

Topp Textil GmbH, Durach

**Automobilinterieurbauteile auf Basis von strukturierten und  
zonierten  
Mehrlagengestricken aus Naturfasern**

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,  
gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt  
AZ 38690/01

Dr. Stefan Topp

Februar 2026

**1 Projektkennblatt**

der  
**Deutschen Bundesstiftung Umwelt**



Az 38690/01

Referat

Fördersumme

282.091 €

**Antragstitel** Automobilinterieurbauteile auf Basis von strukturierten und zonierten Mehrlagengestricken aus Naturfasern

**Stichworte**

Laufzeit

30

Projektbeginn

01.06.2023

Projektende

30.11.2025

Projektphase(n)

Zwischenberichte

**Bewilligungsempfänger** Topp Textil GmbH  
Heubachstr. 4  
87471 Durach

Tel 0831 56113 0

Fax

Projektleitung  
Dr. Stefan Topp

Bearbeiter

**Kooperationspartner****Zielsetzung und Anlaß des Vorhabens**

Ziel dieses F&E-Vorhabens war die Entwicklung eines Herstellungsverfahrens für Automobilinterieurbauteile auf Basis von strukturierten und zonierten Mehrlagengestricken aus Naturfasern. Im Stand der Technik werden Interieurbauteile moderner Fahrzeuge immer noch hauptsächlich im Spritzgussverfahren, aus Kunststoff, also auf Basis fossiler Rohstoffe hergestellt. Die Herstellung von Kunststoff erzeugt beträchtliche Mengen an CO<sub>2</sub>. Wird der Abfall später thermisch verwertet, kommen weitere Mengen CO<sub>2</sub> hinzu. Ein Verfahren zur Herstellung solcher Teile aus möglichst hohen Anteilen nachwachsender Rohstoffe stellt daher ein großes Potenzial zur Vermeidung von CO<sub>2</sub>-Emissionen dar.

**Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden**

Im Unterschied zu bereits verfolgten Konzepten zur Reduktion des Kunststoffanteils in den Bauteilen handelt es sich beim innovativen Ansatz dieses Vorhabens um keine bloße Materialsubstitution in den bestehenden Prozessen, sondern um eine Verfahrens- und Konstruktionsinnovation. Die Bauteile sollen dabei aus Mehrlagengestricken aus Hanffasern hergestellt werden, die später durch Tiefziehen in die benötigte Form gebracht werden. Die Flachstricktechnologie ermöglicht es generell die Dicke, Steifigkeit und andere Parameter in der Ebene des Textils partiell zu definieren, so dass die ausgeformten Teile letztendlich die geforderten Eigenschaften haben.

In diesem Projekt wurde zunächst untersucht, ob es durch moderne Verfahren der Stricktechnik und nachfolgender dreidimensionaler Formgebung möglich ist, Interieurbauteile aus einem möglichst hohen Anteil von Hanffasern herzustellen. Um das CO<sub>2</sub>-Einsparpotenzial zu maximieren und falls möglich auch eine Recyclingfähigkeit der Teile zu erzielen sollte hierbei geprüft werden, ob es idealerweise durch den Mehrlagenaufbau bereits gelingt, die nötige Formstabilität bei ausschließlicher Einsatz der Hanffasern zu

erreichen, oder ob hierzu schmelzende Komponenten in Form von biobasierten Harzpulvern oder Kunststoffäden erforderlich sind. Es sollte soweit möglich Hanf aus biologischem Anbau zum Einsatz kommen, um die Umweltwirkung des Verfahrens zu maximieren. Ferner sollte im Projekt die Möglichkeit untersucht werden, durch das Verfahren bereits Funktionalitäten in die Seitenverkleidungen zu integrieren, um im Vergleich zum Stand der Technik, die dafür erforderlichen Arbeits-, Energie- und Materialaufwände einzusparen.

### ***Ergebnisse und Diskussion***

Das angestrebte Verfahren zur Herstellung von Türinnenverkleidungen aus Naturfaser konnte grundsätzlich erfolgreich entwickelt werden. Die notwendigen Materialien und Qualitäten, der Mehrlagenaufbau sowie alle dafür nötigen Maschinenparameter konnten identifiziert werden und es ist gelungen auf dieser Basis Demonstratoren herzustellen, die einen Hanf-Anteil von 80 % erreichen, die nötige Formstabilität zeigen und auch die Fähigkeit zur Integration zusätzlicher Funktionalitäten unter Beweis gestellt haben.

Es hat sich dabei gezeigt, dass die Naturfaserqualität der dominante Prozessparameter ist, da die Mehrlagenarchitektur hochsensitiv gegenüber den Eigenschaften der Hanffasern ist.

Mit einem Hanf-Anteil von 80 % geht das zum Projektabschluss erreichte Verfahren bereits deutlich über den Stand der Technik hinaus. Ein Kunststoffanteil zur Erreichung der Formstabilität bleibt zum jetzigen Stand aber noch erforderlich. Dennoch kann so ein substantielles CO<sub>2</sub>-Einsparpotenzial im Vergleich zum Stand der Technik durch den weitgehenden Ersatz von Kunststoff durch Hanffasern erreicht werden. Dieser wird noch gesteigert durch die im Gegensatz zum üblichen Verfahren verschnittfreie Konturfertigung und der prinzipiell gezeigten Möglichkeiten der Funktionsintegration ohne zusätzliche Kunststoffbaugruppen.

### ***Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation***

Die Projektergebnisse sind noch nicht veröffentlicht.

### ***Fazit***

Das Vorhaben hat gezeigt, dass großflächige Automobil-Interieurbauteile auf Basis strukturierter, zonierter Mehrlagenstrickarchitekturen aus nachwachsendem Rohstoff (Hanf) technisch realisierbar sind. Die wesentliche Innovation liegt nicht allein in der Substitution einzelner Materialien, sondern in der konstruktiven Verschiebung der Traglogik von flächiger fossiler Polymermatrix hin zu architekturbasierter Lastaufnahme durch nachwachsende Fasern mit lokal dosierter thermoplastischer Fixierung. Erst durch dieses mit der modernen Stricktechnologie realisierte Konzept wird die Fertigung zu weit überwiegendem Anteil aus Naturfasern möglich.

Die mechanische Stabilität konnte bei moderater thermischer Aktivierung (~100 °C) reproduzierbar erzielt werden. Der Naturfaseranteil liegt bei über 80 %. Das Bauteilgewicht beträgt ca. 0,8 kg. Die Materialreduktion gegenüber konventionellen Systemen ist konstruktiv bedingt (Zero-Waste-Konturstrick, Funktionsintegration) und nicht durch bloße Substitution erreicht. Damit wurde der Kernansatz des Projektes technisch bestätigt. Mit dem erreichten Entwicklungsstand sollen die nächsten Schritte in Hinblick auf eine Markteinführung in Form statistisch abgesicherte Dauer- und Alterungsbewertung sowie OEM-spezifische Vollprüfprogramme angegangen werden.

