Medical Design – Zwischen Nachhaltigkeit und Sicherheit

ENTWICKLUNG EINER ZELLSTOFFBASIERTEN, ÖKOLOGISCHEREN GESICHTSMASKE

Name	Affiliation	Contact
Tina Moor	Hochschule Luzern, Forschungsgruppe Produkt & Textil	tina.moor@hslu.ch
Brigitt Egloff	Hochschule Luzern, Forschungsgruppe Produkt & Textil	brigitt.egloff@hslu.ch
Joel Hügli	Hochschule Luzern, Forschungsgruppe Produkt & Textil	joel.huegli@hslu.ch

ABSTRACT

Die vergangene Covid-19 Pandemie hat den Gesundheitsinstitutionen und der Bevölkerung in den westlichen Industrienationen drastisch vor Augen geführt, wie abhängig sie von globalen Märkten sind und welche Abfallmengen durch medizinische Einwegprodukte anfallen. Herkömmliche medizinische Masken werden überwiegend im asiatischen Raum produziert und müssen für den Verkauf über weite Distanzen transportiert werden. Die Masken vom Typ II/Typ IIR bestehen aus drei Schichten synthetischer, erdölbasierter Vliese, die einmal verwendbar sind und danach weggeworfen werden. Durch die akute Verknappung von medizinischen Masken in Spitälern wurde der Ruf nach alternativen, krisenresistenteren, nachhaltigen Produkt- und Lieferkettenlösungen laut.

Ausgehend von dieser Situation konzentrierte sich diese Studie auf ein Konzept lokaler, zirkulärer Prozesse zur Herstellung medizinischer Masken aus europäischem Papier resp. Zellstoff. Zellulosefasern kommen aus einer erneuerbaren Ressource, sind biologisch abbaubar und bieten eine vielversprechende Materialalternative für medizinische Masken. Diese Studie zeigt das Spannungsfeld eines holistischen Designansatzes in seinen Ergebnissen auf. Dazu zählen erstens der Mehrwert für Mensch und Umwelt durch das Redesign der Maske, zweitens die Forschungslücken in Bezug auf alternative Filtermaterialen und drittens die Herausforderungen von Zellstoffmaterial in Bezug auf die Einhaltung der Sicherheitsnormen. Entstanden ist eine validierte Prototypenserie mit nutzer:innenfreundlichen Materialien und vergleichsweise tiefem ökologischen Fussabdruck.

KEYWORDS

- Medical Face Mask
- Circular Design
- Cellulose
- Medical Standards

Abbildung 1: Medizinische Maskenprototypen auf Zellstoffbasis, ©HSLU – DFK, CCPT

EINLEITUNG

Zu Beginn der Covid 19-Pandemie rieten die Schweizer Gesundheitsbehörden gesunden Menschen vom Tragen von Gesichtsmasken ab, da es keine stichhaltigen Beweise dafür gäbe, dass das Tragen von Masken in der Öffentlichkeit einen wichtigen Schutzfaktor darstellt (Koch, 2020). Dies stand im Einklang mit der Feststellung der World Health Organization (WHO, 2020a & 2020b), dass das Tragen von Masken bei Gesunden ein falsches Gefühl der Sicherheit hervorrufen und andere wirksame Präventionsmassnahmen (z. B. soziale Distanzierung und Händehygiene) untergraben könnte (WHO, 2020a & 2020b; Koch, 2020). Die Masken sollten dem Pflegepersonal vorbehalten sein, da diese zu Beginn der Pandemie in den Spitälern und Heimen in der Schweiz und in Europa Mangelware waren (GPK, 2022). Im Juni 2020 revidierten die WHO und das Bundesamt für Gesundheit ihre Empfehlungen und sprachen sich für die Verwendung von Gesichtsmasken für die Bevölkerung aus (WHO, 2020a & 2020b; BFG, 2020). Diese Aussagen verdeutlichen, dass Schutzkleidung und Masken während Covid-19 begrenzt waren. Zudem war die Abhängigkeit von einzelnen Märkten und Herstellern riskant (Chen et al., 2021). Medizinische Masken des Typs II R (SN, 2020) werden einmalig und über einen gewissen Zeitraum verwendet und nach Gebrauch entsorgt. Dies führte in den westlichen Industrienationen zu grossen Mengen an thermisch entsorgtem Abfall (Ayse et al., 2020). Bei der Betrachtung einer schweizerisch-europäischen Kreislaufwirtschaft könnten lange Transportwege vermieden werden, wie sie heute mit China bestehen, dem grössten Hersteller von medizinischen Masken und Schutzkleidung (Chen et al., 2021). Obwohl die Verwendung von Einwegartikeln auf Erdölbasis in Krankenhäusern aus Sicherheits- und wirtschaftlichen Gründen die Standardwahl ist, werden immer mehr Stimmen laut, die nachhaltige Lösungen fordern.

Neue Material- und Designlösungen mit den erforderlichen Sicherheitsnormen und mit dem gesellschaftlichen Anliegen der Transformation, hin zu mehr zirkulären Prozessen zu verbinden, war hochkomplex (Dörner & Funke, 2017; Schoppek und Fischer, 2015, Rittel & Webber, 1973). Die Verfügbarkeit von Ersatzmaterialien, der Preis des Rohmaterials, Nutzer:innenfreundlichkeit, die Verarbeitbarkeit und Rückführung in einen Kreislauf spielten eine entscheidende Rolle (Lacy et al., 2016). Weiter wurde ein erhöhter Komfort durch adaptierte Schnitte und gut anliegende Passformen der medizinischen Masken angestrebt, denn dies reduziert den Austritt von Aerosolen, erhöht die Sicherheit und stellte damit einen Marktvorteil dar (GAeF, 2020).

Diese Machbarkeitsstudie fokussierte auf die Prinzipien der Kreislaufwirtschaft (Ellen MacArthur Foundation, 2017), bei denen ökologische Überlegungen (Ökobilanz) systematisch von Anfang an in die Planung, Entwicklung und Gestaltung von Produkten einbezogen werden. Es wurden Konzepte, Materialien und Herstellungsweisen hinterfragt und wie Alternativen in medizinischen Einweg-Produkten oder Serviceleistungen implementiert werden können. Es sollte sichergestellt sein, dass während des gesamten Lebenszyklus so wenig Ressourcen und Rohstoffe wie möglich verbraucht werden und das Rohmaterial nach dem Gebrauch im Kreislauf verbleibt.

Die methodische Herangehensweise basierte auf einem iterativen Designprozess und wurde mit empirischen Methoden durch die Designphasen Inspiration, Ideation und Implementierung geführt (IDEO.org, 2015). Es wurden Machbarkeiten und Chancen,

aber auch Lücken und Grenzen aufgezeigt, die bei der Substitution von erdölbasierten hin zu natürlichen, rezyklierbaren bzw. biologisch abbaubaren Produkten entstehen. Die Product-Tools von Worldly wurden als Instrument für die grobe Berechnung des ökologischen Fussabdrucks des Redesigns durch Zellstoff, für den Produktvergleich und die Identifikation der ökologischen Hotspots eingesetzt (Worldly, 2023).

Die designgetriebenen und nutzendenzentrierten Entwicklungsprozesse wurden anhand explorativer Experimente, Prototyping und Stakeholder-Befragungen durchgeführt. Interviews mit Schweizer Recycling- und Vergärungsexperten ergänzten die Erkenntnisse aus dem interdisziplinären Designansatz.

Im Folgenden werden die Normen und verwendeten Materialien für Typ II und Typ IIR Masken vorgestellt, um die Argumente von zellulosebasierten Materialien für rezyklierbare Masken zu verdeutlichen. Das Team beleuchtete Aspekte auf den Ebenen Materialentwicklungen und Form und erst in zweiter Linie deren Wirtschaftlichkeit. Anschliessend wurden die Materialentwicklungen und das Maskendesign im Hinblick auf ihre Rezyklierfähigkeit und Akzeptanz analysiert und beurteilt. Dabei sollten Umweltprobleme nicht gelöst, sondern, wie Karell sagt, verhindert werden (Karell, 2019). Im Kapitel Diskussion werden die relevanten Erfolgsfaktoren und die konkreten Vorstellungen von Erfolg anhand der neu entwickelten Maskenmodelle herangezogen und mit herkömmlichen, erdölbasierten tabellarisch verglichen.

KONZEPTIONELLER RAHMEN

Medizinische Halbmasken (oder chirurgische Masken genannt) erfüllen die Anforderungen, die in der Verordnung 2017/745 (EU, 2017) über Medizinprodukte festgelegt sind. Diese schützen den Patienten vor der Kontamination des Gegenübers mit pathogenen Substanzen wie Bakterien oder Viren. Wie gut diese Funktion erfüllt wird, hängt vor allem vom Material, der Dichte, der Ausstattung und der Anzahl der Schichten ab (CENTEXBEL, 2020). Die meisten medizinischen Masken bestehen aus drei Schichten verschiedener erdölbasierter Materialien (PP, PE) oder ganz aus Polyester (PET) (CENTEXBEL, 2021). Die Aussenseite ist flüssigkeitsabweisend und verhindert das Eindringen von Tröpfchen und Aerosolen aus der Luft. In der Mitte behindert eine elektrostatisch geladene Filterschicht mit feiner Struktur das Eindringen und Austreten von krankheitserregenden Partikeln. Innen hält eine flüssigkeitsabsorbierende Schicht die Tröpfchen des Trägers zurück (CENTEXBEL, 2020). Medizinische Typ IIR Masken entsprechen der Klasse I der Medical Device Regulation (MDR).

