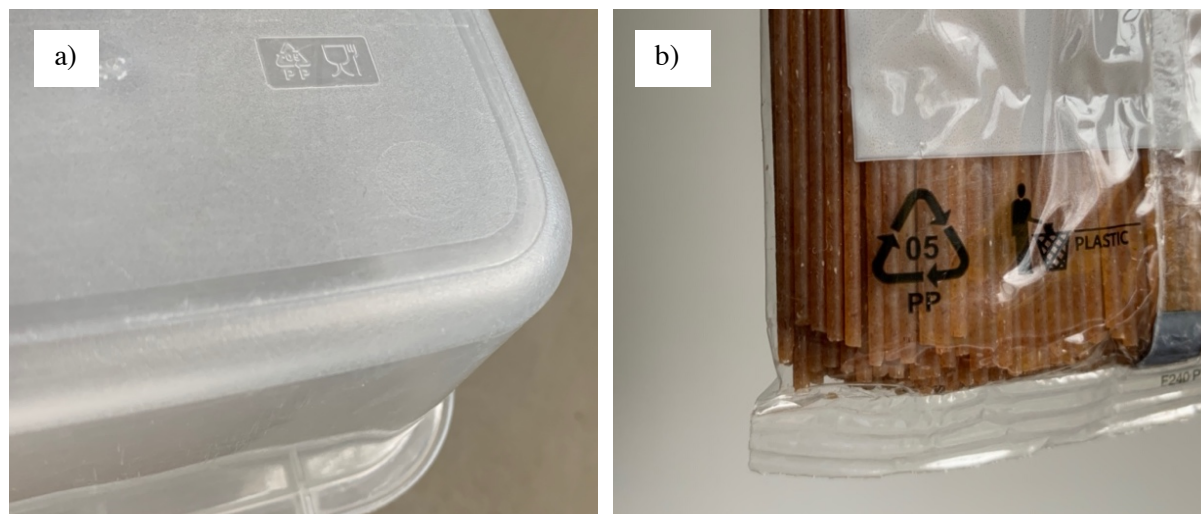


Abbildung 6: a) Tupperware mit der Aufschrift PP, b) Spaghettiverpackung aus PP.

4.1.2 Verhalten gegenüber Wasser

Das Verhalten gegenüber Wasser ist nicht nur in der Anwendung entscheidend, sondern auch für die biologische Abbaubarkeit (vergl. Kapitel 4.3, S. 14). Diese Materialeigenschaft wird durch das Ausmass der Hydrophilie beschrieben. Die Hydrophilie bestimmt, wie stark ein Material mit Wasser wechselwirken kann.³⁸ Es wird versucht, diese Eigenschaft zu quantifizieren, um später einen Vergleich zwischen petrochemischen und biobasierten Polymermaterialien zu ermöglichen.^{39, 40}

Quellverhalten

Wenn ein Material für längere Zeit im Wasser ist, kann es durch die Einlagerung von Wassermolekülen an Masse gewinnen. Die prozentuale Massenzunahme entspricht dem Quellungsgrad. Kunststoffe wie PP, PE und PVC wurden für eine ausgeprägte Wasserresistenz designt. Auch wenn sie lange einem wässrigen Umfeld ausgesetzt sind, zeigen sie keine Massenzunahme. Der Quellungsgrad liegt extrem tief. Die polaren Wassermoleküle schaffen es nicht, zwischen die unpolaren Ketten einzudringen und sich über Dipol-Dipol-Kräfte oder Wasserstoffbrücken festzusetzen. Die Van-der-Waals-Kräfte zwischen den Polymeren hingegen sind riesig. Zusätzlich sind auch der Kristallinitätsgrad sowie der Vernetzungsgrad für die Quellbarkeit mitbestimmend. Mit zunehmender Vernetzung nimmt das freie Volumen zwischen den Polymerketten ab. Je dichter die Kunststoffmoleküle angeordnet und untereinander vernetzt sind, desto weniger Platz bleibt den Wassermolekülen, sich dazwischen zu schieben. Die Studie von Schäfer et al. hält fest, dass der Quellungsgrad umgekehrt proportional ist zum Vernetzungsgrad.⁴¹ Eine ausgeprägte Apolarität, ein grosses Molekulargewicht oder ein hoher Vernetzungs- und Kristallinitätsgrad bewirkt ein hydrophobes Verhalten und verringern die Quellung.^{42, 43}

³⁸ Chemieschule, 2021

³⁹ Trächslin, 1992, S. 23

⁴⁰ Wikipedia, *Hydrolyse von Biomolekülen*, 2021

⁴¹ Schäfer et al, 2018, S. 10

⁴² Ebd., S. 10

⁴³ Wikipedia, *Quellung*, 2021

Permeabilität

Für die Haltbarkeit eines Lebensmittels ist ein kontrolliertes Gasgemisch im Innern der Verpackung massgebend. Je nach Nahrungsmittel ist eine absolute, selektive oder möglichst geringe Durchlässigkeit des Verpackungsmaterials erwünscht. Die Kenntnis über die Permeabilität (lat. *'permeare'*, hindurchlassen⁴⁴) eines Verpackungsmaterials spielt also in der Anwendung eine wichtige Rolle.

Als Permeation wird die Wanderung von Gasen oder Flüssigkeiten durch einen Feststoff bezeichnet. Der Permeationskoeffizient P wird als Produkt aus dem Löslichkeitskoeffizient S und dem Diffusionskoeffizient D definiert.^{45, 46, 47, 48}

$$P = S \cdot D$$

Es lässt sich herauslesen, dass der Permeationskoeffizient P proportional zum Löslichkeitskoeffizient S ist. Da sich die Kunststoffe PP, PE und PVC als hydrophob erwiesen haben, ist der Löslichkeitskoeffizient von Wasser im petrochemischen Polymermaterial relativ klein. Somit ist ein geringer Permeationskoeffizient für Wasserdampf zu erwarten. Verpackungen aus diesen Materialien weisen eine gute Barriereeigenschaft gegenüber Wassermolekülen auf.⁴⁹

4.2 Biokunststoffe

Auch für biobasierte und biologisch abbaubare Kunststoffe wird die molekulare Struktur und das Verhalten gegenüber Wasser genauer betrachtet. Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen biologischen und petrochemischen Kunststoffen sollen ersichtlich werden.

Polymere von biologischer Herkunft sind eine nachhaltige Alternative zu synthetisch erzeugten Molekülketten aus fossilen Rohstoffen. Einerseits können solche Biopolymere künstlich aus Biomasse synthetisiert oder polymerisiert werden. Atome oder kleinere Moleküle werden dabei zu langen Ketten zusammgebaut. Andererseits können auch Polymere verwendet werden, die in der Natur bereits vorhanden sind. Sie wurden von lebenden Organismen produziert, wie etwa Polysaccharide oder Proteine. Die zweite Option erlaubt einen deutlich kürzeren Produktionsprozess. Wenn der Molekülaufbau dabei nicht verändert wird, bleibt die biologische Abbaubarkeit gewährleistet. Aus diesen Gründen wird ein biologisches Ausgangsmaterial gesucht, welches bereits eine Art von Polymer enthält.^{50, 51}

⁴⁴ Siegert, 2006, S. 3

⁴⁵ Jenkins & Harrington, 1992, S. 25

⁴⁶ Wikipedia, *Permeation*, 2021

⁴⁷ Siegert, 2006, S. 7

⁴⁸ Ametek & Mocon, o. J.

⁴⁹ Jenkins & Harrington, 1992, S. 24

⁵⁰ Behr & Seidensticker, 2018, S. 318ff

⁵¹ Schweizer Radio und Fernsehen, 2021

4.2.1 Molekulare und supramolekulare Struktur

Natürliche Polymere wie Proteine, Polysaccharide, Polyester oder Lipide eignen sich für die Herstellung eines Biokunststoffes. Im Unterschied zu petrochemischen Polymeren setzt sich deren Hauptkette nicht ausschliesslich aus Kohlenstoff-Kohlenstoffbindungen zusammen, sondern verfügt über funktionelle Gruppen.^{52, 53}

Damit ein plastikähnliches Material entsteht, werden die Moleküle in wässriger Lösung erhitzt. Durch die Energiezufuhr können sich die Polymerketten umstrukturieren, also ihre räumliche Form und Anordnung verändern. Zum Teil können auch neue kovalente Bindungen entstehen. Das flüssige Gemisch wird zu einer Folie ausgegossen und kühlt ab. Die Neuordnung der Moleküle bleibt erhalten und es bildet sich ein stabiles Polymernetzwerk. Je nach Struktur wird das Material etwa hart, brüchig oder elastisch.⁵⁴

4.2.2 Verhalten gegenüber Wasser

Quellverhalten

Durch die oben genannten funktionellen Gruppen haben Biopolymere polare Molekülteile. Einige Biopolymere zeigen dadurch ein hydrophiles Verhalten. Das Aufquellen von Cellulose oder die Wasserlöslichkeit von manchen Proteinen ist ein Indikator dafür. Polysaccharide beispielsweise haben zahlreiche teilgeladene Wasser- oder Sauerstoffatome. Wegen den gleichen zwischenmolekularen Kräften, nämlich Wasserstoffbrücken, können sich Wassermoleküle zwischen die Ketten schieben. Es ist zu erwarten, dass Biokunststoffe eine grössere Hydrophilie aufweisen als petrochemische Erzeugnisse.⁵⁵

Permeabilität

Während hydrophobe Polymere zu einer geringen Wasserdampfdurchlässigkeit tendieren, kann man beim Biokunststoff das Gegenteil vermuten. Wenn H₂O-Moleküle leichter zwischen die Molekülketten eindringen können, wird auch deren Permeation durch den Biokunststoff begünstigt. Durch eine Erhöhung des Vernetzungs- oder Kristallinitätsgrades kann diesem Nachteil entgegengewirkt werden.⁵⁶

4.3 Biodegradation

Erst durch den Abbau von Bioplastik wird der Kreislauf geschlossen (vergl. Kapitel 3.2 und 3.3, S. 7f). Die folgenden Bedingungen bestimmen, wie gut sich ein Material biologisch abzubauen lässt.

4.3.1 Hydrophilie

Unter dem Abbau eines Stoffes versteht man die Zersetzung von chemischen Verbindungen in kleinere Moleküle oder sogar Elemente.⁵⁷ Für den biologischen Abbau muss ein Polymer zwingend in kleinere Teile zerlegt werden können. Erst so sind die Molekülteile genug klein, dass sie von Mikroorganismen

⁵² Reichert et al., 2020, S. 8

⁵³ Behr & Seidensticker, 2018, S. 322

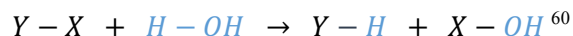
⁵⁴ Reichert et al., 2020, S. 8f

⁵⁵ Thi, 2021

⁵⁶ Schäfer et al, 2018, S. 10

⁵⁷ Wikipedia, *Zersetzung (Chemie)*, 2021

über ihre Zellwände aufgenommen und verstoffwechselt werden können. Ergebnis davon ist meist Kohlendioxid und Wasser. Voraussetzung für diese Zerlegung ist eine hydrolytische Spaltung der Hauptkette. Als Hydrolyse wird die Spaltung einer (bio-) chemischen Verbindung durch Reaktion mit Wasser bezeichnet.^{58, 59}



Damit eine enzymatisch beschleunigte Hydrolyse stattfinden kann, braucht es also ausreichend Wasser. Wie gut Wassermoleküle zwischen die Polymerketten eindringen können, entscheidet unter anderem der Hydrophilitätsgrad. Ein biologisch abbaubarer Kunststoff muss also wasserlöslich oder zumindest benetzbar sein. Ersteres würde bedeuten, dass das Material mit ausreichend Wasser in Lösung gehen und sich so schneller zersetzen kann. Im zweiten Fall würden die Polymere anfänglich als Feststoff zusammenbleiben, jedoch über ihre Oberfläche H₂O-Moleküle eindringen lassen.⁶¹

Die Hydrophobie der konventionellen Kunststoffe verhindert einen biologischen Abbau. Wenn eine grösstmögliche Stabilität gegenüber Wasser während der Verwendung erwünscht ist, bleibt diese Eigenschaft auch nach der Applikation bestehen. Plastik kann in der Umwelt zwar mechanisch zerkleinert, aber chemisch kaum zerlegt werden. Die biologische Abbaubarkeit von Bioplastik hingegen lässt sich in manchen Fällen teils mit der Hydrophilie erklären. Wie bereits beschrieben, ist Wasser für den biologischen Abbau notwendig. Dabei beschleunigen extrazelluläre Enzyme von Mikroorganismen die Hydrolyse.^{62, 63, 64}

4.3.2 Sollbruchstellen

Die Wasserlöslichkeit oder Benetzbarkeit eines Biokunststoffes reicht alleine nicht für den biologischen Abbau aus. Wenn Wassermoleküle in ein Polymermaterial aufgenommen werden können, müssen sie zusätzlich in der Hauptkette angreifbare Bindungen finden. Diese sogenannten Sollbruchstellen sind meist polare Bindungen in funktionellen Gruppen. Monosaccharide beispielsweise, die über extracyclische, teilgeladene Sauerstoffatome aneinandergereiht sind, können dort hydrolytisch aufgespalten werden. Kunststoffe hingegen, deren Rückgrat nur aus Kohlenstoffatomen besteht, lassen sich kaum in kleinere Teile zerlegen. Bis heute ist keine Endo-Hydrolyse einer C–C-Bindung bekannt. Auch nach mehreren Jahrhunderten im Wasser bleiben die petrochemischen Polymere bestehen.^{65, 66, 67, 68}

⁵⁸ Griffin, 1994, S. 117

⁵⁹ Behr & Seidensticker, 2018, S. 320

⁶⁰ Wikipedia, *Hydrolyse*, 2021

⁶¹ Griffin, 1994, S. 15f

⁶² Vergl. Transkription Urs Baier, Kapitel 9.1, S. 47

⁶³ Wikipedia, *Hydrolyse von Biomolekülen*, 2021

⁶⁴ Griffin, 1994, S. 11ff

⁶⁵ Ebd., S. 15f

⁶⁶ Ebd., S. 97

⁶⁷ Fuhrhop & Wang, 2009, S. 59

⁶⁸ Chemiezauber, 2021

4.3.3 Umweltbedingungen

Ob und wie schnell sich ein Stoff abbaut, ist nicht ausschliesslich von den Materialeigenschaften abhängig. Oben wurde aufgezeigt, dass mit der Hydrophilie auch die Verfügbarkeit von Wasser entscheidend ist. Je nach Material und Art des Abbauprozesses sind verschiedene Umweltbedingungen erforderlich und können etwa bestimmte Temperaturen, Feuchtigkeitsgrade oder pH-Werte einschliessen. Bei einem biologischen Abbau braucht es zusätzlich noch Mikroorganismen. Materialien, die als biologisch abbaubar gelten, sind es nur unter spezifischen Umweltbedingungen.^{69, 70, 71}

4.3.4 Zielkonflikt

Die in der Anwendung erwünschte Wasserbeständigkeit behindert gleichzeitig den biologischen Abbau des Kunststoffes. Entweder kann das Material nicht mit den Eigenschaften von konventionellen Kunststoffen mithalten und ist somit nicht genügend funktional oder es zersetzt sich nicht auf dem Komposthaufen. Ein Material, das für eine grösstmögliche Stabilität entwickelt wurde, steht im Widerspruch zur gewünschten Abbaubarkeit in der Umwelt. Die beiden Ziele, Beständigkeit und Abbaubarkeit, stehen im Widerspruch zueinander.^{72, 73}

4.3.5 Deklaration und Reglement

Die Abhängigkeit von den Umweltbedingungen erschwert eine eindeutige Deklaration. Es gibt Materialien, die Zuhause im Garten abgebaut werden können. So ist es zum Beispiel bei den Biokompositen der Firmen *FluidSolids*⁷⁴ und *traceless*⁷⁵. Andere Materialien können sich hingegen nur unter idealen Bedingungen abbauen. PLA ist erst ab einer Temperatur von 50 °C abbaubar und braucht in einer Kompostieranlage länger als die meisten Grünabfälle (Abbildung 7).⁷⁶ Der Biokunststoff ist dafür kaltem Wasser gegenüber sehr beständig.⁷⁷

Auf vielen Verpackungen, Säcken oder auf Einweggeschirr findet sich häufig nur die Aufschrift 'compostable'. Damit ist die korrekte Entsorgung noch nicht geklärt. Was nur unter Laborbedingungen und was auch heimkompostierbar ist, lässt sich von Auge kaum unterscheiden. Durch den missverständlichen Aufdruck entsteht das Risiko einer grösseren Umweltverschmutzung. Der Hinweis auf Kompostierbarkeit kann nach der Verwendung zu unachtsamem Umgang mit Abfall verleiten, der sich möglicherweise nicht bei normalen Umweltbedingungen abbaut. Das ist unter anderem ein Grund für den Einschluss von Bioplastik im EU-Verbot für bestimmte Einweg-Plastikartikel, welches seit dem 3. Juli 2021 Gültigkeit hat.^{78, 79}

⁶⁹ Griffin, 1994, S. 15f

⁷⁰ Wikipedia, *Hydrolyse von Biomolekülen*, 2021

⁷¹ Schweizer Radio und Fernsehen, 2021

⁷² Ebd.

⁷³ Vergl. Transkription Urs Baier, Kapitel 9.1, S. 47

⁷⁴ FluidSolids, 2019

⁷⁵ traceless, 2021

⁷⁶ Schweizer Radio und Fernsehen, 2021

⁷⁷ Ebd.

⁷⁸ Ebd.

⁷⁹ Lemcke & Rietz, 2021

Nachhaltiger PLA-Becher
Biologisch abbaubar, hergestellt aus Nebenprodukten, die bei der Verarbeitung erneuerbarer Rohstoffe entstehen.

Sustainable PLA Cup
Biodegradable, made out of by-products developed during the process of renewable raw materials.

Biologisch abbaubare Cups – because we care about the environment!

Dünger
Aus Bio-Abfall entsteht Strom und Wärme sowie Dünger, womit sich der Kreislauf schliesst.

Bio-Abfall
Die PLA-Becher entsorgen wir zusammen mit unserem Bio-Abfall.

Fertilizer
Out of bio-waste, electricity, heat and fertilizer are produced, thus closing the cycle.

Organic Waste
We dispose the PLA cups together with our organic waste.

Contact Axpo Kompogas AG, Patrik Schmid, Parkstrasse 23, 5401 Baden, +41 56 200 46 13, patrik.schmid@axpo.com

Abbildung 7: Informationsschild für PLA-Trinkbecher in der Gastronomie.

4.4 Kriterien für die Auswahl des Ausgangstoffes

4.4.1 Technische Bedingungen

Im Kapitel 4.2.1 wurden technische Bedingungen für die Auswahl des Ausgangsmaterials herausgearbeitet. Da bereits vorhandene Biopolymere verwendet werden sollen, bieten sich beispielsweise Proteine, Polysaccharide, Polyester oder Lipide an.^{80, 81}

4.4.2 Ökologische Bedingungen

Weniger eindeutig sind die ökologischen Anforderungen an den Ausgangsstoff. Mais- oder Kartoffelstärke beispielsweise sind zwar auf Grund ihrer chemischen Eigenschaften sehr vielversprechend, doch stehen sie dabei in Konkurrenz mit der Nahrungsmittelkette. Dazu gehören nicht nur die Rohstoffe selbst, welche in anderen Sektoren fehlen würden, sondern auch weitere Ressourcen wie etwa die Anbaufläche. Bioplastik-Verpackungen auf Basis von potenziellen Nahrungs- oder Futtermitteln werden deshalb oft kritisiert. Da die Nutzung von Biomaterie, die erst angebaut und geerntet werden muss, ökologisch meist nicht überzeugend ist, lohnt es sich, der Frage nachzugehen, ob und wie Nebenströme aus der Lebensmittelindustrie eine Basis für Verpackungsmaterial bieten können. Als Nebenstrom oder auch Nebenprodukt werden Materialien bezeichnet, welche durch einen Produktionsprozess kontinuierlich verloren gehen. Dieses Material genügt meist den geltenden Hygienebestimmungen und kann vielleicht sogar gleich vor Ort als Verpackung für den dazugehörigen Inhalt dienen.^{82, 83, 84}

4.4.3 Auswertung

Im Folgenden sind Biomaterialien aufgelistet, welche ausschliesslich oder zu einem grossen Teil aus Polymeren aufgebaut sind und somit den technischen Rahmenbedingungen entsprechen. In der Tabelle 1 werden sie in vier Kategorien unterteilt. Grün markiert ist die Überschneidung der beiden aufgestellten ökologischen Kriterien. Es fällt auf, dass sich ein Material aus Cellulose besonders anbietet.

