

Abschlussbericht

zum FuE Vorhaben

Reg.-Nr.: 49VF180011

FuE-Einrichtung: **Faserinstitut Bremen e.V.**



DrapeX – Drapiersimulation auf experimenteller Basis

Andreas Mändle

Laufzeit des Projekts vom: 01.11.2018

bis: 31.07.2021

Gefördert durch das

Förderprogramm des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie „FuE-Förderung
gemeinnütziger externer Industrieforschungseinrichtungen – Innovationskompetenz“

INNO-KOM Modul „Vorlaufforschung“



Kurzbeschreibung zum FuE-Vorhaben

Reg.-Nr.: 49VF180011

Kurztitel: DrapeX – Drapiersimulation auf experimenteller Basis

Laufzeit des Projekts vom: 01.11.2018

bis: 31.07.2021

Name und Anschrift des Zuwendungsempfängers

FASERINSTITUT BREMEN e.V.

Am Biologischen Garten 2, 28359 Bremen

Kurzfassung (Zielstellung, Ergebnisse)

Zielstellung:

Das Projekt verfolgt das Ziel eine semi-analytische Methode zur Berechnung der Effekte zu entwickeln, die bei Umformung eines Verstärkungstextils auftreten, insbesondere in multiaxialen Gelegen. Als Projektergebnis liegt eine Methode vor, die es den Anwendenden ermöglicht ohne ausgeprägte Kompetenzen der Materialprüfung und Simulationsbedienung sowie mit geringen Berechnungsressourcen fertigungsrelevante und anwendungsfreundliche Ergebnisse zu erzeugen.

Ergebnisse:

Drapierprüfungen für 36 unterschiedliche Textilien wurden im DRAPETEST-Drapierprüfstand des Herstellers Textechno mit unterschiedlichen Kalotten durchgeführt, welche teils eigens für dieses Projekt hergestellt wurden. Die Ergebnisse wurden zusammen mit weiteren Messergebnissen aus Drapierprüfungen eines Vorgängerprojekts in eine gemeinsame Datenbank überführt, welche für die weitere statistische Analyse geeignet ist. Statistische Modelle wurden angepasst, um die in Experimenten mit dem DRAPETEST erzeugten Daten nachzubilden und zu verallgemeinern. Dazu wurde mittels der Statistiksoftware R eine Applikation geschrieben, die es ermöglicht, ohne tiefgehende Drapier- und Simulationskenntnisse die Daten darzustellen, zu analysieren und verschiedene regressionsähnliche Modelle aus den Bereichen der statistischen Modellierung und des Machine Learning anzupassen. Aus diesen Modellen können in der Anwenderoberfläche Vorhersagen für neue Eingangsparameter (d.h. Prozess- und Materialparameter) getätigt werden und deren Ergebnisse angezeigt werden. Es wurde ferner untersucht, inwieweit die Messergebnisse aus Umformungen unterschiedlich stark gekrümmter hemisphärischer Kalotten zur Vorhersage für Drapiereffekte bei komplexeren Geometrien genutzt werden können. Mögliche Verbesserungsmöglichkeiten wurden erarbeitet.

Veröffentlichungen

Ergebnisse der Arbeitspakete Modellierung und Übertragung wurden in einem Workshop der Expert*innen-Tage 2021 als Oral-Poster-Präsentation mit Kurzvortrag vorgestellt. Eine Veröffentlichung in Journalen ist bislang nicht erfolgt.

Patentanmeldungen

Es wurden keine Patente angemeldet.

Schlussbericht

Mit der Veröffentlichung des Schlussberichts wird der Veröffentlichungspflicht zum FuE Vorhaben Rechnung getragen. Im Folgenden ist der Wortlaut des Sachberichts (Schlussbericht), Anlage 10 wiedergegeben.

1. Zielsetzung des Vorhabens

Das Projekt verfolgte das Ziel, eine semi-analytische Methode zur Vorhersage von Effekten zu entwickeln, die bei einer Umformung eines Verstärkungstextils auftreten. Es wurde die Analyse von Textilparametern hinsichtlich der zu erwartbaren Drapierbarkeit untersucht und so eine Vorausberechnung von Drapiereffekten ermöglicht, ohne dass hierfür ein komplexes mikromechanisches Modell erforderlich ist. Als Verstärkungstextil wurden vordergründig multiaxiale Glasfasergelege unterschiedlicher textiler Parametervariationen betrachtet.

Mehrere Anforderungen wurden an die Berechnungsmethode festgelegt: Sie sollte von Anwendern ohne ausgeprägte Kompetenzen der Materialprüfung und Simulationsbedienung einfach zu bedienen sein. Es wurden geringe Berechnungsressourcen gefordert, d.h. das Programm sollte auf einer einfachen Rechnerarchitektur (kein Cluster, keine spezielle GPU) lauffähig sein und somit bei geringem Ressourcenaufwand eine Einschätzung der Drapierbarkeit liefern können. Es mussten damit aussagekräftige, fertigungsrelevante Ergebnisse für frei gewählte Textilparameterkombinationen erzeugt werden können, welche die Bauteil- und Prozessauslegung unterstützen können. Die Umsetzung erfolgte als prototypisches Softwaretool. Aufgrund des statistischen Charakters der genutzten Methoden erfolgte die Umsetzung in der freien Statistiksoftware R. Die programmatische Umsetzung sollte die Fähigkeit zur Einbindung in etablierte Programme und die direkte Verwendbarkeit der Ergebnisse demonstrieren.

Als Projektergebnis wurde damit eine Methode gewonnen, mit der experimentelle Untersuchungen zum Teil vermieden werden können, da bereits aus dem trainierten statistischen Modell gewisse Aussagen zur Drapierbarkeit möglich sind. Dies kann helfen, Fertigungsrisiken zu senken, und die Entwicklungszeit und Kosten zur Entwicklung eines FVK-Bauteils zu optimieren. Da hierfür keine Erfahrung mit komplexen FE-Simulationen oder gar eine Großrechner-Infrastruktur erforderlich ist, wird der Einstieg in die Fertigung von FVK-Bauteilen erleichtert, insbesondere für kleine und mittelständische Unternehmen ohne interne Expertise auf dem Gebiet. Die Vorteile faserverstärkter Materialien stehen so mehr Unternehmen aller Größenordnungen zur Verfügung.

2. Durchgeführte Tätigkeiten im Vergleich zu den Arbeitspaketen des bewilligten Arbeitsplanes

AP 1: Empirie

Ziel des Arbeitsinkrements *Empirie* war es, eine Kennwert-Datenbank für die im Projekt untersuchten Drapiereffekte aufzubauen und darauf basierend empirisch erste Erkenntnisse aus den Daten zu erlangen. Die erzeugte Datenbank lieferte die Grundlage für die in den folgenden Inkrementen entwickelte Berechnungsmethode. Auch gegebenenfalls notwendige Anpassungen der Messtechnik an die Bedarfe der Simulation gehörten in dieses Arbeitsinkrement.



Abbildung 1 DRAPETEST mit aktiver Beleuchtung nach Abschluss eines Drapiervorgangs

An den zu untersuchenden Multiaxialgelegen wurden im Textechno DRAPETEST Drapierversuche durchgeführt, vgl., Abbildung 1. Die Eingangsgrößen für diesen Arbeitsschritt waren die Prozess- und Textilparameter, die das Drapierexperiment definieren. Im Experiment wurden die Drapiereffekte mittels des optischen Messsystems des DRAPETEST mit Kamera und Laserlinienscanner vermessen. Diese gingen dann direkt in das darauffolgende Arbeitsinkrement *Modellierung* ein, und wurden im Arbeitsinkrement *Empirie* in Form von Drapiereffektkennwerten interpretiert.

Eigens für das Projekt DrapeX wurden 36 Materialvarianten von Glasfaser-Biaxialgelegen angeschafft, die auf einer COP MAX 4 von der Firma KARL MAYER gefertigt wurden. Zur eindeutigen Kennzeichnung wurden diese Textilien mit dem Präfix "X" als X1 bis X36 bezeichnet. Die Textilien variieren folgende Parameter:

- Lagenausrichtung $\pm\gamma$, $\gamma \in \{45^\circ, 60^\circ, 75^\circ\}$
- Bindungstyp $b \in \{\text{Trikot, Franse}\}$
- Stichlänge $l \in \{4 \text{ mm}, 6 \text{ mm}\}$
- Fadeneinlauf-Spannung s : 3 ordinale Stärkegrade, locker < mittel < fest

Konstant gehalten wurden gegenüber dem Vorgängerprojekt, „Charakterisierung der Drapierbarkeit von Multiaxialgelegen“ (ZIM VP2497103DF9), die Textilparameter Maschenstäbchenabstand ($c = 5 \text{ mm}$), Flächengewicht ($W = 300 \text{ g/m}^2$ pro Lage bzw. insgesamt mit Wirkfaden 610 g/m^2) und der Garntiter (300 tex).

An dem genutzten Testprüfgerät, dem Textechno DRAPETEST waren bei Versuchsdurchführung zusätzliche Prozessparameter festzulegen. Im DRAPETEST wurde eine kreisförmige Textilprobe mit definiertem Druck an einem Klemmring eingespannt und dann in definierten Schritten durch eine, von unten nach oben fahrende, Kalotte deformiert. An vorher definierten Kamerapositionen wurden dann auf Basis von Bildkorrelation und Lasertriangulation lokale Drapiereffekte ermittelt.

Die Messungen wurden auf mehreren Drapierstufen des Verformungsprozesses durchgeführt. Die Drapierhöhen wurden für bis zu 11 Stufen von 0 mm (keine Drapierung) bis 100 mm (höchster Drapiergrad) in Schritten von je 10 mm variiert. Ein weiterer festzulegender Parameter war die Stärke der Einspannung, die

durch den Klemmdruck bestimmt wird. Dieser Parameter wurde konstant bei 1.0 bar gehalten. Variiert wurde ferner die Umformgeometrie des Testkörpers. Diese ist durch die Aufsätze des DRAPETEST vorgegeben. Da die Standardform dieser Aufsätze eine Hemisphäre ist, werden diese allgemein als Kalotten bezeichnet. Es wurden folgende Prüfkörper verwendet:

- Hemisphäre mit Radius $R = 50$ mm („Standard-Kalotte“)
- Hemisphäre mit Radius $R = 20$ mm (kleine Kugel, bzw. „kleine Kalotte“)
- Hemisphäre mit Radius $R = 82,5$ mm (maximaler Radius, bzw. „große Kalotte“)
- Konvexe Hülle eines Triple-Dome (komplexe Geometrie, bzw. „komplexe Kalotte“)

Der Aufbau des Triple-Dome basiert im Wesentlichen auf der konvexen Hülle dreier Hemisphären der Radien (50, 35 und 20 mm), vgl. Abbildung 2. Die in Drapierrichtung maximalen Punkte der Dome-Oberflächen bilden dabei die höchste Erhebung der Kalotte in Form eines dreieckigen Plateaus. In 0° Richtung (in DRAPETEST-Koordinaten) von der Mittelachse der Kalotte aus gesehen, befindet sich dann im Abstand von 2,5 mm der Mittelpunkt der ersten Hemisphäre (dome1). Die Werte für alle drei Hemisphären sind aus Tabelle 1 zu entnehmen. Da es sich bei dem komplexen Prüfkörper nicht um Standard-Zubehör für den DRAPETEST handelt, wurde diese Form im 3D-Druckverfahren aus PLA hergestellt und die Firma Textechno mit der notwendigen Softwareanpassung an der DRAPETEST-Steuerung beauftragt. Um sicherzugehen, dass Messabweichungen nicht alleine durch abweichende Materialeigenschaften der Kalotte entstehen, wurde zum Vergleich auch die Geometrie der Standardkalotte im 3D-Druck hergestellt und Messergebnisse zwischen 3D-gedruckter Kalotte und Original-Kalotte verglichen. Dabei wurden keine Unterschiede außerhalb der üblichen zwischen Messwiederholungen zu beobachtenden statistischen Schwankungen festgestellt. Die Triple-Dome-Kalotte wurde lediglich für Messungen für das *AP4 Validierung* benutzt. Eine alle Textilvarianten umfassende Untersuchung mit dem Triple Dome für das *AP2 Modellierung* fand nicht statt. Die große Kalotte wurde als Spezialanfertigung von der Firma Textechno erworben und erforderte ebenfalls ein Softwareupdate der DRAPETEST-Steuersoftware.

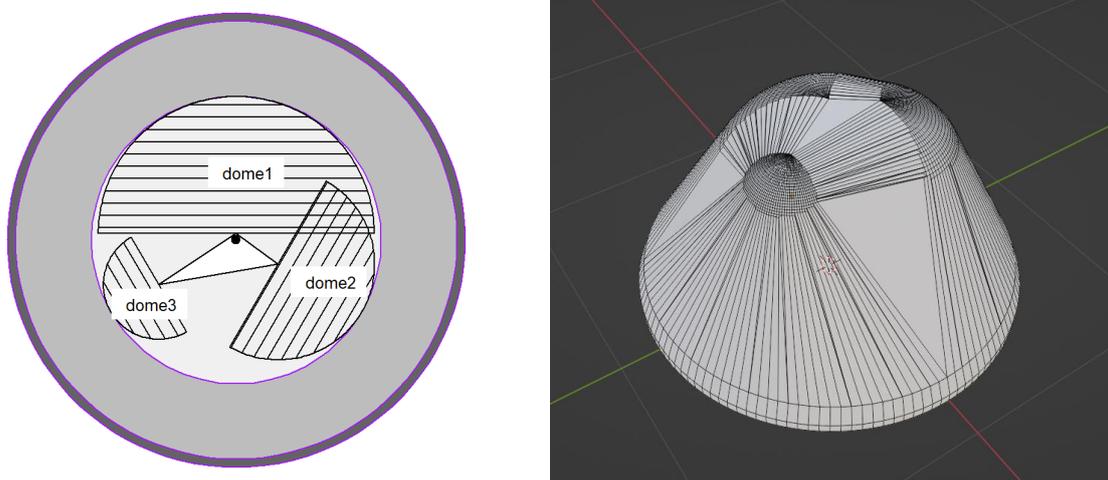


Abbildung 2 Aufbau der "komplexen Kalotte" (Triple-Dome)

Tabelle 1 : Parameter zum Aufbau der komplexen Kalotte.

dome1	dome2	dome3
0°	120°	240°
2.5 mm	17.5 mm	32.5 mm
50 mm	35 mm	20 mm

Zudem mussten die Winkelpositionen definiert werden, an denen Messungen auf Basis von Kameraaufnahmen durchzuführen waren. Dabei handelt es sich um Winkelpositionen in einem Umkreis der Kalotte, an denen die Kamera für die Vermessung positioniert wird. Besonders interessant sind die Winkelstufen entlang der Faserrichtung der einzelnen Lagen eines Geleges und die mittig dazwischenliegenden Winkelstufen. Da hier für den Einfluss der Wirkfaser lokale Maxima, bzw. Minima anzunehmen sind, sind diese Positionen für die Charakterisierung eines Geleges entscheidend. Die zu untersuchenden Winkelstufen mussten also entsprechend der Faserausrichtungen der zu testenden Gelegeprobe gewählt werden, um sicherzugehen, dass diese besonders wichtigen Winkelpositionen erfasst wurden. Die Wahl der Winkelpositionen wurde wie folgt festgelegt:

- $\pm 45^\circ$ -Gelege: $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ, 225^\circ, 270^\circ, 315^\circ$
und zusätzlich: $22.5^\circ, 67.5^\circ, 112.5^\circ, 157.5^\circ, 202.5^\circ, 247.5^\circ, 292.5^\circ, 337.5^\circ$
- $\pm 60^\circ$ -Gelege: $0^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 180^\circ, 240^\circ, 270^\circ, 300^\circ$
und zusätzlich: $30^\circ, 150^\circ, 210^\circ, 330^\circ$
- $\pm 75^\circ$ -Gelege: $0^\circ, 75^\circ, 90^\circ, 105^\circ, 180^\circ, 255^\circ, 270^\circ, 285^\circ$
und zusätzlich $45^\circ, 135^\circ, 225^\circ, 315^\circ$

Somit sind jeweils die vier Winkelpositionen entlang der Wirkfasern beider Lagen und die vier mittig dazwischenliegenden Positionen enthalten. Die weiteren Winkelstufen füllen die größten verbleibenden Lücken auf. Von einer Messung an feineren Winkelstufen wurde zunächst abgesehen, da einerseits die damit einher schreitende Verlangsamung des Messvorgangs dem Ziel entgegensteht, in diesem Projekt eine große Anzahl an Proben zu charakterisieren und andererseits kein entscheidender Informationsgewinn für die Modellierung der wesentlichen Drapiereffekte dadurch zu erwarten war. Für einen kleinen Teil der Proben wurden jedoch zur genaueren Untersuchung nichtlinearer Einflüsse auch weitere Winkelstufen ermittelt.

