

ASSYST

DITF
DEUTSCHE INSTITUTE FÜR
TEXTIL+FASERFORSCHUNG

DBU 
Deutsche
Bundesstiftung Umwelt

ECO-Shoring

**Effektive ökologische Umweltentlastung
durch Nearshoring, Made-to-Measure und
On-Demand Produktion in regionalen Netzwerken**

Abschlussbericht

über ein Entwicklungsprojekt,
gefördert unter dem Az: 37686/01-21/2 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Dr. Martin Lades **Assyst GmbH, Aschheim-Dornach**
Alexander Mirosnichenko, **Deutsche Institute für Textil- und Faserforschung Denkendorf**
Dr. Jürgen Seibold,
Alexander Artschwager

September 2024

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	37686/01-21/2	Referat	01 - 21	Fördersumme	476.189 €
----	---------------	---------	---------	-------------	-----------

Antragstitel **ECO-Shoring - Effektive ökologische Umweltentlastung durch Nearshoring, Made-to-Measure und On-Demand Produktion in regionalen Netzwerken**

Stichworte Umweltentlastung, Kreislaufwirtschaft, E-Commerce, 3D-Digitalisierung, Fashion, Nearshoring, On-Demand Produktion, Made-to-Measure, Virtual Fit, Datensicherheit, regionale Produktion, Vermeidung von Abfall, Ressourceneffizienz

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
27 Monate	24.03.2022	23.06.2024	1

Zwischenberichte Kurzbericht 1 zum Zeitraum 24.03.2022 bis 31.12.2022
Kurzbericht 2 zum Zeitraum 01.01.2023 bis 31.12.2023

Bewilligungsempfänger	Assyst GmbH	Tel	089/90505-188
	Max-Planck-Str. 3, 85609 Aschheim-Dornach	E-Mail	Martin.Lades@assyst.de
		Projektleitung: Dr. Martin Lades	
		Bearbeiter: Dr. Martin Lades	

Kooperationspartner DITF Denkendorf – Körschtalstr. 26, 73770 Denkendorf

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

Die globale Modeindustrie verursachte im Jahr 2018 rund 2,1 Milliarden Tonnen Treibhausgasemissionen. Dies entspricht rund 4% der weltweiten und den THG-Emissionen aus Frankreich, Deutschland und dem Vereinigten Königreich zusammen. 82% davon entfallen auf Bekleidung. Ohne weitere zukünftige Maßnahmen steigt die Treibhausgasemission der Modeindustrie bis 2030 auf voraussichtlich 2,7 Milliarden Tonnen jährlich. Zur Erreichung der angestrebten Klimaerwärmung von maximal 1,5 Grad sind die THG-Emissionen bis 2030 auf maximal 1,1 Milliarden Tonnen zu reduzieren, also in etwa 50% der heutigen Emissionen.

Dazu ist ein radikales Umdenken von „Fast Fashion“ hin zu nachhaltiger Produktion in der Bekleidungsbranche notwendig: Virtualisierung und digitale Abmusterung, On-Demand Technologien, die Nearshoring ermöglichen, sowie der direkte Einbezug des Konsumenten in die Wertschöpfungskette sind die drängenden Herausforderungen für eine nachhaltige Bekleidungsindustrie durch die Rückverlagerung der Produktion.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

An dem oben geschilderten Potenzial zur Reduktion der Umweltbelastung setzt das vorliegende Projekt ECO-Shoring an. Ziel von ECO-Shoring ist eine effektive ökologische Umweltentlastung durch Nearshoring, Made-to-Measure und Musterteilefertigung in regionalen Produktions-Netzwerken. Zu diesem Zweck wurden die folgenden nachhaltigkeitsorientierten Kernziele untersucht und umgesetzt, wobei die effektive Verringerung des Ressourcenverbrauchs im Vordergrund stand.

Die DITF beschäftigten sich mit der Ökobilanzierung und Quantifizierung der Umweltentlastung im Gesamtprozess des Nearshorings und der On-Demand-Produktion durch Reduktion von Bekleidungsmüll, Material, Energie und Produktionsressourcen in regional vernetzten Wertschöpfungsketten. Hierfür wurden MFCA-Modelle für die Bekleidungsproduktionsstufen inkl. Faser-Recycling entwickelt und parametrisiert. Anhand der MFCA-Modelle der Gesamtproduktion wurden Szenarien von regionaler Produktion und Fast-Fashion gegenübergestellt.

Assyst entwickelte neue, digital integrierte und durchgängige Produktentwicklungsprozesse für Made-to-Measure im On-Demand-Business vom Endkunden bis zur Produktion. Die Arbeitsschritte hierzu umfassten den Ausbau der Basistechnologien für die 3D-Bekleidungssimulation und Visualisierung für 3D On-Demand-Anwendungen, die servicebasierte Automatisierung einzelner hierfür erforderlichen Softwarekomponenten sowie deren Anwendung und Validierung für eine Auswahl von MtM-Beispielprodukten.

Für den Ergebnistransfer in die Industrie wurde eine Integration der digitalen Prozess-Komponenten für Ökobilanzierung und MtM-Produktentwicklung in eine Demonstrator-Plattform realisiert. Diese erlaubt die Erforschung möglicher Szenarien und Technologien für eine ökologisch und ökonomisch nachhaltige Rückverlagerung.

Ergebnisse und Diskussion

Die Schwerpunkte des Projektes lagen auf einer ökologischen Entlastung durch nachhaltige Produktionsmethoden im Nearshoring und der Entwicklung von Technologien zur Realisierung von kundenindividuellen Produkten. Dies beinhaltete die umfassende Ökobilanzierung von Bekleidungsproduktionsstufen zur Quantifizierung der Umweltentlastung von On-Demand- und Nearshoring-Ansätzen. Des Weiteren wurde ein Web-basiertes MtM-Framework inkl. Variantenmanagement entwickelt, das eine voll automatisierte Schnitthanpassung, Simulation und Visualisierung von individualisierten Produkten anhand von Kunden-Körpermaßen und Avataren erlaubt. Für die MtM-Anpassung wurde ein Service und eine Web-Schnittstelle zur Erzeugung von Körpermaß- und verschlüsselten Avatar-Daten geschaffen und ein Front-end für die Kundeninteraktion implementiert.

Im Projekt wurden verschiedene Produktionsszenarien von ECO-Shoring und On-Demand-Produktion im Vergleich zur Fast-Fashion analysiert, um deren Umweltpotenzial zu bewerten und Impulse zur Kreislaufwirtschaft zu geben. Es wurden vorkonfigurierte MFCA-Modelle für alle relevanten Produktionsschritte entwickelt, mit denen spezifische Produkte hinsichtlich Strommix, Nutzeffekten und Abfallanteilen detailliert bewertet werden können. Recyclingfasern, insbesondere in der Spinnerei, spielen eine zentrale Rolle, weisen aber teils erhebliche Varianzen in den CO₂-Werten auf. Das Modell zeigt Einsparpotenziale von bis zu 98 % im Vergleich zu Fast-Fashion, vor allem durch kürzere Transportwege und höhere Tragezyklen. Bei 10 % ECO-Shoring-Produktion für den deutschen Markt könnten jährlich 2,1 Mio. Tonnen CO₂ eingespart werden. Trotz höherer Lohn- und Energiekosten in Europa bieten ECO-Shoring-Strategien durch geringere Überhänge, reduzierte Abfallraten und kürzere Transportwege sowohl ökonomische als auch ökologische Vorteile. Die entwickelten MFCA-Modelle unterstützen zudem die finanzielle Planung von Produktionsprozessen.

Die beiden Schwerpunktthemen Ökobilanzierung und Made-to-Measure-Produktanpassung wurden in Demonstratoren überführt und erlauben den Transfer der Themen in die Industrie. Hierbei werden Anreize zur Produktifizierung der erarbeiteten Lösungen gegeben und Potenziale zur Lösung firmenspezifischer Problemstellungen erschlossen. Gleichzeitig wird die Demonstratorumgebung der DITF für Workshops und Veranstaltungen genutzt.

Als größte Herausforderungen für die erfolgreiche Integration der Ökobilanzierung stellt sich die Komplexität der Prozess- und Lieferketten dar. Die Datenbeschaffung und -kommunikation in den international angelegten Strukturen gestaltet sich oft wegen mangelnder Standardisierung und Digitalisierung als sehr aufwändig. Die Rückbesinnung auf regionale Produktionsstrukturen und Fokussierung auf digital durchgängige Prozesse sind wesentliche Faktoren zur Lösung dieser Probleme.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Das Projekt, seine Ziele und Angebote wurden bei vielen Gelegenheiten dem Fachpublikum und der breiten Öffentlichkeit präsentiert. Hierfür wurden Fachvorträge, Laborführungen und Workshops vom Projektteam organisiert und durchgeführt. Zusätzlich zu den Projekt-Präsentationen wurde während der gesamten Projektlaufzeit mehrfach über Pressemeldungen und Social-Media auf das Projekt ECO-Shoring hingewiesen.

Zum Projektende wurde das Projekt über 11 Tage auf der Drupa 2024 in Düsseldorf im Rahmen des "Touchpoint Textile" präsentiert. Durch Vorträge, Live-Vorführungen und Führungen wurde das Publikum über das Made-to-Measure-Framework zur On-Demand-Produktentwicklung und die Ökobilanzierung der Produktionsprozesse informiert. Auf dem Assyst-Stand wurde das Made-to-Measure-Framework live demonstriert, während in der Digital Textile Micro Factory eine On-Demand-Produktion individualisierter Produkte gezeigt wurde. Am Beispiel der Produktion eines DBU-Shirts wurden die Vorteile des ECO-Shoring-Ansatzes aufgezeigt.

Fazit

Die Projektziele, die Entwicklung von umweltfreundlichen und digital integrierten Produktionsprozessen für Nearshoring und On-Demand-Fertigung vom Kunden bis zur Produktion, sowie deren Ökobilanzierung und Quantifizierung, wurden erreicht.

Die Ergebnisse zeigen, dass durch die Anwendung von ECO-Shoring-Strategien der CO₂-Fußabdruck von Bekleidung um bis zu 98 % gesenkt werden kann, insbesondere durch den Einsatz von Ökostrom, die Reduzierung von Überproduktion und die Verlängerung der Nutzungsdauer von Kleidung. Die entwickelten Modelle zur Bewertung von Produktions- und Recyclingprozessen ermöglichen eine detaillierte Analyse, um ökologische und ökonomische Optimierungen vorzunehmen. Für den Transfer der Projektergebnisse in die Industrie stehen die beiden Demonstratoren, Ökobilanzierung und Made-to-Measure Produktentwicklung, zur Verfügung. Die Integration der entwickelten Technologien und Modelle in die Praxis der Mode-Industrie ist der Schlüssel zur Umweltentlastung mittels ECO-Shoring-Strategien.

Inhalt

Inhalt.....	1
Verzeichnis von Bildern, Zeichnungen, Grafiken und Tabellen.....	2
Verzeichnis von Begriffen, Abkürzungen und Definitionen	3
1 Zusammenfassung	4
2 Einleitung	5
3 Effektive ökologische Umweltentlastung durch Nearshoring, Made-to-Measure und On-Demand Produktion in regionalen Netzwerken	8
3.1 Überblick	8
3.2 Anforderungsanalyse und Konzeption des Gesamtsystems (AP1)	9
3.3 Ökobilanzierung der Umweltentlastung mit Schwerpunkt Kreislaufwirtschaft durch Modellierung und Demonstration / ECO-Shoring (AP2).....	14
3.4 On-Demand Technologien für Nearshoring und direkte Vernetzung in das Produktionsnetzwerk Virtuelle Bekleidungs-simulation (AP3)	27
3.5 Virtuelles Framework zur On-Demand-Integration von Services und konfigurierbare Schnittstellen für die Variantenkonstruktion in Drittsystemen (AP4)	35
3.6 Demonstrator für regionale Entwicklungs- und Produktionsnetzwerke für MtM und Online Darstellung ECO-Shoring unter Berücksichtigung des Schutzes von Endkundendaten (AP5).....	40
3.6.1 MtM-Demonstrator für Bekleidungsprodukte einer On-Demand Produktion	40
3.6.2 Demonstrator für Ökobilanzierung im Multifunktionslabor der DITF Denkendorf.....	43
3.7 Projektbegleitendes Expertengremium (AP6).....	47
4 Ökologische, technologische und ökonomische Bewertung der Vorhabensergebnisse	49
5 Verbreitung der Projektergebnisse.....	52
6 Fazit.....	57
7 Literaturverzeichnis	59
Anhang	A1
A1 Auszug aus dem ECommerce Abschlussbericht (Grundlagen Bekleidungsentwicklung)	A1
A2 Ökobilanzierung.....	A4
A3 Ablauf einer ECO-Shoring Kunden-Session in Screenshots	A15
A4 Verbreitung der Projektergebnisse	A26

Verzeichnis von Bildern, Zeichnungen, Grafiken und Tabellen

Abbildung 1: On-Demand Technologien und Nearshoring als Schlüsseltechnologien zur Umweltentlastung in der Textil- und Bekleidungsindustrie	10
Abbildung 2: Gesamtkonzept ECO-Shoring.....	11
Abbildung 3: Gesamtkonzept ASSYST ECO-Shoring - Datenvorbereitung	12
Abbildung 4: Gesamtkonzept ASSYST ECO-Shoring - Auftragsausführung	13
Abbildung 5: Methoden zur Nachhaltigkeitsbewertung.....	15
Abbildung 6: MFCA-Modellierung - Material- und Energieströme	15
Abbildung 7: MFCA-Modellierung - CO ₂ -Fußabdruck	16
Abbildung 8: MFCA-Modell Weberei - Detailansicht	16
Abbildung 9: MFCA-Modell Spinnerei - Fast-Fashion (Sz. 8, li) vs. ECO-Shoring (Sz. 5, re) – Massen-Sicht.....	18
Abbildung 10: MFCA-Modell Spinnerei - Fast-Fashion (Sz. 8, li) vs. ECO-Shoring (Sz. 5, re) - CO ₂ -Sicht	19
Abbildung 11: MFCA-Modell Reisserei - Massen-Sicht	20
Abbildung 12: CO ₂ -Allokation - MFCA-Sicht vs. Classic-Sicht	20
Abbildung 13: CO ₂ je kg Produkt - Classic Allokation bei unterschiedlichen Abfallanteilen und Strommix.....	21
Abbildung 14: Input- und Output-Ströme für 1kg Bekleidung (Gesamtmodell) in 8 Spinnereiszenarien - CO ₂ -Sicht.....	22
Abbildung 15: Allokationsunterschiede - Strommix 0,1.....	23
Abbildung 16: Allokationsunterschiede - Strommix 1,0.....	24
Abbildung 17: MFCA-Gesamtmodell - Fast Fashion (Sz. 8) - 100 Tragezyklen	25
Abbildung 18: Input- und Output-Ströme für 100 Tragezyklen (Gesamtmodell) in 8 Spinnereiszenarien - CO ₂ -Sicht.....	26
Abbildung 19: Input- (oben) und Output- (unten) -Ströme für 100 Tragezyklen - CO ₂ -Sicht	27
Abbildung 20: Beispielprodukte zur Evaluierung von MtM Methoden für ECO-Shoring	28
Abbildung 21: MtM mit 3D-Grading.....	29
Abbildung 22: Assyst Variantenkonfigurator	29
Abbildung 23: Variantenauswahl im Assyst.CAD	30
Abbildung 24: 3D-Vidya Variantenpräparator	31
Abbildung 25: MtM Workflow für 3D Simulation mit Varianten [Quelle Masterarbeit]	31
Abbildung 26: Vergleich zwischen Konfektionsgröße und MtM-Modell (Frontansicht).....	32
Abbildung 27: Vergleich zwischen Konfektionsgröße und MtM-Modell (Rückansicht).....	32
Abbildung 28: API Parameter für den Service 3D Simulation	33
Abbildung 29: Ergebnis des Virtuellen Scanners von Avalution.....	36
Abbildung 30: Importierter Avatar im Backend des ECO-Shoring Demonstrators	36
Abbildung 31: ECO-Shoring Queue-Management.....	37
Abbildung 32: Ablaufprotokoll ECO-Shoring Queue	38
Abbildung 33: E-Mail Benachrichtigung des Anwenders des ECO-Shoring Demonstrators	39
Abbildung 34: 3D Viewer im WEB Browser.....	39
Abbildung 35: 2D/3D Datenpaket inkl. 2D Daten im ASTM Format	39
Abbildung 36: ECO-Shoring Demonstrator – Beispiel-Screenshots zum Ablauf einer Kundensession.	41
Abbildung 37: ECO-Shoring Demonstrator – Zusammenfassung der wichtigsten Eigenschaften	42
Abbildung 38: Technische Infrastruktur des ECO-Shoring Plattform	42
Abbildung 39: Demonstrator zur Berechnung von Szenarien, User Interface und Ergebnisse	44
Abbildung 40: PCF-Input-Ströme Szenario A, B, C [in kgCO ₂ -Eq]	45
Abbildung 41: PCF-Output-Ströme Szenario A, B, C [in kgCO ₂ -Eq]	45
Abbildung 42: MtM-Framework-Demonstrator auf der Drupa 2024	53
Abbildung 43: MFCA-Modell Drupa'24-DTMF – Mengen- und PCF-Sicht.....	54
Abbildung 44: Drupa'24 - DTMF-Produktion DBU-Shirt.....	55

Abb. 45 (Anh.): MFCA-Modell Spinnerei - Fast-Fashion (Sz. 8, li) vs. ECO-Shoring (Sz. 5, re) – Massen-Sicht	A4
Abb. 46 (Anh.): MFCA-Modell Spinnerei - Fast-Fashion (Sz. 8, li) vs. ECO-Shoring (Sz. 5, re) – CO ₂ -Sicht.....	A5
Abb. 47 (Anh.): CO ₂ -Allokation - MFCA-Sicht vs. Classic-Sicht	A6
Abb. 48 (Anh.): MFCA-Gesamtmodell - Fast Fashion (Sz. 8) - 1kg Produkt.....	A7
Abb. 49 (Anh.): MFCA-Gesamtmodell - ECO-Shoring (Sz. 5) - 1kg Produkt.....	A8
Abb. 50 (Anh.): Input-Ströme Spinnerei - ECO-Shoring für 1kg Produkt - CO ₂ -Sicht	A9
Abb. 51 (Anh.): Output-Ströme Spinnerei - ECO-Shoring für 1kg Produkt - CO ₂ -Sicht	A9
Abb. 52 (Anh.): Input-Ströme Spinnerei - Fast-Fashion für 1kg Produkt - CO ₂ -Sicht	A10
Abb. 53 (Anh.): Output-Ströme Spinnerei - Fast-Fashion für 1kg Produkt - CO ₂ -Sicht	A10
Abb. 54 (Anh.): MFCA-Gesamtmodell - Fast Fashion (Sz. 8) - 100 Tragezyklen	A11
Abb. 55 (Anh.): MFCA-Gesamtmodell - ECO-Shoring (Sz. 5) - 100 Tragezyklen.....	A12
Abb. 56 (Anh.): Input-Ströme Spinnerei - ECO-Shoring für 100 Tragezyklen - CO ₂ -Sicht.....	A13
Abb. 57 (Anh.): Output-Ströme Spinnerei - ECO-Shoring für 100 Tragezyklen - CO ₂ -Sicht.....	A13
Abb. 58 (Anh.): Input-Ströme Spinnerei - Fast-Fashion für 100 Tragezyklen - CO ₂ -Sicht	A14
Abb. 59 (Anh.): Output-Ströme Spinnerei - Fast-Fashion für 100 Tragezyklen - CO ₂ -Sicht.....	A14
Abb. 60 (Anh.): Dr. Martin Lades (Assyst GmbH) trägt zur On-Demand-Produktentwicklung vor	A26
Abb. 61 (Anh.): Dr. Jürgen Seibold (DITF) trägt zur Ökobilanzierung der DTMF vor	A27
Abb. 62 (Anh.): LinkedIn-Beitrag der DITF und Pressemeldung von Südwest Textil.....	A27
Tabelle 1: Adressierte Maßnahmen in ECO-Shoring	17
Tabelle 2: Modellparameter der Szenarien 8 und 5.....	18
Tabelle 3: Szenarienauswahl Spinnerei für Gesamtmodell - Fast-Fashion und ECO-Shoring	22
Tabelle 4: Parameter für Überhänge und Tragezyklen - Fast-Fashion und ECO-Shoring.....	25
Tabelle 5: Einsparpotential ECO-Shoring (Sz.8 vs. Sz.5)	26
Tabelle 6: Veranstaltungen mit ECO-Shoring	56

Verzeichnis von Begriffen, Abkürzungen und Definitionen

Abkürzung	Beschreibung
Alteration (MtM)	Regel am Schnitt für Veränderung auf Basis eines Differenzmaßes zwischen individuellen und Referenzavatar
Avatar	3D Repräsentation eines individuellen Kunden
DTMF	Digital Textile Micro Factory
GWP	Global Warming Potential
LCA	Life Cycle Assessment
MFCA	Material Flow Cost Accounting
MtM	Made-to-Measure; dt. Maßkonfektion
PCF	Product Carbon Footprint; dt. CO ₂ -Fußabdruck
THG / GHG	Treibhausgas / Greenhouse Gas

1 Zusammenfassung

Zur Erreichung der von der Politik gesteckten Klimaziele in Bezug auf die Begrenzung der globalen Erwärmung müssen die THG-Emissionen aus der Textilindustrie bis 2030 in etwa halbiert werden. Ein besonderes Augenmerk liegt dabei auf der Bekleidungsindustrie, die den Großteil der Emissionen im Textilektor verantwortet.

Das Projekt ECO-Shoring zielt auf eine effektive ökologische Entlastung durch nachhaltige Produktionsmethoden im Nearshoring-Umfeld unter der Einbeziehung des Kunden und der Entwicklung von Technologien und Services für kundenindividuelle Produkte¹. Die durchgeführten Arbeiten umfassen die Ökobilanzierung einzelner Stufen der Bekleidungsproduktion und die Quantifizierung der Umweltentlastung durch mögliche On-Demand- und Nearshoring-Ansätze sowie die Entwicklung neuer digitaler Services und Workflows für Produktionsprozesse von Kleinserien und individualisierter Kleidung². Der Fokus liegt auf der Reduktion von Bekleidungsmüll, Materialverbrauch, Energieeinsatz und der Produktoptimierung für eine nachhaltige Nutzungsphase. Hierfür wurden detaillierte MFCA-Modelle von Produktionsstufen entwickelt, daraus wirkungsvolle Hebel abgeleitet und damit Wege aufgezeigt, wie der Wandel von Fast-Fashion hin zu einer nachhaltigen Bekleidungsindustrie gelingen kann.

Das Projekt zeigt, dass Nearshoring und On-Demand-Produktion signifikante ökologische Einsparungen ermöglichen, insbesondere durch die Reduzierung von Abfällen und eingesetzten Ressourcen, sowie die Verlängerung der Nutzungsdauer von Produkten und die Steigerung von Recycling-Potentialen bei entsprechender Qualität der Produkte.

Es konnte anhand der entwickelten Modelle und einer polarisierenden Betrachtung nachgewiesen werden, dass ECO-Shoring Produktionsmethoden gegenüber der Fast-Fashion-Industrie ökologisch vorteilhaft sind und das Prinzip der Kreislaufwirtschaft stärken. Technologisch fortschrittliche Fertigungsmethoden mit kurzen Lieferketten sind zukunftsweisend für individualisierte Produkte.

Für eine praktische Umsetzung wurden Modellanwendungen für die digitale Integration von Serviceprozessen, einschließlich CAD-Produkt-Konfiguratoren, 3D-Visualisierung und Produktdaten-Generierung für individuelle Kleidung aus Kunden-Avataren entwickelt. Diese Anwendungen wurden in automatisierten Prozessen in eine skalierbare Technologieplattform überführt und getestet. Abschließend erfolgte eine Integration der Ökobilanzierungs-Modelle und der Technologieplattform als Demonstrator im Multifunktionslabor der DITF.

Die Ergebnisse unterstreichen die Notwendigkeit eines Wandels hin zu zirkulären und nachhaltigen Produktionsmodellen. Es wird empfohlen, die Ansätze von ECO-Shoring weiterzuverfolgen, insbesondere die Integration von digitalen 3D-Designprozessen in Produktions- und Vertriebsabläufe. Zukünftige Geschäftsmodelle sollten auf virtuelle Produktentwicklung und Automatisierung mit durchgehenden Strukturen zur Kommunikation von Öko-Daten aus Design, Produktion und Vertrieb setzen. Konsumenten sollten stärker in die Wertschöpfungskette eingebunden werden, um personalisierte Produkte effizienter zu gestalten und eine Produktbindung herbeizuführen. Hierbei muss der ökologische Mehrwert von unter ECO-Shoring-Bedingungen hergestellten Produkten offen und verständlich kommuniziert werden.

ECO-Shoring wurde durch die Assyst GmbH koordiniert und gemeinsam mit dem Projektpartner DITF Denkendorf im Zeitraum von 24.03.2022 bis 23.06.2024 bearbeitet. Das Vorhaben wurde durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt unter dem Aktenzeichen 37686/1-21/2 finanziell gefördert.

¹ Vgl. (Comarch 2019)

² Vgl. (Geneva 2019)

2 Einleitung

Eine McKinsey Studie zeigt, dass im Jahr 2018 rund 2,1 Milliarden Tonnen Treibhausgasemissionen in der globalen Modeindustrie verursacht wurden. Dies entspricht rund 4% der weltweiten Gesamtmenge und den jährlichen THG-Emissionen kombiniert aus Frankreich, Deutschland und dem Vereinigten Königreich. Davon entfallen 82% auf den Bekleidungssektor. Dabei werden 70% der Emissionen aus der Modeindustrie durch vorgelagerte Aktivitäten erzeugt, wie die Herstellung von Stoffen, die Produktion, Vorbereitungen und Verarbeitung. Die restlichen 30% werden im Zusammenhang mit dem nachfolgenden Transport, Verpackungen, Einzelhandel, der Nutzungsphase, sowie End-of-Use Aktivitäten festgestellt.³

Falls zukünftig keine weiteren Maßnahmen getroffen werden, wird ein Anstieg der Treibhausgasemission der Modeindustrie auf voraussichtlich 2,7 Milliarden Tonnen pro Jahr bis 2030 prognostiziert. Um aber die angestrebte Klimaerwärmung von maximal 1,5 Grad einhalten zu können, sind die Treibhausgasemissionen bis 2030 auf maximal 1,1 Milliarden Tonnen zu reduzieren, was in etwa 50% der heutigen Emissionen entspricht.

Die wichtigsten in der Studie beschriebenen Maßnahmen zur Reduktion der THG-Emissionen sind im Bereich der Upstream Prozesse verortet, welche derzeit ca. 60 % der Einsparpotenziale ausmachen. Generell sind ca. 63% aller Einsparpotenziale mit energetischen Maßnahmen verbunden. Dabei werden 45% mit Energieeffizienz-Maßnahmen und die verbleibenden 55% durch die Umstellung auf erneuerbaren Energien erreicht.⁴

Im Bereich des Handels, welcher ca. 20% der Einsparpotenziale beitragen soll, ist vor allem die Reduktion der Überhänge (von 20% auf 10%) dominant. Aber auch Reuse, Refurbish und die längere Nutzung sind hier wichtig, da diese nur durch qualitativ hochwertige Produkte realisierbar sind. Die Reduktion der Retouren im online Handel durch verbesserte Passform⁵ trifft einen weiteren Kern des geplanten Projektes.

Durch die genannten Maßnahmen sind beispielsweise für die in Deutschland jährlich konsumierte Menge an Bekleidung von ca. 940 Mio. kg konservativ gerechnete Einsparpotenziale von >120 [Mio.kgCO₂-Eq] je Prozentpunkt ECO-Shoring zu erwarten (Strommix 75; Energieeffizienz 20; Nutzungsdauer und Mengenreduktion 20; Überhangsreduktion 10; Flugtransportreduktion⁵; sonstige). Hierbei werden 25 [kgCO₂-Eq] je kg Bekleidung zugrunde gelegt.⁶ Durch die teilweise Rückverlagerung von Produktionsstätten von Asien zurück nach Europa, soll es gelingen nachhaltige Fertigungsstrukturen nahe am Verbraucher aufzubauen. Geht man davon aus, dass mittelfristig 10-15% der Bekleidungsproduktion rückverlagert werden, dann können Einsparpotenziale zwischen 1,2 und 1,8 [Mio.tCO₂-Eq] für den deutschen Markt erschlossen werden.

Weitere treibende Kräfte für eine Veränderung sind die zunehmend geforderte Transparenz in der Wertschöpfungskette, sowie die gesellschaftliche und politische Forderung nach ökologisch nachhaltigen Lösungen. Dieser Veränderungsdruck auf die Wertschöpfungsnetzwerke wird durch den Trend zu mehr Individualität und kundenorientierter Produktion noch verstärkt. Daraus resultieren rückt das Thema Nachhaltigkeit auch in den Führungsebenen der Unternehmen auf der Tagesordnung immer weiter nach oben.⁷

Ziel muss die Umkehr des Trends eines ungebremsten Wachstums in der Bekleidungsfertigung sein. Visualisierungstechnologien, On-Demand-Services und ein kundenintegrierter, individueller Ansatz

³ Vgl. (McKinsey&Company/GFA 2020), S.3f

⁴ Vgl. (McKinsey&Company/GFA 2020), S.18

⁵ Vgl. (Stipic/Seibold 2020)

⁶ Vgl. (UBA 2021)

⁷ Vgl. (McKinsey&Company/GFA 2020), S.2

sowie eine Reduktion des „Bekleidungsmülls“⁸ beim Thema Nearshoring gehen nahtlos ineinander über.

Ziel von ECO-Shoring ist eine effektive ökologische Umweltentlastung durch Nearshoring, MtM und On-Demand-Produktion in regionalen Entwicklungs- und Produktions-Netzwerken. Zu diesem Zweck wurden die folgenden nachhaltigkeitsorientierten Kernziele untersucht und umgesetzt, wobei die effektive Verringerung des Ressourcenverbrauchs im Vordergrund stand:

1. Ökobilanzierung und Quantifizierung der Umweltentlastung im Gesamtprozess des Nearshorings und der On-Demand-Produktion durch Reduktion von Bekleidungsmüll und Produktionsressourcen gestützt durch neue Technologien
2. Entwicklung neuer, digital integrierter durchgängiger Produktentstehungsprozesse für Kleinserienfertigung und MtM im On-Demand-Business vom Endkunden bis zur Produktion
3. Demonstratorhafte Integration der digitalen Prozess-Komponenten in eine skalierbare Technologie-Plattform.

Der Arbeitsplan zur Erreichung der Kernziele wurde wie folgt strukturiert und umgesetzt:

Im ersten Schritt wurde eine **Anforderungsanalyse und die Konzeption des Gesamtsystems (AP1)** durchgeführt. Diese lieferte den Status und die Voraussetzungen für den Ausbau und die Integration von Digitalisierungs-, Virtualisierungs- und Produktionstechnologien in Plattformkonzepte. Die Konzeptionsphase befasste sich mit On-Demand Bausteinen für regionale Entwicklungs- und Produktionsnetzwerke mit Fokus auf die Repräsentation des Kunden, die Prozesse für MtM-Produkte und die Kleinserienfertigung. Eine Detailspezifikation legte geeignete Produkte, die für eine MtM-Umsetzung benötigten Virtualisierungs- und Entwicklungsbausteine sowie die Plattformparameter unter Berücksichtigung der geplanten Implementierung als Demonstrator fest.

Die Umsetzung erfolgte im Wesentlichen in vier zum Teil parallel verlaufenden Arbeitspaketen:

1. **Ökobilanzierung und Quantifizierung der Umweltentlastung durch transparente und polarisierende Darstellung von Strategien und Hebeln innerhalb der Produktionsprozesse von ECO-Shoring und Fast-Fashion anhand von parametrisierten MFCA-Modellen der einzelnen Prozessstufen und deren selektiver Verkettung zu Gesamtmodellen (AP2).**

Die entwickelten MFCA-Modelle decken die typischen Produktionsstationen von Bekleidung, wie Spinnerei, Weberei bzw. Strickerei, Veredlung, Konfektion und Transport ab. Zusätzlich wurden diese Modelle um Recycling-Gesichtspunkte erweitert. Somit ist es möglich auch die Verwendung von Sekundärfasern zu berücksichtigen. Mit dem Recycling einhergehend wurden die Themen der Qualität der Ausgangsmaterialien und der Allokation der CO₂-Äquivalente zum Produkt bzw. dem Abgang der Produktion betrachtet und bewertet.

Für eine verständliche und übersichtliche Darstellung in dem breiten Parameterraum der Modelle, wurden Szenarien definiert, die den Produktionsmethoden von Fast-Fashion bzw. den angestrebten ECO-Shoring-Bedingungen entsprechen. Hierbei wurden einzelne Parameter mit den größten Hebeln zur Umweltentlastung, wie z.B. Strommix, Überproduktion, Tragezyklen und Materialqualität, gezielt variiert und damit ein aussagekräftiger Vergleich der Zustände vorgelegt. Der während der Projektlaufzeit aufgekommene Trend zur Ultra-Fast-Fashion wurde ebenfalls aufgegriffen und bei den o.g. Vergleichen berücksichtigt.

Zur Quantifizierung der im Projekt betrachteten MtM-Prozesse wurden die relevanten Parameter des Materials erfasst, um durch die entwickelten MFCA-Modelle ausgewertet werden zu können. Der entsprechende Output in Form des CO₂-Fußabdrucks des Produkts wurde anschließend dem Kunden in einer prototypischen Anwendung visualisiert.

⁸ Vgl. (Stern 2017)

2. Realisierung eines effizienten CAD/3D-MtM-Frameworks unter Einbindung von Pattern-Making, Variantenkonfiguration und Bekleidungssimulation für einen durchgängigen MtM-Anpassungsprozess in einer serviceorientierten Gesamtarchitektur (AP3).

Kundenindividuelle Bekleidung beinhaltet sowohl die Ausstattung eines Produktes (Farbe, Material, Knöpfe, Zutaten, ...) als auch den kundenindividuellen Schnitt – Made-to-Measure (MtM). Hierfür wurden verfügbare Technologien wie Produkt-Varianten-Management und Visualisierung, kundenindividuelle Schnitthanpassung erweitert für die Anwendung in einer automatischen 3D-Simulation und -Visualisierung als Voraussetzung für eine Verlagerung in das Backend des Web-Shops. Dies erforderte grundlegende Anpassungen an den verfügbaren Software-Modulen. Diese Aufgaben wurden für das CAD/3D-MtM-Framework nach erfolgter Konzeption umgesetzt und basierend auf Internettechnologien implementiert.

3. Framework-Integration von On-Demand-Bausteinen zur MtM-Produktanpassung und Produktvisualisierung von Bekleidungsstücken ausgehend von kundenindividuellen Avataren und Körpermaßen (AP4).

Interaktive CAD- und 3D-Werkzeuge zur Entwicklung und Simulation von Bekleidung als Standalone-Systeme, z.B. auf lokalen Workstations, sind heute industrieüblicher Standard. Für eine erfolgreiche Umsetzung des ECO-Shoring-Ansatzes in lokalen vernetzten Produktionsnetzwerken bedarf es Server-basierter Lösungen für MtM-Prozesse. Diese sind unter der direkten Einbeziehung des Kunden in den On-Demand-Produktentstehungsprozess in MTM-Geschäftsmodellen einsetzbar. Als Basis für die kundenindividuelle Produkthanpassung im ECO-Shoring-Framework dienen Kundendaten. Speziell werden Körpermaßdaten und Avatare für die automatisierte Schnitthanpassung und Produktsimulation bzw. -Visualisierung benötigt. Diese wurden durch einen externen Service produktspezifisch anhand von wenigen Kundenparametern generiert, erfasst und aufbereitet, sowie zum Schutz der persönlichen Daten des Kunden verschlüsselt gespeichert und kommuniziert. Web-Services für Steuerung der On-Demand-Produktentstehung von der Eingabe des Kunden im Varianten-Konfigurator, über die Schnitthanpassung anhand von Körperdaten des Kunden und die anschließende Produktvisualisierung, bis hin zur Produktionsdatenerzeugung wurden konzipiert und umgesetzt. Die Simulationsergebnisse wurden direkt im Web in einer demonstratorhaften eShop-Komponente verfügbar gemacht und tragen somit zur Entwicklung eines vollständig digitalen Vertriebsprozesses zwischen Hersteller, Händler und Endkunden im Webshop bei.

4. Aufbau eines Demonstrators für das im Projekt erarbeiteten ECO-Shoring MtM-Framework an den DITF zur Vernetzung und Motivation von Experten und zur Förderung von Kooperationen mit dem Ziel einer nachhaltigen Bekleidungsproduktion in regionalen Netzwerken. Integration des Frameworks in bereits bestehende Produktions- und Digitalisierungsstrukturen der DITF (AP5).

Im ersten Schritt wurde eine Systemumgebung und die hierfür notwendigen Voraussetzungen für eine Demonstratorumgebung im Multifunktionslabor der DITF aufgebaut. Dies bedurfte der Konfiguration der vorhandenen IIOT-Umgebung auf Software- und Schnittstellenebene. Dies ermöglicht u.a. die Einbindung der vorhandenen Digitalisierungshardware und Rechnerinfrastruktur.

Ein Demonstrator auf Basis der im Projekt entwickelten MFCA-Modelle stellt durch interaktive Parameteranpassung unterschiedliche Ökobilanzierungsszenarien im Spannungsfeld zwischen Fast-Fashion und ECO-Shoring dar. Die hierfür notwendigen MFCA-Grundlagen für die textile Kette sind durch Vorträge, Workshops und Selbstlernkurse vermittelbar.

Die Implementierung des im Projekt entwickelten On-Demand-MtM-Frameworks in die Systemumgebung der DITF demonstriert die Möglichkeiten der kundenindividuellen Produkthanpassung. Hierfür werden virtuelle Services zur Körpermaß- und Avatargenerierung verwendet, Produktschnitte angepasst, das Produkt am Kunden-Avatar visualisiert und Produktionsdaten erzeugt.

Ausgewählte Produktionsstufen einer Kleinserienproduktion nach ECO-Shoring-Ansatz können anhand der im MtM-Framework entstandenen Produktdaten vorgeführt werden.

Unter Ausnutzung der Möglichkeiten des Multifunktionslabors der DITF werden zusätzlich Einblicke in Digitalisierungs- und Visualisierungsmöglichkeiten von Textilien und Bekleidung gegeben.

Während der gesamten Projektlaufzeit wurde ein Austausch mit Industrieunternehmen zu einzelnen spezifischen Themen durchgeführt (**AP6**) und die Projektergebnisse auf externen und internen Veranstaltungen in Form von Vorträgen und Workshops präsentiert und transferiert (**AP7**).

3 Effektive ökologische Umweltentlastung durch Nearshoring, Made-to-Measure und On-Demand Produktion in regionalen Netzwerken

3.1 Überblick

Die Maßnahmen zur Umsetzung eines effektiven Nearshorings, unter Berücksichtigung von ökologischen Aspekten für kundenindividuelle Produkte in Kleinserienfertigung, führen zu einer hohen Komplexität im Projekt. Dies betrifft sowohl die technologischen, als auch die organisatorischen Aspekte des Vorhabens. Eine klare kompetenzbasierte Aufgabenteilung und eine enge Abstimmung bei den zu leistenden Forschungs- und Entwicklungsaufgaben sind daher unerlässlich zur Erreichung der gesteckten Ziele.

Die DITF beschäftigten sich mit der Ökobilanzierung und Quantifizierung der Umweltentlastung durch Darstellung von Strategien und Hebeln innerhalb der Produktionsprozesse anhand von parametrisierten MFCA-Modellen der einzelnen Prozessstufen und im Gesamtmodell.

Assyst verantwortete die Realisierung eines effizienten und zugänglichen MtM-Frameworks für einen durchgängigen Anpassungsprozess von Bekleidung anhand von Kundendaten und die hierfür notwendige Implementierung von 3D On-Demand-Services für Produktvariantenmanagement, Produktpassung, Produktvisualisierung und Produktionsdatenerzeugung. Die für die o.g. Umsetzung erforderlichen Services zur Erzeugung und Kommunikation von Körpermaßen und Avataren wurden zusammen mit der im Unterauftrag agierenden Humanetics Digital Europe GmbH (ehem. Avalution) erarbeitet und implementiert.

Darstellung der einzelnen Arbeitsschritte

In einer gemeinschaftlichen Konzeptionsphase wurden durch die beiden Konsortialpartner Assyst und DITF die Randbedingungen und Anforderungen für Modellierung, Entwicklung und Implementierung im Projekt spezifiziert. Hierfür wurden umfangreich die zentralen serviceorientierten On-Demand-Technologien für die Made-to-Measure- und Kleinserienfertigung betrachtet. Ein zur Projektlaufzeit gebildetes Expertengremium aus Industrieunternehmen und Verbänden hat die Diskussionen im Projekt durch Erfahrungswissen zu aktuellen Themen, Trends und Problemen der Bekleidungsbranche begleitet und den Fokus der adressierten Themen und Schwerpunkte geschärft.

Im Rahmen des Projekts wurde von den **DITF** detaillierte parametrisierte MFCA-Modelle für produktionsrelevante Prozesse entwickelt und implementiert. Diese decken z.B. die Prozesse Spinnen, Stricken, Weben, Veredlung und Konfektion ab. Aus diesen Teilmodellen wurden Gesamtmodelle für verschiedene Produktionsszenarien unter Gesichtspunkten des ECO-Shoring (MtM- und regionale On-Demand-Fertigung unter ökologischen Gesichtspunkten) und der Fast-Fashion abgeleitet und anhand von dedizierten Prozessparametern mit hoher Hebelwirkung hinsichtlich Ökologie sowie hinsichtlich der Auswirkungen von Überproduktion und Produktqualität (Tragezyklen) gegenübergestellt und miteinander verglichen. Außerdem wurde das Recycling mit Schwerpunkt auf das mechanische Recycling von Fasern von der Reisserei über die Spinnerei betrachtet und die Potentiale recycelter Fasern im Gesamtmodell analysiert. Ein wesentlicher Aspekt der Ökobilanzierung ist die Festlegung

einer funktionellen Einheit für das jeweilige Modell. Im Projekt wurden die Betrachtungen daher sowohl für die Herstellung von 1kg Bekleidung, als auch für 100 Tragezyklen durchgeführt. Ziel hierbei war es plausible CO₂-Emissionen unter der Berücksichtigung der Use-Phase zuzuordnen und transparent darzustellen.

Im Rahmen des Projekts wurde von **Assyst** der Ausbau der Basistechnologien für die 3D-Bekleidungssimulation und Visualisierung für 3D On-Demand-Anwendungen entworfen und für eine Auswahl von MtM-Beispielprodukten modular umgesetzt. Hierfür wurde ein Web-basiertes MtM-Framework konzipiert, das eine voll automatisierte Schnittpassung, Simulation und Visualisierung von individualisierten Produkten anhand von Kunden-Körpermaßen und Avataren erlaubt. Zusätzlich wurde ein Variantenmanagement System implementiert. Dies resultiert in einer hohen Produktvielfalt durch modulare Konfiguration weniger Basisprodukte. Für die MtM-Anpassung wurde ein Service und Web-Schnittstelle zur Erzeugung von Körpermaß- und verschlüsselten Avatar-Daten geschaffen und ein Front-end für die Kundeninteraktion implementiert. Die entwickelten Workflowbausteine und Services wurden im MtM-Framework demonstratorhaft umgesetzt und können zur kundenindividuellen Produktpassung und Produktionsdatenerzeugung genutzt werden.