	Nahrungs- /Futtermittel	ungeniessbar
Produkte	Kartoffelproteine Maisstärke Lupinien	Bambus Holzfasern Jatrophaproteine
Nebenprodukte	Molke Kartoffelschale Kürbiskernöltrester Biertreber Kichererbsenwasser	Getreidespelzen Nussschalen Kaffeersatz Maisstirzel Fruchtsteine

Tabelle 1: Biomaterialien, welche ein oder mehrere Biopolymerarten enthalten. Die Schnittmenge von den Kriterien «Nebenprodukt» und «Ungeniessbarkeit» ist in grün dargestellt.

⁸⁰ Reichert et al., 2020, S. 8

⁸¹ Behr & Seidensticker, 2018, S. 322

⁸² Lemcke & Rietz, 2021

⁸³ Vergl. Transkription Linda Grieder, Kapitel 9.2, S. 54

⁸⁴ Vergl. Transkription Urs Baier, Kapitel 9.1, S. 46

5 ANWENDUNG IN DER PRAXIS

In der vorangehenden Theoriebearbeitung wurde nach einem biologischen Ausgangsmaterial für Plastikfolien gesucht, um Lebensmittelverpackungen in einen Materialkreislauf einzubinden. Ungenutzten Nebenströmen könnte so eine Verwendung gegeben werden. Im folgenden Praxisteil werden Versuche mit verschiedenen Biopolymeren beschrieben. Aus den Resultaten werden Schlüsse für das weitere Vorgehen gezogen.

5.1 Vorversuche

Verschiedene Nebenströme wurden bei 25 – 70 °C während 5 – 30 Minuten aufgeköcht. Die Temperatur sollte mit einem Thermometer direkt in der Pfanne bestimmt werden. Wenn Feststoffe als Ausgangsmaterial verwendet wurden, musste Wasser hinzugegeben werden. Glycerolum diente als Weichmacher (Abbildung 8).⁸⁵ Die Proben der aufgeköchten Nebenströme wurden auf verschiedenen Unterlagen wie Papier, Glas oder plastifiziertem Karton ausgestrichen und getrocknet.

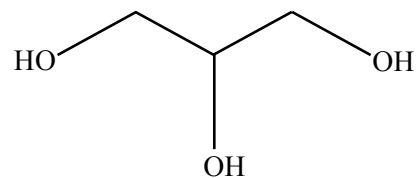


Abbildung 8: Das Glycerinmolekül.

5.1.1 Molke

Bei der Herstellung von einem Kilogramm Käse fallen als Nebenprodukt rund neun Liter Molke an.⁸⁶ Diese bestehen zu 94 % aus Wasser, enthalten aber auch 0,6 – 1 % Proteine.⁸⁷ Die beste Wertschöpfung wäre eine Verwendung als Lebensmittel. Trotz den wertvollen Nährstoffen bleibt jedoch ein grosser Teil davon ungenutzt.⁸⁸ Um dem Nebenstrom eine Verwendung zu geben wird er im folgenden Versuch auf die Einsetzbarkeit in der Lebensmittelverpackungstechnik untersucht.

Molekulare und supramolekulare Struktur

Einige Molkenproteine sind sphärisch, verändern jedoch ihre tertiäre Struktur unter Erhitzung. Nach der räumlichen Umstrukturierung geben die denaturierten Proteine Schwefelgruppen frei, die vorher im Zentrum der Kugel versteckt waren. Es können neue, kovalente Bindungen zwischen den einzelnen Proteinen entstehen, die auch nach der Abkühlung erhalten bleiben. Der Prozess ist irreversibel.^{89, 90, 91}

⁸⁵ Behr & Seidensticker, 2018, S. 86

⁸⁶ Thi, 2021

⁸⁷ Wikipedia, *Molke*, 2021

⁸⁸ Schmid et al., 2012, S. 2

⁸⁹ Zink et al., 2016, S. 3

⁹⁰ Cinelli et al., 2016, S. 3

⁹¹ Thi, 2021

Materialien und Methoden

Der Proteingehalt der frischen Molke reicht nicht aus, um einen Bioplastik herzustellen. Damit eine stabile Folie entstehen kann, braucht es eine höhere Konzentration an Polymeren. Um den Proteingehalt der frischen Molke zu erhöhen, wurde zusätzliches Molkenproteinpulver beigemischt. Die Menge an Glycerolum variierte zwischen 1 und 5 ml pro 1 dl Flüssigkeit. Während einer halben Stunde sollten alle fünf Minuten Proben entnommen werden.

Resultate

Die Ergebnisse blieben entweder flüssig oder härteten zu einer brüchigen Schicht aus (Abbildung 9). Keine Probe liess sich bruchlos in einem Stück vom Untergrund lösen.



Abbildung 9: Vorversuche mit Molke wurden hart und zerbrechlich.

Diskussion

Für Plastikfolien aus Molkeproteinen werden normalerweise Proteinkonzentrate (Proteingehalt 65 – 80 %) oder -isolate (> 90 %) verwendet, die hier nicht zur Verfügung standen.⁹² Durch eine Variation der Kochzeiten sowie der Mengen von frischer Molke, Molkenpulver und Glycerin konnte das Resultat nicht verbessert werden.

Auch die Experimente mit Kürbiskernöltrester, Aprikosenkernen und dem Kochwasser von Kichererbsen führten zu keiner stabilen, reissfesten Folie. Die durchgeführten Versuche lassen vermuten, dass sich viele Nebenprodukte ähnlich wie Molke verhalten. Manche enthalten ebenfalls zu geringe Konzentrationen von Biopolymeren. Andere bestehen zwar zu einem grösseren Anteil aus langkettigen Molekülen, doch auch diese bilden kein stabiles Netzwerk. Verschiedenartige Polymere können sich aufgrund ihrer unterschiedlichen zwischenmolekularen Kräfte kaum verbinden.

⁹² Bugnicourt et al., 2013, S. 2

5.1.2 Hirsespelzen

Cellulose ist Hauptbestandteil der Getreidespelzen. Im Gegensatz zu den vorher getesteten Nebenströmen ist eine einzige Polymerart in hoher Konzentration vorhanden.⁹³ Die ungeniessbaren Schutzhüllen des Getreidekorns fallen bei der Herstellung von getreidehaltigen Lebensmitteln in grossen Mengen an und finden kaum eine Verwendung (vergl. Abbildung 11, S. 22). Der Spelz als Ausgangsmaterial erfüllt gleichzeitig das Kriterium der Ungeniessbarkeit sowie des Nebenproduktes. Im folgenden Vorversuch wurden die chemischen Eigenschaften und möglichen Applikationen von Hirsespelzen genauer betrachtet.

Molekulare und supramolekulare Struktur

Cellulose ist ein Polysaccharid aus 500 bis 5'000 aneinandergereihten D-Glucoseeinheiten.⁹⁴ Durch kristalline Zonen oder Quervernetzungen entstehen stabile, faserartige Strukturen. Die Polymere können aber auch amorphe, also ungeordnete Bereiche bilden. Cellulosemoleküle weisen zahlreiche Hydroxy- und Ketogruppen auf (Abbildung 10).^{95, 96, 97}

Durch eine Erwärmung mit Wasser und Glycerin könnten sich mechanisch möglichst klein verarbeitete Hirsespelzen über Wasserstoffbrücken verbinden. Da Wasser- und Glycerinmoleküle ebenfalls mehrere aktive sowie passive Stellen aufweisen, sollten sie bei diesem Prozess miteingebaut werden.⁹⁸

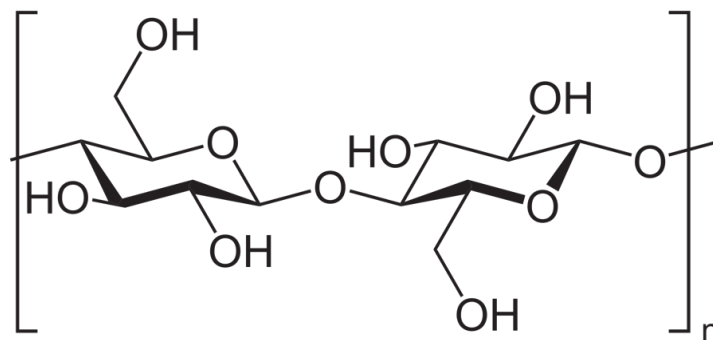


Abbildung 10: Skelettformel von Cellulose.⁹⁹

Materialien und Methoden

Hirsespelzen wurden mit einer Schnitzer Getreidemühle möglichst fein gemahlen, gesiebt und anschliessend mit Wasser und Glycerolum langsam aufgekocht. Nach sieben Minuten stetigem Rühren konnte die dickflüssig gewordene Mischung auf der Innenseite eines Tetra Paks ausgestrichen werden. Die 0.75 mm dicke Schicht trocknete während 24 Stunden vollständig aus.

⁹³ Vergl. Transkription Urs Baier, Kapitel 9.1, S. 46

⁹⁴ Behr & Seidensticker, 2018, S. 142

⁹⁵ Ebd., S. 142

⁹⁶ Kabasci, 2014 S. 38

⁹⁷ Reichert et al, 2020, S. 9

⁹⁸ Thi, 2021

⁹⁹ Wikipedia, *Cellulose*, 2007

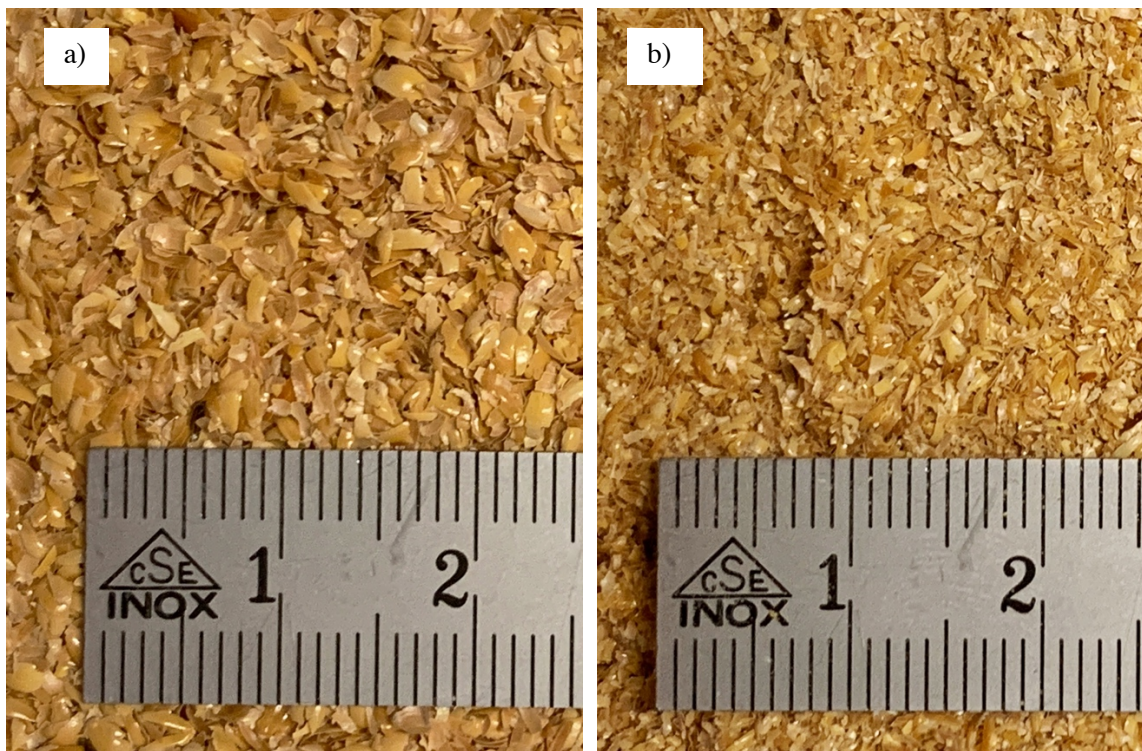


Abbildung 11: Vorbereitung der Hirsespelzen. a) Die Hirsespelzen wurden bei kleinstem Mahlgrad gemahlen. b) Nach dem Mahlprozess wurden die grössten Stücke herausgesiebt und nur der feine Teil verwendet.

Resultate

Die getrocknete Probe liess sich zwar in einem Stück vom plastifizierten Karton lösen, doch war sie nicht besonders stabil (Abbildung 12). Die einzelnen Spelzenstücke lösten sich sehr leicht wieder voneinander.

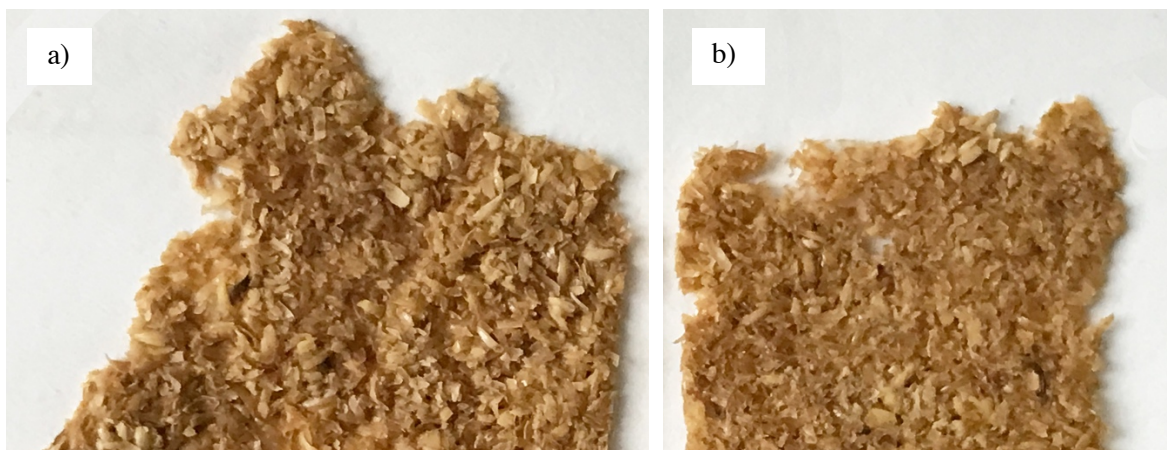


Abbildung 12: Produkt aus Hirsespelzen. Mit Wasser und Glycerin aufgekochte Hirsespelzen zeigen einen sehr schwachen Zusammenhalt. a) zeigt die obere Seite, b) die Unterseite, welche beim Trocknen auf der Unterlage war.

Diskussion

Es zeigte sich, dass Getreidespelzen für die Fabrikation von dünnen, flexiblen und transparenten Folien eher ungeeignet sind. Damit ein Polymermaterial zu einer Folie ausgestrichen werden kann, muss es zuerst in Lösung gehen. Cellulose, der Hauptbestandteil der Spelzen, ist jedoch in Wasser und nahezu allen untoxischen Lösungsmitteln unlöslich. Die hohe Wasserbeständigkeit ist für die natürlichen Schutzfunktion des Spelzes notwendig.^{100, 101, 102}

Trotz der vielen polar gebundenen Wasser- und Sauerstoffatome konnten sich im Versuch vermutlich kaum neue Wasserstoffbrücken bilden. Die einzelnen, ungelösten Stücke kommen sich nur an wenigen Stellen nahe genug. Auch Van-der-Waals-Kräfte können nur an diesen Berührungspunkten wirken (Abbildung 13).

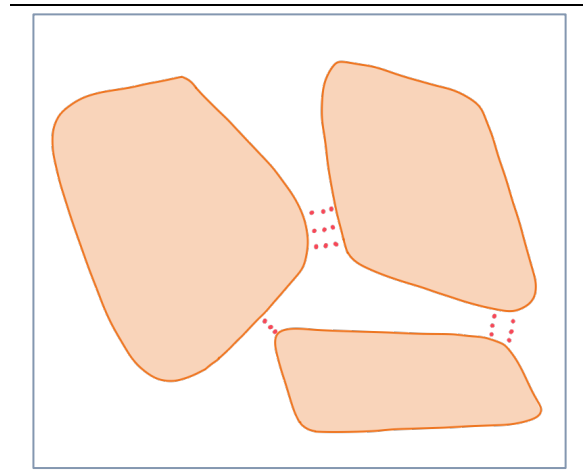


Abbildung 13: Kräfte zwischen Cellulosestücken. Gepunktete Linien kennzeichnen die Stellen, wo zwischenmolekulare Kräfte ausserhalb der einzelnen Hirsespelzen wirken können.

