

Methodenentwicklung zur Konstruktion und Auslegung von  
endlosfaserverstärkten thermoplastischen Komponenten für die  
Automobilindustrie

Methodology development for design and dimensioning of  
continuous fiber reinforced thermoplastic components for the  
automotive industry

Von der Fakultät Energie-, Verfahrens- und Biotechnik der Universität Stuttgart zur  
Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von

**M.Sc. Fabian Fürst**

aus Darmstadt

Hauptberichter: **Prof. Dr.-Ing. Götz T. Gresser**

Mitberichter: **Prof. Dr.-Ing. Christian Bonten**

Tag der mündlichen Prüfung

**20.12.2017**

Institut für Textil- und Fasertechnologien der Universität Stuttgart

**2017**

## **Erklärung über die eigenständige Erstellung dieser Arbeit**

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe.

Die Stellen der Arbeit, die anderen Quellen im Wortlaut oder dem Sinn nach entnommen wurden, sind durch Angaben der Herkunft kenntlich gemacht. Dies gilt auch für Zeichnungen, Skizzen, bildliche Darstellungen sowie für Quellen aus dem Internet.

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>Erklärung über die eigenständige Erstellung dieser Arbeit .....</b>	<b>I</b>
<b>Inhaltsverzeichnis.....</b>	<b>II</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>V</b>
<b>Formelzeichenverzeichnis .....</b>	<b>VI</b>
<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>VIII</b>
<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>XII</b>
<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>XII</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>XVI</b>
<b>1 Einleitung und Motivation.....</b>	<b>1</b>
<b>2 Stand der Wissenschaft und Technik .....</b>	<b>3</b>
2.1 Leichtbaustrategien .....	3
2.2 Faserverstärkte Kunststoffe als Leichtbaumaterial .....	4
2.2.1 Faserverstärkung .....	6
2.2.2 Matrixsysteme und -verarbeitung.....	10
2.2.3 Organoblechherstellung .....	12
2.2.4 Organoblechverarbeitung .....	13
2.3 Simulation von faserverstärkten Kunststoffen .....	18
2.3.1 Modellierungsebenen .....	18
2.3.2 Materialcharakterisierung für die Simulation .....	25
2.3.3 Verwendete Kontaktbedingungen .....	26
2.3.4 Fasermapping .....	26
2.4 Produktentwicklungsprozess .....	28
2.4.1 Produktentwicklungsmethoden .....	31
2.4.2 Entwicklungsprozess von Spritzgusskomponenten .....	39
2.4.3 Entwicklungsprozess von Organoblechkomponenten .....	41
<b>3 Zielsetzung und Arbeitshypothese.....</b>	<b>45</b>
<b>4 Methodenentwicklung.....</b>	<b>48</b>

---

4.1	Übertragbarkeit von bestehenden Entwicklungsschritten auf die Entwicklung von Organoblechkomponenten .....	50
4.2	Analoge Anwendung der Entwicklungsmethode .....	51
4.3	Adaptierung der Entwicklungsschritte .....	54
4.3.1	Pflichtenheft und Produktgestaltung .....	56
4.3.2	Machbarkeitsstudie.....	57
4.3.3	Werkstoffauswahl.....	57
4.3.4	Prozesssimulation.....	62
4.3.5	Mechanische Auslegung und Dimensionierung.....	64
<b>5</b>	<b>Validierung der Entwicklungsmethode an vier ausgewählten Beispielen .....</b>	<b>66</b>
5.1	Versuchsaufbau .....	66
5.1.1	Erstellung des Pflichtenhefts .....	67
5.1.2	Entwicklung der Geometrie .....	71
5.1.3	Modellbildung für die Machbarkeitsstudie .....	74
5.1.4	Werkstoffauswahl und Materialuntersuchung zur Materialcharakterisierung .....	78
5.1.5	Modellbildung für die Prozesssimulation .....	85
5.1.6	Modellbildung für die mechanische Auslegung und Dimensionierung.....	94
5.1.7	Herstellung der Demonstratoren .....	96
5.1.8	Aufbau der Biegeprüfung am Demonstrator der Variante A .....	98
5.1.9	Aufbau des Domversuchs am Demonstrator der Variante B .....	99
5.2	Versuchsdurchführung .....	101
5.2.1	Umsetzung des Demonstrators in CAD .....	101
5.2.2	Berechnung in der Machbarkeitsstudie .....	101
5.2.3	Materialprüfung in der Werkstoffauswahl .....	102
5.2.4	Berechnung in der Prozesssimulation .....	106
5.2.5	Berechnung in der mechanischen Auslegung und Dimensionierung.....	110
5.2.6	Durchführung der Biegeprüfung am Demonstrator der Variante A .....	111
5.2.7	Durchführung des Domversuchs am Demonstrator der Variante B .....	111
5.3	Ergebnisse .....	112
5.3.1	Betrachtung zur Konstruktion des Demonstrators .....	112
5.3.2	Auswertung der Machbarkeitsstudie.....	118
5.3.3	Auswertung der Materialtests in der Werkstoffauswahl .....	118