Den Abschluss bildete der gemeinschaftliche Demonstrator-Aufbau in den Räumlichkeiten der DITF. Der Demonstrator für die im Projekt erarbeiteten Ökobilanzierungsmodelle und das MtM-Framework dient der Vernetzung und Motivation von Experten und soll zur Förderung von Kooperationen mit dem Ziel einer nachhaltigen Bekleidungsproduktion in regionalen Netzwerken beitragen. Hierfür wurde der Demonstrator in die bestehende Transferumgebung aus Produktions- und Digitalisierungsstrukturen der DITF eingebunden.

Im Folgenden werden die wichtigsten, erzielten Ergebnisse der verschiedenen Arbeitspakete dargestellt und besprochen.

3.2 Anforderungsanalyse und Konzeption des Gesamtsystems (AP1)

Im Gegensatz zur Automobilindustrie ist die Modeindustrie stark fragmentiert. Eine voll vernetzte, integrierte Kette bedeutet für ein On-Demand Netzwerk, dass Technologien existieren, die den digitalen Zwilling des individualisierten Bekleidungsstückes ermöglichen und so die am Bedarf orientierte Produktion erlaubt, Entwicklungszeiten eingespart, der Materialverbrauch durch digitale Abmusterungsprozesse reduziert, die Warenströme und -transporte erheblich reduziert, nicht verkaufbare oder falsch produzierte Ware möglichst eliminiert und damit die Umweltbelastungen signifikant reduziert werden.

Abbildung 1 stellt die aktuelle Situation der „Fast-Fashion“ einer nachhaltigen, bedarfsorientierten ECO-Shoring-Struktur der Bekleidungsindustrie gegenüber.

Die Herausforderung besteht damit darin, On-Demand Technologien mit Schwerpunkt KonsumentIn zu entwickeln und zu integrieren, die es ermöglichen, regional, nah am Kunden individualisierte Bekleidung abzustimmen und ressourcenschonend in hoher Qualität zu produzieren. Hierbei soll neben der individualisierten Produktion kleiner Losgrößen, die vom Projektbegleitenden Expertengremium als besonders relevant identifiziert wurde, auch ein Augenmerk auf die Made-to-MtM-Produktion gelegt werden – ein Modell, das eine direkte Interaktion mit dem Kunden voraussetzt. Der MtM-Ansatz wird vom Expertengremium zwar in Bezug auf die große Masse der hergestellten Bekleidung und mit Blick auf den vorherrschenden Trend zu mehr Casual-Mode eher als Randthema gesehen, stellt jedoch im Hinblick auf die ökonomisch sinnvollen Segmente für das Reshoring von Produktion aus Fernost ein sehr interessantes Produktsegment dar. Durch finanzkräftige Early Adopter sollen hierbei die benötigten regionalen Wertschöpfungsnetzwerke entwickelt und aufgebaut werden und subsequent auf eine breitere Produktpalette im Segment der On-Demand Fertigung kleiner Aufträge ohne Abschriften übertragen werden. Dieses Strategische vorgehen dient der nachhaltigen Erschließung von ökologischen Einsparpotentialen.

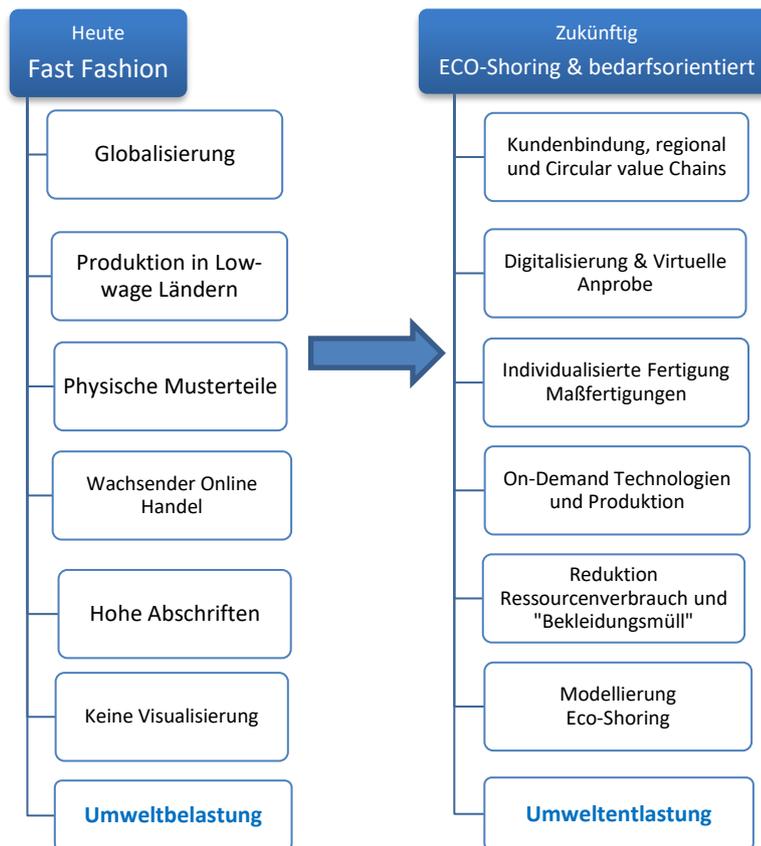


Abbildung 1: On-Demand Technologien und Nearshoring als Schlüsseltechnologien zur Umweltentlastung in der Textil- und Bekleidungsindustrie

Die Wirksamkeit des vorgesehenen Lösungsweges und die Visualisierung der eingesparten CO₂-Emissionen durch ECO-Shoring im Vergleich mit einer klassischen Fast-Fashion Produktion wird mit Hilfe der MFCA-Methode unter Berücksichtigung der zuvor identifizierten wesentlichen Hebel und Parameter modelliert. Dabei werden die ökologischen Vorteile deutlich dargestellt, was den Modellcharakter von ECO-Shoring unterstreicht.

Voraussetzung für die Ökobilanzierung mittels MFCA ist ein Stoff- und Energieflussmodell, das die Produktionsprozesse mit den Stoff- und Energieströmen sowie mit den Abfällen und Verlusten transparent darstellt. Damit soll auch eine Betrachtung von Recyclingpotenzialen und Allokationsstrategien im Produktionsprozess umgesetzt werden. Zur Modellierung wird das an den DITF vorhandene breite Textil-Wissen um die industriellen Produktionsprozesse und Maschinen genutzt. Damit gelingt es die Verwendung von wenig aussagefähigen und vom betrachteten Produkt entkoppelten Katalogkennwerten für Material (CO, PES) und Prozesse (Spinnen, Weben, Stricken usw.) zu vermeiden. Stattdessen werden Material- und Produktdaten direkt aus der Produktentwicklung und Produktion bezogen. Die so erzeugten Ökobilanzierungsmodelle weisen einen hohen Detailgrad und Aussagefähigkeit in Bezug auf die betrachteten Prozesse auf.

Im Detail werden für die einzelnen Produktionsstufen Teilmodelle entwickelt und je nach Produkt und Szenario zu Gesamtmodellen verknüpft, was die Betrachtung von Material- und Energieströmen über den Gesamtprozess ermöglicht. Die CO₂-Sicht der Modelle zeigt deutlich die größten Problemfelder und Potentiale der einzelnen betrachteten Konfigurationen. Die Daten zum Produkt (Materialart und -menge, Effizienz usw.) können dabei dem digital durchgängigen Produktentwicklungsprozess entnommen werden.

Ein wesentlicher Unterschied zwischen Produkten der Fast-Fashion und einer möglichen auf Nachhaltigkeit ausgelegten ECO-Shoring-Produktion ist die Qualität der Produkte. Diese findet in den dargelegten Modellen in Form der Betrachtung der möglichen Tragezyklen Berücksichtigung. Daher

werden die entwickelten MFCA-Modelle für zwei unterschiedliche funktionelle Einheiten gerechnet: eine Massenansicht auf 1kg hergestellte Produkte und eine Sicht auf 100 Tragezyklen.

Als Beispiel für On-Demand-fähige Produktionstechnologien für Kleinserien und individualisierte Produkte im regionalen Kontext, wie dem digitalen Inkjet-Druck und Einzellagenzuschnitt, wird ein MFCA-Modell für Bekleidungsfertigung mittels einer Micro Factory⁹ umgesetzt. Am Beispiel einer flexiblen und reaktionsschnellen Fertigung von individualisierten sportiven Produkten wird die Fähigkeit von durchgängig digitalisierten Produktionsstrukturen gezeigt, die wichtigsten Hebel für eine effektive ökologische Umweltentlastung, wie die hohe Prozesseffizienz, Vermeidung von Überproduktion und das Erzielen hoher Produktqualität, zu bedienen.

Der **Ökobilanzierungsdemonstrator** (siehe Kapitel 3.6.2) ermöglicht es dem Publikum durch Anpassung von Parametern, speziell der Hebel mit dem größten Öko-Impact, eine Neuberechnung des zuvor hinterlegten MFCA-Modells anzustoßen. Als Ergebnis wird dem Besucher der PCF des definierten Szenarios angezeigt. Das Setzen der Parameter über ein übersichtliches Excel-Interface erlaubt das Konfigurieren und den schnellen Vergleich von mehreren Szenarien im Spannungsfeld Fast-Fashion und ECO-Shoring.

Eine On-Demand Vermarktung und Produktion von individualisierter Bekleidung erfordert eine vollständige automatisierte Integration aller Funktionskomponenten und damit verbundenen Rollen beim Entstehungsprozess von Bekleidung vom Schnitt bis hin zum Schnittbild, den Verkaufsunterlagen und den Produktionsdatensatz inkl. dem Einbezug von Ökobilanzierung (siehe Abbildung 2):

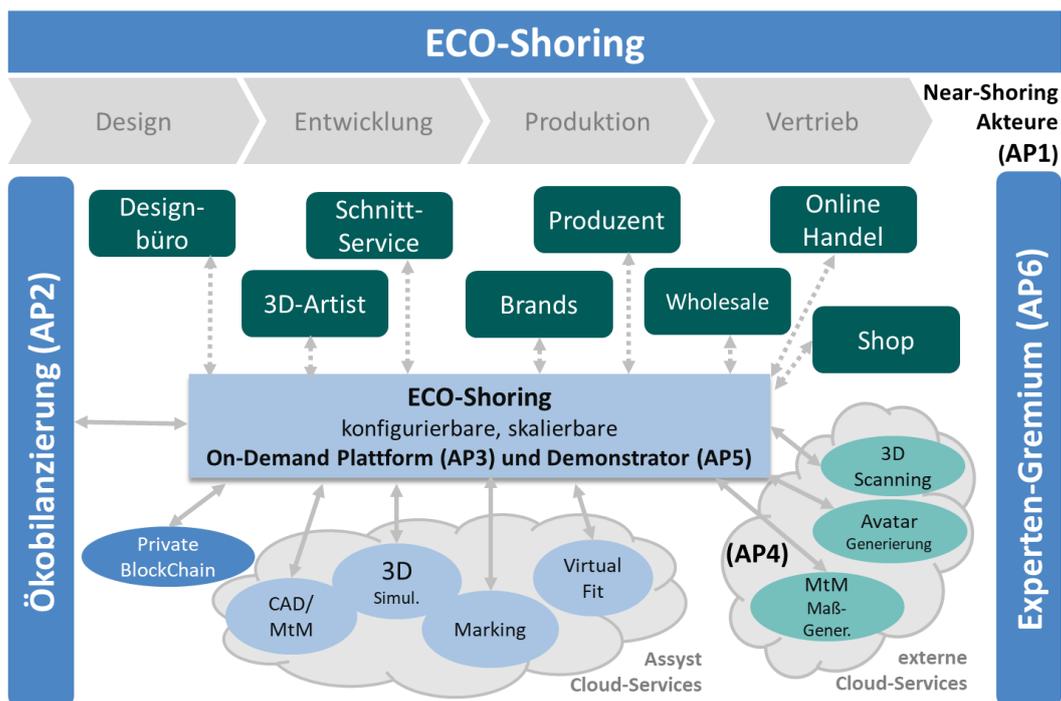


Abbildung 2: Gesamtkonzept ECO-Shoring

Der grundlegende Ablauf der Entwicklung eines 3D Bekleidungsproduktes wurde im Abschlussbericht des Projektes ECommerce¹⁰ beschrieben und ist eine wichtige Voraussetzung zum Verständnis des nachfolgend beschriebenen Konzeptes. Dieser Auszug aus dem Abschlussbericht ECommerce ist daher im Anhang A1 beigefügt.

⁹ Vgl. (Texprocess 2019)

¹⁰ Vgl. (ECommerce 2020)

In diesem Projekt ECO-Shoring wurde eine automatisierte Lösung prototypisch realisiert, welche als Ergebnis fertige 3D Bilder für jede optische Ausprägung und für jede angebotene Konvektionsgröße liefert. Diese können anschließend in das Contentmanagement System eines WEB Shops übernommen werden und stehen somit dann im WEB Shop für Kundensessions statisch zur Verfügung.

Betrachtet man exemplarisch ein Herrenhemd, welches in 10 Konvektionsgrößen Für jede dieser Produktausprägungen muss dann entsprechend ein Datensatz von 10 Bilder (Front, Seite, Rücken, Close-Up, 3D Viewer) vorberechnet werden - also insgesamt in diesem Beispiel 100 Bilder für ein Produkt Hemd.

Zudem umfasst individuelle Konfiguration heute immer ein modulares Angebot verschiedener Varianten eines Bekleidungsproduktes. Dies beinhaltet sowohl die Ausstattung eines Produktes (Farbe, Material, Knöpfe, Zutaten, ...) als auch den kundenindividuellen Schnitt – Made-to-Measure (MtM). Immer, wenn eine Produktvariante Änderungen des Schnitts erfordert, bedeutet dies, dass entsprechend neue Schnittteilgeometrien hinterlegt werden müssen und auch die entsprechende Umsetzung in 3D neu berechnet werden muss. So führt selbst ein moderat ausgestaltetes Angebot an kundenindividuelle Varianten zu einem enorm großen Datensatz.

Somit ist offensichtlich, dass dieser Automatisierungsansatz für individuelle MtM Produkte zwar weiter genutzt werden kann aber ins Backend der Kundensession selbst verlagert werden muss. Hierdurch werden die Produktdaten **nicht mehr vor der Anwendung durch den Kunden erzeugt und statisch im WEB Shop** hinterlegt, **sondern die 2D und 3D Daten werden dynamisch während der Kundensession erzeugt**. Dies beinhaltet auch eine vollständige Neusimulation von Schnittteilen, welche sich aufgrund der Variantenkonfiguration (z.B. verschiedene Kragenausprägung) und auch durch die individuellen Körpermaße des Kunden verändern.

Das hieraus entwickelte Gesamtkonzept des Vorhabens setzt sich aus zwei grundlegenden Komponenten zusammen (siehe Kapitel 3.4 und Kapitel 3.5):

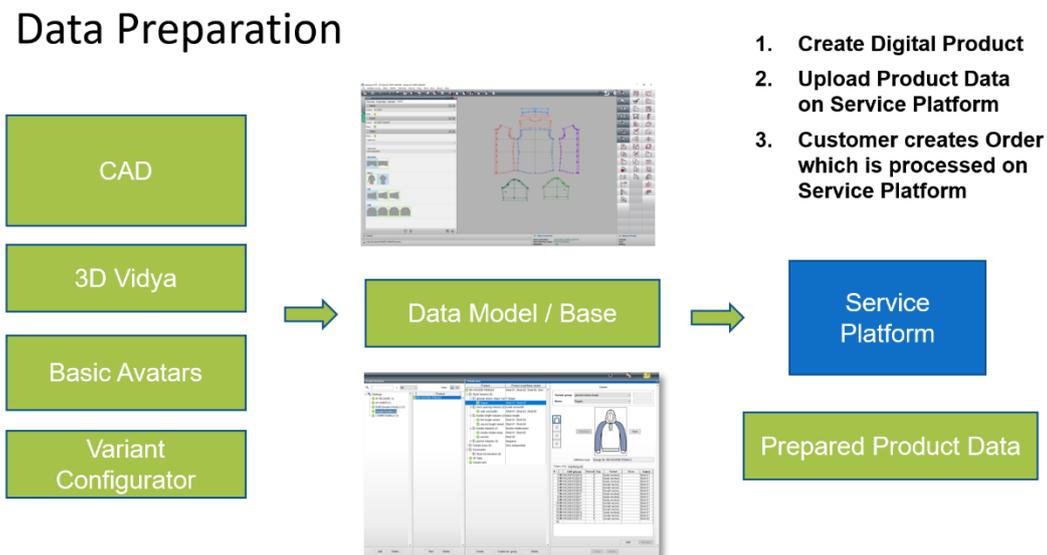


Abbildung 3: Gesamtkonzept ASSYST ECO-Shoring - Datenvorbereitung

Die erste Komponente des Konzepts beinhaltet die Entwicklung eines Bekleidungsproduktes für individualisierte MtM Produktion unter Einbindung des Variantenkonzepts sowie die Vorbereitung des Produktes für einen automatisierten Prozess (Abbildung 3). Dieser Schritt wird unabhängig von der Plattform auf Standard-3D-CAD-Arbeitsplätzen umgesetzt und erfordert daher dieselben Werkzeuge und Lizenzmodule, wie sie auch klassisch für die 3D Bekleidungsentwicklung genutzt werden. Das Ergebnis wird im Backend der Demonstrator Umgebung als vollständiger Datensatz abgelegt.

Die zweite Komponente realisiert den automatisierten Ablauf eines WEB-basierten Angebots und Verkaufs eines individualisierten Bekleidungsproduktes (Abbildung 4). Ein im Shop angemeldeter

Kunde wählt eine Produktvariante aus und fordert deren Visualisierung an. Hierdurch wird im Backend ein vordefinierter Ablauf von Services zur Abarbeitung ausgelöst und das Ergebnis als Datenpaket bereitgestellt.

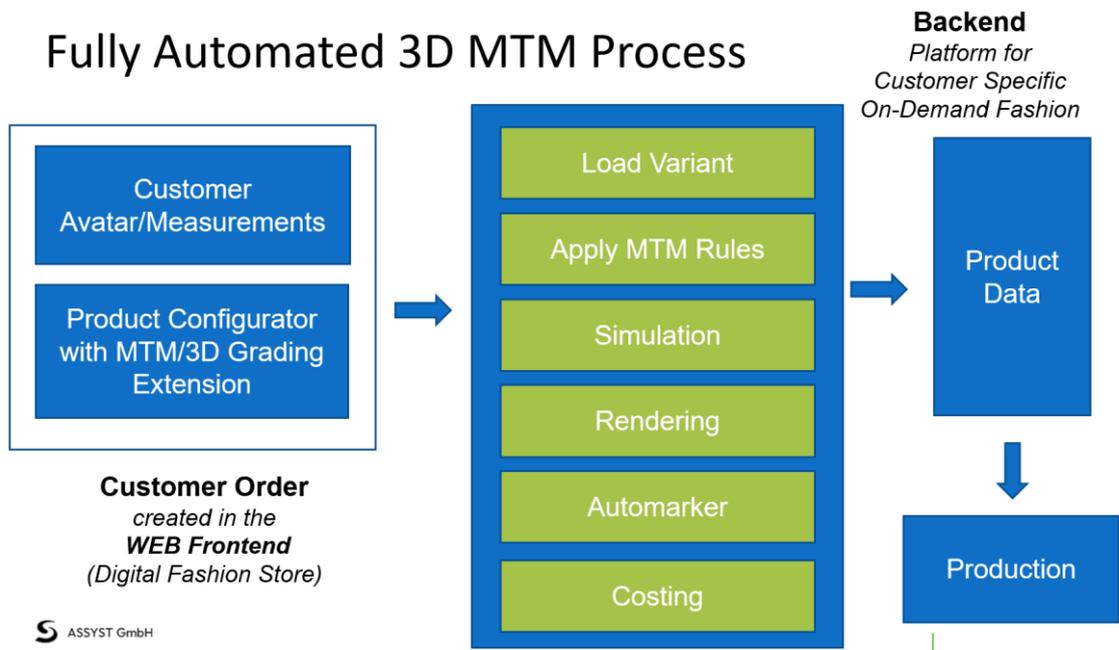


Abbildung 4: Gesamtkonzept ASSYST ECO-Shoring - Auftragsausführung

Ein wesentlicher Bestandteil des Gesamtkonzepts ist die konsequente Einbindung bereits verfügbarer State-of-the-Art 3D Technologie inkl. der Ergebnisse des Projektes ECommerce¹¹. Der Fokus im Projekt lag daher vollständig auf der prototypischen Entwicklung der für den automatischen Ablauf noch fehlenden Komponenten MtM- und Variantenerweiterung des automatisierten 3D Prozesses sowie deren schnittstellenbasierte Integration zu einem WEB-basierten Gesamtablauf im Backend. Damit beinhaltet das Gesamtkonzept auch einen Verzicht auf eine Implementierung von durch Standardtechnologien verfügbaren Prozessen wie WEB-Shop mit Contentmanagement, Abrechnungsverfahren, User und Accountmanagement, Transaktionsverfahren, etc. Eine nachfolgende Produktifizierung des prototypischen Demonstrators erfordert daher insbesondere auch die Implementierung dieser nicht realisierten Komponenten.

Der für jede im Shop angeforderte Produktvariante kalkulierte 3D Datensatz beinhaltet neben dem 3D Viewer auch den kompletten Produktdatensatz, welcher für eine nachfolgende Produktion benötigt wird (individualisierte CAD Daten im Assyst Format und im Standard Austauschdatenformat ASTM). Mit diesem Datensatz kann eine nachfolgend integrierte Produktion entsprechend angesteuert werden.

Der ECO-Shoring Demonstrator beschränkt sich vollständig auf die Darstellung der Automatisierung der Passform – also letztendlich der Geometrie der Schnittteile auf Basis des individuellen Avatars des Kunden und den daraus extrahierten Maßen inkl. der Ausgabe der Produktionsdaten. Daher ist im ECO-Shoring Demonstrator keine Konfiguration optischer Varianten vorgesehen (z.B. verschiedene Farbwege), da hierfür ein zu großer Aufwand für die Anbindung eines Content-Managementsystems erforderlich gewesen wäre.

¹¹ Vgl. (ECommerce 2020)

Ein weiterer wichtiger Aspekt des Gesamtkonzepts besteht darin, dass die einzelnen entwickelten Module auch jeweils unabhängig von deren Einsatz auf einer durchgängigen Plattform zur automatisierten Erstellung virtuell simulierter MtM Produkte mit Variantenkonfiguration einzeln für sich einen Mehrwert darstellen und somit auch in der Produktentwicklung selbst ohne Serviceintegration zum Einsatz kommen können. Damit können die Module auch jeweils einzeln produktifiziert werden und die im Projekt gewonnenen Erfahrungen stellen einen Mehrwert für die Weiterentwicklung der 3D Simulation dar, welche durch die Eliminierung von Prototypen und Verkaufsmuster ebenso einen umweltentlastenden Effekt ermöglicht.

Für den Transfer der Ergebnisse sollen Demonstratoren in der Service- und Digitalisierungsumgebung am Multifunktionslabor der DITF aufgebaut werden (siehe Kapitel 3.6).

Mit dem **ECO-Shoring-Demonstrator** (siehe Kapitel 3.6.1) kann der gesamte automatisierte Prozessablauf nachvollzogen werden. Damit wird eine Shop-Ähnliche Erfahrung in der Produkt-Konfiguration und -Visualisierung angestrebt. Gleichzeitig wird gezeigt, dass sämtliche rechenintensiven Schritte der individuellen Produkt-anpassung, wie die Avatargenerierung, die Produktsimulation und das Rendering der angepassten Produkte in der Cloud erfolgt und nur geringe Systemanforderungen an die Endgeräte des Kunden bzw. am POS gestellt werden. Die erzeugten Produktionsdaten können durch das Verfügbarmachen in der IT-Umgebung des Multifunktionslabors direkt in die Fertigung gegeben und automatisiert zugeschnitten und abschließend vernäht und finalisiert werden.

3.3 Ökobilanzierung der Umweltentlastung mit Schwerpunkt Kreislaufwirtschaft durch Modellierung und Demonstration / ECO-Shoring (AP2)

Im Projekt wurden mögliche Umweltentlastungen mittels Ökobilanzierung, Quantifizierung und Bewertung von Produktionsszenarien von ECO-Shoring/On-Demand-Produktion im Vergleich zu den bestehenden Strukturen der Fast-Fashion dargestellt, um Impulse und Orientierung in Richtung Kreislaufwirtschaft und Rückverlagerung zu geben.

Ökobilanzierungsmodelle für ECO-Shoring Modelle

Der Treibhauseffekt wird durch unterschiedliche Treibhausgase verursacht. Dieser Effekt wird durch die Einheit kg CO_2 Äquivalente [$\text{kgCO}_{2\text{-Eq}}$] beschrieben, und zeigt die mittlere Erwärmungswirkung der Erdatmosphäre über einen bestimmten Zeitraum (in der Regel 100 Jahre) an. Bei der Charakterisierung der einzelnen Treibhausgase wird jedem der Gase ein Wirkungsfaktor zugewiesen. Dabei orientiert man sich an der schädlichen Wirkung von CO_2 und weist ihm daher den Wirkungsfaktor 1 zu. Das CH_4 erhält bei diesem Vorgehen den Wirkungsfaktor 29,7. Dies ist auf den vielfach höheren Schädlichkeitsgrad von CH_4 im Vergleich zu CO_2 zurückzuführen. Dieses Vorgehen wird auf alle für das erstellte Modell relevanten Treibhausgase, klassifiziert nach IPCC2013 (Intergovernmental Panel on Climate Change) Methode, angewendet. Danach werden alle Emissionen addiert, um das gesamte Treibhauspotenzial eines definierten Modells in [$\text{kgCO}_{2\text{-Eq}}$] zu berechnen.

Für die ökologische Betrachtung und die Quantifizierung der Umweltauswirkungen wurden die nach ISO 14040/44:2006 normierte **Life Cycle Assessment (LCA)** Methode, der nach ISO 14067:2018, GHG Protocol und PAS 2050 normierte **Product Carbon Footprint (PCF)**, und das nach ISO 14051 normierte **Material Flow Cost Accounting (MFCA)** verwendet. Abbildung 5 veranschaulicht die Verortung der eingesetzten Methoden bei Nachhaltigkeitsbetrachtungen. Dabei erlaubt die MFCA-Methode die gesonderte Betrachtung von Produktionsabgängen. Damit ist es z.B. möglich, gesonderte Quantifizierungen für die im Projekt relevanten Produktionsüberschüsse und Recyclingabgänge durchzuführen.

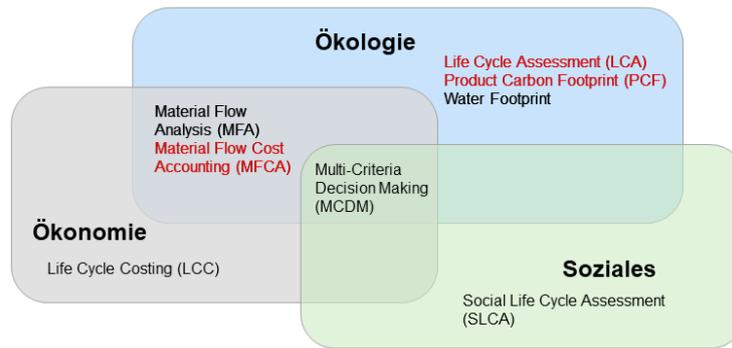


Abbildung 5: Methoden zur Nachhaltigkeitsbewertung

Modellierung

Für die Erstellung der Modelle wurde die Ökobilanzierungssoftware Umberto LCA+ als Werkzeug genutzt. Diese kombiniert die o.g. Methoden und erlaubt eine graphische Modellierung und Visualisierung der Produktionskette. Ein Modell kann dabei für mehrere Auswertungsansichten in Form von Sankey-Diagrammen benutzt werden. Damit können z.B. die Massen-/Energieströme, die Kosten und die CO₂-Äquivalente im System dargestellt werden. Abbildung 6 und Abbildung 7 den grundlegenden Aufbau eines solchen Modells eines generischen Prozesses mit der Sankey-Darstellung der ein- und ausgehenden Ströme. Nachfolgend sollen die grundlegenden Aspekte der Modellierungsmethoden in Kurzform, zum besseren Verständnis der weiter unten aufgeführten Projektmodelle und -ergebnisse, erklärt werden.

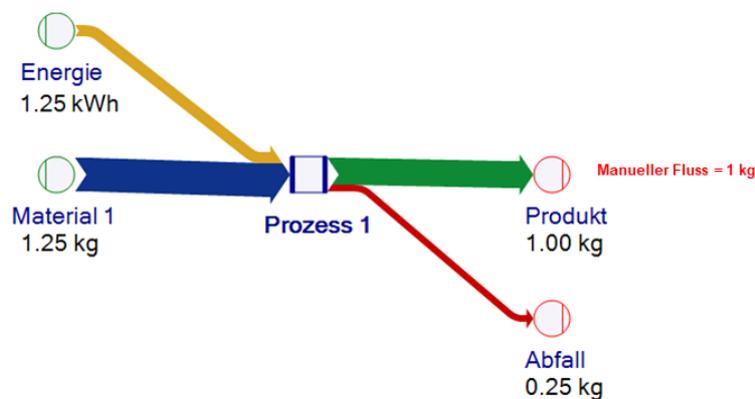


Abbildung 6: MFC-Modellierung - Material- und Energieströme

Abbildung 6 veranschaulicht die für die Herstellung von 1kg Produkt benötigten Material- und Energieströme. Dem Herstellungsprozess werden hier 1,25kg Material zugeführt und unter Aufwendung von 1,25kWh an Energie 1kg Produkt hergestellt. Dabei fallen in der Produktion 0,25kg Abfall an.

Abbildung 7 zeigt denselben Prozess, mit derselben dahinterliegenden Modellierung, aus der CO₂-Sicht. Aus den durch das Material und die Energie Aufgewendeten 3,75 kgCO₂-Eq entfallen in der Produktion 3 kgCO₂-Eq auf das Produkt und 0,75 kgCO₂-Eq auf den Abfall, für dessen Entsorgung weitere 0,25 kgCO₂-Eq aufgewendet werden müssen.

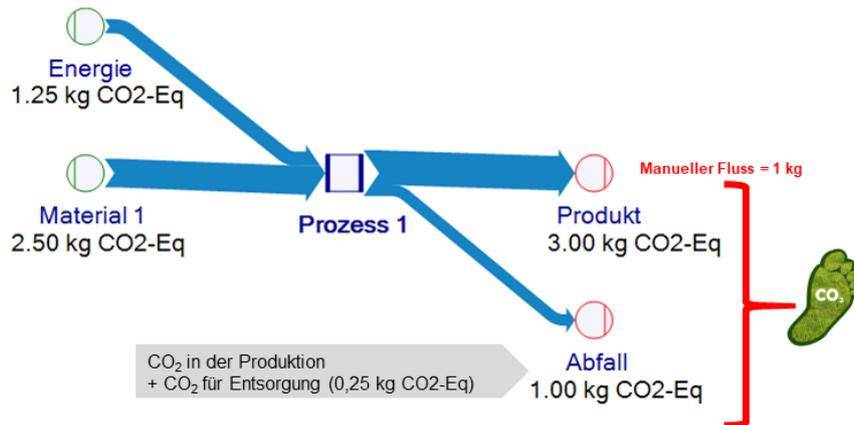


Abbildung 7: MFC A-Modellierung - CO₂-Fußabdruck

Neben den oben dargelegten Prozesssichten, kann das Modell bei entsprechender Parametrisierung auch die dahinterliegenden Kosten darstellen. Aus Platzgründen wird an dieser Stelle jedoch darauf verzichtet.

Der in den Abbildungen dargestellte generische Produktionsprozess wird im Modell hierarchisch aus Teilprozessen aufgebaut und parametrisiert. Hierbei werden zusätzliche für den Real-Prozess relevanten Parameter berücksichtigt.

Abbildung 8 zeigt als Beispiel die Massen-Detailansicht einer Hierarchieebene des Weberei-Prozesses mit den involvierten Teilprozessen, wie der Gatterbestückung, dem Schären, Bäumen, Schlichten, sowie diversen Hilfsprozessen. In einer weiteren Hierarchieebene werden für diese Teilprozesse die Rüsten, die Produktion und die Reinigung als Prozesse modelliert.

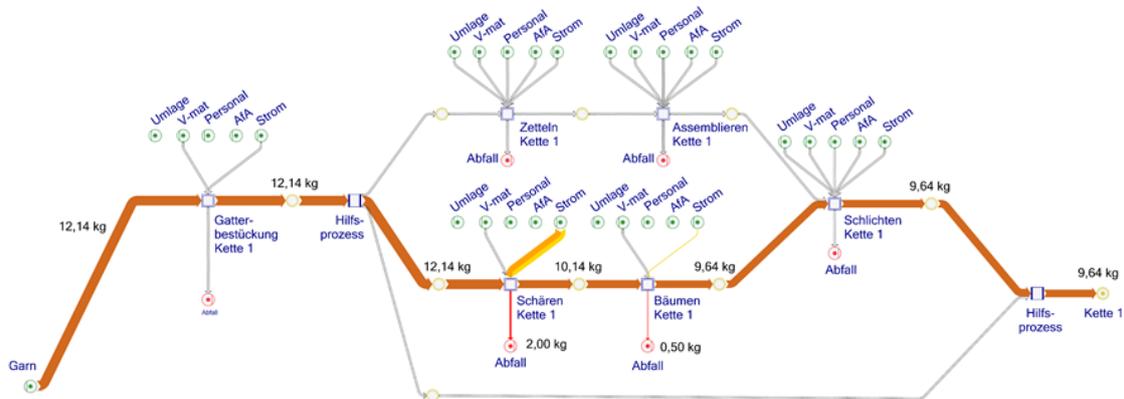


Abbildung 8: MFC A-Modell Weberei - Detailansicht

In der Realität sind für die Produktion eines komplexen Produkts mehrere solcher Produktionsprozesse involviert. Für die Herstellung von Bekleidung, die Gegenstand dieses Forschungsvorhabens ist, wurden MFC A-Modelle für die folgenden Produktionsprozesse angefertigt und parametrisiert: Spinnerei, Weberei, Strickerei, Veredlung, Zuschnitt und Konfektion. Zusätzlich wurden die Umweltbelastungen durch Transport und Verpackung betrachtet. Die im Modell hinterlegten Parameter sind im Detail stark prozessabhängig (z.B. Stricken: Umdrehungszahl bei Rundstricken, Anzahl eingesetzter Fadenführer, Bindungsart,..), können jedoch in einer übergeordneten Hierarchieebene in Parameter, wie z.B. Elektrische Leistung [kW], Produktionsleistung [kg/h], Produktionsdauer pro kg [h], sowie Materialanteilen der eingesetzten Materialien rechnerisch zusammengefasst werden.

Identifikation und Quantifizierung der Hebel für Umweltentlastung

Die eingangs in Kapitel 2 aufgeführte Studie von McKinsey zeigt auf, dass der größte Hebel zur Umweltentlastung im verwendeten Strommix bei der Produktion zu suchen ist. Hier spielt es eine Rolle, wie der für die Produktion verwendete Strom gewonnen wurde und welcher CO₂-Fußabdruck pro kWh Strom bei der Modellierung entsprechend zugrunde gelegt werden muss. Dies ist auch vor dem Hintergrund der Energieeffizienz der verwendeten Produktionsprozesse relevant, die von der Studie an zweiter Stelle bei den Umweltentlastungspotenzialen gesehen wird.

Der weltweit größten LCA Datenbank, ecoinvent in der Version 3.8, können Werte für Ökostrom und vorwiegend mit fossilen Brennstoffen gewonnenen Strom entnommen werden. Diese sind mit 0,1 respektive 1,0 kgCO_{2-Eq}/kWh beziffert.

Die o.g. und weitere Hebel mit den größten Einsparpotenzialen sind in Tabelle 1 zusammengefasst und quantifiziert. Dabei wird für den jeweiligen Hebel das Einsparpotenzial in [Mio.kgCO_{2-Eq}] pro 1% der mittels ECO-Shoring jährlich in Deutschland konsumierten Menge von 940 Mio.kg Bekleidung angegeben.

Tabelle 1: Adressierte Maßnahmen in ECO-Shoring

Maßnahme	Hebel	Einsparpotenzial je 1% [Mio.kgCO _{2-Eq}]
Strommix	0,5 kgCO _{2-Eq} /kWh	75
Höhere Energieeffizienz	10% weniger Energiebedarf elektrisch und thermisch	20
Reduktion der Überhänge	5% der Produktionsmenge	10
Reduktion Flugtransporte	17% Flugtransport der Produktionsmenge	5
Reduktion Verschrottungsquote durch anteilige on Demand Produktion	Von 5% auf 1% Verschrottung der 5% on Demand Anteil der Produktionsmenge	0,5
Reduktion durch längere Nutzung der Bekleidung	Reduktion um 10% durch Verlängerung der Nutzungsdauer (Studie von 3 Jahre auf 4 Jahre) der Produktionsmenge	20
Reuse, Refurbish	Reduktion um 1% der Produktionsmenge	2

Spinnerei

Die Spinnerei ist der zentrale Prozess in der Herstellung von textilen Produkten bei Nachhaltigkeitsbetrachtungen mit dem Fokus auf Kreislaufwirtschaft. Hier erfolgt die Zuführung der recycelten Fasern in die Produktion. Dies ist für die weiter unten aufgeführten Betrachtungen zum Recycling und zur Allokation anfallender CO₂-Äquivalente zwischen Produkt und Abgang wichtig.

Nachfolgend werden daher polarisierende Betrachtungen von Fast-Fashion- und ECO-Shoring-Szenarien am Beispiel der Spinnerei durchgeführt und diskutiert. Für die Auswahl der Basisszenarien wird ein Variantenraum für die Berechnung im Spinnereimodell aufgespannt. Die Parameter hierfür sind **die Art des Rohstoffs**, die **Qualität des Rohstoffs**, die **Effizienz der Produktionsprozesse** und der für die Produktion **verwendete Strommix**. Bei gleichem zu produzierenden Ausgangsgarn (Nm 80) kann hierbei bei der Art des Rohstoffs entweder mit Standard- oder Bio-Baumwolle gearbeitet werden. Die Qualität des Rohmaterials und der Effizienz der Produktionsprozesse kann entweder „gut“ oder „schlecht“ sein. Bei „schlechter“ Qualität (z.B. höherer Anteil kurzer Fasern) wird im Modell mit einem

Nutzeffekt und einer Produktionsgeschwindigkeit von 80% des „guten“ Materials gerechnet. Außerdem fallen bei dem „schlechten“ Material 20% mehr Abfall im Prozess an. Dies sind realistische Erfahrungswerte für Spinnprozesse. Beim Strommix werden die oben angeführten Datenbank-Werte von 0,1 bzw. 1,0 [kgCO_{2-Eq}/kWh] für einen „guten“ grünen Strommix respektive einem „schlechten“ Strommix, z.B. aus Kohleverstromung, herangezogen.

Aus diesen Parametern wurden 8 Szenarien gerechnet. Nachfolgend werden ausführlich die Szenarien 8 und 5 als Repräsentanten für eine typische Fast-Fashion- und eine ECO-Shoring-Produktion betrachtet. Tabelle 2 zeigt den oben beschriebenen Parameterraum und die Parameter der beiden gewählten Szenarien (8 und 5).

Tabelle 2: Modellparameter der Szenarien 8 und 5

		8	5
Ringgarn Feinheit	Nm 80 (12,5 tex)	Nm 80	Nm 80
Baumwolle (Quelle ecoinvent 3.8) Rohstoff 1	Standard: 4,53 kgCO ₂ eq/kg Bio: 0,6 kgCO ₂ eq/kg	Bio	Bio
Qualität Rohmaterial virgin	gute Qualität wie definiert schlechte Qualität Nutzeffekt*0,8 Geschwindigkeit*0,8 Abfall je Prozess*1,2	schl./v5	gut/v3
Strommix	Kohlestrom: 1,0 kgCO ₂ eq/kWh hoher regenerativer Anteil: 0,1 kgCO ₂ eq/kWh	1,0	0,1

Für einen fairen Vergleich wird für beide Szenarien, Fast-Fashion und ECO-Shoring, das gleiche Ausgangsmaterial (Bio-Baumwolle) verwendet. Der CO₂-Fußabdruck der Bio-Baumwolle wurde hierfür der weltweit größten LCA Datenbank, ecoinvent in der Version 3.8, entnommen. Die Polarisierung erfolgt stattdessen rein über den dominanten Hebel des verwendeten Strommixes. Dabei gehen wir davon aus, dass bei einer typischen Fast-Fashion-Fertigung in Fernost hauptsächlich mit Strom aus der Verstromung von fossilen Brennstoffen und mit wenig effizienten Prozessen gearbeitet wird. Konträr dazu wird für eine On-Demand ECO-Shoring-Produktion in regionalen Netzwerken die Verfügbarkeit und Verwendung von Ökostrom und der Einsatz von modernen Maschinen und effizienten Prozessen angenommen.

Abbildung 9 und Abbildung 10 (höher aufgelöste Vergrößerungen der Abbildungen im Anhang unter Abb. 45 bzw. Abb. 46) zeigen die beiden zu den oben definierten Szenarien gehörenden MFCA-Spinnerei-Modelle für die Herstellung von je 10t Garn. Einmal in der Massen- und einmal in der CO₂-Sicht.

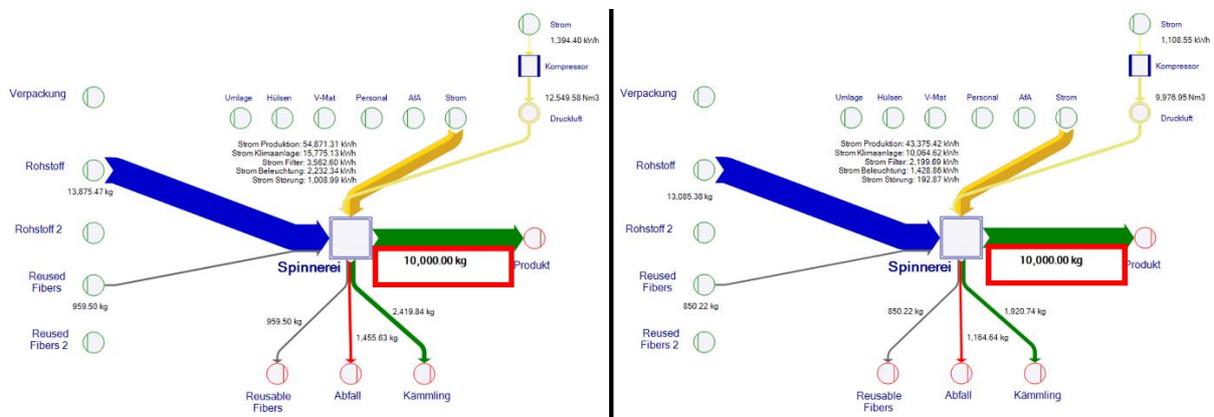


Abbildung 9: MFCA-Modell Spinnerei - Fast-Fashion (Sz. 8, li) vs. ECO-Shoring (Sz. 5, re) – Massen-Sicht

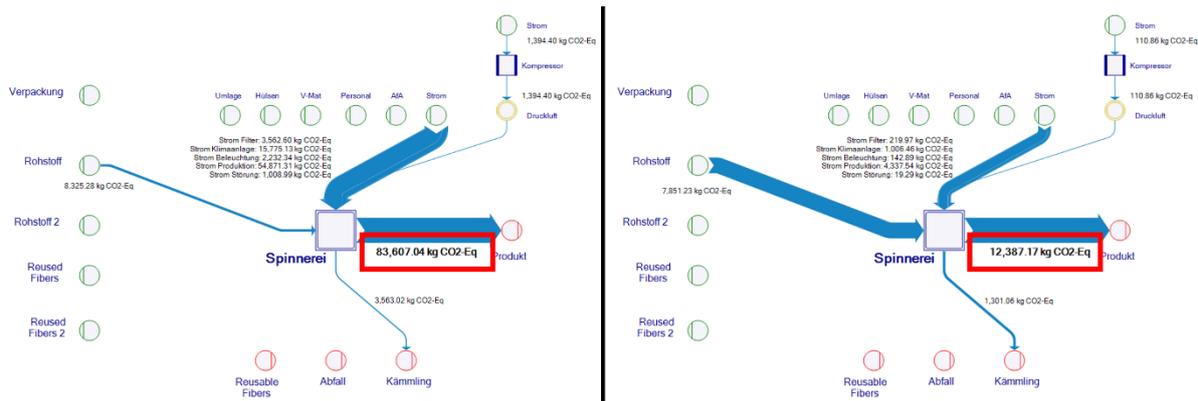


Abbildung 10: MFC-Modell Spinnerei - Fast-Fashion (Sz. 8, li) vs. ECO-Shoring (Sz. 5, re) - CO₂-Sicht

Man sieht, dass für die Herstellung von 10 t gleichartigem Garn im gewählten Fast-Fashion-Szenario durch den schlechteren Nutzeffekt insgesamt 800kg mehr Fasern dem Spinnprozess zugeführt werden müssen. Einhergehend mit dem Einsatz von effizienten Prozessen und eines ökologischen Strommixes im ECO-Shoring-Szenario ergibt sich ein CO₂-Fußabdruck von ca. 12,4 [tCO₂-Eq] für die Herstellung von 10 t Garn. Im Vergleich dazu fallen beim Fast-Fashion-Szenario 6,7x mehr CO₂-Äquivalente für das gleiche Produkt an, nämlich ca. 83,6 [tCO₂-Eq].