5.1.3 Maisstärke

Stärke fällt im Unterschied zu Cellulose kaum als Nebenprodukt an, da es selbst ein Nahrungsmittel ist. Das natürliche Polymer erfüllt keines der ökologischen Kriterien, es ist weder ungeniessbar noch ein Nebenprodukt. Es hat für ein potentielles Ausgangsmaterial eines Biokunststoffes aber vorteilhafte chemische Eigenschaften. Maizena ist aus Mais gewonnene Stärke und besteht somit hauptsächlich aus einer Polymerart. Maisstärke wurde im folgenden Versuch getestet.¹⁰³

Molekulare und supramolekulare Struktur

Wie Cellulose ist auch Stärke ein Polysaccharid bestehend aus D-Glucose-Einheiten. Diese Monomere sind hier jedoch anders verknüpft. Stärkepolymere können in zwei unterschiedlichen Strukturen aufgebaut sein. Amylose (Abbildung 14) macht bei klassischen Maissorten etwa einen Anteil von 26 % aus.¹⁰⁴ Die molekulare Grösse ist vergleichbar mit Cellulose. Die unverzweigten Moleküle formen bevorzugt Helices, zwischen denen grosse Van-der-Waals-Kräfte wirken können. Zusätzlich können sich an den vielen Hydroxy- und Ketogruppen Wasserstoffbrücken bilden. Durch die regelmässige, unverzweigte Struktur und die grosse Summe der zwischenmolekularen Kräfte kann Amylose kristalline Bereiche bilden (vergl. Abbildung 5, S. 11).^{105, 106, 107}

¹⁰⁰ Vergl. Transkription Urs Baier, Kapitel 9.1, S. 47

¹⁰¹ Reichert et al., 2020, S. 9

¹⁰² Behr & Seidensticker, 2018, S. 142

¹⁰³ Ebd., S. 163

¹⁰⁴ Ebd., S. 161

¹⁰⁵ Kabasci, 2014, S. 38

¹⁰⁶ Reichert et al., 2020, S. 9

¹⁰⁷ Behr & Seidensticker, 2018, S. 160ff

Amylopektin hingegen hat seitliche Verzweigungen (Abbildung 15). So entsteht ein weit verästeltes, ungeordnetes Polymernetzwerk, das auch intermolekulare Bindungen schafft. Es bilden sich amorphe Zonen (vergl. Abbildung 5, S. 11).^{108, 109}

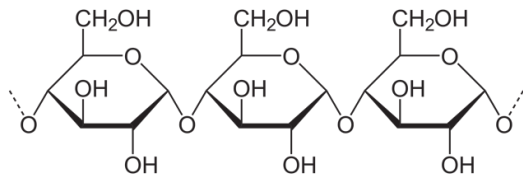


Abbildung 14: Amylose.¹¹⁰

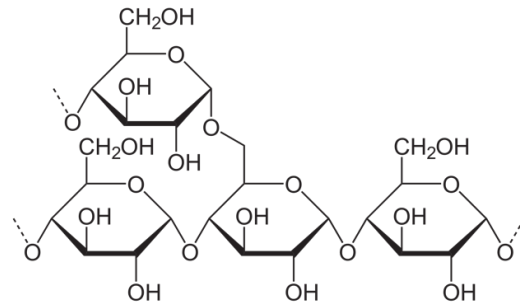


Abbildung 15: Amylopektin.¹¹¹

Mehrere Moleküle bilden unabhängig von ihrer Struktur Stärkekörner (Abbildung 16). Die molekularen und supramolekularen Strukturen führen zu einem starken Zusammenhalt der Moleküle innerhalb eines Stärkekorns. Die einzelnen Stärkekörner sind deshalb trotz der Polarität ihrer Moleküle in kaltem Wasser unlöslich. Mit etwa 10 μm Durchmesser sind sie genug gross, um sichtbares Licht mit einer Wellenlänge im Bereich von 0.4 – 0.8 μm ¹¹² zu reflektieren. Sie erscheinen deshalb weiss. Das farb- und geruchlose Pulver ist bekannt als Maizena.¹¹³

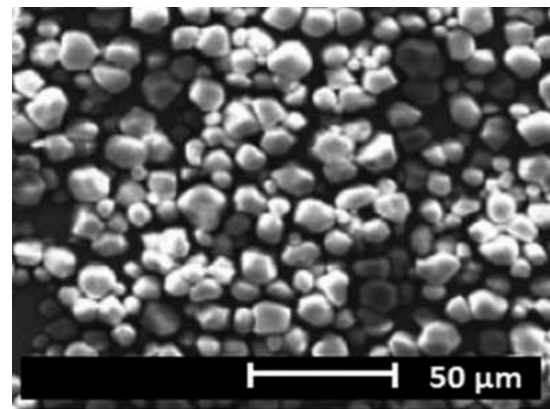


Abbildung 16: Stärkekörner. Stärkemoleküle bilden Körner. Diese sind genug gross, dass sie unter dem Mikroskop erkannt werden können.¹¹⁴

¹⁰⁸ Kabasci, 2014, S. 10 f, S. 14 f

¹⁰⁹ Behr & Seidensticker, 2018, S. 160f

¹¹⁰ Wikipedia, *Stärke*, 2021

¹¹¹ Wikipedia, *Stärke*, 2021

¹¹² Bader & Dorn, 2013, S. 447

¹¹³ Ratnayake & Jackson, 2006, S. 3712

¹¹⁴ Mekonnen, 2013, S. 13387

Verkleisterung

Wird ein Maizena-Wasser-Gemisch erhitzt, können Wassermoleküle in die amorphen Regionen eindringen. Als Konsequenz quillt das Korn auf, kristalline Bereiche werden ebenfalls instabil. Bei Temperaturen von rund 60 – 80 °C, je nach Art der Stärke und Stärke-Wasser-Verhältnis, können die Polymere schliesslich gelöst werden (Abbildung 17).¹¹⁵ Moleküle, die einzeln vorliegen, sind zu klein, um elektromagnetische Wellen im sichtbaren Bereich zu reflektieren. Stattdessen geht das Licht dazwischen hindurch. Das Gemisch erscheint deshalb während dem Erhitzen immer transparenter. Die Zerstörung der granularen Struktur und die daraus resultierende Neuordnung der Polymere wird als Verkleisterung bezeichnet. Diese Umstrukturierung bleibt beim Abkühlen grösstenteils bestehen. Wenn die Temperatur nach dem Giessen der Folie langsam abnimmt, kann es dennoch zu einer Retrogradation kommen: Amylose findet teilweise wieder in eine kristalline Anordnung zurück. Als Konsequenz wird das Material steifer. Mit zunehmendem Kristallinitätsgrad wird auch der Quellungsgrad kleiner: Die Wasserresistenz steigt. In der Anwendung des gesuchten Materials ist das meist eine positive Eigenschaft. Als Konsequenz braucht das Produkt jedoch mehr Zeit bei der biologischen Degradation. Amorphe Bereiche können erhalten bleiben, wenn die noch heisse Masse in die gewünschte Form gegossen und anschliessend schnell abgekühlt wird. So bleibt den Polymeren keine Zeit, sich in kristallinen Zonen anzuordnen.^{116, 117}

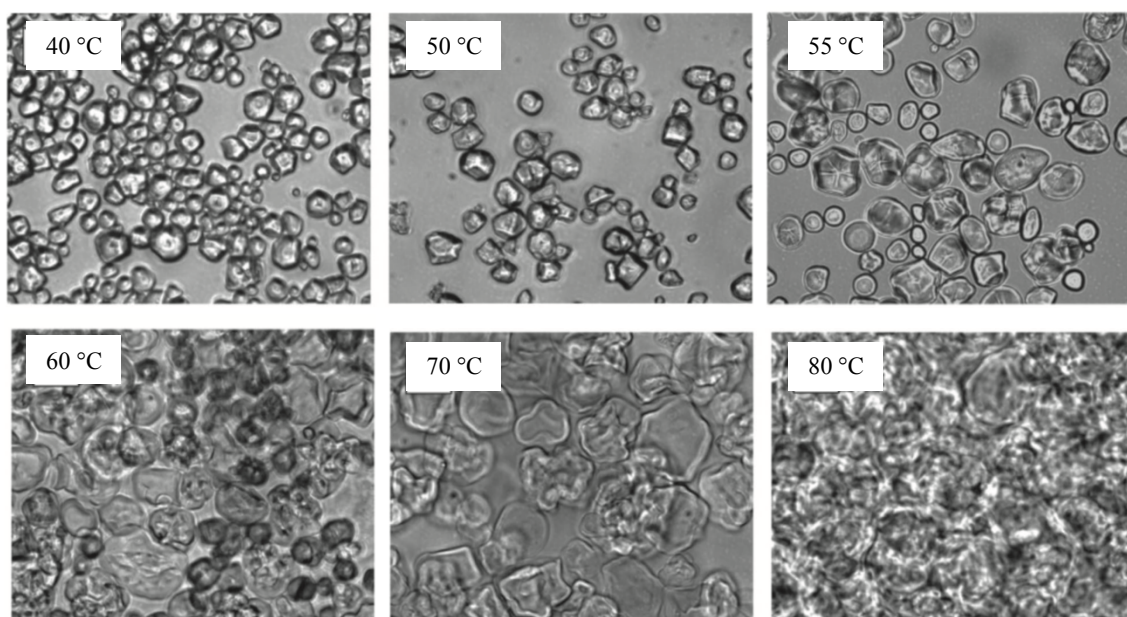


Abbildung 17: Verkleisterung von Stärke durch das Zuführen von thermischer Energie.¹¹⁸

¹¹⁵ Ratnayake & Jackson, 2006, S. 3714

¹¹⁶ Kabasci, 2014, S. 14

¹¹⁷ Reichert et al., 2014, S. 10

¹¹⁸ Ratnayake & Jackson, 2006, S. 3712ff

Materialien und Methoden

10 ml Wasser, 20 g Maizena und 4 ml Glycerin wurden auf 70 °C erhitzt. Die Temperatur sollte stets kontrolliert werden. In den ersten zwei Minuten nehmen Viskosität und Transparenz deutlich zu (Abbildung 18). Es wurden Proben nach einer, zwei, fünf und sieben Minuten entnommen und auf verschiedenen Unterlagen ausgestrichen.

In einem zweiten Versuch wurden für die gleichen Mengen an Wasser und Glycerin nur noch 10 g Maisstärke verwendet. Auch so konnte die gleiche Veränderung der Viskosität während des Kochprozesses beobachtet werden. Die Proben liessen sich gut von Glas und beschichtetem Karton lösen.

In einem zweiten Quellversuch wurden die Massen vor und nach der zweistündigen Quellzeit mit einer Federwaage gemessen. Sie wurden anschliessend für weitere Stunden im Wasser gelassen.

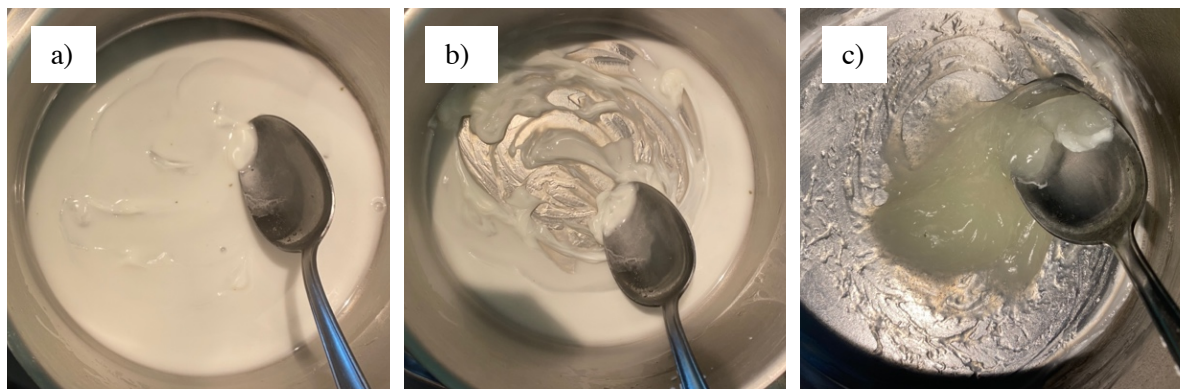


Abbildung 18: Das Maizenagemisch nach a) einer Minute, b) zwei Minuten, c) fünf Minuten.

Resultate

Abbildung 19 zeigt die Resultate nach zwei- und siebenminütiger Kochzeit bei 70 °C. Nach Kochzeiten von zwei bis fünf Minuten entstanden biegsame und sogar etwas elastische Folien (a). Sie konnte deutlich leichter zerrissen werden als eine herkömmliche Plastiktüte. Bei einer Probenentnahme nach sieben Minuten verzog sich das das Resultat während dem Trocknen. Es härtete aus liess sich dann kaum mehr verformen (b). Beim Biegen bildeten sich Risse, bis es schliesslich zerbrach.

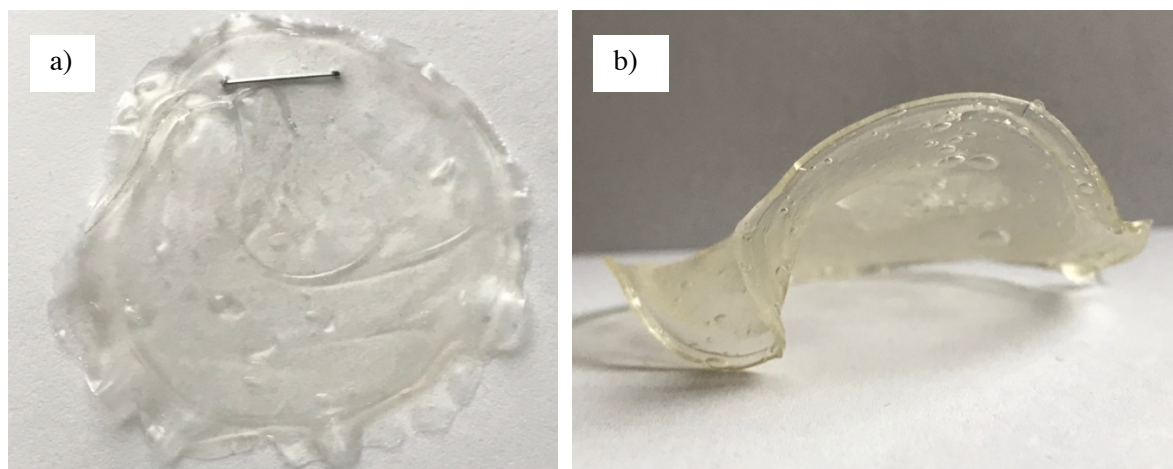


Abbildung 19: Folienprobe nach a) zweiminütiger und b) siebenminütiger Kochzeit. Mit zunehmender Kochzeit wird das Resultat deutlich steifer.

Die verschiedenen Proben unterschieden sich nach einer zweistündigen Quellzeit in der Massenzunahme. Die gemessene Masse vor dem Versuch entspricht 100 %. Abbildung 20 zeigt die neue Masse der gequollenen Folien prozentual zur Masse der trockenen Produkte. Es fällt auf, dass der Quellungsgrad bei längerer Kochzeit abnimmt. Nach mehreren Tagen im Wasser löste sich keine der Folien auf.

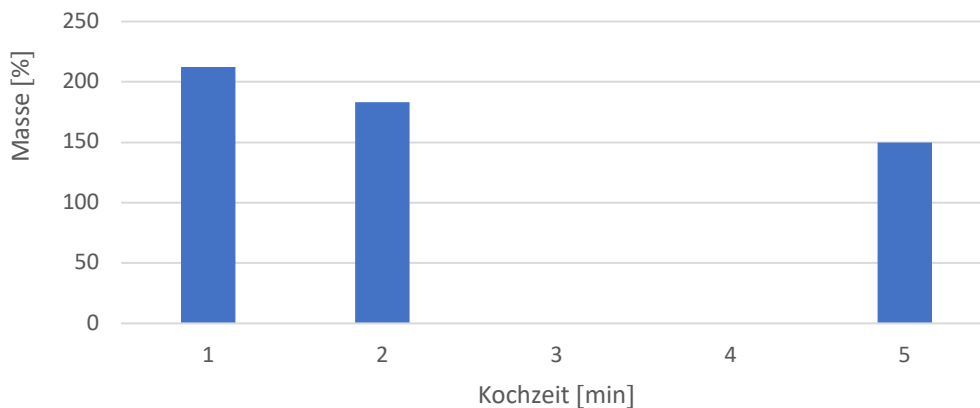


Abbildung 20: Zusammenhang zwischen Kochzeit und Quellungsgrad. Die y-Achse gibt die Masse nach zwei Stunden Quellzeit prozentual zur Masse vor dem Versuch an. Es ist eine abnehmende Quellung mit zunehmender Kochzeit ersichtlich.

Diskussion

Die verlängerte Kochzeit hat eine Abnahme der Flexibilität sowie des Quellungsgrades zur Folge. In der Theoriebearbeitung wurde festgehalten, dass dieselbe Auswirkung durch eine Erhöhung des Kristallinitätsgrades erzeugt werden kann (vergl. Kapitel 4.1.1 und 4.1.2, S. 10ff). Möglicherweise nimmt der Kristallinitätsgrad zu, weil die Moleküle während dem längeren Erhitzen mehr Zeit haben, sich in geordnete Strukturen einzugliedern.

Dieser Versuch hat gezeigt, dass sich Maisstärke aus chemischer Sicht als Basis für eine Bioplastikfolie eignen könnte. Dadurch würde der wertvolle Nährstoff aber in der Nahrungsmittelkette fehlen. Die Produktion von Maizena könnte Anbauflächen und weitere Ressourcen von anderen Sektoren einschränken. Aus ökologischer Sicht werden stärkebasierte Biokunststoffe deshalb eher kritisch betrachtet.¹¹⁹

5.1.4 Fazit der Vorversuche

In den Hirsespelzen wurde ein ungenießbarer Nebenstrom gefunden, welcher den ökologischen Anforderungen entspricht. Aufgrund der chemischen Eigenschaften lassen sie sich aber nicht gut zu einer Folie weiterverarbeiten. Maisstärke hingegen hat trotz der ähnlichen molekularen Struktur einen entscheidenden Vorteil: Sie wird unter Erhitzung wasserlöslich. Da beide Polysaccharide viele Wasserstoffbrücken bilden, könnte gelöste Stärke die Räume zwischen den Spelzenstücken überbrücken (vergl. Abbildung 13, S. 23) und so eine Art Kleberfunktion übernehmen.

¹¹⁹ Lemcke & Rietz, 2021

5.2 Herstellung der Folien

Im folgenden Experiment wurde versucht, eine reine Maizenafolie sowie ein Komposit aus Stärke und Cellulose herzustellen. Im Kapitel 5.3 sollten die beiden Folientypen anhand des Quellungsgrades verglichen werden.

5.2.1 Materialien und Methoden

Von beiden Folien wurden je vier Prototypen hergestellt. Somit mussten die in Tabelle 2 aufgelisteten Portionen für die Maizenafolien und das Komposit jeweils vier Mal bemessen, aber noch nicht durchmischt werden. Das Verhältnis des Feststoffes zum Wasser wurde für beide Folientypen bei 5 g auf 50 ml gehalten. Im Komposit sollte der Nebenstrom einen wesentlichen Bestandteil der Stärke ersetzen. Er durfte aber auch nicht überwiegen, weil das Produkt sonst zu instabil werden könnte (vergl. Kapitel 5.1.2 Diskussion, S. 23). Stärke und Spelzen stehen deshalb im Verhältnis 3 zu 2.

	Menge	Produkt	Weitere Angaben
	1	Gusskochplatte	Ø 9 cm
	1	Pfanne	Ø 9 cm, Höhe: 6 cm
	1	Rührkelle oder Löffel	Aus Metall oder Holz
	1	Thermometer	Skala von -20 °C bis 150 °C
	2	Plexiglasplatten	PMMA, 30 x 40 cm
	1 Bogen	Aquarellpapier	Dicke: 0.75 mm (300 g/m ²)
	4	Nummerierte Etiketten	Wieder ablösbar
	1	Getreidemühle	Kleinster Mahlgrad
	1	Sieb	Maschengrösse 0.8 × 0.8 mm
Maizenafolie:	50 ml	Wasser	Deionisiert
	2 ml	Glycerolum	85 %
	5 g	Maisstärke	Kohlenhydrate: 88 g / 100 g
Komposit:	50 ml	Wasser	Deionisiert
	2 ml	Glycerolum	85 %
	3 g	Maisstärke	Kohlenhydrate: 88 g / 100 g
	2 g	Hirsespelzen	Ø ≤ 0.8 mm

Tabelle 2: Materialliste für die Herstellung der Folien.

Vorbereitung und Aufbau

Für das Abkühlen beider Folientypen musste alles schon vor Beginn des Experimentierens bereitgestellt sein (Abbildung 21). Eine Probe des Gemischs würde später zwischen zwei Plexiglasscheiben flach ausgedrückt werden. Papierrahmen sorgten für eine konstante Dicke von 0.75 mm. Damit vier Wiederholungen einzeln auf einer Plexiglasscheibe ausgestrichen werden konnten, mussten vier kleinere Deckplatten zugeschnitten werden. Jede von ihnen trug die Nummer des jeweiligen Durchgangs.

Damit auch der erste Durchgang möglichst gleich startete wie die folgenden wurde ein kleiner Behälter mit etwas Wasser gefüllt und auf 80 °C erhitzt. Sobald sich der Wert konstant hielt, sollte die Leistungsstufe der Herdplatte nicht mehr verändert werden. Das Wasser diente dabei nur zur Temperaturbestimmung und wurde vor dem ersten Durchlauf weggeleert.



Abbildung 21: Aufbau zur Formgebung und Trocknung der Folien.

Durchführung

Die anschließende Durchführung sollte ebenfalls für alle acht Proben möglichst analog ablaufen. Es wurde eine Kochzeit von fünf Minuten gewählt, damit die Produkte beweglich bleiben und gleichzeitig einen möglichst tiefen Quellungsgrad aufweisen. Beim Erhitzen der Mischung war darauf zu achten, dass stetig gerührt und die Temperatur überprüft wurde. Auch hier wurde sie im Innern der Pfanne mit einem Thermometer ständig gemessen. Bei allen acht Wiederholungen verlief die Temperaturkurve etwa gleich (Abbildung 22). Während der zweiten Minute begann der wässrige Inhalt vom Boden her einzudicken. Nach fünf Minuten wurden kleine Proben von etwa 4 g innerhalb der Papierrahmen rasch ausgestrichen. Da sich später nicht ganz alles in einem Stück von der Unterlage lösen lassen würde, musste die Masse nicht sehr exakt bemessen sein. Damit sich möglichst keine Lufteinschlüsse bildeten, sollte das ausgestrichene Gemisch keine konkaven Stellen aufweisen, bevor es mit einer Plexiglasplatte bedeckt wurde. Damit sich die Unterlage nicht zu stark erwärmte und dadurch verformte, durfte nicht zu viel auf einmal aufgetragen werden.