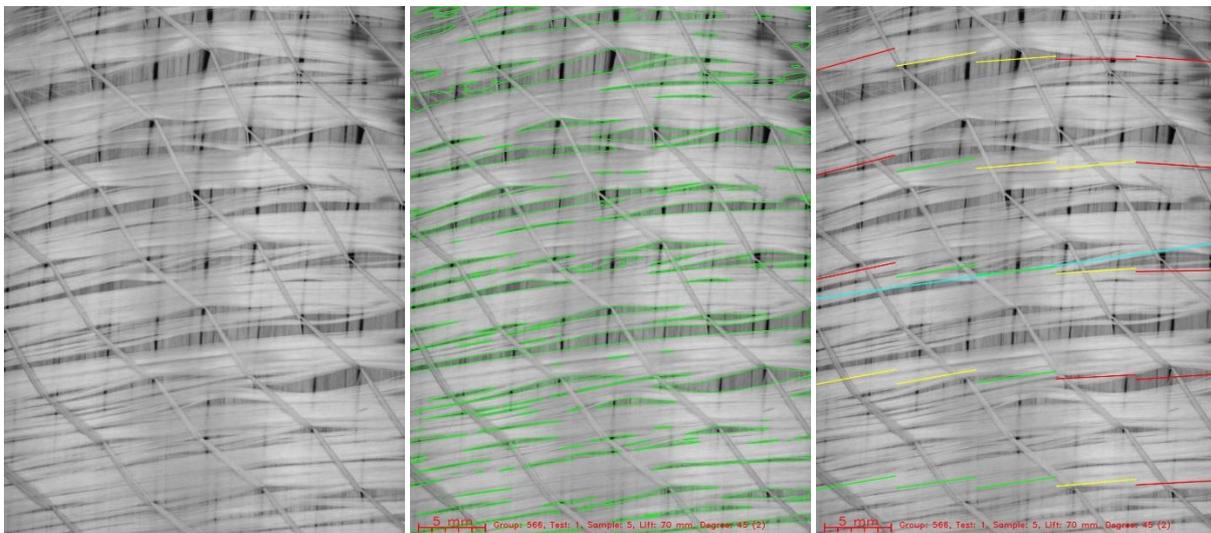


Abbildung 3 Textil unter Last: ohne Markierung (links), mit Kennzeichnung der Gaps (mittig) und Kennzeichnung der lokalen und globalen Faserorientierungen (rechts)

Im DRAPETEST werden automatisiert mehrere Kennzahlen zur Beschreibung von Drapiereffekten ermittelt, vgl. Abbildung 3. Im Rahmen des Vorhabens wurden folgende, für Gelege als besonders wichtig erachtete, Faserorientierungs- und Gap-Effektkenwerte betrachtet:

- **Vorzeichenbehaftete Faserwinkeländerung** (Bezeichnung: ori_24): Vorzeichenbehaftete Winkeldifferenz zwischen Faserorientierung 1 (= obere Lage) bei geringster Drapierhöhe und Faserorientierung 1 bei aktueller Drapierhöhe, vgl. Abbildung 3 rechts.
- **Ondulation** (Bezeichnung: ori_22): Ondulationsmaß definiert als Standardabweichung vom Mittelwert der vorzeichenbehafteten Abweichungen zwischen lokal gemessenen Faserwinkeln und global über

das Bild gemessener Faserorientierung für die obere Textillage, vgl. Abbildung 3 rechts.

- **Gapanteil** (Bezeichnung: gap_01): Prozentualer Anteil der Gapfläche an der Gesamtfläche der betrachteten Oberfläche, vgl. Abbildung 3 mittig.

Anstelle des Kennwertes *Vorzeichenbehaftete Winkeldifferenz* wird im DRAPETEST standardmäßig die absolute Winkeldifferenz (Bezeichnung: ori_01) ermittelt. Die Bildung des Absolutwertes führt jedoch zu Nachteilen in der Modellierung. So könnten eigentlich lineare Effekte durch die Bildung des Absolutwertes nicht mehr direkt als linearer Effekt modelliert werden. Daher wurde aus den vorliegenden Rohdaten die vorzeichenbehaftete Winkeldifferenz rekonstruiert. Die Textilien X01 bis X36 wurden anhand von je 5 Proben geprüft, wobei die Daten für Winkelstufen ab 180° bei Prüfungen mit den rotationssymmetrischen Kalotten zusätzlich als weitere 5 Messwiederholungen in die statistische Analyse eingehen konnten. Dem liegt die anhand der Daten überprüfte Annahme zugrunde, dass die Arbeitsrichtung bei der Textilherstellung keinen relevanten Einfluss auf die hier ermittelten Drapiereffekte hat.

Zusätzlich dazu wurden die im Vorgängerprojekt durchgeführten DRAPETEST-Experimente an Glasfaser-Biaxialgelegen in die Versuchsdatenbank mit aufgenommen. Die Experimente wurden bei Umformung mit der Standard-Kalotte an 72 Textilvariationen durchgeführt, welche mit den Identifikationsbezeichnungen V01 bis V72 benannt wurden. Gefertigt wurden diese auf einer Malitronic Multiaxial der Firma KARL MAYER Textilmaschinenfabrik GmbH. Die Textilien der "V"-Charge variieren folgende Parameter:

- Maschenreihenabstand $c \in \{2,5; 5; 10\}$ (in mm) (Abstand der Stichpunkte quer zur Produktionsrichtung)
- Stichelänge $l \in \{2,5; 5; 10\}$ (in mm) (Abstand der Stichpunkte in Produktionsrichtung)
- Flächengewicht $W \in \{200, 300, 400, 600\}$ (in g/mm^2)
- Bindungstyp $b \in \{\text{Trikot, Franse}\}$

Tabelle 2 Gewählter Garntiter und Legung für die verschiedenen Stärken des Flächengewichts.

Flächengewicht [g/m^2]	Garntiter [tex]	Legung
600	600	2-fach
400	600	Band an Band
300	300	2-fach
200	300	Band an Band

Zur Fertigung der Gelege mit Flächengewichten zwischen $200 g/m^2$ und $600 g/m^2$ pro Lage und einem geschlossenen Warenbild wurden der Garntiter und die Legung verändert, vgl. Tabelle 2. Alle Gelege der V- Charge weisen eine biaxiale $\pm 45^\circ$ -Konstruktion auf. Die Wirkfadenspannung wurde konstant gehalten.

In Anlehnung an die Vorarbeiten des Vorgängerprojekts wurden auch die dort entwickelten Kennwerte im AP1 Empirie anhand der neuen Daten untersucht. Diese wurden mittels linearer Regression aus den experimentellen Daten bestimmt. Die Effekt-Weg-Verläufe wurden zur Kennwertermittlung im Bereich von 30 mm bis 70 mm Drapierhöhe linearisiert. Bei Deformationsstufen bis einschließlich 20 mm wurden generell stark schwankende Drapiereffekte gemessen, da es bei geringer Drapierhöhe erst noch zu einer Vorspannung des Textils kommt und die gemessenen Drapiereffekte durch kleine Abweichungen auf der Textilloberfläche, die durch das händische Einlegen verursacht werden, stark beeinflusst sind. Zur Kennwertermittlung wurden daher nur die Datenpunkte ab Deformationsstufe 30 genutzt. Größere Drapierhöhen ab 80 mm wurden ebenfalls von der Betrachtung bei der Berechnung dieser Kennwerte ausgenommen, da dort die Probe nicht mehr über die gesamte Fläche des Klemmrings geklemmt ist und verstärkt ein Gleiten des Textils durch den Klemmring auftritt. Darüber hinaus kann bei den höheren Drapierstufen Materialversagen auftreten; infolgedessen würde

der weitere Drapierverlauf mehr durch die jeweils auftretenden Schäden als durch die Textilparameter bestimmt. Die Linearisierung des Einflusses der Drapierhöhe wurde mittels einfacher linearer Regression bei jeweils fixer DRAPETEST-Winkelstufe α erzeugt, wobei die Steigungswerte aus dem linearen Modell als Drapiereffektkennwerte $k(\text{Effekt, Winkel})$ interpretiert werden, die das Wachstum des jeweiligen Drapiereffekts für mittlere Drapierhöhen beschreiben. Diese Kennwerte werden in Abhängigkeit von der DRAPETEST-Winkelstufe α angegeben.

Bildet man die Ränge dieser Drapiereffektkennwerte in den einzelnen charakteristischen Bereichen und bildet zudem für jedes Textil den Median der Ränge aller charakteristischen Bereiche, so erhält man einen einzelnen Kennwert (in Tabelle 3: *mrank*), der zur Orientierung dienen kann um die Textilien nach Drapiereffektstärke über alle Winkel-Bereiche hinweg zu ordnen. Beispielsweise ergibt sich so für die Faserwinkeländerungskennwerte das Textil-Ranking in Tabelle 3. Darin sind auch die Kennwerte für die einzelnen Wirkbereiche des Textils angegeben, wobei die farbliche Hinterlegung anzeigt, ob der Wert verglichen mit anderen Textilien im selben Wirkbereich vergleichsweise stark (grün) oder schwach (blau) ausgeprägt ist, wobei das Vorzeichen die Richtung der Faserwinkeländerung angibt. Die Darstellung in Abbildung 4 bestätigt, dass das Ranking einen guten Anhaltspunkt zur generellen Bewertung der Drapierbarkeit hinsichtlich eines bestimmten Effekts darstellt. Es ist zu erkennen, dass die Textilien mit niedrigem Rang im Vergleich der Faserwinkeländerungs-Kennwerte über die verschiedenen Textil-Bereiche hinweg tendenziell geringere Kennwerte aufweisen, als jene mit hohem Rang. Die unterschiedliche Zahl an Datenpunkten für verschiedene Kurvenverläufe in der Darstellung ergibt sich daraus, dass für die Textilien V-Charge keine feinere Abstufung der Messungen verfügbar ist. Alternativ ließe sich ein solcher Kennwert über aller Wirkbereiche hinweg als arithmetisches Mittel oder Maximum bilden. Vergleichbare Rankings wurden auch für die Drapiereffekte Ondulation und Gapanteil erzeugt.

Tabelle 3 Gelege mit höchstem und niedrigstem Median-Ranking der absoluten Faserwinkeländerung.

tex	c	l	W	Winkellage	Bindung	SB1	LZB	SB2	QZB	mrank
X30	5	6	300	75	Franse	0.04	0.02	0	0.03	0.18
V31	2.5	10	600	45	Franse	0.06	0	-0.07	-0.02	0.19
X27	5	4	300	75	Franse	0.03	0.02	0.01	0.04	0.21
X36	5	4	300	75	Trikot	0.05	0.01	0	0.05	0.23
...
V62	2.5	2.5	200	45	Trikot	0.1	-0.06	-0.17	-0.05	0.74
V61	2.5	2.5	200	45	Franse	0.08	-0.07	-0.16	-0.11	0.76
V63	5	2.5	200	45	Franse	0.06	-0.08	-0.17	-0.12	0.78
V67	2.5	2.5	300	45	Franse	0.07	-0.08	-0.18	-0.11	0.82

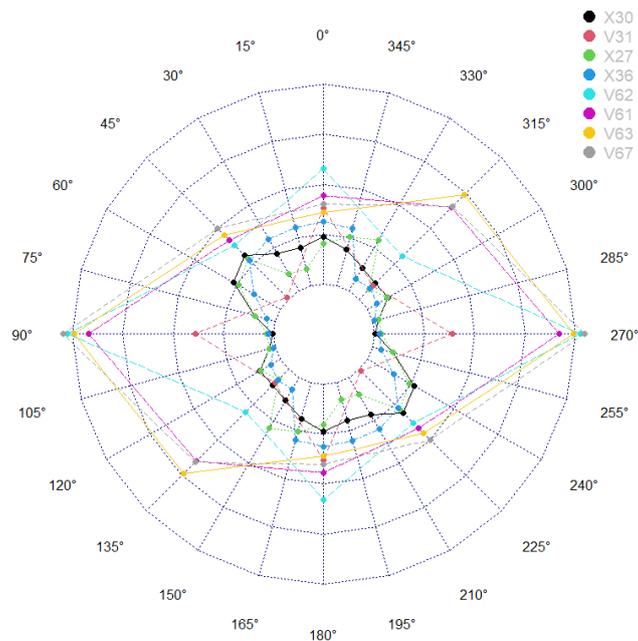


Abbildung 4 Verteilung der Kennwerte der absoluten Faserwinkeländerung.

AP2: Modellierung

Grundgedanke des statistischen Materialmodells im Arbeitspaket Modellierung ist es, auf Basis der empirischen Daten aus dem *AP1 Empirie*, Merkmale, die das Drapierergebnis beeinflussen, in einen funktionalen Zusammenhang mit einem Drapiereffekt zu bringen. Die Prozess- und Textilparameter sind die beeinflussenden Merkmale und damit die unabhängigen Variablen eines Regressionsmodells. Sie werden hier auch als Prädiktoren bezeichnet. Dies sind z.B. die charakteristischen Konstruktionseigenschaften des Textils und weitere Merkmale, welche den Drapierprozess beschreiben. Dazu gehören weiterhin auch geometrische Merkmale, wobei es in vielen Fällen schwierig ist, allgemeingültige geometrische Parameter zu ermitteln, die gute prädiktive Eigenschaften im Regressionsmodell besitzen. Da die komplexe Kalotte als Validierungswerkzeug im *AP4 Validierung* diente, konnte diese nicht in AP2 zur Untersuchung der geometrischen Parameter herangezogen werden, sodass nur hemisphärische Kalotten in diesem Schritt in AP2 zur Verfügung standen. Die Drapiereffektkennwerte sind die abhängigen Variablen eines Regressionsmodells. Sie werden im Folgenden auch als Deskriptoren bezeichnet, da sie das Drapierverhalten beschreiben, also deskriptiv sind. Für jeden der Drapiereffekte D_j soll bei gegebenen Textilparametern T_1, \dots, T_{n_T} und Prozessparametern P_1, \dots, P_{n_P} ein regressionsähnlicher Zusammenhang modelliert werden.