Die Polarisierung im Modell anhand ausgewiesener Hebel und Parameter ist analog auf die folgenden Prozessstufen Weberei/Strickerei, Veredlung, Zuschnitt und Konfektion übertragbar. Mit den entwickelten Modellen ist es möglich, für die Herstellung spezifischer Produkte, entsprechend der Rahmenbedingungen, die Nachhaltigkeit hinsichtlich des Carbon Footprint zu bewerten.

Realisierung von Kreislaufwirtschaft durch Recycling von Baumwolle

Nachfolgend wird das Spinnerei-Modell um die Integration von Recycling erweitert, und die Potenziale des mechanischen Recyclings von Baumwollfasern hinsichtlich Kreislauffähigkeit aufgezeigt und erörtert.

Für das mechanische Recycling von Baumwollprodukten müssen diese in einer Reisserei für die Gewinnung von Baumwollfasern verarbeitet werden. Der Aufwand und die damit einhergehenden Energieaufwendungen und die Menge an Reisserei-Abgängen unterscheiden sich je nach Art des Ausgangsmaterials. So lassen sich gestrickte Stoffe einfacher verarbeiten als z.B. Gewebe. Entscheidend für den nachfolgenden Spinnprozess ist die Länge der gewonnenen Fasern. Längere Fasern lassen sich einfacher verspinnen und ergeben höherwertigere Garne, die einem erneuten Recycling zugeführt werden können. Generell werden die Fasern jedoch mit jedem mechanischen Recycling kürzer, was die Anzahl der möglichen Recycling-Zyklen limitiert.

Abbildung 11 zeigt das MFC-Modell einer Reisserei. Auffällig ist der im Vergleich zum Produkt hohe Masseanteil des Abfalls. Für die Herstellung von 1t verspinnbarer Fasern einer bestimmten Qualität muss im gezeigten Fall ca. 4x so viel Ausgangsmaterial zugeführt werden, wenn die Kurzfasern als Abgang ausgeschieden werden.

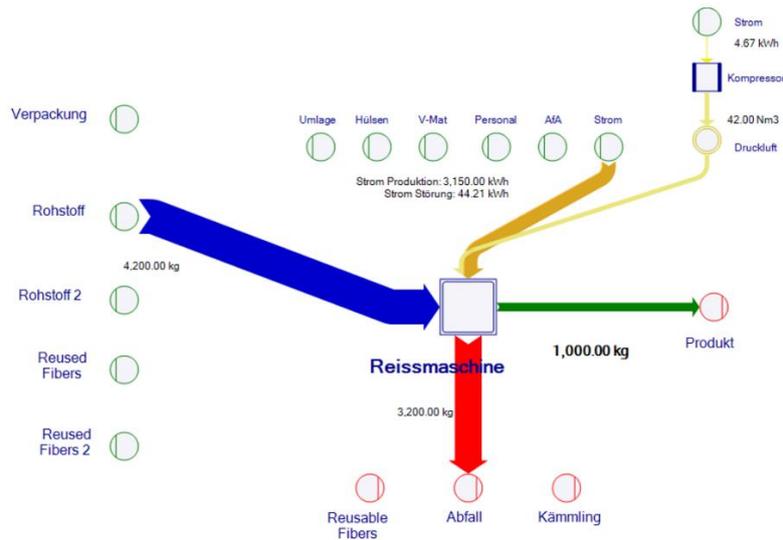


Abbildung 11: MFCA-Modell Reisserei - Massen-Sicht

Die CO₂-Sicht des selben Reisserei-Modells in Abbildung 12 zeigt die massenanteilige Allokation (im Verhältnis 1:1) der im Reisserei-Prozess anfallenden CO₂-Äquivalente auf Produkt und Abfall nach der MFCA-Methode (links) bzw. die Zuordnung der CO₂-Äquivalente ganzheitlich zum Produkt in der klassischen Ansicht (rechts).

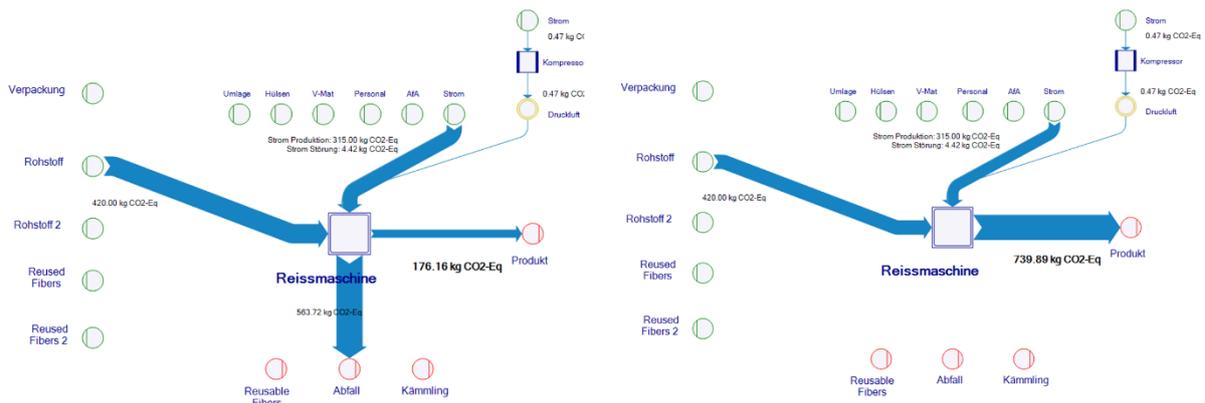


Abbildung 12: CO₂-Allokation - MFCA-Sicht vs. Classic-Sicht

Aufgrund des hohen Anteils an Abfall beim Recycling ist es essentiell wichtig, bei einer kreislauffähigen Produktion mit Recycling-Integration einen Verwertungsweg für den Abfall einzuplanen. Dies erlaubt es, den Reisserei-Abfall als Produkt zu betrachten und diesem in der Allokation CO₂-Anteile zuordnen zu können. Im Beispiel aus Abbildung 12 ist der CO₂-Fußabdruck des Produktes Recyclingfasern für die Spinnerei bei **fairer Allokation nach Masseanteilen** ca. 4x kleiner als bei der vollständigen Allokation zum Produkt.

Abbildung 13 zeigt den CO₂-Fußabdruck von Reisserei-Produkten (verspinnbare Fasern) nach **Classic-Allokation** bei unterschiedlichen Abfallanteilen (10-75%) und unter Verwendung unterschiedlicher Strommixe (von öko: 0,1 kgCO₂-Eq bis fossil: 1,0 kgCO₂-Eq). Man sieht, dass bei hohen Abfallanteilen, der CO₂-Fußabdruck bei Verwendung des fossilen Strommises von 1,0 kgCO₂-Eq/kWh extrem ansteigt. Dies spricht z.B. eindeutig gegen die Verschiffung von qualitativ minderwertigen Fast-Fashion-Konsumabfällen (minderwertige Garne aus vergleichsweise kurzen Fasern) zurück nach Fernost für ein dortiges Recycling. Es ist wichtig dieses Recycling mit Ökostrom und mit effizienten Prozessen zu

betreiben, um den CO₂-Fußabdruck von Produkten mit einem Anteil an Recyclingmaterial gering zu halten.

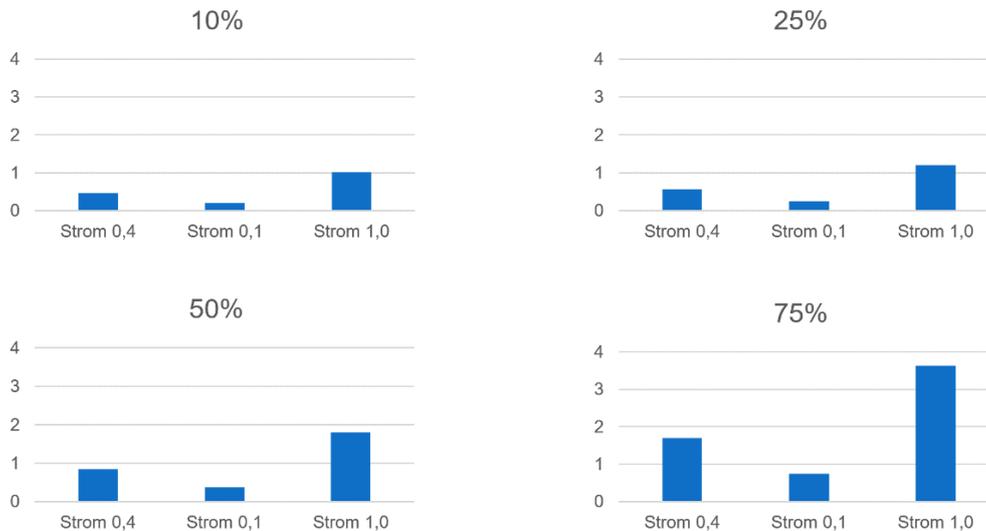


Abbildung 13: CO₂ je kg Produkt - Classic Allokation bei unterschiedlichen Abfallanteilen und Strommix

Ein möglicher Verwertungszweig für Reisserei-Abfälle aus dem Baumwollrecycling ist die Herstellung von Viskose. Hier können die für die Spinnerei zu kurzen Fasern, bis hin zu staubartigen Abfällen, gelöst und zu hochwertiger Viskose verarbeitet werden.

Szenarienauswahl Spinnerei für Gesamtmodell

Durch die Erweiterung des Spinnerei-Modells Richtung Kreislauffähigkeit und die damit einhergehende Integration der Recycling-Modellierung von Baumwollfasern, erweitert sich auch der Parameterraum des Modells. Zusätzliche Parameter sind das **Mischungsverhältnis**, der **Strommix** und der **Abfallanteil der Reisserei**, sowie die **Allokationsstrategie** von CO₂-Äquivalenten zu Produkt und Abfall. Folgende Mischungsverhältnisse von Virgin- zu Recycling-Baumwolle wurden berücksichtigt: 100/0, 90/10, 75/25, 60/40, 50/50, 40/60, 25/75. Beim Strommix kommen, wie zuvor auch, der Ökostrom mit 0,1 kgCO₂-Eq/kWh und der Strom mit 1,0 kgCO₂-Eq/kWh aus der Verstromung von fossilen Energieträgern zum Einsatz. Die Abfallanteile der Reisserei können 10%, 25%, 50% oder 75% betragen und die Allokation im Massen-Verhältnis von 1:1 oder 1:0 zwischen Produkt und Abfall erfolgen. Insgesamt kommen wir in der Kombination auf annähernd 800 Szenarien, statt der bisherigen 8, die durch die Variation der o.g. Parameter gerechnet werden können.

Für unsere Untersuchungen wurden viele Szenarien gerechnet. Schlussendlich sind zu den bereits betrachteten Szenarien ohne Recycling (Szenarien 8 und 5) sechs weitere Szenarien für eine ausführliche Betrachtung mit Recycling ausgewählt worden (Szenarien 4, 650, 711, 714, 775 und 776).

Für die Auswahl wurden folgende Kriterien angewendet:

- Zwei Szenarien mit dem besten und schlechtesten CO₂-Fußabdruck aus dem Parameterraum. Dies sind die **Szenarien 714** (best) und **711** (worst)
- Das schlechteste Bio-Szenario (**Szenario 775**)

Da das Szenario, mit dem geringsten CO₂-Fußabdruck (714, best) Bio-Baumwolle verwendet, wollte man auch dies wieder von Ausgangsmaterial entkoppeln, ähnlich wie bei Szenario 8 und 5, und analysieren was das schlechteste Szenario mit Bio-Baumwolle ist. Damit ist der Fokus auch hier wieder auf den Produktionsprozess gelegt.

- Schlechtestes Bio-Szenario mit fairer Massen-Allokation zwischen Produkt und Abfall in der Reisserei im Verhältnis von 1:1 (**Szenario 776**)

- Das beste Szenario mit Standard-Baumwolle aber ansonsten identisch zum besten Szenario 714, **Szenario 650**. Damit kann der Einfluss des Virgin Rohstoffs gut dargestellt werden.
- Szenario 4, welches bis auf die Wahl von Standard-Baumwolle, statt Bio-Baumwolle, dem oben beschriebenen Szenario 8 entspricht und daher eher den typischen Fast-Fashion-Fall repräsentiert. Dies ist das **Szenario 4**, das schlechteste ohne Recycling.

In den Betrachtungen ohne Recycling weiter oben sollte Szenario 8 der Produktion in Fernost eine faire Vergleichsbasis bieten (auch dort ist Bio-Baumwolle verfügbar und kann für die Produktion eingesetzt werden) und den Fokus des Vergleichs mit Szenario 5 auf den Produktionsprozess lenken.

Tabelle 3 zeigt eine Übersicht der ausgewählten Szenarien und ihre zugrundeliegenden Parameter.

Tabelle 3: Szenarienauswahl Spinnerei für Gesamtmodell - Fast-Fashion und ECO-Shoring

		Best 714	Worst 711	Worst Bio 775	Worst Bio fair Allok. 776	4	8	Best 100% 5	Best Standard 650
Ringgarn Feinheit	Nm 80 (12,5 tex)	Nm 80	Nm 80	Nm 80	Nm 80	Nm 80	Nm 80	Nm 80	Nm 80
Baumwolle (Quelle ecoinvent 3.8) Rohstoff 1	Standard: 4,53 kgCO2 eq/kg Bio: 0,6 kgCO2 eq/kg	Bio	Standard	Bio	Bio	Standard	Bio	Bio	Standard
Qualität Rohmaterial virgin	gute Qualität wie definiert schlechte Qualität Nutzeffekt*0,8 Geschwindigkeit*0,8 Abfall je Prozess*1,2	gut	schlecht	schlecht	schlecht	schlecht	schlecht	gut	gut
Strommix	Kohlestrom: 1,0 kgCO2 eq/kWh hoher regenerativer Anteil: 0,1 kgCO2 eq/kWh	0,1	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,1	0,1
Mischungsanteil Recycling virgin /recycelt mit angepassten Abfallanteilen im Vorwerk2	100/0, 90/10, 75/25, 60/40, 50/50, 40/60, 25/75	25/75	25/75	25/75	25/75	100/0	100/0	100/0	25/75
Reisserei, Carbon Footprint Rohstoff2	Strommix 0,1 und 1,0	0,1	1,0	1,0	1,0				0,1
Reisserei, Carbon Footprint Rohstoff2	Abfallanteile 10%, 25%, 50%, 75%	10	75	75	75				10
Reisserei, Carbon Footprint Rohstoff2	Allokation 1:0 und 1:1	"1:1	"1:0	"1:0	"1:1				"1:1

Anhand der Parameter Strommix (1,0 bzw. 0,1 kgCO₂-Eq/kWh) und Qualität des Rohmaterials (schlecht vs. gut), der auch die Prozesseffizienz (Nutzeffekt) beinhaltet, lassen sich die Szenarien als mögliche Fast-Fashion bzw. ECO-Shoring-Szenarien identifizieren. Szenarien 776, 775, 711, 4 und 8 sind dem Fast-Fashion- und die Szenarien 714, 650 und 5 dem ECO-Shoring-Spektrum zuzuordnen.

Abbildung 14 zeigt den Vergleich der Input- und Output-CO₂-Ströme der acht ausgewählten Spinnerei-Szenarien für eine Produktionsmenge von 1kg Bekleidung mittels des im Folgenden erläuterten Gesamtmodells der gesamten Prozesskette. Eine übersichtlichere Darstellung aufgeteilt nach Input und Output für die jeweiligen ECO-Shoring- bzw. Fast-Fashion-Szenarien findet sich im Anhang (Abb. 50 bis Abb. 53).

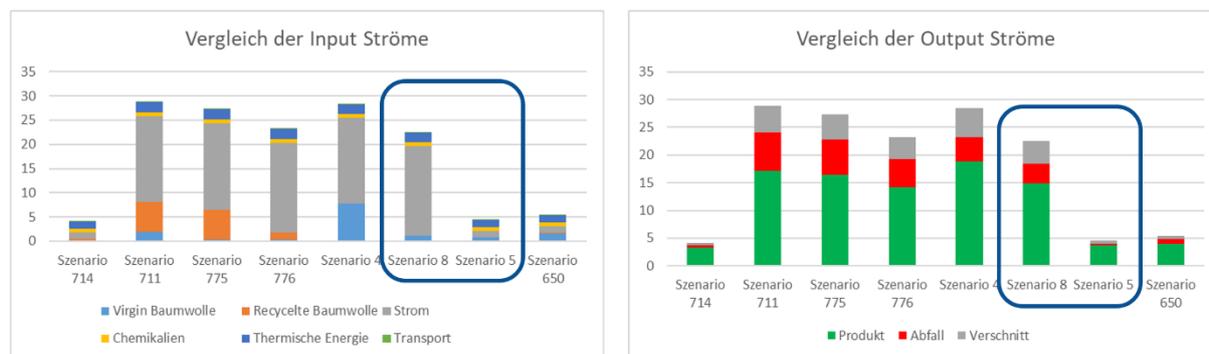


Abbildung 14: Input- und Output-Ströme für 1kg Bekleidung (Gesamtmodell) in 8 Spinnereiszenarien - CO₂-Sicht

Wenn wir uns auf die Rohstoffart (Fasern) fokussieren sehen wir im Input-Diagramm, dass das schlechteste Szenario (711) Standard-Baumwolle verwendet. Gleichzeitig ist es nur unwesentlich schlechter als das schlechteste Szenario mit Bio-Baumwolle (775). Der Unterschied liegt, wie zu erwarten, im höheren CO₂-Fußabdruck der Standard- gegenüber der Bio-Baumwolle (hellblaue Säule). Interessant ist, dass das schlechteste Szenario (711), ein Recycling-Szenario mit 75% Recyclinganteil ist. Dieses ist sogar geringfügig schlechter, als das schlechteste Nicht-Recycling-Szenario (4) (100% Virgin-Anteil). Um das nachzuvollziehen müssen wir uns die Recycling-Szenarien genauer ansehen.

Wenn wir den Fokus weg von der Rohstoffart, hin zum Prozess, verlagern, sehen wir, dass das beste Recycling-Szenario (714) gleichzeitig das absolut beste Szenario im Vergleich ist. Es ist geringfügig besser, als das beste Szenario ohne Recycling (5). Das Optimum liegt im betrachteten Fall bei einem Recycling-Anteil von 75%. Interessant ist die Tatsache, dass sowohl das beste Szenario (714), als auch das schlechteste (711), beide mit einer Kombination aus 25% Virgin- und 75% Recycling-Baumwolle erzielt werden. Dies liegt hauptsächlich an der jeweiligen Allokationsstrategie der CO₂-Äquivalente in der Reisserei und dem verwendeten Strommix in den beiden Szenarien.

Der Abfallanteil in der Reisserei ist umgekehrt proportional zur Qualität. Je größer der Abfallanteil, desto besser die Qualität der gewonnenen Fasern (Faserlänge). Zum Vergleich haben wir in Abbildung 15 (links oben) bei fairer Allokation für die Herstellung von recycelter Baumwolle unter ECO-Shoring-Bedingungen einen Wert von unter 0,2 kgCO₂-Eq/kg. Dieser ist deutlich niedriger, als der Wert für Virgin-Bio-Baumwolle, der üblicherweise bei ca. 0,6 kgCO₂-Eq/kg liegt. Hier sparen wir pro kg eingesetzter Recycling-Fasern ca. 0,4 kgCO₂-Eq. Selbst mit klassischer Allokation und dem höchsten betrachteten Abfallanteil von 75% liegen wir noch relativ gleichauf (rechts unten, 1:0). Wenn man aber gezwungen ist, das Recycling unter Verwendung eines schlechteren Strommixes durchzuführen (Fast-Fashion-Produktion Fernost), siehe Abbildung 16, kann es bei hohen Abfällen bzw. minderwertiger Ausgangsware passieren, dass man für 1kg Fasern einen CO₂-Fußabdruck von ca. 3,5 kgCO₂-Eq bekommt, was dem 5- bis 6-fachen Wert der Virgin-Bio-Baumwolle entspricht. Selbst bei besten Ausgangsmaterialien, erreichen wir beim Recycling im Fast-Fashion-Szenario nicht den Wert der Virgin-Bio-Baumwolle.

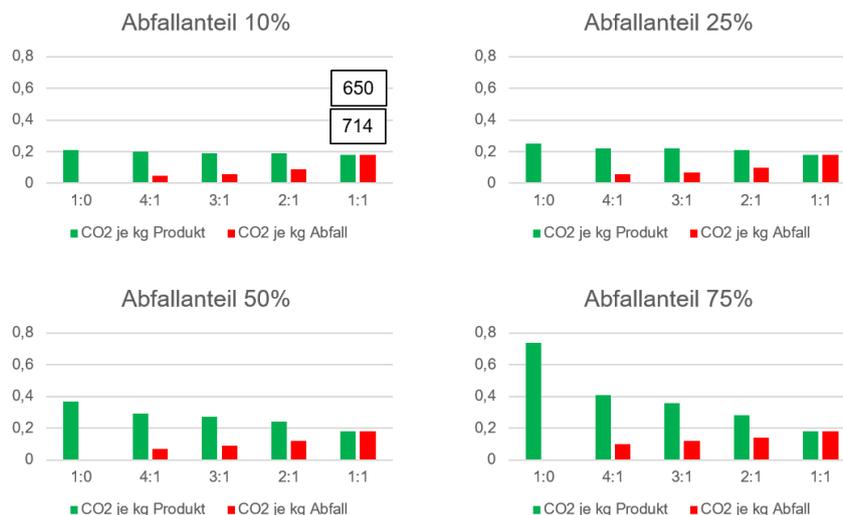


Abbildung 15: Allokationsunterschiede - Strommix 0,1

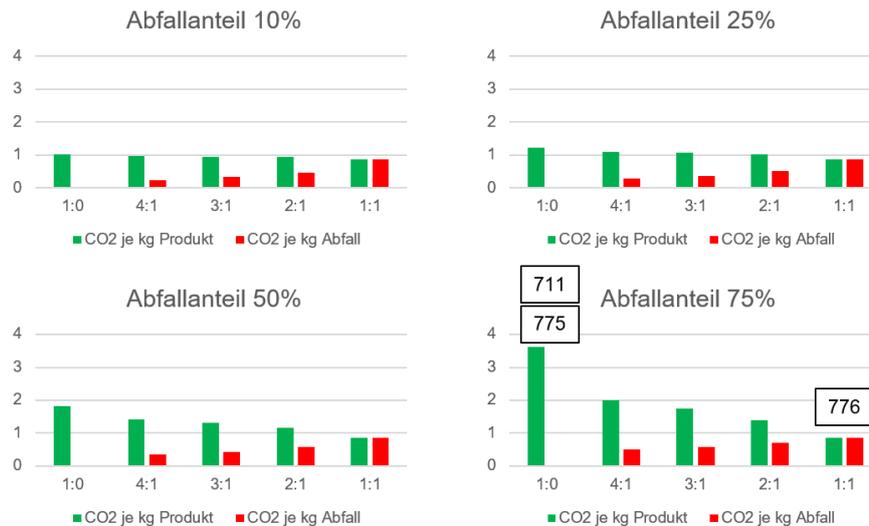


Abbildung 16: Allokationsunterschiede - Strommix 1,0

Das Recycling hat ein hohes Potential zur Umweltentlastung. Recycling allein trägt jedoch nicht zur Umweltentlastung bei, wichtig ist die Qualität des Ausgangsmaterials und die Bedingungen, unter denen das Recycling durchgeführt wird (Strommix, Nutzeffekt). Außerdem sollte dringend für eine kaskadische Nutzung der Abfälle¹² gesorgt werden, um eine faire Allokation im Produktionsprozess zu ermöglichen. Dies ist z.B. im Unterschied der orangenen Säulen der Szenarien 775 und 776 in Abbildung 14 gut zu erkennen. Hier liegt der einzige Unterschied in der Allokation der Abfälle. Zusätzlich unterstreicht das Szenario 650 nachdrücklich die oben getätigten Aussagen, indem es trotz Verwendung von Standard- statt Bio-Baumwolle, durch konsequente Ausnutzung aller Potentiale, fast gleichauf mit den besten Bio-Szenarien liegt.

Die Qualität des Ausgangsmaterials im Recycling-Prozess ist ebenfalls sehr wichtig. Abbildung 15 und Abbildung 16 zeigen (jeweils links oben), dass bei geringen Abfällen der Reisserei, d.h. bei hoher Qualität bzw. einfacherer mechanischer Verarbeitbarkeit der Ausgangsmaterialien, der Unterschied durch die unterschiedlichen Allokationsstrategien kaum noch ins Gewicht fällt. Hochwertige Ausgangsmaterialien kommen meist aus dem Pre-Consumer-Bereich¹³ (z.B. Kantenabfälle aus der Weberei, Spinnereiabgänge, Zuschnittreste) während Post-Consumer-Abfälle (Bekleidung) meist zu deutlich höheren Abfallraten führen.

Die angestellten Betrachtungen haben den Einfluss von Standard- und Bio-Baumwolle auf den Spinnerei-Prozess untersucht, stellen aber sicher, dass die Differenzierung in den Szenarien nicht vordergründig aus der Rohstoffart, sondern vom eingesetzten Strom und der Prozesseffizienz herrührt. Dies entspricht den zuvor identifizierten Hebeln mit dem größten Umweltentlastungspotential.

Gesamtmodell und funktionelle Einheit

Bei den vorhergehenden Betrachtungen wurde festgestellt, dass allein im Spinnereimodell durch die Definition von Modell-Parametern ein Variantenraum von fast 800 Szenarien aufgespannt wird. Aus diesen Szenarien wurden acht Szenarien, aufgeteilt auf Fast-Fashion- und ECO-Shoring-Szenarien ausgesucht. Für diese ausgewählten Szenarien wurde das Gesamtmodell der Bekleidungsherstellung berechnet (Fast-Fashion: 711-worst, 775-worst bio, 776.-worst bio fair alloc., 4-worst no rec., 8-worst bio no rec.; ECO-Shoring: 714-best, 650-best standard, 5-best bio no rec.).

Abbildung 17 zeigt die Struktur der Verkettung der einzelnen MFCA-Teilmodelle zu einem Gesamtmodell. Beispielhaft dargestellt sind drei Ansichten des Gesamtmodells für die Herstellung von

¹² (Vgl. Global Fashion 2022) S.18

¹³ Vgl (Materials Market Report 2024) S.23

Bekleidung zur Abdeckung von 100 Tragezyklen im Fast-Fashion-Szenario (Szenario 8), oben in der Massen-/Energiesicht, in der Mitte und unten in der CO₂-Sicht. Die untere Darstellung berücksichtigt dabei die Allokation der CO₂-Äquivalente zu den Produktionsabgängen nach der MFCA-Methode (Vergrößerung der Abbildung, sowie das Gesamtmodell für das ECO-Shoring-Szenario 5 im Anhang als Abb. 54 bzw. Abb. 55).

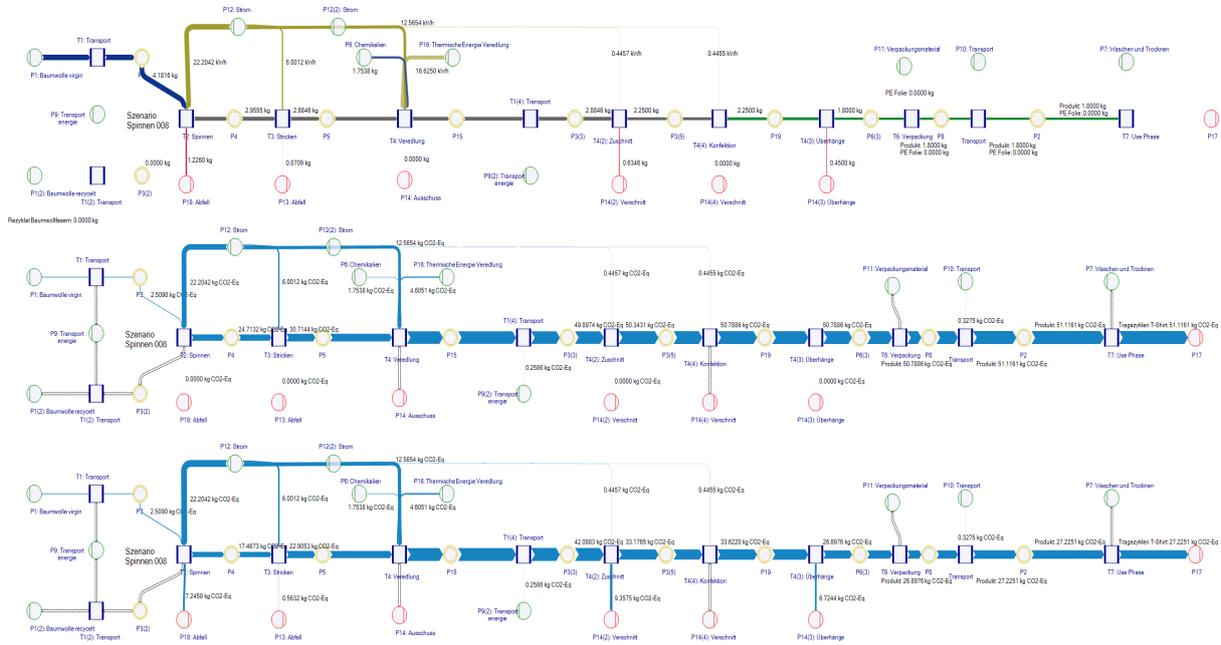


Abbildung 17: MFCA-Gesamtmodell - Fast Fashion (Sz. 8) - 100 Tragezyklen

Diese Modelle können durch entsprechende Parameterwahl für unterschiedliche funktionelle Einheiten (1 Bekleidungsstück, 1kg Produkte, 100 Tragezyklen usw.) berechnet werden, womit die Herstellung von unterschiedlichsten Produkten über die gesamte Prozesskette hinsichtlich der Umweltauswirkungen differenziert bewertet werden.

Die aufgezeigten Hebel zur Reduktion des CO₂-Fußabdrucks im Rahmen der Produktion liegen in der Nutzung eines Strommixes mit einem hohen Anteil regenerativer Energien, der Reduktion der Überhänge sowie in der Erhöhung der Nutzungsdauer der hergestellten Produkte. In Konsequenz ist der größte Hebel, weniger Produkte zu produzieren und die Nutzungsdauer zu erhöhen. Dazu muss die Produktqualität über die Nutzungsphase und die Nutzungsfrequenz selbst in die funktionelle Einheit und somit in das Modell einfließen. Dies wird erreicht durch die Definition der funktionellen Einheit in den erarbeiteten MFCA-Modellen zu 100 Tragezyklen. Die resultierenden Gesamtmodelle ermöglichen die Polarisierung von ECO-Shoring und Fast-Fashion-Produktionsszenarien unter Berücksichtigung der dominierenden Hebel.

Tabelle 4 zeigt die für die Polarisierung der Fast-fashion und ECO-Shoring-Szenarien in der Gesamtmodellberechnung verwendeten Parameterwerte für Überhänge und Tragezyklen. Die Tragezyklen sind dabei nicht gleichzusetzen mit Waschzyklen, weil Bekleidung häufig mehrmals zwischen den Waschgängen getragen wird. Als Beispiel sei hier das aus dem Expertengremium genannte Beispiel für hochwertige Herrenhemden genannt, die für über 50 Wäschen ausgelegt werden. Damit erscheint die gewählte Tragezyklenzahl von 100 für hochwertige ECO-Shoring-Produkte durchaus plausibel.

Tabelle 4: Parameter für Überhänge und Tragezyklen - Fast-Fashion und ECO-Shoring

	Fast Fashion	ECO-Shoring
Überhänge	20%	10%
Tragezyklen	10	100

Abbildung 18 zeigt einen Vergleich der Input- und Output-Ströme des Gesamtmodells der acht ausgewählten Szenarien für eine Produktionsmenge, die 100 Tragezyklen abdeckt. Eine übersichtlichere Darstellung aufgeteilt nach Input und Output für die jeweiligen ECO-Shoring- bzw. Fast-Fashion-Szenarien findet sich im Anhang (Abb. 56 bis Abb. 59).

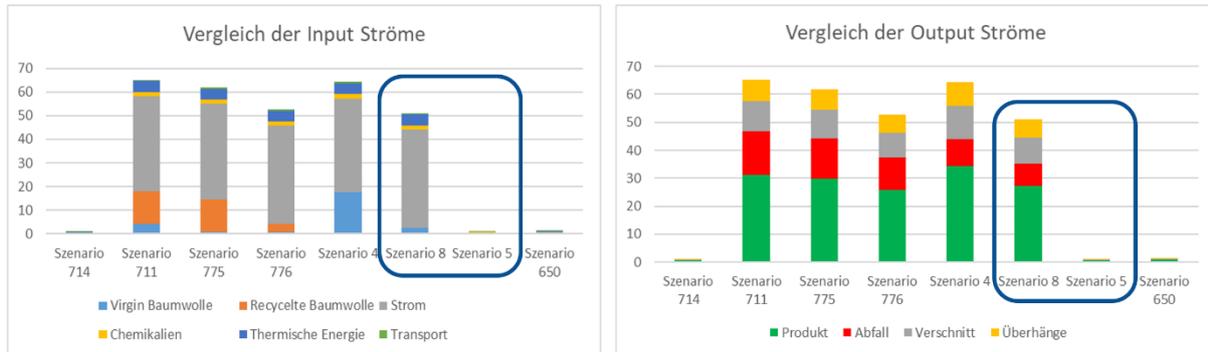


Abbildung 18: Input- und Output-Ströme für 100 Tragezyklen (Gesamtmodell) in 8 Spinnereiszenarien - CO₂-Sicht

Man erkennt deutlich den vielfach geringeren CO₂-Fußabdruck für 100 Tragezyklen der ECO-Shoring-Szenarien. Tabelle 5 quantifiziert die zwei Szenarien 8 und 5. Bei einem ca. 4-fach höheren CO₂-Fußabdruck des Fast-Fashion-Bekleidungsstücks ergibt sich durch Einsparung von 10% Überhängen und 10x mehr Tragezyklen ein Einsparpotenzial an CO₂-Äquivalenten von über 98%. Selbst bei gleicher Tragezyklenzahl zwischen Fast-Fashion und ECO-Shoring von 10 Tragezyklen verbleibt durch die Reduzierung von Überhängen, einen besseren Strommix und einen höheren Nutzeffekt ein Einsparpotential von immer noch 81,5%, bei identischem Ausgangsmaterial.

Tabelle 5: Einsparpotential ECO-Shoring (Sz.8 vs. Sz.5)

	Fast Fashion - Szenario 8	ECO-Shoring - Szenario 5
kgCO _{2-Eq} zur Herstellung 1 Stück (180g)	4,06	0,82
Überhänge	20%	10%
Tragezyklen	10 (entspr. 10 Stück)	100 (entspr. 1 Stück)
kgCO _{2-Eq} für funktionelle Einheit 100-Tragezyklen bei 180g Masse	48,72	0,90
Einsparpotential ECO-Shoring	98,2%	

Zur Verdeutlichung zeigt Abbildung 19 die aus Abbildung 18 bekannten Input- und Output-Ströme des Gesamtmodells für die beiden Szenarien 8 und 5 als Tortendiagramme. Deutlich zu erkennen sind die beim Fast-Fashion-Szenario (8) anfallenden, prozentual höheren Strom-bedingten CO₂-Belastungen. Auf der Output-Seite wirken sich beim ECO-Shoring-Szenario (5) die anteilig deutlich geringen Anteile der Abgänge (Überhänge, Verschnitt, Abfall) positiv aus. Diese resultierenden Verteilungen sind bei den restlichen 6 Fast-Fashion- bzw. ECO-Shoring-Szenarien ähnlich gelagert und können in den o.g. Abbildungen im Anhang eingesehen werden.

Bisher lag der Fokus der Betrachtung auf den Produktionsbedingungen und dem Potential von Recyclingfasern. Dabei konnte das Potential der größten Hebel Strommix, Prozesseffizienz und Recycling eindrücklich belegt werden.

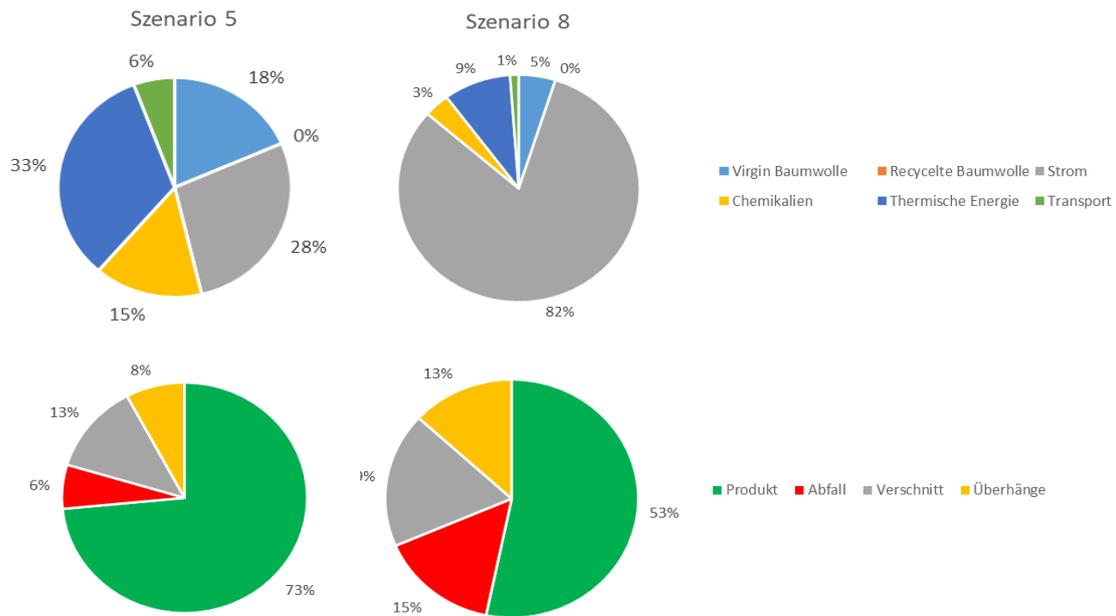


Abbildung 19: Input- (oben) und Output- (unten) -Ströme für 100 Tragezyklen - CO₂-Sicht

Gegenüberstellung Fast Fashion zu ECO-Shoring

Dabei wurde bewusst auf die unterschiedlichen Transportbedingungen verzichtet, um die Unterschiede eindeutig zuordnen zu können. Aber gerade der Transport ist ein wesentliches Differenzierungsmerkmal von ECO-Shoring und Fast-Fashion. Daher wird diese Thematik speziell im MFCA-Demonstrator aufgegriffen. Dort werden im Rahmen der Untersuchung neben den bereits diskutierten 8 Szenarien noch drei weitere Szenarien mit dem Differenzierungsmerkmal Transport analysiert: ECO-Shoring, Fast-Fashion und Ultra Fast-Fashion

Die abschließende Gegenüberstellung ist daher im Rahmen des Demonstrators erfolgt und ist im Kapitel 3.6 dargestellt.

Rebound-Effekte

Im Rahmen des Antrages wurde auch das Problem von Rebound Effekten aufgeworfen. Wenn man die CO₂-Einsparpotentiale isoliert betrachtet, dann könnte ein solcher Effekt durchaus auftreten. Allerdings ist die Produktion unter ECO-Shoring Randbedingungen, wie erhöhten Lohnkosten, mit signifikant höheren Kosten pro Stück verbunden. Daher sind die ökonomischen Einsparpotentiale für den Konsumenten nicht in gleichem Maße wirksam. Und solange CO₂-Emissionen nicht relevant mit Kosten belegt werden, wird sich kein signifikanter Rebound Effekt aufgrund des verbesserten CO₂-Fußabdrucks einstellen.

3.4 On-Demand Technologien für Nearshoring und direkte Vernetzung in das Produktionsnetzwerk Virtuelle Bekleidungs-simulation (AP3)

In diesem Kapitel werden die gemäß des im Kapitel 3.2 beschriebenen Konzepts zu entwickelten neuen Komponenten für eine automatisierte 3D Simulation von MtM-Bekleidungsprodukte inkl. Variantenkonfiguration beschrieben. Hierzu ist im Anhang A1 der grundlegende Ablauf der Entwicklung eines 3D Bekleidungsproduktes beschrieben und ist eine wichtige Voraussetzung zum Verständnis des nachfolgend beschriebenen Konzeptes.

Grundkonzept Made-to-Measure (MtM)

Der Schnitt eines Bekleidungsproduktes wird immer gemäß einer Passform-Vorgabe durch Konstruktion mit Hilfe der Körpermaße eines Referenzmodells und entsprechender Zugaben erstellt.

Es liegt auf der Hand, dass dieses Verfahren nicht für jede individuelle Körperform jeweils erneut durchgeführt werden kann. Im industriellen Umfeld kommen daher verschiedene Konzepte zur Anwendung mit deren Hilfe anhand von Regeln (sogenannte Alterations für MtM) bzw. mit körperbezogenen Konstruktionsparameter die individuelle Geometrie im CAD System abgeleitet wird.

Während der Konzeptionsphase des Projektes wurden im Rahmen einer Masterarbeit die verschiedenen Verfahren anhand zweier Produkte (Abbildung 20) angewendet und im Hinblick auf eine Anwendung für ECO-Shoring beurteilt¹⁴. Hierbei wurden die Ansätze der durchgängigen digitalisierten virtuellen Entwicklung von MtM-Produkten inkl. Variantenkonfiguration am einfachen Beispiel eines T-Shirts von einem Industriepartnerunternehmen erprobt und quantifiziert.

- 2D/3D Software Suite von Assyst
- 2 Produktbeispiele: T-Shirt und Bike-Shirt



Abbildung 20: Beispielprodukte zur Evaluierung von MtM Methoden für ECO-Shoring

Bei der „Gradiermethode mit Alteration Rules“ werden Schnitte zunächst über eine numerische Standard-Grädierung gradiert (siehe Anhang A1). Dann wird der individuelle Schnitt eines Kunden erstellt, indem der gradierte Schnitt in der dem Kunden am besten passenden Standard-Größe weiter angepasst wird. Die Abänderungen werden dabei über sogenannte Differenz-Regeln bestimmt. In diesen Regeln werden die Änderungswerte (Alteration Values), die aus der Differenz der individuellen Körpermaße minus der Tabellenmaße der Referenz-Standard-Größe berechnet werden, prozentual auf die entsprechenden Grädierpunkte des Schnittes verteilt und angewendet.

