

Weimako GmbH

Ziegeleistraße 12
82327 Tutzing
Telefon +49 (0) 8158 - 9070880
info@weimako.com

„Airtight – Luftdichte, biobasierte Cellulosehülsen für Kosmetik-Packaging“

**Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt
gefördert unter dem AZ: 35072/01 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt**

Von

Andreas Mayrginther, Sebastian Wagner

Juni 2021

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

Im Kosmetik-Markt festigt sich zunehmend der Ruf nach „grünen“, kunststofffreien Lösungen. Besonders im Bereich der Make-Up Hülsen und Stifte besteht enormes Potential zur Substitution von Plastik mit ökologisch optimierten Materialien. Ziel dieses Projektes ist es, eine luftdicht versiegelte, biobasierte Cellulosehülse zu entwickeln, deren Versiegelungsschicht keine negativen Auswirkungen auf die Bioabbaubarkeit der Cellulosehülse hat. Es soll möglich sein, langhaftende 24 - 48 h Make-Ups abfüllen zu können, ohne dass die volatilen Bestandteile der Pflegemasse durch die Wandung hindurch diffundieren können, wodurch sich für die Weimako GmbH und ihre Kunden eine enorme Wertsteigerung im Endprodukt ergibt.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Die Luftdichtigkeit soll durch das Aufbringen einer Silanschicht (Silanisierung) auf der Hülse geschaffen werden. Hierfür muss ein biobasiertes, recyclebares Granulat entwickelt werden, welches die benötigten Eigenschaften für die Nachbehandlung mit Oberflächenmodifizierung vorweist. Die Anforderungen an Spitzbarkeit, Dekorierbarkeit, Haptik etc. sind sehr umfassend. In einem ersten Schritt sollen die bestehenden, biobasierten Lösungen auf ihre Eignung zur luftdichten Versiegelung mit Siliciumwasserstoff (SiH₄) überprüft werden. Die bisherigen Hülsen auf Cellulosebasis bestehen aus einer Mischung von Arboblend 3178X und Arboblend 3344V1. Der Anteil an Biopolymeren des Stiftes soll am Ende zwischen 75-95 % liegen. Die Front- und Endkappen sollen durch biobasierte Materialien ersetzt werden. Für den Silanisierungsprozess muss eine Isolationskammer zur Behandlung der Rohhülsen mittels Flammenpyrolyse entwickelt werden. Es soll ein größtenteils geschlossenes System entstehen, das die Durchführung der Hülsen mittels Kettenförderer und eine Abgasabführung gewährleisten kann. Die Bildung einer silikatischen Schicht an der Hülsoberfläche geschieht mittels Flammenpyrolyse. Dadurch kann eine dünne und gleichzeitig sehr dichte Schicht (4-50 nm) aufgebracht werden. Für das Aufbringen der Silanschicht muss ein geeignetes Verfahren zur Vorbehandlung der Substratoberfläche gefunden werden. Zur Überprüfung der Luftundurchlässigkeit der beschichteten Hülsen müssen Stabilitätstests durchgeführt mit unterschiedlichen hochflüchtigen Formulierungen und 100 % Isodecan im Fremdauftrag durchgeführt werden. Es wird ein sogenannter 3-Monats-Test durchgeführt. Der maximale Gewichtsverlust darf nach Ende des Tests nicht über 5-8 wt% liegen.

Deutsche Bundesstiftung Umwelt • An der Bornau 2 • 49090 Osnabrück • Tel 0541/9633-0 • Fax 0541/9633-190 • <http://www.dbu.de>

Ergebnisse und Diskussion

Die, in Zusammenarbeit mit den Granulatherstellern, entwickelten Stifthülsen haben die finalen Kundentests bestanden und sind bereits im freien Markt erhältlich (Alkos France für die Marken Revlon, Sephora, Lady Gaga; Absatz >5 Mio Stifthülsen pro Jahr), oder kommen in der neuen, mikroplastikfreien Variante in Q1/2022 in den Markt (Schwan Cosmetics; Absatz >7,5 Mio Stifthülsen pro Jahr).

Als nächstes Ziel soll jetzt aus dem gleichen biobasierten, nachhaltigen Material ein drehbarer Automatikliner entwickelt werden. Absatzmenge: > 15 Mio Automatikliner pro Jahr

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

3. Platz in der Kategorie "Impact of product"

beim **Sustainable Impact Award (SIA) der WirtschaftsWoche der Handelsblatt Media Group**. Das ist für uns eine großartige Anerkennung und Bestätigung für die Entwicklungsarbeit, unseren Eifer und die Ergebnisse der vergangenen sechs Jahre.

Wir sind stolz darauf!

Auch unseren Kunden sind wir dafür dankbar, dass sie immer an uns glauben und uns vertrauen: **DANKE!**



Fazit

Mit Hilfe der Förderung konnten wir entscheidende Schritte in Richtung Marktreife einer cellulosebasierten, nachhaltigen und luftdichten Kosmetikstifthülse durchführen.

Eine Prototype kann als neue Entwicklung voraussichtlich im **Quartal 1/2022** an einen der größten Kosmetikstiftabfüller in Deutschland verkauft werden. Dieser Kunde verkauft wiederum unsere neue Stifthülse als abgefülltes Fertigprodukt an eine global agierende Kosmetikmarke. Wenn dies eintritt, hat sich die Entwicklungszeit mit allen Mühen und Kosten ausgezahlt.

Inhalt

Projektkennblatt.....	2
Abbildungsverzeichnis	6
Tabellenverzeichnis	6
1. Einleitung - „Airtight – Luftdichte, biobasierte Cellulosehülsen für Kosmetik-Packaging“	7
2. Hauptteil.....	8
2.1. Detaillierung Gesamtkonzept, Festlegung der Anforderungen, Erstellung Pflichtenheft, Marktanalyse	8
2.2. Auswahl, Analyse und Entwicklung geeigneter Compoundrezepturen auf Basis nachwachsender Rohstoffe	8
2.2.1. Extrusionsversuche zur Verbesserung der Maßhaltigkeit und der Oberflächengüte	8
2.2.2. Versuchsergebnisse: biobasierte Frontkappen	10
2.2.3. Extrusionsprobleme.....	11
2.2.4. Extrusionsversuche Sulapac – Materialien.....	11
2.2.5. Unterschiede zwischen Arboblend und Sulapac	13
2.3. Entwicklung einer Isolationskammer zur Silangasbehandlung, Abgasabführung.....	14
2.4. Auswahl bestehender Verfahren zur Vorbehandlung der Substratoberfläche, Durchführung von Tests und Ergebnisanalyse.....	14
2.4.1. Spitzbarkeit.....	14
2.4.2. Dekorierbarkeit.....	15
2.4.3. Oberflächenqualität.....	15
2.5. Anfertigung Probechargen Slim, Jumbo	16
2.5.1. Spitzbarkeit.....	18
2.5.2. Spritzguss Frontkappen	18
2.6. Durchführung von Stabilitätstests	19
2.6.1. Silanisierung.....	19
2.6.2. Ergebnisse Dichtigkeitstest.....	21
2.7. Optimierung des Gesamtsystems; Redesign	21
2.7.1. Optimierung der Spitzmaschine, Veränderung des Klemmklotzes	21
3.1.1. Vorrichtung zum Brechen des beim Planen entstehenden Spanes	22
4. Fazit und Abschlussbemerkung	23

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schmelzinnendruck auf Steuerung	12
Abbildung 2: von oben nach unten: folierten Cellulose Hülse; undekorierte Cellulose Hülse; undekorierte Sulapac-Hülse (Flow 1.7); folierte Sulapac-Hülse (Flow 1.7)	15
Abbildung 3: Herstellungsversuche Sulapac	15
Abbildung 4: Spitzversuche	18
Abbildung 5: Klemmklotz	22
Abbildung 7: Vorrichtung zum Spanbrechen	23

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Untersuchungsergebnisse der Laboranalyse (Dr. Graner).....	19
Tabelle 2: Dichtigkeitstest bei 20°C	20
Tabelle 3: Dichtigkeitstest bei 40°C.....	20
Tabelle 4: Übersicht Teilequalität.....	18

1. Einleitung - „Airtight – Luftdichte, biobasierte Cellulosehülsen für Kosmetik-Packaging“

Das Ziel dieses Projektes war die Entwicklung von luftdichten Liner-Hülsen für die Anwendung in der Kosmetikindustrie aus einem biobasierten, nachhaltigen sowie recyclebarem Biopolymer auf Basis von Cellulose und Lignin im Extrusionsverfahren.

Mit verfolgt wird dabei auch die Entwicklung von luftdichten Front- und Endkappen aus biobasierten Materialien - bei den Frontkappen vorzugsweise aus transparenten Biopolymeren.

Bereits vor Beginn dieses Forschungsprojektes wurden eine Vielzahl an Entwicklungstätigkeiten im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie geförderten Programmes „Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand“ (ZIM) durchgeführt.

Es konnte zwar bereits eine für viele Anwendungen passende Materialkomposition in Kooperation mit dem Materialhersteller Tecnar (Arboblend) evaluiert werden, allerdings weisen die daraus hergestellten Hülsen eine noch für sogenannte Long Lasting Formulierungen unzureichende Luftdichtigkeit auf. Der hierbei genannte Begriff der Luftdichtigkeit ist technisch gesehen allerdings nicht korrekt. Grund hierfür ist, dass die Hülsen keine Dichtigkeit gegenüber Luft aufweisen sollen, sondern eine Migration, der in den abgefüllten kosmetischen Massen enthaltenen leichtflüchtigen, volatilen Bestandteilen, wie z.B. Isododecan und Silikonölen verhindern bzw. auf ein akzeptables Mindestmaß begrenzen sollen. Die Folge eines zu starken verflüchtigen dieser Bestandteile kann zu einem austrocknen der Mine und folglich zu einem Herausrutschen führen.

Neben einer ausreichenden Dichtigkeit der Hülse selbst ist zudem eine gute Abdichtung zwischen Hülse und der Front- bzw. Endkappe sehr wichtig. Weiterhin spielt die Wahl des Kappenmaterial eine bedeutende Rolle.

Einige Einflussfaktoren auf die Migration:

- Art des abgefüllten Lösungsmittels (chemische Reaktivität, Molekülgröße, usw.)
- Umweltbedingungen (Temperatur, Luftfeuchte)
- Beschaffenheit der Hülse (Rauigkeit der Oberfläche, Material, Porosität, Wandstärke)
- Verweildauer (Stichwort: Mindesthaltbarkeitsdatum des Produktes)

2. Hauptteil

2.1. Detaillierung Gesamtkonzept, Festlegung der Anforderungen, Erstellung Pflichtenheft, Marktanalyse

Anhand der Kundenanforderungen wurde das Grundkonzept wie folgt aufgebaut:

- **Auswahl Rohstoff** (Cellulose Granulate auf Basis nachwachsender Rohstoffe)
- **Testreihenfolgen** / **Pflichtenhefte** ergeben sich wie folgt: Extrusion (wenn i.O., dann), Planen und Spitzen der Stifthülse (wenn i.O., dann), Dekoration (Folierung oder Lackierung) (wenn i.O., dann), Testabfüllung mit kosmetischer Formulierung bei Kundem mit anschließendem 3-monatigem Stabilitätstest in der Wärmekammer (wenn i.O., dann), Freigabe und Markteintritt
- **Marktanalyse:** Allein Schwan Cosmetic stellt ca. 600 Mio. Stifthülsen pro Jahr her und ist damit weltweit der größte Stifthersteller. Die projektbezogene Marktanalyse wurde uns durch die Kunden als Planmenge vor dem Projektstart mitgeteilt. Diese lag bei den Wood Plastic Pencils (Tecnaro Granulat) bei > 10 Mio. Stifthülsen und bei den mikroplastikfreien Stifthülsen (Sulapac Granulat) zwischen 5-10 Mio. Stifthülsen allein für den exklusiven Kunden L`Oreal.