Das hier entwickelte statistische Textilmodell zielt nicht darauf ab, den endgültigen Drapierzustand des Textils exakt wiederzugeben. Stattdessen soll der Drapierzustand so durch die Drapiereffektgrößen beschrieben werden, dass eine statistische Vorhersage über die Drapierbarkeit, d.h. die Summe aller auftretenden Drapiereffekte für die gewählte Textil- und Prozessparameterkombination getroffen werden kann. Insbesondere kann damit auch beschrieben werden, welche Auswirkung die Änderung eines Textil- oder Prozessparameters auf den allgemeinen Drapierzustand hat. Die Vorhersage gilt für den Fall, dass kein komplettes Textilversagen auftritt, wobei wir in diesem Kontext das Reißen der Textilbindung als Textilversagen verstehen. Das Auftreten von Gaps, Welligkeiten oder Faserverschiebungen bei intakter Bindung verstehen wir dagegen nicht als Versagen, sondern als „Effekt“. Materialversagen trat je nach Textilparameter vor Allem bei höheren Drapierstufen ab 60 mm oder höher auf, bei Trikot-Bindung eher als bei Fransenbindung, eher bei Textilien mit ähnlich ausgerichteten biaxialen Lagen als bei $\pm 45^\circ$ -Gelegen, eher bei stark gekrümmten Kalotten als bei schwächer gekrümmten und eher bei Gelegen mit hoher Fadenspannung.

Vereinzelt wurden Regressionen mit Methoden aus dem Bereich des Machine-Learning durchgeführt, wie z.B. MARS-, SVM- und Random-Forest-Regression. Primär wurden jedoch lineare Modelle aufgestellt. Durch die

Identifikation nichtlinearer funktioneller Zusammenhänge konnten Transformationen gefunden werden, welche eigentlich nichtlineare Umformeffekte im linearen Modell anschaulich beschreiben. Die Nichtlinearität von Einflussfaktoren ist gut am Beispiel der Drapierhöhe h und der DRAPETEST-Winkelstufe α zu erkennen. So wurden im AP 2 Modell-Kandidaten u.a. für die Einflüsse der Drapierhöhe h und der DRAPETEST-Winkelstufe α auf den Drapiereffekt der vorzeichenbehafteten Faserwinkeländerung Δ_{ori_24} aufgestellt. Der Winkel α stellt die DRAPETEST-Kameraposition dar, und beschreibt damit den Ort auf dem durch den DRAPETEST vorgegebenen Umkreis um den Kalottenmittelpunkt, an dem die vom Textil bedeckte Kalottenfläche optisch per Kameraaufnahme erfasst wird. Die Modellierung dieses Zusammenhangs ist als lineares Modell zufriedenstellend zu lösen, wenn die Winkelstufe geeignet transformiert wird. Im linearen Modell mit den Prädiktoren

$$p_{\alpha,i} := \cos(2(\alpha_i - 45^\circ))$$

und

$$p_{h,i} := h_i^2$$

sowie dem Interaktionseffekt

$$p_{\alpha:h,i} = p_{\alpha,i} \cdot p_{h,i}$$

konnte bereits ein großer Teil der Streuung erklärt werden. So wurde mit dem linearen Modell

$$\Delta_{\text{ori}_24} = -0,0002780 \cdot h_i^2 + 0,0012955 \cdot \cos(2(\alpha_i - 45^\circ)) \cdot h_i^2 \quad (1)$$

bereits ein (adjustiertes) R^2 von ungefähr 0,77 für die Faserwinkeländerung erreicht. Zu beachten ist, dass ein Modell ohne geschätzten Achsenabschnitt gewählt wurde. Da der Effekt der vorzeichenbehafteten Faserwinkeländerung Δ_{ori_24} sich auf die Änderung der Faserwinkel im Vergleich zum undrapierten Textil bezieht, muss bei einer Drapierhöhe von 0 mm die Faserwinkeländerung 0° betragen, wobei Änderungen in beide Richtungen möglich sind, d.h. der Achsenabschnitt 0 für die Faserwinkeländerung ist gerechtfertigt. Beim Modell mit Achsenabschnitt wäre der R^2 -Wert mit 0,775 ähnlich groß. Durch Hinzunahme von Interaktionstermen zwischen $p_{h,i}$ und weiteren Textilparametern konnte die prädiktive Güte weiter gesteigert werden. Die Berücksichtigung der Parameter Titer, Flächengewicht, Maschenstäbchenabstand, Stichweite und Bindungsart hatte das Modell verbessert, wobei das p-Wert-Kriterium auf Basis von t-Tests für die Signifikanz der jeweiligen Interaktionsterme sprach. Es ist jedoch zu hervorzuheben, dass bereits der Großteil der beobachteten Faserwinkeländerung alleine durch die Einflüsse von Drapierhöhe h und Winkelstufe α , und somit unabhängig von den weiteren, textilen Parametern des $\pm 45^\circ$ -Glasfaser-Biaxialgeleges, erklärt werden konnten. Die jeweiligen Einflüsse der modellierten Parameter werden im AP3 Übertragung näher betrachtet.

Ebenso wurden die Drapiereffekte Gapanteil G_p und Ondulation Δ_{loc} untersucht. Der Gapanteil G_p wurde nicht nur direkt als erklärende Variable untersucht, sondern auch als Gapanteilwachstum gegenüber dem Gapanteil im undrapierten Textil, $\Delta_{\text{gap}} := \frac{G_p}{G_{p,0}}$. Durch die Transformation zum Gapanteilwachstum konnte das Modell deutlich besser beschrieben werden, als bei direkter Modellierung des Gapanteils.

Beim Drapiereffekt Ondulation Δ_{loc} wurden in der Modellanpassung die Drapierhöhen 0 mm und 10 mm nicht berücksichtigt. In der Theorie sollte das undrapierte Textil keine Welligkeiten aufweisen. Da im DRAPETEST ein neu eingelegtes Textil durchhängt, da es nur am Rand sowie an der Kalottenspitze aufliegt, werden in den niedrigen Drapierstufen 0 bis 20 mm im DRAPETEST im Vergleich zu den Drapierhöhen 30 bis 50 mm relativ starke Ondulationen gemessen, die hauptsächlich durch die geringe Biegesteifigkeit des Textils und das manuelle Handling beim Einlegen hervorgerufen wird. Bei der Modellierung der Ondulation als Drapiereffekt, sollten diese Drapierstufen deshalb nicht in die Modellanpassung einbezogen werden. Es wurde daher im Modell unterstellt, dass beim noch undrapierten Textil keine Ondulation entsteht. Der Drapiereffekt konnte so mit dem linearen, einfachen Regressionsmodell

$$\Delta_{loc,i} = 0,050853 \cdot h_i - 0,037830 \cdot \cos(2(\alpha_i - 45^\circ)) \cdot h_i$$

die Prüfergebnisse mit der Standardkalotte plausibel annähern. Die Erweiterung des Modells um weitere textile Parameter konnte jedoch kaum zu einer weiteren Verbesserung beitragen. Es war nur ein geringer Einfluss der textilspezifischen Parameter auf die Ondulation zu erkennen.

AP3: Übertragung

Ziel dieses Arbeitspaketes war es, aussagekräftige Schlussfolgerungen zur Drapierbarkeit bei Variation der Textil- und Prozessparameter und ggf. auch bei abweichenden geometrischen Randbedingungen treffen zu können. Als erster Zwischenschritt wurde als Ziel die Berechnung von Drapiereffekten für Gelege verfolgt, die nicht im Trainingsdatensatz für das jeweilige Modell enthalten sind, wobei die Umform-Geometrie hierbei zunächst unverändert bleibt. Die hierfür entwickelten Regressionsmodelle lassen sich auch im Sinne einer Sensitivitätsanalyse der Textilparameter interpretieren, und geben somit eine Aussage über Art und Stärke des Einflusses einzelner Textilparameter und das Auftreten von Interaktionseffekten.

Das zweite Teilziel war die Vorhersage von Drapiereffekten bei Geometrievariation. Um eine Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Geometrien zu ermöglichen, wurden die Prüftextilien mit Kalotten unterschiedlicher Geometrien untersucht. Um mittels der eingesetzten statistischen Verfahren mit der im Rahmen des Vorhabens möglichen Anzahl an Versuchen eine Vorhersage zu ermöglichen, wurde die Umformung mittels kalottenförmiger Geometrien unterschiedlicher Größen untersucht. Als Eingangsparameter für das Modell wurden die Messergebnisse des DRAPETEST bei Umformung mit Kalotten unterschiedlicher Krümmung genutzt. Bei Betrachtung der einzelnen Drapiereffekte wurde allerdings deutlich, dass die Einflüsse der Krümmung, bzw. des Radius der hemisphärischen Kalotten relativ schwach waren. Im Rahmen der Validierung im darauffolgenden AP4 wurden daher weitere geometrische Parameter vorgeschlagen, die aus den durchgeführten Versuchen ermittelt werden konnten, und welche für das Ziel der Übertragung auf andere Geometrien nutzbar gemacht werden konnten. Ergebnisse und Erkenntnisse aus den entwickelten Regressionsmodellen in AP3 wurden am Beispiel mehrerer beobachteter Drapiereffekte auf Basis der DRAPETEST-Prüfdaten gewonnen.

AP 3.1 – Vorzeichenbehaftete Faserwinkeländerung

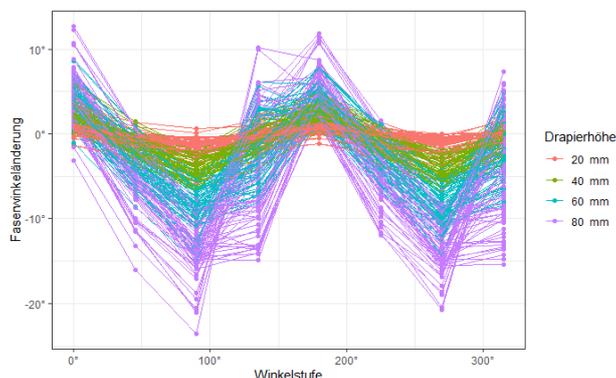


Abbildung 5 Einfluss von Drapierparametervariationen auf die Faserwinkeländerung.

Faserwinkeländerungen treten vor Allem durch Verscherung der Lagen zueinander auf, d.h. durch die interlaminaire Schubverformung. Diese wird beim durch eine äußere Last verursacht, die in 45° zu den beiden Faserrichtungen wirkt. Bei den untersuchten Gelegen trat dieser Effekt je nach Schubrichtung in unterschiedlichem Maße auf, vgl. Abbildung 5. Bei Belastung des Geleges in 0°-Richtung (d.h. Produktionsrichtung) nehmen die (in 0°-Richtung liegenden) Wirkfäden die Lasten auf, sodass eine geringere Scherung der Verstärkungsfasern auftritt und somit einer geringere Faserorientierungsänderung auftritt. Bei einer Belastung im 90° Winkel, d.h. senkrecht zur Produktionsrichtung, übernehmen die Wirkfäden keine Lasten und sind schlaff. Die Schubbelastung der Verstärkungslagen wirkt ungehindert und folglich tritt stärkere Scherverformung auf. Bei Belastung in 45°- oder -45°-Richtung kommt es zu keiner Verscherung des Textils. Die

dennoch auftretende Faserwinkeländerung in der Verstärkungslage, die quer zur Belastung liegt, entsteht durch Biegung aufgrund der Krümmung der Kalotte. Unter Berücksichtigung der allgemeineren Betrachtungen im AP2 wurden Vorhersagemodelle für die vorzeichenbehaftete Winkeldifferenz der Faserorientierung der obersten Lage bei geringster und aktueller Drapierhöhe auf Basis unterschiedlicher Prädiktoren angepasst.

Einfluss von Winkelstufe und Drapierhöhe

Wesentlicher Haupttreiber für die Faserwinkeländerung sind nach den ersten Ergebnissen aus AP2 die Drapierhöhe und die Winkelstufe. Für $\pm 45^\circ$ -Biaxialgelege wurde gemäß AP2 die Winkelstufen-Transformation $\cos(2(\alpha - 45^\circ))$ als Regressor in das lineare Modell aufgenommen. Wir bezeichnen dies als den Längszug-Regressor. Ergänzend dazu wurden als Kandidaten für Regressoren auch $\cos(2(\alpha))$ (Scherbereich-Regressor) und $\cos(4(\alpha - 45^\circ))$ (Längs-/Querzug-Regressor) untersucht, vgl. Abbildung 6 und Abbildung 7.

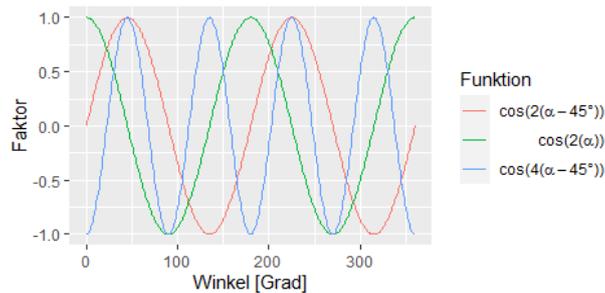


Abbildung 6 Transformationen der Winkelstufe für $\pm 45^\circ$ -Biaxialgelege

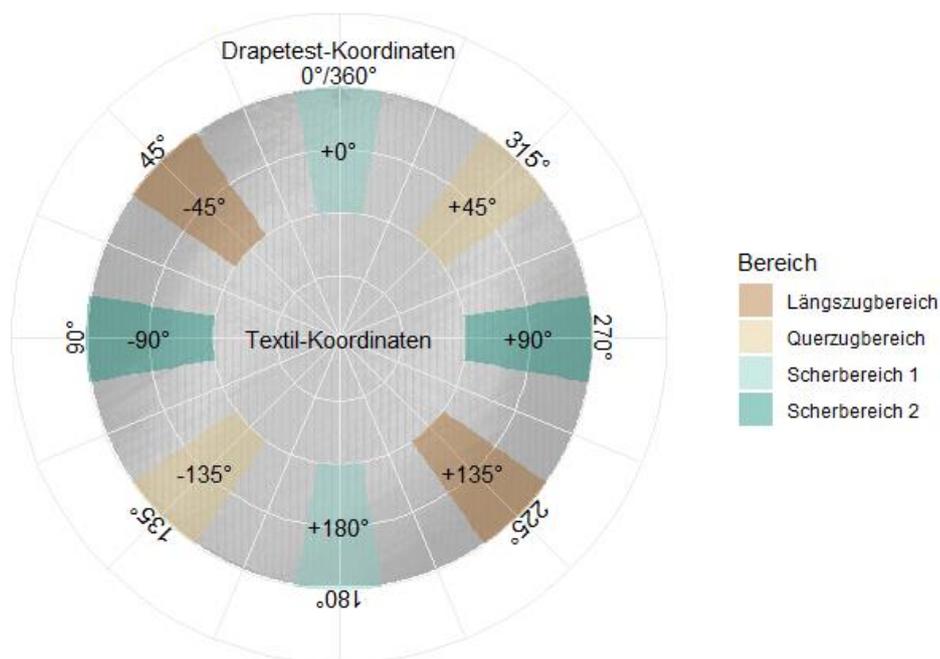


Abbildung 7 Textile Bereiche des Scherverhaltens bei $\pm 45^\circ$ -Biaxialgelegen

Der Einfluss der Deformation auf die Faserwinkeländerung wurde als deutlich nichtlinear erkannt, konnte aber als Polynom 2. oder 3. Ordnung sinnvoll beschrieben werden. Um ein Vorhersage-Modell zu bestimmen, welches die Besonderheiten verschiedener Gelege berücksichtigt, müssen zusätzlich auch textilbeschreibende Parameter in das Modell eingehen.