## **Inhalt**

<b>1</b>	<b>Projektkennblatt.....</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Kurzzusammenfassung .....</b>	<b>6</b>
<b>3</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>7</b>
<b>4</b>	<b>Hauptteil .....</b>	<b>9</b>
4.1	Durchgeführte Arbeiten .....	9
4.2	Ergebnisse.....	19
<b>5</b>	<b>Fazit .....</b>	<b>23</b>
<b>6</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>25</b>

## Verzeichnis von Bildern

Abbildung 1 - Treibhausgasemissionen pro Tonne Naturfasern, inkl. CO <sub>2</sub> -Aufnahme; Nova Institut 2019 .....	8
Abbildung 2 - Entwickelte 3-Lagenstruktur, hier zur Demonstration in schwarz/weiß gestrickt .....	12
Abbildung 3 - Beispiele für diverse analysierte Bindungsstrukturen .....	13
Abbildung 4 - Nahaufnahme, des im Strickprozess integrierten Ventlüfterfeldes.....	17
Abbildung 5 - Nahaufnahme des bereits im Strickprozess integrierten Lautsprecher-Musterfeldes .....	18
Abbildung 6 - Nahaufnahme der im Strickprozess integrierten Lichtfasern.....	18
Abbildung 7 - Demonstrator einer kompletten Türinnenverkleidung .....	19

## 1 Kurzzusammenfassung

Das Vorhaben untersuchte die Realisierbarkeit großflächiger Automobilinterieurbauteile auf Basis strukturierter, zonierter Mehrlagenstrickarchitekturen aus nachwachsenden Rohstoffen (Hanf) unter konsequenter Reduktion fossiler polymerer Matrixanteile. Ziel war nicht die bloße Substitution einzelner Materialien, sondern eine konstruktive Systeminnovation: Die mechanische Tragwirkung sollte primär architekturbasiert erzeugt werden, während thermoplastische Komponenten ausschließlich und nur so weit wie zwingend erforderlich lokal dosiert zur Fixierung eingesetzt werden.

Die Entwicklung des Verfahrens konnte erfolgreich durchgeführt und erste Prototypen von automobilen Türseitenverkleidungen hergestellt werden. Dabei wurden die folgenden technologischen Ergebnisse erreicht:

- Naturfaseranteil der hergestellten Verkleidungen von 80 % (nachwachsender Rohstoff: cottonisiertes Hanf Nm 30)
- Reproduzierbares Prozessfenster in 14 gg (Mehrlagen-Flachstrick)
- Formstabile Geometrie bei moderater thermischer Aktivierung (~100 °C)
- Bauteilnahe Demonstration inkl. Funktionsintegration (Vent, Lautsprecher, Licht)
- Bauteilgewicht ca. 0,8 kg als dreilagiger Verbund (dekorative Oberlage, voluminöse Zwischenlage, tragende Unterlage)
- Übertragbarkeit des Verfahrens auf weitere Interieur Anwendungen (Seitenverkleidungen, Sitzrückseiten, Mittelkonsolen)

Die entwickelte Struktur verzichtet auf flächige fossile Polymermatrizen und nutzt stattdessen eine architekturbasierte Traglogik über Lagenabstand, Kopplungsdichte und Zonierung. Eine separate massive Kunststoffträgerplatte ist konstruktiv nicht mehr erforderlich. Eine vollständige Recyclingfähigkeit der Bauteile konnte im Rahmen des Projektes noch nicht erreicht werden. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass eine Konstruktion ausschließlich aus Hanffasern nicht die erforderliche Formstabilität erreicht. Untersucht wurde ferner, ob die Stabilität durch Einsatz von biobasierten Harzpulvern im Strickvorgang gelingt. Obwohl damit zwar eine grundsätzliche Fixierwirkung erzielt werden konnte, war diese zu unpräzise in der Einbringung und Dosierung, hatte negative Einflüsse auf die Strickmaschine und erlaubte letztendlich keine ausreichend reproduzierbaren dauerstabilen Strukturqualitäten. Um das angestrebte Verfahren erfolgreich umzusetzen, ist es daher vorläufig noch erforderlich die Stabilisierung durch im Strickprozess integrierte kunststoffbasierte Fixierfäden zu erzeugen. Dadurch bleibt ein Kunststoffanteil von ca. 20 % am fertigen Bauteil bestehen, was den Stand der Technik allerdings dennoch deutlich übertrifft.

## 2 Einleitung

Die Automobilindustrie steht vor der Herausforderung, CO<sub>2</sub>-Emissionen entlang der gesamten Wertschöpfungskette substanziell zu reduzieren. Während Elektrifizierung und Leichtbau die Nutzungsphase adressieren, liegt ein erhebliches Minderungspotenzial in der Herstellungsphase – insbesondere bei der Materialwahl.

Türinnenverkleidungen moderner Fahrzeuge bestehen typischerweise aus:

- spritzgegossenen Kunststoffträgern (PP, PC/ABS o. ä.) aus fossilen Rohstoffen
- kaschierten Textil- oder Dekorlagen
- zusätzlichen Akustik- oder Schaumlagen
- integrierten Halte- und Befestigungselementen
- nachträglich montierten Funktionskomponenten (Lautsprechergritter, Vent-Gitter, Lichtführungen)

Diese Struktur führt zu hohem fossilem Polymeranteil, materialbedingtem Verschnitt (ca. 20 % bei Zuschnitt aus rechteckigem Halbzeug), multiplen energieintensiven Prozessschritten und Verbundwerkstoffen mit erschwerter Recyclingfähigkeit. Naturfaserverstärkte Kunststoffe (NFPP) reduzieren zwar den fossilen Anteil, verbleiben jedoch als matrixdominierte Hybridwerkstoffe mit geschlossener polymerer Phase.

Die grundlegende Idee dieses Vorhabens ist es daher, die Bauteile auf Basis von strukturierten und zonierten Mehrlagengestricken aus Naturfasern herzustellen. Die Einsparung von CO<sub>2</sub>-Emissionen im Vergleich zum Stand der Technik entsteht dabei durch den Verzicht von Kunststoff zugunsten von Hanffasern. Das völlig neugedachte Herstellverfahren durch Mehrlagengestricke soll dabei aber zu wesentlich höheren Naturfaseranteilen im fertigen Bauteil führen als es bisher verfolgte Ansätze (Spritzguss aus NFPP) erlauben.

Der Einsatz nachwachsender Rohstoffe wie Hanf bietet einen dreifachen ökologischen Hebel:

- Ersatz fossiler Kunststoffe durch jährlich erneuerbare Biomasse
- Bindung von atmosphärischem CO<sub>2</sub> während des Pflanzenwachstums
- Reduzierung energieintensiver chemischer Syntheseprozesse

Hanf ist eine schnell wachsende Pflanze (Ernte nach ca. 120 Tagen), die prinzipiell ohne Pestizide und mit geringem Wasserbedarf angebaut werden kann. Die Fasern weisen gute mechanische Eigenschaften auf und sind damit grundsätzlich für technische Anwendungen geeignet.