Da das Produkt «medizinische Gesichtsmaske» ein nicht kreislauffähiger Materialmix aus synthetischen, elastischen und metallischen Materialien darstellt (Elander et al., 2016; Wedin et al., 2017), wurde es hier exemplarisch für ein Redesign herangezogen.

Es wurde untersucht, wie zirkuläre Materialien für Masken des Typs II und IIR so gestaltet werden können, dass diese alternativen Materialien für Produkte der Klasse I der MDR durch akkreditierte Labors die folgenden Normen (SN, 2020) erfüllen.

Tabelle 1: Leistungsanforderungen für medizinische Gesichtsmasken gemäss Europäischer Norm mit dem Projektfokus auf Typ II und Typ IIR). Eigene Darstellung in Anlehnung an die Europäische Norm 14683, ©HSLU – DFK, CCPT

	TYP I	TYP II	TYP IIR
Bakterielle Filterleistung (BFE), (%)	≥ 95	≥ 98	≥ 98
Druckdifferenz (Pa/cm2)	< 40	< 40	< 60
Druck des Spritzwiderstandes (kPA)	entfällt	entfällt	≥ 16,0
Mikrobiologische Reinheit (KBE/g)	≥ 30	≥ 30	≥ 30

Das Ziel war, Gesichtsmasken aus Zellulosematerial herzustellen und sie nach Gebrauch in das etablierte Papierrecycling zu überführen und als Ausgangsmaterial für neue Produkte zu verwenden. Ausschlaggebend für die Wahl der Zellulose (Garcia et al., 2021), welche als ‹Renewable Feed Stock› bezeichnet zu den nachwachsenden Rohstoffen gehört, war deren Verfügbarkeit, sowie die Kompatibilität mit dem stofflichen Recyclingprozess (Ellen MacArthur Foundation, 2017). Die Zellulose wurde in Bezug auf Funktion, Verarbeitbarkeit und Zirkularität betrachtet.

Vier Kriterien waren für die Materialentwicklung als Ersatz für erdölbasierte Materialien neben der Normerfüllung relevant:

- Eignung für Ultraschallschweissverfahren
- Dehnbarkeit
- Reissfestigkeit
- Hydrophobe oder hydrophile Wirkung

Für Benutzende musste das Material

- in Bezug auf Berührung, Haptik und Geruch angenehm sein
- Hautreizungen, Juckreiz, Austrocknung von Haut und Augen und Feuchtigkeitsbildung vermeiden

Sicherheit vermitteln und hygienisch wirken

Als Innovationsziel des Maskendesign wurde

- die bestmögliche Form mit minimalem Materialverbrauch und Reduktion von nicht kreislauffähigen Komponenten angestrebt.
- der Entwicklungsprozess mittels Methoden des Material Driven Designs (MDD) (Karana et al., 2015) untersucht, um Materialerfahrungen für das angestrebte Produkt zu sammeln und bestehende Gestaltungspraxen und Lieferketten zu hinterfragen.
- der Maskenprototyp als Grundlage für die Befragung von Proband:innen und für den damit verbundenen Wissenstransfer genutzt.

Um den Bezug zur Realität herzustellen, sollten die Prototypen im Arbeitsalltag von Spitalpersonal getestet werden. Dabei wurden die Hypothesen überprüft, ob das Tragen von Masken aus Zellstoff mit flexiblen Maskengrössen, mit individuellen Anpassungsmöglichkeiten, dem Vermeiden von Druckstellen und einer guten Haut- bzw. olfaktorischen Verträglichkeit einen erhöhten Komfort für die Proband:innen mit sich bringt.

Ein weiterer Faktor war die schlichte, hygienisch wirkende Oberflächengestaltung für eine Akzeptanz und ein Vertrauen in ein neues Produkt. Es galt, ein gesundes Mass zwischen neuartig und herkömmlich zu finden, ganz im Sinne von Raymond Loewy's (2023) MAYA-Effekt: «Most Advanced Yet Acceptable».

METHODEN

Das Designteam nutzte eine Kombination aus qualitativen und quantitativen Methoden in einem empirischen, explorativen und iterativen Forschungsdesign, das sich unter anderem auf das Human-Centered Design Toolkit von IDEO (IDEO.org, 2015) und den Double Diamond Prozess (Nessler, 2016) bezog. In iterativen Entwicklungsloops, die sich teilweise das implizite Wissen (Soler, 2013; Ingold, 2010) der Designer:innen zunutze machte, wurden die Zwischenergebnisse und Erkenntnisse aus den Literaturrecherchen, den rapid Prototyping Workshops und den Materialweiterentwicklungen ständig überprüft und reflektiert. In nachfolgenden Designphasen wurden Verfeinerungen vorgenommen, Kriterien angepasst und geschärft. Die geforderten Normen und angestrebten Eigenschaften der Materialien wurden in internen und externen Labors und bei Nutzenden mit Surveys oder mittels (anonymisierten) Interviews mit Expert:innen überprüft. Die zentralen Designmethoden waren:

QUALITATIVE PRÜFUNGEN «TOUCH & FEEL»

Qualitative Prüfungen dienten der Bewertung der Papiere bezüglich haptischer Qualitäten, Geruch, Hautfreundlichkeit, Festigkeit, Handhabung, Geräusch. Sie wurden mit 10 Personen (Designer, Produzenten, Mitarbeitende) durchgeführt, um Angaben zur Papieroptimierung aus der Nutzendenperspektive zu erhalten.

Fünf Papiere wurden aufgrund der Labortests und qualitativen Prüfung ausgewählt. Diese wurden zu Masken gefaltet und mit Clips während vier Stunden von 10 Proband:innen getragen (5m:5w; Alter 25–70). Daraus resultierte eine qualitative Beurteilung des Materials auf der Gesichtshaut. Stündlich musste zu neun Kriterien Stellung genommen werden. Diese Kriterien wurden mit einem semantischen Differenzial (Steffen, 2000) mit jeweils zwei polaren Adjektiven auf einer horizontalen Linie und einer Einteilung von 0–10 erfasst und ausgewertet. Dies führte zur Priorisierung zweier Papiere, die schrittweise an die erforderlichen Eigenschaften angepasst wurden.

Iteratives Prototyping: Papier- und Maskenentwicklung

Die Qualität des Papiers musste bezüglich der Verarbeitbarkeit, der mikrobiellen Filterleistung und der haptischen Qualitäten weiterentwickelt werden:

- Verbesserung der Reissfestigkeit
- Erhöhung der Elastizität
- Erhöhung des Gewichtes
- verbesserte Homogenität der Oberfläche

Parallel zur Papieroptimierung wurden in iterativen Prozessen die Masken entwickelt. Mit diversen Stakeholdern wurden Ideation und Co-Creation Workshops durchgeführt, bei denen Grössenanpassungen, Befestigungen, Maskenformen und Materialverbindungen exploriert wurden.

Rapid Prototyping (IDEO.org, 2015) befeuerte den schnellen Transfer von konzeptuellen Ideen in physisch erfahrbare Maskenprototypen. Dabei wurden diverse Papiere geklebt, verfestigt, gefaltet und mit Ultraschall verschweisst. Die Prototypen wurden aus Sicht der Produktion und Nutzung bewertet und verfeinert.

Parallel Prototyping: hydrophobe Ausrüstung

Das parallele Vorgehen hatte zum Ziel, zwei der optimierten Papiere wasserabweisend auszurüsten, um sie als Aussenschicht einzusetzen. Die Auswahl der rezyklierbaren, wasserabstossenden und biokompatiblen Additiven basierte auf einer Literaturrecherche, Befragungen von Herstellern und Fachpersonen aus dem Bereich Restauration.

- Laborversuche mit Additiven in der Pulpe, Test der Wasseraufnahme
- Additive in verschiedenen Konzentrationen durch Aufspritzen (Air Brush) oder Bedrucken, Überprüfung des Spritzwiderstandes
- Testserie in drei Varianten mit AKD (Alkylketendimer) auf Labormaschinen eines Papierforschungsinstitutes

Alle ausgerüsteten Papiere wurden auf Biokompatibilität und Rezyklierbarkeit überprüft.

Feldtests 1

Für die ersten Feldtests wurden drei Maskentypen mit drei Ohrenhalterungen entwickelt (siehe Abbildung 3). Daraus ergaben sich sechs verschiedene Befragungssets, die von Hand hergestellt und an über 100 Probanden:innen verteilt wurden. Davon haben 77 Personen die Befragung abgeschlossen.

Die Sets beinhalteten eine Erklärung zur Handhabung der Masken, Informationen zum Forschungsprojekt, einen Weblink sowie einen QR-Code für die Onlineumfrage. Der Fokus lag auf dem korrekten Sitz der Maske im Gesicht und dem Komfort von verschiedenen Maskendesigns und Ohrenhalterungen. Befragt wurden Proband:innen, welche heterogen in Bezug auf Alter, Geschlecht, Seh- und Hörhilfen, Gesichts- und Kopfbehaarungen waren. Die Proband:innen trugen die Masken über einen Zeitraum von drei Tagen je zwei Stunden und beantworteten im Anschluss die Onlineumfrage.