Einfluss des Flächengewichts

Daten von Textiluntersuchungen zum Flächengewicht stammen ausschließlich aus dem Vorgängerprojekt. Bei Untersuchung des Flächengewichts anhand der verfügbaren Daten wurde spezielle Umsicht erfordert, da Flächengewichte bis 300 g/mm^2 mit einem Garntiter von 300 tex erzeugt wurden, während bei den Textilien mit größeren Flächengewichten der Garntiter 600 tex beträgt. Die Effekte vom Flächengewicht lassen sich

daher nicht unabhängig vom Einfluss des Garntiters analysieren. Sofern der Einfluss des Titers relevant ist oder sogar Interaktionseffekte bestehen, lässt sich das Flächengewicht W , ergänzt durch den Titer und einen Interaktionseffekt zwischen den beiden im Modell zu berücksichtigen. Es wurde kein linearer Einfluss des Flächengewichts auf die Faserwinkeländerung erkannt – bei größeren Drapierhöhen scheint jedoch ein nichtlineare Abhängigkeit zu bestehen. Die Art der nicht-Linearität könnte durch den Titer bedingt sein. Zur genaueren Klärung wäre die Untersuchung weiterer Textilvariationen notwendig, was im Rahmen dieses Vorhabens nicht möglich war.

Einfluss der Stichpunktabstände

Die Beschreibung des Einflusses der Stichpunktabstände wurde sowohl gestützt auf die DRAPETEST-Messungen des Vorgängerprojekts als auch anhand neuer Messungen beurteilt. Im Scherbereich 2, d.h. für $\pm 45^\circ$ -Gelege bei DRAPETEST-Winkelstufe $\alpha=90^\circ$, ist der stärkste Einfluss der Stichpunktabstände zu erkennen. Größere Stichtlängen (l) führen ebenso wie größere Maschenstäbchenabstände (c) zu geringerer Faserwinkeländerung. Dies war auch bei gemeinsamer Betrachtung der Parameter als freie Fläche ($c \cdot l$) zu erkennen, vgl. Abbildung 8. Im Scherbereich 1, d.h. bei $\alpha=0^\circ$, trat schwächeres Scherverhalten auf, wobei die Richtung der Faserwinkeländerung hier gegenläufig zur Faserwinkeländerung im Scherbereich 2 ist. Bei Trikotgelegen ist im Scherbereich 2 eine stärkere Faserwinkeländerung zu betrachten als bei Fransengelegen. Die Effekte im Scherbereich 1 lassen sich nicht alleine anhand der freien Fläche erklären. Ein monotoner, womöglich logarithmischer Zusammenhang der Faserwinkeländerung mit dem Aspektverhältnis wurde vermutet, vgl. Abbildung 9.

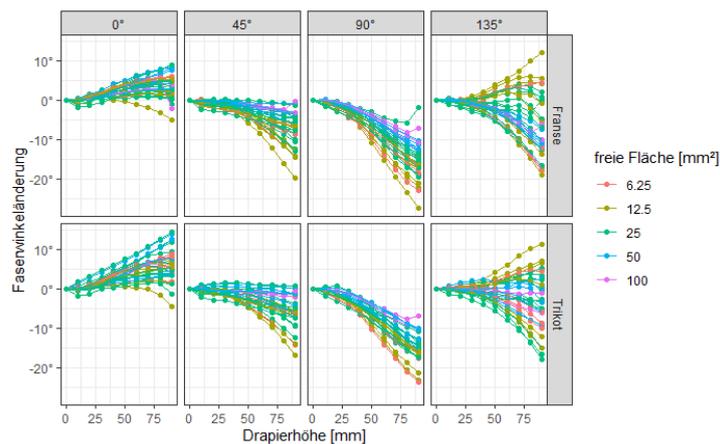


Abbildung 8 Faserwinkeländerung abhängig von Winkelstufe, Bindungsart und freier Fläche für $\pm 45^\circ$ -Gelege

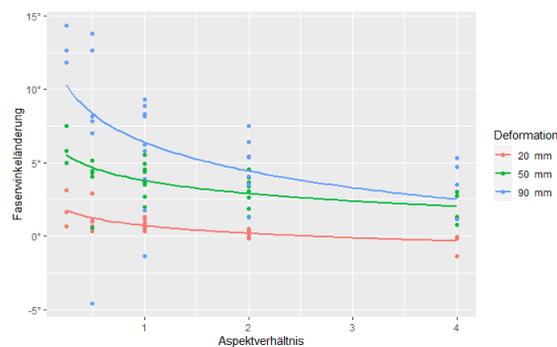


Abbildung 9 Gemeinsamer Plot von Faserwinkeländerung, Drapierhöhe (Deformation) und Aspektverhältnis

Im Scherbereich 2, d.h. bei Winkelstufe $\alpha=45^\circ$, war bei größeren Stichpunktabständen tendenziell eine größere Ausprägung der Faserwinkeländerung zu erkennen. Über verschiedene Winkelstufen hinweg ließ sich keine solche Aussage treffen, dies könnte durch Interaktionseffekte zwischen Winkelstufe, Deformation und Stichtlänge zu erklären sein.

Die neuen Messungen aus diesem Vorhaben decken sich mit den Ergebnissen des Vorgängerprojekts. So wurde bestätigt, dass bei $\pm 45^\circ$ -Gelegen im Scherbereich 2 (90°) bei größerer Stichelänge eine betragsmäßig schwächere Faserwinkeländerung zu beobachten ist. Bei anderen Lagenausrichtungen ist der Einfluss der Stichelweite komplexer; so war in den entsprechenden Übergangsbereichen der $\pm 60^\circ$ und $\pm 75^\circ$ -Gelege dieser Effekt nicht analog zu beobachten. Dort war für mehrere Winkelbereiche zu beobachten, dass bei niedrigerer Stichelänge stärkerer Faserwinkeländerung entsteht. Die variierten Stichelängen der Textilvariationen liegen womöglich zu nahe beieinander, um hier eine Gesetzmäßigkeit erkennen zu können.

Einfluss der biaxialen Gelegestruktur

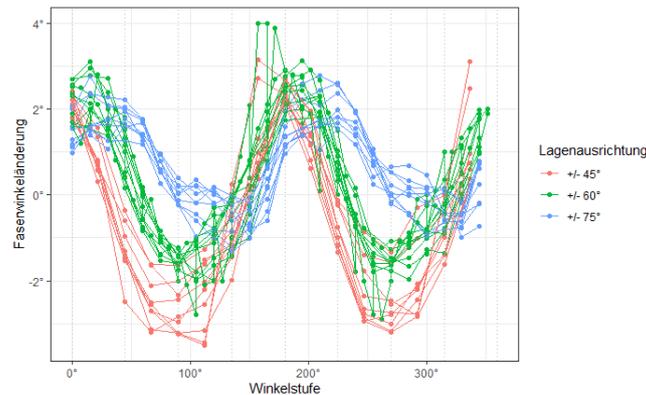


Abbildung 10 Lagenausrichtung, Winkelstufe und Faserwinkeländerung von Prüftextilien mit Fransenbindung, Stichelänge 6 mm bei Drapierhöhe 40mm (Messreihen aller Kalottengrößen)

Der Einfluss der Lagenausrichtung ist ein zentraler Aspekt der Untersuchungen in diesem Vorhaben. Abbildung 10 lässt für den Zusammenhang von Winkelstufe und Faserwinkeländerung auf eine periodische Funktion schließen, deren Amplitude und Verschiebung entlang der x-Achse von der Lagenausrichtung (± 45 , ± 60 , bzw. ± 75) abhängt. Wir unterstellten die theoretischen Extrema wie folgt:

- beim $\pm 45^\circ$ -Gelege: Maxima bei 0 und 180° , Minima bei 90 und 270° (Scherbereich 1 und 2)
- beim $\pm 60^\circ$ -Gelege: Maxima bei 15 und 195° , Minima bei 105 und 285°
- beim $\pm 75^\circ$ -Gelege: Maxima bei 30 und 210° , Minima bei 120 und 300°

Um einen geeigneten Regressor zu finden, wurden folgende Annahmen getroffen:

1. Es gibt 4 Extrempunkte in etwa im Abstand von 90° , davon sind zwei Maxima im Abstand von 180° und zwei Minima im Abstand von 180° .
2. Bei einem $\pm\theta$ -Biaxialgelege liegt an den Winkelstufen $\alpha=\theta$, $\alpha=\theta+180^\circ$, $\alpha=\theta+90^\circ$ und $\alpha=\theta+270^\circ$ ein mittlerer Effekt vor.
3. Maxima liegen bei ca. $\alpha=\theta-45^\circ$ und $\alpha=\theta+135^\circ$ vor, Minima bei $\alpha=\theta+45^\circ$ und $\alpha=\theta+225^\circ$.

Dementsprechend wurde für allgemeine Winkellagen θ die Winkelstufentransformation $\cos(2(\alpha - \theta + 45^\circ))$ als Regressor vorgeschlagen. Damit sollen folgenden Effekte Berücksichtigung finden:

1. **Lage der Maxima der Faserwinkeländerung:** diese ergibt sich aus der Definition des Regressors $\cos(2 \cdot (x - \theta + 45^\circ))$. Da ein Effekt nur im Zusammenhang mit einer Deformation auftritt, wird die Interaktion mit der (quadratischen) Deformation betrachtet.
2. **Höhe der Amplituden der Faserwinkeländerung:** Bei $\pm 45^\circ$ -Gelegen wurden die höchsten Amplituden beobachtet, bei $\pm 75^\circ$ die schwächsten. Die Lagenausrichtung sollte daher in Interaktion mit Effekt (1) in das Modell eingehen, also als Interaktionseffekt $\cos(2 \cdot (x - \theta + 45^\circ)) : \text{Deformation}^2 : \theta$.
3. **Verschiebung der Höhe des Kurvenverlaufs der Faserwinkeländerung:** Ein höherer Wert der Lagenausrichtung θ im untersuchten Parameterraum führte zu durchschnittlich höheren Werten der Faserwinkeländerung. Das konnte durch einen Interaktionseffekt der Lagenausrichtung mit der Deformation berücksichtigt werden, also $\text{Deformation}^2 : \theta$.

Bei genauerer Betrachtung stellte sich heraus, dass vor Allem die Transformationen $\cos(2(\alpha - \theta))$ (Längszug-Regressor) und $\cos(2\alpha)$ (Scherbereichs-Regressor) gemeinsam, Effekte wie in Abbildung 10 betrachtet für verschiedene Drapiereffektkennwerte gut beschreiben konnten.

Einfluss der Fadenspannung

Es konnte kein monotoner Einfluss einer Veränderung der Fadenspannung auf die Faserwinkeländerung erkannt werden. Im Hinblick auf die Streuung der Messwiederholungen waren die Effekte unterschiedlicher Fadenspannungs-Stärken nicht unterscheidbar. Daher war zu erwarten, dass die Berücksichtigung des Parameters das Regressionsmodell kaum verbessert. Dies wurde auch so bestätigt.

Einfluss der Bindungsart

Bei der Bindungsart handelt es sich um einen Faktor, der im Rahmen dieses Vorhabens lediglich die Faktorstufen *Franse* und *Trikot* annehmen konnte. Einflussfaktoren, die für die beiden Bindungsarten ein unterschiedliches Einflussverhalten aufweisen, müssen in Interaktion mit der Bindungsart in das Modell eingehen. Um das Modell einfach zu halten und eine Aufnahme nicht-signifikanter Faktoren ins Vorhersagemodell zu vermeiden, wurden lediglich Interaktionen der Bindungsart mit solchen Einflussfaktoren berücksichtigt, bei denen ein starker Einfluss der Bindungsart zu erkennen war. Ein auffälliger lokaler Unterschied zwischen den Bindungsarten wurde an den DRAPETEST-Winkelstufen 0° und 180° beobachtet. Entlang dieser Winkelstufen der Produktionsrichtung ist aufgrund der Beobachtungen bei der Bindungsart *Franse* ein größerer Einfluss der Spannung des Wirkfadens zu vermuten. Der Einfluss des Wirkfadens spiegelt sich zwar zum Teil im Scherbereichs-Regressor $\cos(2\alpha)$ wider. Um aber zu berücksichtigen, dass der Einfluss lokal begrenzt ist, wurde auch der Regressor $\max(\cos(2\alpha), 0)$ in Interaktion mit der Winkelstufe und Bindungsart als Kandidat für einen möglichen Einflussfaktor im Vorhersagemodell betrachtet.

Erweitert man das Modell aus Formel (1) des AP2 um wichtige Interaktionen mit dem Scherbereich ($\cos\text{Angle}2$), der Stichlänge (l), der Bindungsart (bindFranse), der Fadenspannung (str , linear und quadratisch) und der Lagenausrichtung (r_off) zu dem Modell in Tabelle 4, so wird das Bestimmtheitsmaß weiter von 0,77 auf 0,86 gesteigert. Die Berücksichtigung der zusätzlichen Textilparameter führt also zu einer nennenswerten Verbesserung, wobei die Aufnahme weiterer 5 Interaktionseffekte nochmals zu einer Steigerung des Wertes auf 0,89 führen würden.

Tabelle 4 Erweitertes Modell für die Faserwinkeländerung (für Prüfungen mit Standardkalotte)

term	estimate	std.error	statistic	p.value
$l(\text{Deformation}^2)$	-0.0014445	1.75e-05	-82.6357131	0.0000000
$l(\text{Deformation}^2):\cos\text{Angle}2$	0.0024017	1.79e-05	133.9803919	0.0000000
$l(\text{Deformation}^2):l$	-0.0000488	2.30e-06	-20.7482916	0.0000000
$l(\text{Deformation}^2):\text{bindFranse}$	-0.0002334	4.80e-06	-48.4162817	0.0000000
$l(\text{Deformation}^2):\text{str.L}$	-0.0000037	4.40e-06	-0.8559814	0.3920148
$l(\text{Deformation}^2):\text{str.Q}$	-0.0000610	3.90e-06	-15.6493320	0.0000000
$l(\text{Deformation}^2):r_off$	0.0000304	3.00e-07	118.9763850	0.0000000
$l(\text{Deformation}^2):\cos\text{Angle}2:r_off$	-0.0000225	4.00e-07	-62.5487691	0.0000000

Einfluss der Kalottenkrümmung

Die Geometrie des Umformkörpers wurde in AP3 in Form der Kalotten-Krümmung, definiert als die Inverse des Krümmungsradius, berücksichtigt. Später im AP4 Validierung wurden Alternativen hierzu erarbeitet.

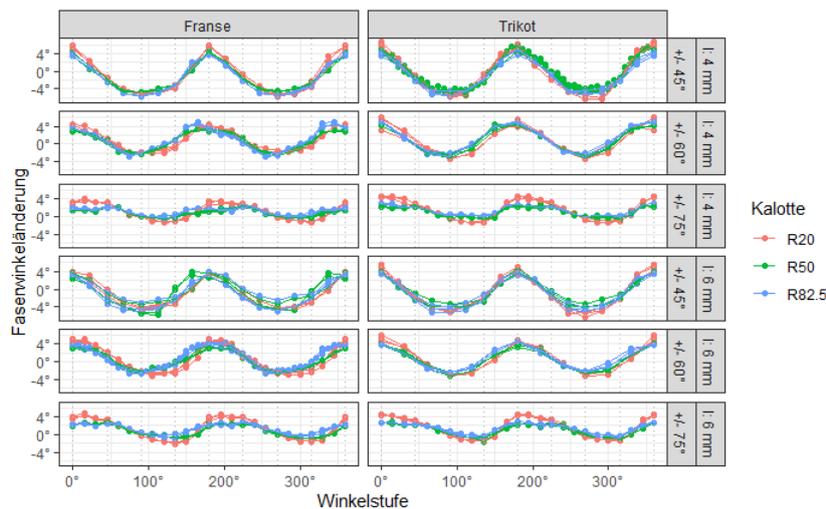


Abbildung 11 Faserwinkeländerungen für unterschiedliche Kalottengrößen und Textilparameter

Bei den Drapierprüfungen wurde festgestellt, dass die Effekt-Verläufe der Faserwinkeländerung sich für die unterschiedlichen Kalottengrößen sehr ähnlich verhielten, vgl. Abbildung 11. Im gemeinsamen Regressionsmodell von Textilparametern und der Kalottengröße für die Versuchsdaten aller drei hemisphärischen Kalotten wurde ein statistisch signifikanter Einfluss der Kalottenkrümmung („curvature“) erkannt. Allerdings hatte die Hinzunahme der Krümmung kaum Auswirkungen auf die Vorhersagegüte, verglichen mit dem Modell ohne Berücksichtigung der Kalottenkrümmung; das Bestimmtheitsmaß lag in beiden Fällen bei 0,81.