---

5.3.4	Auswertung der Prozesssimulation .....	133
5.3.5	Gegenüberstellung von Lastsimulationen und Komponententests .....	141
<b>6</b>	<b>Fazit und Ausblick .....</b>	<b>150</b>
	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>154</b>

---

## Abkürzungsverzeichnis

<b>Symbol</b>	<b>Bezeichnung</b>
ANOVA	Varianzanalyse (engl. Analysis of Variance)
AVK	AVK – Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e. V. und AVK-TV GmbH
BMC	Bulk Molding Compound
CAD	Computer Aided Engineering
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
CPU	Central Processing Unit
CT	Computertomographie
DIN	Deutsches Institut für Normung
DMS	Dehnmessstreifen
DoE	Design of Experiments
DSC	Dynamische Differenzkalorimetrie
ESP	elektronisches Stabilitätsprogramm
FEM	Finite-Elemente-Methode
FKV	Faser-Kunststoff-Verbund (auch: faserverstärkter Kunststoff oder Faserverbundkunststoff, FKV; engl. fibre-reinforced plastic, FRP)
FVW	Faser-Verbund-Werkstoffe
GMT	Glasfasermatten-Thermoplast
IR	infrarot
ISO	International Standard Organisation
Kfz	Kraftfahrzeug
LFT	Langfaser-verstärkter Thermoplast
MSV	Mehrschicht-Verbund
OFAT	Ein Faktor nach dem anderen (engl. one factor at a time)
SMC	Sheet Molding Compound
UD	unidirektional
VDI	Verein deutscher Ingenieure

---

## Formelzeichenverzeichnis

Zeichen	Einheit	Bezeichnung
$d_f$	[Ns/mm]	Dämpfungskonstante der Fasern
$E$	[MPa]	Elastizitätsmodul
$E_{11}$	[MPa]	E-Modul der Kettfasern
$E_{22}$	[MPa]	E-Modul der Schussfasern
$F$	[N]	Kraft
$G$	[MPa]	Schubmodul bei Scherwinkeln größer dem kritischen Scherwinkel
$G_m$	[MPa]	Schubmodul der Matrix
$G_T$	[MPa]	Tangentialer Schubmodul bei kritischem Scherwinkel
$G_T$	[MPa]	tagentialer Schubmodul bei Scherwinkeln größer dem kritischen Scher-
$l$	[mm]	Länge
$l_0$	[mm]	Ausgangslänge
$n_f$	[-]	Anzahl zu variierender Faktoren
$n_r$	[-]	Anzahl durchzuführender Versuche
$s$	[mm]	Rovingabstand, Auslenkung
$SD_{res}$	[-]	Standardabweichung der Residuen
$t$	[mm]	Dicke
$t_0$	[mm]	initiale Dicke
$w$	[mm]	Rovingbreite
$Y$	[-]	vorhergesagtes Ergebnis
$\hat{Y}$	[-]	tatsächliches Ergebnis
$ZRE$	[-]	standardisiertes Residuum
$\alpha, \phi$	[°]	Scherwinkel
$\alpha_0$	[°]	initialer Scherwinkel
$\alpha_{st}$	[°]	Steigungswinkel
$\alpha_T, \phi_{krit}$	[°]	kritischer Scherwinkel/ Blockierwinkel
$\varepsilon$	[-]	Dehnung
$\theta$	[°]	halber Deformationswinkel

$\theta_{\min}$	[°]	minimaler, halber Deformationswinkel
$\mu_f$	[-]	Reibungskoeffizient zwischen Fasern
$\rho_f$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Dichte der Fasern
$\rho_L$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Luftdichte
$\rho_m$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Dichte der Matrix
$\sigma$	[MPa]	Spannung
$\tau$	[MPa]	Schubspannung
$\tau_0$	[MPa]	initiale Schubspannung
$\Phi$	[°]	Winkel zwischen Elementkoordinatensystem und Kettfaden