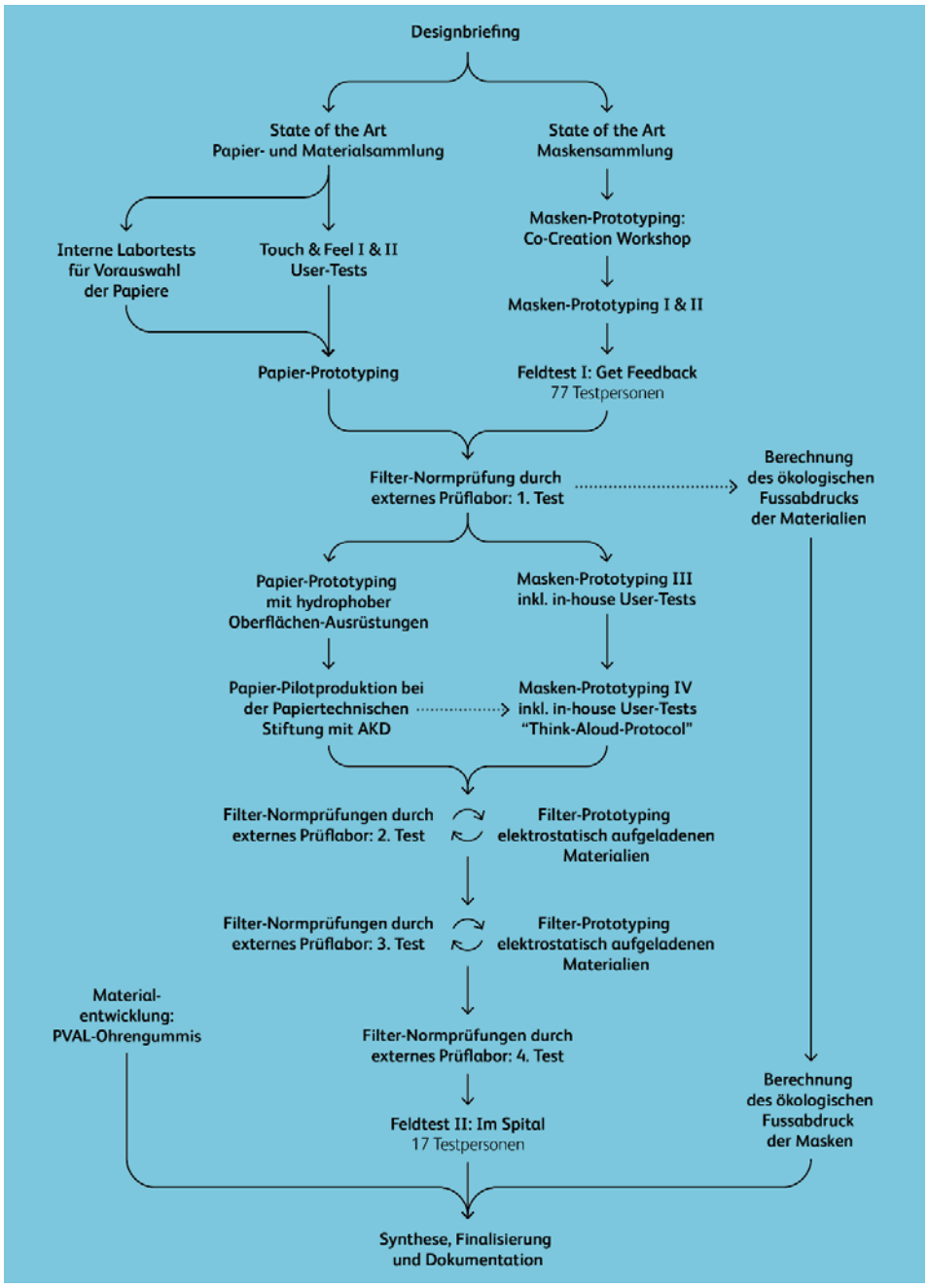

Abbildung 2: Forschungsdesign als Methoden Flow Chart, ©HSLU – DFK, CCPT

Feldtests 2

Der zweite Feldtest mit Spitalpersonal wurde durchgeführt, nachdem die Normanforderungen für medizinische Masken des TypII in einem akkreditierten Labor bestanden waren. Der Fokus lag auf der Funktionalität und Anwendung der Maske im Arbeitsalltag von Spitälern und Gesundheitsinstitutionen. Damit war das Ziel eines vermehrten Einsatzes von Papiermasken und eine mögliche spätere Implementierung verbunden. Der Feldtest wurde von 17 Proband:innen aus unterschiedlichen Berufsgruppen (Arzt- und Pflegedienst, medizinisches Fachpersonal) durchgeführt. Die Tragedauer wurde auf insgesamt acht (2x4) Stunden festgelegt und mit einer Onlinebefragung abgeschlossen.

Sowohl der Feldtest 1 als auch der Feldtest 2 orientierten sich im Wesentlichen an der Live Prototyping Methode aus dem «Field Guide to Human-Centred Design» von IDEO.org (2015).

Validierung ökologischer Mehrwert

Die Auswertung des ökologischen Mehrwertes erfolgte mittels simplifiziertem Life Cycle Assessment (LCA) (Worldly, 2023) in Kombination mit dem Eco-Costs Umrechnungsfaktor (Sustainability Impact Metrics, 2023), um die wahren monetären Gesamtkosten zu berechnen. Worldly bezieht sich auf wissenschaftlich fundierte Daten und erlaubt vereinfachte ökologische LCA aus einer Mischung von standardisierten Daten und individuellen, projektspezifischen Eingaben. Mit Worldly lässt sich der Impact für fünf Kategorien berechnen: Globale Erwärmung, Eutrophierung, Wasserknappheit, Erschöpfung der Ressourcen / Fossile Brennstoffe und Chemie.

FILTERMATERIALIEN

Sicherheitsstandards stellen eine große Herausforderung bei der Suche nach einem Ersatz für Masken auf Erdölbasis dar. In dieser Studie wurden die Herausforderungen für eine ökologischere Maskenvariante, die Entwicklung von hydrophoben, rezyklierbaren oder biologisch abbaubaren Materialien adressiert.

Materialität in Bezug auf Normen und Standards

Die Herausforderung ist gross, medizinische Normen und Standards mit Zellulosematerial anstelle von synthetischen Materialien zu erfüllen. Die Masken wurden deshalb in mehreren Iterationen in einem externen, akkreditierten Labor geprüft. Die Papiere mussten als hydrophobe Aussenschicht, als filternde Mittelschicht und als hydrophile Innenschicht funktionieren. Diese Anforderungen beeinflussten die Wahl der Zellstoffe, Grammatur, Reissfestigkeit, Ausrüstungen und Weichheit.

Die Dehnbarkeit des Zellulosepapiers wurde durch die Kreppbehandlung auf 29 % erhöht. Mit langfaserigem Zellstoff aus zertifiziertem Anbau und unterschiedlichem Materialgewicht wurde die Zugfestigkeit erhöht. Die Materialdichte musste in Abhängigkeit der genormten Vorgaben der Druckdifferenz gesteuert werden, wobei sich ein Warengewicht von 25g/m2 als ideal herausgestellte.

Im Gegensatz zu anderen Materialien kann Papier aus Zellulose nicht als Strukturmaterial für Hochleistungsprodukte verwendet werden, da es grundsätzlich hydrophil ist. Es kann ohne Zusätze die geforderte Widerstandsfähigkeit gegen das Eindringen von Körperflüssigkeiten nicht erfüllen. Bei der final verwendeten Ausrüstung handelt es sich um Alkylketendimer (AKD), ein lebensmittelrechtlich zugelassener Stoff, der für die Schlichtung von Papier und Karton und die hydrophobe Behandlung von Zellulosefasern verwendet wird. AKD findet in diversen Materialien als Additiv Anwendung und kann, trotz seinen hydrophoben Eigenschaften, biologisch abgebaut werden (Brodnjak, 2023; Wahyuningsih, 2020; Tarrés, 2019).

Das Vlies aus Polyvinylalkohol (PVAL), das für die medizinische Maske verwendet wurde, kommt üblicherweise in der Stickerei zum Einsatz. Es ist mit Ultraschall schweissbar und wasserlöslich, hat jedoch durch die grobkörnige Struktur eine geringe Filterleistung. PVAL hat eine chemische Grundstruktur, die je nach Konzentration mikrobiologisch leicht abbaubar ist.

Polyvinylalkohol (PVA) gilt als eines der wenigen wasserlöslichen Vinylpolymere, das in Gegenwart geeigneter Mikroorganismen, beispielsweise in Kläranlagen, biologisch abbaubar ist. (Chiellini, 2003, Marušincová, 2013).