Alternativ könnte auch der von Assyst im Rahmen geförderter Forschungsvorhaben 3D-Grading Ansatz¹⁵ herangezogen werden. Hierbei wird der Schnitt nicht mit Differenzmaß-abhängigen Regeln erweitert, sondern direkt regelbasiert mit Referenzpunkten auf dem Avatar verbunden (Abbildung 21).

¹⁴ Vgl. (Hiß 2024)

¹⁵ Vgl. (ZIM 2015)

Gestaltung der MtM-Prozessbausteine mit 3D-Gradieransatz



Lösungsvariante 1

- Aufbau der 3D-Grädierung anhand herkömmlicher Grädier- und Schnittabänderungstechniken

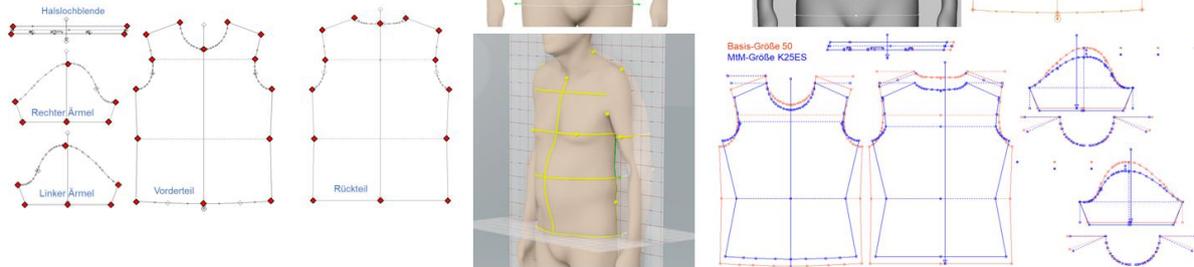


Abbildung 21: MtM mit 3D-Grading

Dieser Ansatz reduziert die Komplexität seitens der automatisierten Analyse des individuellen Avatars (keine Größenschätzung und Differenzmaßbestimmung erforderlich – der kundenindividuelle Avatar wird dem 3D-Grading System direkt übergeben), erfordert aber dagegen einen höheren Aufwand im Bereich CAD Datenvorbereitung. Daher fiel die Entscheidung, das ECO-Shoring Projekt auf Basis des in der Industrie am häufigsten angewandten „Alteration“-Ansatzes umzusetzen.

Grundkonzept Variantenkonfiguration

Das Assyst CAD System stellt mit dem vollintegrierten Variantenkonfigurator ein effektives Konzept zur Erstellung und Verwaltung von Schnittvarianten im CAD bereit. Hierzu werden zunächst im Softwaremodul „Variantenkonfigurator“ sämtliche Varianten eines Produkt-Baukastens definiert (Abbildung 22) – in diesem Beispiel ein Herrenhemd mit vier Variantengruppen Lang-/Kurzarm, Manschette, Kragen und Saumeckentyp.

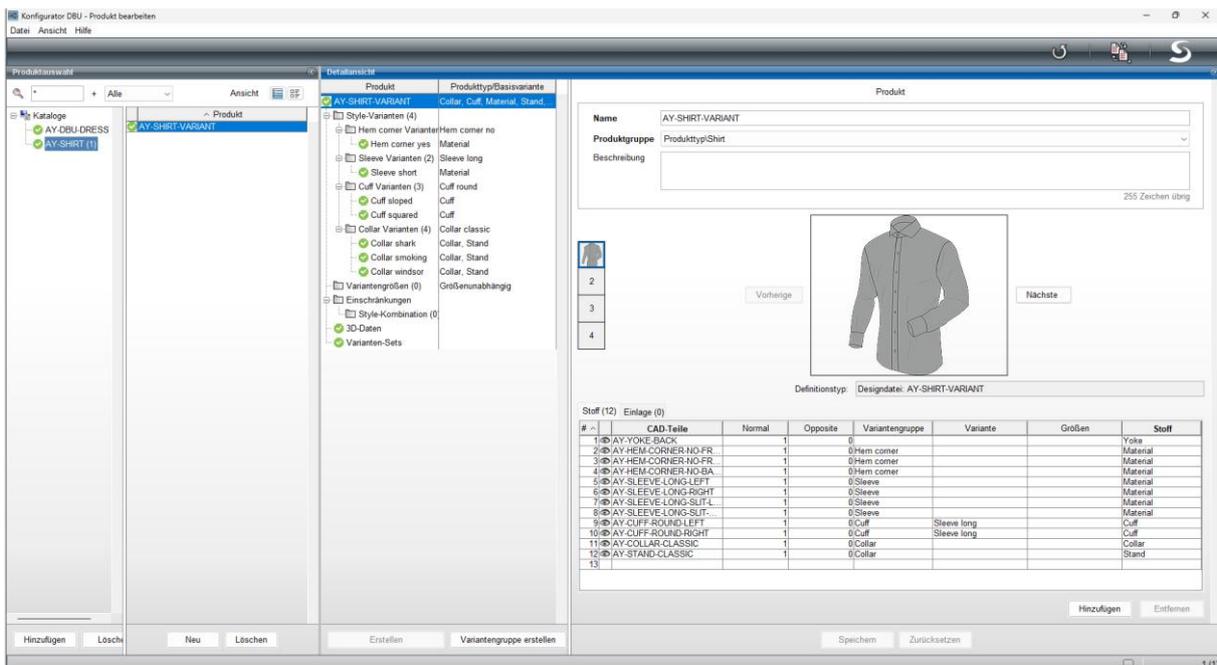


Abbildung 22: Assyst Variantenkonfigurator

Jeder dieser Variantengruppen und Ihren jeweiligen Komponenten (z.B. Kurzer/Langer Arm, 4 Kragentypen, ...) werden dann im Konfigurator die hierfür erforderlichen Schnittteile zugewiesen und sind dann direkt im CAD auswählbar (Abbildung 23).

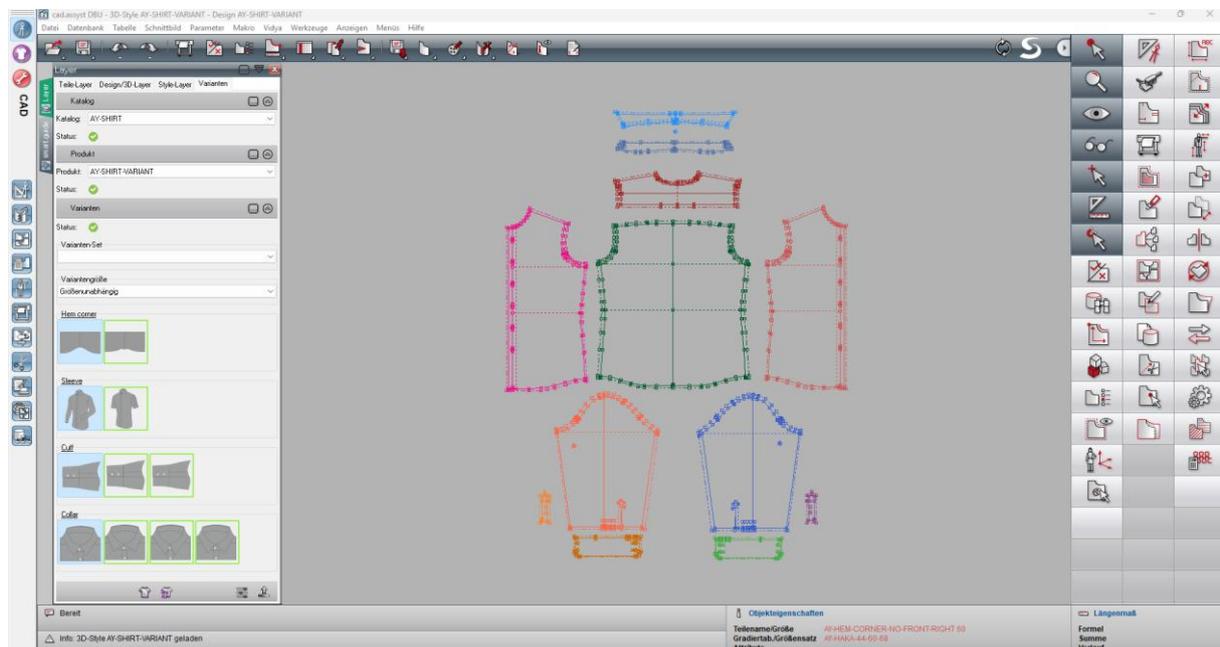


Abbildung 23: Variantenauswahl im Assyst.CAD

Der Schnitt eines Variantenbaukastens enthält daher alle Schnittteile, welche für die Realisierung aller Varianten erforderlich sind. Durch die Auswahl der entsprechenden Variante werden automatisch die hierfür erforderlichen Schnittteile selektiv dargestellt, beispielsweise für die durchzuführende Vernähung. Würde anstelle der Langarmvariante die Kurzarmvariante gewählt werden, so führt dies zur Selektion der identischen Schnittteile mit Ausnahme der Schnittteile für den Arm, usw.

Die Herausforderung für die 3D Simulation von Variantenbaukästen liegt in der Größe des durch die Anzahl der Variantengruppen und Variantenkomponenten entstehenden Variantenraumes und der für jede einzelne Variante erforderlichen Definition der Vernähung. Es ergibt sich für das Beispiel in Abbildung 23 eine Variantenanzahl von 48 Varianten (multiplikativ – $2 \times 2 \times 3 \times 4$). Durch das CAD Variantenkonzept im Zusammenspiel mit 3D Vidya (3D Simulationstool) muss jedes Schnittteil nur einzeln für sich vernäht werden so dass eine additive Vernähungskomplexität entsteht (11 Schritte). Im Softwaremodul „3D-Vidya Varianten-Präparator“ kann nun jede einzelne Variante direkt manuell aufgerufen, simuliert und anschließend abgespeichert werden (Abbildung 24).

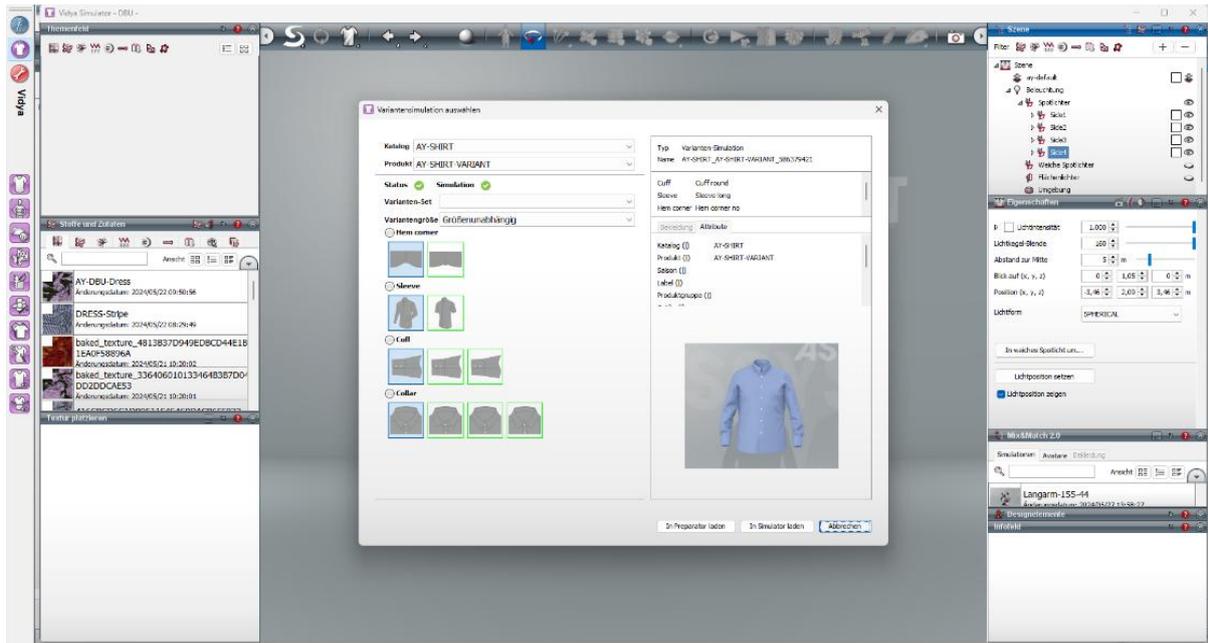


Abbildung 24: 3D-Vidya Variantenpräparator

Entwicklung der Module für die 3D Simulation von Made-to-Measure (MtM) und Variantenkonfiguration

Beide Konzepte – MtM-Alteration und Variantenbaukasten – lassen sich nun kombinieren. Hierbei müssen die Schnittteile eines Variantenbaukastens der maßkonzeptionellen Zielstellung mit entsprechendes Alteration-Regeln ergänzt werden. Eine manuelle kundenspezifische CAD Schnitteilherstellung und Simulation erfolgt dann gemäß nachfolgend abgebildetem Workflow (Abbildung 25):

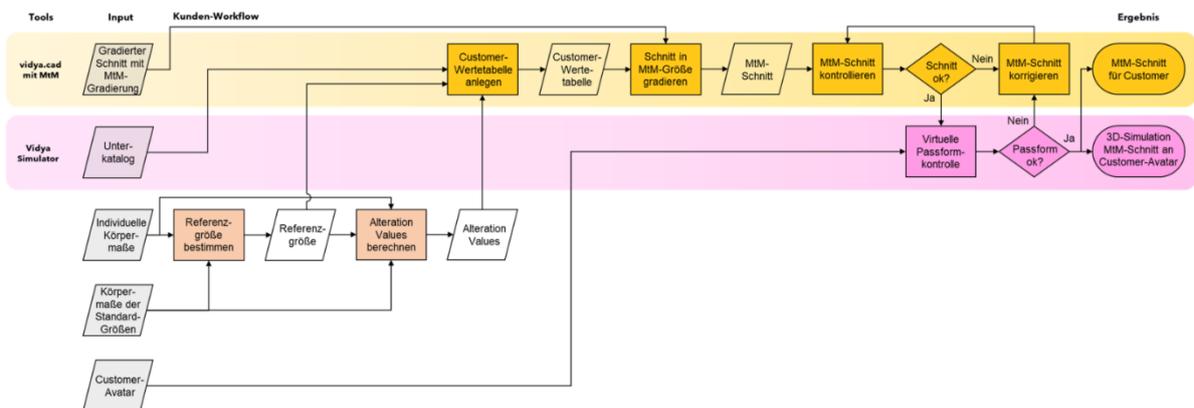


Abbildung 25: MtM Workflow für 3D Simulation mit Varianten [Quelle Masterarbeit]

Aus einem individuellen Avatar wird hierzu zunächst auf Basis der Primärmaße (z.B. Halsumfang und Brustumfang) eine zu gradierende Größe abgeleitet. Aus der Differenz der Maßstrecken zwischen Basis-Avatar (bzw. Körpermaße des Basismodells) und des individuellen Avatars ergeben sich die Werte für die Alterations, aus welchen wiederum im CAD System die Schnittgeometrie automatisch berechnet wird (z.B. Differenz Armlänge +5cm ergibt eine Verlängerung des Schnittteils für den Arm um 5cm).

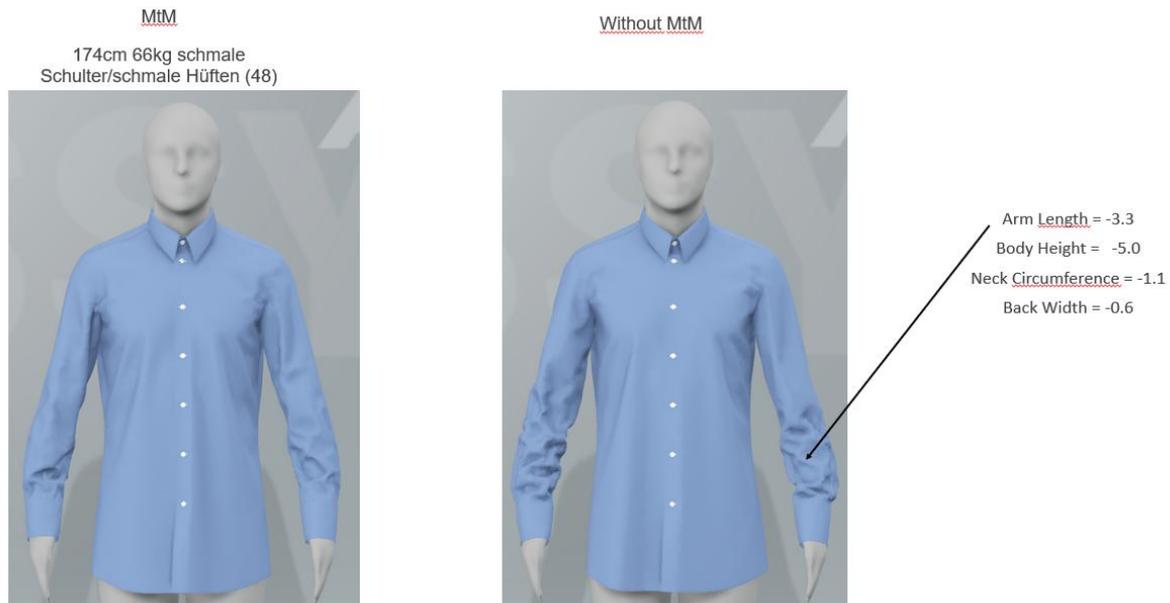


Abbildung 26: Vergleich zwischen Konfektionsgröße und MtM-Modell (Frontansicht)

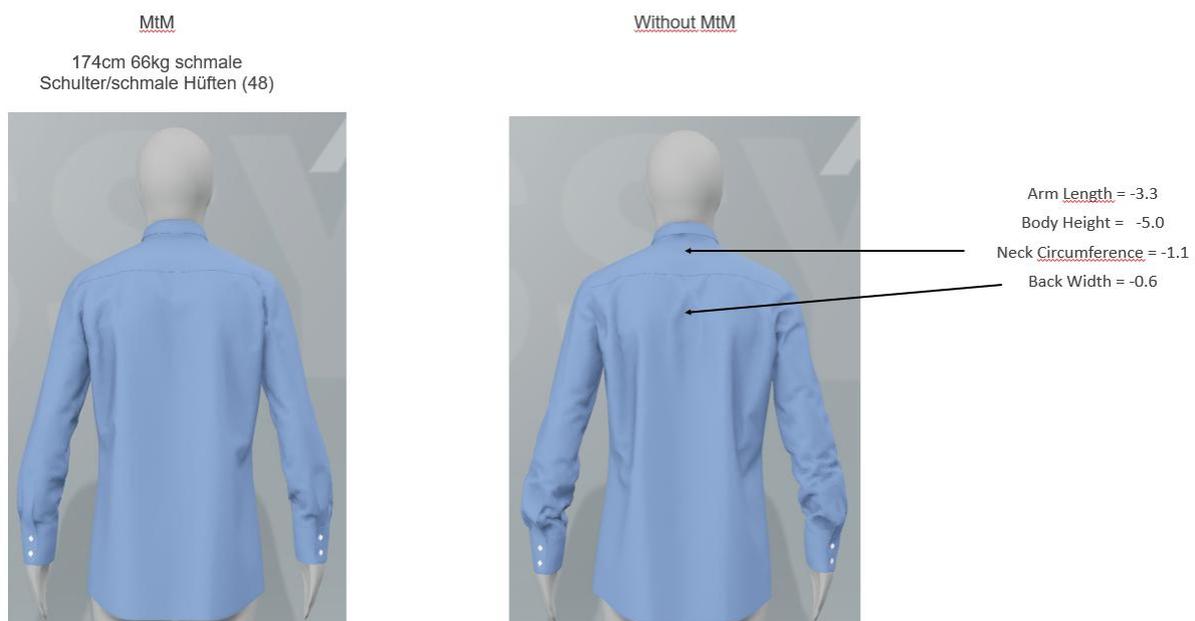


Abbildung 27: Vergleich zwischen Konfektionsgröße und MtM-Modell (Rückansicht)

In Abbildung 26 und Abbildung 27 erkennt man die deutlichen Verbesserungen der Passform für das gewählte Modell. Die Konfektionsgröße wird durch negative Alterationswerte weiter verkleinert (Mehrweite im Brustbereich und Armlänge) so dass sich eine bessere MtM Passform ergibt.

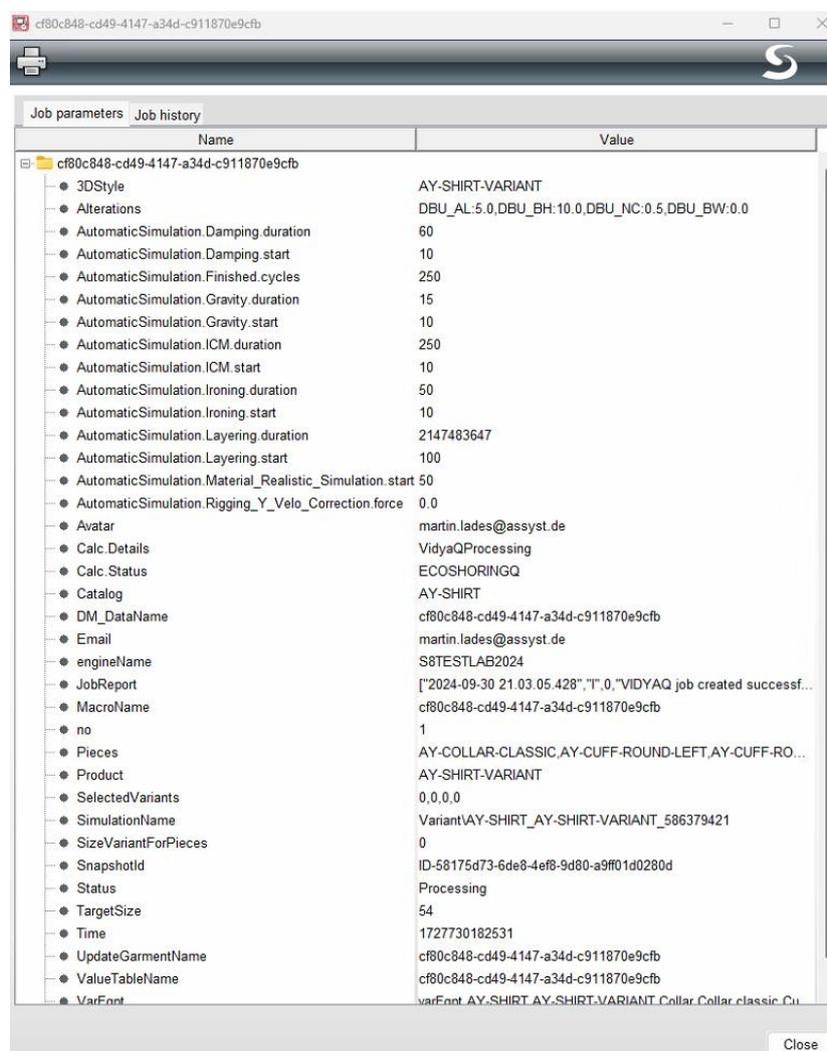
Entwicklung der Module für die automatische Abarbeitung einer MtM 3D Simulation in Variantenkonfiguration

Obwohl das beschriebene Verfahren sehr viel weniger aufwendig ist als für jeden Körper einen entwickelter Schnitt manuell anzupassen, erkennt man, anhand der geschilderten Vorgehensweise und der erforderlichen Abarbeitung einer großen Anzahl an aufwendigen manuellen Schritten, die Komplexität des Verfahrens. Eine vollständige Automatisierung des Verfahrens nachdem die Produktdaten entsprechend dem Verfahren vollständig vorbereitet worden sind ist eine

Grundvoraussetzung für die Anwendung des Konzepts als WEB-basierter Konfigurator für den Verkauf und die Produktion von kundenindividuelle Maßbekleidung.

Folgende wesentliche Herausforderung muss für einen automatischen Ablauf der Simulation gelöst werden: Bei einer normalen interaktiv durchgeführten Bekleidungssimulation beobachtet der Anwender, in der Anwendung 3D Vidya, den Ablauf der virtuellen Vernähung bzw. wenn der Avatar und die Geometrie einer vorbereiteten Variantensimulation ausgetauscht werden und dann durch eine sogenannte Differenzsimulation der neue Fall des Bekleidungsproduktes iterativ berechnet wird. In der Anwendung 3D Vidya stehen dem Anwender hierbei verschiedene Werkzeuge zur Beeinflussung des Verlaufs der Simulation zur Verfügung – virtuelles Bügeln, Setzen von virtuellen Nadeln, Dämpfen der Simulation, um die Auswirkung der durch das Update eingeführten Impulse zu reduzieren, usw. Der Anwender (der Mensch als intelligenter Beobachter) erkennt durch Beobachtung, welche Maßnahmen für eine erfolgreiche Simulation erforderlich sind.

Bei der automatischen Simulation entfällt diese durch den Menschen gesteuerte Beeinflussung des Simulationsverlaufs. Daher musste ein Verfahren implementiert werden, mit dem durch Parameter der Verlauf der Simulation analog beeinflusst werden kann.



Name	Value
cf80c848-cd49-4147-a34d-c911870e9cfb	
3DStyle	AY-SHIRT-VARIANT
Alterations	DBU_AL:5.0,DBU_BH:10.0,DBU_NC:0.5,DBU_BW:0.0
AutomaticSimulation.Damping.duration	60
AutomaticSimulation.Damping.start	10
AutomaticSimulation.Finished.cycles	250
AutomaticSimulation.Gravity.duration	15
AutomaticSimulation.Gravity.start	10
AutomaticSimulation.ICM.duration	250
AutomaticSimulation.ICM.start	10
AutomaticSimulation.Ironing.duration	50
AutomaticSimulation.Ironing.start	10
AutomaticSimulation.Layering.duration	2147483647
AutomaticSimulation.Layering.start	100
AutomaticSimulation.Material.Realistic.Simulation.start	50
AutomaticSimulation.Rigging_Y_Velo_Correction.force	0.0
Avatar	martin.lades@assyst.de
Calc.Details	VidyaQProcessing
Calc.Status	ECOSHORINGQ
Catalog	AY-SHIRT
DM_DataName	cf80c848-cd49-4147-a34d-c911870e9cfb
Email	martin.lades@assyst.de
engineName	S8TESTLAB2024
JobReport	["2024-09-30 21.03.05.428";"T";"0","VIDYAQ job created successf...
MacroName	cf80c848-cd49-4147-a34d-c911870e9cfb
no	1
Pieces	AY-COLLAR-CLASSIC,AY-CUFF-ROUND-LEFT,AY-CUFF-RO...
Product	AY-SHIRT-VARIANT
SelectedVariants	0,0,0
SimulationName	Variant\AY-SHIRT_AY-SHIRT-VARIANT_586379421
SizeVariantForPieces	0
SnapshotId	ID-58175d73-6de8-4ef8-9d80-a9ff01d0280d
Status	Processing
TargetSize	54
Time	1727730182531
UpdateGarmentName	cf80c848-cd49-4147-a34d-c911870e9cfb
ValueTableName	cf80c848-cd49-4147-a34d-c911870e9cfb
VarFont	varFont_AY-SHIRT_AY-SHIRT-VARIANT_Collar_Collar_classic_Cu...

Abbildung 28: API Parameter für den Service 3D Simulation

In Abbildung 28 sind die für den Service 3D Simulation (siehe Kapitel 3.5) hinterlegten Parameter dargestellt (Parameterfenster der Vidya Simulations-Queue). Man erkennt im oberen Bereich des Bildes die implementierten Parameter zur Steuerung der automatischen Simulation. Für diesen Simulations-ablauf wird nach Beginn der Simulation für 60 Iterationen (Frames) gedämpft um den durch den Update der Geometrie und den Austausch des Avatars ins System eingebrachten Impuls zu

reduzieren. Im dargestellten Beispiel endet die Ausgleichssimulation nach 250 Iterationen. So kann je nach Parameterwahl für jedes Je nach Bekleidungstyp (z.B. Herrenhemd, Kleid, Hose, ...) geeignete Simulationsparameter ermittelt und dem Service in der API übergeben werden (JSON Textdatei im Aufruf).

Ein weiteres wesentliches Verfahren für die automatische Simulation besteht in dem Konzept, als Referenzsimulation immer die größte Größe mit den maximalen Alteration-Werten zu nutzen. Dadurch wird beim Ablauf der automatischen Simulation immer von „groß nach klein“ simuliert. Wenn ein Hemd für einen Avatar in Größe 48 mit zusätzlichen Alterations berechnet wird, so wird vom Modul „Automatische Simulation“ erst die als Datensatz vorbereitete Referenzsimulation dieser Variante geladen (diese muss manuell vorsimuliert und als Datensatz hinterlegt werden (Teil der Datenvorbereitung), dann wird der Avatar ausgetauscht und die Geometrie der Schnittteile - soweit sie sich ändern - ausgetauscht (Rigging ohne Simulation = algorithmisch durchgeführter geometrischer Match der vorsimulierten 3D Form an den neuen Avatar) und anschließend die Ausgleichssimulation gestartet. Bei einem im Vergleich zum Referenzavatar kleineren Avatar/Größe schrumpft so die Bekleidung auf die neue Form zusammen und die Simulation konvergiert schließlich zum realen durch die physikalischen Materialparameter definierten Fit der Bekleidung. Für diesen Prozess wurden viele Untersuchungen durchgeführt und das Konzept „von groß nach klein“ hat hierbei die stabilsten Lösungen ergeben.

Wichtig ist auch, auf den gültigen Wertebereich der Alterations zu achten. Wenn beispielsweise die Alterations zu extreme Werte annehmen und die Bekleidung dadurch sehr eng anliegt (Stretch) kann die Ausgleichssimulation nicht zu einem zufriedenstellenden Ergebnis gelangen.

Kostenbetrachtung – Lizenzierung

Wie in diesem und im nachfolgenden Kapitel beschrieben muss für das Framework zur durchgängigen virtuellen Produktdatenerstellung von Bekleidung mit physikalisch basierter Stoffsimulation ein umfangreicher Workflow eingesetzt werden. Dieser beinhaltet, 2D CAD mit MtM und Variantenmodul, 3D Bekleidungssimulation, Automatisiertes Queuemanagement, Schnittbilderstellung mit Automarker.com oder manuelle Schnittbildgenerierung, Plot- und Cut-Datenberechnung für die Produktion. Diese Werkzeuge müssen für die Datenvorbereitung als Voraussetzung für die Bereitstellung im Shop eingesetzt werden. Darüber hinaus ist der Shop mit dem gesamten Framework im Backend erforderlich.

Alle für die Datenvorbereitung aufgeführten Anwendungen sind State-of-the-Art Standardanwendungen die heute vielfach im industriellen Umfeld zur Anwendung kommen. Daher kann für die Datenvorbereitung auf bereits bestehende Infrastruktur zurückgegriffen werden.

Für eine produktifizierte ECO-Shoring Anwendung sind dann neben den zu erwartenden erheblichen Produktifizierungskosten auch die nachfolgende, in diesem Projekt nicht direkt behandelte Infrastruktur zur Produktion mit zu berücksichtigen. Es ergibt sich somit durch die Komplexität des Workflows und der damit verbundenen Tools ein erheblicher Kostenblock für den Bereich Services und für den Aufbau einer Nearshoring Produktions-Lösung (siehe auch Kapitel 5 – DTMF).

Es ist daher zu erwarten, dass eine ROI Betrachtung auf Basis finaler Kostenrechnung erst nach ersten prototypischen Anwendungen im Servicebereich Micro Factory durch Bekleidungsfirmen durchgeführt werden kann.

Die Einzelmodule dagegen können schrittweise die Standardsoftware ergänzen und daher bereits Mehrwert generieren – insbesondere auch durch die Förderung des Einsatzes von 3D digitaler Produktentwicklung und damit verbundener Reduzierung von Prototypen¹⁶ und Verkaufsmustern.

¹⁶ Vgl. (Shen, Y. 2020), S.125

3.5 Virtuelles Framework zur On-Demand-Integration von Services und konfigurierbare Schnittstellen für die Variantenkonstruktion in Drittsystemen (AP4)

Wie in Kapitel 3.2 beschrieben, besteht der Gesamtablauf für die Erstellung eines individuellen Bekleidungsprodukts mit Variantenkonfiguration aus vielen Einzelschritten. Zur Integration eines automatischen Ablaufs im Backend nach Anforderung des Kunden im WEB-Shop ist jeder dieser Einzelschritte als Service mit einer API auszustatten.

Hierzu wurde der in Abbildung 25 dargestellte Workflow auf Basis einer im WEB Frontend vorausgewählten Produktvariante vollständig automatisiert. Hierzu wurden, wie im nachfolgenden Kapitel beschrieben, folgende Teilschritte als Einzelservices umgesetzt:

1. API für die Verarbeitung eines kundenindividuellen Avatars im ECO-Shoring Demonstrator inkl. Größenschätzung und Alterations.
2. „CAD_MtM“ Service für die Auswahl einer Produktvariante und die Anwendung eines kundenindividuellen Maß-Satzes („Order“) auf die Alterations eines vorher hinterlegten MtM Schnitts inkl. Vernähung
3. „Vidya 3D-Simulation“ Service für die automatische 3D-Differenz-Simulation auf Basis einer vorher hinterlegten Referenzsimulation mit anschließendem Rendering
4. Service für den automatisierten Export eines ECO-Shoring Pakets und Bereitstellung eines Links für den 3D Viewer.
5. Erweiterung des Assyst Queue-Managements um die ECO-Shoring Queue

Das Ergebnis eines solchen automatisierten Ablaufs der Services wird durch den im Kapitel 3.6 beschriebenen ECO-Shoring Demonstrator dargestellt (siehe auch Anhang A3).

Service zur Anbindung des virtuellen Scanners inkl. für externen Maßgenerierungsservices und MtM-Anpassung

Im Rahmen einer Unterbeauftragung der Firma Humanetics (ehemals Avalution) wurde ein Web-basierter virtueller Scanner erweitert für die Kalkulation der Differenzmaße (Alterations) des erzeugten Avatars zu einer vorgegebenen Referenzkörpermaßen.

Durch die Eingabe einiger weniger Eigenschaften (Geschlecht, Alter, Gewicht, Körpergröße, Typ) wird mithilfe statistischer Daten (gewonnen aus den Reihenmessungen von Populationen – z.B. Deutschland) ein kundenindividueller Avatar erzeugt. Der so erstellte Avatar wird dann vermessen und die ermittelten Körpermaße hinterlegt. In einem 2. Schritt erfolgt die Größenschätzung und die daraus zu ermittelten Differenzmaße. Der vollständige Datensatz wird anschließend durch den virtuellen Scanner verschlüsselt, so dass die personenbezogenen Daten nicht unverschlüsselt zum ECO-Shoring Demonstrator übertragen werden (Abbildung 29).

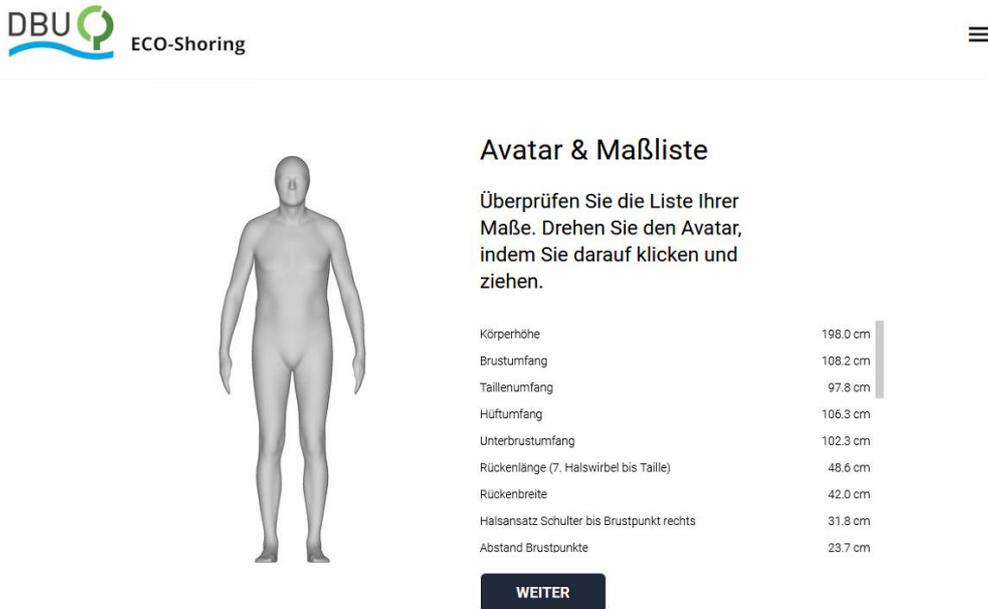


Abbildung 29: Ergebnis des Virtuellen Scanners von Avaluation

Der Service zur Anbindung des virtuellen Scanners nimmt den im vorhergehenden Kapitel beschriebenen verschlüsselten Datensatz entgegen und führt einen automatischen Import in die Assyst Datenbank des ECO-Shoring Demonstrators durch (Abbildung 30).

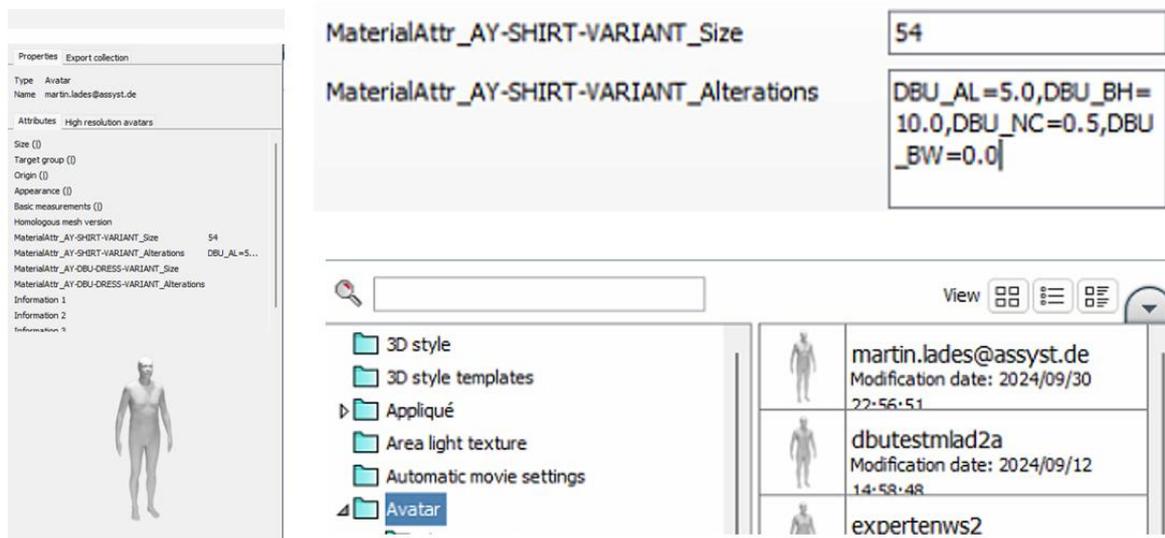


Abbildung 30: Importierter Avatar im Backend des ECO-Shoring Demonstrators

Eine implementierte Avatar Verschlüsselung dient hierbei der Sicherstellung des Schutzes bei der Verarbeitung und Weitergabe persönlicher Daten und Merkmale. Dazu gehört unter anderem, aber nicht exklusiv, die Körperform, die Optik sowie die Veränderungsmaße für die Bekleidung.

Durch die Verschlüsselung ist gewährleistet, dass keine unbefugten Dritte Zugang zu personenspezifischen Merkmalen erlangen. Der Import findet durch das Herunterladen der bereits verschlüsselten Avatar Daten statt. Dies findet über die zugehörige ECO-Shoring Webseite statt. Die Daten umfassen den Avatar selbst sowie eine passende Lizenzdatei. Beide werden benötigt um die Daten ins Zielsystem zu importieren. Avatar und Lizenzdatei sind aufeinander abgestimmt, eine andere Kombination dieser Daten funktioniert nicht. Diese Dateien werden automatisch passend für das

Zielsystem (Backend ECO-Shoring Demonstrator) angelegt. Nur das Zielsystem ist berechtigt diese Daten zu importieren und zu verarbeiten. Einmal vom System verschlüsselt importierte Daten können nicht wieder unverschlüsselt das System verlassen. Die Verschlüsselung ist durch State-of-the-Art Algorithmen umgesetzt und abgesichert.

Eine Veränderung der Daten ist nicht möglich und technisch so gelöst, dass die dafür verantwortlichen Routinen und Algorithmen abgeschaltet sind. Somit stellen Avatar und Lizenz eine unveränderliche Einheit dar. Nur während der Verarbeitung des Avatars im berechtigten Zielsystem wird der Avatar entschlüsselt. Dabei werden keine Daten auf die Festplatte, auch nicht temporär, gespeichert. Alle nötigen Operationen finden ausschließlich im Arbeitsspeicher / Grafikspeicher des Systems statt.

API zur automatischen Abarbeitung der 3D Simulation (ECO-Shoring Queue)

Die im vorhergehenden Kapitel 3.4 entwickelten Module für die automatische Abarbeitung eines CAD-MTM Auftrags (Berechnung der gradierten Geometrien eines Produktes mit anschließender Anwendung der Alteration Rules) und des Moduls zur Ausführung der Simulation und des Renderings im Hintergrund kann nun ein automatischer Prozess implementiert werden. Hierzu wurde die Assyst Scheduler Standardkomponente um eine „ECO-Shoring Queue“ erweitert.