---

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1:	Unterteilung der Leichtbaustrategien .....	4
Abbildung 2.2:	Übersicht zur Zusammensetzung von FKV .....	5
Abbildung 2.3:	a) Unidirektionale-Schicht b) Mehrschichtverbund (Gelege) .....	8
Abbildung 2.4:	Faltenwurf an sphärischer Kontur eines Glasfasergewebes mit Leinwandbindung .....	9
Abbildung 2.5:	Schematische Darstellung der Organoblechproduktion .....	13
Abbildung 2.6:	Schematische Darstellung der Organoblechverarbeitung.....	14
Abbildung 2.7:	Scherung einer Einheitszelle eines Gewebes mit a) unverformtem Zustand; b) Verformung unter Schub; c) Verformung unter Schub bis zum Blockierwinkel..	15
Abbildung 2.8:	Schematische Darstellung zur Definition des Scherwinkels .....	16
Abbildung 2.9:	Versuchsmethoden zur Schubbelastung von Geweben .....	16
Abbildung 2.10:	Verfügbare Modellierungsebenen bei der Simulation von FKV .....	19
Abbildung 2.10:	Faserorientierung im Schalenelement.....	21
Abbildung 2.12:	Prinzipdarstellung der Sandwich-Modellierung .....	22
Abbildung 2.13:	Prinzipdarstellung der Multilayer-/Independent Layer-Modellierung .....	22
Abbildung 2.14:	Idealisierter Verlauf der Scherkraft bzw. der Scherspannung über dem Scherwinkel .....	24
Abbildung 2.15:	Kontaktbedingung zwischen zwei Flächen .....	26
Abbildung 2.16:	Schematische Darstellung des Fasermappings .....	27
Abbildung 2.17:	Zerlegung eines Gewebes in zwei UD-Schichten .....	28
Abbildung 2.18:	Produktkreislauf mit Produktentstehungs- und -lebensphasen einschließlich erforderlicher Informationswege nach VDI 2243 und Lebensphasen eines Systems nach VDI 2221 .....	33
Abbildung 2.19:	Allgemeiner Entwicklungsprozess nach VDI 2221 .....	34
Abbildung 2.20:	Vorgehensempfehlung des VDI für den allgemeinen Gestaltungsprozess.....	36

---

Abbildung 2.21: Schematische Entwicklungskette für Spritzgusskomponenten .....	40
Abbildung 2.22: Ablaufdiagramm für die Entwicklung einer FKV-Komponente mit duromerer Matrix .....	43
Abbildung 3.1: Schematische Darstellung der Kombination bestehender Vorgehensstrategien zu einem optimierten Organoblechentwicklungsprozess .....	46
Abbildung 4.1: Angestrebte Entwicklungskette zur Optimierung des Produktentstehungsprozesses .....	53
Abbildung 4.2: Darstellung des zu beschreitenden Lösungswegs.....	55
Abbildung 4.3: Scherung durch Scherrahmen .....	59
Abbildung 4.4: Illustration der verwendeten Prüfkörpergeometrie .....	60
Abbildung 4.5: Schematische Darstellung der Multimodelloptimierung .....	62
Abbildung 5.1: Auswirkung der Materialdicke auf erforderliche Werkzeugradien .....	68
Abbildung 5.2: Spannungsverlauf im 3-Punkt-Biegeversuch .....	70
Abbildung 5.3: Geometrischer Aufbau des 3-Punkt-Biegeversuchs in NX9 .....	74
Abbildung 5.4: Reduktion verzerrter Elemente am Beispiel des Doms vorher (links) und nachher (rechts) .....	75
Abbildung 5.5: Manuelle Faserorientierung in der Sandwich-Modellierung.....	77
Abbildung 5.6: Prinzip der Einspannung nach ISO 4046.....	79
Abbildung 5.7: Zugprüfung eines einzelnen Rovings angelehnt an DIN EN ISO 6892-1:2009-12.....	80
Abbildung 5.8: Versuchsaufbau mit Abschirmung der freien Konvektion .....	82
Abbildung 5.9: Modellaufbau der Biegeprüfung nach DIN EN ISO 14125:2013-09.....	85
Abbildung 5.10: Modell für die Prozesssimulation .....	86
Abbildung 5.11: Diskretisierung des Werkzeugs im Detailausschnitt .....	87
Abbildung 5.12: Materialmodellierung mit der Multilayer-Methode.....	87
Abbildung 5.13: Prinzipielle Darstellung der Bildaufnahme in der Röntgentomographie .....	93
Abbildung 5.14: Elementverformung und Faserorientierungen nach der Drapiersimulation .....	95