Ohne eine elektrostatische Mittelschicht und mit der alleinigen Verwendung von Zellstoff war es nicht möglich, eine entsprechend den Normen vorgegebene Filterleistung von 98 % (vergl. Tabelle 1) zu erzielen. Papier lässt sich in der Herstellung nicht wie ein synthetisches Material statisch aufladen. Deshalb musste auf ein biologisch abbaubares und im Melblownverfahren hergestelltes Polylactid (PLA) zurückgegriffen werden, das für die weitere Entwicklung als Mittelschicht verwendet wurde. Um die Filterleistung mit dem PLA direkt zu vergleichen, wurde ein für Masken übliches Polypropylen herangezogen. Dank seiner (DaSilva, 2018, Tokiwa, 2006) wird PLA unter anderem für zahlreiche Anwendungen in der Medizintechnik verwendet.

MASKENDESIGN

Design-Ausgangslage

Die Maskenformen wurden parallel zu den Filtermaterialien weiterentwickelt. Die Umsetzung einer vollständig recyclingfähigen Papiermaske war wegen unzureichenden Norm-Prüfungsergebnissen nicht realistisch. Daher wurde der Fokus auf die biologische Rezyklierbarkeit ausgeweitet.

Herkömmliche Typ II und IIR-Masken bestehen meistens aus einem fächerartig gefalteten Filter mit einem metallischen Nasenbügel und elastischen Ohren-Gummibändeln. Das bedeutet ein schwierig zu trennender Materialmix. Die herkömmlichen Maskenmodelle sind auf synthetische Vliesstoffe ausgelegt und funktionieren innerhalb des «Take-Make-Dispose»-Modells. Für eine kreislauffähige Maske aus Zellstoffpapier brauchte es daher elementare Veränderungen im Maskendesign.

Entwicklung: Maskenform und Ohrenhalterung

Losgelöst vom oben beschriebenen, archetypischen Maskendesign wurden in einem projektinternen, interdisziplinären Workshop unterschiedlichste Inspirationen angedacht und Lösungswege für eine Monomaterial-Maske aus Zellstoffpapier entwickelt. Die grössten Herausforderungen lagen bei den Ohrenhalterungen resp. Kopfbefestigungen, der Grössenverstellbarkeit und den Materialverbindungen. Auf der Grundlage der Workshopergebnisse wurden in einem interaktiven Designprozess Maskenkonstruktionen entwickelt, getestet und verbessert. Daraus haben sich drei konkrete Maskenkonzepte mit jeweils drei unterschiedlichen Ohrenhalterungen herauskristallisiert.

Die Maskenkonzepte bestanden aus:

a) versteiften, aufklappbaren Masken mit zwei horizontalen Materialnähten
b) aufklappbaren, schalenförmigen Varianten mit einer vertikalen Materialnaht
c) einer gefächerten Variante mit innenseitiger Versteifung

Die Maskenausführungen gab es mit drei unterschiedlichen Ohrenhalterungen:

4) elastische Lyocellbändchen
5) Bändchen aus Vlies mit individuell verschiebbarem Teil
6) verlängerte Vliese mit Ohrenaussparungen

Die drei Maskenvarianten und Kopfbefestigungen wurden in einem Feldtest mit 77 Teilnehmenden getestet und evaluiert. Nach dem Proband:innen-Feedback wurde der Entwicklungsfokus auf das Modell B gelegt, eine Schalenmaske mit markanter, vertikaler Ultraschallschweissnaht von der Nase zum Kinn. Dabei wurde bewusst auf Metallnasenbügel und elastische Gummibändel verzichtet. Für die Kopfbefestigung wurde eine gänzlich neue Konstruktionsweise entwickelt, ohne elastisches Fremdmaterial, die dennoch alltagstauglich, bequem und stufenlos verstellbar ist.

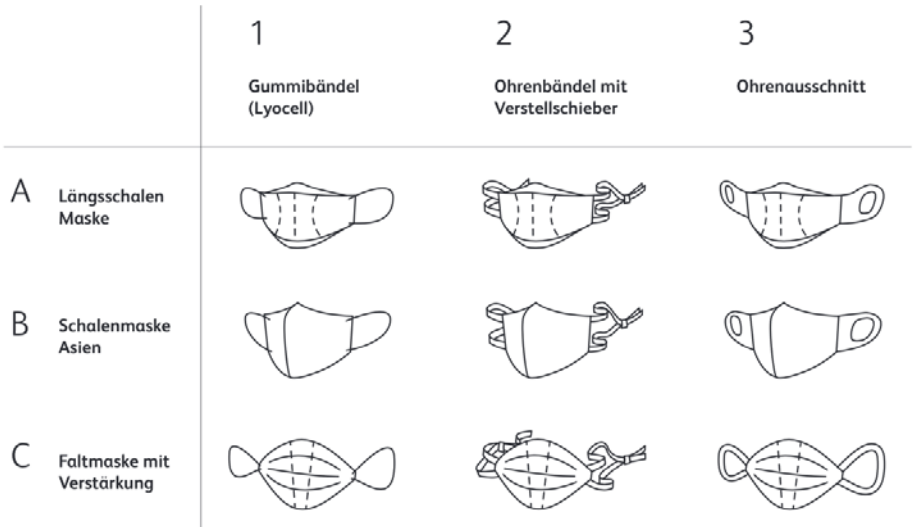

Abbildung 3: Drei Maskenformen mit je drei unterschiedlichen Ohrenbefestigungen für den Feldtest 1, ©HSLU – DFK, CCPT

Materialentwicklung Ersatzgummi

Die Gummibändchen sind bei herkömmlichen Masken nicht kreislauffähig. Für die Masken in dieser Studie musste eine biologisch oder technisch kreislauffähige Variante oder eine Designlösung ohne Gummibändchen entwickelt werden.

Auf einer Kettwirkmaschine wurde statt des üblichen Polyamides ein biologisch abbaubares Lyocell (Zellulosefaser) eingesetzt, und der Anteil des ebenfalls biologisch abbaubaren Elastans reduziert. Entstanden sind Wirkwaren-Bändchen aus 86 % CLY (Tencel™) und 14 % EL («Roica» ©Asahi Kasei).

Parallel dazu entwickelte das Team ein wasserlösliches Bändchen aus PVAL, das in den herkömmlichen Papierrecyclingprozess integriert werden könnte. Das verwendete Garn ist bei 40°C wasserlöslich.

Als Resultat aus den Material- und Formentwicklungen wurden zwei Modell als finale Prototypen ausgearbeitet: Modell I und Modell II

Medizinische Maske Modell I

Zu den Aussen-und Innenschichten aus Papier und dem dazwischenliegenden wasserlöslichen PVAL-Vlies, welches für die Schweissbarkeit der Materiallagen und die Ohrenbefestigungen verwendet wurde, kam eine zusätzliche Mittelschicht aus elektrostatischem Meltblown-Vlies aus PLA dazu. Diese neue Materialkombination ermöglichte die Ausarbeitung eines Maskenmodells, dass ressourcenschonender und biologisch abbaubar ist.

Die aufklappbare Schalenform ist komfortabel, leicht und klebstofffrei. Das neue Design minimiert potenzielle Druckstellen und eignet sich somit auch für eine längere Tragedauer. Das PVAL-Vlies geht stufenlos vom Filter in die Ohrenhalterung über. Dabei wird der längere Bändel durch eine Öse im kürzeren Bändel geführt. Mit dieser Konstruktion bietet die Maske eine stufenlos einstellbare Ohrenhalterung. Für eine optimale Passform wurde das Modell in den Grössen small (S) und large (L) hergestellt.

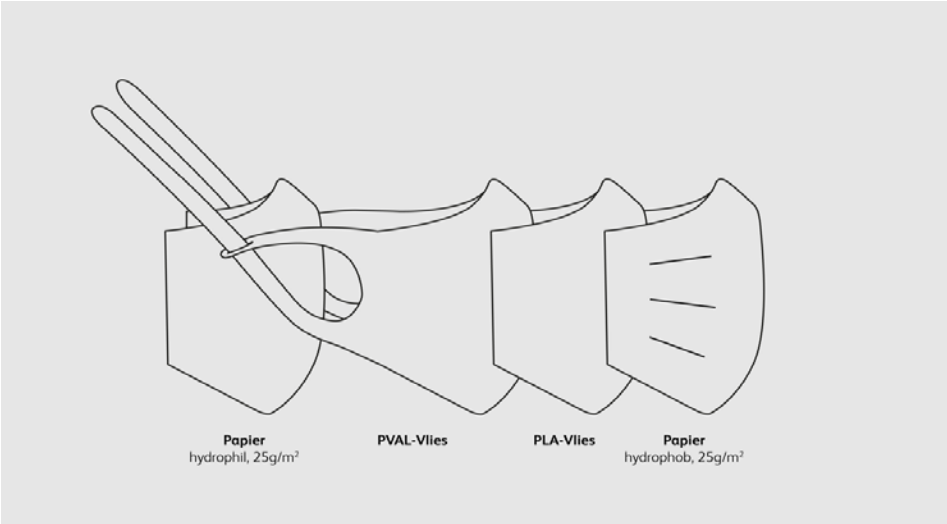

Abbildung 4: Aufbau Modell I als Explosionsdarstellung, ©HSLU – DFK, CCPT

Abbildung 5: Physischer Prototyp des Modell I in der Seitenansicht, ©HSLU – DFK

Medizinische Maske Modell II

Die Maske basiert auf dem marktüblichen, fächerartigen Maskendesign. Die Aussenlage besteht aus hydrophobem, die Innenlagen aus hydrophilem, hautfreundlichem Papier. In der Mittellage befindet sich ein elektrostatisches Meltblown-Vlies aus PLA. Die Ohrenhalterungen bestehen aus einem elastischen und biologisch abbaubaren Kettgewirk (CLY und EL). Das Modell II bietet eine einfacher zu produzierende Designvariante, weil sie mit bestehenden Produktionsanlagen kompatibel ist.