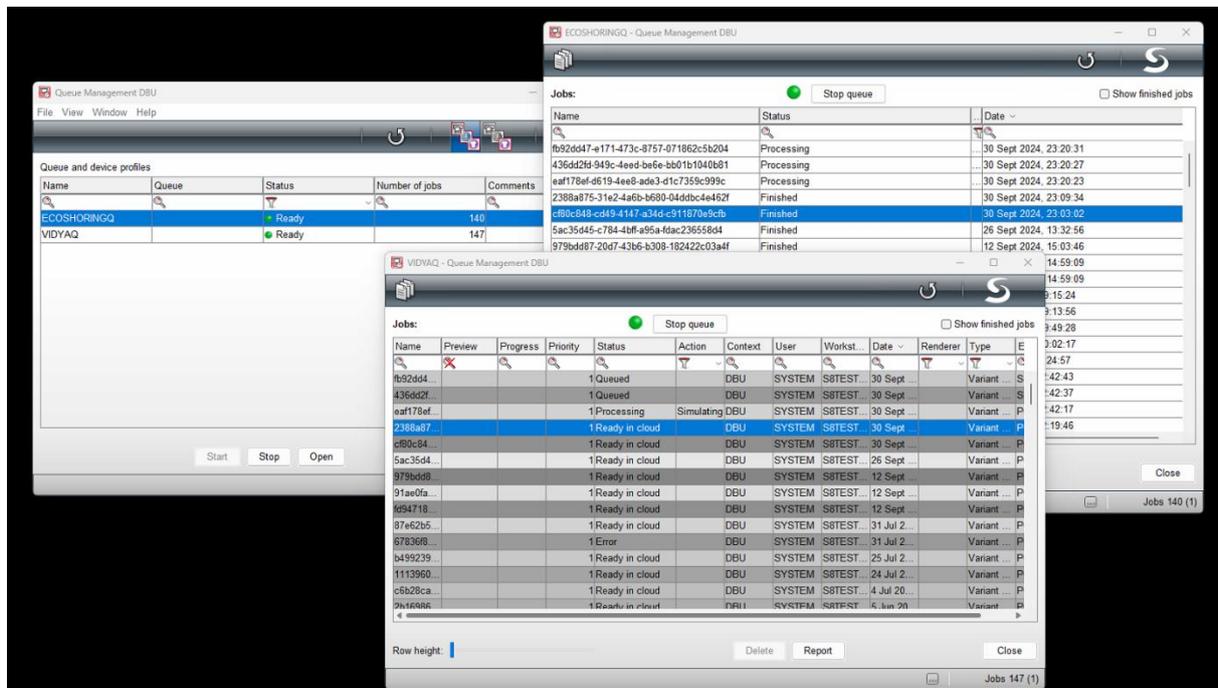


Abbildung 31: ECO-Shoring Queue-Management

In Abbildung 31 sind die Screens der Queuemangement Applikation während der Abarbeitung von ECO-Shoring Aufträgen im Backend des ECO-Shoring Demonstrators dargestellt. Die dazugehörige technische Infrastruktur ist schematisch in Abbildung 38 dargestellt. Diese besteht aus einer Serverkomponente mit dem Assyst Scheduler, der Backend-Datenbank und ein oder mehreren Backend-Engines, die die eigentliche Arbeit des Simulierens und des Renderns durchführen. Nachdem der vorbereitete Datensatz für ein Produkt in der Backend Datenbank gespeichert worden ist kann von der Kommandozeile durch Aufruf einer JSON Datei, welche die verschiedenen API Befehle und Parameterwerte enthält (die JSON Order Datei) ein Job in den Scheduler an die ECO-Shoring-Queue geschickt werden. Dieser Job enthält dann alle für die Abarbeitung erforderlichen Parameter (Abbildung 28) inkl. des Variantennamens und der vorher zu hinterlegenden manuell durchgeführten Referenzsimulation. Es können beliebig viele Jobs gleichzeitig oder nacheinander abgeschickt werden, die dann entsprechend des Eingangs in einer Warteschlange gelistet werden. Im Anwendungsfenster rechts oben der Abbildung 31 erkennt man, das sich gerade drei aktive Jobs in der Queue befinden,

wobei sich zwei in der Warteschleife befinden und ein Job gerade abgearbeitet wird. Die Abarbeitung des Jobs erfolgt auf einer der konfigurierten Engines, die sobald frei sich den nächsten Job holen und abarbeiten, d.h. zunächst das CAD-MTM Modul ausführen und dann den Job in die Vidya Queue weiterleiten. In dieser Queue erkennt man im Anwendungsfenster unten der Abbildung 31 erkennt man ebenfalls die beiden Jobs in Warteschleife und einen aktiven Job. In dieser Queue gibt es die Stati „Queued“, „Simulating“, „Rendering“, „Exporting“ und „Ready in Cloud“. Der Ablauf eines Jobs kann im Reiter „Job History“ des Jobeigenschaften nachvollzogen werden (Abbildung 32).

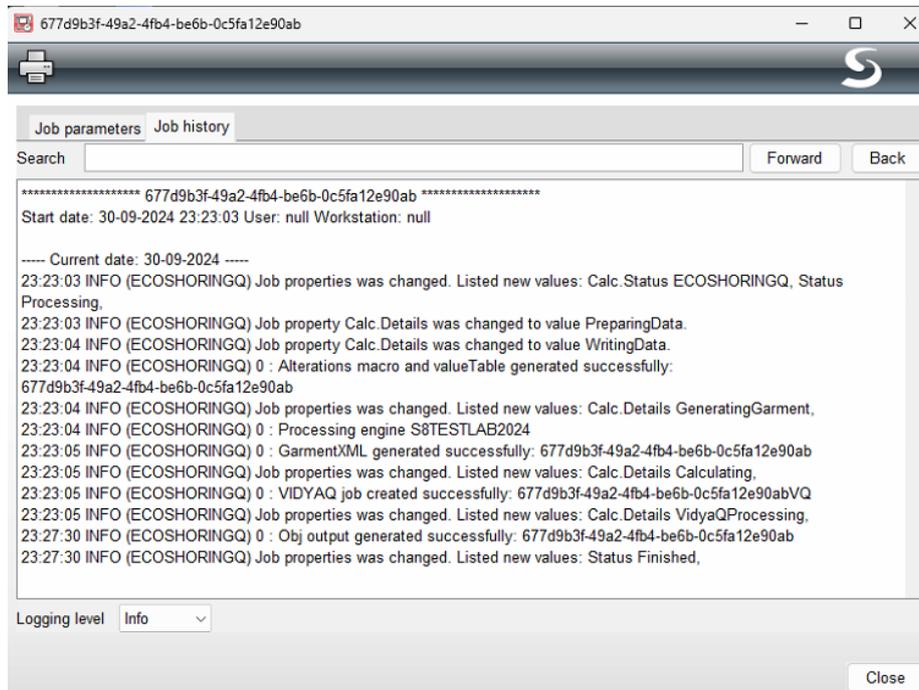


Abbildung 32: Ablaufprotokoll ECO-Shoring Queue

Das für den ECO-Shoring Demonstrator implementierte WEB-Frontend (siehe Kapitel 3.6.1) stellt die interaktive Eingabemöglichkeit der Jobparameter bereit und erzeugt daraus im Backend eine entsprechende JSON Auftragsdatei, die dem Assyst Scheduler übergeben wird. Daher können im Queue Management des Backends jederzeit die gerade eingestellten Jobs vom ECO-Shoring Frontend eingesehen und gegebenenfalls beeinflusst werden (Orchestrierung der Services), wie beispielsweise Stop und Restart, die Jobpriorität ändern, etc. Beispielsweise wurden die in Abbildung 31 dargestellten Aufträge über das ECO-Shoring Demonstrator Frontend eingestellt.

Service für Datenexport und Darstellung

Der letzte Schritt in der automatischen Abarbeitung eines Jobs ist der Export des Datenpakets mit Verlinkung zu der Datenbank des Backends sowie der Generierung eines entsprechenden QR Codes. Der Anwender erhält für jeden abgeschlossenen Job optional eine E-Mail mit dem http Link (Abbildung 33). Dieser Link kann im Browser auf einem Endgerät aufgerufen werden (Windows PC, Apple MAC oder mobile Geräte mit iOS oder Android). Es wird damit eine Anwendung gestartet welches einen 3D Viewer bereitstellt mit dem das Produkt interaktiv auf dem Endgerät betrachtet werden kann inkl. Drehung und Zoom Funktion (Abbildung 34). Dieser Link kann auch mit mobilen Geräten direkt durch einen Scan des QR Codes aufgerufen werden. Des Weiteren enthält das Datenpaket auch den gesamten für die Erzeugung der Produktionsdaten erforderlichen Datensatz des Produktes (Abbildung 35).



CLOUD-17254858: Data package shared
noreply to: martin.lades

30.09.2024 23:27
[Show Details](#)

Dear Ladies and Gentlemen,

User "Vidya.assyst" has shared Vidya data package with you.

You can access it here:

https://cloud-golive.com/data-package/viewer/S326951159440385a4a3775d2aa046142eae046b6/0588a749-abe0-4e00-b69d-4f2b4b976b54AY-SHIRT_AY-SHIRT-VARIAN

Yours,
Assyst Cloud

Abbildung 33: E-Mail Benachrichtigung des Anwenders des ECO-Shoring Demonstrators

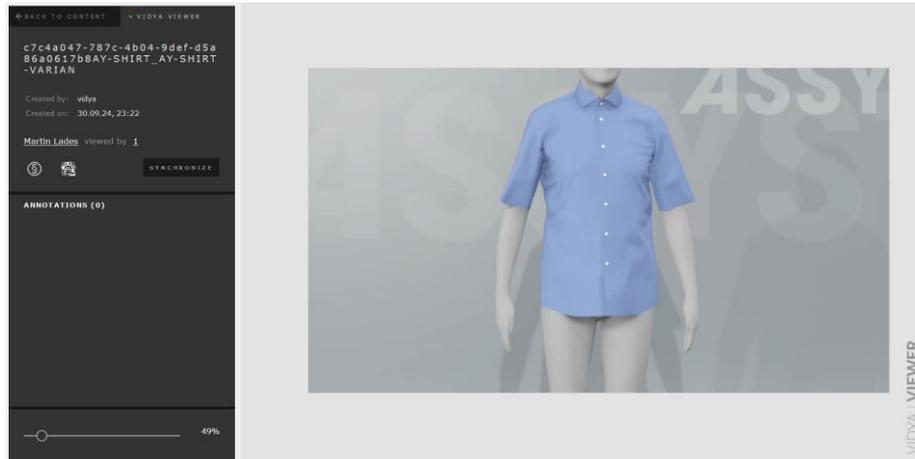


Abbildung 34: 3D Viewer im WEB Browser

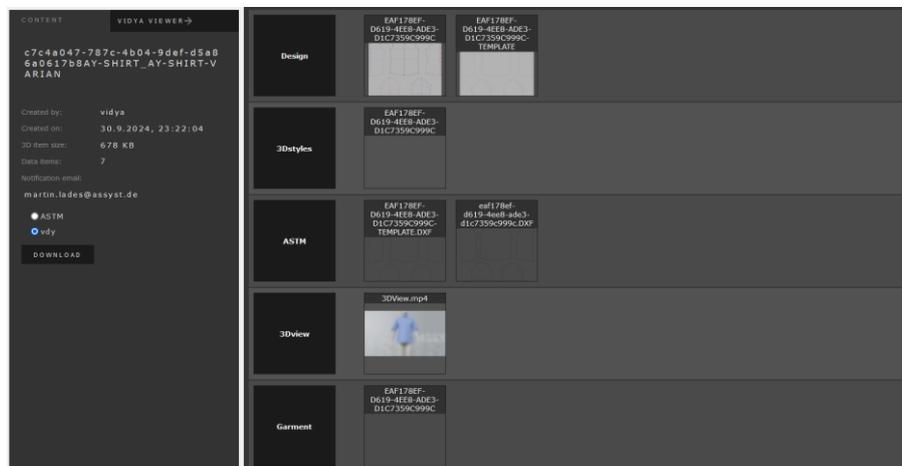


Abbildung 35: 2D/3D Datenpaket inkl. 2D Daten im ASTM Format

Nutzung des Frameworks für Konvektions- und MTM-Produktentwicklung

Unabhängig von der Anwendung als Daten-Vorbereitung für die ECO-Shoring Plattform kann nun dieses Framework auch für die Produktentwicklung von MtM-Bekleidung (z.B. Passformanalysen bei Entwicklung eines neuen Produktes) verwendet werden.

Es ist nun möglich, nach der Definition der Alterations deren Auswirkungen nicht nur in 2D zu prüfen sondern sofort eine 3D Simulation auszulösen ohne manuellen Simulationsprozess. Aufgrund der meist großen Anzahl an Variationen (Varianten und Wertebereich/Kombination mit den Alterations) verkürzt dies den Prozess der Produktentwicklung signifikant.

Nach dem initialen Entwurf des Schnitts inkl. Gradierung und Alterations für alle Varianten wird der Anwender in einem iterativen Entwicklungsprozess repräsentative Werte von Alterations wählen und

entsprechende Jobs generieren. Diese werden im Hintergrund auf den separaten Engines abgearbeitet. Parallel dazu kann der Anwender derweil an einem anderen Produkt bzw. an einer anderen Variante weiterarbeiten. Nach Abschluss der Jobs wird der Anwender die Ergebnisse prüfen und gegebenenfalls die Definition der Alterations anpassen und den Überprüfungsprozess anschließend erneut anstoßen. Dieser iterative Prozess wäre ohne den neu implementierten Automatismus sehr zeitaufwändig und daher in der industriellen Praxis kaum anwendbar.

Ebenso konnte diese Automatisierung des Prozesses auch dazu genutzt werden, die ECO-Shoring Referenzprodukte selbst in ihren Varianten zu prüfen und somit das Konzept verifiziert und evaluiert werden.

3.6 Demonstrator für regionale Entwicklungs- und Produktionsnetzwerke für MtM und Online Darstellung ECO-Shoring unter Berücksichtigung des Schutzes von Endkundendaten (AP5)

Der Kernbestandteil des Projektes ist ein Demonstrator, welcher die durchgängige Prozesskette mit allen ihren Elementen konkret realisiert. Dieser Demonstrator unterteilt sich in zwei wesentliche Komponenten, die in die Demonstratorumgebung des Multifunktionslabors der DITF eingebunden wurden:

1. MtM-Demonstrator für ausgewählte MtM-Bekleidungsprodukte geeignet für eine On-Demand Produktion
2. Demonstrator für Ökobilanzierung

3.6.1 MtM-Demonstrator für Bekleidungsprodukte einer On-Demand Produktion

Wie im Kapitel 3.2 beschrieben, besteht eine automatisierte durchgängige Prozesskette aus zwei grundlegenden Komponenten und muss viele bereits verfügbare Module der digitalen Bekleidungsentwicklung und Produktion einbinden.

Die erste Komponente „Datenvorbereitung“ beinhaltet die Entwicklung eines Bekleidungsproduktes für individualisierte MtM Produktion unter Einbindung des Variantenkonzepts sowie die Vorbereitung des Produktes für einen automatisierten Prozess (Abbildung 3). Dieser Schritt wird unabhängig von der Plattform auf Standard-3D-CAD-Arbeitsplätzen umgesetzt und erfordert daher dieselben Werkzeuge und Lizenzmodule wie sie auch klassisch für die 3D Bekleidungsentwicklung genutzt werden. Das Ergebnis wird im Backend der Demonstrator Umgebung als vollständiger Datensatz abgelegt.

Die zweite Komponente „MtM-Demonstrator“ realisiert den automatisierten Ablauf eines WEB-basierten Angebots und Verkaufs eines individualisierten Bekleidungsproduktes auf Basis der im Kapitel 3.5 entwickelten Frameworks.

Ein solcher Verkaufsvorgang aus Sicht des Kunden stellt sich wie folgt dar (Abbildung 36):

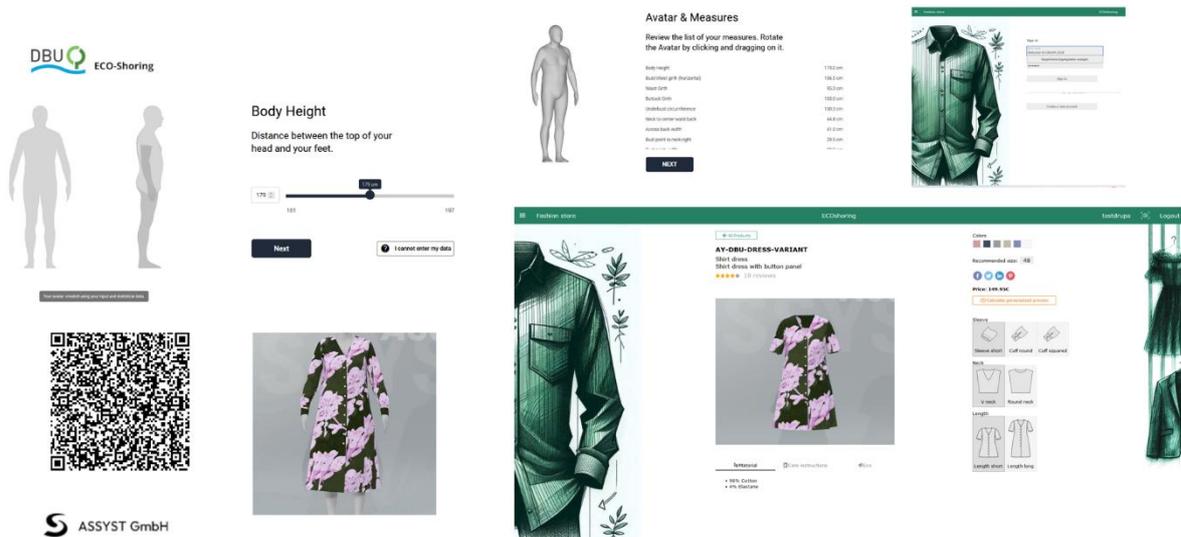


Abbildung 36: ECO-Shoring Demonstrator – Beispiel-Screenshots zum Ablauf einer Kundensession

1. Erstellung eines Kunden Accounts (Email Adresse) durch die Erstellung eines individuellen Avatars auf Basis des virtuellen Scanners von Avalution.
2. Anmeldung am ECO-Shoring Demonstrator mit diesem individuellen Kundenaccount.
3. Beim Login werden automatisch nur die dem Geschlecht zugeordneten Produkte dem Kunden angeboten: z.B. das Herrenhemd.
4. Durch Auswahl des Produktes werden die für dieses Produkt konfigurierten Varianten unterteilt in Variantengruppen angezeigt: Lang/Kurzarm, Manschettentyp, Kragentyp.
5. Durch Auswahl einer Variante wird ihm als Preview ein nicht-individualisiertes Bild dieser Variante angezeigt.
6. Durch Klick des Buttons „Calculate personalized Preview“ wird nun im Hintergrund der im Kapitel 3.5 beschriebene vollautomatische Prozess ausgelöst.
7. Sobald das Ergebnis vorliegt, erhält der Anwender eine Benachrichtigung per E-Mail mit http-Link zum 3D-Viewer des individualisierten Produktes, welcher sowohl im WEB Browser auf PC/MAC als auch auf einem mobilen Gerät ausgeführt werden kann.
8. Der Schritt 6 kann für beliebige Variantenkombinationen erneut durchgeführt werden. Sobald man eine Variantenkonfiguration auswählt, für die bereits eine Kalkulation durchgeführt worden ist, bietet der umgewandelte Button „Show personalized Preview“ den 3D Viewer auch direkt, in der WEB Umgebung des Demonstrators integriert, an.
9. Des Weiteren ist im WEB Shop auch eine Übersicht über alle bereits individuell vorbereiteten Produkte umgesetzt. Durch Anwahl des entsprechenden Produktes bzw. durch Scan des dort abgebildeten QR-Codes (MLAD-ABB-QRCode) kann der 3D Viewer der entsprechenden Variante wieder aufgerufen werden. Gleichzeitig erhält der Kunde eine E-Mail mit dem Link zum Aufruf des 3D Viewers.

Die Screenshots zu diesem Ablauf sind im Anhang A3 dargestellt. In Abbildung 37 sind die damit verbundenen wesentlichen Eigenschaften des Demonstrator-Ablaufs zusammengefasst, welche im Rahmen des ECO-Shoring Projektes umgesetzt wurden.



Abbildung 37: ECO-Shoring Demonstrator – Zusammenfassung der wichtigsten Eigenschaften

Der ECO-Shoring Demonstrator in seiner Gesamtheit besteht somit aus beiden Komponenten. Die **erste Komponente (Assyst „ECO-Shoring Services“)** dient zur Datenvorbereitung und besteht aus einer **um die ECO-Shoring Services erweiterte Standard Assyst Entwicklungsumgebung** inkl. der ECO-Shoring Queue als Erweiterung des Assyst Schedulers. Die **zweite Komponente „Plattform für ECO-Shoring“** wie in Abbildung 38 dargestellt. Diese Plattform setzt sich aus einem Backend und einem WEB-basierten Frontend zusammen. Die auf den separaten Assyst Systemen vorbereiteten Datensätze können durch Export/Import auf die ECO-Shoring Plattform übertragen werden und sind dadurch dann im ECO-Shoring WEB-Shop verfügbar. Es ergibt sich also nach der Produktifizierung des Gesamtsystems die Möglichkeit, die Systeme bestehender Assyst Kunden um ein Modul „ECO-Shoring Services“ zu erweitern. Auf jedem entsprechend erweiterten Assyst System können dann ECO-Shoring Produkte für die Plattform vorbereitet und durch Export/Import auf die Plattform übertragen werden. So können dann von verschiedenen Firmen bzw. Dienstleistern entwickelte Produkte eingebunden werden bzw. ein Dienstleister kann Produkte eines Unternehmens für die Bereitstellung im ECO-Shoring Demonstrator vorbereiten.

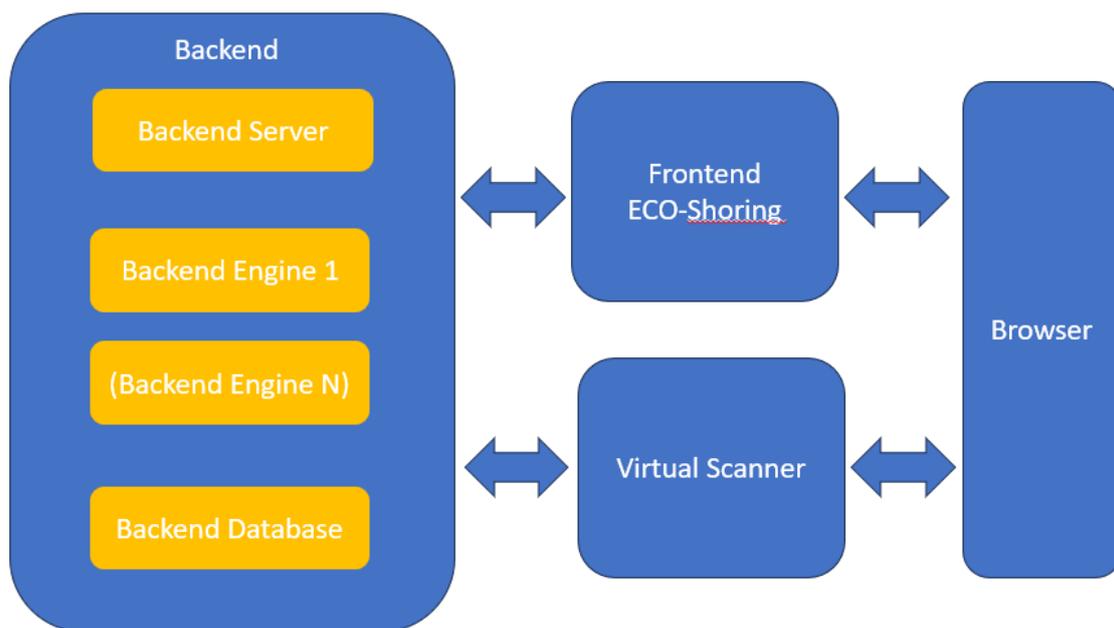


Abbildung 38: Technische Infrastruktur des ECO-Shoring Plattform

Für die Umsetzung des MtM-Demonstrators in den Labor-Räumlichkeiten der DITF mussten diverse IT-Voraussetzungen geschaffen werden. Für den initialen Schritt, die MtM-Produkterstellung, musste ein Assyst-3D-CAD-Arbeitsplatz eingerichtet werden. Hierfür wurde die entsprechende Software installiert und für die Variantenkonfigurationserstellung und die MtM-Automatisierung konfiguriert. Parallel hierzu wurden Vorkehrungen getroffen, um die Daten der vorhandenen Digitalisierungslösungen der DITF für Personen und Stoffe in den Entwicklungsprozess einbinden zu können.

Die WEB-basierte Demonstration des eigentlichen MtM-Frameworks erfolgt anschließend publikumswirksam und zugänglich auf großformatigen Bildschirmen mit direkter Touch-Interaktions-schnittstelle. Die Erreichbarkeit der MtM-Webanwendungen wurde über die Konfiguration der Firewall der Demonstrationsumgebung sichergestellt.

Die im MtM-Demonstrator erzeugten Produktionsdaten können im Multifunktionslabor der DITF unter der Ausnutzung der vorhandenen Einzellagencutters und Industrienähmaschinen zugeschnitten und prototypisch vernäht werden. Durch die Konfiguration der IIOT-Schnittstelle des Labors ist es möglich die Design-, Konfigurations- und Produktionsprozesse sensorisch hinsichtlich Energieverbrauch zu überwachen. Diese Daten können für die Verfeinerung der Modellparameter bei der Ökobilanzierung herangezogen werden.

3.6.2 Demonstrator für Ökobilanzierung im Multifunktionslabor der DITF Denkendorf

Da das Thema Ökobilanzierung und der zugrundeliegende Variantenraum sehr weitläufig und komplex sind, wurde im Projekt ein Ökobilanzierungs-Demonstrator erarbeitet, der es erlaubt, die Modellparameter zu variieren und somit individuelle Szenarien des MFCA-Gesamtmodells zu berechnen. Damit lassen sich Ursachen und Wirkungen im Prozess anschaulich und nachvollziehbar darstellen und bilden somit eine verlässliche Basis für Überlegungen hin zu einer nachhaltigen Bekleidungs-Produktion.

Die Beschreibung des Demonstrators wird anhand der folgenden Themen erläutert:

- Dateninput über Excel Interface
- Welche Parameter über das Interface variiert werden können
- Vordefinieren der detaillierten Parameter für die Prozesse des Gesamtmodells
- Übernahme der Daten mittels Live-Links in Umberto Modell
- Berechnung unterschiedlicher Szenarien mit Umberto und Interpretation der Ergebnisse

Der Demonstrator basiert auf einer Excel-Datei, die als Schnittstelle für die Auswahl und Modifikation von Szenarien dient. Nutzer können über Dropdown-Menüs das jeweilige Szenario auswählen, womit man die im Interface bereitgestellten Parameter variieren kann. Dazu gehören Parameter wie die Art der Virgin-Baumwolle (Standard oder Bio), die Effizienz der Produktion (gut oder schlecht), der Strommix (regenerativ mit 0,1 kg CO_{2-Eq}/kWh oder fossil mit 1,0 kg CO_{2-Eq}/kWh), Transportwege, Überhänge, Verpackungen und die Tragezyklen der Kleidungsstücke. Diese Parameter sind in Abbildung 39 dargestellt.

Außerdem wurden für die Prozesse des Gesamtmodells in Umberto einige Parameter bezüglich Energie und Produktivität vordefiniert, sodass für detaillierte Parameterwerte wie gut/schlecht mehrere Eingaben gleichzeitig im Hintergrund übernommen werden können.

Nach dem Speichern der Excel-Datei werden die Modellparameter mittels Live-Links in Umberto automatisch aktualisiert, wodurch die neuen Ergebnisse direkt berechnet werden können. Die Werte für CO₂-Emissionen werden dabei je nach Rohstoff (Bio oder Standard) und dem jeweiligen Strommix bei der Auswahl der einzelnen Szenarien in Umberto manuell eingestellt.

Es werden drei Hauptszenarien untersucht: „Eco-Shoring“ (Szenario A), „Fast Fashion“ (Szenario B) und „Ultra Fast Fashion“ (Szenario C). Ziel des Demonstrators ist es, datenbasierte Einblicke in die Effizienz und Umweltbelastung der einzelnen Szenarien zu geben, insbesondere in Bezug auf CO₂-Emissionen, Energieverbrauch, Materialeffizienz und Transportaufwand. Die Berechnungen der CO₂-Werte wurden mittels des Gesamtmodells durchgeführt, welches bereits in Kapitel 3.3 detailliert erläutert wurde.

				Aktuell:	714	711	775	776	4	8	5	650	Eco-Shoring	Fast Fashion	Ultra Fast Fa
				9	1	2	3	4	5	6	7	8	A	B	C
Ergebnis für funktionelle Einheit															
Einheit															
100 Tragezyklen		kgCO2eq/kg													
Rohmaterialien	Baumwolle virgin		Bio		Bio	Standard	Bio	Bio	Standard	Bio	Bio	Standard	Bio	Bio	Bio
	Baumwolle virgin	kgCO2eq/kg	0,6		0,6	4,53	0,6	0,6	4,53	0,6	0,6	4,53	0,6	0,6	0,6
	Baumwolle recycelt	kgCO2eq/kg	0		0,18	3,62	3,62	0,86	0,00	0,00	0,00	0,18			
	Effektivität		gut		gut	schlecht	schlecht	schlecht	schlecht	schlecht	gut	gut	gut	schlecht	schlecht
Energie	Strommix		regenerativ		regenerativ	Kohle	Kohle	Kohle	Kohle	Kohle	regenerativ	regenerativ	regenerativ	Kohle	Kohle
	Strommix	kgCO2eq/kWh	0,1		0,1	1	1	1	1	1	0,1	0,1	0,1	1	1
Transport virgin	Aufschlag Tara	%	10,00		0	0	0	0	0	0	0	0	10	10	10
	Entfernung LKW groß	km	1.000,00		0	0	0	0	0	0	0	0	1000	2000	2000
	Entfernung Kleinsporthaler	km	0,00		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Entfernung Containerschiff	km	2.600,00		0	0	0	0	0	0	0	0	2600	5000	5000
	Entfernung Zug elektrisch	km	0,00		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Entfernung Luftfracht	km	0,00		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Transport recycelt	Aufschlag Tara	%	0,00		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Entfernung LKW groß	km	0,00		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Entfernung Kleinsporthaler	km	0,00		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Entfernung Containerschiff	km	0,00		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Entfernung Zug elektrisch	km	0,00		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Entfernung Luftfracht	km	0,00		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Spinnerei	Anteil Baumwolle recycelt		0,00		75%	75%	75%	75%	0%	0%	0%	75%	0%	0%	0%
Transport Veredlung	Aufschlag Tara	%	10,00		10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
	Entfernung LKW groß	km	1.500,00		500	500	500	500	500	500	500	500	1500	1500	1500
	Entfernung Kleinsporthaler	km	0,00		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Entfernung Containerschiff	km	0,00		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Entfernung Zug elektrisch	km	0,00		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Entfernung Luftfracht	km	0,00		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Überhänge	Überhänge	%	10,00		10,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	10,00	10,00	10,00	20,00	30,00
Verpackung	Messe Folie/Verpackung je kg Produkt	kg	0,05		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	0,05	0,50
Transport Produkt	Entfernung LKW groß	km	1.500,00		1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1500	1500	500
	Entfernung Kleinsporthaler	km	0,00		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Entfernung Containerschiff	km	0,00		0	0	0	0	0	0	0	0	0	20000	0
	Entfernung Zug elektrisch	km	0,00		1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	0	0	0
	Entfernung Luftfracht	km	0,00		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8000

Abbildung 39: Demonstrator zur Berechnung von Szenarien, User Interface und Ergebnisse

Erläuterung der Szenarien A, B und C:

- Die Szenarien wurden ohne Recycling unter Einsatz von Biobaumwolle gerechnet, um einen Vergleich zu Szenario 5 und 8 (Datensatz 6 und 7) zu ermöglichen. Die Datensätze wurden jedoch gezielt um die Thematik Transport ergänzt.
- Speziell Szenario C „Ultra Fast Fashion“ soll die Folgen des Transports, der hohen Verpackungsanteile und der hohen Überhänge als Folge der Rücksendungen erläutern.

Szenario A beschreibt die ECO-Shoring Produktion in regionalen Netzwerken. Es handelt sich um eine nachhaltige Produktionsmethode, bei der Kleidung in der Nähe der Konsumenten hergestellt wird, was die Transportwege verkürzt und den Energieverbrauch minimiert. Die effizienten Produktionsprozesse sorgen für niedrige Emissionen und eine hohe Produktqualität, was die Lebensdauer der Kleidungsstücke verlängert. Dies wurde über die Nutzungszyklen (100) im Gesamtmodell berücksichtigt.

In Szenario B, dem Fast-Fashion-Modell, liegt der Schwerpunkt auf der Massenproduktion in weit entfernten Produktionsländern. Die langen Transportwege, bei denen LKW und Containerschiffe verwendet werden, tragen erheblich zum CO₂-Ausstoß bei. Der Einsatz von Kohlestrom in der Produktion in Kombination mit ineffizienten Produktionsbedingungen, wodurch die Produktivität sinkt, führt zu erhöhten Emissionen. Zusätzlich werden durch die Massenproduktion große Mengen an Kleidungsstücken minderer Qualität hergestellt. Die geringe Produktqualität spiegelt sich in der geringen Anzahl von Nutzungszyklen (10) im Gesamtmodell wieder. Zusätzlich kommen erhebliche Mengen an Überhängen hinzu.

Diese Überhänge resultieren häufig in hohem Abfallaufkommen, da unverkaufte Produkte vernichtet werden müssen. Die Rücksendungsquote ist aufgrund des schnellen Wechsels von Modeartikeln und der geringen Qualität der Produkte höher als in Szenario A. Durch den globalen Versand entstehen große Mengen an Emissionen. Dies gilt auch für die retournierten Produkte, da jedes davon erneut transportiert und aufbereitet werden muss, oder direkt entsorgt wird da die Aufbereitung nicht möglich oder unwirtschaftlich ist.

Szenario C, das Ultra-Fast-Fashion-Modell, beschreibt eine beschleunigte Version von Szenario B, bei der die Produktion und Lieferung noch schneller erfolgen. Hier liegt der Schwerpunkt auf der extrem schnellen Markteinführung neuer Kleidungsstücke. Szenario C geht davon aus, dass Luftfracht verwendet wird, um die Lieferzeiten zu verkürzen, was zu sehr hohen CO₂-Emissionen führt. Darüber hinaus steigen die Verpackungsaufwendungen, da Produkte oft einzeln verpackt und verschickt werden. Die hohen Rücksendequoten sind in diesem Szenario besonders problematisch. Der Anteil der Überhänge ist hier mit 30% am höchsten: Ultra Fast Fashion generiert sehr viele überschüssige Produkte, die entweder zurückgesandt oder entsorgt werden müssen. Diese Überhänge tragen wesentlich zu Materialabfall und zusätzlichem CO₂-Ausstoß bei, da retournierte Ware oft nicht weiterverkauft wird. Analog zum Fast Fashion Modell, werden die Kleidungsstücke mit minderer Qualität hergestellt, was zu kurzen Nutzungszyklen (10) im Gesamtmodell führt.

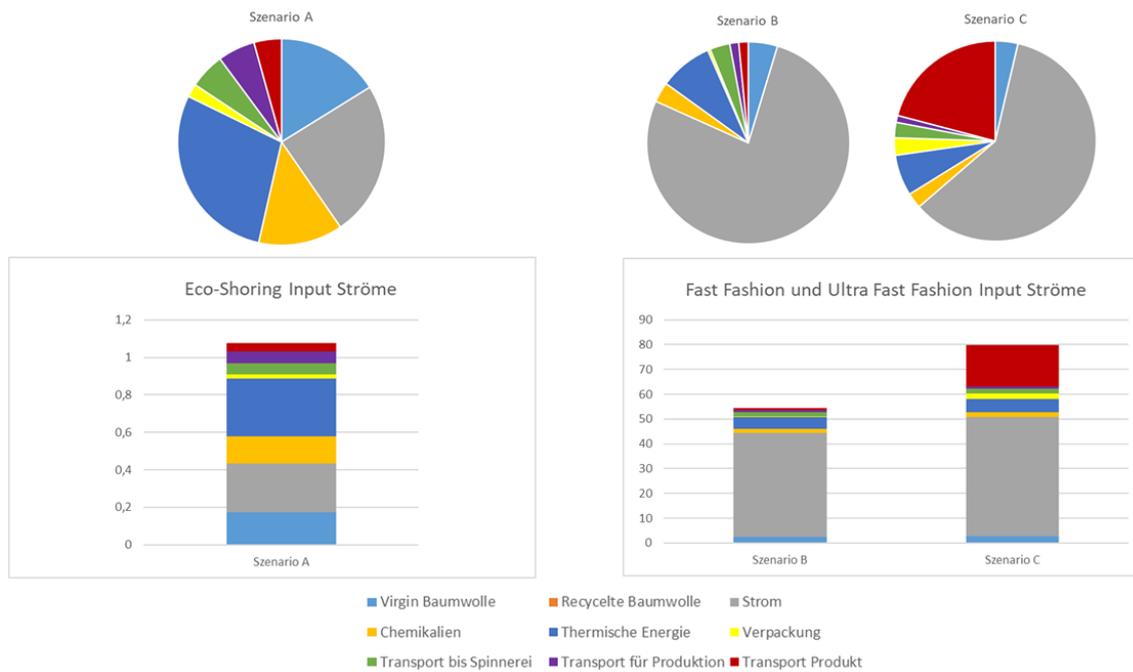


Abbildung 40: PCF-Input-Ströme Szenario A, B, C [in kgCO₂-Eq]

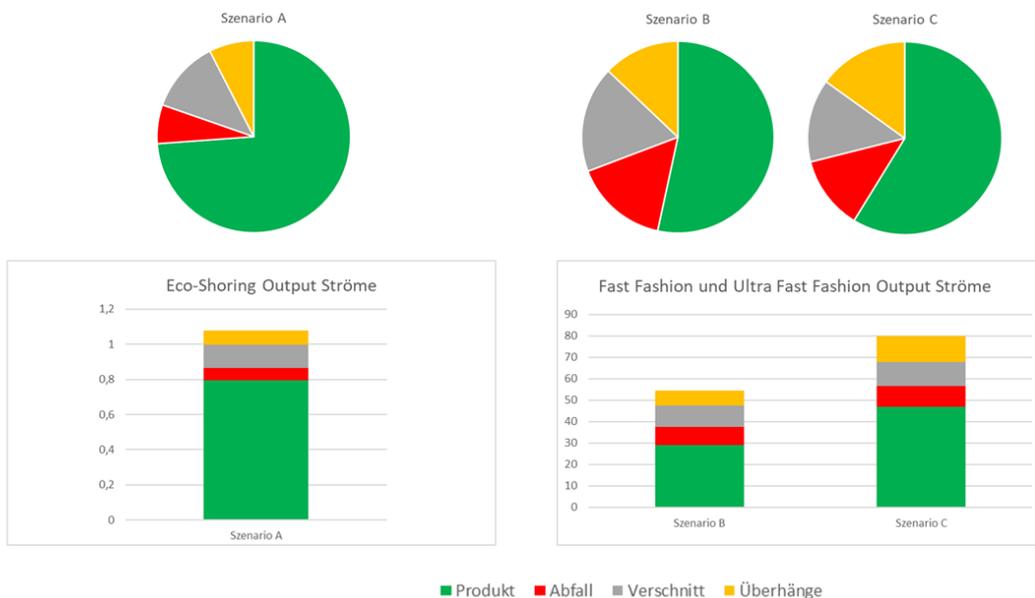


Abbildung 41: PCF-Output-Ströme Szenario A, B, C [in kgCO₂-Eq]

Die Erläuterung der Ergebnisse greift folgende Aspekte auf:

- Vergleich der Gesamtwerte für die funktionelle Einheit 100 Tragezyklen
- Welche Anteile verursachen die Unterschiede
- Speziell Vergleich von Szenario B und C, hier Einfluss Flugtransport mit erhöhter Masse durch Einzelverpackung und hohem Überhang

Im Rahmen der Untersuchung der verschiedenen Produktionsszenarien wurde ein Vergleich der CO₂-Fußabdrücke sowie eine Betrachtung der Input- und Output-Ströme der Szenarien durchgeführt. Die Analyse bewertet die Umweltbelastungen der unterschiedlichen Produktionsansätze und zeigt die Faktoren auf, welche die größten Unterschiede in den Emissionen verursachen.

Das Szenario A zeigt mit einem CO₂-Fußabdruck von 1,1 kg CO_{2-Eq} pro 100 Tragezyklen den geringsten Wert. Dies ist auf mehrere Faktoren zurückzuführen, insbesondere auf die Nutzung von regenerativem Ökostrom. Dadurch beträgt der graue Anteil des ersten Balkens in Abbildung 40 nur einen Bruchteil der Anteile der anderen beiden Szenarien, wobei die unterschiedliche Skalierung der Szenarien in der Abbildung zu beachten ist. Außerdem ermöglicht die lokale Produktion (Nearshoring) kurze Transportwege und reduziert so erheblich den CO₂-Ausstoß durch den Transport. Auch der geringe Einsatz von Verpackungen und die reduzierte Menge an Überhängen von 10% tragen zu diesem niedrigen Wert bei.

Abbildung 41 zeigt die Output-Ströme. Der größte Teil der verwendeten Materialien in Szenario A wird effektiv in fertige Produkte umgesetzt, Der Großteil der Ressourceneinsätze mündet hier im Produkt, während Abfälle und Verschnitt im Vergleich zur Größenordnung der anderen beiden Szenarien wiederum minimal sind.

Im Gegensatz dazu weist Szenario B einen deutlich höheren CO₂-Fußabdruck von 54,3 kg CO_{2-Eq} pro 100 Tragezyklen auf. Die Analyse der Input-Ströme verdeutlicht, dass hier ein erheblicher Teil der Emissionen durch Ineffizienzen und den fossilen Strommix entsteht. Vergleicht man die Skalierungen der Diagramme, sieht man, dass ein weiterer großer Teil der Emissionen durch den Transport entsteht, da die fertigen Waren über große Distanzen verschifft werden müssen. Die Output-Ströme zeigen, dass die energieintensive Produktion etwa 120-mal mehr Abfall generiert als im ECO-Shoring-Szenario (A) und entsprechend viel mehr CO₂ im Produkt, den Überhängen und dem Verschnitt stecken.

Szenario C weist mit 79,8 kg CO_{2-Eq} pro 100 Tragezyklen den höchsten CO₂-Fußabdruck auf. Dies ist wiederum vor allem auf die Nutzung von Kohlestrom und den vermehrten Einsatz von Luftfracht zurückzuführen, da die extrem kurzen Lieferzeiten in diesem Modell nur durch den Einsatz schneller, aber emissionsintensiver Transportmethoden erreicht werden können. Die Input-Ströme für Szenario C zeigen, dass der Anteil der Transportemissionen signifikant höher ist, als in den anderen Szenarien. Darüber hinaus wird aufgrund der schnellen Modezyklen und der kleinen Transporteinheiten eine große Menge an Verpackungen benötigt, was die Umweltbelastung weiter erhöht.

Die Output-Ströme offenbaren ebenfalls eine hohe Menge an Abfällen und Verschnitt. Die Überhänge fallen ebenfalls hoch aus, da viele Kleidungsstücke, die aufgrund der geringen Tragezyklen, produziert werden und wegen der geringen Qualität der Produkte oft entsorgt werden müssen.

Ein besonders auffälliger Unterschied zwischen Szenario B und C besteht in der Transportart. Während Fast Fashion in Szenario B hauptsächlich auf Seefracht setzt, was ebenfalls hohe Emissionen verursacht, liegt der Fokus in Szenario C stark auf dem noch schädlicheren Flugtransport. Dies erklärt den deutlich höheren CO₂-Ausstoß in Szenario C, insbesondere da zusätzlich zur Luftfracht die Einzelverpackungen und der hohe Anteil an Überhängen den ökologischen Fußabdruck von Ultra-Fast-Fashion-Produkten weiter vergrößern.

Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse der Szenarien, dass Szenario A (ECO-Shoring) durch seine regionalen Produktionsprozesse und den bedarfsgerechten Einsatz von Ressourcen die beste ökologische Bilanz aufweist. Die Input-Ströme in diesem Szenario bestehen zu einem großen Teil aus den Materialien und der eingesetzten Energie, und die Output-Ströme verdeutlichen die effiziente Nutzung der Ressourcen mit minimalem Abfall und Verschnitt. Im Gegensatz dazu verursachen die

Massenproduktion in Kombination mit geringen Nutzungszyklen und die weiten Transportwege in Szenario B und die emissionsintensive Luftfracht sowie der hohe Verpackungsaufwand und die Überhänge in Szenario C erhebliche Umweltbelastungen. Daraus resultieren die wesentlich höheren CO₂-Fußabdrücke in diesen beiden Szenarien. Der CO₂-Fußabdruck von Szenario A mit 1,1 kg CO₂-Eq pro 100 Tragezyklen beträgt im Vergleich zu Szenario C mit 79,8 kg CO₂-Eq pro 100 Tragezyklen daher nur ca. 1,4%. Wenn man die Tragezyklen in Szenario A von optimistischen 100 Tragezyklen auf 50 Tragezyklen halbieren würde, verdoppelt sich der CO₂-Fußabdruck von Szenario A auf 2,2 kg CO₂-Eq pro 100 Tragezyklen, und dann im Vergleich zu Szenario C auf weiterhin sehr niedrige 2,8%.

Der Sustainability Report von SHEIN aus 2023¹⁷ zeigt, dass 40% des PCF auf den Transport zurückzuführen sind und 60% durch das Material und die Herstellung verursacht werden. Dieser hohe Anteil von Transport am Gesamt-PCF wurde im Projekt in Szenario C vorgesehen und im Ultra-Fast-Fashion-Szenario berücksichtigt. Die hierbei gewonnenen Werte fallen im Vergleich zu den realen Zuständen mit ca. 25% Transportanteil noch moderat aus.