---

---

Abbildung 5.15: Herstellungsprozess des Organoblech-Demonstrators, Variante A.....	97
Abbildung 5.16: Versuchsaufbau des 3-Punkt-Biegeversuchs .....	99
Abbildung 5.17: Versuchsaufbau des Domversuchs .....	100
Abbildung 5.18: Zugversuch am trockenen Gewebe mit Laminierung im Einspannbereich.....	103
Abbildung 5.19: Prüfpunkte am Demonstrator zum Vergleich des Scherwinkels mit der Simulation.....	108
Abbildung 5.20: CT-Aufnahme am Demonstrator der Variante B am Messpunkt D17oCT2 .....	109
Abbildung 5.21: CT-Aufnahme an stark ondulierter Faserlage.....	110
Abbildung 5.22: Perspektivische Darstellung des Demonstrators in Variante A und B .....	112
Abbildung 5.23: Bemaßte Skizze des Demonstrators in Variante A.....	113
Abbildung 5.24: Bemaßte Skizze des Demonstrators in Variante B .....	114
Abbildung 5.25: Draufsicht des Demonstrators in Varianten A und B .....	115
Abbildung 5.26: Vorderansicht (oben) und Rückansicht (unten) des Demonstrators Variante A.....	116
Abbildung 5.27: Rückansicht des Demonstrators Variante B ohne (oben) und mit (unten) Einlegern.....	117
Abbildung 5.28: Kraft-Weg-Diagramm im Zugversuch der Kettrichtung von trockenem Glasfasergewebe .....	120
Abbildung 5.29: Klemmbereich des Prüfkörpers nach Scherversuch .....	121
Abbildung 5.30: Temperaturbereiche am Prüfkörper im Scherversuch .....	122
Abbildung 5.31: Verspannung des Scherrahmens .....	123
Abbildung 5.32: Schematische Darstellung der Wärmeübertragung .....	124
Abbildung 5.33: Kraft-Scherwinkelverläufe bei 290 °C Verarbeitungstemperatur .....	125
Abbildung 5.34: Kritischer Scherwinkel in Abhängigkeit von der Temperatur.....	126
Abbildung 5.35: Schubmoduln $G_0$ und $G_T$ in Abhängigkeit von der Temperatur.....	127
Abbildung 5.36: Kraft-Weg-Verläufe für 0° und 90° ermittelt nach DIN EN ISO 527-4 und ±45°, ermittelt nach DIN EN ISO 14129.....	128

---

---

Abbildung 5.37: Kraft-Weg-Verläufe für $0^\circ$ , $90^\circ$ und $\pm 45^\circ$ , ermittelt nach DIN EN ISO 14125 .....	129
Abbildung 5.38: Gegenüberstellung der Versuche am Rohmaterial mit der Simulation .....	132
Abbildung 5.39: Pareto-Diagramm der standardisierten Effekte mit einem Signifikanzlevel von 1,77 .....	133
Abbildung 5.40: Gegenüberstellung der maximalen Scherwinkel aus Metamodell mit denen aus der Simulation .....	135
Abbildung 5.41: Gegenüberstellung standardisierter Residuen mit einzelnen Datenpunkten .....	136
Abbildung 5.42: Prozentualer Einfluss einzelner Eingabeparameter auf den maximalen Scherwinkel .....	137
Abbildung 5.43: Darstellung der Abweichungen des simulierten Scherwinkels vom realen Scherwinkel .....	138
Abbildung 5.44: Vergleich der Kraft-Weg-Verläufe am Demonstrator der Variante A mit $0/90^\circ$ Faserorientierung .....	142
Abbildung 5.45: Vergleich der Kraft-Weg-Verläufe am Demonstrator der Variante A mit $\pm 45^\circ$ Faserorientierung .....	143
Abbildung 5.46: Vergleich der Kraft-Weg-Verläufe am Demonstrator der Variante B mit $0/90^\circ$ Faserorientierung .....	144
Abbildung 5.47: Bruchbild des Demonstrators der Variante B mit $0/90^\circ$ Faserorientierung.....	146
Abbildung 5.48: Vergleich der Kraft-Weg-Verläufe am Demonstrator der Variante B mit $\pm 45^\circ$ Faserorientierung .....	147
Abbildung 5.49: Bruchbild des Demonstrators der Variante B mit $\pm 45^\circ$ Faserorientierung.....	148