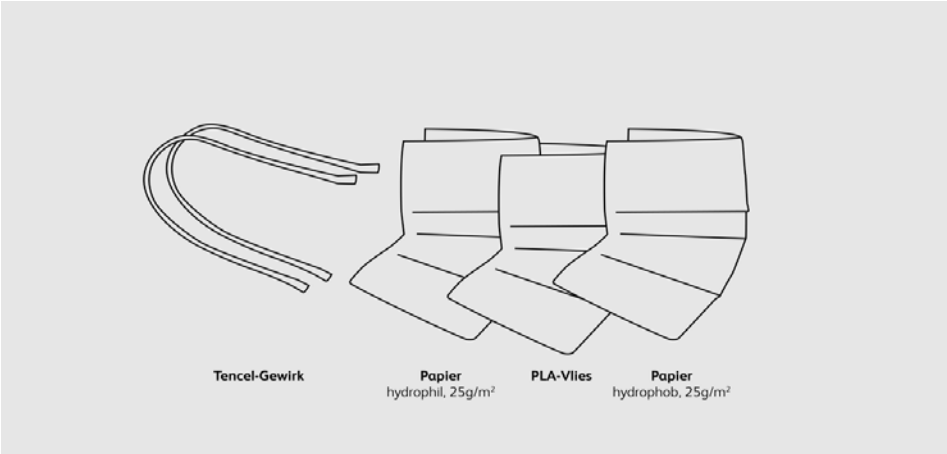

Abbildung 6: Aufbau Model II als Explosionsdarstellung, ©HSLU – DFK, CCPT

Abbildung 7: Physischer Prototyp des Modell II in der Seitenansicht, ©HSLU – DFK, CCPT

MEDIZINISCHE MASKEN IM KREISLAUF

Beim Konzept der Kreislaufwirtschaft und den Cradle-to-Cradle (Braungart et al., 2010) Prinzipien sollen Ressourcenverbrauch und Abfälle verringert werden. Die Abfallvermeidung und Verschmutzung gehen einher mit dem Erhalt von Produkten und Materialien durch Wiederverwendung und Regeneration in natürlichen Systemen (Ellen MacArthur Foundation, 2017; Braungart und McDonough, 2014), denn Materialien sind wertvolle Ressourcen und müssen sorgfältig eingesetzt werden (Balkenende et al., 2018; Haffmans et al., 2018; Karell et al., 2019; Ellen MacArthur Foundation, 2017; Vignali et al., 2020).

Im technischen oder biologischen Kreislauf werden Produkte durch Wartung, Reparatur, Wiederaufbereitung und Wiederverwertung möglichst lange im Umlauf gehalten. Ultrakurzlebige Produkte sollten entweder kompostierbar oder leicht rezyklierbar sein, um eine langfristige Nutzung der Materialien durch wiederholte Verwertung sicherzustellen (Goldsworthy, 2017).

Das Material ist entscheidend für den ökologischen Fussabdruck bei der Herstellung von Einwegmasken aus erdölbasierten versus alternativen, zellulosehaltigen Materialien. Die Herausforderungen für eine ökologischere Variante, welche die Standards für medizinische Produkte erfüllen, sind jedoch hoch (SN, 2020). In dieser Studie arbeitete ein breites Spektrum von Akteur:innen zusammen, darunter Forschende, Papierhersteller, Produzente, Lieferanten, Logistikmanager in Krankenhäusern, Nutzende im Gesundheitswesen, Abfallwirtschaftsunternehmen und Papierrecycler.

Der multidisziplinäre Ansatz führte zu Erkenntnissen für ein potenzielles Kreislaufmodell für medizinische Masken. Im Gegensatz zum ausgereiften Recyclingverfahren für Zellulose in Papieren und Karton, gilt dies nicht für die in dieser Studie ebenfalls herangezogenen bakteriellen Filtermaterialien aus PP, PLA und PVAL. Expert:innen Interviews aus den Bereichen Landwirtschaft, Biotechnologie und Umweltwissenschaften führten zu folgender Priorisierung der End-of-Life-Materialien der medizinischen Testmasken:

1) Rückführung in den technischen Kreislauf (Recycling): Es gibt Bedenken hinsichtlich der mikrobiologischen Keimabtötung im Papierherstellungs-prozess. Es müsste getestet werden, ob die Prozesstemperatur von 450°C bei einem Zeitraum von einigen Sekunden dafür ausreichent. PVAL als wasserlösliches Polymer löst sich im Papieraufbereitungsprozess auf und wird in Kläranlagen unter spezifischen Bedingungen vollständig abgebaut (Chiellini, 2003, Marušincová, 2013, Byrne et al., 2021).
2) Verbrennung zur Energiegewinnung: Papier ist bei der Verbrennung CO2-neutral. In Europa ist das Verbrennen von medizinischen Masken ein etabliertes Verfahren und wird in nutzbare Energie umgesetzt. Der verbleibende Waschschlamm aus dem Verbrennungsprozess wird gemeinsam mit dem Filterstaub aus dem Elektrofilter in Untertagedeponien endgelagert.
3) Vergärung in Kläranlagen zur Gaserzeugung: Es bestehen Bedenken hinsichtlich der Akzeptanz von Krankenhausabfällen in Vergärungsanlagen (Kontamination). Bei der Vergärung in Kläranlagen geht das Rohmaterial grundsätzlich verloren.
4) Industrielle Kompostierung: Obwohl PLA, PVAL wie auch Zellulose der industriellen Kompostierung zugeführt werden können, werden Materialien für medizinische Masken im biologischen Kreislauf kritisch beurteilt. Die Kompostierung hat keine positiven Auswirkungen auf das Endprodukt Humus. Eine industrielle Kompostieranlage würde die neuen Maskenmodelle nicht verarbeiten, weil das Risiko der Verwechslung mit synthetischen Masken zu gross ist. Zudem besteht eine Unsicherheit wegen möglicher Kontamination von Spitalprodukten (EU, 2017).

PLA ist grundsätzlich nur unter industriellen Kompostierungsbedingungen und anaerober Vergärung biologisch abbaubar. Andererseits kann nicht ausgeschlossen werden, dass die auf dem Markt befindlichen PLA kleine Polymerfragmente (Mikroplastik oder Nanoplastik) bilden (Luo, 2019, Ainali et al., 2022). PLA erfüllt die cradle-to-cradle Kriterien nicht.

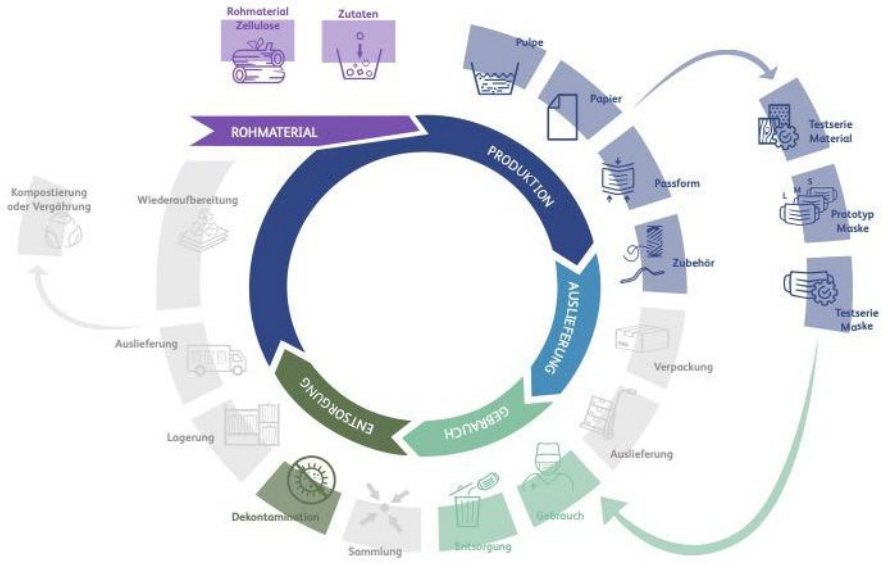

Abbildung 8: Kreislaufmodell für zirkuläre Masken, ©HSLU – DFK, CCPT

Diese Informationen beziehen sich auf die Schweiz und die meisten westlichen Länder. Abhängig von der geografischen Lage (Landfill oder Abfall in Meeren), macht eine biologische Abbaubarkeit oder die Möglichkeit der Kompostierung Sinn.

Neben der Entsorgung gibt es auch in der Lagerung, Aufbereitung und Rückhollogistik Entwicklungspotenzial, um ein zirkuläres Ökosystem für medizinische Masken im Gesundheitswesen zu gewährleisten. Bis anhin sind die Prozesse für zellulosehaltige Medizinprodukte erst fragmentarisch etabliert oder noch nicht vorhanden.