3.7 Projektbegleitendes Expertengremium (AP6)

Zur Projektlaufzeit wurde ein Expertengremium aus Vertretern der Modeindustrie, Verbänden, Consultingunternehmen und Softwareanbietern gebildet. Ziel des Gremiums war es, das Projekt durch Vermittlung von Erfahrungen und Wissen aus der Praxis zu begleiten und Themen im Projekt zu akzentuieren, die aus praktischer Sicht besonders relevant sind. Gleichzeitig wurde Input für die entwickelten technologischen Ansätze und Modelle gegeben. Der Austausch mit den Teilnehmern des Expertengremiums erfolgte in online stattfindenden Expertenworkshops und in gezielten bilateralen Gesprächen zur Vertiefung spezieller Themen (z.B. laufende Recycling-Bemühungen der Unternehmen).

Nachfolgend werden die wesentlichen projektrelevanten Erkenntnisse aus den Expertenrunden in separaten, thematisch getrennten Abschnitten präsentiert und deren Auswirkungen auf die Projektfokussierung samt erfolgter Anpassungen erläutert und diskutiert. Diese Anpassungen sind in die weiter oben zusammengefassten Entwicklungen im Projekt geflossen.

Des Weiteren gibt der Input des Expertengremiums Einblicke in praxisrelevante Themen und Problemstellungen, die die Modeindustrie und die in der Wertschöpfungskette der Bekleidungsherstellung involvierten Unternehmen beschäftigen, die jedoch nicht vom Projekt adressiert werden können. Diese Punkte werden in den Anregungen zur weiteren Erforschung im Fazit (Kapitel 6) aufgegriffen.

Fast Fashion, On-Demand Fertigung, Made to Measure

Fast Fashion ist der aktuell vorherrschende Produktionsmodus der Bekleidungsindustrie, der die klassischen, sich saisonal abwechselnden Kollektionen fast vollständig abgelöst hat und den sich seit Jahren steigernden Konsum von Bekleidung bedient. Getriggert wird dieser Trend auch durch den Konsumenten mit dem Wunsch nach immer schnelleren Fashion-Wechseln. Der wiederum durch das Angebot von immer mehr billiger Bekleidung begünstigt wird. Hierbei fallen im Schnitt ca. 20% Überproduktion an. Dies steht eindeutig im Widerspruch zu den gesteckten Klimazielen (siehe Kapitel 2). Der Einfluss einer angestrebten Reduktion der Überproduktion wurde daher in den im Projekt entwickelten Gesamtmodellen ausführlich betrachtet.

Als Gegenentwurf zur Fast-Fashion muss Wertigkeit und Langlebigkeit von Produkten wieder eine wichtigere Rolle bekommen. Eine hohe Qualität der Produkte und eine klare Kommunikation der Vorteile solcher Produkte dem Kunden gegenüber sind wesentliche Voraussetzungen hierfür. Die MFCA-Modelle sind in der Lage konkrete PCF-Werte für Produkte zu liefern, die dem Kunden

¹⁷ Vgl. (Shein 2024)

gegenüber in verständlicher Form, z.B. in Äquivalenten gefahrener PKW-Kilometern, kommuniziert werden können.

Bei entsprechender Qualität und Design der Produkte kann ein positives Verhältnis von Standzeiten zu Nutzungsdauer erreicht werden. Zur Verdeutlichung des Einflusses der Qualität auf die Use-Phase wurde bei der Definition der funktionellen Einheit für die Berechnung der MFCA-Gesamtmodelle die Tragezyklen berücksichtigt. Dies ermöglicht die Akzentuierung der mit einer längeren Nutzungsphase einhergehenden Umweltentlastungspotenziale.

Individualisierung und Passform

Die vom Expertengremium beobachtete Veränderung beim Verbraucher in Bezug auf die Anforderungen an die Passform, konkret der Trend zur Casualisierung von Bekleidung und daher zu einer weniger kritischen Bewertung derselben durch den Kunden, entschärft die Lage bei den NOS-Produkten, was die Retouren angeht. Im höherpreisigen Segment spielt die Passform dennoch eine große Rolle. Aus diesem Grund wurden im Projekt zwei Beispielprodukte (Hemd und Kleid) für die Umsetzung im MtM-Framework von Assyst ausgewählt, die diesem Segment zuzuordnen sind. Die Vorarbeiten im Projekt zu den Workflow-Bausteinen Variantenkonfigurator, 2D- und 3D-Gradierung, die die Grundlagen für die Implementierung im Framework bilden, hatten noch ein einfaches T-Shirt als Gegenstand der Betrachtungen.

Die Individualisierung nach dem MtM-Ansatz ist aus Sicht der Experten aktuell nur ein Randgebiet für die Personen, die aus den Standardgrößen rausfallen und die Individualisierung für einzelne Zielgruppen eher interessant. Es wird aber auch angemerkt, dass die jüngere Käufergeneration sich durchaus durch eine Affinität zu technischen Ansätzen auszeichnet. Diese Affinität kann durch die im Projekt entwickelten Technologien, als Komponenten für einen möglichen innovativen Web-Shop, genutzt werden, um diese Zielgruppe mit einem Individualisierungsangebot zu erreichen und damit helfen Retouren zu reduzieren und die Nutzungsfrequenz zu erhöhen.

Dieser Ansatz kann als Basis für eine weitere Verbreitung in andere Käuferschichten dienen. Das Shopping-Erlebnis und die Qualität der Produkte müssen hierbei die Preisperspektive für den Verbraucher rechtfertigen. Wesentlicher Hebel hierbei kann neben der Qualität die Markenbindung sein.

Virtualisierung und Automatisierung der Prozesse

Während die Produktvirtualisierung im B2B-Bereich bereits auf einem guten Weg ist (Vermittlung der Anmutung und Ästhetik ohne physische Prototypen), herrscht im Bereich B2C noch Handlungsbedarf. Der Konsument muss mehr in den virtuellen Verkauf einbezogen werden. Im Projekt wurde daher eine demonstratorhafte Implementierung eines kundenzentrierten Ansatzes zur Bekleidungsindividualisierung in Form einer möglichen Web-Shop-Komponente entwickelt, die den Kunden direkt involviert, von der Generierung der eigenen Körperdaten/Avatare über die Produktkonfiguration, bis hin zur Visualisierung und Passformbeurteilung. Dies soll die Bindung des Kunden zum jeweiligen Produkt erhöhen und wiederum zu einer häufigeren und längeren Nutzung des Produkts führen, was sich positiv auf die Umweltbilanz auswirkt.

Wesentliche Hebeln zur Reduzierung des PCF, Ökobilanzierung Produktionsmengen

Auch die Unternehmen haben erkannt, dass der verwendete Strommix und die Nutzeffekte der Prozesse einen wesentlichen Einfluss auf den PCF ihrer Produkte haben. Daher sind einige Unternehmen bemüht die Produktionsstätten zu modernisieren und oder mit Ökostrom zu produzieren. Oft scheitern diese Bemühungen heute jedoch an den lokalen Gegebenheiten oder an der hohen zu erwartenden Investitionshöhe.

Als Hotspots bei der Ökobilanzierung werden die Spinnerei und deren Vorstufen, sowie die Use-Phase gesehen. Im Projekt wurden beide Punkte detailliert adressiert. Im Hinblick auf die Kreislauffähigkeit von Produkten wurde das Recycling ausführlich parametrisiert und modelliert. Zur Berücksichtigung der Use-Phase wird die funktionelle Einheit der Tragezyklen in die Modelle eingeführt.

Das Thema Flugtransporte spielt für viele Unternehmen keine große Rolle. Mit dem Aufkommen der neuen erfolgreichen Mittbewerber, die dem Bereich Ultra-Fast-Fashion zuzuordnen sind, rücken diese jedoch in den Fokus. Im Projekt wurden daher spezielle Ultra-Fast-Fashion-Szenarien gerechnet, um den Einfluss von Flugtransporten und großen Mengen an Verpackungsmüll aufzuzeigen.

Recycling

Das Thema Recycling steht bei vielen Firmen noch relativ weit am Anfang. Im Moment wird der Fokus hauptsächlich auf Pre-Consumer-Waste gelegt (z.B. bei Denim-Produkten). Es fällt den Firmen schwer einzuschätzen, ob sich Recycling rechnet oder nicht, wobei Allokationsthemen keine vorrangige Rolle spielen.

Bei der Modellierung und Auswertung wurden die o.g. Themen daher vertieft adressiert, um den Firmen zeigen zu können, welchen Hebel die Qualität der Ausgangsstoffe auf das Recycling haben kann und wie wichtig eine kaskadische Nutzung von Abfällen und die faire Allokation vom PCF zum Produkt/Abfall ist.

Schutz personenbezogener Daten

Zur Beantragung des Projekts wurde der Schutz der personenbezogenen Daten durch Blockchain-Technologie thematisiert und durch einen Unterauftrag im Projekt avisiert. Die Diskussion im Expertengremium hat zwar ein generelles Interesse am Thema Blockchain ergeben, aber auch gezeigt, dass diese Technologie mittelfristig, wegen mangelnder Nachfrage, nicht im Fokus der laufenden Entwicklungen steht.

Wesentlicher Vorteil der Blockchain Technologie ist die Transaktionssicherheit in offenen Netzwerken mit der lückenlosen und manipulationssicheren Nachverfolgbarkeit von Transaktionen. Diesem Vorteil stehen aber inhaltliche und organisatorische Nachteile entgegen. So führt das Übertragen von großen Datenmengen (z.B. Avatare) zu erheblichen Transaktionskosten in öffentlichen Blockchains. Und stellt bei privaten Blockchains große Hürde wegen der anfallenden Kosten und Administrationsaufwand. Des Weiteren bietet die Technologie selbst keine Möglichkeiten, personenbezogene Daten so zu verschlüsseln, dass sie geschützt übertragen werden. Dies ist nur über Erweiterungen möglich.

Um das Thema Schutz personenbezogener Daten im Projekt zu fokussieren, wurde zwischen den Partnern Assyst und Humanetics (ehemals Avalution) ein Konzept erstellt und realisiert, um Kundendaten (Körpermaße, Avatare) sicher zwischen den einzelnen Bausteinen des MtM-Frameworks auszutauschen, verschlüsselt, nicht exportierbar und zeitlich begrenzt. Diese Implementierung wurde auch für den Demonstrator umgesetzt.

4 Ökologische, technologische und ökonomische Bewertung der Vorhabensergebnisse

Im Projekt wurde eine Quantifizierung und Bewertung von Produktionsszenarien von ECO-Shoring/On-Demand-Produktion im Vergleich zu den bestehenden Strukturen der Fast-Fashion dargestellt, um deren Umweltentlastung zu bewerten und Impulse und Orientierung in Richtung Kreislaufwirtschaft und Rückverlagerung zu geben.

Als Ergebnis stehen detaillierte, vorkonfigurierte und parametrisierte **MFCA-Prozessmodelle** für die folgenden Produktionsprozesse zur Verfügung: **Spinnerei, Weberei, Strickerei, Veredlung, Zuschnitt und Konfektion**. Zusätzlich wurden die Umweltbelastungen durch Transport und Verpackung betrachtet.

Die im Modell hinterlegten Parameter erlauben eine detaillierte Konfiguration spezifischer Produkte für sämtliche genannten Prozessstufen. Bei der Herstellung sind der Strommix, Nutzeffekte und Abfallanteile entscheidende Prozessparameter.

Ökologische Bewertung

Die **Spinnerei** ist der zentrale Prozess in der Herstellung von textilen Produkten bei Nachhaltigkeitsbetrachtungen mit dem Fokus auf Kreislaufwirtschaft. Hier erfolgt die Zuführung der recycelten Fasern in die Produktion. Daher wurden speziell die entwickelten Module Spinnerei und Reisserei herangezogen, um eine differenzierte Bewertung des mechanischen Recyclings mittels Reisserei durchzuführen.

Dabei hat sich gezeigt, dass bei großen und variablen Mengen an Abgängen in der Reisserei und Spinnerei die Thematik der Allokation entscheidend ist. Eine Betrachtung der Abgänge als reinen Abfall führt sowohl zu ökologischen als auch ökonomischen Kennwerten, welche nicht vertretbar sind.

So zeigen der PCF von Recyclingfasern Werte zwischen 0,2 - 3,6 kgCO_{2-Eq}/kg. Diese sind zwar immer noch geringer als der PCF von Standardbaumwolle mit ca. 4,5 kgCO_{2-Eq}/kg. Allerdings ist der Wert von Biobaumwolle mit ca. 0,6 kgCO_{2-Eq}/kg kaum merklich zu unterbieten. Und dabei ist die Qualität des erzeugten Garns mit Recyclingfasern immer geringer als die mit 100% virgin Fasern.

Die Varianz an Szenarien alleine in der Spinnerei in Kombination mit Recyclingfaser ist enorm groß. Daher wurden nur eine Auswahl an polarisierenden Szenarien im Rahmen eines Gesamtmodells vertieft, um die relevanten Hebel zwischen Fast-Fashion- und ECO-Shoring-Szenarien zu betrachten. Wenn man als funktionelle Einheit die Herstellung eines Stückes Bekleidung betrachtet, dann ergeben sich Einsparpotenziale in der Größenordnung von ca. 80%. Dabei ist bemerkenswert, dass ein hoher Recyclinganteil von 75% sowohl dem besten als auch dem schlechtesten Szenario zugrunde liegt, es kommt also extrem auf die Randbedingungen an. Die relevanten Hebel für einen guten PCF bei den Herstellungsprozessen sind Strommix, Nutzeffekte sowie Abfallanteile.

Eine große Differenzierung zwischen Fast-Fashion- und ECO-Shoring sind auch die **Transportwege**¹⁸, welche zwischen europäischen Nearshoring Produktionsnetzwerken und Fernost-Produktion direkt und transparent analysiert wurden. Daher wurden mittels des Gesamtmodells **drei polarisierende Szenarien**, ECO-Shoring (A), Fast-Fashion (B) und Ultra-Fast-Fashion (C) untersucht. Neben den unterschiedlichen Transportwegen wurden im Gesamtmodell auch speziell Überhänge sowie die Nutzungsphase mittels der Anzahl der Tragezyklen untersucht.

Unter Berücksichtigung von Überhängen und potenziellen Tragezyklen hat Szenario A mit 1,1 kg CO_{2Eq} im Vergleich zu Szenario B mit 54,3 kg CO_{2-Eq} und Szenario C mit 79,8 kg CO_{2-Eq} pro 100 Tragezyklen Einsparpotenziale von ca. 98%. Wenn man die Tragezyklen in Szenario A von optimistischen 100 Tragezyklen auf 50 Tragezyklen halbiert, verringert sich das Einsparpotenzial nur auf ca. 96%.

Zusammenfassend soll nochmals eine Abschätzung des ökologischen Einsparpotenzials für die in Deutschland jährlich konsumierte Menge an Bekleidung von ca. 940 Mio. kg gegeben werden. Die Analysen haben gezeigt, dass bei der Herstellung von 1kg Bekleidung ca. 20 kg CO_{2-Eq} mittels ECO-Shoring eingespart werden können (Vgl. Abbildung 14).

- Wenn 10% dieser Bekleidungsmenge mittels ECO-Shoring mit 10% geringeren Überhängen produziert werden würden, dann resultierte daraus für Deutschland jährlich ein Einsparpotenzial von ca. 2,1 Mio. t CO_{2-Eq}.
- Bei Fast-Fashion Bekleidung könnte bereits 1% ECO-Shoring mit 20% geringeren Überhängen durch die entscheidende Erhöhung der Tragezyklen (Hebel 10x) ein Einsparpotenzial von ca. 2,2 Mio. t CO_{2-Eq} bewirken.

Diese Ergebnisse liegen deutlich über den im Antrag genannten Abschätzungen (Stand der Technik) von 1,2 bis 1,8 Mio. t CO_{2-Eq} bei einem unterstellten ECO-Shoring-Anteil von 10% bis 15% für den deutschen Markt.

¹⁸ Vgl. (Tilman Altenburg, 2020), S. 24f

Ökonomische Bewertung

Der bisherige Fokus lag stets auf den ökologischen Einsparpotenzialen. Die Kostensicht der MFCA-Modelle unterstützt aber auch hervorragend die finanzielle Planung und Bewertung der Produktionsszenarien.

Die erarbeiteten MFCA-Modelle sind hervorragend als Grundlage zur ökonomischen Bewertung geeignet. Die spezifischen Kosten für Materialien und Energien und Transport müssen nur in bereits bestehenden Modellen beziffert werden. Kosten für Personal und Abschreibungen von Maschinen sind weitere relevante Kostenblöcke. Beispiele wie die Speedfactory von Adidas¹⁹ in Ansbach haben gezeigt, dass eine voll automatisierte Fertigung nach Micro Factory-Ansätzen für ein Mass Customization möglich ist, der wirtschaftliche Erfolg aber auch ein zentrales Element einer solchen Strategie sein muss. Eine voll roboterisierte Fertigung mit den notwendigen R&D Mitarbeitern ist aktuell am Hochlohnland Deutschland nur schwer darstellbar. Es ist dennoch davon auszugehen, dass aufgrund der erarbeiteten Ergebnisse signifikante ökonomische Potenziale realisierbar sind²⁰.

Die ökonomischen Vorteile bei einer Nearshoring Produktion in Europa liegen unter anderem bei **deutlich geringeren Überhängen**. Durch Nearshoring wird es möglich schnelle Nachorderaufträge bei kleinen Losgrößen effizient und mit kürzeren Transportwegen zu produzieren. Dadurch können die Überhänge von derzeit 20% auf 10%, und im Rahmen von MtM sogar gegen 0% reduziert werden. Neben den ökologischen Auswirkungen hat diese auch eine große ökonomische Bedeutung. Zusätzlich zur Vermeidung von Überhängen können höhere Nutzeffekte, geringere Abfallraten sowie geringere Transportaufwendungen (speziell keine Luftfracht) realisiert werden. Zudem ist dann die Herstellung und Verwertung von Recyclingfasern aus ökonomischer und ökologischer Perspektive attraktiv. Der organisatorische Aufwand zum Nachweis sozialer Nachhaltigkeit (Lieferkettengesetz) und für Zertifizierungen kann damit ebenfalls deutlich geringer gehalten werden, was enorme Einsparpotenziale beinhaltet.

Technologische Bewertung

Durch den aktuellen Stand der Technik besteht heute die Option einer vollständigen Digitalisierung der Produktentwicklung von Konzept über Design und Schnitt bis hin zur Produktion inkl. der Erstellung digitaler Verkaufsunterlagen für den Endkunden.

Dies stellt enorme Anforderungen an die Technologie, da im Vergleich zum Maschinenbau nicht feste Formen dynamisch modelliert werden müssen sondern die Form der Bekleidung selbst erst durch die physikalisch basierte Simulation berechnet werden muss als Kernbestandteil des **digitalen Zwillings** des Bekleidungsproduktes.

Die in diesem Projekt entwickelten Methoden und Module für die Automatisierung individualisierter Bekleidung schließen in diesem Rahmen eine noch bestehende relevante Lücke in dieser Technologie für die 3D Bekleidungssimulation.

Der Einsatz eines digitalen Zwillings eröffnet unabhängig vom Nearshoring Ansatz vielfältige Optionen zur Reduktion des ökologischen Fußabdrucks eines Bekleidungsproduktes. Neben einer Einsparung von Prototypen und Verkaufsmustern (welche insbesondere ökonomisch relevant ist jedoch aufgrund der limitierten Stückzahlen ökologisch eine geringere Rolle spielt) ist auch hier die Reduktion von Überhangproduktion hervorzuheben bedingt durch die viel schnellere Produktentwicklung und der damit verbundenen Produktentwicklung viel näher am Markttrend.

Alle beteiligten Softwarekomponenten können einzeln produktifiziert und in anbietbare Lösungen verwandelt werden, da sie teilweise bereits jetzt in den Produktentstehungsprozess integrierbar sind. Mit Pilotprojekten können diese kundenspezifisch angepasst und getestet werden. In welcher Form

¹⁹ Vgl. (Adidas-group 2019)

²⁰ Vgl. (McKinsey&Company 2019), S.83

diese Komponenten angeboten werden, von Lizenzierungs- über Betreibermodelle bis hin zu SaaS-Lösungen, muss allerdings nach Bedarf noch entschieden werden.

Es verbleibt weiter die Herausforderung der Optimierung der Simulationstechnologie für den Prozess einer automatischen nicht-interaktiven Simulation. Die umgesetzten Ansätze erzielen hier in einem weiten Anwendungsbereich gute Ergebnisse, jedoch verbleibt je nach Produkt und Körperform auch weiterhin ein Optimierungsbedarf.

Bewertung im Kontext des aktuellen Stands der europäischen Bekleidungsindustrie

Nach einer jahrzehntelangen Verlagerung von Produktion und teilweise auch Entwicklung von Bekleidung in Niedriglohnländer (Asien, Afrika, Süd- und Mittelamerika) sind die Kapazitäten für Nearshoring-Fertigung in Europa und das hierfür erforderliche Knowhow äußerst limitiert. Somit stellt sich die Frage, inwieweit aufgrund dieser Ausgangslage die theoretisch möglichen Vorteile des Near-Shoring Konzepts in der Praxis realisiert werden können.

In Europa bestehen die Nachteile höherer Lohnkosten und Energiekosten verbunden mit einem Fachkräftemangel und geringen Produktionskapazitäten. Diese Faktoren stehen im Moment dem Aufbau von Nearshoring im Produktionsprozess für große Unternehmen entgegen. Nearshoring kann jedoch auch als Mittel zur Produktionsflexibilisierung gesehen und die begrenzten Produktionskapazitäten somit als wertvolle Ressourcen zur gezielten Reduzierung von Überhängen durch die Reduktion von Ordermengen und den damit verbundenen Kosten eingesetzt werden (**Dual Sourcing**).

Die deutsche und europäische Gesetzgebung stellt mit dem Lieferkettengesetz und Gesetzen zur Reduktion von THG-Emissionen, zur Erreichung der gesteckten Klimaziele, hohe Anforderungen an die Produktionsbedingungen der Textilwirtschaft. Den weiter oben dargelegten und quantifizierten Einflüssen der Überhangproduktion als einem wesentlichen Treiber der Emissionen kann durch das Dual Sourcing, im Sinne der Flexibilisierung der Produktion, effektiv begegnet werden. Hierbei können die reaktionsschnellen europäischen Produktionseinheiten nahe am Kunden für die Nachorder eingesetzt werden. Die so gewonnene Flexibilität hinsichtlich Bestell- und damit Produktionsmengen kann die Überhangproduktion in Fernost deutlich minimieren. Damit wird zur Steigerung der Nachhaltigkeit im Prozess, zur Erfüllung der Regularien und zur Optimierung der ökonomischen Rentabilität der Produktion beigetragen.

Aber nicht nur die Gesetzgebung, sondern auch die schnelllebigen Trends, erfordern den Einsatz von effizienten und reaktionsschnellen Design- und Produktionseinheiten nahe am Kunden. Dies stellt einen Anreiz für den Ausbau von Produktionskapazitäten in Europa dar. Damit einhergehend werden auch ein hoher Automatisierungs- und Digitalisierungsgrad der Produktion stimuliert.

Zusammenfassend ist noch einmal auf die **Überhangproduktion als einen wesentlichen Treiber der Emissionen** und somit als einen **zentralen Faktor für die Reduktion des ökologischen Fußabdrucks** durch Nearshoring im Sinne des Dual Sourcing als auch durch den durchgängigen Einsatz eines digitalen Zwillings sowohl kombiniert als auch jeweils unabhängig voneinander hinzuweisen.

5 Verbreitung der Projektergebnisse

Das Projekt ECO-Shoring wurde über eine Laufzeit von 11 Tagen im Rahmen der Drupa 2024, der Weltleitmesse für Print und Packaging, in Düsseldorf auf dem "Touchpoint Textile" vorgestellt²¹. Hierzu wurde das Projekt im Rahmen von Podiums-Vorträgen, Live-Vorführungen und Führungen dem Publikum nähergebracht. Die Vorträge fokussierten sich auf die technologischen Aspekte und Möglichkeiten des im Projekt entwickelten MtM-Frameworks zur On-Demand Produktentwicklung und die Ökobilanzierung der gezeigten Produktionsprozesse. Bei den Vorführungen wurde auf dem

²¹ https://www.drupa.de/de/Programm/Foren/touchpoint_textile (Abgerufen 09.09.2024)

Assyst-Stand des Touchpoints das MtM-Framework zur Konfiguration und MtM-Anpassung von Bekleidung live demonstriert (siehe Abbildung 42). Parallel dazu wurde auf dem zentralen Teil des Touchpoint Textile, der Digital Textile Micro Factory (DTMF), die digital durchgängige On-Demand-Produktion von sportiven Produkten gezeigt (Koordination und Organisation DITF). Am Beispiel der Produktion eines individualisierten DBU-Shirts (Abbildung 44) wurden dabei die Aspekte des ECO-Shorings demonstriert und die Möglichkeiten digital durchgängiger Produktionsmethoden zur Reduktion von Überhängen in lokalen Produktionsstrukturen dargestellt.

Für die Vorführung der Ergebnisse des ECO-Shoring Projekts wurde der Demonstratorablauf wie in Kapitel 3.6.1 beschrieben und im Anhang A3 dargestellt mit den Daten des Besuchers im WEB-basierten ECO-Shoring Demonstrator durchgeführt. Der Besucher konnte somit selbst ein oder mehrere Varianten, für die er sich interessierte, auswählen und die Visualisierung direkt am Bildschirm beurteilen inkl. Passform sowie durch den Scan des QR Codes auf sein mobiles Gerät laden und mitnehmen. Ergänzend – insbesondere im Falle eines Fachbesuchers für Bekleidungsentwicklung – wurde das zugrundeliegende ECO-Shoring Services Framework dargestellt und die Auswirkungen der Alterations anhand der sich für den Besucher ermittelnden Werte erläutert und diskutiert. So zeigte sich auch in der Regel eine Übereinstimmung mit den Erfahrungswerten des Besuchers bzgl. der ermittelnden Konfektionsgröße sowie auch bei den Alterations (z.B. Alteration Armlänge plus 5 und Feedback des Besuchers, dass man Probleme mit der Armlänge beim Hemdeneinkauf hat und häufig auf Sondergrößen zurückgreifen muss). Darüber hinaus wurden in einem vom ECO-Shoring Demonstrator separierten Prozess die Designs von Designer-Stand in das System eingelesen und die Print Ausgabe für den nachfolgenden Produktionsprozess generiert.

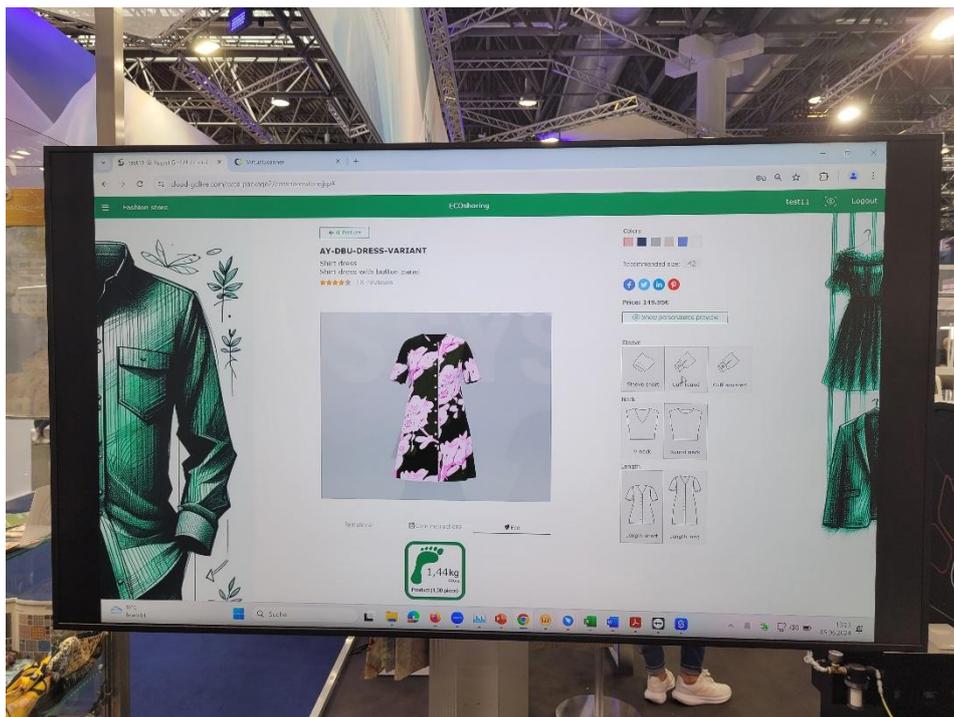


Abbildung 42: ECO-Shoring Demonstrator auf der Drupa 2024

Für die Modellierung der DTMF-Shirt-Produktion, wurden die MFCA-Teilmodelle aus Kapitel 3.3 um die Produktionsstufen digitaler Inkjet-Druck (mit Trocknung und Fixierung), automatisierter Materialtransport über einen Material-Puffer zwischen Druck und Zuschnitt, sowie automatisiertes Materialhandling beim robotischen Absortieren vom Einzellagenzuscchnittstisch erweitert. Zusammen mit den MFCA-Teilmodellen für Design, Zuschnitt und Nähen, konnte ein MFCA-Gesamtmodell erstellt und berechnet werden, siehe Abbildung 43.

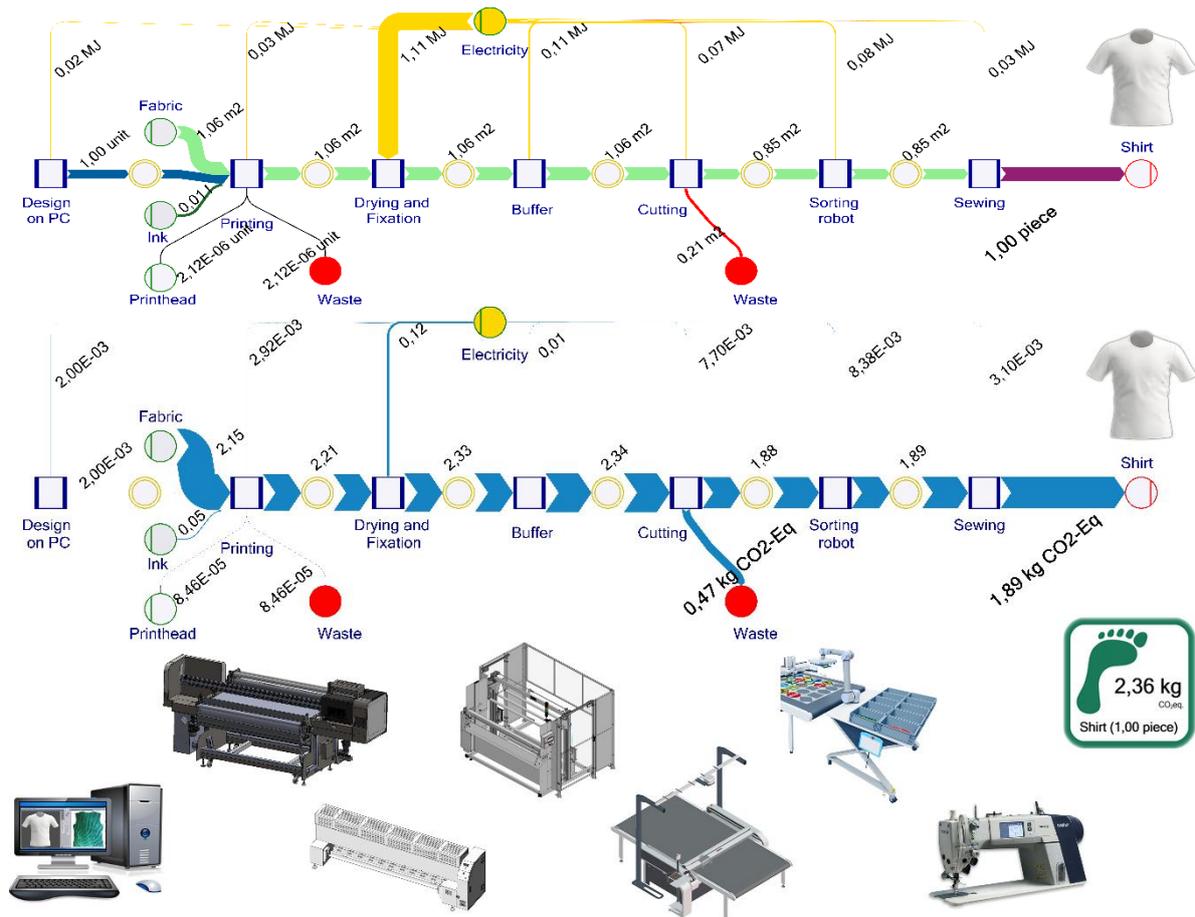


Abbildung 43: MFCA-Modell Drupa'24-DTMF – Mengen- und PCF-Sicht

Die Ökobilanzierung für das auf der Drupa in der DTMF hergestellte DBU-Shirt (Design) ergibt einen PCF von 2,36 kgCO₂-Eq für ein Ausgangsmaterial, das nicht unter ECO-Shoring-Bedingungen hergestellt wurde. Der Drupa-Showcase unterstreicht die Relevanz und Anwendbarkeit der entwickelten MFCA-Modelle für die Bewertung von On-Demand-Produktionskonzepten.

Nachfolgend werden die einzelnen Produktionsschritte der voll vernetzten und digital integrierten On-Demand-DTMF-Produktion vom Design bis zum fertigen Produkt kurz dargestellt. Abbildung 44 zeigt die beschriebenen Produktionsschritte (ohne Design) in chronologischer Abfolge am Beispiel des DBU-Shirts.



Abbildung 44: Drupa'24 - DTMF-Produktion DBU-Shirt

Schritt 1: Kreativität/Design:

Ohne Kreativität und Design – kein Markterfolg. Für das DBU-Shirt wurde ein individuelles Textil-Design entwickelt und eine 3D-Simulation zur Abstimmung als virtueller Prototyp vor der Produktion erstellt. Die hieraus generierten Produktionsdaten werden in den Folgeprozessen Inkjet-Druck, Einzellagenzuscchnitt und automatisiertes Absortieren verwendet.

Schritt 2: Inkjet-Druck

Der digitale Textildruck ist eine wichtige Technologie für die On-Demand-Fertigung in der Textilindustrie. Das Bedrucken verschiedener Substrate (Polyester, Baumwolle, Mischgewebe, etc.) mit unterschiedlichen Materialeigenschaften ist eine Herausforderung, um den "Grip" des Stoffes, das Druckergebnis und die Passform des Kleidungsstücks zu gewährleisten.

Schritt 3: Materialtransport - Puffer

Für eine automatisierte Produktion mit kontinuierlichem Materialfluss ist eine Pufferlösung in den Ablauf integriert. Dieser Puffer entkoppelt den kontinuierlichen Druckprozess vom diskontinuierlichen Schneideprozess und synchronisiert die beiden Prozesse in Abhängigkeit von der Materialmenge im Puffer. Für elastische Materialien ist dies eine zentrale Herausforderung.

Schritt 4: Cutting und automatisiertes Materialhandling

Der digitale Einzellagenzuscchnitt ist ein zentraler Baustein in der On-Demand und kundenspezifischen Bekleidungsherstellung. Die direkte Integration eines Cutters mit automatisierter robotischer Sortierung mittels Textilgreifern ist ein zentraler Baustein der Drupa DTMF mit dem Ziel der Personalminimierung und der Steigerung der Materialeffizienz. Hierzu wurden Services für das Nesting, sowie die Schnittweg- und Greifpunkt-Optimierung in die Produktion integriert.

Schritt 5: Konfektion

In der DTMF wurden produkt- und materialspezifische Fügeverfahren, Nähen und Kleben, erprobt. Die hergestellten Zuschnitte des DBU-Shirts wurden zum fertigen Produkt vernäht.

Projekt-Präsentationen

Das Projekt, seine Ziele und Angebote wurden bei vielen Gelegenheiten präsentiert. In der folgenden Tabelle 6 sind die Veranstaltungen, auf denen die Projektziele und erarbeiteten Angebote explizit im Fokus standen und vorgestellt wurden, chronologisch aufgeführt.

Tabelle 6: Veranstaltungen mit ECO-Shoring

Datum	Veranstaltung	Form, Inhalt, Referenten und Zielgruppe
20.10.2022	Ressourceneffizienzkongress Forum 13 – Circular Economy (Karlsruhe)	Fachvortrag „ECO-Shoring als Schlüssel zur Umweltentlastung in der Bekleidungsherstellung“; Dr. Martin Lades (Assyst GmbH)
16.02.2023	DITF Innovationstag (Denkendorf)	Vorführung Körpermaßextraktion und Avatargenerierung für 2D-Schnittanpassung/3D-Produktsimulation für Fachbesucher aus der Industrie (ca. 100 Besucher).
06.07.2023	Expertenworkshop	Online-Sitzung des projektbegleitenden Experten-Gremiums zu Schwerpunktthemen des Projektes ECO-Shoring
30.11.2023	Aachen-Dresden-Denkendorf International Textile Conference 2023	Fachvortrag „ECO-Shoring - Technologie-Plattform für kundenindividuelle "On-Demand" Bekleidung auf Basis digitaler 3D Produktentwicklung“; Dr. Martin Lades (Assyst GmbH)
20.03.2024	DITF Innovationstag (Denkendorf)	Vorführung Vorstufen Projektdemonstratoren zur Ökobilanzierung und Made-to-Measure-Produktentwicklung für Fachbesucher aus der Industrie (ca. 100 Besucher).
29.05.2024	Drupa 2024 – Touchpoint Textile (Düsseldorf)	Fachvortrag „ECO-Shoring – Technology Platform for customer specific “On-Demand” Fashion based on Digital 3D Product Development“; Dr. Martin Lades (Assyst GmbH)
06.06.2024	Drupa 2024 – Touchpoint Textile (Düsseldorf)	Fachvortrag „Product Carbon Footprint Analysis for Digital Textile Micro Factory at drupa touchpoint textile“; Dr. Jürgen Seibold (DITF)
14.07.2024	Tag der offenen Tür – DITF (Denkendorf)	Vorführung Projektdemonstratoren zur Ökobilanzierung und Made-to-Measure-Produktentwicklung im Digitalisierungs-Labor der DITF für breite Öffentlichkeit (ca. 2000 Besucher).
25.07.2024	Expertenworkshop	Online Abschlussveranstaltung des projektbegleitenden Experten-Gremiums mit Schwerpunkt Ökobilanzierung

Zusätzlich zu den Projekt-Präsentationen wurde während der gesamten Projektlaufzeit mehrfach über Pressemeldungen und Social-Media auf das Projekt ECO-Shoring hingewiesen (Beispiele siehe Abb. 62 im Anhang).

6 Fazit

Die Kernziele des vorliegenden Projektes

- Ökobilanzierung und Quantifizierung der Umweltentlastung im Gesamtprozess des Nearshorings und der On-Demand-Produktion durch Reduktion von Bekleidungsmüll und Produktionsressourcen gestützt durch neue Technologien
- Entwicklung neuer, digital integrierter durchgängiger Produktentstehungsprozesse für Kleinserienfertigung und MtM im On-Demand-Business vom Endkunden bis zur Produktion
- Demonstratorhafte Integration der digitalen Prozess-Komponenten in eine skalierbare Technologie-Plattform.

wurden vollständig erreicht und umgesetzt.

Das Projekt hat gezeigt, dass es durch die konsequente Anwendung von ECO-Shoring-Strategien in Produktion und Recycling, unter Berücksichtigung der Use-Phase, möglich ist, den PCF von Bekleidung um bis zu 98% zu reduzieren. Wesentliche Faktoren dabei sind die Verwendung von Ökostrom bei der Produktion, die Steigerung der Nutzeffekte der involvierten Produktionsprozesse, die Reduktion der Überhänge, sowie die Steigerung der Nutzungsdauer von Bekleidung, da diese einen besonders großen Hebel hat. Bei kreislauffähigen Produktionsszenarien ist zusätzlich die Kaskadennutzung von Abfällen und die Qualität der Ausgangsmaterialien von ausschlaggebender Bedeutung. Außerdem wurden im Projekt durch die gesonderte Betrachtung von Transport- und Verpackungsaufwänden die ökologischen Gefahren von Ultra-Fast-Fashion-Geschäftsmodellen aufgezeigt.

Die im Projektverlauf entwickelten und implementierten MFCA-Modelle zur Auswertung von Produktions-, Recycling- und Use-Phase-Szenarien, ermöglichen eine detaillierte ganzheitliche Sicht auf die Bekleidungsproduktion. Es können ausführliche Szenarien formuliert, gerechnet und gegenübergestellt werden, um die wesentlichen ökologischen und ökonomischen Hebel zu identifizieren und die Produktion hinsichtlich relevanter Faktoren gezielt zu optimieren. Dabei lassen sich die komplexen Zusammenhänge zwischen Ursachen und Wirkungen im System anschaulich darstellen.

Das im Projekt entwickelte MtM-Framework ermöglicht die Konfiguration, Visualisierung und Herstellung von kundenindividuellen Bekleidungsstücken in Bezug auf die Passform und adressiert damit die wesentlichen ökologischen Hebel der Überhangreduktion und der Verlängerung der Nutzungsdauer. Hierbei wird der Kunde zur Produkt- und Markenbindung direkt in den Produktentstehungsprozess eingebunden. Dieser Ansatz zielt auf eine technologieaffine Zielgruppe und ein Produktsegment ab, dass die Preisperspektive rechtfertigt.

Im ECO-Shoring Demonstrator wurden ausschließlich die innovativen neuen Komponenten integriert und somit auf eine umfangreiche Einbindung von Standardkomponenten für WEB Shops (User Management, Content-Management, Bezahlsystem, ...) verzichtet. Des Weiteren wurde auch auf den bereits als Standardtechnologie verfügbaren Prozess der Konfiguration der Optik eines Produktes verzichtet und auf der Drupa nur getrennt vom ECO-Shoring Demonstrator gezeigt. Für eine vollständige Produktifizierung des Gesamtprozesses und der Organisation des Betriebs einer ECO-Shoring Plattform sind daher noch umfangreiche Produktifizierungsmaßnahmen erforderlich. Einzelkomponenten der entwickelten Technologien (z.B. die Erweiterungen des Assyst Schedulers bzw. die Verschlüsselungstechnologie Avatar) sind jedoch mit geringem Aufwand produktifizierbar und generieren daher zeitnah Mehrwert.

Unabhängig vom ECO-Shoring Konzept dienen die erzielten Projektergebnisse der Verbesserung der 3D Simulationstechnologien von Bekleidung und den damit verbundenen Anwendungen. Somit wird deren Einsatz in der Branche zur Reduktion von Prototypen und Verbrauchsmuster gefördert mit einer daraus resultierenden entsprechenden Umweltentlastung.

In einem praxisnahen Demonstrator in Form einer Digital Textile Micro Factory wurde gezeigt, wie eine digital durchgängige Produktionsanlage zur On-Demand-Herstellung von kundenindividualisierten Produkten ohne Abschriften implementiert werden kann. Hierbei wurde die direkte Involvierung des Kunden in den Produktentstehungsprozess, die Automatisierung und Optimierung der Produktion auf einen Betrieb mit minimaler Personalbesetzung fokussiert dargestellt.

Weiterhin wurde anhand des DTMF-Beispiels bestätigt, dass die im Projekt entwickelten Prozess-Modelle durch flexible Kombination und die vorhandenen Erweiterungsmöglichkeiten in der Lage sind, eine breite Vielfalt an ECO-Shoring-relevanten Produktionsszenarien abzudecken und für diese verlässliche Aussagen über die zu erwartenden Umweltbelastungen zu liefern. Damit lassen sich Produktionsszenarien bereits im Vorfeld planen und Varianten durchrechnen, um die ökologisch und ökonomisch sinnvollsten Lösungen im Produktionsprozess zu implementieren.