---

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Vergleich von Fasermaterialien .....	10
Tabelle 5.1: Auflistung verwendeter Klebstoffe.....	83
Tabelle 5.2: Auflistung untersuchter Einflussparameter auf die Prozesssimulation im Screening ..	91
Tabelle 5.3: Auflistung untersuchter Einflussparameter auf die Prozesssimulation in der DoE nach Hammersley .....	92
Tabelle 5.4: Auflistung produzierter Demonstratorteile .....	98
Tabelle 5.5: Hardwarespezifikation für die Simulation .....	101
Tabelle 5.6: Berechnungsinformationen bei der Vorauslegung .....	101
Tabelle 5.7: Berechnungsinformationen bei der Multimodelloptimierung .....	106
Tabelle 5.8: Berechnungsinformationen bei der Prozesssimulation.....	107
Tabelle 5.9: Berechnungsinformationen bei der mechanischen Auslegung und Dimensionierung.....	111

## Zusammenfassung

Diese Arbeit befasst sich mit einer Methode zur Auslegung und Dimensionierung von Faserverstärkten-Kunststoff-Verbund (FKV) Bauteilen, welche aus endlosfaserverstärkten Thermoplasten bestehen. Der besondere Fokus liegt dabei auf der Anwendung in der Automobilindustrie. Angetrieben von Gesetzgeber und Kunden in Kombination mit zunehmendem Kostendruck durch die Marktsituationen müssen in der Fahrzeugentwicklung immer neue Anforderungen erfüllt werden. Dabei sind endlosfaserverstärkte Thermoplaste eine Möglichkeit diesen Anforderungen gerecht zu werden und gewinnen daher als kostengünstiges Leichtbaumaterial zunehmend an Bedeutung.

Es wird eine Methode entwickelt und vorgestellt, anhand derer das Verhalten von Komponenten in Simulationsmodellen vorhergesagt werden kann. Die hier erarbeitete Vorgehensstrategie setzt sich dabei in erster Linie aus einzelnen Entwicklungsschritten zusammen, wie sie heute bei der Entwicklung von herkömmlichen FKV-Komponenten mit duromeren Matrixsystemen und Spritzgusskomponenten mit thermoplastischem Kunststoff verwendet werden. Durch die Kombination dieser beiden Entwicklungsmethoden kann auf bereits bestehendem Kenntnisstand aufgebaut werden, und gleichzeitig grenzt sich dadurch die neu entwickelte Vorgehensstrategie von den beiden bestehenden Methoden ab. Nach entscheidenden Entwicklungsschritten besteht die Möglichkeit der Prüfung, ob vorgegebene Ziele erreicht und nicht übererfüllt werden; daraus ergibt sich die Option, die Komponente in einem iterativen Prozess zu optimieren. Dies ermöglicht einen Entwicklungsprozess, welcher mit einem möglichst geringen Zeit- und Kostenaufwand auskommt und den stetig kürzer werdenden Entwicklungszyklen gerecht wird. Im Zuge der vorliegenden Arbeit werden für die einzelnen Entwicklungsschritte die jeweiligen aktuellen Untersuchungen und Veröffentlichungen in den Kontext gestellt und ggf. mit einbezogen.

Bei der neu entwickelten Methode steht hier die technische Entwicklung im Vordergrund. Auf spezielle Herangehensweisen bspw. zur Konzeptfindung oder zur lastpfadgerechten Konstruktion wird nicht eingegangen. Stattdessen fokussiert sich die Arbeit auf die Erarbeitung von Simulationsmodellen und Prüfmethode, um so die Vorhersagbarkeit von Bauteilverhalten zu optimieren und so den Entwicklungsprozess zu beschleunigen und Kosten für Prototypen zu reduzieren. Dabei wird zwischen drei verschiedenen Typen von Entwicklungsschritten unterschieden.