Eine vollständige Analyse zur Kohlenstoffbilanz von Hanf (und anderen Naturfasern) wurde vom Nova Institut in Hürth durchgeführt. [1] Diese Studie berücksichtigt die Emissionen der gesamten Produktionskette, inkl. Feldarbeiten Dünger, Pestiziden, Faserverarbeitung und Transport, bis zum Verarbeiter in Deutschland. Sie errechnet im Ergebnis Treibhausgasemissionen für Hanf abhängig vom gewählten Dünger von 360 – 400 kg CO<sub>2</sub>-eq pro Tonne Faser. Dem gegenüber steht allerdings eine CO<sub>2</sub>-Aufnahme durch den Hanf von 1393 kg CO<sub>2</sub>-eq pro Tonne Faser, wodurch sogar eine negative CO<sub>2</sub>-Bilanz erreicht wird:

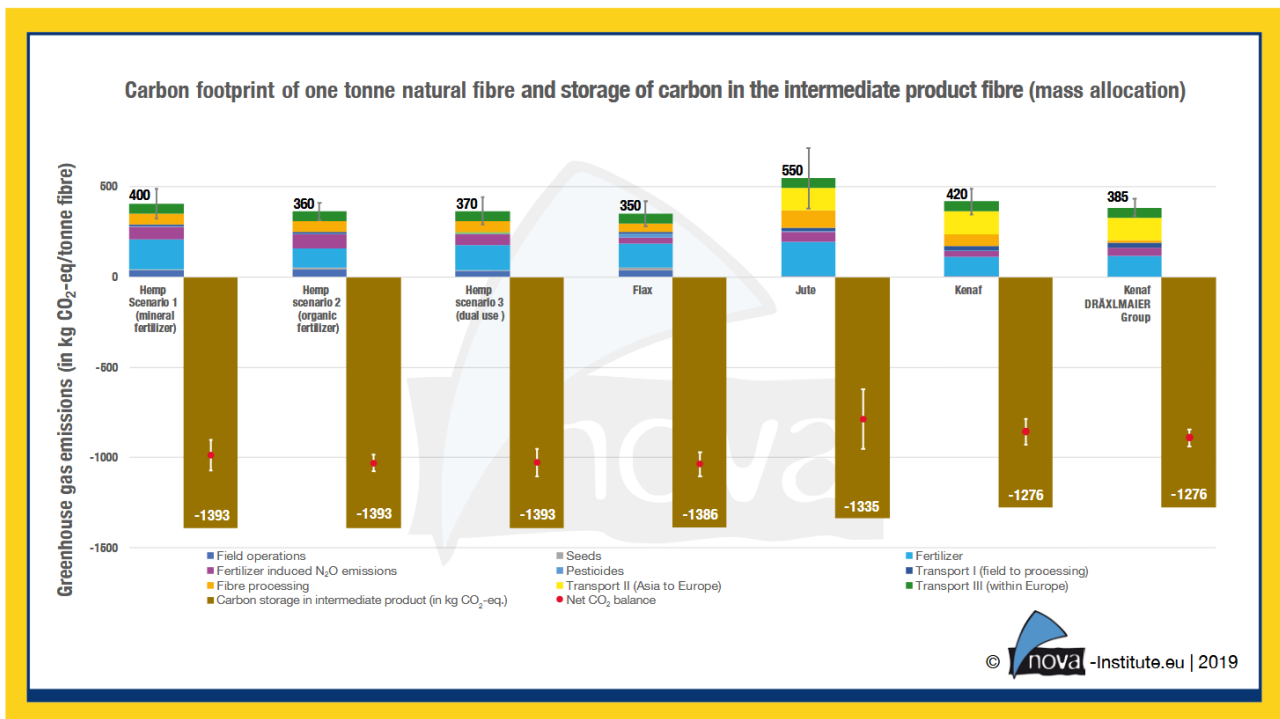


Abbildung 1 - Treibhausgasemissionen pro Tonne Naturfasern, inkl. CO<sub>2</sub>-Aufnahme; Nova Institut 2019

In diesem Projekt sollte untersucht werden, ob es durch moderne Verfahren der Stricktechnik und nachfolgender dreidimensionaler Formgebung möglich ist, Interieurbauteile aus einem möglichst hohen Anteil von Hanffasern herzustellen. Um das CO<sub>2</sub>-Einsparpotenzial zu maximieren und falls möglich auch eine Recyclingfähigkeit der Teile zu erzielen, sollte hierbei geprüft werden, ob es idealerweise durch den Mehrlagenaufbau bereits gelingt, die nötige Formstabilität bei ausschließlichem Einsatz der Hanffasern zu erreichen, oder ob hierzu schmelzende Komponenten in Form von biobasierten Harzpulvern oder Kunststoffäden erforderlich sind. Es sollte soweit möglich Hanf aus biologischem Anbau zum Einsatz kommen, um die Umweltwirkung des Verfahrens zu maximieren. Ferner sollte im Projekt die Möglichkeit untersucht werden, durch das Verfahren bereits Funktionalitäten in die Seitenverkleidungen zu integrieren, um im Vergleich zum Stand der Technik, die dafür erforderlichen Arbeits-, Energie- und Materialaufwände einzusparen.

### 3 Hauptteil

#### 3.1 Durchgeführte Arbeiten

##### Material und Maschinenbasis

Ein Ziel der Projektarbeiten war die Schaffung einer reproduzierbaren Entwicklungsplattform für Hanffaser-Mehrlagenstricke. Hierzu wurden verschiedene Materialien untersucht und für die weitere Projektdurchführung definiert sowie Versuche zur Parametrisierung der Strickmaschine durchgeführt.

##### Materialscreening und Leitmaterialdefinition

Versuchsdesign:

Im Rahmen des Materialscreenings wurden umfangreiche Testreihen mit Hanffasern unterschiedlicher Herkunft, Aufbereitungsgraden, Faserfeinheiten und Reinheitsniveaus durchgeführt. Neben cottonisierten Garnen wurden nicht-cottonisierte, grobfaserige sowie unterschiedlich stark verunreinigte oder inhomogene Qualitäten in identischen Basismustern verarbeitet, um Laufverhalten, Fadenbruchrate, Faserflug, Maschenbild und Spannungsstabilität vergleichbar zu bewerten.

Entscheidungskriterien waren:

- i. Prozessstabilität (minimierte Störereignisse)
- ii. reproduzierbares Maschenbild
- iii. Eignung für Mehrlagensysteme (geringe Drift)
- iv. Handhabung (Staub/Faserflug)
- v. Verfügbarkeit/Skalierbarkeit.

Die Versuche zeigten, dass insbesondere folgende Parameter kritisch waren:

- stark schwankende Faserfeinheiten führten zu instabilen Maschenlängen und erhöhter Spannungsdrift,
- gröbere oder unzureichend aufbereitete Faseranteile verursachten erhöhte Reibspitzen an Führungen und Nadeln,
- Restschäben, Staubanteile und Inhomogenitäten steigerten Faserflug und Störereignisdichte,
- inhomogene Garnaufbauten führten zu lokaler Verdichtung bzw. Ausdünnung innerhalb der Mehrlagenarchitektur.
- Mehrheitlich waren die Fasern nicht oder nur auf extrem groben Maschinen zu verarbeiten.

In der Mehrlagenkonfiguration verstärkten sich diese Effekte deutlich: Bereits geringe Streuungen in Faserquerschnitt oder Oberflächenbeschaffenheit führten zu planarer Welligkeit oder unzureichender Kopplungsstabilität. Die resultierende Fehlerquote ließ eine stabile Prozessführung nicht zu.