2.2. Auswahl, Analyse und Entwicklung geeigneter Compoundrezepturen auf Basis nachwachsender Rohstoffe

2.2.1. Extrusionsversuche zur Verbesserung der Maßhaltigkeit und der Oberflächengüte

Material: 75 % Arboblend 3178 X + 25 % Arboblend 3344 V (Standardmaterialmix)

In der Vergangenheit hat sich immer wieder gezeigt, dass es oftmals schwierig ist sowohl die Abmessungen der Hülsen innerhalb der Toleranz zu halten als auch gleichzeitig eine glatte, gleichmäßige Oberfläche zu erreichen. Es kann hierbei eine Abflachung an der Strangoberseite, meist in Kombination mit Rillen in Produktionsrichtung, festgestellt werden. Auch durch eine, über mehrere Versuchsreihen durchgeführte, systematische Veränderung verschiedenster Extrusionsparameter (Drehzahl, Temperatur, Vakuum, Abzugsgeschwindigkeit, anlegen von Stützluft, Abstand Düse Kalibrierung, Position Kalibriertisch) konnte leider kein zuverlässig laufender Prozess erzielt werden.

Als eine Hauptursache für die Abflachung und Rillenbildung wird der Wasseraustritt aus der Spritzkühlung (zwischen Düse/Dorn und Kalibrierung) bzw. eine Anstauung von Wasser angesehen. Um die Wassermenge auf das mindestens notwendige Maß zu begrenzen fand ein Einlegen verschiedener saugfähiger Materialien (Filz, Schaumstoff, Schwamm) zwischen Haltering und Spritzkühlung statt.

Theorie: Verringerung der Durchflussgeschwindigkeit des Wassers + gleichmäßigere Verteilung auf der Hülsenoberfläche => gleichmäßigere Oberflächenbeschaffenheit

Die Kombination von Spritzkühlung (Spritzring mit großen Bohrungen) + Schwamm führte zur stärksten Verbesserung der Prozessstabilität, allerdings nur bei der Produktion von Slim Hülsen. Es kommt nicht mehr zu ruckartigen, unregelmäßigen Verschlechterungen der Oberfläche. Das Einlegen des Schwammes vermindert zudem die Ablagerung von im Wasser enthaltenen Partikel in den Bohrungen der Spritzkühlung.

Material: Sulapac 10 UI04

Das Material Sulapac 10 UI04 ist aufgrund seines zu hohen Meltflow - Indexes für die Verarbeitung auf dem Extruder, selbst bei einer sehr niedrigen Verarbeitungstemperatur, zu dünnflüssig. Zudem neigt es aufgrund seiner hohen Sprödigkeit zum Zerfall in kleine Partikel innerhalb der Kalibrierung. Folglich eignet sich dieses Material nicht für die Extrusion.

Es sind Versuche mit zwei speziell von Sulapac für die Extrusion produzierten Materialien geplant.

Front – und Endkappen

Materialauswahl:

Bei uns bekannten Lieferanten wurden biobasierte Materialien für die Spritzgusstechnik angefragt.

Die Einteilung in die verschiedenen Ausgangsrohstoffe auf denen die bereitgestellten / gelieferten Compounds basieren, gestaltete sich aufgrund verschiedener Umstände (Materialblends, fehlende Daten und Auskunft der Lieferanten, usw.) mitunter schwierig.

Wir teilen dennoch in folgende Gruppen ein:

- PLA, milchsäurebasierte Biopolymere
- Cellulose, cellulosebasierte Polymere, Celluloseacetat
- Blends (Polymermischungen)

Verarbeitung:

Grundsätzlich ist auf die sehr engen Prozessparameter aufgrund der thermischen Empfindlichkeit zu achten!

Auswirkungen können sein:

- Starke Geruchsentwicklung, Gelb/ - Braunfärbung,
- Sprödigkeit und sehr schwere Entformbarkeit der Spritzgussteile (Schäden im Plastifizierzylinder, Schnecke und am Spritzgusswerkzeug)
- Abrasion und korrosive Wirkung
- schlechter Materialeinzug bis hin zum Abscheren des Schneckenantriebes (Sicherheitskupplung)
- Hoher Reinigungsaufwand vor und nach den Versuchen

Teilequalität: Es wurden Materialien gefunden, die sich gut verarbeiten ließen. Allerdings war der Geruch einer Vielzahl dieser Materialtypen (hauptsächlich der PLA - Typen) inakzeptabel und Produkte daraus nicht vermarktbar.

Mithilfe eines Masterbatchherstellers wurde die Möglichkeit der Kaschierung durch Aroma - Zugabe zur Entwicklung gebracht.

2.2.2. Versuchsergebnisse: biobasierte Frontkappen

Material: Sulapac 10 UI04 (nicht transparent)

Dieses nicht transparente, holzfarbene Material ist aufgrund seiner hohen Sprödigkeit und der damit verbundenen Neigung zu Spannungsrissen (Weißbruch) beim Montieren der Frontkappe auf die Hülse für diese Anwendung ungeeignet. Zudem weisen die Teile eine ungleichmäßige Farbe auf (gelbe Punkte) Die Verarbeitung auf der Spritzgusslinie hingegen war relativ wenig fehlerbehaftet.

Material: F-Kur 5509 CL (transparent)

Reines Material ist nicht zufriedenstellend verarbeitbar.

Auftretende Probleme:

- Transparenz nicht perfekt
- Wolkenbildung, leichte Schlieren
- Plastifizierung: Anfangs keine Probleme, nach etwa 5 min. Laufzeit jedoch starkes Quietschen, Effekt verstärkt sich bis zum drohenden Stillstand der Schnecke, dann wieder nachlassend bis Dosierung ohne Geräusch und gutes Einziehen. Phänomen äußert sich wellenartig und zyklisch wiederkehrend. Erhöhung der Temperatur schafft keine Abhilfe der Dosierprobleme, Teile jedoch transparent bis hochtransparent - abhängig vom Dosierprozess
- Material reagiert sehr sensibel durch Zersetzung

Zur Behebung / Minderung der oben genannten Probleme fand als Gegenmaßnahme eine Zugabe von verschiedenen Additiven statt.

- Cearit ; Baerlocher: (Braunfärbung der Teile, Brandstellen => ungeeignet)
- AB – Gleitmittel (1% Zugabe => funktioniert gut => keine Dosierprobleme, keine Verfärbung);
- Baerlocher Zinkum PS : ebenfalls starke Braunfärbung. (0,2% Zugabe)

Die Teilequalität ist durch höhere Spitztemperatur besser, dadurch aber Zersetzungsgefahr (Heißkanal muss absolut frei von Restmaterial sein)

Arboblend 4255 R (transparent)

Das prinzipiell relativ gut zu verarbeitende transparente Arboblend 4255 R zeigt leider bei der Trocknung und dem Verarbeiten auf der Spritzgussmaschine eine sehr negativ auffallende Geruchsbildung (stechend, reizend). Auch nach dem Verarbeiten weisen die Endprodukte einen erheblichen Geruch auf. Für die überwiegende Mehrheit unserer Kunden ist dieser jedoch inakzeptabel.

Um dem entgegenzuwirken, fanden Versuche mit einem eigens hierfür komponentierten Duftstoffmasterbatch (Vanille) statt. Abgesehen von einer leichten Veränderung des Geruchs war keine echte Verbesserung zu beobachten.

Außerdem musste auch hier ein Gleitmittel eingesetzt werden, um Schnecken- und Zylinderschäden zu verhindern. Diese stammt vom Materiallieferanten Tecnar und ist wirksam.

Andere Arboblendtypen (4261 R, 4263 R) haben eine ähnliche Verarbeitungscharakteristik, zeigen in der Teilequalität aber andere Eigenschaften. (Schlechtere Füllung, Wellenbildung, Brandstellen).

Die selben Dosierprobleme deuten auf einen generellen Effekt bei den PLA- Typen; hersteller- und markenübergreifend hin.

Weitere Materialien werden gesucht, angefordert und getestet.

2.2.3. Extrusionsprobleme

Eine weiterhin noch vorhandene Problemstellung ist, dass es trotz einer Vielzahl durchgeführter Optimierungsmaßnahmen immer noch schwierig und zeitintensiv ist eine konstant gleichmäßige Maßhaltigkeit (Innen – und Außendurchmesser, Rundheit, Konzentrität) bei gleichzeitig guter Oberflächengüte (frei von Rillen, Glanzstellen, Rattermarken) zu erreichen. Die Qualität der Hülsen schwankt während des Extrusionsprozesses oft schlagartig und lässt sich dann oft nur schwer wieder verbessern. Im Gegensatz zu den anderen verwendeten Standardkunststoffen wie PP und AES besitzt das zurzeit hauptsächlich verwendete Biocompound der Firma Tecnar somit ein sehr enges Verarbeitungsfenster. Auch zeigt sich ein merklicher Unterschied in der Verarbeitbarkeit zwischen dem hinsichtlich des Außendurchmessers kleineren Slim Formates im Vergleich zum größeren Jumbo Hülsen. Für alle nachfolgenden internen Verarbeitungsschritte wie Spitzen, Folieren und Siebdrucken als auch externen Verarbeitungsschritten (Befüllen der Hülse mit der kosmetischen Masse) ist allerdings eine gute Maßhaltigkeit und glatte Oberfläche essentiell wichtig, um die Ausschussmenge auf einem Mindestmaß zu halten bzw. die Verbreitung (Dekoration, Befüllung) erst zu ermöglichen.

Abwägung verschiedener Verfahrensmöglichkeiten zur Verbesserung der Migrationsdichtigkeit:

- Aufbringen einer zusätzlichen Schicht (z.B. Silan) auf die innere und/oder äußere Hülsoberfläche => bevorzugtes Verfahren
- Koextrusion => unrentabel, da sehr hoher Maschinenanschaffungspreis und potenziell problematische Wiederverwendung des Extrusionsausschusses (unkontrollierte Materialuntermischung) => erhöhte Materialkosten

2.2.4. Extrusionsversuche Sulapac – Materialien

Um eine breitere Versuchsstreuung zu erreichen, wurde ab 01/2020 eine Kooperation mit einem neuen Lieferanten (Sulapac) forciert.