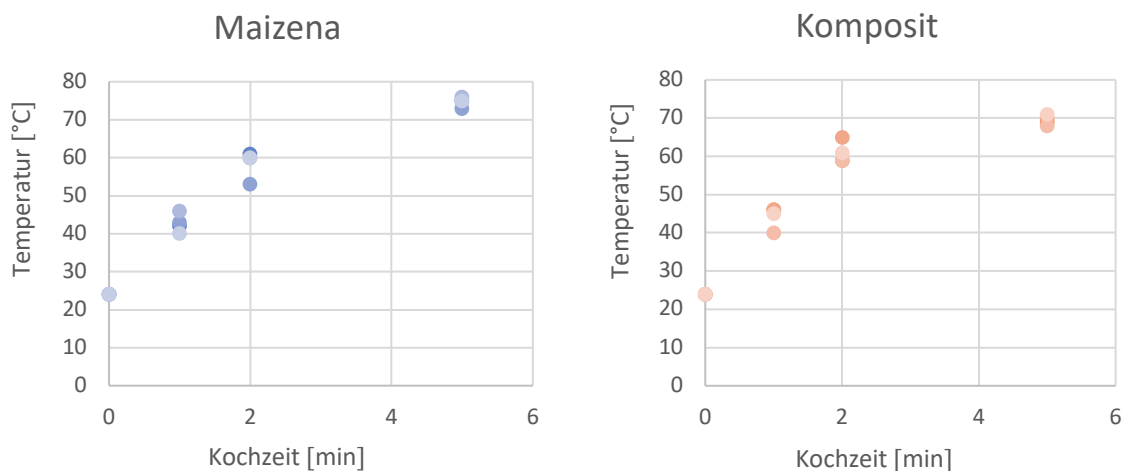


Abbildung 22: Temperaturverläufe der einzelnen Proben. Jede Farbe zeigt die gemessenen Temperaturen einer Probe.

5.2.2 Resultate

Die Kompositproben zerrissen zwar nicht beim Trocknen, hafteten aber zu fest an der Unterlage. Alle Folien bis auf eine liessen sich nicht in einem Stück von der Plexiglasplatte lösen. Es wurden vier neue Proben hergestellt und durch schwächeres Andrücken der Deckplatte etwas dicker gemacht (Abbildung 23 b, c, d). Die scheinbar geringere Dichte der Hirsespelzen in Abbildung 23 a weist auf die dünnere Folie aus dem ersten Versuch hin. b, c und d sind dicker und enthalten deshalb mehr Spelzen pro Flächeneinheit. Dies zeigt sich in der abnehmenden Transparenz.



Abbildung 23: Acht der neun finalen Proben der zwei Folientypen. Die Folienprobe a) des ersten Durchgangs ist dünner als b), c) und d) des zweiten Durchgangs.

5.2.3 Diskussion

Gemeinsamkeiten und Unterschiede der Folieneigenschaften

Der offensichtlichste Unterschied der beiden Folientypen liegt in der optischen Erscheinung. Der Spelz verringert die Transparenz der Folie, weil die Cellulosestücke kein Licht durchlassen. Je nach Verpackung kann das positiv oder negativ auffallen.

Die Cellulosemoleküle sind vermutlich auch für die geringere Biegsamkeit verantwortlich. Sie sind in einem dichteren Polymernetzwerk angeordnet und haben dadurch weniger Bewegungsfreiheit. Obwohl die natürliche Schutzhülle des Hirsekorns über eine grosse mechanische Stabilität verfügt, ist das Komposit aus Spelzen und Stärke nicht reissfester. Das lückenfüllende Maizenamaterial würde unter der gleichen Zugkraft nachgeben wie die reine Maizenafolie. Vielleicht geben die Berührungsstellen zwischen den beiden verschiedenartigen Polymeren sogar noch schneller nach. Einen aussagekräftigeren Vergleich der Reissfestigkeit wäre mithilfe einer Zugprüfmaschine möglich.^{120, 121}

Das Hirsspelzkomposit von 0.75 mm Dicke löste sich im Gegensatz zur reinen Maizenafolie sehr schlecht in einem Stück von der Unterlage. Es haftete stärker an der Plexiglasplatte, was aber auch darauf hindeuten könnte, dass mehr Material für die gleiche mechanische Stabilität nötig ist. Die Komposite wurden durch die grössere Dicke schwerer, was sich negativ auf einen Transport auswirken würde.¹²²

Optimierungsmöglichkeiten

Möglicherweise hätten beide Folien an Stabilität gewonnen, wenn sie länger und stärker erhitzt worden wären. Vilpoux und Avérous hielten fest, dass die Stärke zur Herstellung von Kunststoffen für mehr als 30 Minuten bei Temperaturen über 90 °C gehalten wurde.¹²³ Wie die Vorversuche gezeigt haben, müsste dabei für eine Erhaltung der Elastizität und Flexibilität der Retrogradation vorgebeugt werden. Wenn die noch heisse Masse sofort zu einer Folie ausgestrichen und schnell abgekühlt wird, haben die Moleküle weniger Zeit, sich wieder in kristallinen Bereichen anzuordnen. Spannend wäre zu vergleichen, ob sich beide Materialien mit zunehmender Kochzeit gleich verändern würden oder nicht.¹²⁴

Beim Maizenaversuch betrug das Verhältnis Stärke [g] zu Wasser [ml] eins zu zehn. Für das Komposit wurde dasselbe Verhältnis auf Feststoff und Wasser angewandt. Die Menge der Feststoffe setzte sich hier zu zwei Fünftel aus Spelzen und zu drei Fünftel aus Maizena zusammen. Die Stärke machte also nur 60 % des Feststoffes aus. Da die Flüssigkeit lediglich für die Verkleisterung der Stärke notwendig war, hätten 60 % der Wassermenge vermutlich ausgereicht. Wahrscheinlich ist dieser Überschuss einfach als Dampf entwichen und hat deshalb das Experiment nicht gestört.

Hitzebeständigere Glasplatten hätten sich vermutlich besser geeignet. Das Plexiglas hat sich trotz der kleinen aufgetragenen Mengen unter der Hitze leicht gewölbt.

Das Hirsspelzkomposit konnte nicht gleich dünn gemacht werden wie die Maizenafolien. Wären die Maizenaprobieren ebenfalls dicker hergestellt worden, würde das den späteren Vergleich vereinfachen.

¹²⁰ Schäfer et al, 2018, S. 10

¹²¹ Faunhofer Institut für Verfahrenstechnik und Verpackung, 2021

¹²² Migros, *Weniger Verpackung ist mehr*, o. J.

¹²³ Vilpoux & Avérous, 2004, S. 524

¹²⁴ Kabasci, 2014, S. 14

5.3 Quellversuch

Bereits in den Vorversuchen konnte festgehalten werden, dass sich die Produkte in Wasser zwar nicht unmittelbar auflösen, jedoch benetzbar sind. Sie quellen also auf. Wassermoleküle können eindringen und sich mittels Wasserstoffbrücken festsetzen. Je mehr Molekülen das gelingt, desto grösser ist der Quellungsgrad. Weil diese Eigenschaft für die Wasserdampfdurchlässigkeit sowie den biologischen Abbau massgeblich ist, wurde sie im folgenden Experiment quantifiziert. Die Resultate ermöglichten einen Vergleich zwischen den Maizenaprodukten, dem Komposit und herkömmlichen Plastikfolien (vergl. Kapitel 4.1.2, S. 12 und 4.3.1, S. 14).¹²⁵

Weil die Kompositproben dicker als die Maizenafolien sind, weisen sie mehr Gramm pro Quadratzen-timeter Oberfläche auf. Wassermoleküle können nur über die Oberfläche eindringen, was die Quellung des Komposits zusätzlich verkleinert. Bei der Diskussion der Resultate muss dieser Faktor berücksich-tigt werden.

5.3.1 Hypothese

Das Komposit kann weniger Wassermoleküle aufnehmen als die Maizenaprodukte. Folglich quillt es weniger auf, die Massenzunahme nach der Quellung ist geringer.

Die natürliche Schutzfunktion des Spelzes bedingt eine grössere Wasserresistenz, welche auf ein dichter-eres Polymernetzwerk zurückzuführen ist. Obwohl sich die Stärke- und Cellulosemoleküle im moleku-laren Aufbau sehr ähnlich sind, lässt die supramolekulare Struktur des Spelzes weniger Volumen zwi-schen den Molekülen frei. Als Konsequenz können weniger Wassermoleküle eingelagert werden.¹²⁶

5.3.2 Materialien und Methoden

	Menge	Produkt	Weitere Angaben
Für jeweils zwei Proben:	1	Elektrische Waage	0 – 160 g, +10 / –15 %
	1	Becherglas	600 ml
	600 ml	Hahnenwasser	Raumtemperatur (24 °C)

Tabelle 3: Materialliste für den Quellversuch.

Die Quellbarkeit sollte durch die Zunahme der Massen nach der Quellung bestimmt werden und einen Vergleich der beiden Folien ermöglichen. Jeweils zwei Proben wurden gewogen und zusammen in ein Becherglas gegeben, wobei nur Folien von gleicher Zusammensetzung in einem Gefäss waren (Abbil-dung 24). Reichlich Hahnenwasser wurde dazu gegossen, möglichst ohne Wirbel zu erzeugen. Da die Folien in der Anwendung auch nicht mit deionisiertem Wasser in Kontakt wären, kommt dieses Expe-riment mit natürlichem Wasser der Realität näher.

Nach drei Stunden hatten sich kleine Luftbläschen an den Folienoberflächen gebildet. Manche Stücke waren an die Oberfläche gekommen und dadurch nicht mehr ganz mit Wasser bedeckt. Vorsichtig wur-den die Folien herausgenommen, rasch abgetupft und erneut gewogen. Es durften sich keine Wasser-tropfen mehr auf der Oberfläche befinden, aber es sollte aber auch möglichst keine Feuchtigkeit ver-dunsten oder mit dem Papiertuch aus der Folie gezogen werden.

¹²⁵ Schäfer et al., 2018, S. 10

¹²⁶ Vergl. Transkription Urs Baier, Kapitel 9.1, S. 47



Abbildung 24: Zwei Folienproben im Wasser.

5.3.3 Resultate

In der nachstehenden Auswertung sind die Proben nach zunehmender Masse pro Flächeneinheit ($m(\text{vorher}) / A$) geordnet. Dieser Quotient ist proportional zur Dicke der Folie. Daraus folgt, dass die erste Probe die geringste Dicke aufweist. Die Quellungsgrad Q beschreibt die Masse nach dem Quellungsversuch prozentual zur Masse davor. Die durchschnittlichen Quellungsgrade der beiden Produkte «Maizena» und «Komposit» sind mit Farbe hervorgehoben. Diese sollen in der Diskussion besprochen werden. Die berechneten Werte wurden auf vier Stellen nach dem Komma gerundet.

$m(\text{vorher})$ [g]	=	Masse vorher
$m(\text{nachher})$ [g]	=	Masse nachher
l [cm]	=	Länge
b [cm]	=	Breite
A [cm ²]	=	Fläche
Q [%]	=	Quellungsgrad

$$Q = \frac{m(\text{vorher})}{m(\text{nachher})} \cdot 100 \%$$

	Nr.	l	b	$m(\text{vorher})$	$m(\text{nachher})$
Maizena:	1	6.5	5.8	0.2741	0.4736
	2	9	8	0.6394	1.0824
	3	9	6	0.5646	0.9617
	4	8.5	8	0.7489	1.2529
Komposit:	1	7	9	0.6686	1.088
	2	6	8.5	0.8566	1.3649
	3	3.5	8.5	0.5039	0.7604
	4	7	12.5	1.9965	2.8935
	5	5	9	1.0331	1.695

Tabelle 4: Gemessene Werte jeder Probe.

	Nr.	A	$\frac{m(vorher)}{A}$	Q
Maizena:	1	37.7	0.0073	172.78
	2	72	0.0089	169.28
	3	54	0.0105	170.33
	4	68	0.0110	167.30
Durchschnitt				169.92
Standartabweichung				2.28
Komposit:	1	63	0.0106	162.73
	2	51	0.0168	159.34
	3	29.75	0.0169	150.90
	4	87.5	0.0228	144.93
	5	45	0.0230	164.07
Durchschnitt				156.39
Standartabweichung				8.2054

Tabelle 5: Berechnete Werte jeder Probe.

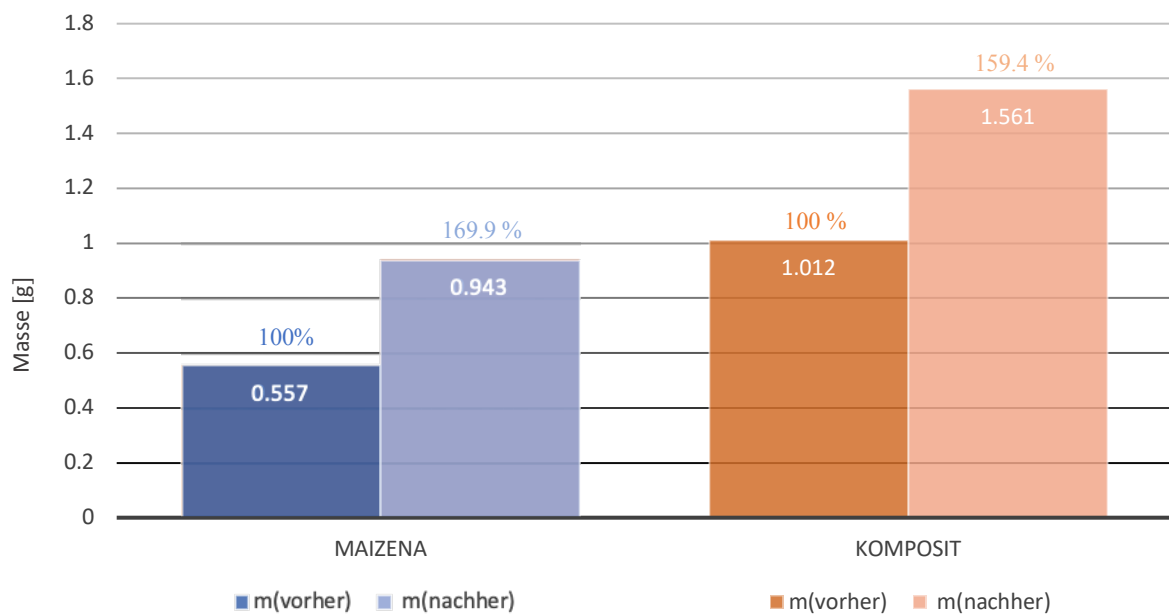


Abbildung 25: Durchschnittliche Massenzunahme der beiden Folientypen. Das Diagramm zeigt, wie sich die durchschnittliche Masse nach dreistündiger Quellzeit verändert hat. Die prozentuale Zunahme entspricht der Quellzahl Q.

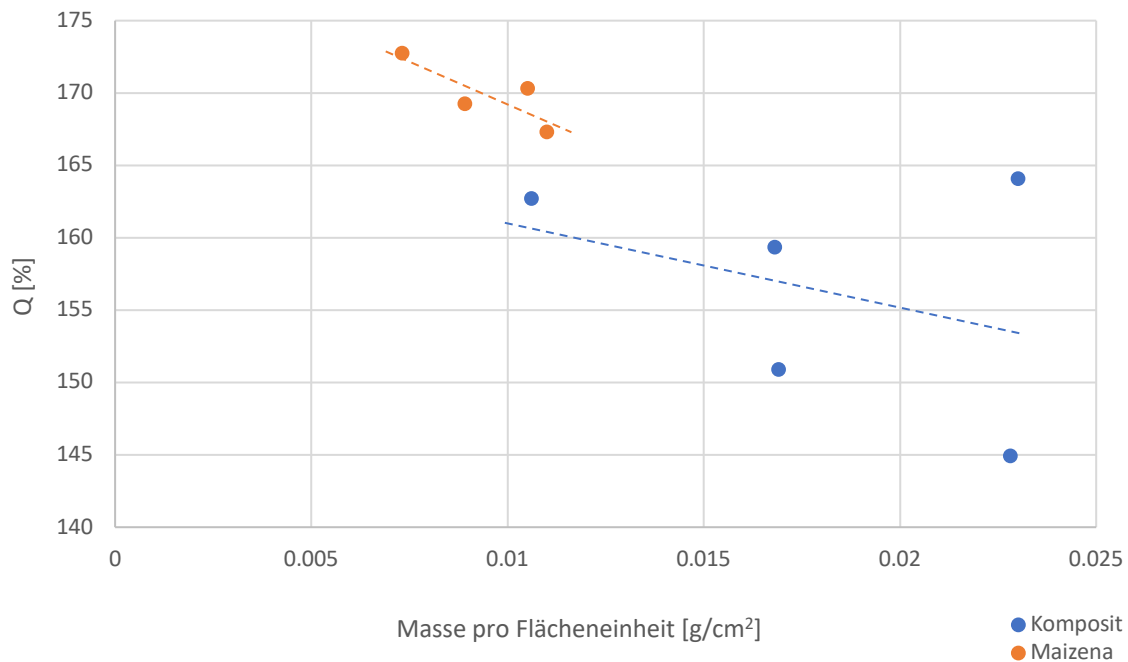


Abbildung 26: Der Zusammenhang zwischen dem Quellungsgrad und der Foliendicke. Gezeigt wird jeder berechneten Quellungsgrad Q in Funktion zur jeweiligen Masse pro Flächeneinheit. Die Daten wurden aus der Tabelle 5 entnommen und die Trendlinien gestrichelt eingezeichnet.

5.3.4 Diskussion

Anhand der Abbildung 26 musste zuerst geklärt werden, inwiefern die Dicke einen Einfluss auf die Resultate hat. Der Quellungsgrad der Maizenaprobe nimmt mit zunehmender Masse pro Flächeneinheit deutlicher ab. Bei den Kompositfolien ist die Streuung der Daten deutlich grösser. Die Trendlinie der Komposite liegt allerdings nicht in der direkten Verlängerung derjenigen der Maizenafolien, sondern deutlich tiefer. Auch die Steigung ist unterschiedlich. Das spricht dafür, dass das Komposit generell einen tieferen Quellungsgrad hat. Die Maizenafolien sind nicht nur wegen der im Schnitt geringeren Dicke stärker gequollen. Diese Stellungnahme könnte mit mehr Daten und zusätzlichen Messungen nach einer längeren Quellzeit genauer überprüft werden. Mit den vorhandenen Daten ist es nicht möglich, den Einfluss der Dicke und des Materials selber gegeneinander abzuwägen. Für einen präziseren Vergleich der Maizena- und Kompositfolien wäre es deshalb hilfreich, wenn bei allen Proben die gleiche Dicke eingehalten werden könnte.

Wenn genauer beurteilt werden soll, wie stark die unterschiedliche Masse pro Flächeneinheit das Resultat beeinflusst, müsste ein grösseres Spektrum an verschiedenen Dicken abgedeckt werden.