Der Ausnutzung der im Projekt quantifizierten Entlastungspotenziale stehen in der Praxis diverse Hürden im Weg. Die Bemühungen der Unternehmen zur Steigerung der Nutzeffekte und zur Verwendung von Ökostrom in der Produktion scheitern heute häufig an hohen Investmentaufwänden und den lokalen Gegebenheiten auf den Energiemärkten. Finanzielle Förderungen und entsprechende Regulatorik können wichtige Anreize für eine Rückverlagerung von Teilen der Produktion schaffen. Beispielhaft sei hier die Thematik des Flugtransports von Einzelbestellungen über große Entfernungen genannt, um entsprechenden Geschäftsmodellen mit hohen Umweltbelastungen entgegenzuwirken und die Akteure zu einer Produktion nahe am Kunden zu bewegen.

Zur Vermeidung von Abschriften erhofft sich die Modeindustrie große Einsparpotenziale (ökonomisch und ökologisch) von der Verbesserung der Fehldisposition und der Prognose-Sicherheit. Die hierfür benötigten zuverlässigen Marktvorhersagen und die Verfügbarmachung von Entscheidungsgrundlagen in der Wertschöpfungskette weisen jedoch noch immer erhebliche Defizite auf. Der gezielte Einsatz von Methoden der künstlichen Intelligenz kann helfen bessere Vorhersagen für die Produktionsplanung zu treffen. Hierfür muss die Datenqualität gesteigert und die Daten im gesamten Wertschöpfungsnetzwerk durchgehend digital gesammelt und für Auswertungen verfügbar gemacht werden. Die Möglichkeit der Monetarisierung der hierfür benötigten Zusatzaufwände über datengetriebene Geschäftsmodelle sollte ausführlich erforscht und konkretisiert werden.

Zur Steigerung der Tragezyklen und der damit einhergehenden Reduktion an Bekleidung muss es gelingen, den Trend nach immer schnelleren Modewechseln zu durchbrechen. Es wird empfohlen gezielte Maßnahmen zur Sensibilisierung des Kunden für die Themen der Nachhaltigkeit, speziell in Bezug auf die Modeindustrie, zu fördern und Innovationen auf dem Gebiet von nachhaltiger Modeproduktion zu popularisieren.

Der Schlüssel zur erfolgreichen Umweltentlastung mittels ECO-Shoring liegt in der nachhaltigen und transparenten Herstellung in Europa, wodurch auch eine ökologische und ökonomische Umsetzung von Recycling erst attraktiv wird. Viele der für die Kundenindividualisierung notwendigen Softwarelösungen sind bereits am Markt verfügbar, wurden durch die Entwicklungen im Projekt erweitert und können in die Industrie transferiert werden. Für die effiziente digital durchgängige Fertigung nahe am Kunden stehen flexible Micro Factory-Konzepte zur Verfügung. In Zukunft müssen verstärkt Hürden der Produktifizierung dieser neuen Technologien überwunden werden. Damit kann es gelingen, eine nachhaltige Produktion nach ECO-Shoring Ansätzen zu realisieren und damit die maximal möglichen Umweltentlastungspotenziale zu erschließen.

7 Literaturverzeichnis

- [Adidas-group 2019] Prestigeprojekt am Ende: Adidas schließt Speed-Factory. Adidas-group, verfügbar unter <https://www.produktion.de/wirtschaft/prestigeprojekt-am-ende-adidas-schliesst-speed-factory-327.html>, Abgerufen 09.09.2024
- [Comarch 2019] DIE ZUKUNFT DES EINKAUFENS – DIE WICHTIGSTEN TRENDS IM EINZELHANDEL HEUTE UND 2030; Studie von COMARCH TANDAR TNS, https://www.comarch.de/files-de/file_53/Comarch_TNS_Studie_Zukunft_des_Einkaufens.pdf
- [ECommerce 2020] Abschlussbericht ECommerce: “Effektive ökologische Umweltentlastung durch Digitalisierung der Wertschöpfungskette zwischen Hersteller, Händler und Endkunde in Online-Handel von Bekleidung“, Az 34611/01 DBU, 2020
- [Geneva, I. L. 2019] The future of work in textiles, clothing, leather and footwear. International Labour Organization 2019
- [Global Fashion 2022] Scaling Circularity - Lessons learned from the Circular Fashion Partnership for building pre-competitive collaborations to scale upstream circular fashion systems, <https://globalfashionagenda.org/wp-content/uploads/2022/12/Scaling-Circularity-November-2021.pdf>, 2022, Abgerufen 09.09.2024
- [Hiß, S. 2023] S.Hiß, 3D-Gradierung als innovativer Ansatz für die Made-to-Measure-Bekleidungsproduktion – Aufbau und Analyse von neuen Made-to-Measure-Prozessbausteinen zur personalisierten Schnittanpassung mit 3D-Gradieransatz und individualisierten Avataren, 2023, Masterarbeit, HS Reutlingen, Fakultät Texoversum
- [Materials Market Report, 2024] Materials Market Report, Textile Exchange, <https://textileexchange.org/app/uploads/2024/09/Materials-Market-Report-2024.pdf>, September 2024, Abgerufen 24.09.2024
- [McKinsey&Company 2019] The State of Fashion 2019; Studie von McKinsey&Company, https://www.mckinsey.de/~ /media/mckinsey/locations/europe%20and%20middle%20east/deutschland/news/presse/2018/2018-11-29%20state%20of%20fashion/181128_stateoffashion.pdf
- [McKinsey&Company/GFA 2020] Fashion on Climate, “How the Fashion Industry can urgently act to reduce its Greenhouse Gas Emissions“, 2020, McKinsey & Company and Global Fashion Agenda, verfügbar unter <https://www.mckinsey.com/~ /media/mckinsey/industries/retail/our%20insights/fashion%20on%20climate/fashion-on-climate-full-report.pdf>
- [Shein 2024] 2023 Sustainability and Social Impact Report; <https://www.sheingroup.com/corporate-news/company-updates/2023-sustainability-and-social-impact-report/>, Zugriff am 09.09.2024
- [Shen, Y. 2020] 3D Technology and Tailored Clothing. 3rd International Conference on Global Economy, Finance and Humanities Research.
- [Stern 2017] Stern (2017), „H&M verbrennt tonnenweise unverkaufte Kleidung“, Abgerufen am 09.09.2024 von <https://www.stern.de/wirtschaft/news/h-m-verbrennt-tonnenweise-unverkaufte-kleidung-7663888.html>

- [Stipic/Seibold 2020] N.Stipic, J. Seibold, Model for Quantification of Environmental Impact of Textile Products within Webshops, X International Conference Industrial Engineering and Environmental Protection, Zrenjanin, 2020, Seiten 294-301, ISBN:978-86-7672-340-9, verfügbar unter <http://www.tfzr.uns.ac.rs/iizs/files/IIZS%202020%20Proceedings.pdf>
- [Texprocess 2019] *So wird Bekleidung in Zukunft produziert*. Frankfurt am Main: Texprocess Internationale Leitmesse für die Verarbeitung textiler und flexibler Materialien.
- [Tilman Altenburg 2020] Tilman Altenburg, X. C. (2020). Exporting out of China or out of Afrika? Automation versus Relocation in the Global Clothing Industry. Bonn: Deutsches Institut für Entwicklungspolitik.
- [UBA 2021] "Kleider mit Haken" - Fallstudie zur globalen Umweltinanspruchnahme durch die Herstellung unserer Kleidung, Umweltbundesamt Mai 2021, verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/uba_kleider_mit_haken_bf.pdf
- [ZIM 2015] 3D-Grading - Entwicklung und Realisierung von neuen Methoden und Verfahren zur automatisierten Überprüfung, Optimierung und Erzeugung der Gradierung von Bekleidungsschnitten auf Grundlage von 3D-Körperformen, Abschlussbericht, EP131099, Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand, Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz.

Anhang

A1 Auszug aus dem ECommerce Abschlussbericht (Grundlagen Bekleidungsentwicklung)

ECommerce

Abschlussbericht

Seite 33 / 55

Grundlagen

Bekleidung wird heute zu nahezu 100% weltweit computergestützt auf Basis von 2D Schnitten entwickelt (in einem auf die Konstruktion von Bekleidung spezialisierten CAD System). Dies bedeutet, dass von jedem Bekleidungsprodukt ein digitaler 2D Schnitt (Abbildung 21 – rechts) mit einer daraus abgeleiteten Schnitt-Maßstabelle vorliegt. Diese Schnitt-Maßstabelle entspricht der Körper-Maßstabelle des Referenzkörpers, für den dieses Bekleidungsprodukt entwickelt worden ist. Für die Produktion werden die 2D Schnitte dann vom CAD System automatisch in die für das Produkt vorgesehenen Größen transformiert – man spricht von „Grädierung“ – wodurch automatisch eine Schnitt-Maßstabelle für alle Größen entsteht. In Abbildung 19 erkennt man wie Schnittteile wie in Abbildung 21 in automatisch gradierten Formen; sie sind somit auf kleinere und größere Größen umgerechnet.

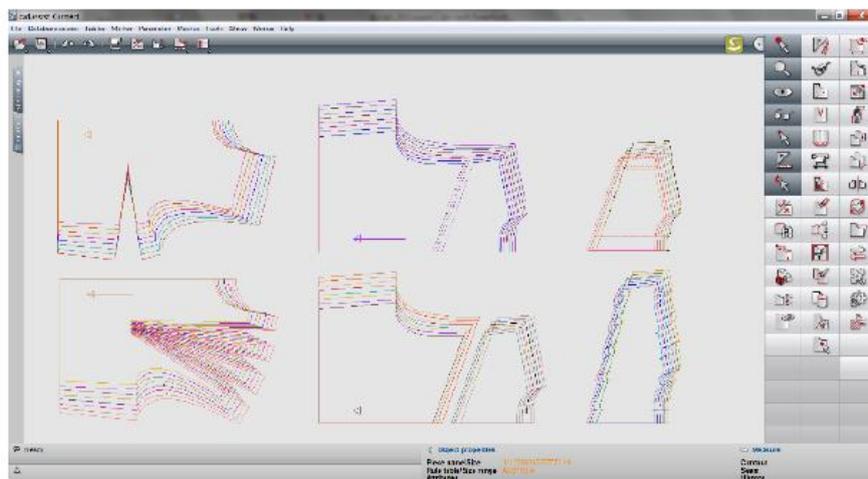


Abbildung 19: Gradierte Schnittteile im CAD

Die 2D Schnittteile werden in einem weiteren Arbeitsschritt dann mit minimalen Platzverbrauch (manuell oder automatisiert) auf einer 2D Stoffbahn platziert und anschließend aus dem Stoff ausgeschnitten und zu einem Bekleidungsprodukt vernäht (Abbildung 20).

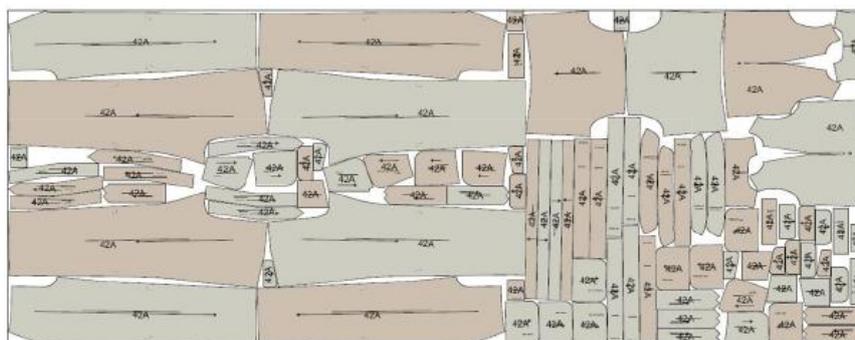


Abbildung 20: Platziertes Mehrgrößen Schnitt Bild für Plot und Cut

Die virtuelle Produktentwicklung setzt im Prozess bei den vorhandenen 2D Schnittteilen im CAD System an. Diese werden im 3D System „virtuell“ um einen Avatar vernäht, welcher den Referenzkörper repräsentiert (d.h. eine Körperform entsprechend der Ziel Körper-Maßtabelle aufweist). Hierzu werden zunächst die Vernähinformationen im CAD Schnitt hinterlegt, also zum Beispiel die Vernähung der entsprechenden Säume/Kanten des linken und rechten Vorderteils eines Kleides. Diese Schnittteile werden anschließend automatisiert auf so genannte Hüllflächen um den Avatar positioniert. In Abbildung 21 ist dies auf der linken Seite zu erkennen wobei auch die virtuell angebrachten Nähte erkennbar sind. Durch den Start der Simulation werden diese Nähte zusammengefügt (virtuell vernäht) und es ergibt sich so ein auf dem Avatar sitzendes Bekleidungsstück (Abbildung 22).

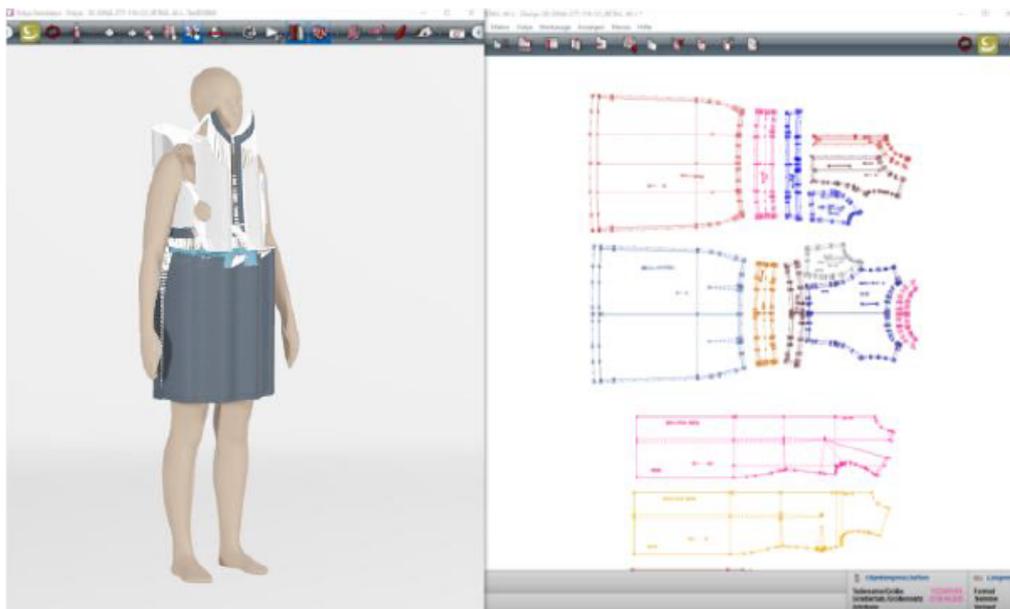


Abbildung 21: Schnittteile eines Kleides im CAD (rechts) vorpositioniert um den Avatar in 3D (links)

Die Avatare werden von Avalution über einen passenden Webservice bereitgestellt. Die Generierung von kundenindividuellen Avataren (weitere Details dazu folgen im folgenden Abschnitt 3.8), Anprobemodell- und Büstenavataren oder auch Größentabellen-spezifischen Avataren erfolgt über diese Schnittstelle. Die Avatargenerierung erstellt anthropometrisch valide Avatare auf Basis einfacher Körperparameter und unter Berücksichtigung statistischen Reihenmessungswissen und morphologischer Merkmale (variable Anzahl von Körpermaßen, korrelative Zusammenhänge zwischen Körpermaßen und Morphotypen).

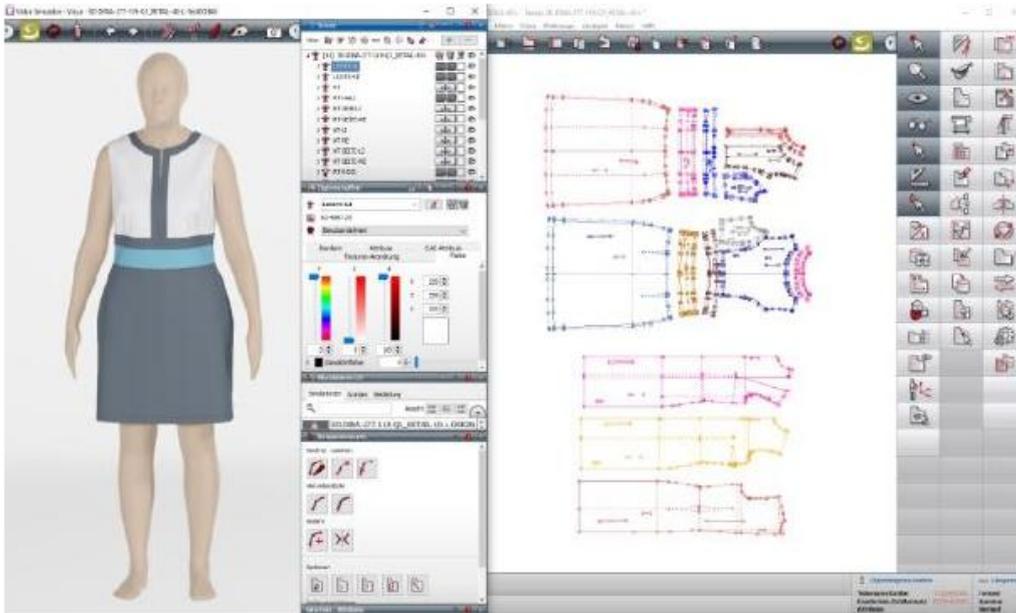


Abbildung 22: Ergebnis der Vernähung durch Simulation in 3D (links)

2-D und 3-D sind somit hierbei eng miteinander verknüpft. Eine Änderung der Geometrie eines Schnittteils in 2-D führt sofort zu einer entsprechenden Änderung in der 3-D Ansicht. Zusätzlich kann ohne Simulation die optische Ausstattung des Kleidungsstücks in 3-D angepasst beziehungsweise ausgearbeitet werden. So können schnell Varianten eines Produktes mit unterschiedlichen Farbverläufen oder Ausstattungsdetails erstellt werden. In Abbildung 1 sind weitere Beispiele virtueller Visualisierungen dargestellt. Es können auf diese Weise vollständige Outfits simuliert werden auf menschlich aussehenden Avataren in sehr hoher Qualität. Wie bei einem realen Fotoshooting können die Produkte hierbei durch entsprechende Ausleuchtung vorteilhaft in hoher Qualität präsentiert werden.

A2 Ökobilanzierung

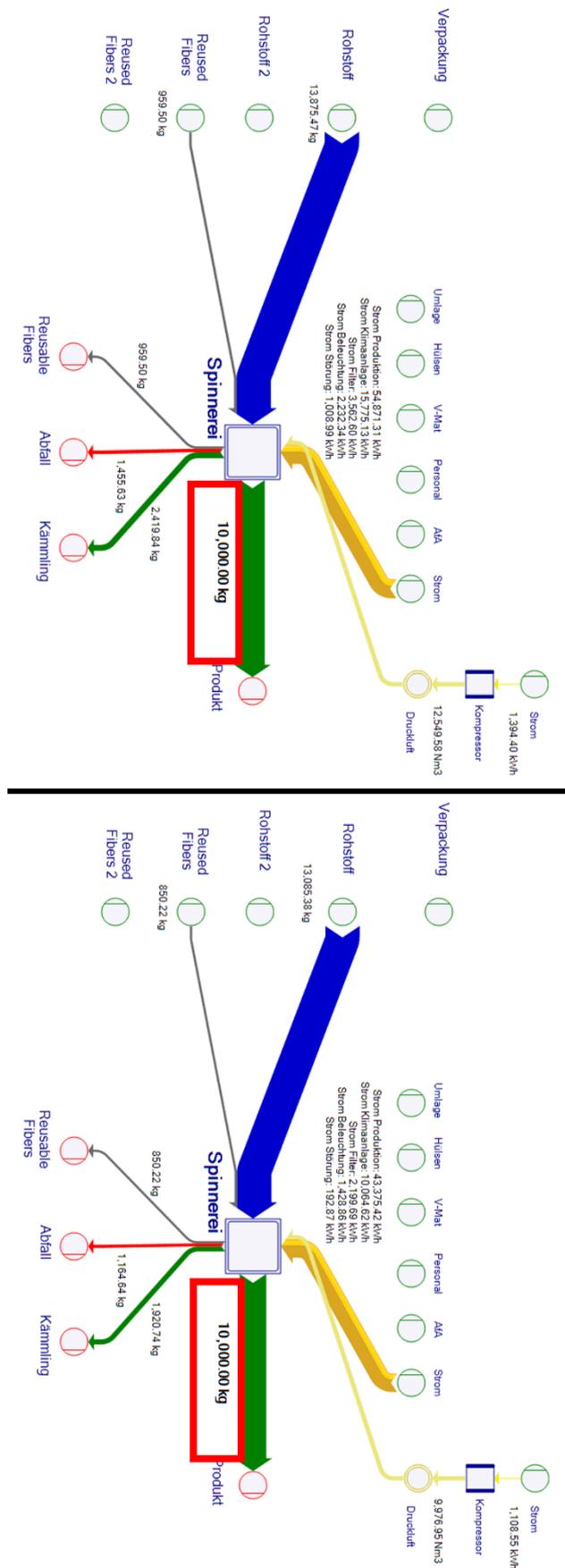


Abb. 45 (Anh.): MFCA-Modell Spinnerei - Fast-Fashion (Sz. 8, li) vs. ECO-Shoring (Sz. 5, re) – Massen-Sicht

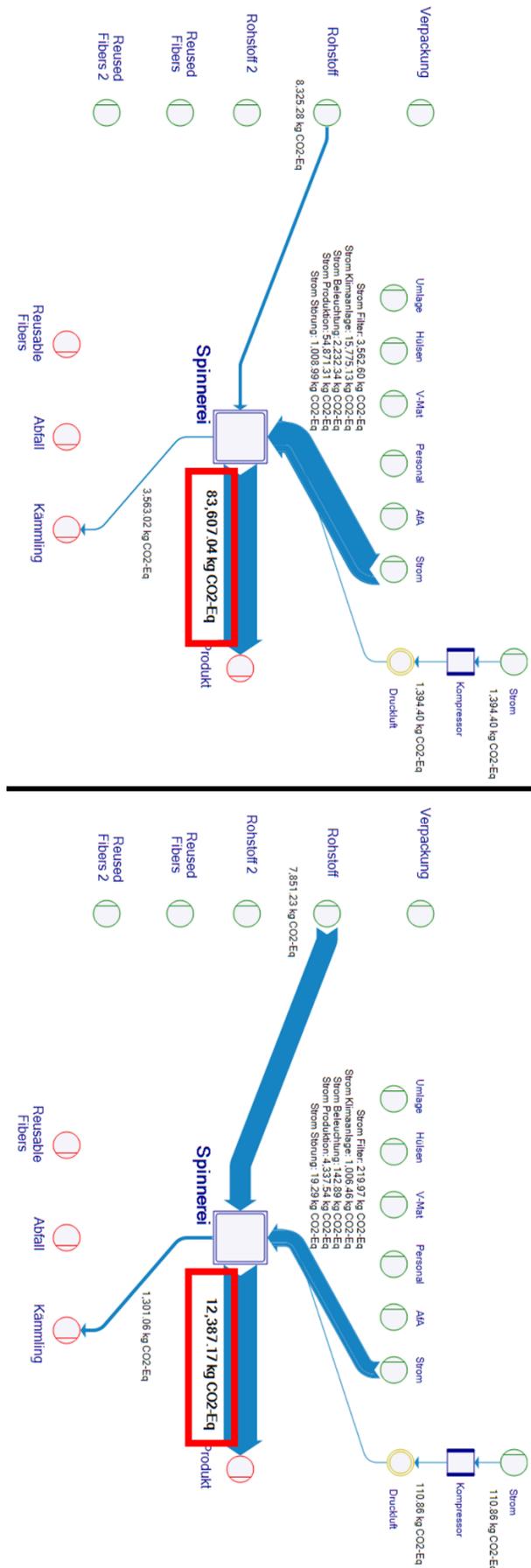


Abb. 46 (Anh.): MFA-Modell Spinnerei - Fast-Fashion (Sz. 8, li) vs. ECO-Shoring (Sz. 5, re) – CO₂-Sicht

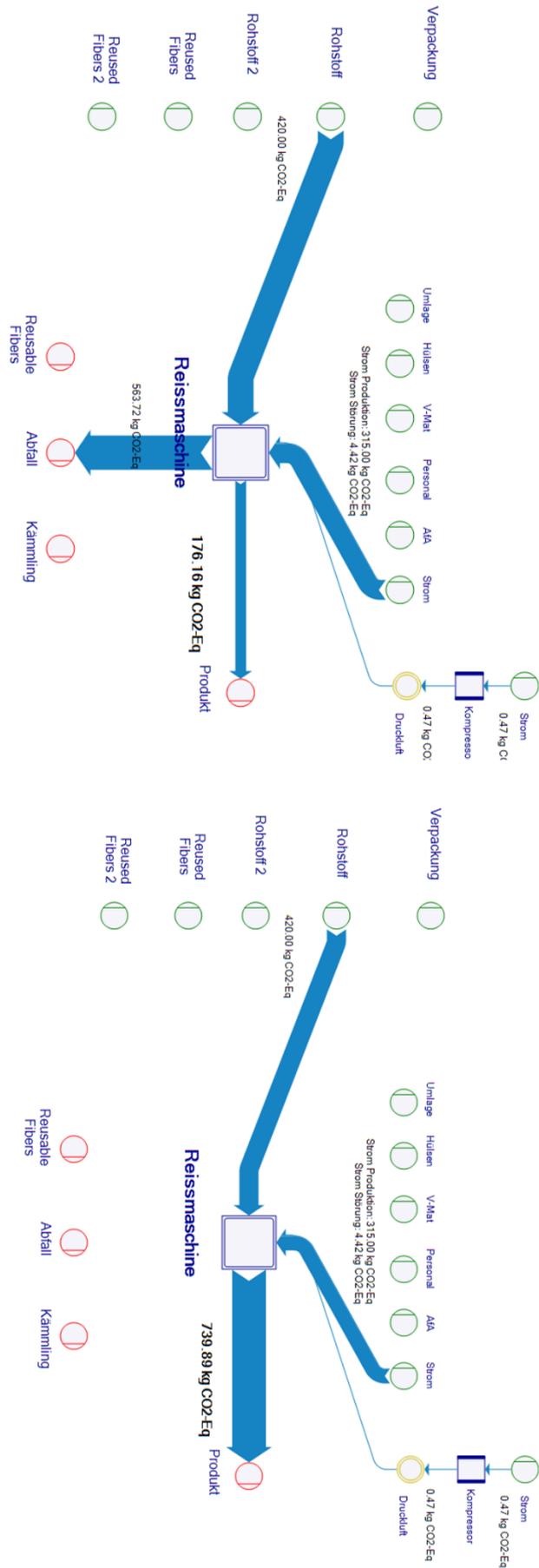


Abb. 47 (Anh.): CO₂-Allokation - MFC-Sicht vs. Classic-Sicht

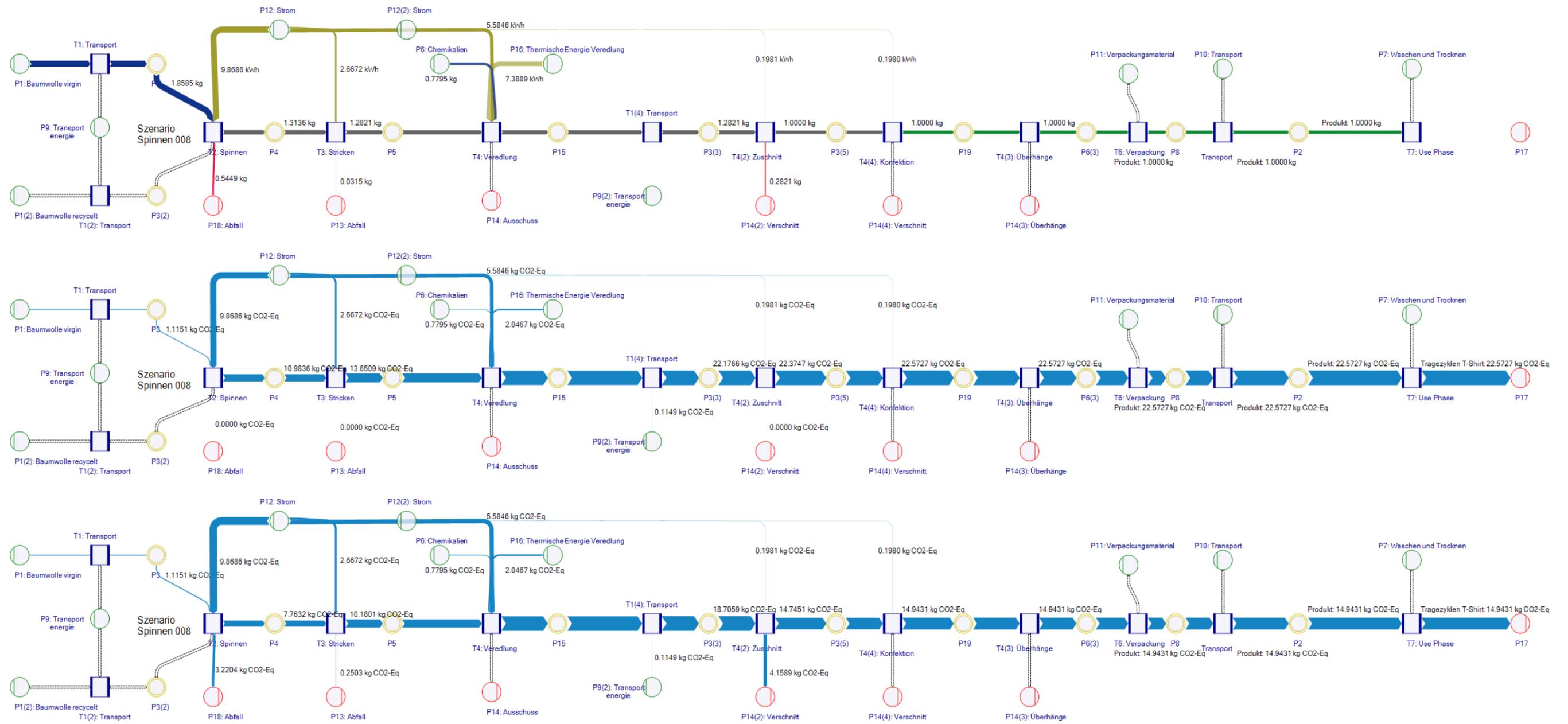


Abb. 48 (Anh.): MFCA-Gesamtmodell - Fast Fashion (Sz. 8) - 1kg Produkt

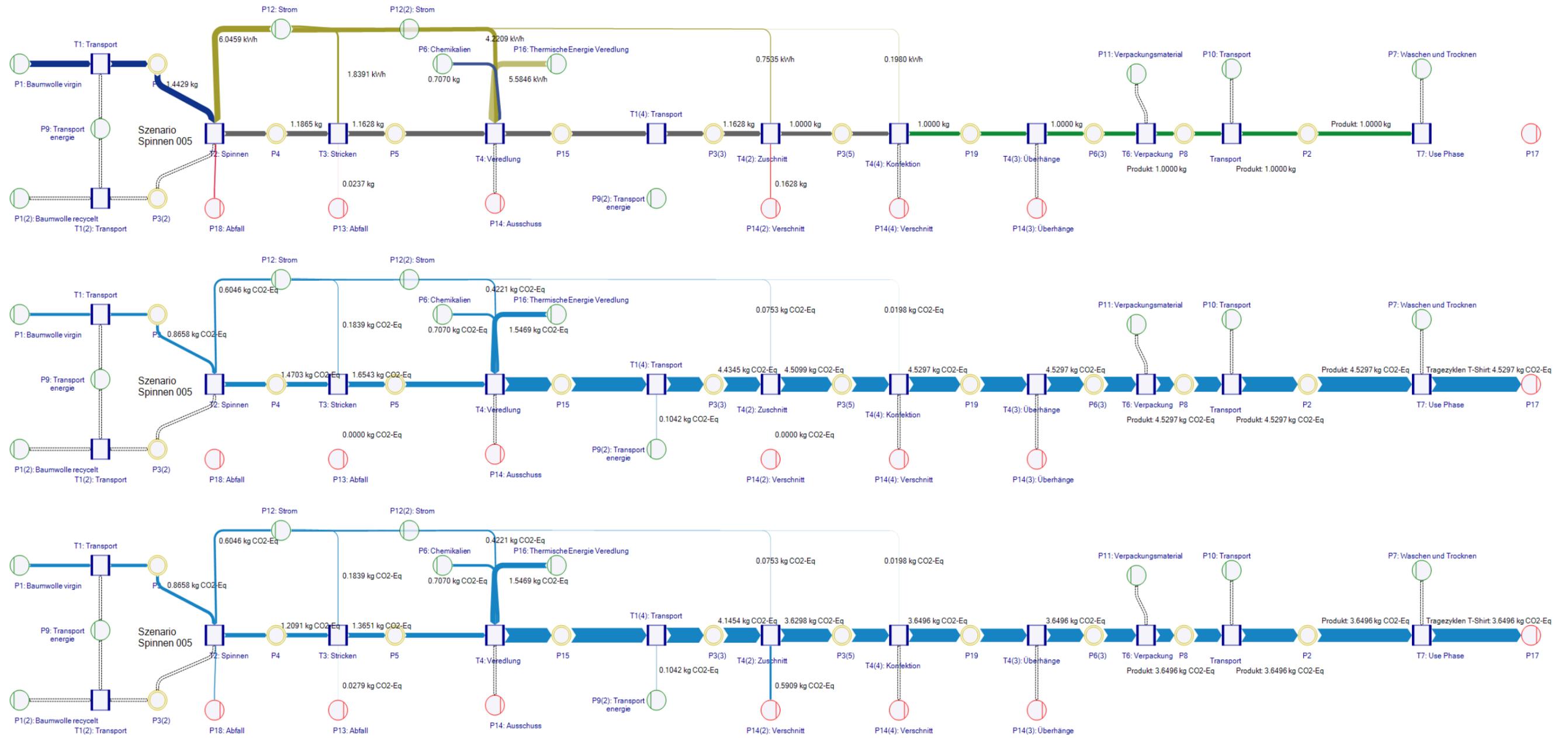


Abb. 49 (Anh.): MFCa-Gesamtmodell - ECO-Shoring (Sz. 5) - 1kg Produkt

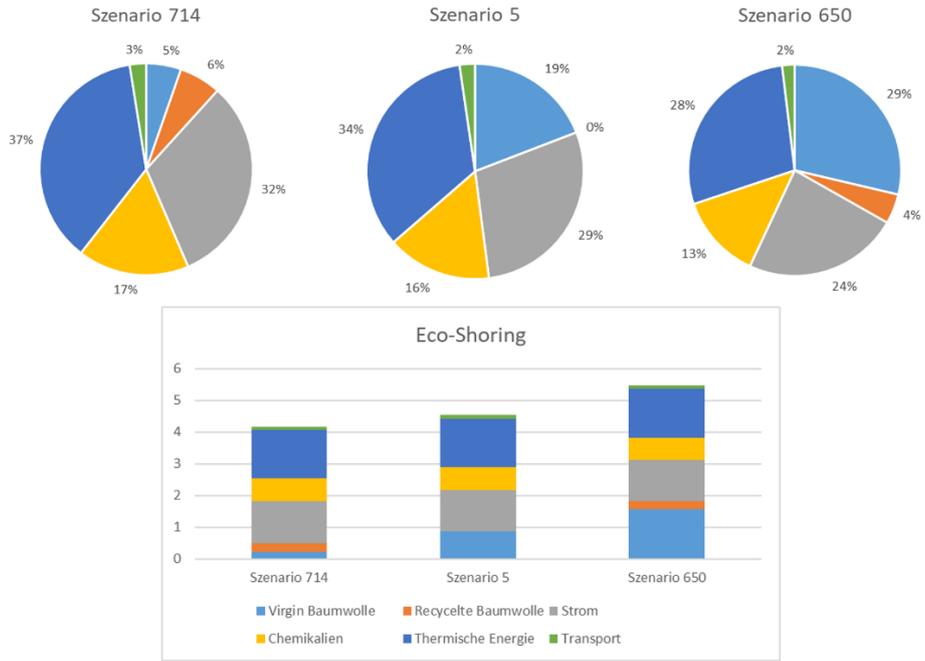


Abb. 50 (Anh.): Input-Ströme Spinnerei - ECO-Shoring für 1kg Produkt - CO₂-Sicht

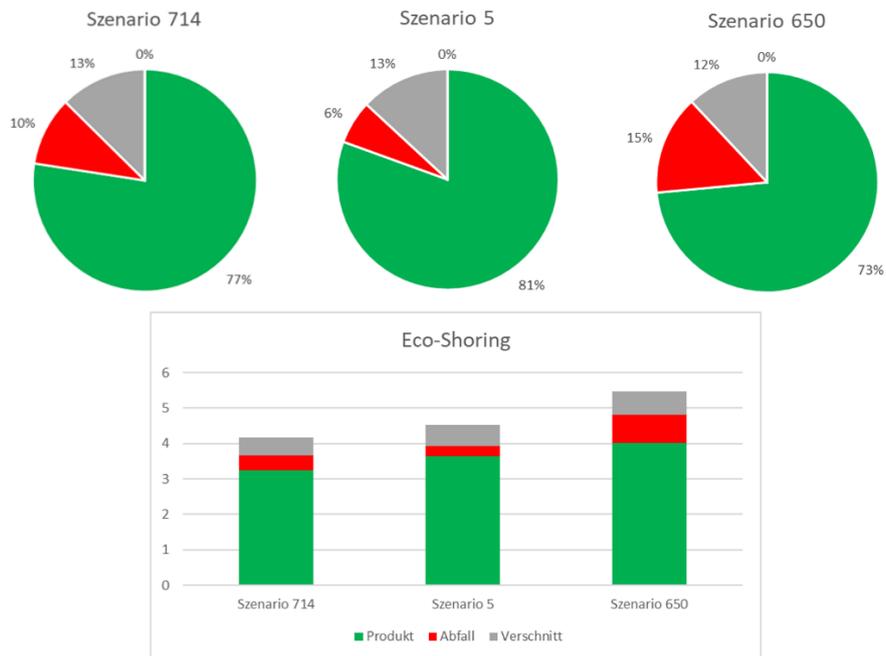


Abb. 51 (Anh.): Output-Ströme Spinnerei - ECO-Shoring für 1kg Produkt - CO₂-Sicht

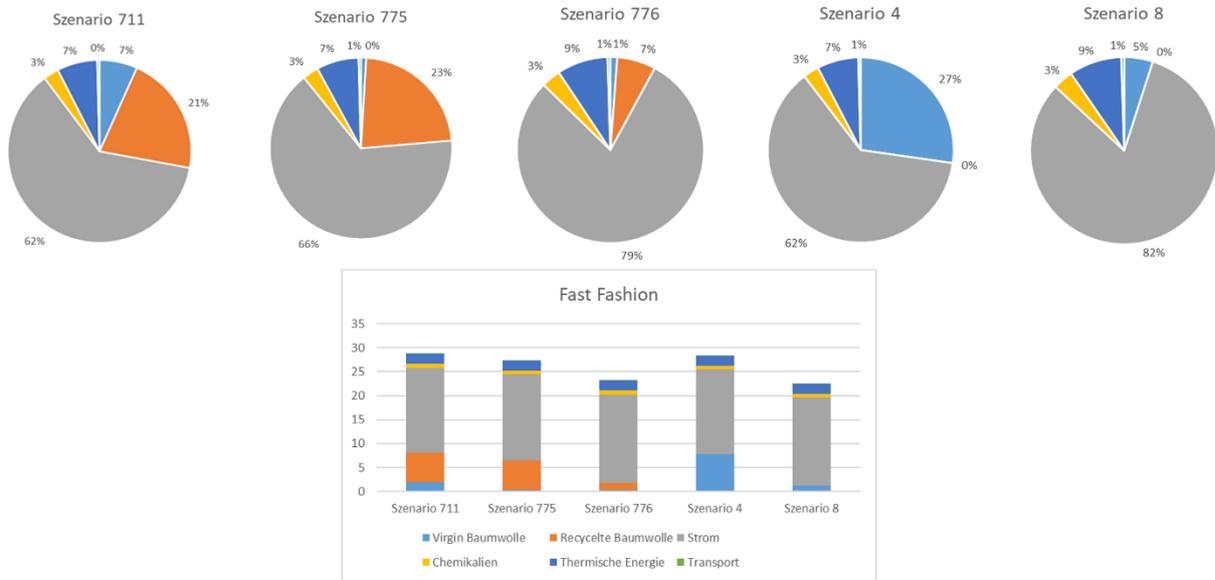


Abb. 52 (Anh.): Input-Ströme Spinnerei - Fast-Fashion für 1kg Produkt - CO₂-Sicht

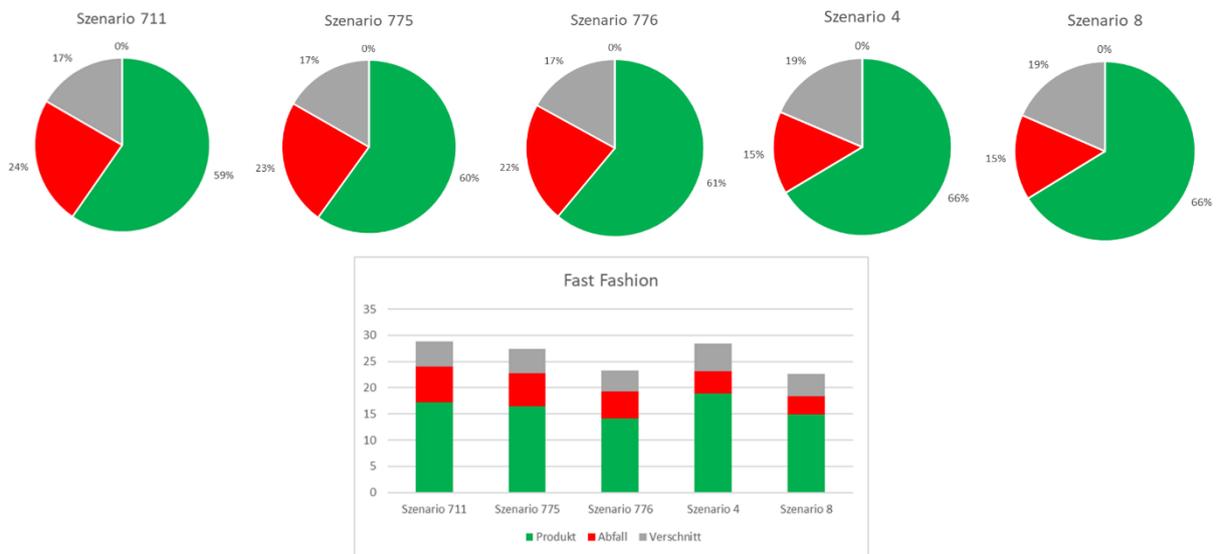


Abb. 53 (Anh.): Output-Ströme Spinnerei - Fast-Fashion für 1kg Produkt - CO₂-Sicht