Ergebnis: Cottonisiertes, weiches Hanf Nm 30 erwies sich als deutlich überlegen hinsichtlich Maschenhomogenität und Laufstabilität. Nicht cottonisierte Qualitäten zeigten erhöhte Reibspitzen, mehr Faserflug und eine erhöhte Störereignisdichte (Fehlerbilder: Aufrauen an Führungen, sporadische Fadenbrüche, lokale Maschenaussetzer). Die negativen Versuchsergebnisse waren somit kein Randbefund, sondern ein wesentlicher Erkenntnisschritt: Für eine architekturbasierte, polymerarme Mehrlagenstruktur ist eine definierte, fein aufbereitete Naturfaserqualität zwingend erforderlich. Als Leitmaterial wurde daher als cottonisiertes Hanf Nm 30 festgelegt, da nur damit eine weitere Prozessentwicklung möglich war.

#### Maschinenparametrisierung (Baseline) und Feinheitsvergleich 14 gg/18 gg

Versuchsdesign:

Aufbau eines Parameterraums mit Variation von Geschwindigkeit, Abzug, Kulierung, Sinkerposition und Fadenführerhöhe. Jede Einstellung wurde über definierte Laufzeiten geprüft, um zeitabhängige Drift zu beobachten. Parallel wurden identische Muster in 14 gg und 18 gg gefahren.

Bewertet wurden:

- i. Spannungsstabilität
- ii. planare Warenlage
- iii. Fehlerrate (Maschenaussetzer, Fadenrisse)
- iv. Eignung für Mehrlagenkopplung

Ergebnis: Ein stabiler Parametersatz wurde identifiziert: langsame Geschwindigkeit, mittlere Sinkerposition, hoher Abzug, mittlere Kulierung, tiefer Fadenführer. 14 gg zeigte robuste Toleranz gegenüber geringen Spannungsabweichungen. 18 gg war prinzipiell lauffähig, jedoch grenzwertig: kleine Drift führte schneller zu Lageninkongruenz und Welligkeit. Schlussfolgerung: 14 gg als robuster Entwicklungspfad; 18 gg nur unter verschärfter Rohstoff- und Spannungsdisziplin.

### Biobasierte Binder

Um die nötige Formstabilität zu erreichen wurden parallel biobasierte Harzpulver und thermoplastische Fixierfäden (nächster Abschnitt) untersucht.

Ziel war die Entwicklung biobasierter Binder- und Fixierkonzepte als flankierender Technologiepfad zum etablierten Fixierfadenansatz, ohne das architekturbasierte Tragprinzip und die Minimierung des polymeren Flächenanteils zu gefährden. Biobasiertes Harzpulver wurde im bisherigen Projektverlauf direkt im Strickprozess zugeführt und später in einer dreidimensionalen Form verpresst; dabei zeigte sich zwar die prinzipielle Machbarkeit einer Fixierung, zugleich aber eine sehr ungleichmäßige, schlecht dosierbare Verteilung mit lokalen Über- und Unterbindungen sowie einer Tendenz zur unerwünschten flächigen Matrixbildung.

### Integration thermoplastischer Fixierfäden

Versuchsdesign:

Einbringung von Grilon Fäden unterschiedlicher Fadenstärken und Schmelzpunkte als separates Fadensystem, zunächst in einfachen Zonen (Ränder/Steifigkeitsfelder), später in komplexeren Übergängen. Ziel war die lokale Fixierbarkeit im Formprozess bei moderater Temperatur, ohne flächige Matrixbildung.

Bewertet wurden

- i. Verarbeitbarkeit (Zusatzfadensystem)
- ii. Einfluss auf Maschenbildung
- iii. spätere Fixierwirkung nach thermischer Aktivierung.

Ergebnis: Grilon konnte prozessintegriert eingebracht werden. Durch Variation der Fadenparameter wurde eine abgestufte Fixierlogik ermöglicht (z. B. weichere Aktivierung in Flächen, stärkere Fixierung in Kanten /Befestigungszonen). Damit wurde die Grundlage für den späteren Formprozess gelegt.

### Rohstoffstandardisierung

Ziel war es, die Definition eines belastbaren Rohstoffstandards für Hanfgarne als Basis einer reproduzierbaren Serienfertigung zu erreichen.

Es wurden geeignete Hanfqualitäten spezifiziert (z. B. Nm 30+, Variationskoeffizient der Feinheit  $CV < 15\%$ ), zulässige Streuparameter (Reibwert, Feuchtegehalt, Faserlängenverteilung) festgelegt und entsprechende Prüf- bzw. Eingangskontrollkriterien definiert. Da in Europa derzeit noch keine ausreichend feinen, prozessstabilen Hanfgarne in industriellem Maßstab verfügbar sind, kann die

Leitqualität zum jetzigen Zeitpunkt nur durch fein cottonisierte Hanfgarne aus asiatischer Produktion abgedeckt. Parallel dazu wurde der Aufbau perspektivischer europäischer Lieferketten vorbereitet: In einem gezielt angelegten Joint Venture soll mittel- bis langfristig eine europäische Feinaufbereitung etabliert werden, die cottonisierte Feinqualitäten nach dem definierten Standard bereitstellt und damit eine skalierbare, regional verankerte Rohstoffbasis schafft. Somit wurden einerseits Kriterien zur Beherrschung von Materialstreuung und Spannungsdrift im laufenden Prozess geschaffen und ferner die strategische Grundlage gelegt, die heute genutzten Feinqualitäten künftig durch europäische, joint-venture-basierte Rohstoffquellen zu ergänzen bzw. zu substituieren.

### **Mehrlagenarchitektur und Prozessfenster**

Das Ziel war Entwicklung einer mechanisch tragfähigen Mehrlagenstruktur mit reproduzierbarer Prozessstabilität.

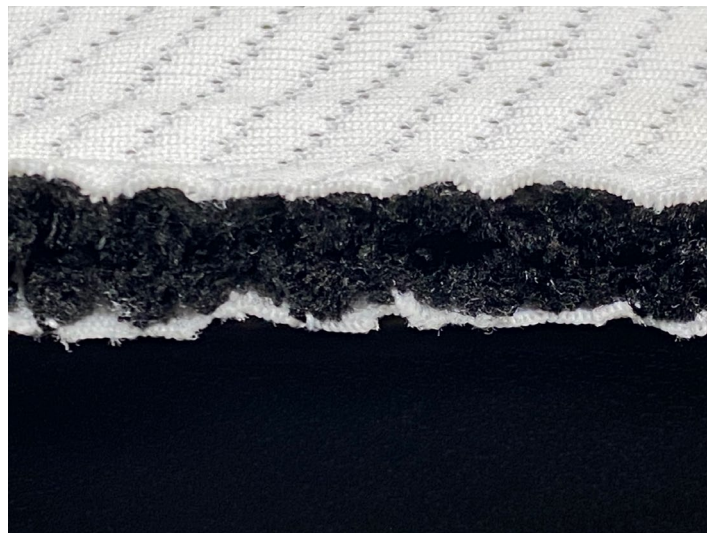


Abbildung 2 - Entwickelte 3-Lagenstruktur, hier zur Demonstration in schwarz/weiß gestrickt

### *Bindungs- und Kopplungsscreening (Strukturfamilien)*

Versuchsdesign:

Screening von Bindungsfamilien (doppelflächig, Abstandskopplung, zonierte Kopplungsdichten).