Vergleich der beiden Materialien

Für die weitere Auswertung wurde angenommen, dass sich in beiden Folientypen die maximale Anzahl Wassermoleküle festsetzen konnte und die Dicke somit keinen Einfluss mehr hat. Unter dieser Voraussetzung quillt Stärke nach einem analogen Verarbeitungsverfahren um etwa 13 % mehr als Cellulose (vergl. Tabelle 5: Berechnete Werte jeder Probe).

$$Q(\text{Maizena}) - Q(\text{Komposit}) = 169 \% - 156 \% = 13 \%$$

Mit der folgenden Rechnung wurde der Quellungsgrad von Hirsespelzen gefunden. Die Wasser- und Glycerolanteile wurden nicht berücksichtigt.

$$\begin{aligned} \frac{3}{5} \cdot Q(\text{Maizena}) + \frac{2}{5} \cdot Q(\text{Hirse}) &= Q(\text{Komposit}) \\ \frac{3}{5} \cdot 169 \% + \frac{2}{5} \cdot Q(\text{Hirse}) &= 156 \% \\ \frac{2}{5} \cdot Q(\text{Hirse}) &= 54 \% \\ Q(\text{Hirse}) &= 136.5 \% \end{aligned}$$

Die Hypothese hat sich bestätigt, dass Hirsespelzen mit einem Quellungsgrad von 136.5 % weniger Feuchtigkeit aufnehmen können als Maisstärke ($Q = 169 \%$). Ein grösserer Vernetzungsgrad der Cellulose würde den geringeren Quellungsgrad erklären. Vermutlich ist das Maizenamaterial Wasserdampf gegenüber durchlässiger als eine Kombination aus Stärke und Cellulose.

Vergleich vor und nach der Quellung

Die noch feuchten Folien waren deutlich fragiler und weicher. Durch das Aufquellen verloren alle Proben deutlich an mechanischer Stabilität: Sie waren viel leichter zu zerreißen (Abbildung 27 a).

Während die gequollenen Folien noch elastisch und biegsam waren, knickten die getrockneten leicht und knisterten beim Bewegen (Abbildung 27 b). Vermutlich wurde der Weichmacher Glycerol beim Quellversuch herausgewaschen. Er war nur über Wasserstoffbrücken eingebettet, die deutlich schwächer sind als kovalente Bindungen. Der Verlust des Weichmachers macht sich in der steiferen Konsistenz der Folie bemerkbar.¹²⁷

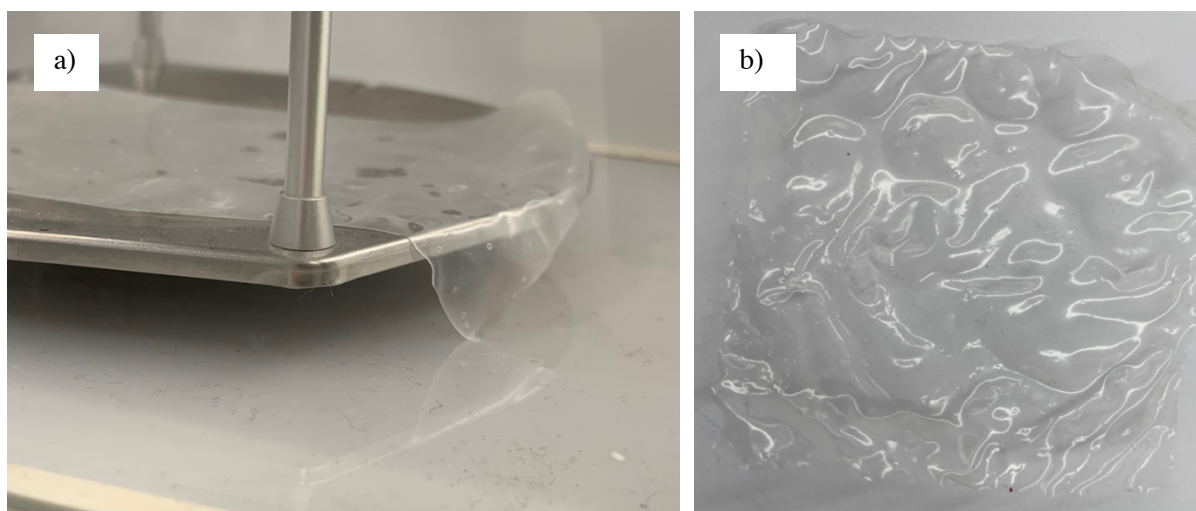


Abbildung 27: Veränderungen nach dem Quellversuch. a) Die noch feuchte Folie hängt schlaff über den Rand der Waagschale. b) Die getrocknete Folie deutlich steifer geworden und hat sich verzogen.

¹²⁷ Schäfer et al., 2018, S. 10

Mögliche Anwendungsbereiche

Auf Grund der hohen Wasserdurchlässigkeit wären die Materialien eher ungeeignet für feuchte Lebensmittel, die möglichst lange frisch bleiben sollten. Nehmen sie viele Wassermoleküle auf, verlieren sie an mechanischer Stabilität. Die Folien, welche in dieser Arbeit hergestellt wurden, eignen sich hingegen für fettige Speisen, die sofort konsumiert werden (Abbildung 28).



Abbildung 28: Mögliche Anwendung der untersuchten Biofolien. Weil die biologisch abbaubaren Folien hydrophil sind, quellen sie beim Kontakt mit Wasser. Sie könnten sich aber als Tüte für fettige Speisen eignen.

6 FAZIT

Ziel war es, durch biobasierte und bioabbaubare Lebensmittelverpackungen einen Materialkreislauf zu schliessen und dadurch die Einwegprozesse zu reduzieren.

Im Theorieteil wurden ökologische und technische Anforderungen an das biologische Ausgangsmaterial herausgearbeitet. Biopolymere aus einem ungenutzten Nebenstrom erfüllen die gestellten Bedingungen. Experimente zeigten jedoch, dass eine Biofolie aus den getesteten Nebenprodukten nicht einfach herzustellen war. Es eignen sich nicht alle Naturpolymere für diese Verwendung. Während sich ungenutzte Getreidespelzen aus ökologischer Sicht anbieten, haben sie ungeeignete chemische Eigenschaften. Der Einsatz von Zucker oder Stärke ist hingegen ökologisch nicht sinnvoll, wenn für ein Verpackungsmaterial Nutzpflanzen angebaut werden müssen. Im Rahmen der Arbeit wurde kein Ausgangsstoff gefunden, welcher die geforderten ökologischen und chemischen Bedingungen gleichzeitig erfüllt.

Aus einer Kombination von Maisstärke und Hirsespelzen wurden Biofolien für den Vergleich mit konventionellen Kunststoffen hergestellt. Petrochemische Kunststoffe zeichnen sich durch ihre ausgeprägte Wasserresistenz aus. Sie quellen nicht auf und lassen kaum Wasserdampf hindurch. Als Konsequenz lässt sich der Stoff nicht biologisch abbauen. Die getesteten Biofolien hingegen zeigen eine viel geringere Wasserbeständigkeit. Die Masse nach einer dreistündigen Quellzeit im Wasser betrug durchschnittlich 156 % der ursprünglichen Masse. Bei einem Produkt allein aus Maisstärke betrug der Quellungsgrad im Schnitt 169 %. Dieses hydrophile Verhalten begünstigt einen biologischen Abbau des Materials. Dafür bedeutet die Aufnahme von vielen Wassermolekülen eine grosse Wasserdampfdurchlässigkeit in der Applikation. Sie sind ungeeignet für die Verpackung feuchter Lebensmittel. Eine gleichzeitige Erfüllung von funktionalen Ansprüchen und Biodegradation wird durch diesen Zielkonflikt erschwert. Weltweit macht Bioplastik einen Marktanteil von 1 % aus, die restlichen Plastikverpackungen sind petrochemisch. Die rund 70-jährige Entwicklungsgeschichte der konventionellen Kunststoffe zeigt sich in den schwer zu übertreffenden Eigenschaften.¹²⁸ Verpackungen aus Bioplastik hingegen sind eine sehr junge Entwicklung und deshalb technisch aber auch ökonomisch kaum konkurrenzfähig mit petrochemischen Produkten.

Ist eine weitere Entwicklungsarbeit von Biokunststoffen dennoch sinnvoll, um eine nachhaltige Alternative zu Plastikverpackungen zu finden? Ich denke, man sollte an dieser Stelle kritisch hinterfragen, ob die Erforschung von möglichen Plastikersatzprodukten der einzig richtige Ansatz ist.

Das Argument, dass ein Lebensmittel besser gut verpackt verkauft wird als wegen mangelnder Verpackung verdirbt, ist in den meisten Fällen faktisch gut belegt. Es rechtfertigt die Suche nach alternativen, ökologischen Verpackungsmaterialien, welche für eine lange Haltbarkeit des Inhalts garantieren können.^{129, 130, 131}

¹²⁸ Griffin, 1994, S. 97

¹²⁹ Migros, *Warum werden Biofrüchte und -gemüse in Plastik verpackt?*, o. J.

¹³⁰ Schmid, 2019, S. 8

¹³¹ Vergl. Transkription Judith Wemmer, Kapitel 9.3, S. 58

Wenn ein Lebensmittel zur Verbesserung der Haltbarkeit verpackt verkauft werden soll, könnte ein biobasierter Plastik eine gute Alternative sein. Das ist er aber nur dann, wenn das Ausgangsmaterial nicht extra produziert wird, sondern Nebenströme eingesetzt werden. Wenn die Verpackung gleichzeitig auch biologisch abbaubar sein sollte, wirkt sich das meist negativ auf die Funktionalität aus. Die biologische Abbaubarkeit steht in direktem Widerspruch zur gewünschten Stabilität in der Anwendung. Eigenschaften wie die Durchlässigkeit von Wasserdampf begünstigen zwar die Degradation, verschlechtern aber gleichzeitig die Haltbarmachung des Lebensmittels. Die biologische Abbaubarkeit ist deshalb für diesen Anwendungsbereich nicht immer günstig. Bei der Verbrennung einer biobasierten wird der Materialkreislauf trotzdem geschlossen. Dabei entsteht die gleiche Menge CO₂ wie bei der Biodegradation. Diese Eigenschaft kann hingegen dann sinnvoll sein, wenn eine grosse Wahrscheinlichkeit besteht, dass das Material in der Umwelt verbleibt. Ein Beispiel dafür könnte der Kleber auf der Orange sein, der mit der Schale auf dem Komposthaufen landet. Insgesamt ist der Begriff 'Bioplastik' viel zu ungenau, um zu beurteilen, ob ein Material ökologisch sinnvoll ist oder nicht.¹³²

Dennoch kann alleine die Suche nach alternativen Verpackungsmaterialien der Umweltproblematik nicht genügend entgegenwirken. Auch wenn etablierte Institutionen wie die Wissenschaft und die Politik ihren Beitrag leisten sollen, braucht es genauso ein Umdenken in der Gesellschaft. Sobald die Konsumierenden ebenfalls ein Bewusstsein für die Problematik der Einweg-Verpackung entwickeln und beim Konsum Verantwortung übernehmen, können auch unverpackte Produkte angemessen gelagert und rechtzeitig konsumiert werden. Ob Bio oder nicht, ein Plastikverzicht bedingt am meisten Eigenverantwortung, ist aber die umweltfreundlichste Option.

7 AUSBLICK

Die Verwendung von Molke in der Lebensmittelverpackungstechnik wurde intensiv erforscht. Molkenproteinerzeugnisse werden noch nicht als eigenständige Verpackungsmaterialien eingesetzt, dazu haben sie keine ausreichende mechanische Stabilität. Jedoch können sie wegen ihrer guten Barriereeigenschaft gegenüber Sauerstoff und Wasserdampf in mehrschichtigen Folien (engl. *multilayer films*¹³³) eingesetzt werden (Abbildung 29). Ein Material alleine schneidet nicht in allen Kriterien hervorragend ab, dafür können mehrere Komponenten ein breiteres Spektrum abdecken. So wird eine längere Haltbarkeit des Lebensmittels gewährleistet. Als Beschichtung zwischen zwei unterschiedlichen Kunststofflagen erlaubt ein *Wheylayer*¹³⁴ sogar deren Trennung und somit auch die Rezyklierung der einzelnen Plastiksorten nach dem Gebrauch.^{135, 136, 137, 138}

¹³² Vergl. Transkription Urs Baier, Kapitel 9.1, S. 48

¹³³ Cinelli et al., 2016, S. 1

¹³⁴ Schmid et al., 2012, S. 2

¹³⁵ Reichert et al., 2020, S. 10

¹³⁶ Cinelli et al., 2016, S. 12

¹³⁷ Zink et al., 2016, S.30

¹³⁸ Schmid, 2012, S. 2



Abbildung 29: Eine mehrschichtige Folie aus PE, einem *Whey-layer* und PET.¹³⁹

Abbildung 30 zeigt zwei aktuelle Beispiele eines sogenannten Wood-Plastic-Composite. Diese bestehen meist aus einem cellulosebasierten Material, welches meist mit PP, PE oder PVC kombiniert wird. So kann die Menge an petrochemischen Erzeugnissen reduziert werden. Das in dieser Arbeit behandelte Stärke-Cellulose-Komposit fällt zwar nicht in die Kategorie eines richtigen Plastiks, macht sich aber ebenfalls Cellulose als Füllstoff zunutze.¹⁴⁰



Abbildung 30: Ein Button und ein Besteckstück aus Bioplastik.

¹³⁹ Cinelli, 2016, S. 8

¹⁴⁰ Wikipedia, *Wood-Plastic-Composite*, 2021

8 VERZEICHNISSE

8.1 Literaturverzeichnis

- Ametek & Mocon.* (o. J.). Abgerufen am 30. 10. 2021 von Permeation Basics: <https://www.ametekmocon.com/knowledge/learnaboutpermeation/permeationfaq>
- Bader, F. & Dorn, F. (2013). *Physik in einem Band*. Braunschweig: Westermann Schroedel.
- Baier, U. (9. 6. 2021). Interviewt von Palma Joos
- Behr, A., & Seidensticker, T. (2018). *Einführung in die Chemie der nachwachsenden Rohstoffe*. Deutschland: Springer Spektrum.
- Bugnicourt, E. et al. (2013). *Processing and Validation of Whey-Protein-Coated Films and Laminates at Semi-Industrial Scale as Novel Recyclable Food Packaging Materials with Excellent Barrier Properties*. Hindawi Publishing Corporation.
- Buntebarth, G. (1980). *Geothermie - Eine Einführung in die allgemeine und angewandte Wärmelehre des Erdkörpers*. Deutschland: Springer Verlag.
- Chemieschule. (2021). Abgerufen am 8. 12. 2021 von <https://www.chemie-schule.de/KnowHow/Hydrophilie>
- Chemiezauber. (6. 9. 2021). Abgerufen am 13. 11. 2021 von <https://www.chemiezauber.de/inhalt/q1/polysaccharide/struktur.html>
- Cinelli, P. et al. (2016). *Recyclability of PET/WPI/PE Multilayer Films by Removal of Whey Protein Isolate-Based Coatings with Enzymatic Detergents*. MDPI.
- Faunhofer-Institut für Verfahrenstechnik und Verpackung.* (2021). Abgerufen am 10. 12. 2021 von <https://www.ivv.fraunhofer.de/de/verpackung/materialpruefungen.html>
- FluidSolids. (2019). Abgerufen am 9. 5. 2021 von <https://www.fluidsolids.com>
- Fuhrhop, J.-H. & Wang, T. (2009). *Sieben Moleküle - Die chemischen Elemente und das Leben*. Weinheim: Wiley-VCH.
- Grabuschnig, R. (10. 8. 2020). Abgerufen am 27. 11. 2021 von <https://ralfgrabuschnig.com/plastik-kunststoff-geschichte/>
- Grieder, L. (26. 5. 2021). Interviewt von Palma Joos
- Griffin, G. (1994). *Chemistry and Tecnology of Biodegradable Polymers*. Glasgow: Blackie Academic & Professional.
- Jenkins, W. A. & Harrington, J. P. (1992). *Lebensmittelverpackungen aus Kunststoff*. Hamburg: Behr's.
- Kabasci, S. (2014). *Bio-Based Plastics, Materials and Applications*. Chichester: John Wiley & Sons.
- Lemcke, A. & Rietz, H. (18. 6. 2021). *Wie umweltfreundlich ist Bioplastik?* Abgerufen am 16. 7. 2021 von www.nzz.ch: <https://www.nzz.ch/wissenschaft/ist-bioplastik-umweltfreundlicher-als-herkoemmlisches-plastik-ld.1569190>

Bioplastik

- Lesch, H. (5. 5. 2021). Abgerufen am 5. 11. 2021 von <https://www.youtube.com/watch?v=ReXgSAs65QA&t=499s>
- Mekonnen, T. et al. (7. 8. 2013). *Progress in bio-based plastics and plasticizing modifications*. Journal of Materials, Chemistry.
- Migros. (o. J.). *Weniger Verpackung ist mehr*. Abgerufen am 25. 2. 2021 von <https://generation-m.migros.ch/de/nachhaltig-leben/verpackung/weniger-verpackung-ist-mehr.html>
- Migros. (o. J.). *Warum werden Biofrüchte und -gemüse in Plastik verpackt?* Abgerufen am 25. 2. 2021 von <https://faq.migros.ch/de/detail/warum-werden-bio-fruechte-gemuese-in-plastik-verpackt>
- Misicka, S. (2. 5. 2018). Abgerufen am 9. 10. 2021 von https://www.swissinfo.ch/ger/gesellschaft/ressourcen_plastik-in-der-schweiz--top-beim-verbrauch--flop-beim-recycling/44085230
- Morgenthaler, M. (3. 10. 2020). *Sie macht aus Abfall Geld*. Zürcher Tageszeitung, S. 11.
- Planted. (2021). Abgerufen am 1. 5. 2021 von <https://www.eatplanted.com>
- Ratnayake, W. S., & Jackson, D. S. (2006). *Gelatinization and Solubility of Corn Starch during Heating in Excess Water: New Insights*. University of Nebraska, Food Science and Technology Department. Lincoln: Journal of Agricultural and Food Chemistry.
- Reichert, C. L. et al. (14. 7. 2020). Bio-Based Packaging: Materials, Modifications, Industrial Applications and Sustainability. *MDPI polymers*, S. 9 ff.
- RethinkResource. (2021). Abgerufen am 20. 12. 2021 von <https://rethink-resource.com>
- Schäfer, D. et al. (5. 2. 2018). Mechanical and Barrier Properties of Potato Protein Isolate-Based Films. *Coatings MDPI*.
- Schmid, M. et al. (2012). *Properties of Whey-Protein-Coated Films and Laminates as Novel Recyclable Food Packaging Materials with Excellent Barrier Properties*. International Journal of Polymer Science.
- Schmid, M. (25. 9. 2019). *Innovationspotenziale von biobasierten Kunststoffen für Lebensmittelverpackungen*. Abgerufen am 29. 12. 2021 von <https://veranstaltungen.fnr.de/fileadmin/allgemein/pdf/veranstaltungen/Fachpacktagung2019/06-Innovationspotenziale-Schmid.pdf>
- Siegert, M. (7. 6. 2006). *Berechnung von Löslichkeitskoeffizienten in Polymer-Materialien*. Berlin.
- Schweizer Radio und Fernsehen. (7. 1. 2021). Abgerufen am 1. 5. 2021 von <https://www.srf.ch/play/tv/einstein/video/loest-bioplastik-wirklich-unser-abfallproblem?urn=urn:srf:video:14bc8a93-b86f-4967-a69f-bed4ceb575ce>
- Thi, M. (5. 5. 2021). Abgerufen am 10. 8. 2021 von <https://youtu.be/gnshMQuysbw>
- Tiseo, I. (10. 9. 2021). Abgerufen am 9. 10. 2021 von <https://www.statista.com/statistics/282732/global-production-of-plastics-since-1950/>
- Trächslin, E. (1992). *Freigabe- und Quellverhalten biologisch abbaubarer Polymere*. Basel: Sandoz Druck.
- Traceless. (2021). Abgerufen am 11. 8. 2021 von <https://www.traceless.eu>

Vilpoux O. & Avérous L. (2004). *Use and potentialities of Latin American starchy tubers*. Kapitel 18: *Starch-based Plastics*. Semantic Scholar.