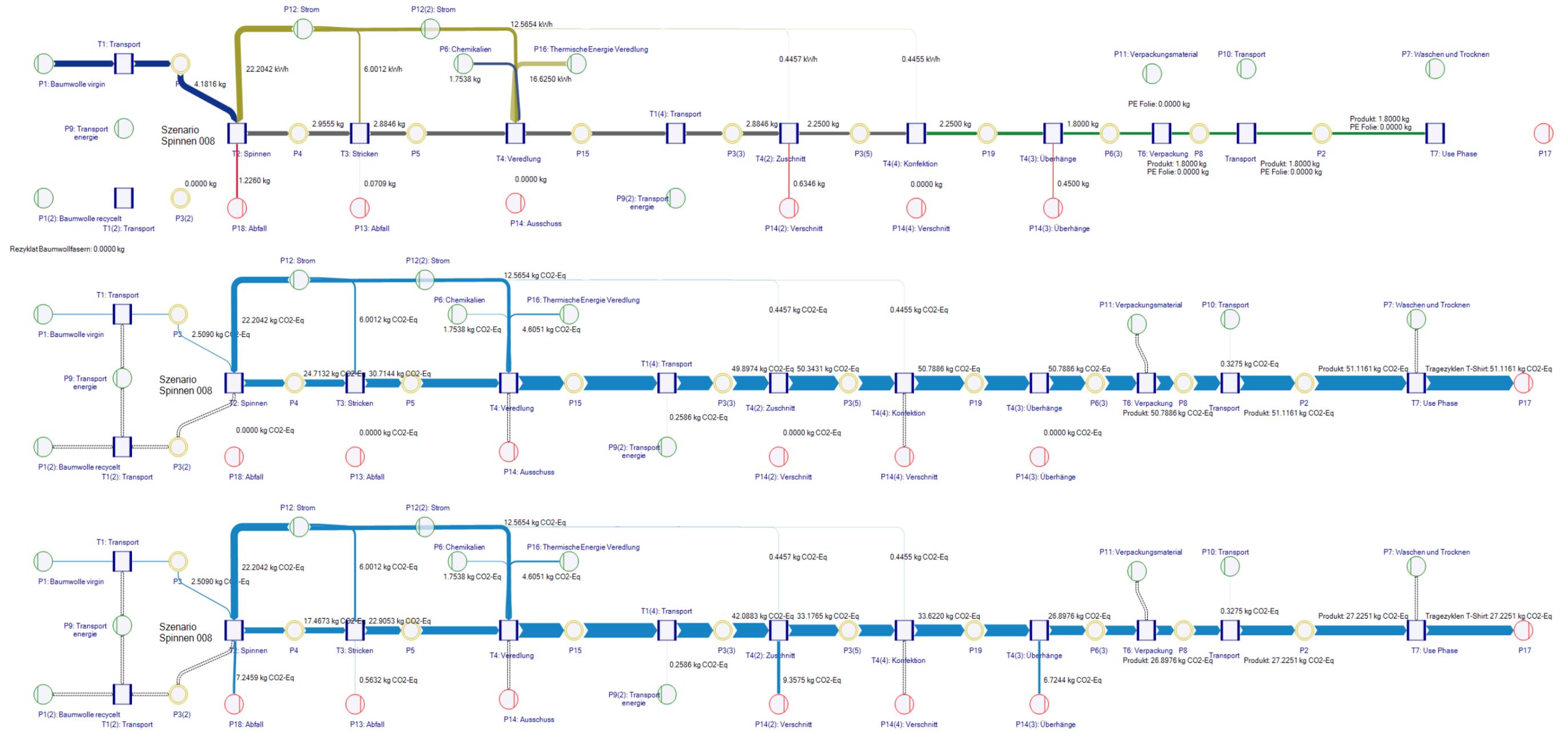


Abb. 54 (Anh.): MFCAs-Gesamtmodell - Fast Fashion (Sz. 8) - 100 Tragezyklen

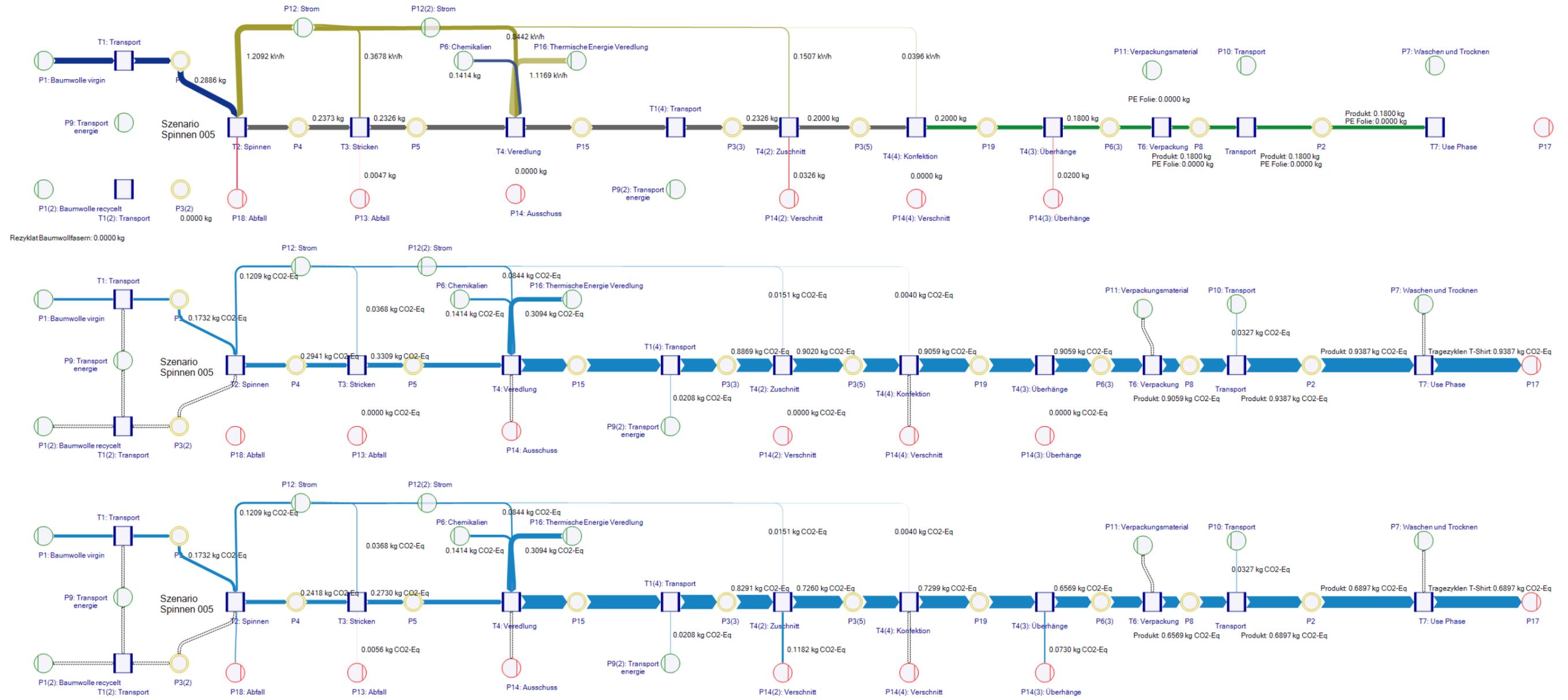


Abb. 55 (Anh.): MFCA-Gesamtmodell - ECO-Shoring (Sz. 5) - 100 Tragezyklen

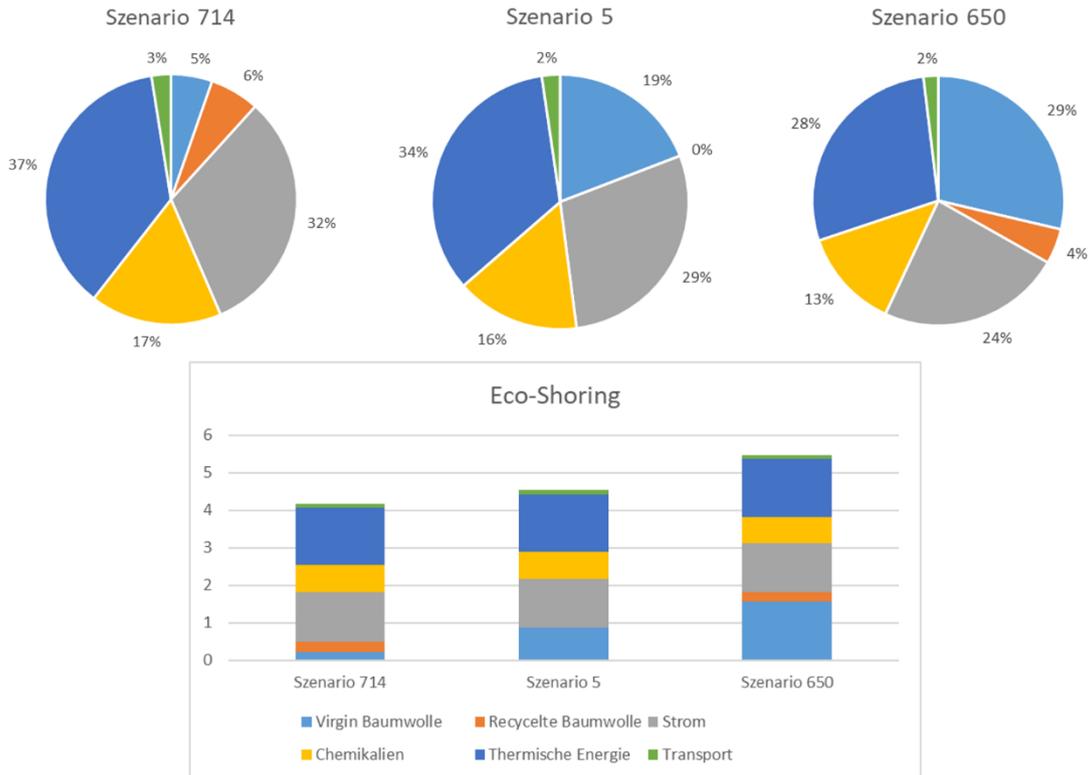


Abb. 56 (Anh.): Input-Ströme Spinnerei - ECO-Shoring für 100 Tragezyklen - CO₂-Sicht



Abb. 57 (Anh.): Output-Ströme Spinnerei - ECO-Shoring für 100 Tragezyklen - CO₂-Sicht

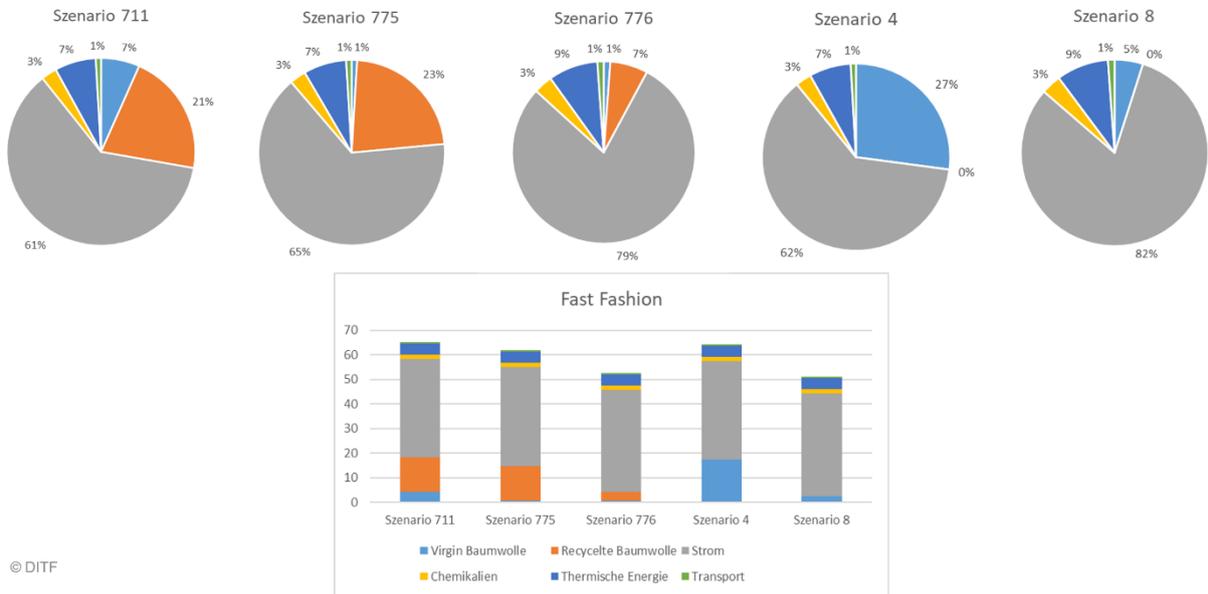


Abb. 58 (Anh.): Input-Ströme Spinnerei - Fast-Fashion für 100 Tragezyklen - CO₂-Sicht

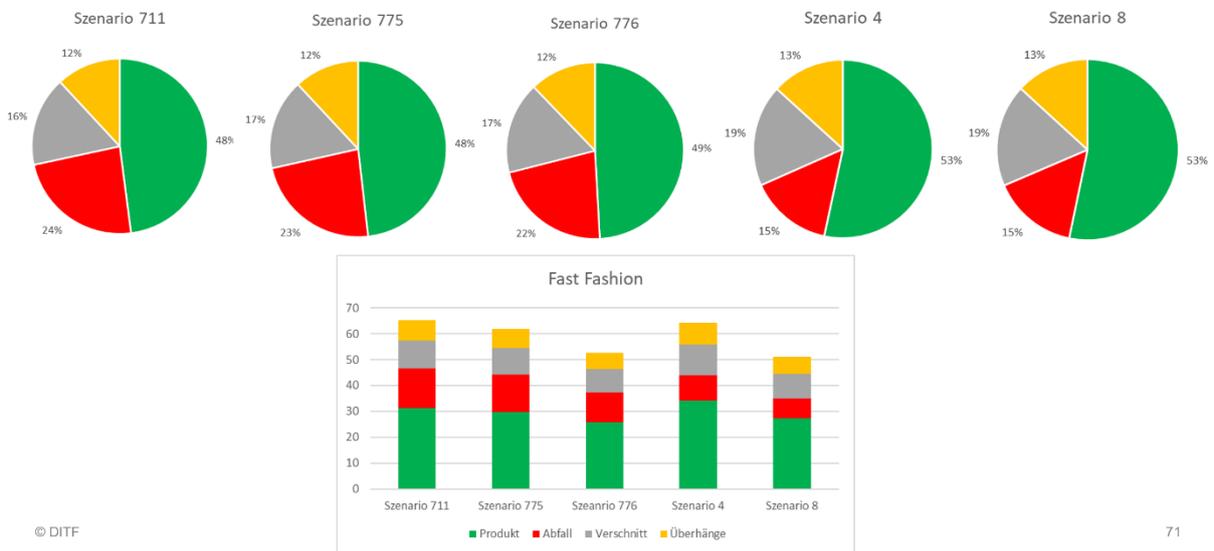


Abb. 59 (Anh.): Output-Ströme Spinnerei - Fast-Fashion für 100 Tragezyklen - CO₂-Sicht

A3 Ablauf einer ECO-Shoring Kunden-Session in Screenshots

 DBU ECO-Shoring



Willkommen

Bitte geben Sie Ihren Identifizierungs-Code ein.

 DBU ECO-Shoring



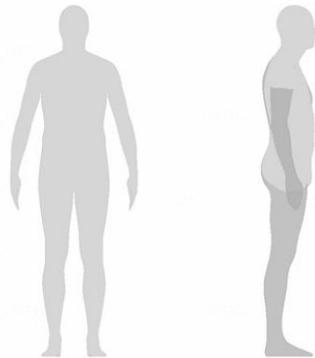
Bitte wählen Sie Ihre Körperform



Weiblich



Männlich



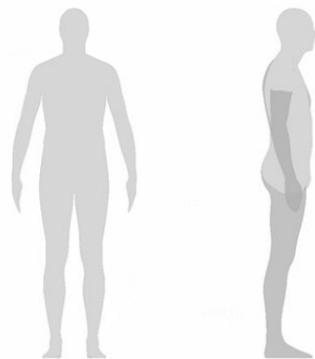
Körperhöhe

Abstand zwischen dem höchsten erkennbaren Punkt des Kopfes und dem Boden.



Weiter

🔍 Ich kann meine Daten nicht eingeben



Gewicht

Bitte erfassen Sie Ihr Gewicht.

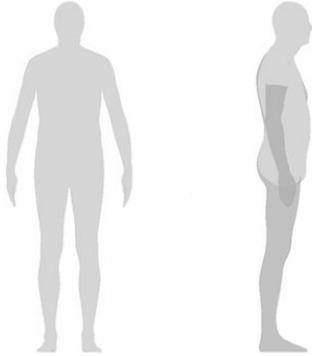


Weiter

🔍 Ich kann meine Daten nicht eingeben

 DBU ECO-Shoring





Alter

Bitte geben Sie Ihr Alter ein.

59  59 Jahre
17 62

Weiter

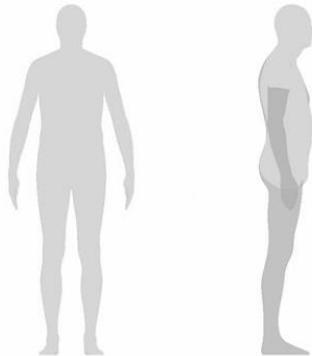
 Ich kann meine Daten nicht eingeben

 DBU ECO-Shoring



 DBU ECO-Shoring





Form Ihres Oberkörpers

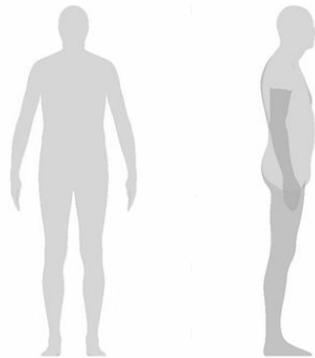
Ihre Schultern sind:

schmal	durchschnittlich / Ich weiß es nicht	breit
--------	---	-------

Ihre Hüften sind:

schmal	durchschnittlich / Ich weiß es nicht	breit
--------	---	-------

Weiter



Form Ihrer Taille

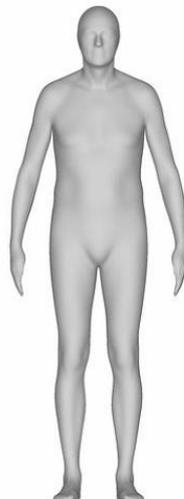
Ihr Bauch ist:

flach

durchschnittlich /
Ich weiß es nicht

vorstehend

Weiter



Avatar & Maßliste

Überprüfen Sie die Liste Ihrer Maße. Drehen Sie den Avatar, indem Sie darauf klicken und ziehen.

Körperhöhe	198.0 cm
Brustumfang	108.2 cm
Taillenumfang	97.8 cm
Hüftumfang	106.3 cm
Unterbrustumfang	102.3 cm
Rückenlänge (7. Halswirbel bis Taille)	48.6 cm
Rückenbreite	42.0 cm
Halsansatz Schulter bis Brustpunkt rechts	31.8 cm
Abstand Brustpunkte	23.7 cm

WEITER



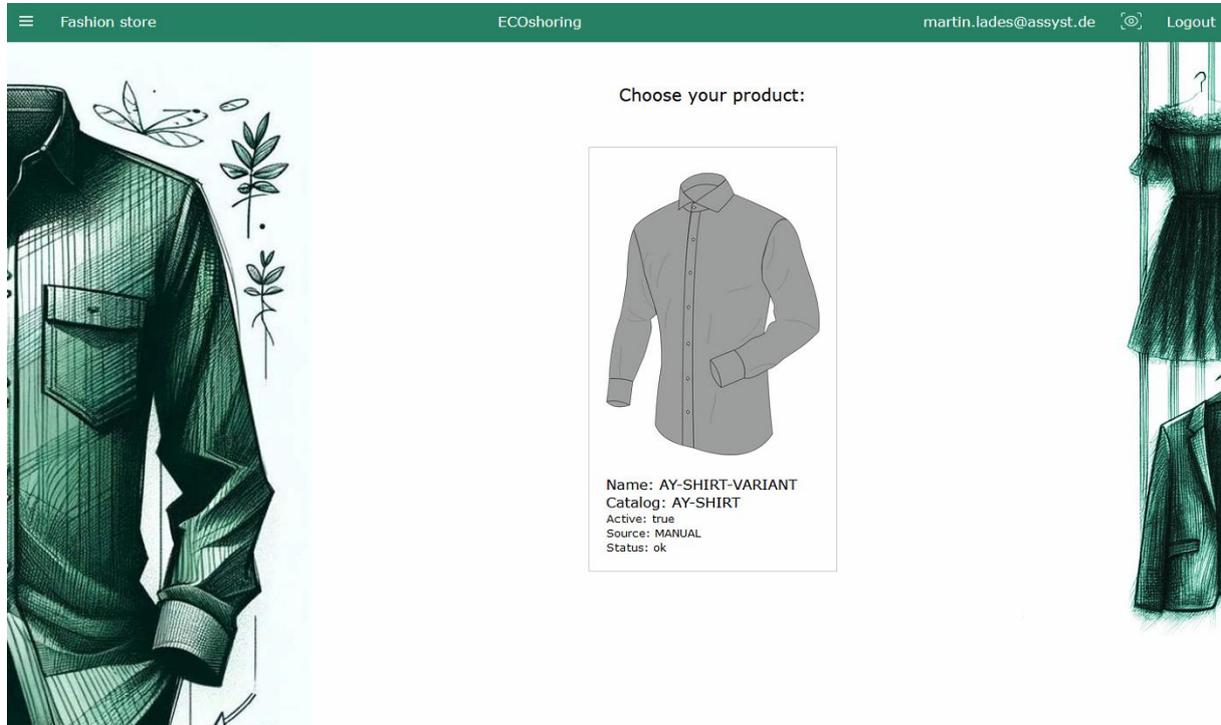
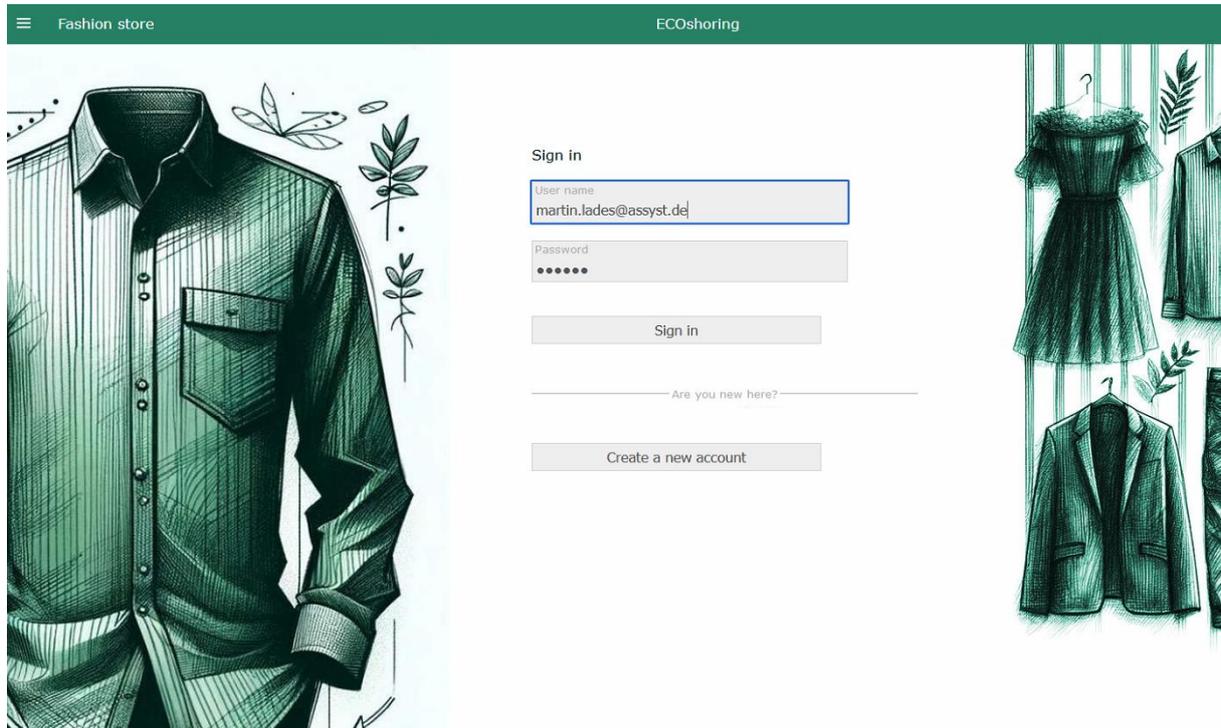
 martin.jades@assyst.de.eAvatar
Fertig — 5,3 MB



[Alle Downloads anzeigen](#)

Vielen Dank

[Nächsten Fragebogen ausfüllen](#)



← All Products

AY-SHIRT-VARIANT

Relaxed fit shirt
Relaxed fit shirt, brushed cotton
★★★★★ 18 reviews

Colors: [Red, Blue, Grey, Brown, Green, White]

Recommended size: 54

Price: 149.95€

Calculate personalized preview

Hem corner: [Hem corner no] [Hem corner yes]

Sleeve: [Sleeve long] [Sleeve short]

Cuff: [Cuff round] [Cuff sloped] [Cuff squared]

Collar: [Collar classic] [Collar shark] [Collar smoking] [Collar windsor]

Material Care instructions Eco

0,88kg CO₂e Product (1,00 piece)

← All Products

AY-SHIRT-VARIANT

Relaxed fit shirt
Relaxed fit shirt, brushed cotton
★★★★★ 18 reviews

Colors: [Red, Blue, Grey, Brown, Green, White]

Recommended size: 54

Price: 149.95€

Calculate personalized preview

Calculation in progress, please wait...

Hem corner: [Hem corner no] [Hem corner yes]

Sleeve: [Sleeve long] [Sleeve short]

Cuff: [Cuff round] [Cuff sloped] [Cuff squared]

Collar: [Collar classic] [Collar shark] [Collar smoking] [Collar windsor]

Material Care instructions Eco

0,88kg CO₂e Product (1,00 piece)

Colors



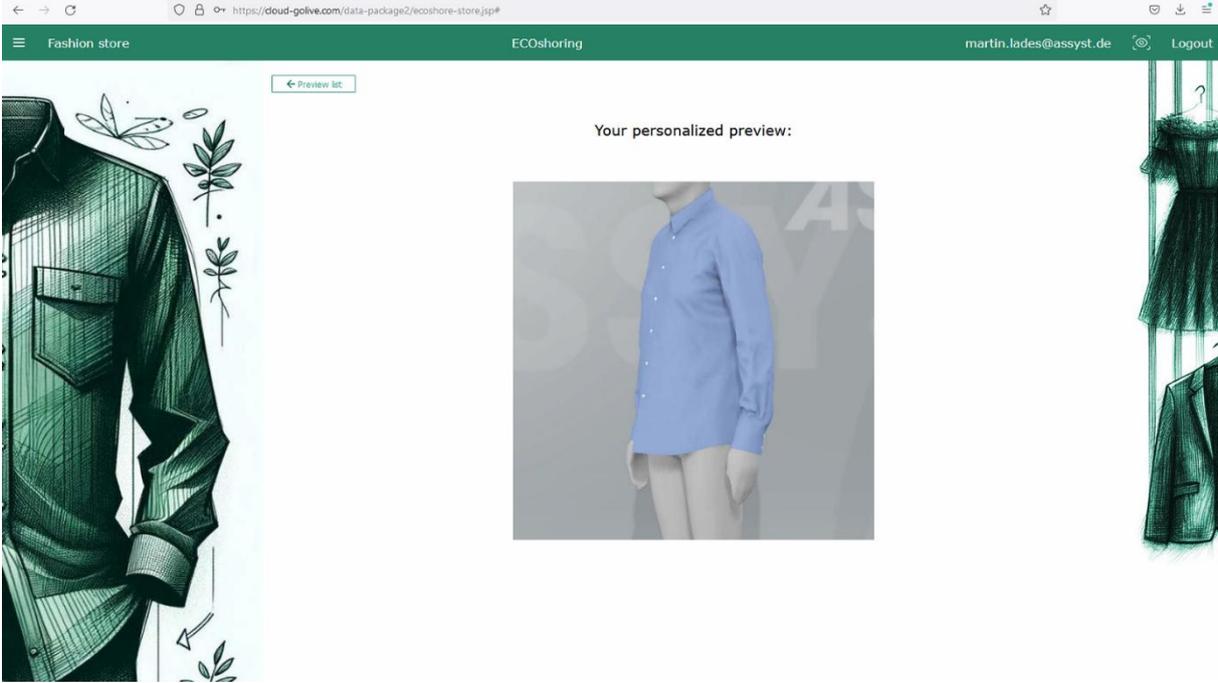
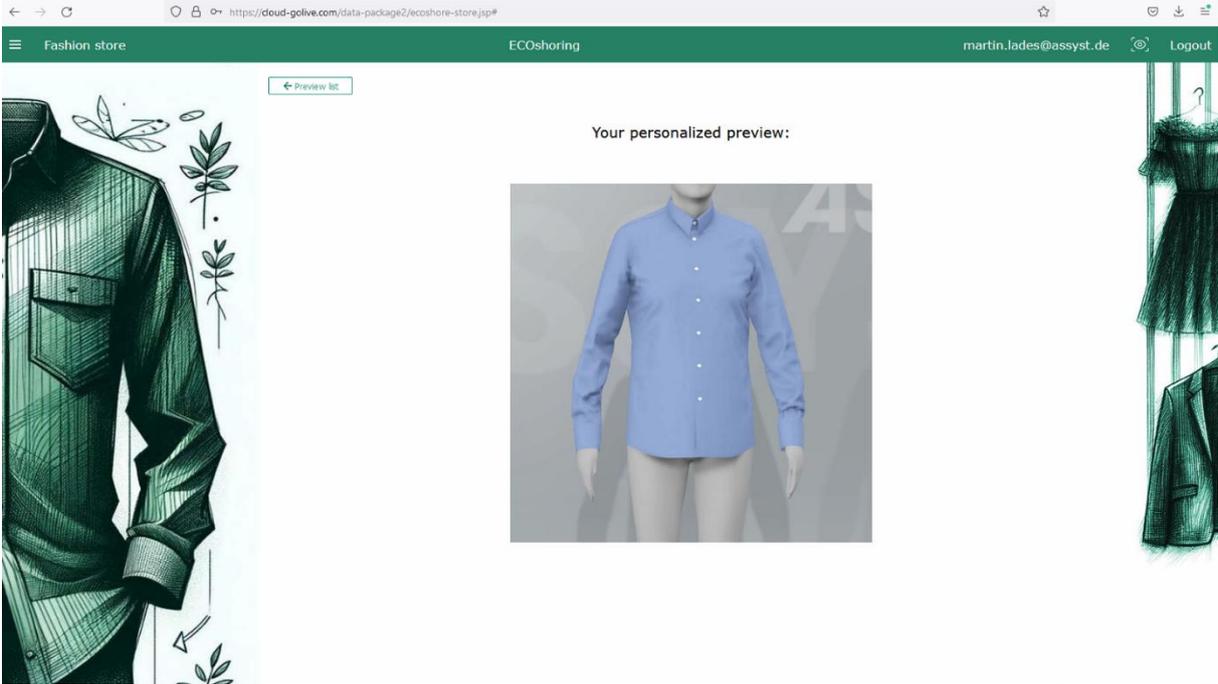
Recommended size: 54



Price: 149.95€

Calculate personalized preview

Calculation in progress, please wait....



Fashion store ECOshoring martin.lades@assyst.de Logout

← All Products

AY-SHIRT-VARIANT

Relaxed fit shirt
Relaxed fit shirt, brushed cotton
★★★★☆ 18 reviews



Material Care instructions Eco

- 100% brushed cotton
- Soft texture
- Mother-of-pearl buttons

Colors

Recommended size: 54

Price: 149.95€

Calculate personalized preview

Hem corner
Hem corner no Hem corner yes

Sleeve
Sleeve long Sleeve short

Cuff
Cuff round Cuff sloped Cuff squared

Collar
Collar classic Collar shark Collar smoking Collar windsor



Colors

Recommended size: 54

Price: 149.95€

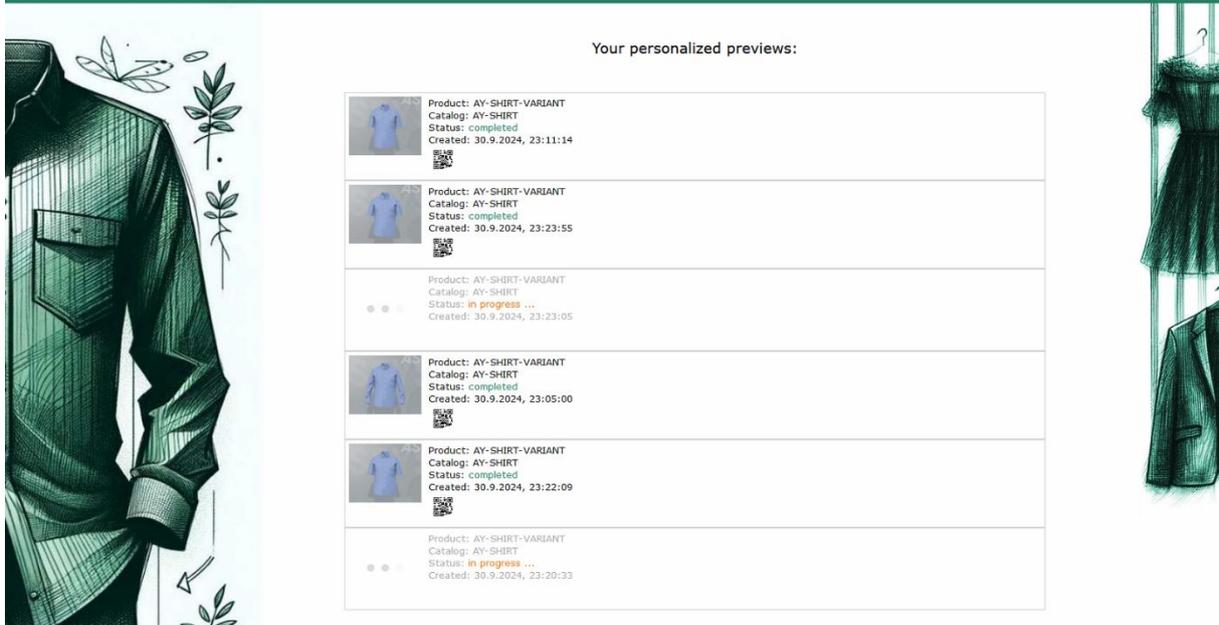
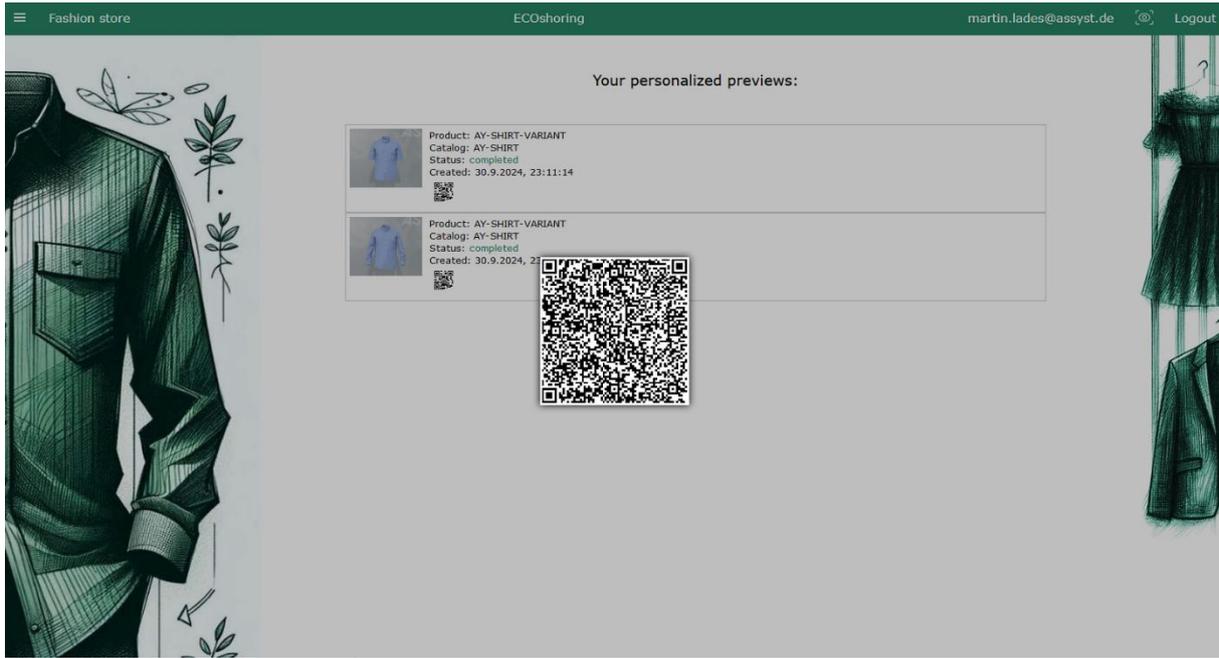
Calculate personalized preview

Fashion store ECOshoring martin.lades@assyst.de Logout

Your personalized previews:

	Product: AY-SHIRT-VARIANT Catalog: AY-SHIRT Status: completed Created: 30.9.2024, 23:11:14
	Product: AY-SHIRT-VARIANT Catalog: AY-SHIRT Status: completed Created: 30.9.2024, 23:05:00





The screenshot shows a web browser window with the URL <https://doud-golive.com/data-package2/ecoshore-store.jsp#>. The page header includes 'Fashion store', 'ECOshoring', 'experenws2', and 'Logout'. The main content area features a product listing for 'AY-DBU-DRESS-VARIANT', described as a 'Shirt dress with button panel' with a 4.5-star rating from 18 reviews and a price of 149.95€. A central image shows a pink floral dress. To the left is a technical drawing of a shirt. To the right is a vertical carousel of clothing items. Below the main image are links for 'Material', 'Care instructions', and 'Eco'. An 'Eco' badge indicates a carbon footprint of 1,44kg CO₂e per product (1,00 piece).

VirtualScanner x experenws2 @ Assyst GmbH / x +
← → ↻ <https://doud-golive.com/data-package2/ecoshore-store.jsp#> ☆ ⌵ ⌵ ⌵

Fashion store ECOshoring experenws2 Logout

← All Products

AY-DBU-DRESS-VARIANT
Shirt dress
Shirt dress with button panel
★★★★★ 18 reviews

Colors
Recommended size: 42
Price: 149.95€
Calculate personalized preview
Calculation in progress, please wait...

Sleeve
Sleeve short Cuff round Cuff squared

Neck
V neck Round neck

Length
Length short Length long

Material Care instructions Eco

1,44kg CO₂e
Product (1,00 piece)

A4 Verbreitung der Projektergebnisse



Abb. 60 (Anh.): Dr. Martin Lades (Assyst GmbH) trägt zur On-Demand-Produktentwicklung vor

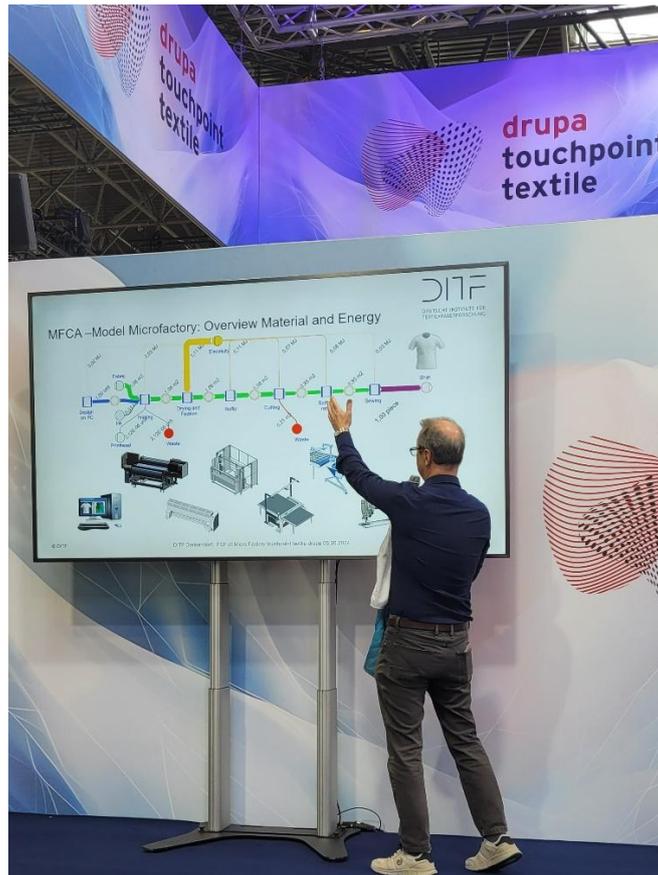


Abb. 61 (Anh.): Dr. Jürgen Seibold (DITF) trägt zur Ökobilanzierung der DTMF vor

DITF Deutsche Institute für Textil- und Faserforschung Denkendorf (DITF) 3ヶ月前

Shopping and production digitally optimized:
 The designer has an idea, the customer, consumer or retailer, checks it out and changes one or two details to suit his or her taste. Then garments are produced in small batches or tailored to the body thanks to modern body measurement. Digital technology ensures that the wishes are met, everything fits and everything looks as expected. Returns? That was yesterday. Digitized processes not only satisfy the customer, but also protect the environment. That's why the Deutsche Bundesstiftung Umwelt (German Federal Environmental Foundation) is funding the research cooperation between the German Institutes of Textile and Fiber Research Denkendorf (DITF) and ASSYST GmbH. The keyword here is the shifting back of value-added processes. Result: no mass-produced goods for the garbage, no child labor, high ecological standards and low transport costs.
 "Every body is individual" emphasizes Dr. Martin Lades, Assyst GmbH. The ECO-Shoring project takes this into account. The creation of an avatar, i.e. the model of one's own body, is the basis. There are also serial measurements in different regions of the world. In the project, processes and the database of Avalution GmbH allow that the customer only has to enter a few body parameters to get an accurate fit. With the body height, weight and age, the program can create a true-to-life body double - the trying-on on the computer can begin. The model is primarily suitable for online shopping, but in principle the customer can also be measured and advised directly in the [store.it](#).
 #EcoShoring #Sustainability #Avatar #BodyMeasurement #DBU #retail #readytowear #apparel

Shopping und Produktion digital optimiert

Digitale Technik der DITF und der Assyst GmbH sorgt dafür, dass die Kleidung passt und alles so aussieht, wie erwartet. Retourne? Das war gestern. Eco-Shoring ist das Stichwort.

Der Designer hat eine Idee, der Kunde, Konsument oder Handel, schaut sie sich an und ändert noch das eine oder andere Detail nach seinem Geschmack. Danach werden Kleidungsstücke in kleinen Losgrößen hergestellt oder dank moderner Körpervermessung auf den Leib geschneidert. Digitale Technik sorgt dafür, dass die Wünsche erfüllt werden, alles passt und alles so aussieht, wie erwartet. Retourne? Das war gestern.

Digitalisierte Prozesse stellen nicht nur den Kunden zufrieden, sondern schonen auch die Umwelt. Deshalb fördert die Deutsche Bundesstiftung Umwelt die Forschungskoooperation von den Deutschen Instituten für Textil- und Faserforschung Denkendorf (DITF) und der Assyst GmbH. Rückverlagerung von Wertschöpfungsprozessen ist das Stichwort. Ergebnis: Keine Massenware für den Müll, keine Kinderarbeit, hohe ökologische Standards und geringe Transportkosten.

„Jeder Körper ist ein Individuum.“
 Dr. Martin Lades, Assyst GmbH

Dem trägt das Projekt ECO-Shoring Rechnung. Die Erstellung eines Avatars, also dem Modell des eigenen Körpers, ist Basis. Auch gibt es Reihennmessungen in verschiedenen Regionen der Welt. Im Projekt ermöglichen Prozesse und die Datenbasis der Avalution GmbH, dass der Kunde nur noch wenige Körperkennwerte angeben muss, um eine treffsichere Passform zu bekommen. Mit der Körpergröße, dem Gewicht und Alter kann das Programm ein originalgetreues Körperdouble erstellen – das Anprobieren am Computer kann beginnen. Das Modell eignet sich in erster Linie für das Online-Shopping, aber grundsätzlich kann der Kunde sich auch direkt im Shop vermessen und beraten lassen.

Abb. 62 (Anh.): LinkedIn-Beitrag der DITF und Pressemeldung von Südwest Textil