Zum einen werden einige Entwicklungsschritte speziell für Organobleche angepasst. So wird bspw. nach dem aktuellen Stand der Technik ein Scherrahmenversuch an trockenem Gewebe durchgeführt, um darauf basierend eine Drapiersimulation aufzusetzen. Dieser Versuch stammt aus der Auslegung

von duromeren FKV und ist nicht ohne weiteres auf Organobleche übertragbar, da bei der Verarbeitung von Organoblech andere Prozessbedingungen herrschen und somit eine Vereinfachung auf trockenes Gewebe nicht zulässig ist. Daher wird der Scherrahmenversuch in einem iterativen Prozess an reale Prozessbedingungen angepasst, bei dem die Kunststoffmatrix in schmelzflüssigem Zustand vorliegt.

Weiterhin werden einige Entwicklungsschritte in den Validierungsprozess der Methode eingebunden, enthalten jedoch keine spezifische Anpassung für Organobleche. Außerdem werden die Entwicklungsschritte „Projektplan“ und „Kostenkalkulation“ vernachlässigt, da diese für die Prädiktion eines Bauteilverhaltens nicht von Relevanz sind. Der Entwicklungsschritt zur Werkzeugauslegung wird ebenfalls nicht näher betrachtet, da dieser zum einen meist nicht vom Automobilhersteller selbst durchgeführt wird und zum anderen in seiner Komplexität über den Rahmen dieser Arbeit hinausginge.

Die vorgestellte Entwicklungsmethode wird an einem Bauteil exemplarisch erarbeitet und validiert. Begonnen wird mit der Erstellung eines Pflichtenhefts, bei dem Anforderungen an das zu entwickelnde Bauteil formuliert und zusammengefasst werden. Das Bauteil fungiert als Muster, welches möglichst viele für die Herstellung kritische Bereiche enthält und es ermöglicht, weitere in der vorliegenden Arbeit nicht näher ausgeführte Untersuchungen anzuschließen. Damit können mit einem einzigen Bauteil eine ganze Reihe von Problemstellungen bearbeitet werden, wobei hier die Vorhersagbarkeit des Herstellungsprozesses und des Bauteilverhaltens thematisiert werden.

Anschließend wird das Bauteil gestaltet, welches gestellte Anforderungen erfüllt. In der darauf folgenden Machbarkeitsstudie wird ein Vorgehen vorgestellt, anhand dessen ohne komplexe Fertigungssimulation eine Abschätzung getroffen werden kann, ob ein Bauteil die gestellten mechanischen Anforderungen erfüllen kann. Dabei werden zunächst die Einflüsse durch die Herstellung vernachlässigt; die Herstellbarkeit an sich kann noch nicht überprüft werden. Dafür wird ein speziell für diesen Zweck entwickeltes Berechnungsmodell erstellt.

Im Rahmen der Werkstoffauswahl wird eine Reihe von Materialprüfungen erarbeitet, durchgeführt und vorgestellt, welche mindestens vorliegen müssen, um ein Materialverhalten im Verarbeitungsprozess und im Bauteil abzubilden. Im Zuge dessen wird auch der neu entwickelte Scherrahmenversuch erläutert, welcher die Prozessbedingungen berücksichtigt. In einer Multimodelloptimierung wird erstmals ein Verfahren vorgestellt, mit welchem eine Materialkarte für eine Belastungssimulation von Organoblechkomponenten automatisiert erstellt wird. Dazu werden reale Materialtests

durchgeführt und in Simulationsmodellen nachgestellt. In einer statistischen Auswertung der Simulationsergebnisse wird eine Materialkarte charakterisiert.

Im Anschluss an die Werkstoffauswahl wird der Fertigungsprozess in einer Simulation mit Shellelementen für jede einzelne der vier Gewebelagen abgebildet. Die Entwicklung und Erstellung des Modells zur Beschreibung dieses Prozesses wird erläutert, wobei in einer Sensitivitätsanalyse untersucht wird, welche Parameter einen entscheidenden Einfluss auf die berechnete Faserorientierung haben. Darauf basierend wird eine Abschätzung getroffen, welche Informationen mit welcher Präzision im Aufbau eines solchen Simulationsmodells für weitere Komponenten vorliegen müssen, um ein realitätsnahes Ergebnis zu erzeugen. Das Ergebnis der Prozesssimulation in Form von Faserorientierungen wird mittels Computertomographie an den realen Bauteilen validiert. Die realen Bauteile werden erst nach erfolgreichem Abschluss der Entwicklungskette produziert und dienen bei diesem Entwicklungsschritt zur nachträglichen Validierung.