BEWERTUNG DER ERGEBNISSE

Filterleistung: Maske

In einem akkreditierten Labor wurden Masken in verschiedenen Kombinationen aus Papieren, PVAL-Vlies und PLA geprüft. Signifikante Fortschritte bezüglich einer guten Filterleistung konnte durch den Einsatz einer mittleren, elektrostatischen Filterschicht aus PP oder PLA gemacht werden. Mehr als zwei Filterlagen aus Papier haben keinen positiven Einfluss auf die bakterielle Filterleistung, führen jedoch zu schlechteren Druckdifferenzwerten bei gleichzeitiger Verbesserung des Spritzwiderstandes. Um die geforderten 98 % Filterleistung auch für die kleinsten Aerosolpartikel zu erreichen, wurde beim finalen Maskenmodell ein elektrostatisch geladenes, biologisch abbaubares PLA verwendet. Damit konnten die Filterleistung und die Druckdifferenz gut ausgewogen werden.

Filterleistung: Papier

Bei herkömmlichen medizinischen Masken des Typ II/IIR haben die beiden Innen- und Aussenschichten aus Polypropylen (PP) oder Polyester (PES) eine Filterleistung von 30–35 %. Mit der mittleren, elektrostatischen PP-Meltblown-Schicht wird die Filtereffizienz auf 95 % oder mehr erhöht (DeVelder, 2021).

Mit den in dieser Studie entwickelten hydrophoben und hydrophilen Papieren konnte nebst der hervorragenden Biokompatibilität auch eine deutlich höhere Filterleistung erzielt werden. Im Vergleich zu den herkömmlichen, synthetischen Materialien konnte mit den Papieren bereits eine bakterielle Filterleistung von durchschnittlich 71,8 % erzielt werden.

Bewertung durch Nutzer:innen

Die quantitative Online-Umfrage ergab, dass Papier als Hauptmaterial im Vergleich zu Polyestermaterial als angenehm, geruchlos und feuchtigkeitsbindend auf der Haut empfunden wird. Mit dem neu entwickelten Maskenmodell konnte ein gutes Sicherheitsgefühl vermittelt werden.

Der neue Stil des Maskendesigns Modell I wird grundsätzlich akzeptiert, lediglich das Anlegen und Anpassen der Ohrenhalterung wird beim ersten Mal als gewöhnungsbedürftig empfunden. Teilweise stellten sich Schmuck, Brillen oder offen getragene Haare beim Anpassen oder Tragen der Maske als hinderlich heraus. Kritisch beurteilt wurde, dass das Maskenmodell I immer ganz ausgezogen werden musste und nicht einfach unters Kinn geschoben werden kann, wie das bei herkömmlichen Masken und beim Maskenmodell II der Fall ist.

Die Testpersonen haben überwiegend Maskengrösse S getragen. Nur drei der insgesamt 17 Testpersonen haben angegeben, dass das neue Maskenmodell I unangenehmer ist als die herkömmlichen Spitalmasken. Die Auswertung der Umfrage hat ergeben, dass die neue Maskenform und -materialität generell als alltagstauglich eingestuft wird.

Ökologischer Mehrwert

Bei den mittels Worldly erstellten Berechnungen handelt es sich um eine Annäherung mit wissenschaftlichen Standardwerten resp. Richtwerten, die nicht als abschliessende LCAs gewertet werden können.

In Bezug auf den ökologischen Fussabdruck schneiden die bei Schweizer Partnern produzierten Masken der Modelle I & II gegenüber denjenigen aus dem asiatischen Raum je nach Modell und Ausführungsvariante um -26 % bis -72 % besser ab (siehe Abbildungen 8 und 9). Die Prozentangaben wurden aus dem durchschnittlichen Impact aus den fünf Impact-Kategorien in Relation zur herkömmlichen Maske berechnet. Auf Grund der vereinfachten Berechnungen mit Worldly und den Unklarheiten, wie die Produktion genau aussehen würde, dienen die genannten Zahlen lediglich als Richtwert. Einen eklatanten Einfluss auf die Ökobilanz hatten die Einsparungen der Aluminiumnasenbügel und elastischen Gummibändel aus Polyester und Elasthan sowie die klimaneutrale Konfektion mit erneuerbarer Energie. Ohne klimaneutrale Produktion lägen die ökologischen Verbesserungen beim Modell II nur noch bei -3 % bis -18 % und beim Modell I bei +44 % bis -8 %. Das komplexe Schnittmuster von Modell I führt zu den schlechteren Ökobilanzen.

Weitaus deutlicher fallen die Umwelt-Kompensationskosten (Sustainability Impact Metrics, 2023) für die Produktion aus. Mit dem Modell II könnten im Vergleich zu herkömmlichen, synthetischen Masken bis zu fünfmal mehr Eco-Costs eingespart werden. Bei Model I konnte eine Reduktion der Kosten um mehr als die Hälfte festgestellt werden. Dazu kommt, dass im Gegensatz zu herkömmlichen Masken die neuen Prototypen biologisch abbaubar sind und somit das Littering- und Mikroplastikproblem in der Natur reduzieren.

Der ökologische Mehrwert wird also durch die Wahl des Rohstoffes, die Produktion mit erneuerbarer Energie und die stoffliche Verwertung erreicht.

		Papier hydrophil, 25g/m²	PLA-Vlies	PVAL-Vlies	Papier hydrophil, 25g/m²
Maske Model I	**Variante A** Stand jetzt	x	x	x	x
	Variante B Vision	x	x		x
	Variante C Vision	x		x	x
Maske Model II	**Variante B** Stand jetzt	x	x		x
	Variante C Vision	x		x	x

Abbildung 9: Materialvarianten für die LCA Berechnungen der Modelle I & II, ©HSLU – DFK, CCPT

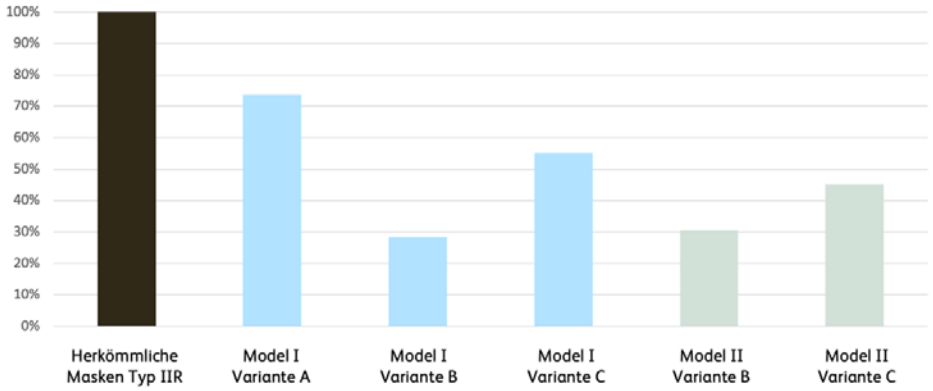

Abbildung 10: Ökologischer Impact von herkömmlichen Masken vs. Maskenmodelle I und II in unterschiedlichen Ausführungen (% Impact im Vergleich), ©HSLU – DFK, CCPT

DISKUSSION

Während der Corona-Pandemie waren die Lieferketten unterbrochen, es gab Engpässe bei der Maskenbeschaffung, für welche hohe Summen ausgegeben wurden. Dies befeuerte die Diskussion um Abhängigkeiten im globalen Markt, die oftmals ohne eine grundsätzliche Diskussion über Nachhaltigkeitsaspekte geführt wurde. Die Notwendigkeit für resiliente und lokale Maskenproduktionen bot somit eine Chance, bei der Überarbeitung herkömmlicher Masken hin zu zirkulären Maskenlösungen die Nutzendenbedürfnisse miteinzubeziehen.

Zwei Grundsätze wurden verfolgt:

- eine grundlegende Infragestellung von synthetischen und biologisch nicht abbaubaren Materialien und
- die Abklärung einer Rückführbarkeit des Produktes medizinische Maske in einen etablierten und lokalen Kreislauf, in das Papierrecycling.

Die Forschungsfrage war, ob sich eine ökologischere Maske mit zellulosischem Material herstellen, in einem Recyclingprozess wieder aufbereiten lässt und in den Materialkreislauf rückführbar ist.

Papier aus Zellulose bietet je nach Ausführung Eigenschaften, die sich optimal für nachhaltig zirkuläre Masken nutzen lassen. Es ist angenehm hautfreundlich, rezyklierbar, aus nachwachsenden Rohstoffen gefertigt und hat eine, im Vergleich zu Polypropylen (PP) oder Polyester (PES), hohe bakterielle Filterleistung. Neben allen positiven Eigenschaften wie Hautfreundlichkeit, Rezyklierbarkeit, Verwendung nachwachsender Rohstoffe, ist ein grosser Nachteil, dass das Papier aus Zellulose die elektrostatische Aufladung nicht aufrechterhalten kann. Diese wäre notwendig, um die kleinsten infektiösen Partikel zurückzuhalten und damit die hohen Normanforderungen für medizinische Masken zu erreichen. Bei synthetischen Fasern geschieht die elektrostatische Aufladung beim Meltblown-Produktionsprozess. Ein synthetisches Vlies, das aus regenerativen Rohstoffen besteht, biologisch abbaubar ist und kein Störfaktor im Papierrecycling darstellt, ist hierfür ideal. Vliesstoffe aus Polylactidfasern (PLA) wiesen in der vorliegenden Studie daher eine hohe Eignung auf.