Die am Beispiel der Faserwinkeländerung beschriebenen Schritte sind auf die anderen Drapiereffekte übertragbar. Die für die Faserwinkeländerung betrachteten Kandidaten für Einflussparameter der Regression wurden gleichermaßen für die anderen Drapiereffekte betrachtet. Daher werden Untersuchungen für die weiter folgenden Drapiereffekte nicht in der gleichen Ausführlichkeit beschrieben.

AP 3.2 – Gapanteil

Der Gapanteil ist auch bei undrapierten Textilien als Eigenschaft vorhanden, die von den Textil- bzw. Produktionsparametern abhängt. Da im DRAPETEST nur die obere Textil-Lage vermessen wird, beziehen sich die Gap-Messergebnisse auf diese. Betrachtet man alle Daten des DRAPETEST-Datensatzes in Abhängigkeit der der Drapierhöhe und der Winkelstufe α , lediglich gruppiert nach der Bindungsart, ist keine deutliche Clusterung für Messungen unterschiedlicher Drapierhöhen zu erkennen, wie es zuvor am Beispiel der Faserwinkeländerungen der Fall war. Eine Erklärung dafür ist, dass für den Gapanteil die weiteren textilen Parameter, z.B. die Stichpunktabstände und das Flächengewicht einen wesentlicheren Einfluss auf den Gapanteil haben, als es bei der Faserwinkeländerung der Fall ist, wo bereits die Winkelstufe gemeinsam mit der Drapierhöhe einen Großteil der Varianz in den Daten erklärte. Außerdem ist es möglich, dass generell größere Varianzen und damit Unsicherheiten bei der Ermittlung des Drapiereffekts „Gapanteil“ auftraten.

Initialgaps

Da bereits beim undrapierten Textil große Unterschiede in den Gapanteilen auftraten, wurden zunächst die Initialgaps einer Regressionsanalyse unterzogen. Um auf den tatsächlichen Flächenanteil eines verformten Textils schließen zu können, ist es wesentlich den Ausgangszustand des Textils zu kennen, insbesondere den initialen Gapanteil. Bei der Betrachtung der Initialgaps findet die Wahl der Kalotte keine Berücksichtigung, da bei Drapierhöhe 0 mm offenbar keine Drapiereffekte durch die Kalotte erzeugt werden. Ebenso hat die Winkelstufe keine Bedeutung als Einflussparameter, da das Verstärkungstextil unter Vernachlässigung produktionsgegebener Qualitätsschwankungen über die Fläche betrachtet überall den gleichen textilen Aufbau besitzen sollte. Zwar sind innerhalb einer Einheitszelle offenbar auch konstruktionsbedingte, sozusagen planmäßige Inhomogenitäten vorhanden, die Drapiereffekte des DRAPETEST werden aber auf Bildausschnitten,

die mehrere Einheitszellen umfassen, ermittelt.

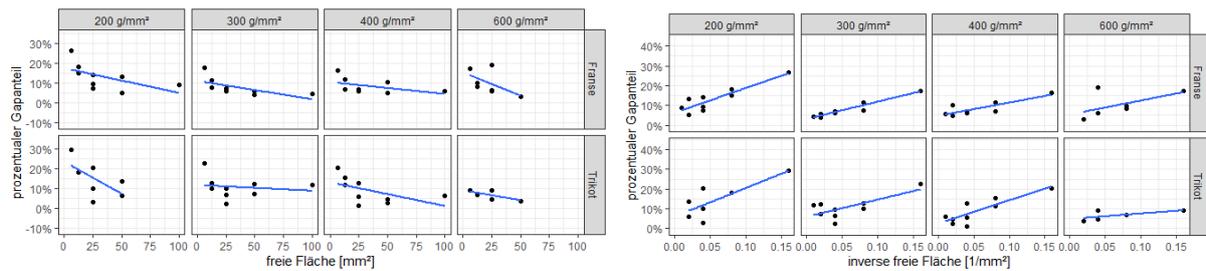


Abbildung 12 Mittlerer Anteil an Initialgaps bei unterschiedlichen Stichpunktabständen gruppiert nach Bindungsart und Flächengewicht.

Wie in den Regressionsgeraden in Abbildung 12 zu erkennen, treten mit zunehmender freier Fläche $c \cdot l$ tendenziell niedrigere Werte für den initialen Gapanteil auf. Eine mögliche Erklärung ist, dass Gaps zu einem wesentlichen Teil beim Durchdringen der Lagen mit dem Wirkfaden entstehen. In diesem Fall ist zu erwarten, dass bei Halbierung der freien Fläche, als bei Verdopplung der Anzahl der Einstichpunkte, entsprechend eine Ausweitung der Gapfläche stattfindet, d.h. starke Abbindung führt zu stärker ausgeprägten Initialgaps. Die freie Fläche selbst ist aufgrund des stark nichtlinearen Einflusses auf den initialen Gapanteil nur bedingt als Regressor geeignet, allerdings stellte sich die inverse der freien Fläche als geeigneter Kandidat für einen Regressor im Modell für den initialen Gapanteil heraus. Zu vermuten ist anhand der Abbildung 12 (rechts) ein linearer Einfluss der Inversen der freien Fläche auf den initialen Gapanteil. Außerdem lässt sich ein Interaktionseffekt zwischen Flächengewicht und freier Fläche vermuten: Der Einfluss der freien Fläche nimmt mit steigendem Flächengewicht ab.

Ein signifikanter Einfluss der Bindungsart auf den initialen Gapanteil konnte im Rahmen einer Varianzanalyse nicht gefunden werden. Vorhersagemodelle ohne Berücksichtigung der Bindungsart wurden bevorzugt. Auch ein systematischer Einfluss der biaxialen Lagenausrichtung auf die initiale Gapfläche konnte nicht erkannt werden. Bei Variation der Fadenspannung, war ebenfalls kein systematisches Verhalten zu beobachten. Für ein Regressionsmodell waren diese Parameter daher ungeeignet. Die Parameter die im Rahmen des Vorhabens neu untersucht wurden, haben damit einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Initialgaps. Die schon im Vorgängerprojekt in anderem Kontext untersuchten Stichpunktabstände sowie das Flächengewicht stellten sich jedoch als relevant heraus, vgl. Tabelle 5.

Tabelle 5 Regression für den initialen Gapanteil, basierend auf Daten des Vorgängerprojekts; $R^{2*} = 0,72$.

term	estimate	std.error	statistic	p.value
(Intercept)	10.665262	1.8922773	5.636204	0.0000005
$l(1/l)$	-18.254236	6.7842119	-2.690694	0.0092606
$l(1/c)$	-28.701410	7.0891439	-4.048643	0.0001522
$l(1/c):l(1/l)$	265.576810	29.1762203	9.102509	0.0000000
$l(1/c):l(1/l):W$	-0.230872	0.0366878	-6.292880	0.0000000

Prozentualer Gapanteil

Ähnlich wie bei der Faserwinkeländerung sind auch hier die Drapierhöhe und die DRAPETEST-Winkelstufe bestimmende Einflussfaktoren für den Drapiereffekt. Für kleine Drapierhöhen (Drapierhöhe < 20 mm) wurde in den Querschnittsbereichen beobachtet, dass sich von Anfang an vorhandene Initialgaps verkleinern. Bei größeren Drapierhöhen findet meist nur eine Vergrößerung bereits vorhandener Gaps sowie Bildung neuer Gaps statt.

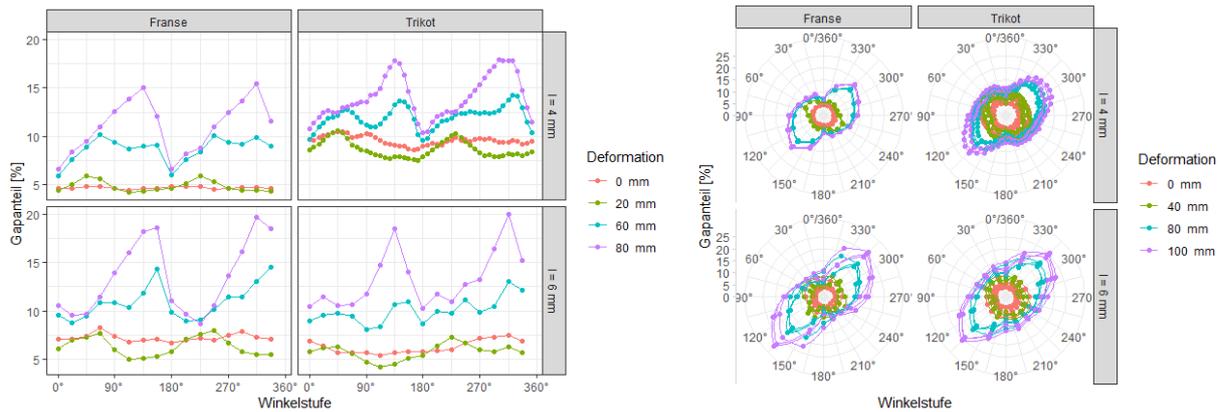


Abbildung 13 Gapanteil in Abhängigkeit von Winkelstufe und Drapierhöhe (Deformation), bei Lagenausrichtung $\pm 45^\circ$, mittlerer Fadenspannung und Verformung mit der Standard-Kalotte.

Das größte Gapwachstum trat im Quersugbereich auf; am Beispiel der oberen Lage eines $\pm 45^\circ$ -Geleges also bei 135° bzw. 315° . Die beobachteten Minima des Gapanteils lagen nicht etwa mittig dazwischen im Längszugbereich; vielmehr war im Scherbereich 1 ein lokales Minimum des Gapanteils zu erkennen. Es ist aufgrund der Winkelposition naheliegend, dass der Effekt durch die Wirkfäden erzeugt wird: Im Scherbereich 1 ist das Textil entlang der Produktionsrichtung gespannt. Die Wirkfäden verstärken das Biaxialgelege in dieser Richtung (bei Fransen-Bindung verläuft der Wirkgarn sogar ausschließlich in dieser Richtung) und halten die Faserbündel zusammen, sodass hier weniger Gapwachstum während des Umformens stattfindet. Dieser Effekt trat bei Stichweite 4 mm stärker in Erscheinung als bei Stichweite 6 mm. Eine Erklärung hierfür ist, dass bei geringerer Stichweite der Zusammenhalt weiter gestärkt wird – es tritt eine Versteifung der Maschenstäbchen auf und der zur Verschiebung der Faserbündel verfügbare Raum wird weiter begrenzt. Da bei Trikot-Bindung die Wirkfadenverläufe teilweise an der Unterseite des Geleges von der Produktionsrichtung abweichen (hier je nach Aspektverhältnis c/l um $\tan^{-1} 5/4 \approx 39.8^\circ$ bzw. $\tan^{-1} 5/6 \approx 51.3^\circ$) ist hier dieser Effekt weniger prägnant als bei Fransenbindung.

Am Beispiel der $\pm 75^\circ$ -Gelege ist in Abbildung 14 zu erkennen, wie die Effekte sich Überlagern: Der höchste Gapanteil wäre zunächst im Quersugbereich der oberen Lage zu erwarten, also bei Winkelstufe $165^\circ/345^\circ$. Dieser Bereich liegt jedoch nahe des Scherbereich 1, d.h. in diesem Fall wird schon nahe des Quersugbereichs der Zusammenhalt durch die nur um 15° von der Produktionsrichtung abweichenden Wirkfäden verstärkt. Mit der Überlagerung der gegenläufigen Effekte ist zu erklären, dass die beobachteten globalen Maxima im Übergangsbereich zwischen Quersugbereich und Scherbereich 2 eingenommen werden.

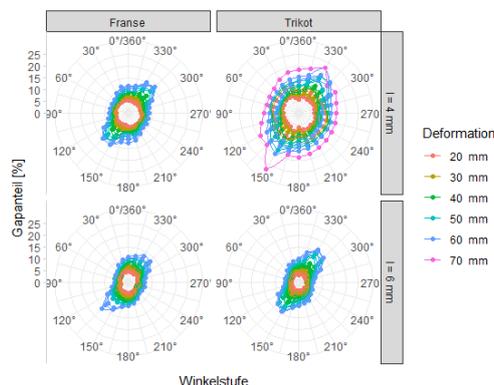


Abbildung 14 Gapanteil in Abhängigkeit von Winkelstufe und Drapierhöhe (Deformation), am Beispiel $\pm 75^\circ$ -Gelegen bei Verformung mit der Standard-Kalotte

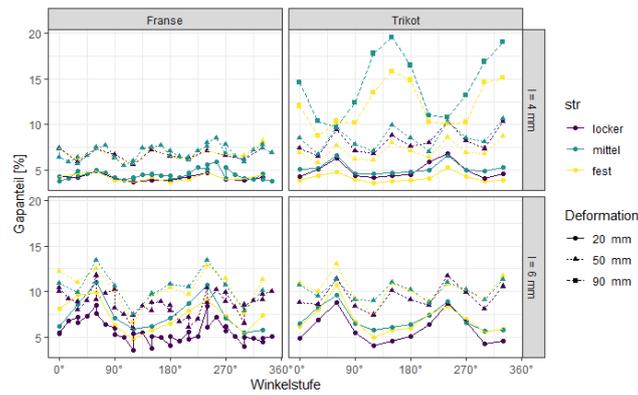


Abbildung 15 Gapanteil für unterschiedliche Fadenspannungen und Drapierhöhen (Deformation) bei $\pm 60^\circ$ -Gelegen bei Umformung mit der Standard-Kalotte

Die ermittelten Gapwachstums-Effekte lagen für die unterschiedlichen Fadenspannungs-Stärken sehr nahe beieinander. Nach Abbildung 15 ist zu erwarten, dass der Einfluss der Fadenspannung verglichen mit den Parametern Deformation, Winkelstufe und Stichlänge nur eine untergeordnete Rolle spielen kann. Ein systematischer Einfluss der Fadenspannung konnte nicht identifiziert werden, sodass vorab zu vermuten ist, dass die Fadenspannung im Vorhersagemodell für das Gapwachstum kein wesentlicher Einflussfaktor sein wird.