Der Parameterraum umfasste

- i. Kopplungsdichte (niedrig/mittel/hoch)
- ii. Maschendichtevariation (Fläche vs. Rand)
- iii. Lagenabstandskonfiguration
- iv. Positionierung von Fixierfäden.

Jede Variante wurde in mindestens drei Wiederholungen unter identischen Prozessparametern gefahren, um Drift und Reproduzierbarkeitseffekte zu erfassen.



Abbildung 3 - Beispiele für diverse analysierte Bindungsstrukturen

Beobachtungen/Ergebnisse: Niedrige Kopplungsdichte führte zu unzureichender Schubübertragung zwischen den Lagen (Fehlerbild: Relativverschiebung unter Biegung, lokale Beulenbildung). Hohe Kopplungsdichte erhöhte die Materialakkumulation und führte zu lokalen Verdickungen (Fehlerbild: Randwelligkeit, höhere Rückfederung nach Formung). Eine mittlere Kopplungsdichte erwies sich als bestes Verhältnis zwischen Stabilität und Materialeinsatz.

### Spannungsdrift – Fehlerbilder, Ursachenanalyse, Gegenmaßnahmen

Fehlerkatalog (typische Fehlerbilder):

- i. Fadenbruch / Aufrauen an Führungsstellen
- ii. Maschenaussetzer in Mehrlagensequenzen
- iii. planare Welligkeit (Lageninkongruenz)
- iv. Kopplungsinstabilität in Übergängen (lokales Aufstellen)
- v. Randinstabilität (Einrollen, ungleichmäßige Kanten)

Ursachenbaum: Materialstreuung (Reibwert, Staub, Querschnitt) → Spannungsdrift → differenzielle Maschenlängen → Lagenversatz → Welligkeit/Instabilität.

Gegenmaßnahmen:

- i. Reduktion der Geschwindigkeit zur Dämpfung dynamischer Reibspitzen
- ii. Erhöhung des Abzugs zur Stabilisierung der planaren Lage

- iii. mittlere Kulierung zur Vermeidung von Über /Unterkulierung
- iv. tiefe Fadenführung zur Reduktion lokaler Reibspitzen.

Ergebnis: Stabilisierung des Prozessfensters in 14 gg; 18 gg blieb driftnfällig und wurde als grenzwertig eingestuft.

#### Mechanische Vorbewertung der Struktur (Entwicklungsindikatoren)

Da OEM-spezifische Vollprüfprogramme nicht Bestandteil der frühen Entwicklungsphase waren, wurde eine mechanische Vorbewertung über strukturmechanische Indikatoren durchgeführt:

- i. Biegeantwort bei definierter Durchbiegung
- ii. Rückstellverhalten nach Entlastung
- iii. Stabilität der Kopplungspunkte unter zyklischer Handhabung
- iv. lokale Druckverformbarkeit in Funktionszonen

Diese Indikatoren dienten der Auswahl robuster Strukturvarianten für die bauteilnahe Überführung im späteren Projektverlauf.

#### Prozessmonitoring

Ziel: Aufbau eines durchgängigen Prozessmonitorings zur Beherrschung enger Prozessfenster in der Entwicklungs- und späteren Serienphase.

Vorgehen: Im ersten Schritt wurde eine in-line Spannungsüberwachung in ausgewählten Fadenzügen implementiert, um relevante Prozessgrößen (Spannung, Geschwindigkeitsprofile, Störereignisse) kontinuierlich zu erfassen. Darauf aufbauend wurden Auswertelgorithmen zur Driftanalyse entwickelt, die Muster und Trends in den Spannungsverläufen identifizieren und geeignete Kompensationsstrategien (z. B. automatische Anpassung von Abzug oder Geschwindigkeit) ableiten. Parallel wurden enge Parameterfenster für die Kernstellgrößen (Geschwindigkeit, Abzug, Kulierung, Fadenführung) definiert und über Versuchsreihen validiert. Abschließend wurde eine statistische Prozesskontrolle (SPC) mit geeigneten Kennzahlen und Regelkarten eingeführt, um kritische Zustände frühzeitig zu erkennen und die Prozessstabilität nachhaltig zu erhöhen.

## Architekturrobustheit

Ziel: Erhöhung der strukturmechanischen Robustheit der Mehrlagenarchitektur in kritischen Bereichen sowie Absicherung feinmaschiger Architekturen (18 gg) für eine perspektivische Serienanwendung.

Vorgehen: Ausgangspunkt war eine detaillierte Analyse der kritischen Übergangsbereiche (Ränder, Befestigungszonen, Radien), in denen bislang Randinstabilitäten, lokale Welligkeit oder Spannungsgradienten auftreten. Auf dieser Basis wurden Kopplungsgeometrie, Zonierung (Maschendichte/Kopplungsdichte) und Fixierfaden Positionierung gezielt angepasst, um die Stabilität in diesen Bereichen zu erhöhen. Parallel wurde die 18 gg Architektur systematisch hinsichtlich Spannungsdrift, Welligkeit und Kopplungsstabilität untersucht und mit der 14 gg Referenz verglichen. Ergänzend wurden Ansätze zur Reduktion polymerer Fixieranteile (z. B. biobasierte oder modifizierte Fixierfäden) entwickelt und hinsichtlich Delaminationssicherheit unter definierten mechanischen und klimatischen Belastungen geprüft. Die Arbeiten zielten auf eine robuste, materialsparende Architektur mit hoher Ausfallsicherheit, insbesondere in Rand und Übergangsbereichen.

### **Bauteilnahe Überführung und Konturoptimierung**

Das Ziel dieser Arbeiten war die Überführung der stabilisierten Mehrlagenarchitektur in eine bauteilnahe Türtafelgeometrie.

### Sukzessiver Strukturaufbau (Komplexität in Stufen)

Die Bauteilstruktur wurde bewusst in Stufen aufgebaut, um Interaktionen zwischen Geometrie, Zonierung und Prozessstabilität transparent zu halten:

Stufe 1: Flächige Mehrlagenbasis (Stabilität/Planlage).

Stufe 2: Randzonen (Kantenstabilität, Einrollneigung, Fixierfäden).

Stufe 3: Befestigungszonen (lokale Verdichtung, Fixierlogik).

Stufe 4: Lokale Verstärkungsfelder (Steifigkeit in definierten Bereichen).

Stufe 5: Übergänge und Radien (Kopplungsgeometrie, Rückfederung).

Jede Stufe wurde erst nach reproduzierbarer Stabilisierung in die nächste Stufe überführt.

### Konturoptimierung (Fehlerbilder, Iterationslogik)

Die folgenden Fehlerbilder wurden in der bauteilnahen Geometrie beobachtet:

- i. Randwelligkeit in Übergängen
- ii. Rückfederung in großflächigen Radien
- iii. lokale Verdickungen bei zu hoher Kopplungsdichte
- iv. Instabilität an Befestigungszonen durch Spannungsgradienten.

Um diese Probleme im Prozess zu beherrschen, wurde das Verfahren iterativ angepasst:

- i. Anpassung der Zonierung (Maschendichte/Kopplungsdichte)
- ii. gezielte Positionierung von Fixierfäden
- iii. Reduktion lokaler Materialakkumulation
- iv. Stabilisierung der Übergänge über robuste Kopplungsgeometrien.