Die ganzheitliche Sichtweise auf das Produkt «medizinische Maske» zeigte die vielen Abhängigkeiten, Vorgaben, Designanforderungen und Lücken auf, die den Designprozess beeinflussten und sich auf die gesamte Lieferkette und das Ende der Lebensdauer von zellulosischen Materialien in medizinischen Produkten auswirkten.

Es konnten Konzepte für lokale, zirkuläre Prozesse für die Produktion, Nutzung und Wiederaufbereitung von Schutzmasken

	Standard	CIMProW „Modell I“	CIMProW „Modell II“
Norm EN 14683 Medizinische Gesichtsmasken	Typ IIR	Typ II (oder Typ IIR)	Typ II (oder Typ IIR)
Resiliente Lieferkette	Nein (global)	Eher Ja (Europa)	Eher Ja (Europa)
Prognostizierter VP pro Stück	4-5 Rappen	15-20 Rappen	Keine Angaben
Recycling	Nein	Nein (Ja bei Var. PVAL)	Nein (Ja bei Var. PVAL)
Kompostierung/Vergärung	Nein	Ja (Variante PLA)	Ja (Var. PLA & Tencel)
Kompensation Öko-Fussabdruck	2.3 Rappen	1.1 Rappen	0.4 Rappen
User-Komfort	Erfüllt, aber nicht ideal	Erfüllt und optimiert	Keine Angaben

Tabelle 2: Vergleichende Darstellung einer standardisierten Typ IIR Maske im Vergleich zu den Neuentwicklungen, ©HSLU – DFK, CCPT

skizziert werden, um so eine ökologischere, resilientere und transparentere Versorgung aufzuzeigen.

Die Studie zeigt Potential für weitere Anwendungsbereiche auf. Um die Sammelmengen zu erhöhen und das Sammelsystem rentabler zu gestalten, wären auf der Basis der vorgestellten Designlösungen andere medizinische Einwegprodukte aus Zellulosepapieren möglich und nötig, die heute aus erdölbasiertem Material bestehen (Wärmedecken, Hauben/Augenmasken bei Patientenvorbereitung, Materialien für Patientenliegen, Medikamentenbecher für Tabletten). Eine Umstellung auf kreislauffähige Masken und weitere Einwegprodukte erforderten zudem Platz für die zwischenzeitliche Lagerung, eine Rückführlogistik, die Erforschung der Wiederaufbereitung von Krankenhausprodukten aus Zellstoff sowie automatisierte Produktionsprozesse zur Umsetzung einer lokalen Herstellung.

In der Praxis können Designer:innen verborgenes Potenzial in Lieferketten und bei Materialien aufdecken. Die Etablierung einer Kreislaufwirtschaft geht jedoch über die Möglichkeiten spezifischer Designdisziplinen hinaus. Deshalb bedingt eine derartige Studie die Mitarbeit diverser weiterer Akteur:innen, aus Landwirtschaft, Medizin- und Umweltwissenschaften, Chemie, Abfallwirtschaft, Papiertechnologie, Gesundheitsbereich, Herstellung von Medizinprodukten und des medizinischen Qualitätsmanagements. Die Autor:innen sehen in diesen Fragen auch staatlichen Handlungsbedarf und betonen die kritischen externen Faktoren wie Preisdruck, Politik und staatliche Gesetzgebung, die hier die Weichen in Richtung mehr Nachhaltigkeit stellen könnten.

Folgende Bereiche bedürfen zudem weiterer Entwicklungen:

- Zusätzliche Mechanismen und Anreize zur Förderung lokaler, dezentraler Produktion in Gesetzgebung und Technologie, um unabhängig von globalen Märkten zu werden.
- Erforschung weiterer Ersatzstoffe aus (einheimischen) Pflanzen wie Brennnesseln, Gras, Stroh zur Gewinnung von Zellulose und der Entwicklung biologisch abbaubaren Materialien.
- Entwicklung von elektrostatischen Filtermaterialien aus wasserlöslichem PVAL als Alternative zu PLA.
- Weiterentwicklung von medizinischen Einwegprodukten aus Monomaterialien, die rezyklierbar oder biokompatibel sind.
- Herstellung von Masken und medizinischen Produkten aus Zellstoff mit erneuerbarer Energie in automatisierten Prozessen.
- Detailliertere Berechnung des ökologischen Fussabdrucks der herkömmlichen Masken und neuen Maskenmodelle I & II

FAZIT

Inzwischen ist die Post-Corona-Weltrealität radikal anders: Der Kostendruck im Gesundheitswesen ist enorm und lässt uns die ganzen Mühen der Pandemie wieder vergessen. Masken werden wieder zu Tiefstpreisen aus Asien importiert. Eine Reanimierung resilienter Lieferketten für nachhaltige medizinische Masken ist nicht in Sicht. Aufgrund der oben ausgeführten Gründe und der Studienresultate verdiente ein nachhaltiges Redesign medizinischer Masken eine breitere Aufmerksamkeit, damit die Gesundheitsinstitutionen und die Gesellschaft im Falle einer neuen Pandemie besser vorbereitet sind.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Rückgewinnung von Ressourcen in einer Kreislaufwirtschaft, in der Abfall keine Option mehr ist, unweigerlich an Bedeutung gewinnen wird. Grundsätzlich ist es gelungen, eine prototypische, biologisch abbaubare und bequeme medizinische Maske vom Typ II herzustellen, die den Sicherheitsnormen für medizinische Produkte entspricht. Die Autor:innen hoffen, damit die Diskussion über zirkuläre Innovation anzuregen, um Design, Produktion und die Verwendung von Einwegmaterialien in Krankenhäusern zu überdenken.

ACKNOWLEDGEMENTS

Die vorliegende Studie wurde im Rahmen vom Forschungsprojekt «CIMProW – Circular Innovation: Medical Protective Wear» durchgeführt. Die Forschungs-tätigkeiten der Hochschule Luzern wurden durch Innosuisse, Schweizer Agentur für Innovationsförderung und die Zürcherische Seidenindustrie Gesellschaft (ZSIG) finanziert.

REFERENCES

Ainali, N. M., Kalaronis, D., Evgenidou, E., Kyzas, G. Z., Bobori, D. C., Kaloyianni, M., Yang, X., Bikiaris, D. N., Lambropoulou, D. A. (2022). Do Poly(Lactic Acid) Microplastics Instigate a Threat? A Perception for Their Dynamic towards Environmental Pollution and Toxicity. Science of The Total Environment 832 (August 2022): 155014. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155014.

Allison, A. L., Ambrose-Dempster, E., Bawn, M., Arredondo, M. C., Chau, C., Chandler, K., Dobrijevic, D., Aparasi, T. D., Hailes, H. C., Lettieri, P., Liu, C., Medda, F., Michie, S., Miodownik, M., Munro, B., Purkiss, D., & Ward, J. M. (2021). The impact and effectiveness of the general public wearing masks to reduce the spread of pandemics in the UK: a multidisciplinary comparison of single-use masks versus reusable face masks. UCL Open Environment, 3. https://doi.org/10.14324/111.444/ucloe.000022

Balkenende, R., Bakker, C. (2018). Designing for a circular economy: Make, Use and Recover Products, in: Sustainable Fashion in a Circular Economy. Hrsg. von Niinimäki, K. et al., Helsinki, 76–95.

Bundesamt für Gesundheit, BFG (2020). Gesetzgebung Covid-19. https://www.bag.admin.ch/bag/de/home/krankheiten/ausbrueche-epidemien-pandemien/aktuelle-ausbrueche-epidemien/novel-cov/massnahmen-des-bundes.html

Braungart, M., McDonough, W. (2014). Cradle to Cradle: Einfach intelligent produzieren. Piper Verlag GmbH

Byrne, D., Boeije, G., Croft, I., Hüttmann, G., Luijkx, G., Meier, F., Parulekar, Y. & Stijntjes, G. (2021). Biodegradability of Polyvinyl Alcohol Based Film Used for Liquid Detergent Capsules: Biologische Abbaubarkeit der für Flüssigwaschmittelkapseln verwendeten Folie auf Polyvinylalkoholbasis. Tenside Surfactants Detergents, 58(2), 88–96. https://doi.org/10.1515/tsd-2020-2326

Chen, C, Chen, J., Fang, R., Ye, F., Yang, Z., Wang, Z., Shi, F., Tan, W. (2021). What medical waste management system may cope With COVID-19 pandemic: Lessons from Wuhan. Resources, Conservation and Recycling. Volume 170. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105600.

CENTEXBEL, De Vilder, I., Vanneste, M., Van Deun, J. (2021). Material use medical masks. (COVVID-PBM). CENTEXBEL, HOGENT.