Mittels anschließender Belastungssimulationen werden vier zuvor definierte Lastfälle vorhergesagt. Das dafür benötigte Berechnungsmodell wird im Rahmen einer mechanischen Auslegung und Dimensionierung entwickelt, aufgebaut und erläutert. In der Entwicklung einer realen Komponente kann bei diesem Schritt eine Anpassung des Bauteils erfolgen. Durch das Abarbeiten der Entwicklungskette in mehreren Iterationen kann eine Komponente bis zur Erfüllung der Anforderungen optimiert werden.

Im Anschluss an die Lastsimulationen werden zur Validierung des gesamten Vorgehens die entwickelten Bauteile produziert. Die vier zuvor berechneten Lastfälle werden in realen Versuchen an den hergestellten Teilen überprüft. Die resultierenden realen Kraft-Weg-Kurven und die qualitativen Verformungen der Bauteile werden mit den äquivalenten Ergebnissen aus den zugehörigen Simulationen verglichen. Dadurch wird überprüft, ob mit der vorgestellten Entwicklungsmethode – mit an den jeweiligen Stellen getroffenen Einschränkungen – ein Bauteilverhalten simulativ vorhergesagt werden kann und somit eine Komponentenentwicklung möglich ist.



## Abstract

This thesis is about the design and dimensioning of components made of continuous fiber reinforced thermoplastics, with special focus on the automotive industry. These materials have attracted attention for vehicle development as – driven by legislation, customers' demands and an increasing cost pressure as a consequence from market conditions by the manufacturers – more and more new requirements are appearing thus making cost-effective light-weight materials gain priority.

In this paper a method is developed on the basis of which the behavior of components can be predicted in numerical simulations. The developed procedure is primarily composed of individual development steps that are used today in the development of conventional FKV components with thermoset matrix systems and injection-molded components of thermoplastics. Thus the combination of these two development methods can build on existing knowledge, and at the same time, the newly developed approach is separated from the two existing methods. After decisive stages of the development, it is possible to evaluate whether given targets are reached or exceeded, resulting in the option to optimize the component in an iterative process. That allows a development process which requires only a minimum of time and expenses and therefore is adapted to steadily reducing development cycles. In the course of this work current studies and publications are put in the context of the individual steps of development and are integrated if applicable.

The newly developed methodology focuses on technical development. Special approaches such as conceptual design or load-path-oriented design are not dealt with. Instead, the strategy is focused on the development of simulation models and test methods, in order to optimize the predictability of component behavior, thus speeding up the development process and reducing the costs for prototypes. A distinction is made between three different types of development steps.

On the one hand, some developing steps are adapted for organic sheets. For example, according to the current state of the art, a shear frame test is carried out on dry fabric in order to apply draping simulation based thereon. This attempt comes from the interpretation of thermoset FRP and is not transferable to organic sheets, as process conditions in the processing of organic sheet are different and thus a simplification to dry fabric is applicable. Therefore, the shear frame experiment is adapted in an iterative process to real process conditions, in which the plastic matrix is in the molten state.

Furthermore, some development steps are involved in the validation process of the method, but do not contain any specific adaptation for organic sheets. In addition, the development steps "project plan" and "cost calculation" are neglected as these are not relevant for the prediction of a component

behavior. The development step in mold design is also not considered in detail, as it is usually not performed by the automakers themselves and would – due to its complexity – exceed the scope of this work.

The proposed development method will be carried out and validated based on an exemplary component. It begins with the definition of a requirements specification in which the demands for the developed component are provided and summarized. The device functions as a chicane containing as many critical areas for the production as possible for further investigations, which are not detailed in the present work. This means that with only one component a whole set of problems can be dealt with; the issue of the thesis, however, is the predictability of the manufacturing process and of the component behavior.

Subsequently, the component is designed which is based on imposed requirements and fulfills them. In the following feasibility study, an approach is presented which provides the possibility to assess if a component can meet the mechanical requirements. At first the influences of the manufacturing process are neglected and the manufacturability itself cannot be checked yet.

During the material selection a number of material tests are developed, conducted and presented which must at least be available to represent a material in a simulation while being processed and enables prediction of component behavior under load. The newly developed shear frame test, which takes the process conditions into account, will also be explained. For the first time a multi-model optimization method is applied to create a material card for load simulations of organic sheets automatically. These real material tests are carried out and reproduced in simulation models. In a statistical analysis of simulation results the material card is characterized.