Wemmer J. (1. 7. 2021). Interviewt von Palma Joos

Wikipedia. (24. 12. 2006). Abgerufen am 10. 11. 2021 von <https://de.wikipedia.org/wiki/Kunststoff#Herstellung>

Wikipedia. (21. 10. 2007). Abgerufen am 12. 11. 2021 von https://de.wikipedia.org/wiki/Cellulose#/media/Datei:Cellulose_Sessel.svg

Wikipedia. (6. 9. 2021). Abgerufen am 11. 10. 2021 von <https://de.wikipedia.org/wiki/Kreislaufwirtschaft>

Wikipedia. (17. 11. 2021). Abgerufen am 10. 12. 2021 von <https://de.wikipedia.org/wiki/Erdöl#Petrochemie>

Wikipedia. (2. 12. 2021). Abgerufen am 29. 12. 2021 von <https://de.wikipedia.org/wiki/Polyethylen>

Wikipedia. (24. 12. 2021). Abgerufen am 29. 12. 2021 von <https://de.wikipedia.org/wiki/Polypropylen>

Wikipedia. (8. 12. 2021). Abgerufen am 29. 12. 2021 von <https://de.wikipedia.org/wiki/Petrochemie>

Wikipedia. (10. 11. 2021). Abgerufen am 29. 12. 2021 von <https://de.wikipedia.org/wiki/Polyvinylchlorid>

Wikipedia. (6. 6. 2021). Abgerufen am 14. 11. 2021 von https://de.wikipedia.org/wiki/Kristallisation_%28Polymer%29#Eigenschaften_teilkristalliner_Polymere

Wikipedia. (1. 5. 2021). Abgerufen am 9. 12. 2021 von <https://de.wikipedia.org/wiki/Quellung>

Wikipedia. (21. 11. 2021). Abgerufen am 30. 10. 2021 von https://de.wikipedia.org/wiki/Permeation#Permeation_im_Alltag

Wikipedia. (7. 11. 2021). Abgerufen am 10. 11. 2021 von: [https://de.wikipedia.org/wiki/Zersetzung_\(Chemie\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Zersetzung_(Chemie))

Wikipedia. (15. 6. 2021). Abgerufen am 13. 11. 2021 von https://de.wikipedia.org/wiki/Hydrolyse#Hydrolyse_von_Biomolekülen

Wikipedia. (15. 6. 2021). Abgerufen am 6. 11. 2021 von <https://de.wikipedia.org/wiki/Hydrolyse>

Wikipedia. (14. 6. 2021). Abgerufen am 16. 8. 2021 von <https://de.wikipedia.org/wiki/Molke>

Wikipedia. (10. 11. 2021). Abgerufen am 12. 11. 2021 von <https://de.wikipedia.org/wiki/Stärke>

Wikipedia. (7. 12. 2021). Abgerufen am 23. 12. 2021 von <https://de.wikipedia.org/wiki/Wood-Plastic-Composite>

Zink, J. et al. (2016). *Physycal, Chemicala and Biochemical Modifications of Protein-Based Films and Coatings: An Extensive Review*. MDPI.

8.2 Materialverzeichnis

Nachstehend sind alle bekannten Angaben zu den benutzten Materialien verzeichnet.

Produkt	Vertrieb	Hersteller	Weitere Angaben
Aquarellpapier	Papeterie Zumstein AG Rennweg 19 8001 Zürich	Royal Talens	Van Gogh 140 LBS
Deionisiertes Wasser	Zur Verfügung gestellt von der Kantonsschule Freudenberg, Zürich		
Elektrische Waage	Zur Verfügung gestellt von der Kantonsschule Freudenberg, Zürich	Mettler Instrumente AG CH – 8606 Greifensee Zürich	Type HK 160 NO.819 376 50/60 cps, 24 VA PAC Inv. Nr. 442
Federwaage		Pesola Oskar Lüdi & CO AG 4021 Basel	Trade mark 0 – 30 g
Getreidemühle		Schnitzer 7742 St. Giorgio	Getreidemühle RH D
Glycerolum	Morgental Apotheke Zürich	Spiga Nord SPA Via Pontevecchio 55 16042 Carcasco (GE) Italien	Verpacker: Hänseler AG CH-9100 Herisau
Gusskochplatte	Coop Supermarkt Bleicherweg 19 8002 Zürich	Menatec	230 V, 500 W, 50 Hz Typ 1217 Ø 8 cm
Hirsespelzen	Coop City St. Annahof Bahnhofstrasse 57 8001 Zürich		
Maisstärke	Migros Supermarkt Etzelstrasse 3 8038 Zürich		Pâtissier 300 g
Molke	Caseificio Val Poschiavo 7741 San Carlo GR		Kuhmilch
Molkepulver	Coop Vitality Sihlcity Kalanderplatz 1 8045 Zürich	Morga Suisse AG CH-9642 Ebnet-Kappel	
Pfanne			
Plexiglasplatten	Papeterie Zumstein AG Rennweg 19 8001 Zürich	Plexiglas® Röhm GmbH	DIN EN ISO 9001 standarts Dicke: 2 mm
Thermometer			

8.3 Abbildungsverzeichnis

Alle Quellen sind in der der vollständigen Beschriftung nach der Abbildung vermerkt. Wenn keine Verweise angegeben sind, wurde die Abbildung selber erstellt.

Abbildung 1: Der lineare Lebensweg von konventionellem Plastik.....	6
Abbildung 2: Alternative Materialkreisläufe.....	7
Abbildung 3: Unterkategorien des Bioplastiks.....	8
Abbildung 4: Polypropylen, Polyethylen und Polyvinylchlorid.	10
Abbildung 5: Teilkristalline Struktur mit a) kristallinen und b) amorphen Bereichen.	11
Abbildung 6: a) Tupperware mit der Aufschrift PP, b) Spaghettiverpackung aus PP.	12
Abbildung 7: Informationsschild für PLA-Trinkbecher in der Gastronomie.	17
Abbildung 8: Das Glycerinmolekül.	19
Abbildung 9: Vorversuche mit Molke wurden hart und zerbrechlich.....	20
Abbildung 10: Skelettformel von Cellulose.	21
Abbildung 11: Vorbereitung der Hirsespelzen.	22
Abbildung 12: Produkt aus Hirsespelzen.	22
Abbildung 13: Kräfte zwischen Cellulosestücken.....	23
Abbildung 14: Amylose.	24
Abbildung 15: Amylopektin.....	24
Abbildung 16: Stärkekörner.	24
Abbildung 17: Verkleisterung von Stärke durch das Zuführen von thermischer Energie.....	25
Abbildung 18: Das Maizenagemisch nach a) einer Minute, b) zwei Minuten, c) fünf Minuten.	26
Abbildung 19: Folienprobe nach a) zweiminütiger und b) siebenminütiger Kochzeit.	26
Abbildung 20: Zusammenhang zwischen Kochzeit und Quellungsgrad.....	27
Abbildung 21: Aufbau zur Formgebung und Trocknung der Folien.	29
Abbildung 22: Temperaturverläufe der einzelnen Proben.....	29
Abbildung 23: Acht der neun finalen Proben der zwei Folientypen.....	30
Abbildung 24: Zwei Folienproben im Wasser.....	33
Abbildung 25: Durchschnittliche Massenzunahme der beiden Folientypen.	34
Abbildung 26: Der Zusammenhang zwischen dem Quellungsgrad und der Foliendicke.	35
Abbildung 27: Veränderungen nach dem Quellversuch.	36
Abbildung 28: Mögliche Anwendung der untersuchten Biofolien.....	37
Abbildung 29: Eine mehrschichtige Folie aus PE, einem Wheylayer und PET.	40
Abbildung 30: Ein Button und ein Besteckstück aus Bioplastik.	40

8.4 Tabellenverzeichnis

Alle Tabellen wurden selber erstellt.

Tabelle 1: Biomaterialien, welche ein oder mehrere Biopolymerarten enthalten.....	18
Tabelle 2: Materialliste für die Herstellung der Folien.....	28
Tabelle 3: Materialliste für den Quellversuch.....	32
Tabelle 4: Gemessene Werte jeder Probe.....	33
Tabelle 5: Berechnete Werte jeder Probe.....	34

9 ANHANG

9.1 Transkription Urs Baier

Studium der Biotechnologie, Mitarbeitender der ZHAW Wädenswil
Gespräch vom 09.06.21

1. *Bis jetzt kenne ich die drei Kategorien zucker- zellulose- und stärkebasierte Kunststoffe. Wo liegt der Unterschied?*

Wenn ich Zucker habe, ist er meist auch lebensmittel- oder futtertauglich, wenn ich ihn also brauche für die Produktion eines Biokunststoffes greife ich häufig in die Lebensmittel- oder Futtermittelkette ein, ich nehme also irgendwo jemand anderem etwas weg. Ausserdem ist Zucker direkt kein Stoff, der für eine Verpackung gebraucht werden kann, er ist ja kein Polymer. Das heisst, es eignet sich dann, wenn der Zucker einem Bakterium, einer Alge verfüttert wird und erst diese machen das Endprodukt eines Verpackungspolymers, welches sehr komplexe Strukturen haben kann. Es ist dann nicht mehr der natürliche Stoff, der in der Pflanze vorkommt, wie eben der Zucker. Das sind die groben Vor- und Nachteile des Zuckers. Der Vorteil: Ich kann damit über bakterielle Produktionen sehr komplexe, spezielle Biokunststoffe herstellen, der Nachteil: Ich nehme den Zucker einer bestehenden Wertschöpfung weg.

2. *Wie ist es mit Bioplastik aus Molke, ist das auch zuckerbasiert?*

Ja, das ist auch zuckerbasiert. Sobald ich irgendwelche Abfälle oder Abwässer habe, die einen grossen Anteil an Zucker haben, dann stimmt es nicht mehr zwingend, dass der Stoff dann woanders fehlt. Molke könnte man eigentlich auch verfüttern, aber dafür gibt es in der Schweiz gar nicht genug Tiere. Dort ist es dann eine zusätzliche Wertschöpfung, eine zusätzliche Generierung eines Wertes mit diesem Abfall. Das gleiche ist zum Beispiel möglich mit Abwasser aus der Getränkeindustrie. Süssgetränkeabfüllstationen werden am Schluss ausgewaschen, das ergibt dann böse gesagt einfach verdünnte Cola. Dort habe ich sehr viel Zucker, der niemand direkt verwenden kann. Dort wäre zuckerbasiert ein positiver Aspekt. Bei der Stärke kann der erste Punkt, dass ich sie jemandem wegnehme, auch stimmen, aber dort muss man unterscheiden zwischen Stärken, die eine schlechtere Qualität haben, also für die Lebensmittel- oder Futtermittelproduktion nicht geeignet sind. Diese sind aber für Biokunststoffe durchaus einsetzbar.

3. *Was wären Beispiele für solche Stärken mit niedriger Qualität?*

In grossen Getreidemühlen gibt es eine Fraktionierung: die Stärke wird in unterschiedliche Qualitäten eingeteilt, wovon der grösste Teil, etwa achtzig bis neunzig Prozent, als Mehl weggeht. Der Rest könnte eben zum Beispiel in eine solche Biokunststoffproduktion geschoben werden. Das Schöne an der Stärke ist, dass Stärke relativ einfach modifiziert werden kann und dann zwar nicht zu einem hochwertigen aber doch relativ guten Bestandteil für Verpackungen brauchen. Also der Prozess von Stärke zum Verpackungsmaterial ist nicht so aufwändig, er ist relativ einfach. Deshalb ist es grundsätzlich ein dankbarer Stoff. Dann gilt natürlich wieder dasselbe, wenn ich Stärkeabfälle habe, also zum Beispiel Kartoffelschalen aus der Pommes-Produktion, könnte ich aus diesen Stärke extrahieren für einen Biokunststoff.

4. *Ist diese Stärke mit niedriger Qualität beispielsweise in den Spelzen vorhanden?*

Nein, nicht zwingend. In den Spelzen hat man nicht so einen grossen Anteil Stärke. Diese ist ja ein Energiespeicher und die Spelze selber ist ein mechanischer Schutz, vor Wasser zum Beispiel. Dort ist dann der grösste Teil Zellulose. Stärke ist im Korn oder im Knollen, wie Mais Korn, Kartoffel oder generell Gemüseknollen. Dort, wo die Pflanze einen Speicher braucht, wenn sie neu wachsen will. Stärke ist also eigentlich in Samen vorhanden im Normalfall.

5. *Und wie ist es mit Zellulose, eignet sich das gut als Ausgangsstoff?*

Zellulose eignet sich sehr gut aber sehr anders, Zellulose ist ein Molekül, eine Verbindung die die Pflanze im Wesentlichen für mechanische Stabilität oder zum Schutz vor Witterungseinflüssen macht. Das heisst, es ist in sich ein sehr stabiles Molekül, es ist aber eine Faser. Somit kann ich Zellulose als Ausgangsstoff ebenfalls modifizieren und kann sehr direkt ein Faserkunststoff machen. Aus einer Zellulose wird nicht unbedingt eine durchsichtige Folie, sondern eher etwas wie diese Teller, die man zum Teil findet aus biologisch abbaubarem Material. Die müssen wasserdicht sein, aber nicht unbedingt durchsichtig. Es ist also kein Film, um eine Schokolade einzuwickeln. Als Nahrungsmittelverpackung also geeignet aber eher für den unteren Containerbereich, wo eine gewisse mechanische Stabilität und keine Durchsichtigkeit gefragt ist. als den oberen Folienbereich. Für diesen wird heute häufig Polystyrol oder Polypropylen oder PET verwendet. Ausserdem steht Zellulose nicht in Konkurrenz mit Nahrungs- oder Futtermittel.

6. *Unterscheiden sich diese Materialien auf verschiedenen Basen auch in der Abbaubarkeit?*

Ja natürlich schon, aber das hat relativ wenig mit dem Ausgangsstoff Zucker, Stärke oder Zellulose zu tun. Die Abbaubarkeit ist abhängig davon, welches Molekül, welches Polymer es schlussendlich ist. Grob kann man sagen, dass die meisten Zellulosematerialien nicht sehr schnell abbaubar sind, da Zellulose von Natur aus so gemacht ist. Ein grosser Teil von Holz ist zum Beispiel Zellulose. Aber Zellulose-Biokunststoffe sind von der Abbaubarkeit meist nicht wirklich ein Thema, weil sie sich gleich verhalten wie ein Blatt oder ein Ast einfach gesagt. Sie brauchen also schon ein halbes bis ein ganzes Jahr, aber das ist nicht weiter kritisch, das braucht jedes Blatt ja auch. Stärke-Materialien sind in den meisten Fällen sehr gut abbaubar. Kann man auch nicht generell sagen, weil auch ein Stärkematerial kompliziert verändert werden kann, dann ist sie auch nicht mehr so gut abbaubar. Aber die allermeisten sind schon recht gut abbaubar, zum Teil sind sie aber genau darum gar nicht geeignet für Verpackungen, weil sie zu wenig Stabilität gegenüber Wasser aufweisen, zu wenig Barrierewirkung. Zu viel Feuchtigkeit, zu viel Gas geht hindurch. Das ist dann der Nachteil an der eher guten Abbaubarkeit. Zucker wird wie gesagt nicht direkt eingesetzt. Eines von den grossen, wichtigen Molekülen, das zuckerbasiert ist heutzutage, das ist PLA, Polymilchsäure. Dieser Bioplastik hat dann mit dem Zucker, der am Anfang war,

gar nichts mehr zu tun. Von der Struktur her ganz anders. Diese ist dann nur noch unter bestimmten Bedingungen recht gut abbaubar, unter anderen hingegen gar nicht.

7. *Gut abbaubar unter beispielsweise hohen Temperaturen?*

Ja genau. In einer Kompostierung oder Biogasanlage bei hohen Temperaturen kein Problem, in der Natur bei tieferen Temperaturen ist es sehr kritisch.

8. *Und wie ist es mit der Wasserlöslichkeit, damit sich ein Stoff zersetzen kann muss er doch wasserlöslich sein?*

Er muss nicht zwingend wasserlöslich sein, aber er muss benetzbar sein. Das heisst auf der Oberfläche des Stoffes muss es einen Feuchtigkeitsfilm geben können, wo sich Bakterien vermehren können. Diese müssen ja dann zuerst Enzyme ausscheiden, und erst durch diese Enzyme wird dann der Stoff tatsächlich abgebaut. Also er muss nicht direkt wasserlöslich sein.

9. *Wenn ich also eine Flasche habe mit einer Flüssigkeit und die so verschlossen ist, dass keine Mikroorganismen reinkommen, baut sie sich dann nicht ab?*

Nein. Es braucht ja für einen Abbau erst einmal gewisse Bedingungen, dass zum Beispiel Sauerstoff dabei ist, Temperatur und PH stimmt, dann braucht es für den Abbau selber Feuchtigkeit. Die kann aber auch nur auf der Oberfläche sein, der Stoff selber muss nicht zwingend wasserlöslich sein. Das ist wie auf unseren Zähnen, die sind auch nicht wasserlöslich, aber auf der Oberfläche gibt es einen Feuchtigkeitsfilm, deshalb finden es Bakterien dort toll, den Zahn abzubauen und Löcher zu machen. Als drittes braucht es dann noch die Biologie, die den tatsächlichen Abbau macht. Wenn etwas dieser drei Dinge nicht vorhanden ist, funktioniert es nicht. Wenn Sie also Ihren Bio-Kunststoff in einer Flasche verschliessen mit Nährstoffen, Wasser und Luft, dann wird zuerst gar nichts passieren, denn die Biologie ist nicht da für den Abbau, obwohl der Stoff selber schon abbaubar wäre. Selbst wenn er sich dann im Wasser lösen würde, wie zum Beispiel viele Stärkeprodukte, dann ist er zwar aufgelöst, aber es passiert immer noch nichts.

10. *Brauchen Kunststoffe, die nicht wasserlöslich, sondern nur benetzbar sind, länger für den Abbau?*

Die brauchen länger, auf jeden Fall. Dort läuft alles über die Oberfläche, das heisst, wenn die Oberfläche sehr gross ist, weil der Stoff fein gemahlen ist, dann geht es recht schnell. Hingegen wenn die Oberfläche recht klein ist, beispielsweise ein ganzer, nicht wasserlöslicher Becher, dann brauchen die sehr lang.

11. *Wäre das dann dennoch besser als normaler Plastik? Selbst wenn er verbrennt würde, wäre er schlussendlich CO₂-neutral.*

Ja, richtig, ich muss natürlich den Biokunststoff nicht unbedingt abbauen, damit er CO₂-neutral ist, ich kann ihn auch verbrennen. Aber Materialien, die entweder schlecht abbaubar sind, oder für Produkte eingesetzt werden, die eigentlich gar nicht kompostiert werden, zum Beispiel ein Handycase oder Calida-Unterwäsche, das wirft einfach niemand auf den Kompost, das Material kann man immer noch verbrennen. Das CO₂, welches dann freigesetzt wird, ist genau das gleiche wie bei der Kompostierung.

12. *Und wie ist es mit den drei Varianten, biobasiert, bioabbaubar oder beides, welches sind Unterschiede? Wann eignet sich welches am besten?*

Biobasiert ergibt dann Sinn, wenn ich die gleichen Funktionen wie beim fossilen Kunststoff haben möchte, zum Beispiel mechanische Stabilität, Gasundruchlässigkeit oder Wasserdichtheit, aber auf einer Basis von Biomasse, also mit weniger Energieinput und weniger Umweltbelastung. Das ist mit vielen Möglich, deshalb sind biobasierte in vielen Bereichen eine gute Lösung.

Biologisch abbaubare als separates Argument ist entweder dann ein Vorteil, wenn es ein Produkt ist, das in die Umwelt kommt oder in der Umwelt verbleibt, wie zum Beispiel Mulchfolie oder Kompostierbeutel oder Kunststoffklipps die man im Garten braucht. Das sind alles Materialien, die am Schluss ihres Lebens in der Natur verbleiben, dort ist die Abbaubarkeit natürlich absolut erwünscht. Der zweite Grund, weshalb Abbaubarkeit gewünscht ist, ist wenn ich in einem System lebe, wo ich nicht verhindern kann, dass Kunststoffe einen sehr grossen Eintrag in die Natur haben. Dort wo es zum Beispiel Deponien gibt, oder wo Material aus irgendeinem Grund ausgewaschen, abgetragen wird. Diese gelben Plastikfäden von Elektrosensen ist ein typisches Beispiel. Das sollte ja eigentlich nicht in die Umwelt gelangen, aber die werden so stark beansprucht, dass sie dauernd abgerieben werden. Dort ist Abbaubarkeit ein sinnreiches Thema. [...]