Gapwachstum

Um es zu erleichtern, das Wachstum des Gapanteils getrennt von den relativ stark schwankenden initialen Gapanteilen zu betrachten, wurde zusätzlich die Gapanteiländerung als Faktor, der die Änderung des Gapanteils gegenüber einem Referenzzustand angibt, betrachtet. Es ist zu vermuten, dass eine Verminderung der Stichpunkt-Abstände tendenziell zu geringerem Gapanteil-Wachstum führt, vgl. **Abbildung 16 Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** Dies entspricht der Idee, dass bei stärker abgebandenen Gelegen, also bei kleinerem Stichpunkt-Abstand, weniger laterale Beweglichkeit der Verstärkungsgarne ermöglicht wird und daher weniger Gaps neu entstehen. Für den Gapanteil ist der Einfluss einer starken Abbindung somit ambivalent: Zwar wird bei starker Abbindung, die Entstehung neuer Gaps vermindert, andererseits sind bei stärkerer Abbindung bereits im unverformten Textil mehr Gaps vorhanden. Im Scherbereich 1 bei Winkelstufe 0° , findet nur schwaches Gapwachstum statt, sodass hier die Initialgaps die Gapfläche maßgeblich bestimmen,

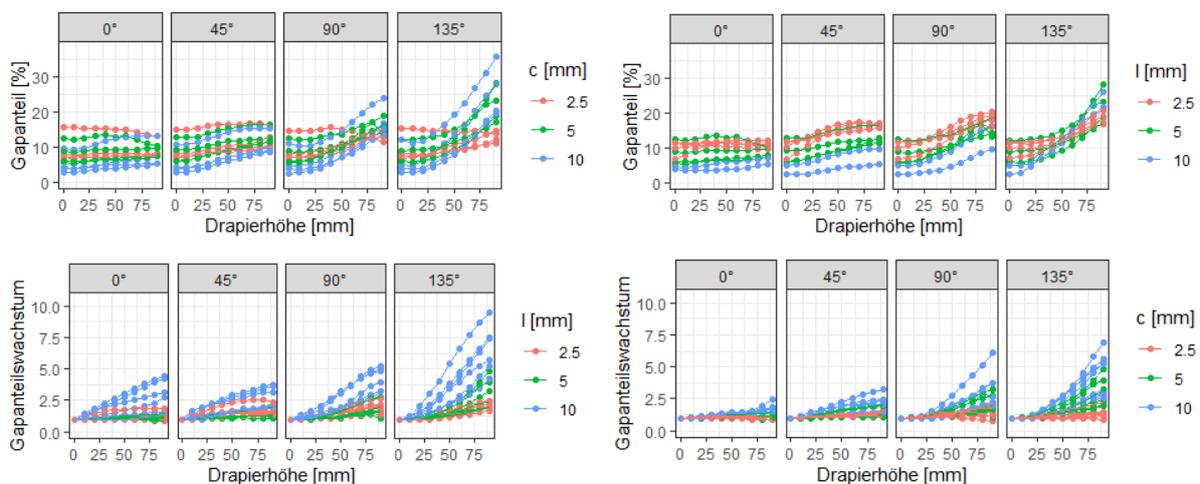


Abbildung 16 Gapanteil (oben) und Gapanteilswachstum (unten) in Abhängigkeit von Drapierhöhe, gruppiert nach Winkelstufen für verschiedene Stichpunktabstände c und l bei fixem l bzw. c .

Für zunehmendes Flächengewicht wurde ein negativer Einfluss auf den Gapanteil beobachtet. Eine zusätzliche Variation der Bindungsart beeinflusste den Gapanteil dabei kaum.

Es ist zu beobachten, dass die Messreihen bei stärker gekrümmten Kalotten vorzeitig abbrachen, d.h. keine Messwerte für höhere Drapierstufen sind verfügbar, vgl. Abbildung 17. Dies liegt daran, dass Messungen nach Textilversagen aus der dargestellten Stichprobe entfernt wurden, da deren weiteren Verläufe nicht mehr als für den Umformprozess systematisch anzusehen sind.

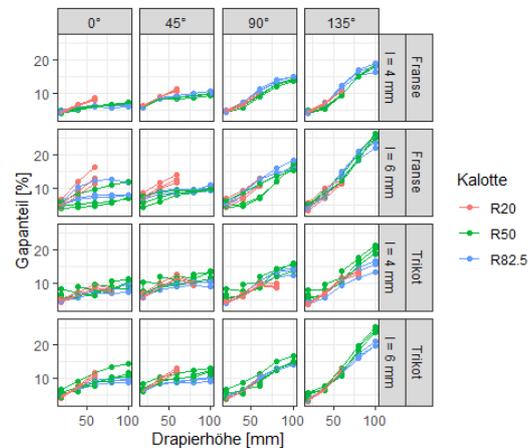


Abbildung 17 Gapanteil in Abhängigkeit von Winkelstufe und Drapierhöhe

Die Verlaufskurven für den Gapanteil sind für unterschiedliche Kalottengrößen weitgehend ähnlich. Ein größerer Unterschied ist im Scherbereich 1 festzustellen: hier verlaufen die Kurven für die kleine Kalotte erkennbar steiler, d.h. hier kommt es zu einem schnelleren Wachstum der Gaps. Ab Drapierhöhe 70 mm tritt meist das Versagen auf, da die Nähte den Spannungen nicht mehr standhalten können. Für systematische Werte im Vorhersagemodell, ist ein Einfluss der Kalottenkrümmung auf das Gapwachstum bzw. die Gapfläche zu erwarten.

Vorhersagemodell für das relative Gapwachstum (gegenüber Drapierstufe 0 mm)

Ein stark vereinfachtes Regressionsmodell mit Achsenabschnitt für das Gapwachstum ohne textile Parameter, welches lediglich die Drapierhöhe sowie deren Interaktion mit zwei Winkelstufentransformationen berücksichtigt, erreichte für Datensatz mit Messungen aller drei hemisphärische Kalotten ein Bestimmtheitsmaß von 0,64. Ein Modell mit Berücksichtigung der Kalottenkrümmung, der Stichlänge, der Lagenausrichtung, der Fadenspannung und der Bindungsart, konnten den Wert auf 0,71 steigern. Gegenüber einer direkten Modellierung des Gapanteils, konnte beim Modell für das Gapwachstum der Einfluss von Textil- und Drapierparametern besser erklärt werden, z.B. war bei Kalottenkrümmung nur in letzterem Modell ein linearer Einfluss zu erkennen.

AP 3.3 – Ondulation

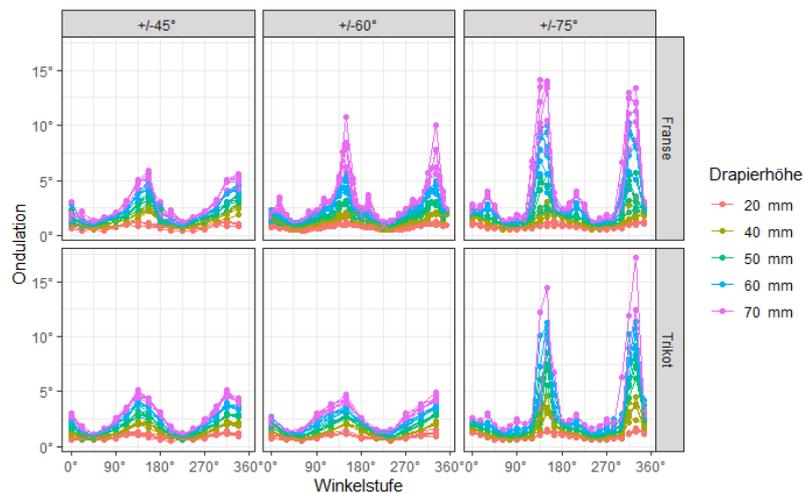


Abbildung 18 Ondulation in Abhängigkeit von Drapierhöhe und Winkelstufe, gruppiert nach Bindungsart und Lagenausrichtung für Messungen mit der Standardkalotte.

Wie schon bei der Faserwinkeländerung und dem Gapwachstum ist der Einfluss von Drapierhöhe und Winkelstufe deutlich erkennbar, wobei die Lagen von Minima und Maxima wieder von der Lagenausrichtung des Textils abhängen: Die Ondulationswerte nehmen mit zunehmender Drapierhöhe im Allgemeinen zu. Das Ausmaß des Ondulationswachstums hängt dabei erkennbar von der Winkelstufe ab: So wurde beobachtet, dass Ondulation vor Allem im Querszugbereich entsteht ($\pm 45^\circ$ -Gelege: $135^\circ/315^\circ$, $\pm 60^\circ$ -Gelege: $150^\circ/330^\circ$, $\pm 75^\circ$ -Gelege: $165^\circ/345^\circ$). Die geringste Ondulation findet im Längszugbereich statt ($\pm 45^\circ$ -Gelege: $45^\circ/225^\circ$, $\pm 60^\circ$ -Gelege: $60^\circ/240^\circ$, $\pm 75^\circ$ -Gelege: $75^\circ/235^\circ$). Dazu sind weitere kleine, lokale Peaks zu beobachten, die bei Fransenbindung verstärkt auftreten und im Bereich der Winkelstufen von 15° - 22.5° bzw. 195° - 210° zu finden sind.

Ähnlich wie beim Gapanteil ist auch für die Ondulationskennwerte zu beobachten, dass im unverformten Zustand bereits Ondulation auftritt. Diese nimmt oftmals bei niedrigen Drapierstufen während der Vorspannung des Textils zunächst ab. Dieser Effekt ist wahrscheinlich vor Allem auf Einflüsse durch das Handling beim Einlegen der Probe in den DRAPETEST zurückzuführen, da beim unverformten Textil idealerweise keine Ondulation vorliegen sollte. Messungen bei niedrigen Drapierstufen (weniger als 30 mm Drapierhöhe) sollten daher nicht in die Modellanpassung der Vorhersagemodelle eingehen.

Für beide betrachtete Bindungsarten waren weitgehend ähnliche Kurvenverläufe für die Ondulation zu erkennen, jedoch unterscheiden sie sich aber in den Peaks deutlich voneinander, vgl. Abbildung 18. Die Peaks bei Fransenbindung traten konzentrierter auf, die Maxima in den Verlaufskurven sind also spitzer.

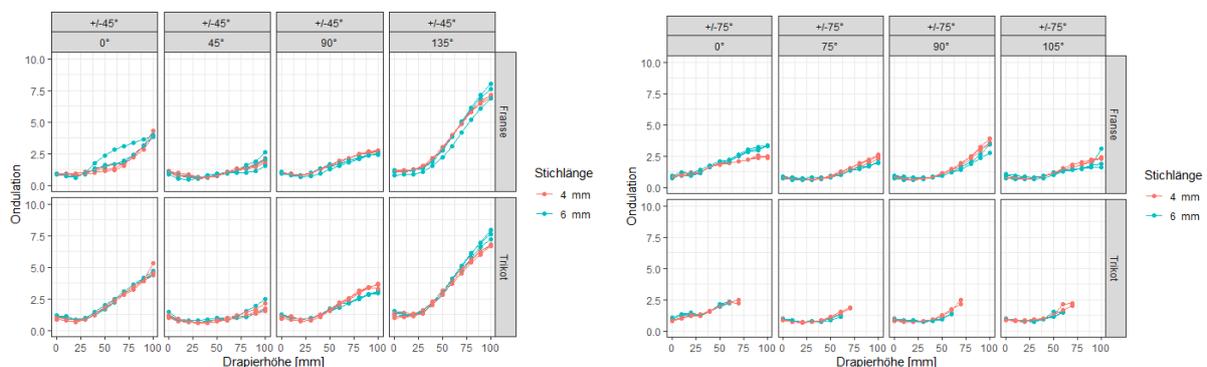


Abbildung 19 Ondulation in Abhängigkeit von Drapierhöhe (Deformation), Stichlänge, Bindungsart und Winkelstufe für $\pm 45^\circ$ -Gelege (links) und $\pm 75^\circ$ -Gelege (rechts) bei Umformung mit der großen Kalotte

Es könnte ein schwacher, linearer Einfluss der Stichlänge auf die Ondulation stattfinden. Anhand der in diesem Vorhaben durchgeführten Messungen wurde im Scherbereich 2, vor Allem bei höherer Drapierstufe, eine stärkere Ondulation für Gelege mit geringeren Stichlängen beobachtet, vgl. Abbildung 19. Im Scherbereich 1 ist die Entwicklung gegenläufig. Der Effekt ist verglichen mit den Einflüssen von Drapierhöhe und Winkelstufe allerdings schwach. Daten des Vorgängerprojekts, in welchem auch variierende Maschenstäbchenabstände untersucht wurden, konnten die Vermutung nicht bekräftigen, da jene Messungen noch größeren Schwankungen unterlagen und dort daher keine systematischen Einflüsse zuverlässig erkennbar sind.

Unabhängig von der Fadenspannung ergab sich nahezu der gleiche Drapiereffekt-Verlauf für die Ondulation. Die beobachteten Ondulationskennwerte hängen nicht erkennbar von der Fadenspannung ab.

Auch für das Flächengewicht konnte kein systematischer Einfluss auf den Drapiereffekt Ondulation entdeckt werden. Sofern ein Einfluss vorhanden ist, ist anhand der Daten davon auszugehen, dass der Effekt klein sein muss. Es ist nicht zu erwarten, dass das Flächengewicht ein aussagekräftiger Regressor für das Vorhersagemodell ist.

Die Wahl der unterschiedlich gekrümmten Kalotten hatte einen erkennbaren Einfluss auf die Ondulation, vgl. Abbildung 20. Bei Wahl der kleinen Kalotte, also der größten Krümmung, traten für mittlere Drapierhöhen deutlich höhere Ondulationskennwerte im Querzugbereich der $\pm 45^\circ$ -Gelege auf, teils bis um den Faktor 2 vergrößert gegenüber den Werten für die mittlere und große Kalotte. Bei stärker gleichgerichteten Textilien, also den für $\pm 60^\circ$ - und $\pm 75^\circ$ -Gelegen sind diese Unterschiede geringer. Die Verlaufskurven für die mittlere und große Kalotte ähneln sich in ihrer Ausprägung mehr, was auf den geringeren Krümmungsunterschied zwischen diesen beiden Kalotten zurückgeführt werden kann. Es wurden nichtlinearen Abhängigkeiten der Ondulationskennwerte von der Kalottenkrümmung vermutet. Interaktionseffekte mit der Lagenausrichtung treten zwar scheinbar auf, die Art des Einflusses ist jedoch nicht ohne Weiteres ersichtlich. Es ist davon auszugehen, dass weitere Untersuchungen notwendig sind, um den Einfluss der Kalottengröße im Modell für die Ondulationskennwerte erklären zu können.

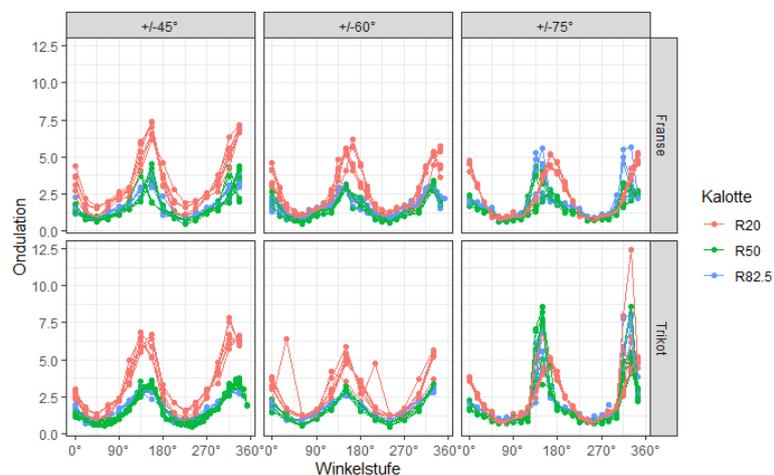


Abbildung 20 Ondulation in Abhängigkeit von Winkelstufe, Lagenausrichtung und Bindung, gruppiert nach Kalottentyp

Vorhersagemodell für die Ondulation

Im Regressionsmodell für die Ondulation stellten sich erneut Transformationen von Winkelstufe und Lagenausrichtung als wesentlichste Einflussparameter heraus. Ferner konnte die Kalottenkrümmung als Regressor die prädiktive Güte des Modells deutlich verbessern. Die Stichpunktabstände wurden zwar als signifikante Faktoren identifiziert, allerdings tragen Sie nur zu einer geringen Verbesserung der Vorhersage im betrachteten Parameterraum bei. Vermutlich unterscheiden sich die im Projekt untersuchten Stichpunktabstände zu wenig um einen deutlicheren Einfluss zu bewirken.