Neben der bereits erwähnten Materialtype 10 UI 104 wurden uns weitere Materialien vorgestellt:

- Sulapac Flow Code Ex 100501
- Sulapac Flex Code CW 122F2
- Sulapac Flow 1.6 (Extrusion)
- Sulapac Flow 1.7 (Extrusion)
- Sulapac Flow 1.8 (Extrusion)
- Sulapac Universal INJ (Spritzguss)
- Sulapac CW 28 C5 (Spritzguss)

- Sulapac CW 28 C9 (Spritzguss)

Der Hersteller Sulapac ist ein 2016 gegründetes finnisches Unternehmen, das sich auf die Herstellung von Biopolymeren spezialisiert hat. Das Interesse von WEIMAKO und Sulapac liegt in der gemeinsamen Grundlagenforschung und Weiterentwicklung von Verpackungen aus biobasierten und biologisch abbaubaren Verpackungen – wie zum Beispiel unserer Stifthülsen mit Zubehör. Einige Materialien wurden bereits von anderen Verarbeitern getestet und für deren Anforderungen entwickelt.

All diese derzeit verfügbaren, oben gelisteten Materialien wurden von WEIMAKO getestet.

Vorbereitend für alle Extrusions - Versuche mussten folgende Massnahmen getroffen werden:

- Material nach Herstellerangaben vortrocknen (z. B. 4 Std. bei 80° C)
- Extruderschnecke - und Zylinder reinigen
- ggf. Extruderkopf abbauen, Lochscheibe ausbauen
- Lochscheibe reinigen, ggf. einbauen, Extruderkopf aufbauen
- ggf. Kalibrierung wechseln oder neu konfigurieren
- ggf. Vakuumbecken, Ablaseinheit, und Cutter umbauen und einrichten

Erste Beobachtungen:



Abbildung 1: Schmelzinnendruck auf Steuerung

Die bereitgestellten Sulapac Granulate treten homogen und zähflüssig aus der Extruderdüse aus.

Der Massestrom ist kompakt und gasblasenfrei. Gegenüber Materialien anderer Hersteller sind Schwindung und Schrumpf relativ gering, sodass eine Standard Cellulose-Konfiguration der Kalibrierung relativ grosse Aussendurchmesser erzeugt (ca. + 0,1mm ggü. Standard).

Die Strangoberfläche ist vor dem Eintritt der Spritzkühlung und der Kalibrierstrecke glatt und homogen, reißt aber beim ersten Wasserkontakt auf und erzeugt eine sehr raue Oberfläche. (Vglb. mit Schleifpapier der Körnung 40-60).

Darüber hinaus lässt sich der Strang nicht richtig füllen, d.h. sobald sich die Aussenhaut an die Kalibrierung anlegt (bei Erhöhung der Extruderzahl), beginnt der Strang unkontrolliert zu taumeln – bis zum plötzlichen Abriss.

Gegenmassnahmen wie die Verkleinerung der Düse/ Dorn- Kombination, der Spritzkühlung und der Kalibrierungslängen brachten keine nennenswerte Verbesserung.

Auffällig war auch der ungewöhnlich hohe Schmelzeinnendruck von bis zu 150 bar (gewöhnlich 40 bis max. 80 bar).

Ebenso ungewöhnlich war die Tendenz des Compounds, sich durch eine innere Friktion selbst aufzuheizen, was die Heizungsregelung durch das Starten der Kühlgebläse versuchte, auszugleichen.

Dies gelang nicht, und die vom Hersteller empfohlene Verarbeitungstemperaturen konnten nicht eingehalten werden.

Eine Erhöhung der Zylinder- und Kopftemperaturen verringerte die Kühlneigung des Extruders nur vorübergehend und nur geringfügig.

Das Ausbauen des Schmelzesiebes nach Empfehlung von Sulapac zeigte keine merkliche Veränderung des Extrusionsprozesses bei den Flow - Typen von Sulapac. Jedoch konnte als sehr angenehmer Nebeneffekt die Prozessstabilität und Oberflächenqualität bei der Produktion von unseren Standard Cellulosehülsen signifikant verbessert werden.

Grundsätzlich lässt sich bei den bisher verwendeten Granulaten feststellen, dass sie zur Bildung eines brüchigen, empfindlichen Stranges neigen, bei dem es je nach Typ anspruchsvoll bis sehr schwer ist einen zuverlässigen Prozess, unter Einhaltung aller in der Spezifikation definierten Toleranzvorgaben, sicherzustellen.

2.2.5. Unterschiede zwischen Arboblend und Sulapac

Beim Anfahren unseres Extruders mit unserem Standardmix (Arboblend 3178X + 3344V) muss zunächst mittels Drehzahlerhöhung und Beaufschlagung von Vakuum dafür gesorgt werden, dass der Strang an der Kalibrierung anliegt. Somit wird eine glatte Hülsoberfläche und ein sich innerhalb der Toleranz befindlicher Außendurchmesser erreicht. Der meist noch zu geringe Innendurchmesser lässt sich durch eine weitere Erhöhung der Extruderzahl auf das gewünschte Sollmaß bringen.

Im Vergleich hierzu zeigen die SULAPAC Materialien ein anderes Verhalten auf. Ein vollständiges Anliegen des Stranges an der Kalibrierung ist, wenn überhaupt, nur kurzzeitig möglich (Folge: Abriss). Eine Veränderung der Drehzahl bewirkt auch immer gleichzeitig eine Veränderung des Außen - als auch Innendurchmessers. Es ist also viel schwieriger beide Maße innerhalb des engen Toleranzfensters einzustellen und zu halten.

Die Kalibrierung dient somit weniger als maßgebende Einheit, sondern mehr als Stabilisation für den, direkt nach dem Eintritt in die erste Vakuumkammer, immer noch stark plastischen Strang, um ein ungewolltes Durchbiegen zu verhindern.

Sulapac CW 41 C2

Nach durchtesten verschiedener Kombination von Düse und Dorn erwies sich die Düse mit 7,5 mm zusammen mit dem 3,2 mm großen Dorn als die bisher am besten geeignete Variante. Es konnte hiermit eine deutliche Verbesserung sowohl der Prozessstabilität als auch der Maßhaltigkeit erzielt werden. => Produktion der 0-Serie möglich, wenn auch noch weiter verbesserungswürdig.

2.3. Entwicklung einer Isolationskammer zur Silangasbehandlung, Abgasabführung

Von der ursprünglichen Idee die Teile zur Verbesserung der Migrationsdichtigkeit zu Silanisieren wurde nach ein paar Versuchen wieder verworfen, da das Verfahren zum einen teuer ist (in Kombination mit dem ohnehin schon teuren Material ist das Produkt nicht mehr wettbewerbsfähig) und zum anderen ist der logistische Aufwand zu hoch. Weiterhin kommt der bereits oben erwähnte Effekt, dass die Hülse bereits von Natur aus sehr dicht ist. Auf die Oberflächenunebenheiten hat das Silanisieren keine positiven Auswirkungen (Verringerung der Rauigkeit). Vergleichbar mit der Lackierung bei SCHWAN.

2.4. Auswahl bestehender Verfahren zur Vorbehandlung der Substratoberfläche, Durchführung von Tests und Ergebnisanalyse

2.4.1. Spitzbarkeit

Hinsichtlich der Spitzbarkeit der Hülsen lässt sich folgendes feststellen. Da bei allen Extrusionsversuchen nur Hülsen mit einer (je nach Materialtyp mehr oder weniger) rauen Oberfläche (siehe Abbildung unten) produzierbar waren ist die Handhabung an der maschinellen Spitzanlage deutlich schwieriger/aufwendiger, verglichen mit unserem Standard Celluloseprodukt. Die Oberflächenunebenheiten sorgen für ein „Verhaken“ der Teile untereinander und erschweren somit:

- das Ausrichten der Teile beim Einlegen in das Magazin der Spitzmaschine,
- die Entnahme der Hülsen nach dem Spitzvorgang,
- die Entfernung der sich um die Hülse gewickelten Späne,
- die Qualitätskontrolle (Längenkontrolle) in unseren eigens „entwickelten“ Schaukasten.

Der eigentliche Spitzprozess in der Spitzmaschine hingegen verlief verglichen mit anderen Materialien/Produkten relativ problemlos.

Die manuelle Spitzbarkeit kann als sehr gut beurteilt werden. Der zum Spitzen notwendige Kraftaufwand ist im Vergleich zu anderen Kunststoffen wie PP, AES signifikant geringer und ähnelt unserer Meinung nach sehr stark dem von klassischen Zedernholzstiften.

- Glatte Oberfläche der Spitzkante
- Moderates Ausfransen der Spitze

2.4.2. Dekorierbarkeit

Auch auf die Dekorierbarkeit der Hülsen mit einer Folie wirkt sich die raue Oberfläche erwartungsgemäß negativ aus. Im Vergleich zu unseren Standardhülsen aus Cellulose ist eine deutlich sichtbare „Orangenhaut“ erkennbar. Ursächlich hierfür ist die Tatsache, dass die Folie die Vertiefungen der Hülsenoberfläche nicht ausreichend auffüllen kann. Den Tape-Test (testet Abzugsfestigkeit der Folie) hingegen haben alle Muster bestanden.



Abbildung 2: von oben nach unten: folierten Cellulose Hülse; undekorierte Cellulose Hülse; undekorierte Sulapac-Hülse (Flow 1.7); folierte Sulapac-Hülse (Flow 1.7)

Obwohl die Dekorierbarkeit somit grundsätzlich gewährleistet ist muss die Oberflächenqualität in weiteren Tests auf jeden Fall noch verbessert werden, um einerseits die Verarbeitbarkeit auf den internen Maschinen zu vereinfachen und andererseits die Kundenanforderungen erfüllen zu können.

2.4.3. Oberflächenqualität



- | |
|----------------------------------------------------------------------------------------|
| V1. Sulapac Flow 1.6 |
| V2. Sulapac Flow 1.6 (75%) + Arboblend 3178 X (25%) |
| V3. Sulapac Flow 1.6 (75%) + Arboblend 3178 X (25%),
geänderte Maschineneinstellung |
| V4. Sulapac Flow 1.7 |
| V5. Sulapac Flow 1.8 |

Abbildung 3: Herstellungsversuche Sulapac

Bei den Versuchen V1, V4 und V5 handelt es sich jeweils um 100% Sulapac Material. Die daraus produzierten Hülsen sind somit dem Hersteller zufolge zu 100 % mikroplastikfrei und zudem unter industriellen Bedingungen laut der geltenden Norm kompostierbar. Durch Mischen mit Arboblend 3178 X (zur Verbesserung der Oberflächenglätte) wie in V2 und V3 durchgeführt, verschwinden jedoch diese Alleinstellungsmerkmale des Materials. Aus diesem Grund wurde in den weiteren Versuch auf eine Zugabe Sulapac fremder Materialien verzichtet.

Flow 1.6 (50%) + INJ 10U104 (50%):

Materialmischung ist noch etwas brüchiger als reines Flow 1.6, selbst bei direktem Düsenaustritt, kein Hochfahren des Prozesses möglich, vorher Abriss

Flow 1.6 (75%) + AB 3178X (25%):

Materialmischung ist etwas brüchig, Prozess etwas stabiler aber noch nicht sicher.

Flow 1.6 (90%) + AB 3178X (10%):

Reduzierung von AB 3178 auf 10% verschlechterte wieder die Prozesssicherheit

Flow 1.7

Material kommt rund und zäh vom Extruder; (nur mit Stirnflansch und 9 Kalibrierscheiben zum Stützen des Stranges), vergleichbar mit Flow V 1.6 pur, durch die fehlenden Kalibrierscheiben verlagert sich das Taumeln in das Kühlbecken. Mit und ohne Sprühkühlung probiert. Strang schiebt schon stark aus dem Extruder, sodass nur bis zum Gleichgewicht zwischen Abzug und Extruder gefüllt werden kann. Dann wieder Stau vor der Düse, Abriss.