Nach meiner Meinung müssen heute die meisten Produkte mit dem Argument «aus erneuerbaren Ressourcen, aus Biomaterial hergestellt» vertrieben, vermarktet, angepriesen werden und *nicht* mit der biologischen Abbaubarkeit. Biologische Abbaubarkeit und damit auch die Label, Knospe oder OK-Kompost, das sollte nur für die Produkte sein, wo man auch will, dass sie tatsächlich in den Kompost kommen, oder in der Kompostieranlage oder in der Natur landen. Auf einem Calida-Pijama hat das Label «biologisch abbaubar» nichts zu suchen. Das ist die falsche Botschaft. Man kann sagen, es wurde aus nachwachsenden Ressourcen, aus erneuerbaren Rohstoffen gemacht, das ist die richtige und die bessere Botschaft.

13. *Und sie ist besser, weil es dann quasi nicht schlimm ist, wenn man es dann wegwirft, oder wieso?*

Ja, genau. Es gibt die falsche Botschaft hinaus, nämlich was biologisch abbaubar ist, darf man einfach ohne Bedenken auf den Kompost werfen. Die Botschaft in diesen Produkten soll eigentlich sein, dass es weniger CO₂-Belastung und einen kleineren Energieaufwand gibt, einen besseren ökologischen Fussabdruck hat.

14. *Wie ist das geregelt mit der Kompostierbarkeit? Ich habe die Normen etwas überflogen und habe den Eindruck, es gibt viele Graubereiche oder Bereiche, die nicht klar definiert sind.*

In den Normen selber oder in der Anwendbarkeit der Normen? Das hat es, das ist so eine Eigenheit der Normen. Normen sind normiert, das heisst sie schliessen irgendwelche Sachen aus. Bei der Abbaubarkeit muss man vor allem unterscheiden, geht es um die aerobe Abbaubarkeit, also mit Luft im Kompost, oder geht es um die anaerobe Abbaubarkeit, also in einer Biogasanlage. Häufig sind beide vorhanden aber manchmal ist eben vor allem oder nur die eine vorhanden und die andere eben nicht. Was man unterscheiden muss bei diesen Normen für die Abbaubarkeit ist für welche Bedingungen sie herrschen. Sind es Normen, die die für technische Bedingungen herrschen, also in technischen Anlagen oder sind es Normen, die für die Bedingungen in der Natur draussen herrschen. Die meisten gelten für Laborbedingungen, einige gelten für technische Bedingungen in realen Anlagen, und andere, ganz ganz wenige, gelten in der Natur. Was man häufig macht ist, dass eine Norm unter Laborbedingungen angewandt wird, dann wird gesagt, das Material ist biologisch abbaubar. Das ist richtig, diese Aussage, aber eben biologisch abbaubar unter Laborbedingungen und das bedeutet nicht, dass es eben auch in einer technischen Anlage biologisch abbaubar ist.

15. *Und was hat das für einen Sinn, wenn man sagen kann, dass ein Material im Labor biologisch abbaubar ist, aber nicht mehr?*

Das ist grundsätzlich die erste Charakterisierung, die man für ein Produkt machen muss. Man muss zeigen, dass es im Labor abbaubar ist. Wenn es unter Idealbedingungen schon nicht abbaubar ist, dann kann man den Rest schenken. Deshalb muss man das eigentlich machen. Wenn man nachher diese

Produkte einsetzt, muss man dann auch noch ein Label dabei haben, welches sagt, wie verhält es sich an diesem Ort, wo es dann tatsächlich in der Realität hinkommt, also zum Beispiel in der Kompostieranlage. Es gibt viel Produkte, die mehr als ein Label haben. Die haben zum Beispiel schon ein Label biologisch abbaubar, biodegradable, und haben aber auch OK-kompost. Das heisst dann, es ist eben nicht nur theoretisch, also unter Idealbedingungen abbaubar, sondern auch für die normale technische Kompostierung geeignet, es wird dort tatsächlich auch abgebaut. Dann gibt es noch ein Label, das heisst OK-home-kompost, das kann man sogar bei sich zuhause im Garten auf den Kompost werfen, selbst unter diesen Bedingungen sollte es funktionieren. Aber wenn Sie als Konsumentin das nicht wissen, dann sehen Sie natürlich einfach ein Label, das war's dann. Sie sehen den Unterschied zwischen diesen verschiedenen Label nicht, den nehmen Sie nicht wahr.

16. *Ja genau, das wäre dann meine nächste Frage gewesen. Wenn ich lese, es ist kompostierbar, dann überlege ich mir nicht, dass es vielleicht noch OK-kompost und OK-home-kompost geben könnte. Dann wird vieles wahrscheinlich doch noch falsch entsorgt.*

Exakt. Und das ist mitunter ein Grund weshalb ich vorhin gesagt habe, die Botschaft «aus erneuerbaren Rohstoffen» ist viel besser, weil die mir sagt, was ich hier habe, ist ziemlich sicher ein ziemlich ein sinnvolles Produkt, gibt aber nicht wirklich einen Hinweis, was ich damit machen soll. Die Botschaft «kompostierbar» ist gefährlich, weil die dann einfach global verstanden wird. Ähnlich ist es mit dem Recycling.

17. *Aber auch innerhalb der Kategorie «biobasiert» wird es Unterschiede geben, es könnten ja auch Gemische sein. Dann gehört eigentlich noch ein Prozentsatz dazu.*

Richtig, es gibt Gemische. Das ist generell ein kritischer Punkt, auch bei der Abbaubarkeit. Es gibt Normen, die Abbaubarkeit so definieren, dass mehr als 70 % abbaubar sein muss. Wenn ich ein Gemisch habe, welches zu 80 % abbaubar ist, gilt es als biologisch abbaubar. Wenn ich das in einen Kompost werfe, bleibt also noch 20 % bestehen. Das ist recht gefährlich. Das gleiche gilt für «aus erneuerbaren Rohstoffen», wenn ein Label so definiert ist, dass einfach ein Anteil aus erneuerbaren Rohstoffen bestehen muss, dann kann der Rest trotzdem fossil sein. Dort müsste man es deklarieren. Aber Gemische sind generell dadurch ein heikler Punkt.

18. *Heikel, weil sie offiziell als abbaubar oder biobasiert gelten können obwohl sie es nicht zu 100 % sind?*
Exakt.

19. *Wissen Sie von Forschungsprojekten in diesem Bereich oder anderes, das noch in Entwicklung ist? Über Mulchfolien habe ich einiges gefunden aber weniger zu Lebensmittelverpackungen.*

Ja, es gibt da sicher etliche Aktivitäten zu Lebensmittelverpackungen, nur habe ich da nicht wirklich einen Überblick, muss ich da sagen. Wir haben bei uns in Wädenswil an der ZHAW ein relativ grosses internes Projekt, also es ist nicht direkt ein Forschungsauftrag oder Forschungsprojekt mit Industrien zusammen. Ein grosses internes Projekt, welches genau die gesamte Wertschöpfungskette, also wie macht man aus irgendwelchen Reststoffen, irgendwelchen Abfallstoffen lebensmittelfähige Verpackungsmaterialien. Auch nachher, für welche Lebensmittel setze ich sie ein, was ist die Abbauarbeit, was ist End of Live etc. ist relativ ein grosses Projekt, das hier läuft, es geht noch bis Ende Jahr, es heisst BIOMAT, biologische Materialien, ist aber wie gesagt nicht ein Projekt, welches nach aussen stark dargestellt wird. Dort gibt es sicher die Möglichkeit, dass Sie für diese Frage spezifisch, was ist noch so im Forschungsbereich für biologisch abbaubare Verpackungen des Lebensmittelbereichs, mal auf einen der Projektleiter zugehen.

20. *Läuft das ein Jahr lang oder hat das schon vorher begonnen?*

Nein, das läuft drei Jahre. Innerhalb von diesem gesamten Projekt werden Potential erfasst, wo gibt es überhaupt noch Reststoffe, wo gibt es Abfallstoffe, die sich eignen könnten zum Nutzen, das möchte man ja nicht aus lebensmittelfähigem Zucker machen. Welche Produkte sind überhaupt interessant, welche Produktionsprozesse sind interessant, welche Charakteristiken müssen solche Folien haben, wie kann man das prüfen, sind sie dann wirklich abbaubar... all diese Fragen. Die gesamte Biokunststoff-wertschöpfungskette kommt mit hinein. Bis hin zu wie man diese Botschaft dann unter die Leute bringt, wie schult man Personal, um die Gesamtbetrachtung herüberzubringen.

21. *Da solche Verpackungen für die Konsumierenden noch nicht wirklich ein Thema sind, habe nicht mich auch gefragt, wo dann diese Probleme sind. Wahrscheinlich ist es sowohl der Konsument, der sich das nicht gewohnt ist, andererseits auch die Forschung, die noch am Laufen ist.*

Das spielt alles zusammen. Es ist zum Teil die Forschung, da die Anforderungen an Verpackungen sehr sehr hoch sein können. Fossile Kunststoffe haben unendlich viele tolle Funktionen. Die gleiche Funktion zu erzeugen mit einem biobasierten ist nicht immer ganz einfach. Denken Sie nur an PET, das ist so etwas Geniales und sämtliche Funktionen mit Biokunststoffen zu machen ist relativ schwierig. Das ist ein Teil, ein zweiter Teil ist, dass manche biobasierte Kunststoffe nicht überall akzeptiert sind auf dem Markt, weil es dann genau zu dieser Vermischung führt mit den biobasierten und fossilen Kunststoffen. In dem Moment, als diese Green Bottle, die es in Amerika bereits gibt, auf den Markt kommt und genau gleich aussieht wie eine PET-Flasche und genau die gleichen Eigenschaften hat aber biobasiert ist, in diesem Moment findet das das PET-Recycling natürlich völlig ungeschickt. Dann ist ihr PET, welches in den Sammelsäcken zurückkommt, ist dann verunreinigt mit diesen Bioflaschen, die erst aussortiert werden müssen. Plötzlich ist das biologisch abbaubare Material aus biologischen Ressourcen nicht mehr akzeptiert. Das gleiche ist bei den Kompostieranlagen, es gibt etliche Kompostier- und Biogasanlagen, die biologisch abbaubares Material gar nicht oder nur sehr selektiv akzeptieren. Sie sagen, sobald wir das akzeptieren, gibt es Fehlwürfe. Die Leute sehen, gewisser Kunststoff kommt dort rein, also werfen sie allen Kunststoff ins Grüngut. So hat man eine grössere Verschmutzung mit fossilem Plastik, als man Vorteil hat mit den bioabbaubaren. Es ist also auch bei den Entsorgern nicht überall akzeptiert. Der dritte Punkt, wie Sie richtig gesagt haben, ist die Botschaft: Wo ergibt es einen Sinn und wo nicht, und wie erkenne ich es wirklich gut? Diese Botschaft ist noch nicht überall durch. Da hat man zum Teil zu wenig oder falsche Aufklärung gemacht, das ist sicher auch so, das muss man noch aufholen. Es gibt zum Beispiel diesen berühmten Gitterdruck, Kompostsäcke sind ja so weisslich und haben so ein Gitterdruck drauf. Dieser ist eigentlich das Zeichen, zwar kein offizielles Label aber eine Branchenvereinbarung, dass das Material ist, welches auf Kompostieranlagen angenommen wird, also dort funktioniert. Das wissen aber die wenigsten Konsumentinnen und Konsumenten.

22. *Vielleicht geht es noch ein Weilchen, bis man sich daran gewöhnt, dann wird es vielleicht automatisch erkannt...*

Genau, es geht ein Weilchen und das ist auch ganz ein guter Effekt, wenn das automatisch ist. Aber wenn man am Anfang die falsche Botschaft übermittelt.

23. *Dann ist es schwierig, einen Überblick zu behalten. Besonders wenn dann der Deckel und der Karton und der Becher jeweils noch an einen anderen Ort kommt.*

Exakt. Und dann die Frage, wenn es beschichtet ist, darf man das jetzt immer noch dort hineinwerfen... Das ist eben wirklich beim PET sehr gut und eindeutig gelöst, PET ist recht einfach und für

Trinkflaschen ist ausser PET nichts Vergleichbares auf dem Markt. Und eine Milchflasche kann jeder unterscheiden, ebenso eine Bierdose.

24. *Bei den Tetra Pack beispielsweise hat man ja Plastik und Karton, und doch kann man keines von beidem recyceln, oder?*

Das ist richtig. Verbundstoffe sind generell, wenn es um End of Live geht, Entsorgung oder Recycling, recht kritisch. Das Produkt vorne herum kann immer noch sehr toll sein, auch wenn nur ein Drittel erneuerbar ist, zum Beispiel, aber wenn es dann eben so eine Verbundfolie ist, beispielsweise der Struktur gebende, mechanische Teil zu 80 % erneuerbar und die Funktion der Wasserdichtheit oder Gaspermeabilität oder so, die ist dann noch fossil. Die kann man dann nicht mehr recyceln, das funktioniert so ziemlich gar nicht, die muss fast verbrannt werden. Verbundstoffe sind heikel, ja.

25. *Ich habe hier eine PET-Flasche, auf der steht, dass sie 100 % recyklierbar ist. Aber es ist doch auch beim PET so, dass das Material irgendwann an Qualität verliert, nicht?*

Ja, das ist so, aber bei PET ist es unterdessen so, dass wenn Sie aus einer PET-Flasche wieder eine PET-Flasche machen möchten, dann ist das nicht 100 % recyklierbar. Die können zu einem sehr grossen Teil, ich bin erstaunt wie gross, können Sie wirklich aus einer alten Flasche eine neue machen. Aber eine gewisse Qualitätseinbusse gibt es, ein gewisser Teil an neuem PET muss rein. Aber die PET-Flasche ist es zu 100 % weil daraus andere Produkte gemacht werden können. Sie können Tragtaschen daraus machen oder andere Folien oder Gartenzäune oder was auch immer. Das ist zwar ein Downcycling aber es ist eben auch ein Recycling. Deshalb ist der Begriff 100 % recyklierbar bei PET richtig, das stimmt schon. Es ist nur nicht zwingend zu 100 % das identische Produkt.

9.2 Transkription Linda Grieder

Gründerin des Unternehmens *RethinkResource*¹⁴¹

Gespräch vom 26.05.21

1. *Euer Produkt besteht aus Gelberbsen, Wasser und Rapsöl. Sind das alles Schweizer Zutaten?*

Nein, also das Rapsöl ist aus der Schweiz aber die anderen Rohmaterialien, auch von unseren anderen Produkten sind überwiegend aus Westeuropa.

2. *Habt ihr ein grobes Konzept oder Vorgehensmuster, die sich wiederholen?*

Wir machen nicht immer das gleiche, aber wir haben durchaus eine Art wiederkehrende Schritte, die wir machen. Es hängt immer vom Kunden ab. Grundsätzlich haben wir zwei Typen: ein Kunde ist der, der eine Produktion hat, in der ein bestimmter Nebenstrom entsteht. Dann gibt es solche, die ihr Produkt nachhaltiger herstellen möchten, also im Bereich Upcycling oder Circular Economy nach Materialien für die Herstellung suchen. Je nach dem gibt wiederholen sich also schon gewisse Schritte, es ist allerdings immer noch stark abhängig, wo sich der Kunde befindet, wie gross er ist und so weiter. Mit was wir aber meistens starten, und das ist ähnlich bei beiden Typen, ist mit einem grossen Streaming: was gibt es alles für Technologien, Anwendungen, Materialien, Firmen und so weiter, die interessant sein könnten für diesen Kunden. Und wenn wir das gemacht haben, dann arbeiten wir von dort aus weiter

¹⁴¹ RethinkResource, 2021

indem wir herausfinden, welche Technologie am sinnvollsten ist für diesen Nebenstrom oder welches Material am vielversprechendsten wäre.

3. *Gibt es auch den Fall, dass der Kunde zu beiden Typen gleichzeitig gehört? Dass man zum Beispiel den entstehenden Nebenstrom in der Produktion gleich selber für sein Produkt verwenden will?*

Ja, absolut, das haben wir auch. Das sind sogar die, sagen wir mal, besonders vielversprechenden Fälle. Beim Upcycling von Nebenströmen ist meist der Transport über eine weite Distanz nicht profitabel, das lohnt sich nicht. Das bedeutet, man sucht immer nach möglichst lokalen Lösungen. Wenn also der Kunde das selber gleich verwerten möchte, ist das natürlich von der wirtschaftlichen sowie von der nachhaltigen Perspektive sehr interessant. Gerade wenn in der Produktion eines Lebensmittels auch der Nebenstrom zu einem Lebensmittel weiterverarbeiten kann ist das natürlich die höchstwertigste Verwendung.

4. *Und wie geht ihr vor, wenn ihr sowohl das Ausgangsmaterial als auch das Zielprodukt wisst?*

Als allererstes lassen wir eine grosse Laboranalyse des Materials machen, um herauszufinden, was es für Eigenschaften hat, was es für Inhaltsstoffe hat, in welchen Mengen diese vorhanden sind. Als zweites müssen wir schauen in welchen Mengen und in welchen Regelmässigkeiten das Material in der Fabrik anfällt. Über die Zeit hinweg wird gemessen, werden Proben genommen ob sich etwas verändert. Ob zum Beispiel die Qualität konstant bleibt oder Schwankungen unterliegt. Gerade bei Lebensmittel, die von der Saison oder vom Wetter abhängig sind gibt es starke Unterschiede in der Qualität des Nebenstroms. Das wird aufgenommen und wir versuchen zu verstehen, wo der Wert des Materials liegt. Im Lebensmittelbereich ist es beispielsweise immer spannend, wenn man sieht, dass ganz viele Proteine enthalten sind.

5. *Im Hinblick auf Lebensmittelverpackungen habe ich oft das Problem, dass manche Nebenströme der Lebensmittelindustrie wie zum Beispiel Molke eigentlich einen hohen Nährwert hätten, also zu schade wären um als Verpackungsmaterial genutzt zu werden.*

Ja genau. Es gibt eine Art Pyramide, die man sich immer wieder in Erinnerung rufen sollte. Die höchstwertige Verwendung ist effektiv als Lebensmittel, dann Futtermittel und als Drittes thermische oder energetische Verwertung. Das ist auch was wir immer machen, als erstes schauen wir, ob sich ein Lebensmittel daraus machen lässt. Aber gerade bei der Molke ist es ja so, dass es saure und süsse Molke gibt. Süssmolke kann man super zu Lebensmittel verarbeiten, aber die saure Molke ist viel schwieriger. Gerade bei Verpackungen könnte man überprüfen, ob sich die saure Molke eignen würde.

6. *Habt ihr schon Projekte und Erfahrungen mit Lebensmittelverpackungen gemacht?*

Ja, wir arbeiten an einigen Verpackungskonzepten für die Lebensmittelindustrie. Wir sind da besonders an Papierverpackungen am Arbeiten, das heisst aus vielen verschiedenen Nebenströmen kann man gut Papier herstellen. Das andere Feld, in dem wir aktiv sind, beinhaltet Beschichtungen aus Nebenströmen. Wenn man Papier beschichten kann, hat man natürlich ein grösseres Potential, auch Lebensmittel mit höheren Anforderungen zu verpacken und so eine Plastikverpackung zu verhindern. Gerade die Beschichtungen sind noch sehr stark in einem Forschungsstadium, sind also noch nicht so weit entwickelt. Papier hingegen ist schon relativ weit entwickelt, wir sind viele verschiedene Materialien am Testen mit unseren Kunden, die hoffentlich auch bald auf den Markt kommen.