Das Ergebnis dieser erfolgreichen Verfahrensoptimierungen war ein stabiler Grundkörper („reines Formteil“), der als Ausgangsbasis für den späteren Formprozess und die Funktionsintegration diente.

### Materialreduktion

Durch die lastangepasste Zonierung konnte eine Materialreduktion erreicht werden: Material wurde in Flächen mit geringer Beanspruchung reduziert, während Rand und Befestigungszonen gezielt verstärkt wurden. Die bauteilnahe Ausprägung zeigte eine Reduktion um ca. 0,20 kg je Bauteil (Referenz: vorherige Ausprägung/Trägerlogik). Diese Reduktion ist konstruktiv bedingt und hat Einfluss auf die Umweltwirkung des Verfahrens.

### **Formprozess und thermoplastische Fixierung**

Das Ziel dieser Arbeiten war ein Verfahren zur formstabilen Fixierung des Grundkörpers ohne flächige Matrixbildung bei moderater Temperatur zu erreichen.

### Prozessführung: Durchlauf bei ca. 100 °C, leichte Pressung

Die Formgebung erfolgte als Durchlaufprozess bei ca. 100 °C mit leichter Pressung. Die Temperatur wurde so gewählt, dass die thermoplastischen Fäden partiell erweichen und lokal

benetzen können, ohne eine flächige Durchtränkung zu erzeugen. Die Pressung diente der definierten Formübernahme und der Kontaktierung in Fixierzonen. Ziel war ein prozessrobuster Ansatz mit moderater thermischer Belastung (Energieprofil) und minimalem Polymeranteil.

Bewertungskriterien der Fixierwirkung:

- i. Rückfederung nach Entformung
- ii. Kanten /Randstabilität
- iii. Lagenverschiebung
- iv. lokale Delaminationstendenzen in Übergängen

Ergebnis: Die Fixierwirkung konnte über Variation von Position und Stärke der Fixierfäden zoniert angepasst werden. Auf diese Weise konnte eine ausreichende Stabilisierung des Grundkörpers bei moderater Temperatur erreicht werden.

### **Funktionsintegration und Systempotenzial**

Das Ziel der finalen Arbeiten war die Demonstration der systemischen Integrationsfähigkeit von Funktionalitäten zur Perspektive Prozesskettenverkürzung bei der Herstellung von Seitenverkleidungen durch das neue Verfahren im Vergleich zum Stand der Technik.

#### *Ventlüfterfeld: strukturelle Funktion im Strickprozess*

Ein Ventlüfterfeld konnte als strukturierte Zone direkt in die Mehrlagenarchitektur integriert werden (Abbildung 3). Technischer Fokus war die Geometrieabbildung über lokale Bindungs- und Kopplungsvariation sowie die Sicherung der Planlage im Übergang zur umgebenden Fläche.

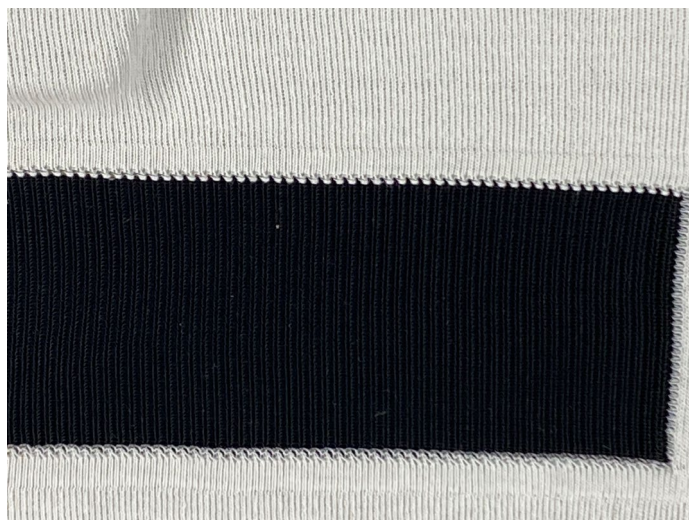


Abbildung 4 - Nahaufnahme, des im Strickprozess integrierten Ventlüfterfeldes

### Lautsprecher-Musterfeld: lokale Strukturvariation und akustische Randbedingungen

Ein Lautsprecher-Musterfeld konnte als Demonstration lokaler Funktionszonen in die Struktur integriert werden (Abbildung 4). Variiert wurden dabei lokale Steifigkeit und Dicke, um die prinzipielle Anpassbarkeit an akustische Anforderungen zu zeigen. Das Feld ist als Demonstrator zu verstehen; OEM-spezifische Akustikfreigaben sind Bestandteil einer späteren Qualifikation.



Abbildung 5 - Nahaufnahme des bereits im Strickprozess integrierten Lautsprecher-Musterfeldes

### Lichtfaserintegration: Einbringung ohne Nachmontage

Die Integration einer Lichtfaser konnte nach umfangreicher Modifikation der kompletten Fadenleitelemente der Strickmaschine erfolgreich als prozessintegrierte Einlegerlösung demonstriert werden, als Einbringung in eine definierte Lage ohne nachträgliche Montage (Abbildung 5).



Abbildung 6 - Nahaufnahme der im Strickprozess integrierten Lichtfasern

### 3.2 Ergebnisse

Das angestrebte Verfahren zur Herstellung von Türinnenverkleidungen aus Naturfaser konnte grundsätzlich erfolgreich entwickelt werden. Die notwendigen Materialien und Qualitäten, der Mehrlagenaufbau sowie alle dafür nötigen Maschinenparameter konnten identifiziert werden und es ist gelungen auf dieser Basis Demonstratoren herzustellen (Abbildung 2), die einen Hanf-Anteil von 80 % erreichen, die nötige Formstabilität zeigen und auch die Fähigkeit zur Integration zusätzlicher Funktionalitäten unter Beweis gestellt haben.



Abbildung 7 - Demonstrator einer kompletten Türinnenverkleidung

Es hat sich dabei gezeigt, dass die Naturfaserqualität der dominante Prozessparameter ist, da die Mehrlagenarchitektur hochsensitiv gegenüber den Eigenschaften der Hanffasern ist.

Entscheidend sind:

- Faserfeinheit (Nm 30 oder feiner erforderlich)
- Gleichmäßigkeit (CV-Wert <15 %)
- Cottonisierung (Aufschluss zu Einzelfasern)
- Partikel- und Staubanteil (Prozessstabilität)
- Faserlängenverteilung
- Reibwertkonstanz

Insbesondere im Feinstrickbereich (14 gg / 18 gg) wirken kleine Materialstreuungen unmittelbar auf Spannungsdrift, Maschenlängenunterschiede, Lageninkongruenz und Delaminationstendenzen.

Es hat sich gezeigt, dass die derzeit verfügbaren europäischen Hanffasern aus biologischem Anbau, deren Anwendung zur Maximierung der Umweltwirkung des Verfahrens angestrebt war, im entwickelten Mehrlagen-Feinstrick nicht prozessstabil verarbeitbar waren. Es kam zu:

- Erhöhter Fadenbruchrate
- Starkem Faserflug
- Unkontrollierbarer Spannungsdrift
- Instabilität in Mehrlagensequenzen

Insgesamt konnten aus den verfügbaren Hanfqualitäten, die im Projekt untersucht wurden, nur mit cottonisiertem Hanf Nm 30 gute Ergebnisse erzielt werden, mit denen das Verfahren bis hin zum Demonstrator entwickelt werden konnte.