Flow 1.7 (50%) + INJ 10U104 (50%):

Strang wie Mürbteig, brüchig, kein Einfädeln möglich

Luftdichtheit:

Aufgrund der noch optimierungsbedürftigen Oberflächenqualität wurden Dichtigkeitstests noch nicht durchgeführt.

Ausblick:

Bei all diesen Versuchen war eine Veränderung der Extrusionsparameter (Temperatur, Kalibrierung, Sprühring, Vakuum usw.) notwendig, leider nur mit mäßigem Erfolg. Das bis jetzt am vielversprechendste Material ist Flow 1.7. Somit zeigt sich, dass wir grundsätzlich auf dem richtigen Weg sind. Sulapac hat bereits aufgrund der gewonnenen Erfahrungen eine weitere neue Rezeptur formuliert, welche im Rahmen eines baldigen Besuches gemeinsam auf der Extrusionslinie getestet wird.

2.5. Anfertigung Probechargen Slim, Jumbo

Da sich in den vorhergegangenen Versuchen eine nur mäßig zufriedenstellende Extrudierbarkeit mit den eigentlich für die Extrusion entwickelten Materialtypen aufgezeigt hat, fanden nun auch Test mit den Spitzgusstypen Sulapac CW 28 C5 und CW 28 C9 statt.

Ergebnisse Extrusionsversuche

Sulapac CW 28 C5

Der Strang kommt zäh aus dem Extruder und lässt sich einführen. Die Dimensionen der Hülsen können nur durch die Veränderung der Drehzahl beeinflusst werden. Das Vakuum muss sehr niedrig gehalten werden. Es muss vermieden werden, dass der Strang an der Kalibrierung anliegt - sonst sofortiger Abriss. Mit der für die Standard Cellulosehülsen verwendeten Düse/Dorn Kombination ist es nicht möglich den geforderten Innendurchmesser von 4,15 mm zu erreichen, da das Minimum bei 4,4 mm liegt. Versuche den Innendurchmesser weiter zu verringern führen zu einem instabilen Prozess mit Abrissen. Extruder kühlt stark,

sehr hoher Massedruck, sehr hohe Friktion. Um das Kühlen zu kompensieren musste das Temperaturprofil angepasst werden.

Sulapac CW 28 C9

Der Strang kommt zäh aus dem Extruder und lässt sich einführen. Das Vakuum muss aber sehr niedrig gehalten werden, um keine Abrisse hervorzurufen. Der Extruder kühlt aufgrund einer hohen Friktion weiterhin, im Vergleich zu den anderen Versuchen jedoch nicht mehr so stark. Der Massedruck bleibt jedoch ebenso auf einem ungewöhnlich hohen Niveau. Als positiv lässt sich die Tatsache beurteilen, dass dieses das erste Material ist, bei welchem sich der Strang an die Kalibrierung anlegt, ohne abzureißen und somit ein stabiler Prozess möglich ist. Mit der für die Standard Cellulosehülsen verwendeten Düse/Dorn Kombination kann der geforderte Innendurchmesser allerdings nicht zuverlässig eingehalten werden – das Minimum liegt bei 4,2 mm.

Sulapac Flow 1.9

Das Material lässt sich aufgrund der relativ hohen Zähigkeit sehr gut einführen. Grundsätzlich zeigt sich eine gute Verarbeitbarkeit, sowie eine sehr schöne, gleichmäßige makellose Oberflächenqualität, allerdings kommt es immer wieder zu Abrissen sobald versucht wird, die geforderten Maße einzustellen. Bereits beim Anlegen eines sehr geringen Vakuums beginnt der Strang zu taumeln, oft verbunden mit einem Abriss. Ein höheres Vakuum wäre jedoch zur Erreichung des Außendurchmessers notwendig. Die Spritzkühlung soll relativ hoch eingestellt sein, sonst ebenfalls Abriss. Eine Verringerung der Abzugsgeschwindigkeit (9 anstelle von 11 m/min) zeigt keine Verbesserung. Auch die Entfernung der Stützrollen führte zu keiner merklichen Veränderung.

Versuche mit Sulapac

Untersuchte Materialien:

- Sulapac CW 41 C1
- Sulapac CW 41 C2
- Sulapac CW 41 C3
- Sulapac CW 41 C4

Im Rahmen der mithilfe von zwei Sulapac - Mitarbeitern durchgeführten Extrusionsversuchen wurden insgesamt vier verschiedene Materialtypen auf ihre Verarbeitbarkeit hin überprüft. Es hat sich herausgestellt, dass die beiden Typen Sulapac CW 41 C1 und CW 41 C2 am vielversprechendsten hinsichtlich der Prozessstabilität, der optischen und haptischen Teilequalität sowie der maßlichen Vorgaben sind. In beiden Fällen war es möglich ausreichend Musterteile zu fertigen um diese anschließend auf unserer Spitzmaschine zu planen und an SCHWAN STABILO für Dichtigkeitstest zu senden. Von weiteren Versuchen mit den Typen CW 41 C3 und CW 41 C4 wird zum aktuellen Zeitpunkt abgesehen. Auffallend ist eine gute bis sehr gute Rundheit bei allen Versuchsmaterialien.

Tabelle 1: Übersicht Teilequalität

Trial		Compound				Dimension		Quality (1= very good; 6 =not acceptable)					Comment
Date	Trial	Material	Type	Colour	Masterbatch	OD	ID	Process	Surface	Dimension	Roundness	Sharpenability	
26.10.20	1	Sulapac	CW41C3	nature		7,75	4,55	4-5		4-5	1-2	not testet	Selfheating, ID too big, next step: change of core
26.10.20	2	Sulapac	CW41C3	nature		7,63	4,20	3-4		2	1-2	not testet	Selfheating; ID and OD within tol.
27.10.20	3	Sulapac	CW41C1	nature		7,55	4,20	5		4-5	1-2	not testet	Higher cylindertemp. ,OD too low, next step: change of calibration
27.10.20	4	Sulapac	CW41C1	nature		7,90	4,80	5		6	1-2	not testet	9 plate - calibration too big, re-change to mod. Calibration
27.10.20	5	Sulapac	CW41C1	nature		7,70	4,20	2	2-3	2	1-2	2-3	testproduction; low self-heating, stable so far
27.10.20	6	Sulapac	CW41C2	nature		7,70	4,20	2	2	2	1-2	2-3	similar to c1, surface slightly smoother
27.10.20	7	Sulapac	CW41C2	white	3% First Snow	7,60	3,98	2		5	1-2	not testet	significant lower ID and OD
27.10.20	8	Sulapac	CW41C4	nature		7,70	4,15	2-3		2-3	1-2	not testet	starting slightly instable, then ok; low self-heating then ID and OD increasing --> out of tolerances
27.10.20	9	Sulapac	CW41C4	black	3% Warm Granite	7,60	3,98	2-3		5	1-2	not testet	significant lower ID and OD

Die Zugabe von sowohl 3 % weißem (First Snow) als auch 3 % anthrazit (Warm Granite) farbigem Masterbatch (von Sulapac hergestellt) bewirkte jeweils eine signifikante Verringerung des Außen – sowie Innendurchmessers soweit, dass diese außerhalb der Toleranz sind, bei ansonsten unveränderten Maschinenparametern.

2.5.1. Spitzbarkeit

Grundsätzlich zeigen die Typen CW 41 C1 und CW 41 C2 beide eine schlechtere „Planbarkeit“ auf der Spitzmaschine im Vergleich zu unseren Standard Cellulosehülsen aus dem Material Arboblend von Tecnar. Dies ist vermutlich auf eine allgemein höhere Festigkeit der Hülsen zurückzuführen. Hingegen ist diese höhere Festigkeit auch für eine merklich unempfindlichere Oberfläche gegenüber „Druckstellen“ und Kratzer, verursacht durch die Klemmbacken der Maschine verantwortlich, was als positiv zu beurteilen ist. Die verschlechterte Spitzbarkeit äußert sich v.a. in einer vergleichsweise unsauber geplanten Kante und längeren, festeren Spänen, die sich um die Hülse wickeln und innerhalb der Maschine den Transport der Hülsen teilweise behindern.



Abbildung 4: Spitzversuche

2.5.2. Spritzguss Frontkappen

Sulapac Flex Prototype Material

Material wurde mit Vakuumtrockner vorgetrocknet. Material lässt sich gut verarbeiten, wenig Fadenbildung. Mechanische Eigenschaften: Kappen lassen sich knicken - Weißbruch, aber beim Aufdrücken stabil und flexibel genug.

PCTG Selenis XP 310

Eine Grundeinigung des Heisskanals und des Plastifizierzylinders ist erforderlich, langes Einfahren und mehrmalige Reinigung. Werkzeug wurde mit Warmwasser (50°C) erwärmt, anschließend Füllstudie durchgeführt => ungleichmäßige Füllung, Nestbezogen und über die Zyklen, keine Besserung -> evtl. Test mit Gleitmittel. Die Zugabe von 1% AB – Gleitmittel führt zu einer leichten, allerdings noch akzeptablen Trübung der Frontkappe. Die Füllstudien ergeben keine akzeptable Teilequalität (ungleichmäßige Füllung, Wellenbildung), kein stabiler Prozess möglich.

2.6. Durchführung von Stabilitätstests

2.6.1. Silanisierung

Die Silanisierung des Cellulosehülsen erfolgte bei unserem externen Dekorationspartner EPD mittels einer eigens dafür konstruierten Versuchsanlage. Zur Überprüfung und Beurteilung der Wirksamkeit dieses Verfahrens fand eine Ermittlung der Migrationsdichtigkeit der Hülsen gegenüber einem Gemisch aus Isododecan (21,6 %) und Dimethicone (10 %) in einem externen Labor statt.

Tabelle 2: Untersuchungsergebnisse der Laboranalyse (Dr. Graner)

Folienkonfiguration	Gewichtsverlust nach ... Tagen [%] bei 20°C			Gewichtsverlust nach ... Tagen [%] bei 45°C		
	7	14	28	7	14	28
S - F	0,021	0,052	0,097	0,062	0,376	1,738
S - F - S - F	0,037	0,089	0,138	0,059	0,377	1,616
S - F	0,974	1,730	2,838	1,645	2,982	5,244
S - F - S - F	0,716	1,140	1,974	1,790	3,169	5,291
---	0,695	1,118	2,000	1,842	3,194	5,364

Legende: S = Silan-Schicht; F = Standardfolie schwarz

Wie in den unten abgebildeten Diagrammen erkennbar ergab sich bei den untersuchten Proben ein Anstieg der migrierten Menge und somit einer Gewichtsreduzierung des Stiftes bei Erhöhung der Lagertemperatur. Mit fortschreitendem Versuchsablauf fand ebenfalls, wie zu erwarten, eine Erhöhung der Migrationsmenge statt. Aufgrund ihrer geringeren durchschnittlichen Wandstärke (Slim 1,5 mm, Jumbo 2,25 mm) zeigen die Slim Hülsen logischerweise eine verringerte Migrationsdichtigkeit auf.

Die Betrachtung der Folienkombinationen hingegen lässt keine eindeutigen, allgemeingültigen Rückschlüsse zu, welche Variante im Allgemeinen bevorzugt werden soll. Hier muss jeweils eine Einzelbetrachtung erfolgen.