7. *Gibt es zum Teil Schwierigkeiten mit den gesetzlichen Bestimmungen?*

Es geht, es kommt darauf an. Je nach dem um welches Material es sich handelt bedingt eine neue Anwendung wie für eine Lebensmittelverpackung natürlich eine neue Zulassung, das ist aber bisher noch

nie ein Problem gewesen. Oder es bedingt eine andere Handhabung des Kunden vor Ort, also dass ein Nebenstrom zum Beispiel nicht offen gelagert wird und dass er auch den gleichen Standards unterliegt wie den anderen Rohstoffen, die in der Fabrik verarbeitet werden. Das ist manchmal eine Veränderung, die gemacht werden muss damit das Material lebensmittelsicher wird und dann eben auch als Verpackung geeignet ist.

8. *Wäre es bei den Beschichtungen möglich, dass man ein Karton oder ein Papier so beschichtet, dass zum Schluss die gleichen Eigenschaften eines Plastiks erzielt werden können?*

Gleich wie ein Plastik wird recht schwierig, aber dass das Lebensmittel geschützt werden kann schon. Der Kompromiss, den man machen muss ist eventuell eine geringere Haltbarkeit in Kauf nehmen. Das heisst, man kann gut eine CO₂-Barriere machen, oder eine Wasserbarriere, manchmal müssen auch verschiedene Materialien, also verschiedene Beschichtungen kombiniert werden, aber dieselben Eigenschaften wie Plastik ist sehr schwer. Allerdings ist es in manchen Fällen gar nicht nötig, solche starke Eigenschaften zu erhalten wie sie Plastik hat.

9. *Vorher hast Du erwähnt, dass ihr Materialien im Labor untersucht. Plant Ihr eure Laborversuche oder schaut Ihr auch einfach mal was herauskommt?*

Wir haben sicherlich unsere Standardanalyse, die wir machen, das ist geplant. Diese Analysen sind aber relativ teuer. Inzwischen haben wir etwas Erfahrung, dass wir je nach Material wissen, was man analysieren kann, das vielversprechend ist, aber wir probieren auch viel aus. Manchmal hat man einen Verdacht und hat dann zum Teil positive oder auch negative Ergebnisse. Was wir auch machen ist ausprobieren, wie sich gewisse Eigenschaften verändern, wenn man das Material zum Beispiel trocknet oder presst.

10. *Was gehört zu den Standardanalysen?*

Das ist ganz unterschiedlich. Wenn wir es möchten für eine Verpackung verwenden sind natürlich die Fasern sehr ausschlaggebend, die Fasermenge ist ganz wichtig. Bei Lebensmittel schaut man eher, welche Nährwerte es hat, das ist immer etwas unterschiedlich. Kürzlich, als wir etwas für die Lebensmittelindustrie untersucht haben, merkten wir plötzlich, dass die ganz interessante Fasereigenschaften haben und haben dann auch an eine Verwendung als Verpackung gedacht. So stösst man manchmal auch etwas per Zufall auf interessante Eigenschaften.

11. *Also sind diese Analysen abhängig vom Material selber aber auch von der vorgestellten Verwendung?*
Ja genau.

12. *Und für Lebensmittelverpackungen im speziellen, gibt es da Materialien die sich besonders gut eignen?*

Faserhaltige Nebenströme sind am interessantesten für Verpackungen, wenn man Papier anschaut. Bioplastik ist wieder anders. Wir sind am stärksten eingestellt auf das, was Papier angeht. Dort sind Nebenströme aus der Getreideherstellung, Schokoladeherstellung oder auch von Früchten beliebt. Was man auch machen kann, ist einen Teil der bisherigen Fasern, also der normalen Zellulose, ersetzen mit Nebenströmen, die vielleicht nicht ganz so tolle Eigenschaften haben, aber so kann man wenigstens einen Teil davon verwenden und das Papier bleibt trotzdem interessant. Aber es gibt andere, die Zellulose zu 100 % ersetzen können.

13. *Kennst Du Nebenströme, die in der Lebensmittelherstellung anfallen, jedoch ungeniessbar sind?*

Es gibt Dinge, die man so verarbeiten kann, dass sie doch geniessbar werden. Sehr viel kann man tatsächlich so aufwerten. Was hingegen relativ schwierig zu verarbeiten ist sind Fruchttrester. Die

entstehen hauptsächlich in der Fruchtsaftherstellung und sind Samen und Schalen und so gemischt, auch Fruchtfleisch zum Teil. Grundsätzlich haben die einen hohen Nährwert, aber sie gären extrem schnell und sind geschmacklich auch meist nicht so attraktiv. Meist sind es auch Gemische aus verschiedenen Früchten und durch das relativ ungeniessbar. Es gibt natürlich spannende Technologien, um einzelne Nährstoffe rauszuholen, dass man zum Beispiel Farbe extrahiert oder Vitamine, aber dass man es als Ganzes verwendet ist sehr selten.

Kaffeersatz wäre auch noch sowas.

14. *Zu den Fruchttrestern gehört auch der Abfall der Weinproduktion, richtig?*

Ja genau.

15. *Aber in diesem Fall ist natürlich alles gemischt, Schalen, Kerne, Stängel.*

Vitamine würden sich mit komplizierteren Extraktionsverfahren herausholen lassen. Aber wer zum Beispiel Interesse daran hat ist die Kosmetikindustrie. Das sind dann natürliche Inhaltsstoffe, die sie für ihre Pflegeprodukte und Kosmetik verwenden können.

16. *Im Zusammenhang mit Bioplastik und Kompostierbarkeit habe ich mit noch überlegt, ob das dann auch zur Kreislaufwirtschaft gehört, wenn es eigentlich nicht zum Wiederverwenden oder Recyceln gedacht ist, sondern zum Fortwerfen.*

Das ist eine interessante Frage. Ich würde mal sagen, dass beim Kreislauf das wichtige ist, dass es einen Weg zurück ins System gibt und dem System nicht schadet. Wenn du nun eine biologisch abbaubare Verpackung hast, die sich in der Natur zersetzen kann ohne Schaden anzurichten, dann sind diese Anforderung sicherlich erfüllt, würde ich sagen. Was schwierig ist, sind die vielen bioabbaubaren Verpackungen die nur industriell abgebaut werden können, die also in eine Kompostieranlage müssen, damit bestimmte Temperaturen erreicht werden. Dort finde ich es etwas schwieriger. Wenn das jetzt in der Umwelt landet, schadet es trotzdem, da es sehr lange braucht um sich abzubauen. Irgendwann wird alles zersetzt und irgendwann ist jedes Material mal zu Ende gebraucht und wenn man da sinnvolle Konzepte für biologische Abbaubarkeit hat, ist das durchaus im Sinne der Kreislaufwirtschaft.

17. *Weil es dann wieder in den Boden kommt, ohne zu schaden und daraus sozusagen ein neuer Baum wachsen könnte?*

Ja, absolut. Es könnte ja sogar ein Dünger sein.

18. *Was neben der Kompostierbarkeit auch noch ein Thema ist, ist Recycling. Was macht mehr Sinn?*

Da gibt es richtig getrennte Meinungen. Ich selber finde Recycling sehr sinnvoll, weil die meisten Konsumenten sich gewohnt sind, was das ist und wie es funktioniert. Gerade wir in der Schweiz haben ja ein sehr gut funktionierendes System. Das heisst bei einer recycelbaren Verpackung weiss meistens der Konsument selber auch besser was er damit machen muss. Also wenn ich eine Papierverpackung habe, weiss ich, ich kann sie in den Papierabfall tun und sie wird wiederverwendet. Das ist eine klarere Message. Bei biologisch abbaubaren Verpackungen weiss ich vielleicht nicht so genau, was damit machen, vor allem wenn ich keinen Kompost habe. Das andere ist, dass sich ein recycelbares Material mehrmals verwenden lässt, was sicherlich sehr sinnvoll ist.

19. *Ich habe mich gefragt, ob es möglich ist, Rezyklierbarkeit zu kombinieren mit einem besseren Ausgangsmaterial als Erdöl.*

Ja, sicher. Was oft der Fall ist, ist dass man Papier hat das rezyklierbar aber noch mit einer Kunststoffbeschichtung beschichtet werden muss. Dort wird viel geforscht, wie eventuell biologisch abbaubare

Beschichtungen auf Papier eingesetzt werden können. Bei dem Papierrecycling hat man zuerst einen Wasch-/ Trennprozess, in dem die Beschichtung vom Papier eine Art weggeschwemmen werden, die löst sich ab. Dort sind viele am Untersuchen, ob man diese Beschichtungen biologisch abbaubar machen kann, damit sie kompostiert werden können oder sich sogar im Wasser auflösen. Da gibt es viele verschiedene Konzepte, die Leute am Anschauen sind, also kann man das sicher irgendwie kombinieren.

20. *Das stelle ich mir aber gar nicht so einfach vor, da die Beschichtung ja doch noch irgendwie wasserresistent sein müsste.*

Ja, das ist sehr anspruchsvoll. Es gibt extra solche Zwischenbeschichtungen zwischen Papier und Beschichtung die das Ablösen vereinfachen. Es ist mega High-Tech in diesem Sinne und viel davon ist noch am Anfang der Entwicklung. In Universitäten wird viel geforscht und nach und nach werden solche Konzepte auch reifer, weiter getestet und kommen auf den Markt. Wir müssen halt alle ein bisschen herausfinden was gut funktioniert. Vor kurzem ist zum Beispiel Nesquik in einer Papierverpackung auf den Markt gekommen, dort schaut man natürlich auch, wie funktioniert das, verhält es sich gut, was passiert, wenn man es nachher recycelt. Ich denke, man muss dem auch einfach etwas Zeit geben, dass sich das entwickelt und die Leute verstehen, wie man damit umgehen muss.

21. *Und jetzt aktuell könnte man mit einem Tetra Pak nicht viel machen oder?*

Nein, Tetra Pak ist ganz eine eigene Sache. Das sind sehr viel Schichten, aber sie arbeiten an sehr vielen interessanten Konzepten, wie sie auch ihre Verpackung nachhaltiger machen können. Ich glaube, sie sind auch am schauen, ob man alle Schichten aus demselben Material machen könnte. Indem man das verschieden verarbeitet, hat man verschiedene Eigenschaften, und wenn man das so kombiniert kann man es vielleicht einfacher abbauen oder recyceln. Das ist aber natürlich sehr schwierig. Tetra Pak hat wahnsinnige Eigenschaften, es ist lange haltbar, es ist Licht- und CO₂-undurchlässig, das ist natürlich eine sehr schwierige Aufgabe.

22. *Die Kreislaufwirtschaft, also Reuse, Recycle und Kompostierbarkeit ist, gerade wenn man Migros und Coop anschaut nur bedingt ein Thema, sehr vieles ist nach wie vor konventionell verpackt.*

Ja, das meiste ist wirklich noch konventionell verpackt. Eine der grössten Herausforderungen die sie haben und ich vorhin schon etwas angesprochen habe, ist wie zeigst du dem Konsumenten wie er mit dieser Verpackung umgehen muss. Wenn es recycelbar ist, ist es natürlich viel einfacher, dann wissen wir, was wir damit machen müssen, aber wenn es effektiv biologisch abbaubar ist, ist es schwieriger, da es die meisten halt trotzdem in den normalen Abfall schmeissen. Dann ist die Frage, ob sich das lohnt, denn die sind meistens auch teurer, diese Verpackungen. So ist es nicht so einfach, dies abzuwägen, aber ich weiss, dass man dran ist und versucht, Lösungen zu finden. Man muss auch herausfinden, bei welchen Produkten es einfacher ist, am Anfang umzusetzen. Man fängt mit den einfacheren an und tastet sich dann vor zu den schweren. Einfacher sind natürlich trocken verpackte Sachen, Cerealien, Mehl und Müesli, aber wenn es dann um Flüssigkeiten, Joghurt und Flüssigkeiten geht, wird es viel schwieriger.

9.3 Transkription Judith Wemmer

Studium der Lebensmittelwissenschaften an der ETH Zürich, Produktentwicklung bei *Planted Foods*¹⁴²
Gespräch vom 01.07.21

1. *Euer Produkt besteht aus Gelberbsen, fallen Nebenströme an oder könnt Ihr die ganze Erbse verwenden?*

Von der Erbse verwenden wir das Protein und die Fasern. Wir bekommen das schon vorverarbeitet und das was übrigbleibt ist ein Teil der Erbsenstärke. Da sind wir im Moment auch am Schauen wie wir das noch besser nutzen können aber ansonsten wird die Erbsenstärke viel in anderen Lebensmitteln verwendet, zum Beispiel in Teigwaren.

2. *In diesem Fall wird das von euch zu Zeit so genutzt?*

Wir bekommen das schon verarbeitet, wir bekommen die Erbsenstärke gar nicht, das wird von anderen Herstellern für Lebensmittel verwendet. Wir bekommen nur die Proteine und die Fasern, diese beiden Bestandteile und die Erbsenstärke bekommt jemand anderes.

3. *Und wie lief die Entstehung des Produktes? Habt schon von Anfang an einen Fleischersatz gewollt oder seid ihr von diesen Inhaltsstoffen ausgegangen und habt damit ausprobiert?*

Das Ziel war von Anfang an, pflanzliches Fleisch herzustellen, mit sehr schnell dem Fokus auf Poulet, weil das ein grosser Teil von unserem Alltag ausmacht, vor allem in der Schweiz. Poulet Geschnetzeltes ist ein sehr wichtiges Produkt in der Schweiz und für uns war von Anfang an klar dass es schon Produkte auf dem Markt gibt aus Soja und Gluten, also Weizen- und Sojaproteine. Der Körper braucht Diversität, man sollte sich nicht so beschränken auf einzelne Quellen und wir wollen auch nicht den ganzen Tag Soja essen, sondern auch Diversität in unserer Ernährung. So haben wir uns dafür entschieden, auf andere Proteinquellen zurückzugreifen und haben uns angeschaut, was für andere Rohmaterialien reich an Proteinen, also zum Beispiel Erbsen, aber für andere Produkte verwenden wir eben die Sonnenblumenkerne, die Nebenstrom sind aus der Sonnenblumenölproduktion. Das wird normalerweise als Schweinefutter verwendet oder als Dünger und wir verwenden es in unseren Produkten, weil es sehr reich ist an Proteinen und auch Mikronährstoffen, Ballaststoffen...

4. *Dann entwickelt ihr eure Produkte nach wie vor weiter? Ihr betreibt Forschung?*

Genau, für uns ist Forschung extrem wichtig, etwa die Hälfte vom Team arbeitet im Forschungsbereich. Wir entwickeln unsere Produkte immer weiter und wir entwickeln auch immer mehr Produkte. Wir haben mittlerweile schon einige verschiedene Produkte, die du dir auch mal auf unserer Homepage anschauen kannst.

5. *Das ist dann besonders Laborarbeit oder auch anderes?*

Wir beschäftigen uns wirklich von der Forschung, also vom Labor bis dann zur finalen Produktionskala, weil wir ja auch selber produzieren. Es ist wichtig, dass wir das was wir im Labor herausfinden auf Produktionsmassstab skalieren können. Man fängt zum Teil im Labor an, zum Teil schon auf grösserer Skala und gehen dann bis hin zur Gesamtproduktionsskala, um Produkte, Maschinen und so weiter zu entwickeln.

¹⁴² Planted, 2021

6. *Im Labor ist es ein Ausprobieren und Experimentieren oder ist das alles sehr vorausgeplant?*

Forschung hat eigentlich immer zwei Komponenten: Das eine ist systematisch Verständnis generieren, wieso wir was finden, das ist dann systematische Forschung, aber dann gehört zum Forschen auch eine Komponente, dass man Prototypen macht und dass man Dinge ausprobiert und sich auch in Extrembereiche bewegt, um womöglich was zu sehen, was man vorher noch nicht gesehen hat. Viel systematisch, zwischendurch auch explorativ.

7. *Alles was ihr selber im Labor macht wird auch dokumentiert oder?*

Ja, das gehört auch dazu.

8. *Wie sieht so eine Labor-Dokumentation aus?*

Im besten Falle fängt man eigentlich damit an, dass man eine Hypothese aufstellt, was man sehen möchte beim Versuch. Dann schreibt man auf was man macht, stellt dann die Resultate an, schliesst Schlussfolgerungen und widerlegt oder bestätigt die Hypothese, die man am Anfang aufgesetzt hat.

9. *Und auf die Hypothese kommt man durch Ausprobieren oder dadurch, dass man sich zuvor damit auseinandergesetzt hat?*

Durch Wissen, ja genau.

10. *Zur Verpackung: Zurzeit nutzt ihr da Plastik und Karton, was sind Gründe für diese Wahl?*

Das Allerwichtigste an der Verpackung von Lebensmittel ist, dass sie die Produktsicherheit gewährleistet. Je nach dem, was du für ein Produkt hast, heisst das Gewährleisten von Sicherheit verschiedene Dinge: Wenn man beispielsweise Erdbeeren in einer Schale hast und da noch etwas drumgewickelt ist, dann möchtest du, dass da keine grösseren Fremdkörper reinfallen. Wenn du eine Chipspackung anschaut, dann möchtest du dass da keine Feuchtigkeit reinkommt, damit die Chips nicht anfangen zu Schimmeln und nicht weich werden. Also dass die Produktqualität und die Sicherheit erhalten bleibt. Bei der Verpackung für so fleischartige Produkte oder so eher frische Produkte ist es oft so, dass man entweder ein Vakuum zieht, dann haben Bakterien und Schimmel kaum oder verzögertes Wachstum, weil einfach sehr wenig Sauerstoff dabei ist, oder wie eben bei unserer, man tut eine modifizierte Atmosphäre rein. Das ist dann ein bestimmtes Gasgemisch, in dem dann beispielsweise sehr wenig Sauerstoff drin ist oder vor allem Stickstoff und zum Teil CO₂. Dafür ist es wichtig, dass die Verpackung nicht nur so zu ist, dass keine grösseren Fremdkörper reinfallen, sondern auch der Gasaustausch so gering ist, dass zum Beispiel nicht ganz viel Sauerstoff reingeht und Bakterien sich vermehren können. Oder dass es sich nicht auflöst, wenn es ein bisschen feucht wird. Das Fleisch ist ja ein bisschen feucht, dann darf sich das aussen auch nicht auflösen. Da ist das Allerwichtigste, dass sie Verpackung diese Hygienestandard halten kann, ansonsten hält sich das Produkt nur sehr kurz, weil es dann sehr schnell abläuft. Der grösste Umweltimpact von unserem Produkt kommt von den Rohmaterialien. Wenn unser Produkt mal verarbeitet ist und man es dann wegwerfen muss, dann ist das das Schlimmste, was die Umwelt angeht. Deshalb ist das Wichtigste, dass eine Verpackung gut schützt.

11. *Und ihr habt also dieses spezielle Gasgemisch in der Verpackung?*

Ja genau. Das kannst du mal nachlesen, das heisst modified atmosphere packaging, so ist es bei vielen Produkten für den Supermarkt, Salat, Fleisch, das ist eigentlich bei allem drin, MAP ist das. Bei unserer Webshop-Verpackung haben wir einfach Vakuum.

12. Weshalb ist das, was ihr über das Internet verkauft, in Vakuum abgepackt?

Das was wir über den Webshop verkaufen ist gefroren und wenn man das Ganze in Vakuum verpackt, dann kann man es gut einfrieren, das hast du vielleicht auch schon bei Lebensmittel gesehen.

13. Ist das so, weil es so weniger Platz in Anspruch nimmt?

Nein, es ist eigentlich nur wegen dem gefrieren. Wenn es in Vakuum verpackt ist, friert es schonender ein und ist somit besser für die Produktqualität. Ein Webshop-Produkt soll ein bisschen länger haltbar sein.

14. Aber wenn ihr Produkte im Laden verkauft, ist doch die Methode der modified atmosphere packaging doch überzeugender?

Der Vorteil ist, dass dort die Stücke lose drin sind und das sieht ansprechender aus. Es ist sehr gut für die Haltbarkeit und wir haben uns dafür entschieden, das Produkt nicht zu einzufrieren.



Kantonsschule Freudenberg Zürich
 **Liceo Artistico**
Schweizerisch-italienisches Kunstgymnasium