Tabelle 6 Sparsames Regressionsmodell für die Ondulation bei Messdurchläufen mit der Standardkalotte

term	estimate	std.error	statistic	p.value
(Intercept)	-0.4241485	0.0278987	-15.20315	0
I(Deformation)	0.0584589	0.0006158	94.93633	0
I(Deformation):I(cosAngle1)	-0.0278415	0.0002964	-93.93537	0
I(Deformation):I(cosAngle2)	0.0209419	0.0006773	30.92157	0
I(Deformation):I(cosAngle180)	-0.0384723	0.0011879	-32.38631	0

Das Beispiel in Tabelle 6 enthält ein sparsames Modell mit Regressoren für die Drapierhöhe (Deformation) und ihre Interaktion mit dem Längszugregressor ($\cos\text{Angle}1 = \cos(2 \cdot (\alpha - \theta))$), und mit zwei Varianten des Scherbereich-Regressors ($\cos\text{Angle}2 = \cos(2\alpha)$, $\cos\text{Angle}180 = \max(0, \cos(2\alpha))$); das Bestimmtheitsmaß beträgt 0,76. Das Analoge Modell für die kleine Kalotte hat eine niedrigere prädiktive Güte mit einem Bestimmtheitsmaß von lediglich 0,67. Ein Modell mit Berücksichtigung der Kalottenkrümmung und der Stichlänge erreichte ein Bestimmtheitsmaß von 0,77.

AP4 Validierung der Berechnungsmethode für das Drapiereffekt-Mapping

Ziel des Arbeitspakets ist es mit einem Bildanalyseprüfstand Vergleichsmessungen an einer realistischen Geometrie durchzuführen. Dazu sollen zuvor untersuchte Textilien über das Validierungswerkzeug drapiert werden. Die Messergebnisse werden dann mit Vorausberechnungen verglichen, die sich aus den Vorhersagemodellen von AP3 ergeben. Im Falle von unzureichenden Vorhersageergebnissen, sollte eine Überarbeitung des Modells erfolgen.

Um die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf realistische Geometrien zu validieren, wurde im 3D-Druckverfahren eine komplexe Geometrie als DRAPETEST-Kalotte erzeugt. Dadurch konnte der DRAPETEST und dessen Bildanalysesoftware als Validierungsprüfstand verwendet werden. Somit wurden Einflussfaktoren eliminiert, die aufgrund von Unterschieden in verschiedenen Drapierwerkzeugen und deren Bildauswertung auftreten würden und daher zur Diskrepanz von vorhergesagten Daten und im Validierungswerkzeug gemessenen Daten führen würden. Dies ermöglicht es, auftretende Diskrepanzen auf den Geometrieinfluss zurückzuführen und im Anschluss besser zu analysieren. Aufgrund des im DRAPETEST zur Anwendung kommenden Drapierverfahrens, können nur konvexe Geometrien sinnvoll untersucht werden. Unter Berücksichtigung dieser Einschränkung wurde als Validierungsgeometrie der in AP1 beschriebene Triple Dome gewählt. Die entsprechende Softwareanpassung durch die Firma Textechno geschah zusammen mit den notwendigen Anpassungen für eine weitere neu für das Vorhaben angeschaffte, hemisphärische Kalotte.

Eine Vorhersage von Drapiereffekten aufgrund der Kalottenkrümmung ist nach den Vorhersage-Modellen aus AP3 möglich. Die komplexe Kalotte des Triple-Dome ist jedoch an den verschiedenen Winkelpositionen des DRAPETEST unterschiedlich gekrümmt. Die Krümmung variiert jedoch aufgrund der Definition der Geometrie auch entlang einer fixen Winkelstufe; aufgrund des Plateaus ist sie an der Oberfläche nahe der Mittelachse ungekrümmt, während sie um das Plateau herum konvex gekrümmt ist. Für einen ersten Vorhersage-Versuch wurde eine Ersatzkrümmung an jeder vermessenen Winkelstufe berechnet, welche als durchschnittliche Krümmung der Kontaktfläche von Textil und Kalotte entlang der Winkelstufe von außen bis zur Mittelachse definiert wurde. Die so berechneten Ersatzkrümmungen lagen zwischen $1/49 \text{ mm}^{-1}$ bis $1/67 \text{ mm}^{-1}$, wobei für die meisten Winkelstufen Werte zwischen den Krümmungswerten der kleinen und der großen Kalotte vorliegen. Daher war davon auszugehen, dass die Drapiereffekt-Vorhersagen für die komplexe Geometrie auf Grundlage der Ersatzkrümmung vorwiegend zwischen den entsprechenden Kennwerten bei Wahl der kleinen und der großen Kalotte liegen wird.

Vorhersage der Faserwinkeländerung

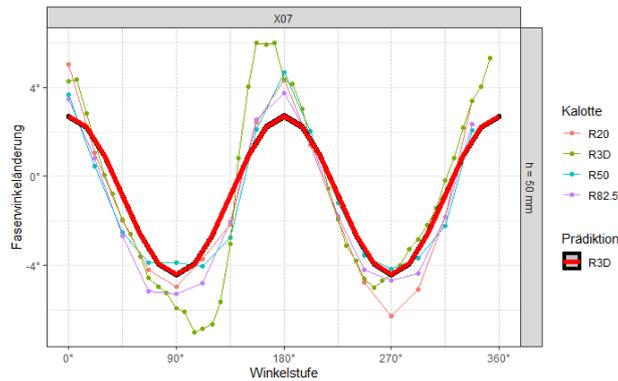


Abbildung 21 Vorhersage der Faserwinkeländerung für die komplexe Kalotte (R3D) bei Drapierhöhe 50 mm auf Basis der Ersatz-Krümmungen im Vergleich mit den tatsächlichen Werten bei Umformung des Textils X07

Wie aus AP3 bekannt, liegen die Effektverläufe für die drei hemisphärischen Kalotten nahe beieinander, wobei beim Vergleich der Kurvenverläufe der Kalotten unterschiedlicher Krümmungen kein durchgehend monotoner Einfluss der Krümmung zu erkennen war. Für die Faserwinkeländerung wurde die Vermutung bestätigt, dass die für die komplexe Geometrie vorhergesagte Verlaufskurve der Faserwinkeländerung über die Winkelstufen nahe an den Daten der hemisphärischen Kalotten liegt, vgl. Abbildung 21. Die Minima im Scherbereich 2 liegen etwa auf gleicher Höhe wie bei der mittleren und großen Kalotte. Die Maxima liegen jedoch erkennbar unter den Maxima aus den Verlaufskurven der hemisphärischen Kalotten. Die gemessenen Faserwinkeländerungen bei Verwendung der komplexen Kalotte unterschieden sich deutlich, von denen bei den hemisphärischen Kalotten. Es ist eine deutliche Asymmetrie zu erkennen, d.h., Effekte auf einer Winkelstufe und der gegenüberliegenden Winkelstufe unterscheiden sich. Weiterhin fällt das Minimum, welches sich ca. bei Winkelstufe 100°-120° befindet, deutlich stärker aus und liegt nicht exakt im Scherbereich 2 des Textils. Ebenso liegt auch das Maximum nahe der Winkelstufen 160°-170° nicht exakt im Scherbereich 1 und fällt ebenfalls deutlich stärker aus, als bei den hemisphärischen Kalotten. Es ist somit keine sinnvolle Prädiktion auf Basis nur der Kalottenkrümmungen für die komplexe Kalotte hinsichtlich der Faserwinkeländerung möglich, die Asymmetrie der Drapiereffekte wurde nicht abgebildet.

Ein anderer Lösungsansatz wurde benötigt und daher die Methode angepasst: Das Modell musste um andere Parameter erweitert werden, um die Geometrieeinflüsse besser beschreiben zu können. Dazu kamen Parameter infrage, die von Geometrie und Drapiergrad abhängen. Zwei Kandidaten wurden hierfür näher untersucht: Dies ist zunächst die Strecke auf der mit der Kalotte in Kontakt befindlichen Fläche des Textils entlang einer Winkelstufe. Diese wurde als Krümmungsstrecke bezeichnet (im Regressionsmodell: *curve_mid_len*). Damit lässt sich das Regressionsmodell aus Tabelle 7 erzeugen.

Tabelle 7 Vorhersagemodell für Faserwinkeländerung mit Regressor für die Krümmungsstrecke (*curve_mid_len*) anstelle der Drapierhöhe

term	estimate	std.error	statistic	p.value
$l(\text{curve_mid_len}^2)$	8.3841966	1.3741225	6.1014912	0.0000000
$l(\text{curve_mid_len}^2):\cos\text{Angle}2$	-71.2271011	1.9544618	-36.4433326	0.0000000
$l(\text{curve_mid_len}^2):l(1/\text{calotte})$	-1463.7876585	90.4542144	-16.1826364	0.0000000
$l(\text{curve_mid_len}^2):\text{bindFranse}$	1.3953125	0.9868069	1.4139672	0.1575636
$l(\text{curve_mid_len}^2):\cos\text{Angle}2:l(1/\text{calotte})$	6537.5114264	124.5041579	52.5083783	0.0000000
$l(\text{curve_mid_len}^2):\text{bindFranse}:\cos\text{Angle}180$	12.7465627	1.9453692	6.5522588	0.0000000

term	estimate	std.error	statistic	p.value
$l(\text{curve_mid_len}^2):\text{bindTrikot}:\text{cosAngle180}$	15.6105238	1.9007800	8.2126935	0.0000000
$l(\text{curve_mid_len}^2):\text{cosAngle2}:\text{r_off}:\text{bindTrikot}$	-0.0022526	0.0350254	-0.0643133	0.9487287

Die Vorhersagen aus diesem Modell passen besser zu den Messungen mit der komplexen Kalotte, vgl. Abbildung 22 (links): Asymmetrisches Verhalten wird vorhergesagt, wobei die Lage der Minima in Scherbereich 2 und der Maxima in Scherbereich 1 weiterhin nicht ganz getroffen werden.

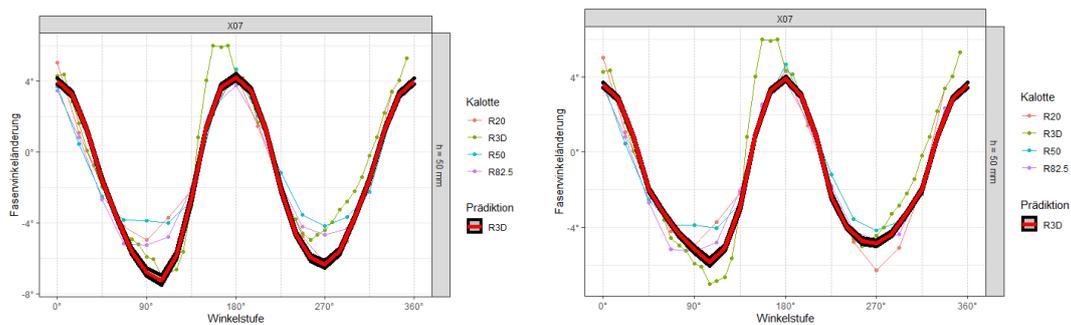


Abbildung 22 Vorhersagen für die komplexe Kalotte bei Drapierhöhe 50 mm: links mittels Regressor Krümmungstrecke, rechts mittels Spannflächenwinkel

Des Weiteren wurde als alternativer geometrische Einflussparameter der Winkel der zwischen Kalotte und Spanning gespannten freien textilen Fläche entlang einer Winkelstufe beobachtet, den wir als Spannflächenwinkel bezeichnen. Benutzt man diesen im Regressionsmodell anstelle der Drapierstufe, so enthält die Vorhersage auch nichtsymmetrische Effekte. Diese passen teilweise zu den in der komplexen Kalotte beobachteten Tendenzen, spiegeln aber nicht die extremen Peaks in den Beobachtungen wider. Die Bestimmtheitsmaße sind mit Werten von 0.81 bzw. 0.89 für die zweite Variante zwar recht hoch (Bestimmtheitsmaße für Modelle mit Achsenabschnitt), daraus lässt sich jedoch keine Schlussfolgerung für die generelle Vorhersagegüte für weitere Geometrievariationen, ähnlich der komplexen Kalotte, treffen. Um zu überprüfen, ob die Parameter einen wirklichen Erklärungsgehalt für die komplexe Geometrie im Regressionsmodell besitzen, wären weitere Untersuchungen notwendig. Mit überschaubarem Aufwand könnten dazu Rotationen der komplexen Kalotte untersucht werden. Dies würde allerdings ein Vielfaches der bisher betrachteten Proben für ein fixes Textil erfordern und war im Rahmen des Vorhabens nicht leistbar.

Vorhersage des Gapanteils

Wegen numerischer Probleme wurden im folgenden Modell die ohnehin schwachen Prädiktoren Fadenspannung und Bindungsart nicht in das Regressionsmodell aufgenommen. Ähnlich wie bei der Faserwinkeländerung, wird auch das asymmetrische Verhalten des Effekts Gapwachstum im Modell auf Basis der Kalottenkrümmung als einzigem geometrischen Parameter nicht abgebildet, vgl. Abbildung 23 (links). Das Bestimmtheitsmaß erreichte hier den Wert $R^2=0,669$ (Modell mit Achsenabschnitt).

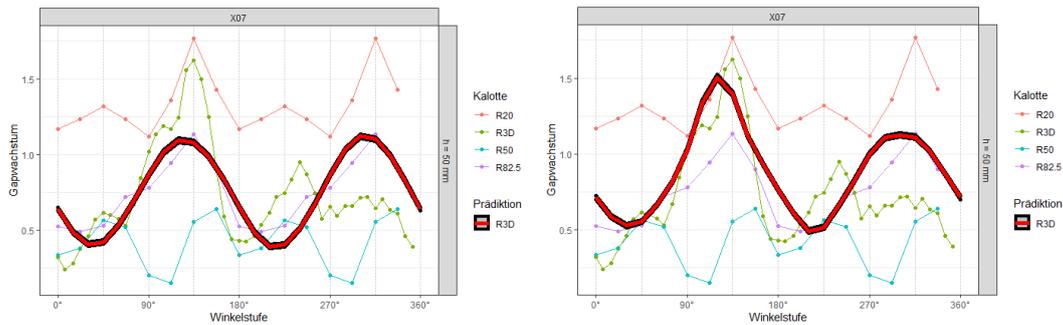


Abbildung 23 Vorhersage des Gapwachstums für die komplexe Kalotte (R3D) im Vergleich mit den tatsächlichen Werten bei Umformung des Textils auf Basis von Krümmung (links) bzw. Krümmungsstrecke (rechts)

Ersetzt man den Prädiktor Deformation durch den geometrischen Einflussfaktor der Krümmungsstrecke, so ist in Abbildung 23 (rechts) zu erkennen, dass die Asymmetrie wieder abgebildet wird. Während das größere der beiden Maxima in den Querzugbereichen ungefähr getroffen wird, wird die gegenüberliegende Winkelstufe bezüglich des Gapwachstums deutlich überschätzt. Für beide vorgeschlagenen geometrischen Einflussfaktoren ergibt sich jeweils ein ähnliches Bild wie in vgl. *Abbildung 23* (rechts).