So zeigt zum Beispiel die unfolierte Slim Hülse bei Raumtemperatur nach 14 Tagen die beste Dichtigkeit, bei 45 °C nach ebenfalls 14 Tage die schlechteste Dichtigkeit. Anders verhält es sich hingegen bei der 2x folierten Hülse (20 °C höchster Materialverlust, 45 °C geringster Verlust)

Grundsätzlich muss immer vor Markteinführung eines neuen Produktes die Sicherstellung der Kompatibilität zwischen Füllmasse und Packaging mittels eines durchgeführten Stabilitätstestes erfolgen. Ein weiterer möglicher Grund für diese teilweise stark abweichenden Ergebnisse könnte darin begründet liegen, dass die Silanisierung nicht gleichmäßig genug erfolgt ist.

Die teils sehr geringen Unterschiede lassen sich sehr wahrscheinlich durch die in der Praxis nicht zu 100 % gleichmäßigen Wandstärken der Hülsen erklären, hinzu kommen noch die Messungenauigkeiten und mögliche Fehler bei der Probenerstellung.

Tabelle 3: Dichtigkeitstest bei 20°C

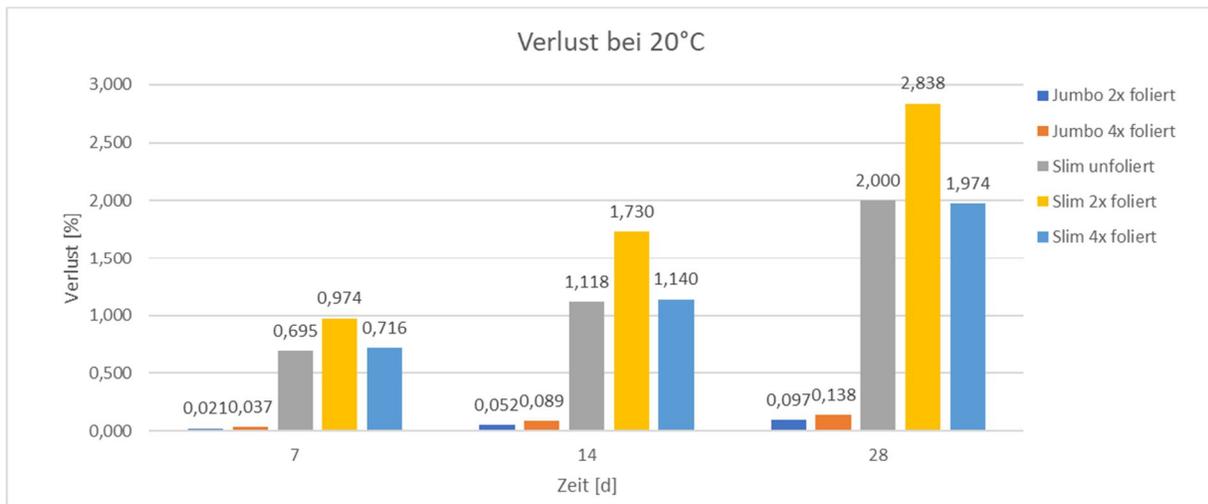
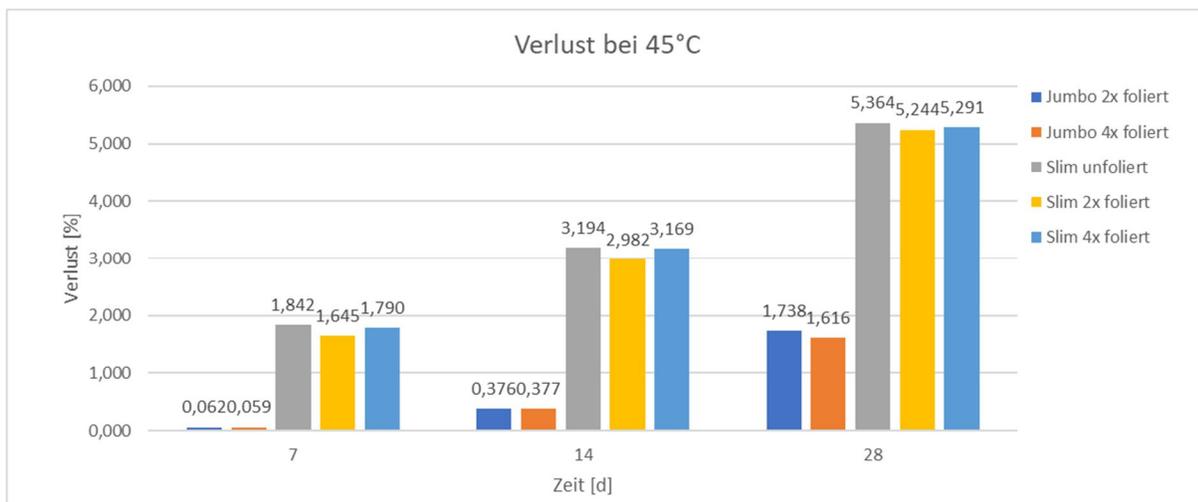


Tabelle 4: Dichtigkeitstest bei 40°C



Wie sich bei einem Abfüllversuch einer unserer potentiellen Kunden (Faber-Castell) gezeigt hat kann es zu einer nicht vernachlässigbaren Interaktion zwischen Füllmasse und den Hülsen kommen. In diesem konkreten Fall war nach dem Abfüllen der Stifte eine erkennbare Verformung (Biegung in Längsachse) der Hülsen zu beobachten.

Vermutlich handelt es sich hierbei um eine ungewollte Reaktion zwischen einer oder mehreren in der Formulierung enthaltenen Substanzen mit einer oder mehreren in den Hülsen enthaltenen Komponenten (wahrscheinlich Bio PE). Da der Granulathersteller, aus Gründen der Geheimhaltung, die in der Materialrezeptur enthaltenen Bestandteile entweder nur sehr allgemein oder gar nicht benennt, ist eine Ursachenfindung unsererseits schwierig.

2.6.2. Ergebnisse Dichtigkeitstest

Da mit den Materialtypen CW 41 C1 und CW 42 C2 zwei vielversprechende Rezepturen gefunden wurden, bei denen eine relativ zuverlässige Extrudierbarkeit bei gleichzeitig ansprechende Oberflächenqualität gegeben ist, fanden mit diesen die ersten Dichtigkeitsprüfungen bei unserem Partner SCHWAN STABILO in Heroldsberg statt.

Zur Ermittlung der Dichtigkeit der Hülsen werden diese mit einer kosmetischen Masse, welche zu einem gewissen Anteil flüchtige Bestandteile (z. B. Isododecan) enthält befüllt und für eine Dauer von mehreren Wochen bei erhöhter Temperatur gelagert. Nach Ablauf der Versuchsdauer wurde der Gewichtsunterschied gravimetrisch festgestellt.

Da die Kombination der verwendeten kosmetischen Formulierung und unseren Hülsen zu einem Gewichtsverlust von ca. 6% führt, und somit über dem von SCHWAN STABILO gewünschten Maximalwert von 3% liegt finden nun neue Dichtigkeitstest mit einer veränderten Formulierung (enthält weniger flüchtige Bestandteile) statt. Eine detaillierte Betrachtung der Versuchsergebnisse ist leider aufgrund der Verschwiegenheit unseres Partnerunternehmens nicht möglich.

Die Hülse (CW 41 C1 und CW 41 C2) selbst weist nach dem derzeitigen Kenntnisstand eine ausreichende Migrationsdichtigkeit auf. Der trotzdem beobachtete Gewichtsverlust lässt sich durch eine nicht ausreichende Abdichtung zwischen Hülse und Frontkappe erklären.

Da auch eine Veränderung der Rezeptur bisher noch keine zuverlässige Verbesserung der Dichtigkeit bewirkt hat, versucht Schwan aktuell durch eine Modifikation der Frontkappe (mit Silikondichtring) die Abdichtung zwischen Hülse und Frontkappe zu verbessern.

SCHWAN konnte die Oberfläche prinzipiell lackieren, allerdings verdecken die Lackschichten die raue Oberfläche nicht ausreichend.

2.7. Optimierung des Gesamtsystems; Redesign

2.7.1. Optimierung der Spitzmaschine, Veränderung des Klemmklotzes

In der Spitzmaschine dient der Klemmklotz der mechanischen Fixierung der Hülse während den Bearbeitungsschritten.

Originalbauteil: Metall

- Gut zum Einstellen der seitlichen Hülsenposition
- Hinterlässt häufig Abdrücke auf der Hülsenoberfläche (Glanzstellen)

1. Optimierungsversuch: Kunststoff (3D – gedruckt)

- Einstellen der Position schwieriger als bei Metall, da flexibel
 - Hinterlässt keine oder nicht nennenswerte Abdrücke
3. Optimierungsversuch: Metall + Kunststoff



Abbildung 5: Klemmklotz

- Rahmen aus Metall => Gut zum Einstellen der seitlichen Hülsenposition
- Einschubteil zum Klemmen der Hülse aus Kunststoff (PETG) => hinterlässt keine oder nicht nennenswerte Abdrücke, passt sich deutlich besser der Hülsengeometrie an (höhere Auflagefläche, Druck wird besser verteilt)
- Je nach Außendurchmesser der Hülse lässt sich spezifische ein Einschubteil konstruieren und drucken

Ob dieser Optimierungsversuch eine Verbesserung beim SULAPAC Material darstellt, soll im Rahmen des nächsten Materialtestes mit CW 41 C2 ermittelt werden. Anhand der Versuche mit unserem Standard Cellulose Material zeigte sich auf jedem Fall eine Verbesserung der Prozessstabilität und Teilequalität.

3.1.1. Vorrichtung zum Brechen des beim Planen entstehenden Spanes

Wie bereits erwähnt stellen die beim planen gebildeten Späne eine erhebliche Beeinträchtigung der Produktion in der Spitzmaschine dar. Prinzipiell ist eine Beeinflussung der Spanlänge mittels der Drehzahl des Planwerkzeuges möglich (geringere Drehzahl => kürzerer Span). Allerdings führt eine Verringerung der Drehzahl zu einem vermehrten Einhaken des Werkzeuges in die Hülse => Hülse dreht sich mit => schlechte Oberfläche.

Aus diesem Grund wurde an einer Konstruktion gearbeitet, welche die Länge der Späne so stark wie möglich mechanisch verringert. Sodass diese wie bei unserem Tecnaro Materialmix von der Hülse wegbewegt werden.

Ergebnis: 3D – gedrucktes Teil aus Kunststoff welches am eigentliche Planwerkzeug befestigt ist. zweiseitiger Aufbau:

- Teil 1 (blau): Halterung aus TPU (flexibel, aber trotzdem sehr robust) zur Fixierung von Teil 2
- Teil 2 (schwarz): Platte aus PETG, welche den Span bricht

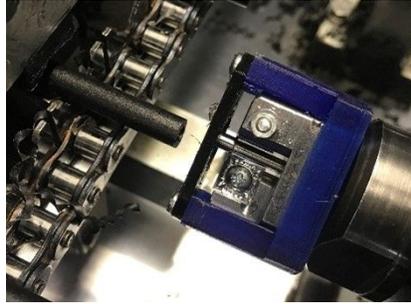


Abbildung 6: Vorrichtung zum Spanbrechen

Fazit: signifikante Verbesserung, es bleiben nur noch vereinzelt Späne an den Hülsen haften. Der Prozess ist trotz alledem deutlich unruhiger als bei Tecnaro Hülsen. Um eine verhältnismäßig stabile Produktion zu haben, muss die Taktrate stark gesenkt werden (Tecnaro: 30 Takte/min; Sulapac 15 Takte/min)

4. Fazit und Abschlussbemerkung

Mit Hilfe der Förderung konnten wir entscheidende Schritte in Richtung Marktreife einer cellulosebasierten, nachhaltigen und luftdichten Kosmetikstifthülse durchführen.