Der Markt für Hanffasern steckt von seinem Reifegrad her heute immer noch in seinen Anfängen und kämpft daher mit mangelndem Angebot und Mengen sowie erheblichen Qualitätsschwankungen. Cottonisierung von Hanf zu feinen, gleichmäßigen Qualitäten erfolgt in Europa bislang nur in Pilotanlagen oder Versuchsspinnereien. Eine industrielle Serienproduktion mit reproduzierbarer Chargenstabilität existiert derzeit nicht. Ebenso gibt es für fein cottonisierten Hanf keine Zertifizierungsstandards, wie etwa für Bio-Baumwolle. Werden die im Projekt als für das Verfahren notwendigen Hanfqualitäten auch aus biologischem Anbau zukünftig verfügbar, sollte es aus jetziger Sicht jedoch möglich sein diese ohne größere Entwicklungsarbeiten einzusetzen.

Mit einem Naturfaseranteil von 80 % geht das zum Projektabschluss erreichte Verfahren bereits über den Stand der Technik hinaus. Dennoch bleibt ein Kunststoffanteil zur Erreichung der Formstabilität erforderlich. Versuche die Struktur rein aus Hanffasern zu fertigen, konnten die nötige Stabilität nicht erreichen. Der Einsatz von biobasierten Harzpulvern, die im Formprozess thermisch aktiviert werden, konnten in ersten Versuchen zwar eine Fixierwirkung erreichen, diese blieb aber zu gering, um unter bauteilnahen Mehrlagenbedingungen ausreichend reproduzierbare, dauerstabile Strukturqualitäten zu erzielen. Zum jetzigen Entwicklungsstand des Verfahrens können die Interieurteile daher noch nicht vollständig aus Naturmaterialien hergestellt werden und eine vollumfängliche Recyclingfähigkeit ist daher noch nicht erreicht. Dennoch kann eine Wiederverwertung der Teile mit dem derzeitigen Entwicklungsstand erfolgen: Schreddern des

kompletten Bauteils und Verpressen des Rezyklats unter Beigabe von Bioharzen zwischen zwei Vlieslagen z.B. zu einer Kofferraumabdeckung.

Der erreichte Entwicklungsstand des Verfahrens mit einem Hanf-Anteil von 80 % in den Türverkleidungen erreicht dennoch ein substanzielles Potenzial zur Umweltentlastung im Vergleich zum Stand der Technik. Im Zentrum steht dabei das CO<sub>2</sub>-Einsparpotenzial der so herstellbaren Bauteile. Vergleicht man diese mit den im Stand der Technik aus Kunststoff gefertigten Bauteile, entsteht die wesentliche Einsparung aus dem weitgehenden Ersatz von Kunststoff durch Hanffasern. Darüber hinaus auch noch aus der im Gegensatz zum üblichen Verfahren verschnittfreien Konturfertigung und der prinzipiell gezeigten Möglichkeiten der Funktionsintegration ohne zusätzliche Kunststoffbaugruppen.

Der in diesem Projekt erreichte Demonstrator weist eine Bauteilmasse von rund 0,8 kg auf und besteht zu 80 % aus Hanf (ca. 0,64 kg) und zu etwa 20 % aus thermoplastischen Komponenten (ca. 0,16 kg, vorwiegend Grilon-Fixierfäden).

Als Referenz dient eine polymerdominierte Türinnenverkleidung mit einer Bauteilmasse von 0,8 kg Kunststoff (PP) und Fertigung aus rechteckigem Halbzeug mit ca. 20 % konstruktiv bedingtem Verschnitt (0,16 kg) sowie nötigen Zusatzteilen/Kunststoffkomponenten für Lautsprecherabdeckung, Vent-Zonen und lichtführenden Elemente (konservativ geschätzt 0,10 kg).

Für den Vergleich ziehen wir als CO<sub>2</sub>-Faktoren für thermoplastische Polymermaterialien (PP): 2,0 kg CO<sub>2</sub>-eq/kg heran [2].

Für den CO<sub>2</sub>-Faktor von Hanf beziehen wir uns auf die Studie des Nova Instituts von 2019 [1]. Diese Studie berücksichtigt die Emissionen der gesamten Produktionskette, inkl. Feldarbeiten Dünger, Pestiziden, Faserverarbeitung und Transport, bis zum Verarbeiter in Deutschland. Sie errechnet im Ergebnis Treibhausgasemissionen für Hanf abhängig vom gewählten Dünger von 360 – 400 kg CO<sub>2</sub>-eq pro Tonne Faser. Wir rechnen hier daher konservativ mit dem höchsten Wert von 0,4 kg CO<sub>2</sub>-eq/kg.

#### Materialspezifische Klimawirkung Referenzsystem:

Bauteil: 0,8 kg × 2,0 kg CO<sub>2</sub>-eq/kg = 1,60 kg CO<sub>2</sub>-eq

Verschnitt: 0,16 kg × 2,0 kg CO<sub>2</sub>-eq/kg = 0,32 kg CO<sub>2</sub>-eq

Zusatzteile: 0,10 kg × 2,0 kg CO<sub>2</sub>-eq/kg = 0,20 kg CO<sub>2</sub>-eq

Summe Referenz: 2,12 kg CO<sub>2</sub>-eq pro Türverkleidung

### Neu entwickeltes System

Der dreilagige Hanfverbund weist folgende materialspezifische Klimawirkung auf:

Hanfanteil:  $0,64 \text{ kg} \times 0,4 \text{ kg CO}_2\text{-eq/kg} = 0,26 \text{ kg CO}_2\text{-eq}$

Thermoplastanteil:  $0,16 \text{ kg} \times 2,0 \text{ kg CO}_2\text{-eq/kg} = 0,32 \text{ kg CO}_2\text{-eq}$

Verschnitt: 0 kg (konturiert gestrickt, kein Seitenbeschnitt)

Zusatzteile: 0 kg (Lautsprecher-, Vent-, Lichtzonen integriert)

Summe entwickeltes System: 0,58 kg CO<sub>2</sub>-eq pro Türverkleidung

Aus der Gegenüberstellung resultiert eine konservativ berechnete CO<sub>2</sub>-Minderung von:

$2,12 \text{ kg CO}_2\text{-eq} - 0,58 \text{ kg CO}_2\text{-eq} = 1,54 \text{ kg CO}_2\text{-eq pro Türverkleidung.}$

Bei vier Türverkleidungen pro Fahrzeug ergibt sich:

$1,54 \text{ kg CO}_2\text{-eq} \times 4 = 6,16 \text{ kg CO}_2\text{-eq} \approx 6 \text{ kg CO}_2\text{-eq pro Fahrzeug}$

Für die Abschätzung des gesamten CO<sub>2</sub>-Entlastungspotenzials werden drei Szenarien zur Marktdurchdringung betrachtet. Als Modellannahme werden 3 Mio. Fahrzeuge pro Jahr in Deutschland zugrunde gelegt.