Chiellini, E., Corti, A., et al., (2003), Biodegradation of poly (vinyl alcohol) based materials, Progress in Polymer Science, Volume 28, Issue 6, 2003,

Pages 963-1014, https://doi.org/10.1016/S0079-6700(02)00149-1

Da Silva, D. et al., (2018), Biocompatibility, biodegradation and excretion of polylactic acid (PLA) in medical implants and theranostic systems, Chemical Engineering Journal, Volume 340, 2018, Pages 9–14, https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.01.010.

Dörner, D., Funke, J. (2017). Complex Problem Solving: What It Is and What It Is Not. Frontiers in Psychology. 8:1153. DOI: 10.3389/fpsyg.2017.01153

Elander, M., Ljungkvist, H. (2016). Critical aspects in design for fiber-to-fiber recycling of textiles. A Mistra Future Fashion Report. Retrieved December 2017:7.

Ellen MacArthur Foundation. (2017). A new textiles economy: Redesigning fashion's future. https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/A-New-Textiles-Economy_Full-Report.pdf

EU. (2023). VERORDNUNG (EU) 2017/745 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 5. April 2017 über Medizinprodukte, zur Änderung der Richtlinie 2001/83/EG, der Verordnung (EG) Nr. 178/2002 und der Verordnung (EG) Nr. 1223/2009 und zur Aufhebung der Richtlinien 90/385/EWG und 93/42/EWG des Rates. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32017R0745. [Stand 30.09.2023]

Garcia, R. A., Stevanovic, T., Berthier, J., Njamen, G., Tolnai, B., & Achim, A. (2021). Cellulose, Nanocellulose, and Antimicrobial Materials for the Manufacture of Disposable Face Masks: A Review. BioResources, 16(2)., 2021.

Geschäftsprüfungskommission des Nationalrates, GPK (2022). Covid-19-Pandemie: Beschaffung von Schutzmasken. https://www.parlament.ch/centers/documents/de/Bericht%20der%20GPK-N%20vom%20 18.2.2022%20D.pdf

Gesellschaft für Aerosolforschung, GAeF (2020). Position paper of the Gesellschaft für Aerosolforschung on understanding the role of aerosol particles in SARS-CoV-2 infection. Zenodo. https://doi.org/10.5281/zenodo.4350494

Goldsworthy, K., Earley, R., & Politowicz, K. (2019). Circular Design Speeds: prototyping fast and slow sustainable fashion concepts through interdisciplinary design research.

Haffmans, S., van Gelder, M., van Hinte, E., & Zijlstra, Y. (2018). Products That Flow: Circular Business Models and Design Strategies for Fast Moving Consumer Goods. BIS Publishers. https://doi.org/10.1080/21681015.2016.1172124

Hochschule Luzern – Design Film Kunst, Forschungsgruppe Produkt & Textil, HSLU – DFK, CCPT (2023). Produkt & Textil Forschungsgruppe. https://www.hslu.ch/de-ch/design-kunst/forschung/produkt-und-textil/#?filters=1132, [Stand 28.08.2023]

IDEO.org. (2015). The Field Guide to Human-Centered Design. https://www.designkit.org/

Ingold, T. (2018). Five questions of skill. Cultural Geographies, 25(1), 159–163. https://doi.org/10.1177/1474474017702514

Jablonsky, M., Homola, J., Masaryk, M., Slavikova, M., Homolova, M., Brazinova, A., and Katuscak, S. (2021). Cellulose fibers (dominant protecting means/tool) against COVID-19. Facemasks pros, cons, and challenges. BioResources 16(2), 2200–2203.

Karana, E., Barati, B., Rognoli, V., & Zeeuw van der Laar, A. (2015). Material Driven Design (MDD): A Method to Design for Material Experiences. International Journal of Design. 9(2), 35–54.

Karell, E., Niinimäki, K. (2019). Adressing the dialogue between design, sorting and recycling in a circular economy. Design Journal 22(sup1): 997-1013, DOI: 10.1080/14606925.2019.1595413

Koch, D. (2020). Leiter Abteilung Übertragbare Krankheiten beim BAG. Zitiert am 31. März 2020 im «Echo der Zeit» auf Radio SRF 1 und am 27. März in der Sendung «10vor10».

Lacy, P., Rutqvist, J. (2016). Waste to wealth: The circular economy advantage. Berlin 2016, p.119

Loewy, R. (2023): About Raymond Loewy. https://www.raymondloewy.com/about/biography/ [Stand 24.10.2023]

Luo, Y., Lin, Z., Guo, G., (2019), Biodegradation Assessment of Poly (Lactic Acid) Filled with Functionalized Titania Nanoparticles (PLA/TiO2) under Compost Conditions. Nanoscale Res Lett. 2019 Feb 14;14(1):56. doi: 10.1186/s11671-019-2891-4. PMID: 30767099; PMCID: PMC6376044.

Marušincová, H., Husárová, L., et al., (2013), Polyvinyl alcohol biodegradation under denitrifying conditions, International Biodeterioration & Biodegradation,Volume 84, 2013, Pages 21–28, https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2013.05.023.

Nessler, D. (2016). How to rethink the Design process, fail, reflect and iterate. https://uxdesign.cc/how-to-fuck-up-the-design-thinking-process-and-make-it-right-dc2cb7a00dca [Stand 30.01.2024]

Rittel, H. W. J., & Webber, M. M. (1973). Dilemmas in a General Theory of Planning. Policy Sciences, Vol. 4 (No 2, June 1973), 155–169.

Schoppek, W., & Fischer, A. (2015). Complex problem solving – Single ability or complex phenomenon? Frontiers in Psychology, 6, Article 1669. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.01669

Schweizer Norm, SN (2020). Medizinische Gesichtsmasken – Anforderungen und Prüfverfahren. EN 14683+AC. https://www.sssh.ch/wp-content/uploads/2021/10/SN_EN_14683_AC_D.pdf

Steffen, D. (2014). New experimentalism in design research. Characteristics and interferences of experiments in science, the arts, and in design research. Artifact, 3(2), 1.1–1.6.

Soler, L., Zwart, S. D., & Catinaud, R. (Hrsg.). (2013). Tacit and explicit knowledge: Harry Collins framework. Kimé.

Sustainability Impact Metrics. (2023). What are eco-costs? https://www.ecocostsvalue.com/ecocosts/#av_section_2 [Stand 06.11.2023]

Tarrés, Q., Mutjé, P., Delgado-Aguilar, M. (2019). Towards the development of highly transparent, flexible and water-resistant bio-based nanopapers: tailoring physico-mechanical properties. Cellulose, 26:6917-6932. https://doi.org/10.1007/s10570-019-02524-8

Tokiwa, Y., Calabia, B. P. (2006). Biodegradability and biodegradation of poly(lactide). Appl Microbiol Biotechnol, 72:244–251. DOI 10.1007/s00253-006-0488-1

Vignali, G., Reid, L. F., Ryding, D., & Henninger, C. E. (Hrsg.). (2020). Technology-Driven Sustainability: Innovation in the Fashion Supply Chain. Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-15483-7

Wahyuningsih, K.,Savitri Iriani, E. S., Yuanita, E. (2020). Characterization of Migration Rate and Biodegradability of Cassava Starch-Based Biofoam Modified with Alkyl Ketene Dimer. Macromol. Symp. 2020, 391. DOI: 10.1002/masy.201900131

Wedin, H., Gupta, C., Mzikian, P., Englund, F., Hornbuckle, R., Troppenz, V., Kobal, L., Krečič, M., Costi, M., Ellams, D. & Olsson, S. (2017). Can automated NIR technology be a way to improve the sorting quality of textile waste? https://static1.squarespace.com/static/5891ce37d2b857f0c58457c1/t/5a0dced7419202640c130f81/1510854363825/report4.pdf

World Health Organization, WHO (2020a). Advice on the use of masks in the context of COVID-19: Interim guidance. https://apps.who.int/iris/handle/10665/332293

World Health Organization, WHO (2020b). Stay healthy – Protect yourself against COVID-19. http://www.emro.who.int/omn/oman-news/stay-healthy-protect-your-self.html

Worldly (2023). Worldly Product Impacts. https://worldly.io/tools/product-impacts/ [Stand 24.10.2023]

ABOUT THE AUTHORS:

Tina Moor ist Textildesignerin, Forscherin und Dozentin an der Hochschule Luzern und an Partnerinstituten in Europa, Indien und China. Sie leitete 12 Jahre die Studienrichtung Textildesign und forscht seit 1995 in der angewandten Forschung mit Wirtschaftspartnern. Ihre Forschungsarbeiten wurden mehrfach ausgezeichnet.

Brigitt Egloff ist Textildesignerin, Forscherin und Dozentin an der Hochschule Luzern – DFK. Seit 2016 ist sie in der Designforschung mit Schwerpunkt nachhaltiger Materialstrategien und in der Lehrtätigkeit an Designhochschulen in Luzern, Beijing, Chongqing und Ahmedabad tätig. Ihre künstlerische Arbeit wurde mehrfach ausgezeichnet.

Joel Hügli ist als nachhaltiger Produktdesigner und Forscher an der Hochschule Luzern tätig und fokussiert sich auf die Entwicklung von zirkulären Materialien und Produkten im Textilbereich. Für seine Masterarbeit «ECOMADE – Ecological Mattress Design» hat er den Schweizer Design Preis und den Swiss Design Award erhalten.

HSLU Hochschule Luzern