Eine Prototype kann als neue Entwicklung voraussichtlich im **Quartal 1/2022** an einen der größten Kosmetikstiftabfüller in Deutschland verkauft werden. Dieser Kunde verkauft wiederum unsere neue Stifthülse als abgefülltes Fertigprodukt an eine global agierende Kosmetikmarke. Wenn dies eintritt, hat sich die Entwicklungszeit mit allen Mühen und Kosten ausgezahlt.

Annex

Ecological Comparison of AES- vs. Cellulose-based Tubes for Cosmetic Liner

Cradle-to-Gate LCA according to DIN EN ISO 14040/14044

Date: 30.08.2021



Parties involved

For privacy reason regarding customers and according to a mutual agreement between the parties involved, their names were not included in the main report, but instead replaced as followed:

Tecnaro	replaced by	« Granular Supplier »
Weimako GmbH	replaced by	« Pencil Manufacturer »
EurA AG	replaced by	« LCA Consultant »
Alkos KDC ONE	is not mentioned at all, however, Fig. 2 of the final report indicates the out-of-system-boundary process of “cosmetic liner production in France”, which is due to Alkos.	

Ecological Comparison of AES- vs. Cellulose-based Tubes for Cosmetic Liner

Cradle-to-Gate LCA according to DIN EN ISO 14040/14044

Client:
Knut Offerdinger
Weimako GmbH
Ziegeleistraße 12
82327 Tutzing
Germany

Study performed by:
Dr. Denise Ott
EurA AG
Krämpferstraße 2
99084 Erfurt
Germany

Phone: +49 3682 400 62-26
Email: denise.ott@aura-ag.de

Date: 16.03.2021



Table of Contents

1. Introduction	3
2. Methodological Approach.....	4
3. Data Basis.....	6
3.1 Framework and Functional Unit.....	6
3.2 Life Cycle Inventory.....	7
3.2.1 Primary Production Data.....	7
3.2.2 Life Cycle Information for Arboblend [®]	8
3.2.3 Life Cycle Information for AES.....	10
3.2.4 Life Cycle Information for Foaming Agent.....	10
4. Life Cycle Impact Assessment and Interpretation.....	11
4.1 Carbon Footprint	11
4.2 Other Life Cycle Impact Categories.....	12
5. Summary.....	13
6. Literature and Further Information.....	14

1. Introduction

Weimako GmbH is developing, producing and distributing sustainable packaging solutions for the cosmetics and stationery industry as well as food supplements, containing bio-based formulations of a wide variety of biopolymers, such as cellulose, lignin, natural resins, natural waxes and natural oils, biological additives and natural reinforcing fibers.

Herein, the environmental relevance of Weimako's **cosmetic liners/barrels based on Arboblend[®] is assessed (also called cellulose liner herein) and compared to the AES (acrylonitrile-ethylene-styrene-copolymer) barrels**, which are typically used for this kind of application in the decorative and care cosmetics industry. For this purpose, the method of Life Cycle Assessment according to DIN EN ISO 14040/14044 was used. In addition, this assessment allows to identify hot-spots and derive further optimisation potentials.

Weimako GmbH is supplying its bio-based formulation from Tecnaro GmbH, who was strongly involved in supplying Life Cycle Inventory data in order to correctly represent the environmental impact of this material, especially since the specific composition is subject to secrecy. This fact was quite important, as a former LCA study provided by Solinnen¹ was made on assumptions instead of practically relevant material compositions, resulting in a benefit for fossil-based AES tubes compared to bio-based tubes. This fact was aimed to be verified.

Finally, the study successfully passed a critical review by an independent EurA LCA consultant, being independent and having adequate professional knowledge of both the life cycle assessment technique itself and environmental resource management.

2. Methodological Approach

Life Cycle Assessments (LCA) according to DIN EN ISO 14040 and DIN EN ISO 14044² are scientific methods to evaluate products, processes or services with regard to their environmental impact over the entire life cycle ("from cradle to grave"), *i.e.* from raw material exploration and supply, processing, distribution, use, through to recycling, reuse and disposal. The anthropogenic environmental influences occurring during the life cycle can be quantified and objectively assessed with the aid of life cycle assessments. The methodology is used to identify weak points in the environmental characteristics of a product or process along the process chain, to make ecological optimizations, to compare alternatives, and to support the decision between alternative processes and process routes. Life cycle assessments, therefore, function as an important planning and decision-making tool and can also serve as an information basis for marketing purposes, e.g. by a company advertising the environmental compatibility of its products.

According to the DIN standards, the procedure of a life cycle assessment comprises four phases, see Figure 1. At the beginning of this study, the objective and scope are defined. The scope of the study, including the system boundary and the level of detail, depends on the subject of the study and the intended application of the study. The functional unit and the spatial and temporal limits of the system are therefore determined. According to DIN EN ISO 14040, the functional unit is defined as the quantified benefit of a product system which is used as a comparison unit/reference basis.

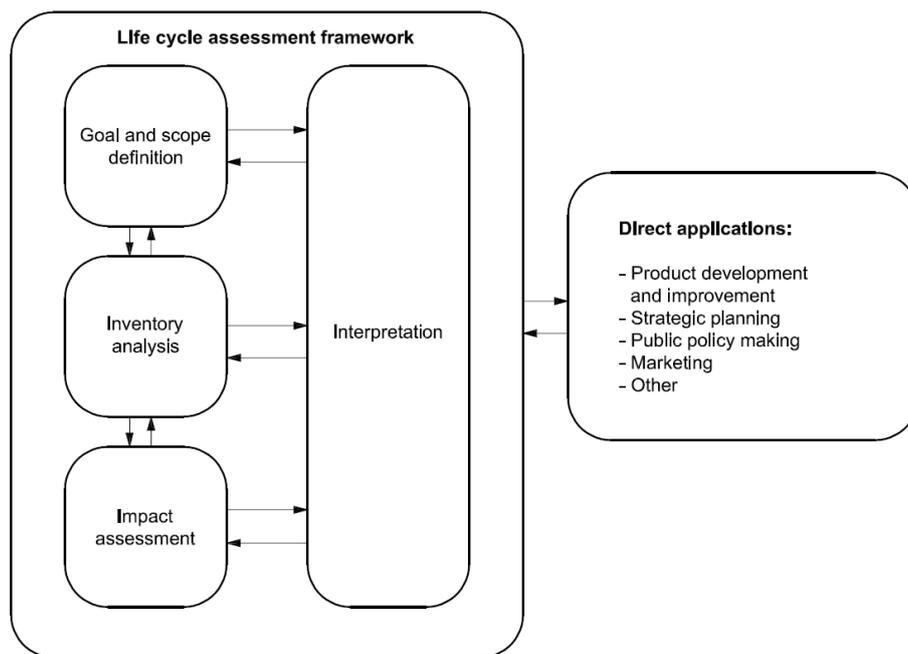


Figure 1: Phases of a life cycle assessment according to DIN EN ISO 14040.

The second step is the preparation of a Life Cycle Inventory (LCI) quantifying the input and output flows (energy and mass flows) over the entire life cycle, followed by an impact assessment (Life Cycle Impact Assessment, LCIA) quantifying the potential effects of these materials and energy flows on the environment in the impact categories defined at the beginning.

A selection of impact categories, impact indicators, and characterization models as well as the allocation of the LCI results to the selected impact categories (classification) and calculation of the impact indicator values have to be performed. Using the example of the impact category climate change, these terms are explained in Table 1 below.

Finally, the evaluation stage takes place, in which the results obtained are interpreted, conclusions and decisions are made or recommendations for further action are derived.

The conduct of an LCA usually is an iterative process, which is represented by the arrows in between the stages in Figure 2. While working on one of the stages, it is often useful and desirable to go back to earlier parts and change the settings. It is possible, for example, that the impact assessment may reveal a need for refining or changing LCI data in order to gradually increase the degree of detail and accuracy. The iterative approach within and between phases contributes to the holistic and consistent nature of the study and the results presented in the report.

Table 1: LCIA terms and example.³

Terms	Example
Impact category	Climate change
LCI result	Quantity of greenhouse gases per functional unit
Characterization model	Baseline scenario over 100 years, International Panel for Climate Change (IPCC)
Impact indicator	Amplification of infrared radiation (W/m ²)
Characterization factor	Global Warming Potential (GWP100) for each greenhouse gas
Impact indicator value	Kilogram CO ₂ equivalents per functional unit
Impact endpoints	Coral reefs, forests, harvests
Environmental relevance	Amplification of infrared radiation is representative of possible effects on the climate, which depend on the integrated atmospheric heat absorption, caused by emissions, and its distribution over time.

The modeling of the material and energy flows was carried out with the help of GaBi⁴. With the aid of the integrated Ecoinvent database⁵, corresponding inventory data concerning the supply of raw materials, energy or transport processes were integrated. The emission factors of all materials, energy sources and transport processes are based on the Ecoinvent database.

The impact assessment was carried out according to ReCiPe 2016 v1.1 with the help of midpoint indicators at the hierarchist level⁶. The impact category mainly considered within this study is climate change (in this study also referred to as global warming potential or carbon footprint), as this is the most prominent key objective for political and business-related decisions and can be seen as an important screening indicator of the environmental impact of products and processes. Additionally, according to the LCA results from Tecnar GmbH, the impact categories of ozone depletion, terrestrial acidification, and eutrophication were selected, as they were assumed to be decisive indicators with regard to political, entrepreneurial and social interests in the context of this study. There was no weighting of the impact categories.

3. Data Basis

3.1 Framework and Functional Unit

A life cycle assessment according to DIN EN ISO 14040 and 14044 was carried out under the assumptions and simplifications given below. At the same time, future optimization potentials were identified, whose considerations in further research and development activities are recommended.

Framework and functional unit

The production and comparison of AES- and biobased cosmetic barrels analyzed in chapter 4 was considered cradle-to-gate, i.e. from the cradle (exploration of the raw materials) to the factory's gate. The recipes are compared per pcs. of cosmetic pencils. Post-production life cycle steps are not taken into account, i.e. within the alternative formulations a comparable further processing (e.g., filling, colorization of plastics), use and functionality/ performance are assumed. Further, capot, embout and sleeve were not considered as being assumed to be comparable/equally for both cosmetic liners. On this basis, a simplified life cycle assessment is permissible. This does not allow a complete ecological picture of the systems, but different ecological effects are clearly visible and comparable. The functional unit refers to 1kg material or 1 pcs. cosmetic liner (see later explanation in the text).

Assumptions and detail limits

Life cycle inventory data was, if not available, substituted or modelled as far as possible. Detailed information can be found below.