#### *5 % Marktdurchdringung*

150.000 Fahrzeuge/Jahr

→ 900 t CO<sub>2</sub>-eq/Jahr

#### *20 % Marktdurchdringung*

600.000 Fahrzeuge/Jahr

→ 3.600 t CO<sub>2</sub>-eq/Jahr

#### *50 % Marktdurchdringung*

1.500.000 Fahrzeuge/Jahr

→ 9.000 t CO<sub>2</sub>-eq/Jahr

Selbst bei moderater Marktdurchdringung (5–20 %) ergeben sich jährliche CO<sub>2</sub>-Entlastungen im Bereich von 900–3.600 t CO<sub>2</sub>-eq. Hierbei muss zusätzlich aber betrachtet werden, dass die Berechnung bis hierhin sehr konservativ durchgeführt wurde. Denn in seiner Studie berechnet das Nova Institut auch, dass den bereits genannten Treibhausgasemissionen von 400 kg CO<sub>2</sub>-eq pro Tonne Faser eine CO<sub>2</sub>-Aufnahme durch den Hanf im Wachstum von 1393 kg CO<sub>2</sub>-eq pro Tonne Faser gegenübersteht. Dadurch besitzt er sogar eine negative CO<sub>2</sub>-Bilanz. Berücksichtigt man dies ebenfalls, zumindest in dem Maße, dass die CO<sub>2</sub>-Aufnahme die verursachten Emissionen

ausgleicht, also einen effektiven CO<sub>2</sub>-Faktor von 0, so ergibt sich eine Einsparung von ca. 8,5 kg CO<sub>2</sub>-eq pro Fahrzeug. Dadurch erhöht sich bspw. für das Szenario einer 20 % Marktdurchdringung das rechnerische Einsparpotenzial auf 5.100 t CO<sub>2</sub>-eq/Jahr.

Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass das entwickelte System nicht grundsätzlich auf Türinnenverkleidungen beschränkt ist. Die Mehrlagen-Strickarchitektur ist prinzipiell auf weitere Interieurbauteile übertragbar, wie etwa:

- Seitenverkleidungen (ähnliche Geometrie und Anforderungen wie Türtafeln)
- Sitzrückseiten (textile Oberfläche, akustische Anforderungen)
- Mittelkonsolen-Verkleidungen
- Hutablagen
- Verkleidungsteile im Kofferraum

Die mögliche Übertragung auf weitere Bauteile des Autointerieur birgt daher ein noch größeres CO<sub>2</sub>-Minderungspotenzial.

### Ausblick

Nach Projektabschluss ist festzuhalten, dass die Technologie den Schritt von der Konzeptidee hin zu einem industriell anschlussfähigen System gemacht hat, eine volle Serienqualifikation steht noch. Die Mehrlagenarchitektur ist bauteilnah demonstriert, das Prozessfenster im 14 gg Strick ist stabil beschrieben, die formstabile Fixierung bei moderaten 100 °C ist reproduzierbar und die CO<sub>2</sub>-Minderung gegenüber einer konventionellen Seitenverkleidung ist quantitativ belegt.

Damit ist die grundsätzliche technische Machbarkeit großflächiger Hanf-Interieurbauteile mit architekturbasierter Tragwirkung nachgewiesen und als Referenzbauteil die Seitenverkleidung so weit entwickelt, dass sie als seriöser Ausgangspunkt für industrielle Pilotanwendungen dient. Die nächsten Schritte sind eine statistisch abgesicherte Dauer- und Alterungsbewertung, OEM-spezifische Vollprüfprogramme, eine vollständig standardisierte Bio-Hanf-Rohstoffkette und die Überführung aller Parameter in freigabefähige Serienspezifikationen.

Aus Sicht einer zukünftigen Markteinführung bedeutet das: Die Technologie ist reif für den Einstieg in kleinere und mittlere Anwendungen (z. B. Caravan-, Schienen- oder Nutzfahrzeuginterieur), in denen mit realen Bauteilen unter Praxisbedingungen Erfahrungen gesammelt und Referenzprojekte aufgebaut werden können. Parallel dazu können auf Basis der bereits etablierten Architektur und Prozesslogik die notwendigen Dauerprüfungen, Rohstoffstandardisierungen und Qualifikationsprogramme vorbereitet werden, um mittelfristig die Hürde zur automobilen Großserie zu nehmen. Der erreichte Stand bildet somit eine belastbare, industriell anschlussfähige Grundlage, von der aus eine Markteinführung in klar definierten Stufen realistisch und planbar ist.

## 4 Fazit

Das Vorhaben hat gezeigt, dass großflächige Automobil-Interieurbauteile auf Basis strukturierter, zonierter Mehrlagenstrickarchitekturen aus nachwachsendem Rohstoff (Hanf) technisch realisierbar sind. Die wesentliche Innovation liegt nicht allein in der Substitution einzelner Materialien, sondern in der konstruktiven Verschiebung der Traglogik von flächiger fossiler Polymermatrix hin zu architekturbasierter Lastaufnahme durch nachwachsende Fasern mit lokal dosierter thermoplastischer Fixierung. Erst durch dieses mit der modernen Stricktechnologie realisierte Konzept wird die Fertigung zu weit überwiegendem Anteil aus Naturfasern möglich.

Die mechanische Stabilität konnte bei moderater thermischer Aktivierung (~100 °C) reproduzierbar erzielt werden. Der Naturfaseranteil liegt bei über 80 %. Das Bauteilgewicht beträgt ca. 0,8 kg. Die Materialreduktion gegenüber konventionellen Systemen ist konstruktiv bedingt (Zero-Waste-Konturstrick, Funktionsintegration) und nicht durch bloße Substitution erreicht. Damit wurde der Kernansatz des Projektes technisch bestätigt.

Die demonstrierte konstruktive Architektur führt zu einer konservativ berechneten CO<sub>2</sub>-Mindestentlastung von 1,54 kg CO<sub>2</sub>-eq pro Türverkleidung, gegenüber einem polymerdominierten Referenzsystem mit 20 % Verschnitt und separaten Kunststoffeinlegern. Auf Fahrzeugebene ergibt sich ein Potenzial von ca. 6 kg CO<sub>2</sub>-eq pro Fahrzeug (vier Türverkleidungen). Bei industrieller Skalierung sind jährliche Einsparungen im Bereich von 900–9.000 t CO<sub>2</sub>-eq potenziell – selbst bei moderater Marktdurchdringung (5–50 %). Ferner ist das Verfahren grundsätzlich auch geeignet, über die hier beispielhaft untersuchten Türinnenverkleidungen hinaus auf weitere Fahrzeuginterieurteile angewendet zu werden, wodurch sich ein noch höheres CO<sub>2</sub>-Einsparpotenzial ergibt.

Mit dem erreichten Entwicklungsstand sollen die nächsten Schritte in Hinblick auf eine Markteinführung in Form statistisch abgesicherter Dauer- und Alterungsbewertung sowie OEM-spezifische Vollprüfprogramme angegangen werden.

## 5 Literaturverzeichnis

- [1] <https://renewable-carbon.eu/publications/product/carbon-footprint-and-sustainability-of-different-natural-fibres-for-biocomposites-and-insulation-material-%E2%88%92-full-version-update-2019/>
- [2] <https://www.econstor.eu/bitstream/10419/235747/1/1762784475.pdf>