Beschränkt man sich bei der Modellbildung für den Gapanteil auf ähnliche Textilien, wie z.B. in *Abbildung 24*, auf Trikotbindungen mit $\pm 45^\circ$ -Biaxialgelegen und Stichlänge 6 mm bei fixer Drapierhöhe 50 mm, um verschiedene Kalotten zu vergleichen, so können leichter gut korrelierende Modelle gefunden werden. Um diese in das allgemeine Modell zu überführen, wären weitere Untersuchungen notwendig, auch um auszuschließen, dass es sich hierbei nicht um zufällige Korrelationen handelt.

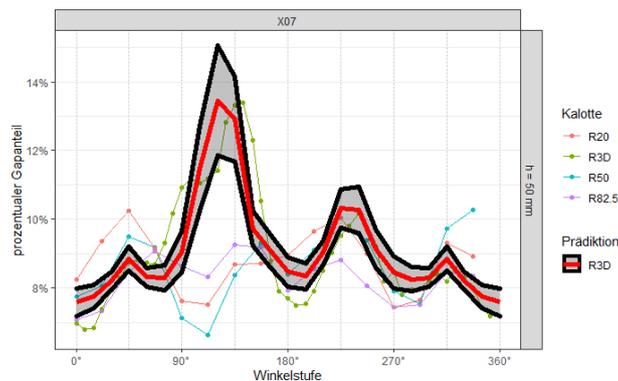


Abbildung 24 Vorhersage aus textilbezogenem Regressionsmodell für das Gelege X07

Vorhersage der Ondulation

Zunächst wurden wieder Modelle betrachtet, deren einziger geometriebeschreibender Parameter die Kalottenkrümmung ist. Drapierprüfungen mit der komplexen Kalotte zeigen auch hier wieder eine deutliche Asymmetrie und unterscheiden sich vor allem im Querzugbereich bei 135° deutlich von den Beobachtungen bei der mittleren und großen Kalotte. Bei Wahl der Kalottenkrümmung als einzigen geometriebeschreibenden Parameter konnte daher kein zufriedenstellendes Modell erzeugt werden, vgl. *Abbildung 25*.

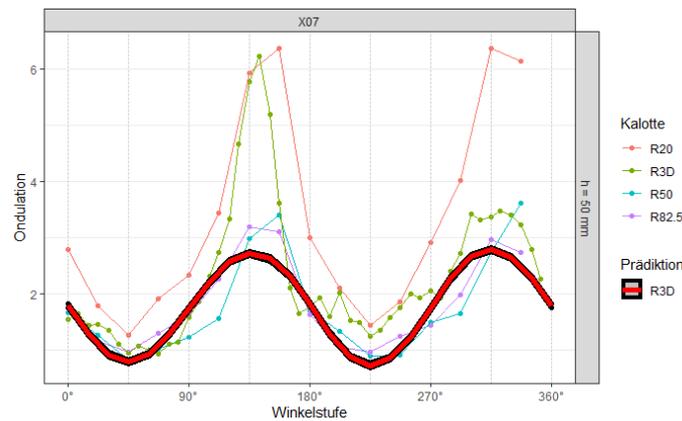


Abbildung 25 Vorhersage für Drapierhöhe 50 mm aus stark vereinfachtem Modell auf Basis vom Regressor Drapierhöhe in Interaktion mit Scherbereich, Längs-/Querzug-Bereich und Kalottenkrümmung

Als alternative geometriebeschreibende Parameter wurden wieder die Krümmungstrecke und der Spannflächenwinkel in einem auch um weitere Textilparameter erweiterten Modell betrachtet, vgl. Abbildung 26.

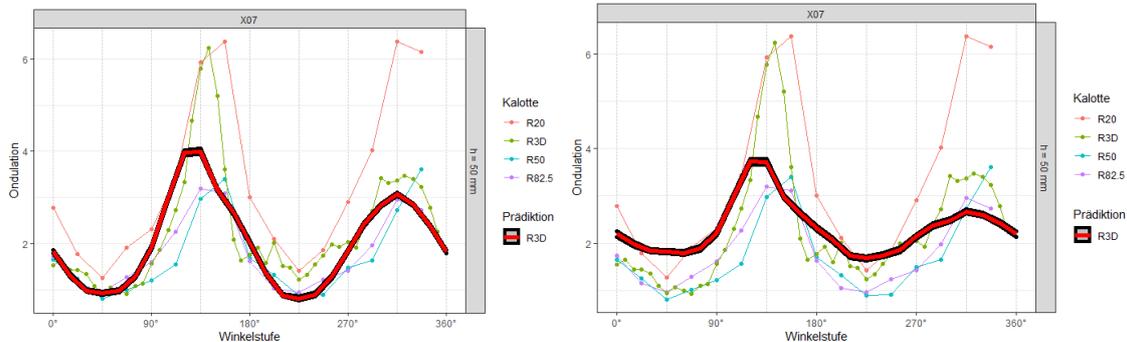


Abbildung 26 Vorhersage für Drapierhöhe 50 mm für Textil X07 aus Modell auf Basis des Regressors Spannflächenwinkel (links) bzw. Krümmungstrecke (rechts)

Beide Varianten konnten zwar asymmetrisches Verhalten abbilden, das Modell auf Basis der Krümmungstrecke kann aber die Größenordnung keines der Minima und Maxima erfassen. Hier ist das Modell auf Basis des Spannflächenwinkels geeigneter; der grobe Verlauf stimmt weitgehend mit den Beobachtungen der komplexen Kalotte überein. Die besonders große Ondulation im Querzugbereich bei 135° wird jedoch auch hier deutlich unterschätzt. Die Bestimmtheitsmaße der Modelle erreichten Werte von 0,67 (mit Spannflächenwinkel) bzw. 0,53 (Krümmungstrecke).

Insgesamt können die neu untersuchten geometrischen Einflussfaktoren das komplexe Verhalten der der Triple-Dome-Kalotte teilweise abbilden. Es wären jedoch neue Prüfungen mit weiteren Geometrievariationen notwendig um die Validität dieses neu vorgeschlagenen Parameters zu bestätigen und die Modelle zu verbessern.

AP5: Anwendung

Begleitend zu den Arbeitspaketen 2 und 3 wurde eine Shiny-App in der Programmiersprache R erstellt. Die Umsetzung als Shiny-App wurde gewählt, da hiermit einerseits die in R erstellten Modelle und Algorithmen direkt genutzt werden können und andererseits hiermit eine übersichtliche und für Endanwender intuitiv zu bedienender Oberfläche erzeugt werden konnte. Der Nachteil der Methode ist, dass für die lokale Nutzung am Computer, R und R Studio mit den benötigten Packages installiert sein müssen. Andererseits ist es durch die Umsetzung als Shiny-App auch möglich, das Programm auf einem Webserver zu betreiben, und es so Dritten mittels einer URL zur Verfügung zu stellen, sodass diese das Programm ohne Installation über den Web-

Browser benutzen können. Für einen Prototypen zu Demonstrationszwecken ist dies somit geeignet.

Das Softwaretool ermöglicht die Darstellung, Analyse und für eine Auswahl an Regressionsmethoden auch die automatisierte Modellierung und Prädiktion anhand der schon ermittelten Messdaten, ohne dass dafür spezielle Kenntnisse der Textilsimulation benötigt werden. So können für frei gewählte Textilparameter-Kombinationen und Drapierstufen die Drapiereffektkennwerte bestimmt werden, die bei einer entsprechenden Drapierprüfung im DRAPETEST zu erwarten wären. Die Methoden der AP2 und AP3 zur Darstellung, Modellierung und Vorhersage und der gesamte Datensatz der Drapierversuche aus dem *AP1 Empirie* wurden in einem R-Package implementiert und so in die Shiny-App eingebunden. Die Umsetzung der Methoden in R dient als Nachweis der Funktionsfähigkeit und der weiteren Verwertbarkeit der Berechnungsmethode. Die Umsetzung in R ermöglichte eine effiziente statistische Untersuchung der Drapierversuche, da eine Vielzahl an statistischen Verfahren bereits in R implementiert und erprobt sind. Nicht implementiert im Software-Prototypen ist die Vorhersage für abweichende Geometrien und der Datenexport für weitere Schritte der virtuellen Prozesskette. Die Informationen in den in der App dargestellten Graphen und Tabellen können jedoch direkt per Copy & Paste übernommen werden. Erweiterungen, wie z.B. ein spezieller Daten-Export als CSV können von in R kundigen Anwendern hinzugefügt werden, da der Quellcode von R-Programmen, wie eben auch der hier erzeugten Shiny-App, grundsätzlich offen ist.

3. Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse

Als Ergebnis konnten textile Parameter, sowie den Drapiervorgang beschreibende Parameter mit den dabei entstehenden Effekten in einen modellhaften Zusammenhang gebracht werden. Es wurden Versuchsergebnisse aller im Projekt untersuchten Verstärkungstextilien berücksichtigt und somit eine Beschreibung des multidimensionalen Auslegungsraumes mit empirisch abgeleiteten Funktionen erreicht. Dabei wurden auch verschiedene nichtlineare Einflüsse berücksichtigt und nach geeigneter Transformation einer Regressions- und Korrelationsanalyse unterzogen. Eine im Projektantrag genannte Methode zur Datenassimilation stellte sich in diesem Zusammenhang als nicht zielführend heraus und wurde daher nicht eingesetzt. Die erzeugten Modelle sind sparsam gewählt, um Overfitting zu vermeiden und einer gute Interpretierbarkeit zu gewährleisten. Die Modellanpassung benötigt nur wenig Rechenzeit. Die Zielsetzung ein prototypisches Softwaretool zu entwickeln, welches Anwendenden und Herstellern von Multiaxialgelegen bei der Textil-, bzw. Textilparameterwahl behilflich sein kann, konnte erreicht werden. Für den Prototypen wurde eine Teilmenge der entwickelten Modelle implementiert, sodass dieser zur Demonstration des Ergebnisses dienen kann. Für die direkte Verknüpfung mit Simulationsmethoden auf Basis mechanischer Gesetze sind die Ergebnisse in dieser Form nur begrenzt geeignet, jedoch können die Ansätze und Methoden in einem Nachfolgeprojekt entsprechend weiterentwickelt werden, um die Anbindung an die Schnittstellen der Simulationen der nächsten Schritte der Prozesskette zu ermöglichen.

Die Validierung der Übertragbarkeit der Modelle auf komplexe Geometrien wurde entgegen des Plans nicht in einem eigenständigen Prüfstand untersucht, sondern anhand einer neuen, nichtsymmetrischen Kalotte für den DRAPETEST. Somit konnte trotz Schwierigkeiten der Wiederholbarkeit der Versuche im externen Prüfstand eine Überprüfung der Übertragbarkeit durchgeführt werden. Auf die niedrige prädiktive Güte des ursprünglichen, nur krümmungsbasierten Modells wurde in einem weiteren Durchgang reagiert: So wurden mögliche Verbesserungen vorgeschlagen und im Rahmen der Möglichkeiten der durchgeführten Versuche untersucht. In einem Nachfolgeprojekt mit einem neuen Versuchsplan kann dies weiter untersucht bzw. weiterentwickelt werden.

Das Projekt wurde von wissenschaftlichen Mitarbeitern des Faserinstituts Bremen mit Unterstützung durch Labormitarbeiter bearbeitet. Der für das Projekt eingeplante Kostenrahmen wurde eingehalten. Der zeitliche Rahmen konnte dank der genehmigten Projektverlängerung gestreckt werden, sodass ein vorübergehender zeitlicher Verzug, ausgeglichen werden konnte. Die Durchführung der Untersuchung der komplexen Geometrie

im DRAPETEST statt in einem eigenständigen Prüfstand, die wegen der verbesserten Wiederholbarkeit und auch aus zeitlichen Gründen gewählt wurde, führte zu den aufgetretenen Einsparungen im zahlenmäßigen Nachweis.

4. Darstellung der Innovationspotenziale und Applikationsmöglichkeiten

Wissenschaftliche und wirtschaftliche Bedeutung der Ergebnisse

Aus wissenschaftlicher Sicht konnten textile Zusammenhänge auf Basis der erzeugten Messdaten erkannt werden. Die wachsende Datenbank an Drapiermessungen kann als Input für Machine-Learning-Verfahren dienen, mit deren Hilfe Cluster erkannt werden können oder Vorhersagemodelle erzeugt werden können. Die begrenzte Übertragbarkeit auf neue Geometrien mittels rein statistischer Methoden spricht dafür diesen Ansatz nicht isoliert zu betrachten, sondern in Kombination mit anderen Methoden, wie z.B. finite Elemente-Methoden. Eine potenzielle wirtschaftliche Bedeutung der Ergebnisse ergibt sich dadurch, dass gewonnene Erkenntnisse in die Prozesskette zur Erzeugung eines Faserverbundbauteils eingebracht werden können: So ist die Relevanz verschiedener Textilparameter hinsichtlich mehrerer Drapiereffekte auf Basis der erzeugten Daten und Modelle vorab bekannt. Dies erleichtert es geeignete Multiaxialgelege, welche die gewünschten Drapiereigenschaften haben auszuwählen bzw. herzustellen. Aus einer Vielzahl von möglichen Textilien in den Parametervariationen konnte im *AP1 Empirie* eine relativ kleine Menge Pareto-optimaler Textilien identifiziert werden, sodass unmittelbar aufgrund einer Präferenz hinsichtlich verschiedener Drapierbarkeitseigenschaften eine Entscheidung für passende Parameterkombination gefunden werden kann. Solcher Nutzen kann mithilfe der entwickelten, prototypischen Tools bei minimalem Kosten- und Arbeitsaufwand erzeugt werden, wobei ein Erreichen der Marktreife in Nachfolgeprojekten zu erreichen ist.

Internes Innovations- und Anwendungspotenzial (eigene Nutzung der Ergebnisse, Folgeprojekte)

Die im Projekt durchgeführten Versuche und daraus hervorgebrachten Erkenntnisse bilden eine Grundlage für die gegenwärtige Projektplanung verwandter Themen und Zielsetzungen am Faserinstitut. Die erarbeitete Vorgehensweise kann auf weitere Textilarten, z.B. Vliesstoffe, angewandt werden. Die Vorhersage-Methoden lassen sich bei Durchführung geeigneter Versuchsreihen auch für eine virtuelle Charakterisierung von Textilien für eine FE-Simulation nutzen. Entsprechende Projektideen wurden erarbeitet und Anträge werden mit geeigneten Projektpartnern aktiv vorbereitet.

Darstellung erworbener bzw. anzumeldender Schutzrechte

Keine Schutzrechte wurden erworben oder angemeldet. Es ist keine Anmeldung von Schutzrechten vorgesehen.

Applikationsmöglichkeiten für die mittelständische Industrie und Transferkonzept

Die Grundlagenergebnisse sollen in ein Nachfolgeprojekt und verwandte künftige Projekte mit Projektpartnern transferiert werden. Dort werden weitere Entwicklungsschritte hin zu einer marktfähigen Lösung folgen.

5. Zusammenstellung aller erfolgten bzw. geplanten Veröffentlichungen

Ergebnisse der Arbeitspakete Modellierung und Übertragung wurden in einem Workshop der Expert*innen-Tage 2021 als Oral-Poster-Präsentation mit Kurzvortrag vorgestellt. Eine umfangreiche Veröffentlichung wird als Forschungsbericht veröffentlicht. Dazu wird angestrebt einen Teil der Ergebnisse als Paper zu veröffentlichen.