Although mass flows of less than < 5 wt-% relative to the mass of the desired output were present within the scope of the study (foaming agent), no flows of a considered process were cut off, since they were of interest for the entire life cycle assessment.

Geographical and temporal framework

As far as possible, the supply of materials in the countries of origin as specified by Weimako GmbH, including corresponding transport processes to the next processing step, was taken into account. Thus, as far as possible, data from area under study (DE etc.) or similar (CH) was considered. If not possible, average data from larger area in which the area under study was included (RER/Europe... GLO).

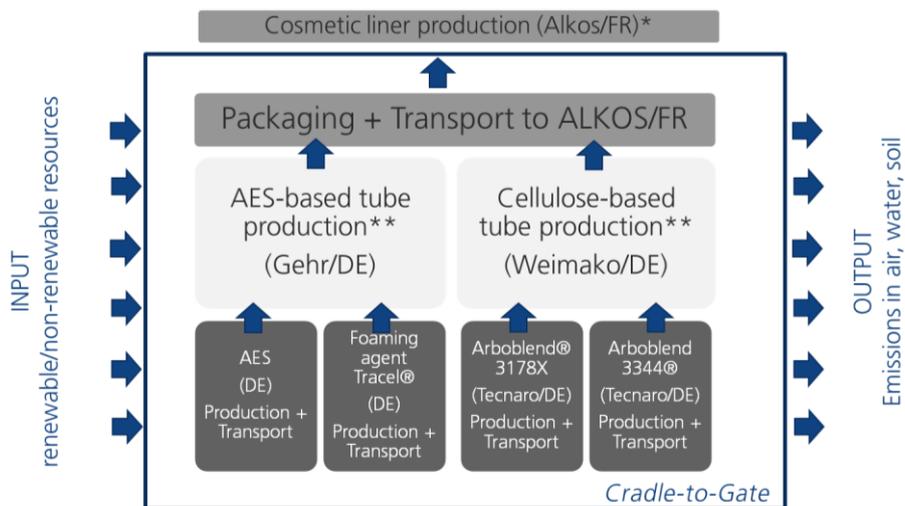


Figure 2: System under study. *Out of system boundary; **including granular mixing, extrusion, sharpening, waste management

3.2 Life Cycle Inventory

3.2.1 Primary Production Data

The study herein is based on primary data from tube producer (Weimako GmbH) with regard to energy and material demand (granular mixing, extrusion, sharpening) as well as EoL (end-of-life) of production waste, see Table 2.

Table 2: Data per production of one AES and cellulose liner.

	AES liner	Cellulose liner	Comments
Production location	Gehr/ Germany	Tutzing/ Germany	
Per liner [g, netto weight]	4.1	4.3	Brutto weight (material consumption): AES liner: 4.3; cellulose liner: 4.5 g
Raw Materials [g]			
AES minus recycled material	3.99	-	
Foaming agent	0.13	-	3 wt.-% per 100 g
Arboblend® 3178X minus recycled material	-	3.24	Arboblend® 3178X/Arboblend® 3344: 75/25 wt.-%
Arboblend® 3344 minus recycled material	-	1.08	
Packaging [g]	-	-	
Cardboard	0.113636364		1 cardboard (250 g) contains 2200 pencils units
Material transport [tkm] (via truck, 7.5 t)			
AES	0.000059865	-	Production in Mannheim/Germany (15 km)
Foaming agent	0.0000774	-	Production in Pinneberg/Germany (600 km)
Arboblend® granules	-	0.00126144	Production in Stuttgart/Germany (292 km)
Packaging	0.00000511364		45 km
Transport to Alkos/France	0.002788	0.0042656	680 km
Energy consumption [kWh] ("electricity mix, Germany")			
Granular mixing	0.000571429		For simplification, same energy consumptions for both AES and cellulose processing steps were assumed
Extrusion	0.0021		
Sharpening	0.0002		
Water [l]			
Tap water	0.003		For granular mixing, extrusion, sharpening Closed-loop, i.e. not considered
Process waste [g]			
Recycling/fed back	0.18		90 % can be recycled and fed back
Landfill	-	0.02	Distance of waste treatment unit: 25 km
Incineration	0.02	-	Distance of waste treatment unit: 10 km
Waste Transport [tkm]	0.0000002	0.0000005	

3.2.2 Life Cycle Information for Arboblend®

To get more information regarding Arboblend®, EurA AG got in contact with supplier Tecnaro GmbH. Their statement was as follows:

1. The assumptions made within the Sollinnen LCA report: “biobased cellulose material for SUPPLIER tube is composed of 35 PLA, 45 Cellulose Acetate, 20 Polyester” is not applicable and “far away from the real composition”.
2. Tecnaro GmbH is currently performing their own LCA studies and will provide carbon footprint results to EurA AG.

Before receiving data from Tecnaro GmbH, EurA AG made its own assumptions and calculations. As the Arboblend® mixture is defined to consist of > 35 wt-% binders and < 45 wt-% organic filler and no adhesion promoter,⁷ the first screening of several possible compositions based onecoinvent and scientific literature was made, see table 3. Data for cellulose production were taken from ecoinvent⁸, for PLA and bio-PE carbon footprint from Institute for Bioplastics and Biocomposites⁹, and for lignin from literature. Lignin is always the product of a multioutput process. Assessing such processes requires the environmental impacts to be divided between the co-products of the system, referred to as allocation. Herein, an economic allocation was taken as a basis, assuming that in the future, the environmental impact of lignin production might be higher than the impact today if prices increase.¹⁰

Table 3: Carbon Footprint assumptions of different Arboblend® recipes [kg CO₂eq/kg].

wt.-%	Cellulose/PLA	Cellulose/bio-PE	Lignin/PLA	Lignin/bio-PE
60/40	0.64	0.04	1.06	0.46
70/30	0.58	0.13	1.07	0.62
80/20	0.52	0.22	1.08	0.78

As the composition is not known exactly, we assumed a worst-case scenario of 1.08 kg CO₂eq/kg Arboblend® mixture, as this is the worst-case result in table 3. In parallel, Tecnaro GmbH provided their own carbon footprint results of – 0.7 kg CO₂eq/kg (including 2.5 kg biogenic carbon per kg), see the statement on page 9. Thus, we made a scenario analysis as defined in table 4.

Table 4: Scenario analysis for Arboblend® [kg CO₂eq/kg].

Scenario	Carbon Footprint [kg CO ₂ eq./kg]	Source
Case 1	1.08	Worst result from table 3
Case 2	-0.7	Tecnaro GmbH including biogenic CO ₂
Case 3	1.8	Tecnaro GmbH excluding biogenic CO ₂

Besides providing absolute carbon footprint numbers for Arboblend®, Tecnaro also provided relative results of the comparison of ABS (acrylonitrile-butadiene-styrene-copolymer, as a substitute for AES) and Arboblend® mixture w.r.t. carbon footprint, ozone depletion, terrestrial acidification, and eutrophication, see chapter 4.

AW: Ökologische Bewertung von Arboblend



Lena Scholz <Lena.Scholz@Tecnaro.de>

An Ott, Dr. Denise

Sie haben am 15.03.2021 17:48 auf diese Nachricht geantwortet.

Antworten Allen antworten Weiterleiten

Mo 15.03.2021 17:44

Hallo Frau Ott,

wie heute telefonisch besprochen kann ich Ihnen bestätigen, dass wir bei unseren Carbon Footprint Berechnungen zu der von Weimako verwendeten Werkstoff-Mischung den Wert von ca. -0,7 kg CO₂eq/kg Material errechnet haben (inkl. Gutschrift für CO₂ Aufnahme bei Pflanzenwachstum, cradle to gate).

Primärdaten wurden von uns erhoben bzw. beim entsprechenden Lieferanten, Sekundärdaten entstammen der ecoinvent Datenbank (v3.7).

Diese Informationen und alle weiteren Hinweise beruhen auf dem derzeitigen Wissensstand der Tecnaro GmbH. Weiterhin übernimmt Tecnaro keine Haftung für die Richtigkeit von Werten. Die Werte sind ausdrücklich für den internen Gebrauch erhoben worden. Tecnaro behält sich das Recht vor, jederzeit und ohne vorherige oder spätere Ankündigung Änderungen an den Informationen vorzunehmen, falls neuere Kennzahlen oder Erkenntnisse zur Berechnung des GWP zur Verfügung stehen oder notwendig sind.

Mit freundlichen Grüßen

Best Regards



TECNARO GmbH T. +49 7062 97687-242
Bustadt 40 Zentrale +49 7062 97687-0
D - 74360 Ilsfeld F. +49 7062 97687-101
E. info@tecnaro.de
W. <http://www.tecnaro.de>

Geschäftsführer: Jürgen Pfitzer, Helmut Nägele
Registergericht: Amtsgericht Stuttgart
Handelsregister-Nr.: HRB 109306
UST-ID-Nr.: DE 195938530
Hausbank: VR-Bank Ellwangen
IBAN: DE87 6349 1010 0210 8960 00
BIC: GENODE33LELL

Translation to English:

As discussed on the phone today, I can confirm that we have calculated a value of approx. -0.7 kg CO₂eq/kg material in our carbon footprint calculations for the material mixture used by Weimako (incl. credit for CO₂ absorption during plant growth, cradle to gate).

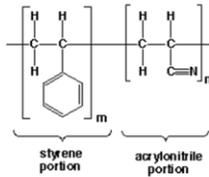
Primary data were collected by us or from the respective supplier, secondary data are taken from the ecoinvent database (v3.7).

This information and all other references are based on the current state of knowledge of Tecnaro GmbH. Furthermore, Tecnaro assumes no liability for the correctness of values. The values have been collected expressly for internal use. Tecnaro reserves the right to make changes to the information at any time and without prior or subsequent notice if newer key figures or knowledge are available or necessary for calculating the GWP.

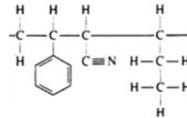
3.2.3 Life Cycle Information for AES

Similar to Solinnen study, AES does not exist in the life cycle inventory database used. Instead of substitution via ABS, AES was estimated as the mean of SAN (styrene-acrylonitrile-copolymer) and ABS data, as data are available in ecoinvent and as both are chemically similar to AES.

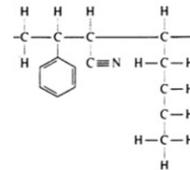
SAN = styrene-acrylonitrile-copolymer



AES = acrylonitrile-ethylene-styrene-copolymer



ABS = acrylonitrile-butadiene-styrene-copolymer



Carbon Footprint	SAN	AES	ABS
kg CO ₂ eq per kg	4.45	estimated as mean of SAN and ABS	4.76

Figure 3: Comparison of structural differences of SAN, AES, and ABS and resulting Carbon Footprints.

3.2.4 Life Cycle Information for Foaming Agent

Life Cycle Inventory data for foaming agent were represented by a mean of production data within ecoinvent data sets "azodicarbonamide" and "ethylene carbonate", as the exact composition of the herein used foaming agent is not known and as both materials are suitable for this purpose.

4. Life Cycle Impact Assessment and Interpretation

4.1 Carbon Footprint

Taken the data and assumptions made above as a basis, the following results can be obtained, see also figure 4: In comparison, the ecological backpack of AES-based tubes is heavier, being due to the supply of AES: the ecological impact is driven by raw material supply 88 % (share of AES: 84 %, share of foaming agent: 4 %), energy demand 8% (mainly due to the extrusion process, 6 %) and transport 3 % (mainly due to transport to Alkos), whereas the impact of waste treatment and packaging is negligibly low. For cellulose-based liner, the ecological impact is driven by raw material supply 61 % (Arboblend[®] mixture), energy demand 23 % (mainly due to the extrusion process, 17 %) and transport 15 % (mainly due to transport to Alkos, 12 %). In the case of transportation, the impact of cellulose-based liners is higher due to longer transport distances from Weimako GmbH to Alkos, whereas the impact of waste treatment and packaging is negligibly low as for AES-based tubes. Infrastructure (chemical plant, extrusion equipment and auxiliaries) was not considered, as, according to our experience, the impact is expected to be also negligibly low due to high lifetime, throughput and recyclability of single components, e.g. steel.

Cellulose-based tubes are environmentally more promising, even if neglecting the biogenic carbon and/or assuming worst-case calculations (see scenarios table 4 and figure 4). Depending on the considered cases, reduction by 65 % up to 100 % is possible if using Arboblend[®] instead of AES.

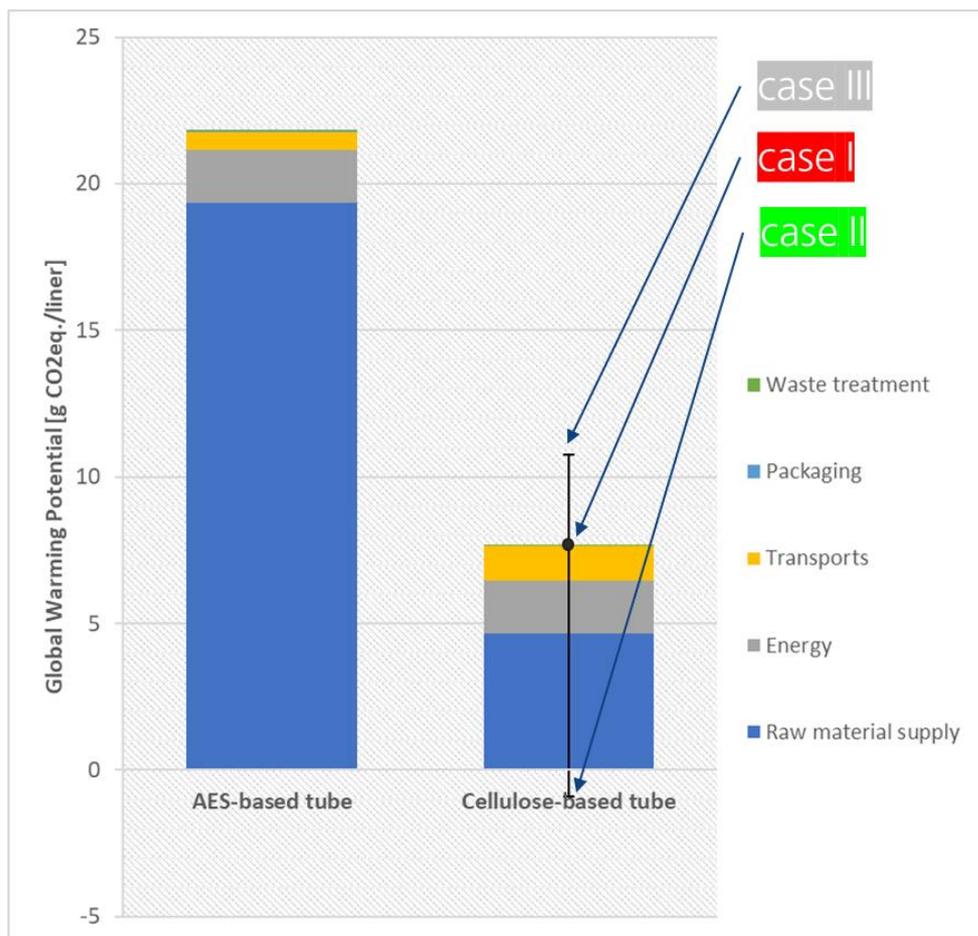


Figure 4: Carbon Footprint per AES and cellulose-based liner.

4.2 Other Life Cycle Impact Categories

Besides providing an absolute carbon footprint number for Arboblend[®], Tecnaro also provided relative results of the comparison of ABS (as a substitute for AES) and Arboblend[®] mixture w.r.t. carbon footprint/climate change, ozone depletion (“Ozonschädigung”), terrestrial acidification (“Versauerung”) and eutrophication (“Überdüngung”), see figure 5. **Although the comparison is based on ABS instead of AES**, the results clearly indicate the ecological advantages of Arboblend[®] also within other Life Cycle Impact Categories. As the supply of these raw materials is the main driver for the ecological impact, as seen in Figure 4, ABS/AES is environmentally not favourable for cosmetic liner production compared to Arboblend[®]. This is due to its **high complexity** (compared to plastics like PE or PP, whose environmental footprint is quite lower) as well as its **production based on fossil resources**. In the case of bio-based materials considered herein, even today lower environmental impacts can be assumed, whereas the **full optimization potential has not yet been exhausted** and further reduction might be possible in the near future. That is why Tecnaro GmbH is still optimizing their production line, iteratively calculating the environmental footprint as thus stated on page 9: “This information and all other references are based on the current state of knowledge of Tecnaro GmbH.[...] Tecnaro reserves the right to make changes to the information at any time and without prior or subsequent notice if newer key figures or knowledge are available or necessary for calculating the GWP.”

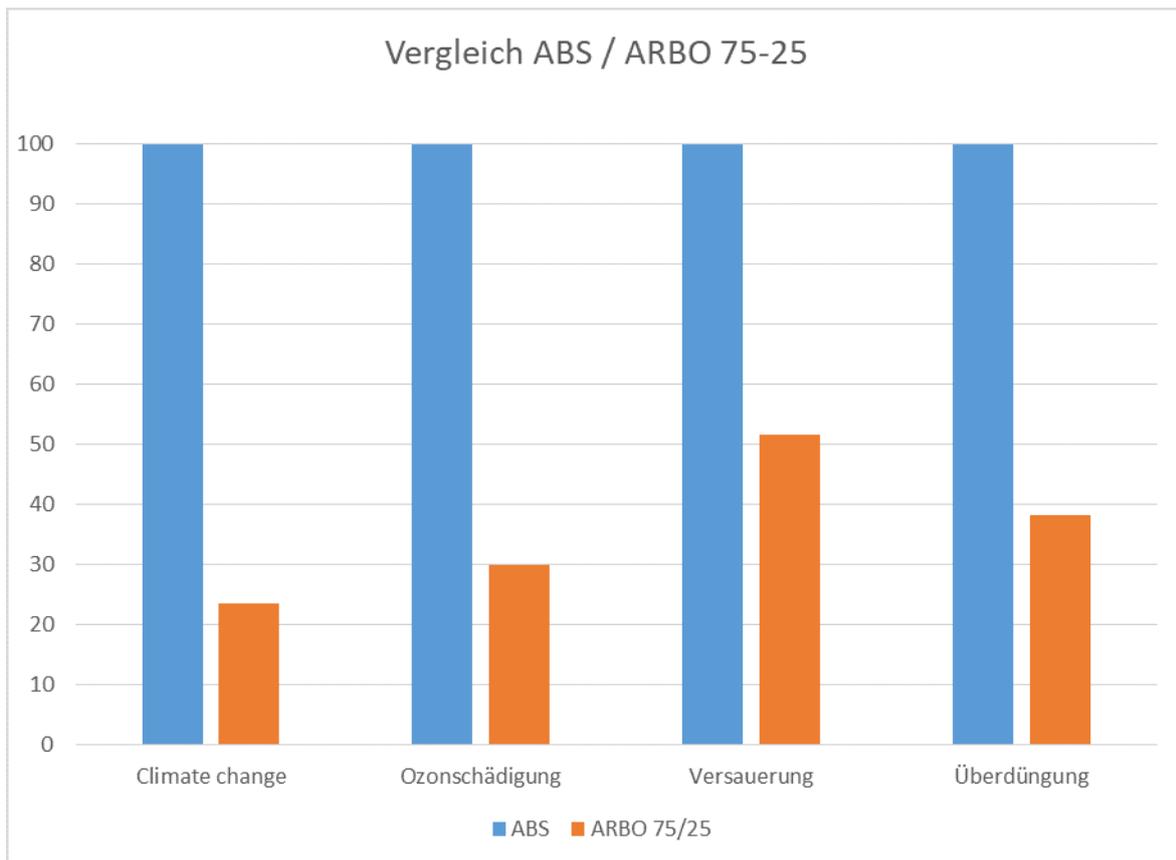


Figure 5: Environmental footprints for the supply of AES and Arboblend[®] mixture (including biogenic carbon). Normalized to the worst-case results per impact category. Source: Tecnaro GmbH.

5. Summary

The LCA study made by Solinnen is not applicable, as the Arboblend[®] composition assumed therein is not representative (statement from Arboblend[®] supplier Tecnar GmbH).

Cellulose-based tubes have a significantly lower carbon footprint than AES-based tubes, which is mainly due to the supply of raw materials. Tecnar supported our investigations by own LCA activities, however, even if screening possible Arboblend[®] compositions in theory and considering several scenarios for Arboblend[®], the environmental benefit remains, indicating that the data are very robust, and trends are clear.

For all impact categories considered herein, reduction potentials of at least 50 % up to approx. 100 % (due to biogenic carbon related credits) are possible compared to AES-based tubes.

All data as well as results can be provided in excel format for review if needed.

6. Literature and Further Information

-
- ¹ Final Restitution - Simplified Life Cycle Assessment, prepared by Solinnen for Alkos, May, 27th 2020. Presentation.
 - ² DIN EN ISO 14040, Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework (ISO 14040:2006); Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines (ISO 14044:2006).
 - ³ L. Lüdemann, K. Feig, Vergleich von Softwarelösungen für die Ökobilanzierung – eine softwareergonomische Analyse, Logistics Journal (9), www.logistics-journal.de/not-reviewed/2014/09/3991/luedemann_2014.pdf, 2014.
 - ⁴ GaBi Software System and Database for Life Cycle Engineering, Gabi TS v10.0.0.71, Sphera Solutions GmbH, Leinfelden-Echterdingen (Deutschland).
 - ⁵ Ecoinvent v3.7, ecoinvent, Zürich (Schweiz).
 - ⁶ M. Goedkoop, R. Heijungs, M. Huijbregts, A. D. Schryver, J. Struijs and R. v. Zelm, ReCiPe 2008 - A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level, First edition, Report I: Characterisation, Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer, Den Hague, 2009.
 - ⁷ Weimako statement regarding IPR issues, 29.11.2019.
 - ⁸ Data set in ecoinvent 3.7: "CH: cellulose fibre production, inclusive blowing"
 - ⁹ Data taken from: „Ökobilanzierung von biobasierten Kunststoffen (BioMat_LCA) aus der IfBB-Webinarreihe: „Biowerkstoffe im Fokus!“, 18.07.2019“
 - ¹⁰ F. Hermansson, M. Janssen, M. Svanström. Allocation in life cycle assessment of lignin. Int J Life Cycle Assess 25, 1620–1632 (2020). <https://doi.org/10.1007/s11367-020-01770-4>.