After the selection of materials the production process is depicted in a simulation with shell elements for each of the four layers of fabric. The creation of the according model is explained and examined in a sensitivity analysis. Here parameters with a significant influence on the result of computation are identified. Based on this an assessment can be made about the required information and the precision in the process of building the model which are needed to produce realistic results. The result of the process simulation in the form of fiber orientations is validated by computer tomography of the real components. Although the real parts will be produced after a successful completion of the development chain, here they are used for validation at this stage of development.

Hereafter four load simulations of previously defined load cases are predicted. The simulation model required for this is set up and explained as part of a mechanical design and dimensioning. During the

development of a real component, an adaptation of the component can be performed at this step. By going through the development chain in several iterations the component can be optimized until it finally meets the requirements.

Following the load simulations the developed components are produced to validate the entire procedure. The four previously calculated load cases are being examined in real experiments on the manufactured parts. The resulting real force-displacement curves and the qualitative deformation of the components are compared with the equivalent results of the corresponding simulations. This will evaluate if the presented method of development is – with restrictions at the appropriate positions – capable to predict a component behavior in a simulation and thus will allow component development.

# 1 Einleitung und Motivation

Vom Markt getriebene Anforderungen ergeben – mit den global unterschiedlichen gesetzlichen Rahmenbedingungen und den wirtschaftlichen Interessen der Automobilbauer selbst – ein vielseitiges Spannungsfeld, in welchem die Hersteller und Zulieferer agieren [119]. Steigende Ansprüche an den Komfort und die Ergonomie, welchen ein modernes Fahrzeug genügen muss, schlagen sich u.a. in einer erhöhten Fahrzeugmasse nieder.

Neben dem Wunsch der Kunden nach mehr Komfort und Sicherheit im Kraftfahrzeug (Kfz) wird vom heutigen Fahrzeug zudem immer mehr Motorleistung erwartet. Mehr Leistung, eine höhere Drehzahl und ein größeres Drehmoment sollen noch stärkere Beschleunigungen und höhere Geschwindigkeiten ermöglichen, [40]. Dies soll mit möglichst wirtschaftlichen und effizienten Motoren bei geringem Treibstoffverbrauch umgesetzt werden, die gleichzeitig möglichst wenige Schadstoffe wie CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> und Feinstaub ausstoßen [2, 3, 40, 41]. Um diesen Kundenwunsch umzusetzen, werden größere Motoren und Getriebe benötigt, die von einer darauf angepassten Fahrzeugarchitektur aufgenommen werden müssen [51, 160]. Diese treiben zusätzliches Gewicht in das Fahrzeug, was jedoch in direktem Konflikt mit den Anforderungen steht [3].

Obwohl vieles dafür spricht, dass Fahrzeuge mit jeder Weiterentwicklung schwerer werden, stagniert das Gewicht auf hohem Niveau, da der Leichtbau, um den vielschichtigen Anforderungen gerecht zu werden, zunehmend an Bedeutung gewinnt [197]. Insbesondere durch die schrittweise reduzierte, maximal zulässige CO<sub>2</sub>-Emission pro gefahrenem Kilometer, welche die Fahrzeugflotte eines Herstellers in der EU nicht ohne Strafzahlung überschreiten darf, werden die Hersteller vom Gesetzgeber gezwungen, die Fahrzeuge in dieser Hinsicht zu optimieren.

Kunststoffe erhalten einen immer größeren Stellenwert in der automobilen Fertigung und die Anzahl an Komponenten aus diesen Materialien steigt stetig [56, 78]. Besonders im Spritzguss verarbeitete Materialien halten seit vielen Jahren einen großen Einzug in moderne Kfz. Dies liegt insbesondere an der großen Gestaltungsfreiheit, niedrigen Rohmaterialkosten, der Möglichkeit einer schnellen Verarbeitbarkeit und daraus resultierenden geringen Gesamtkosten [56]. Thermoplastische Kunststoffe haben gegenüber den Duromeren und Elastomeren dabei u.a. die zusätzlichen Vorteile, dass diese rezyklierbar und schweißbar sind [38, 39].

Allerdings haben Kunststoffe gegenüber metallischen Werkstoffen, welche im Allgemeinen im Fahrzeug eingesetzt werden, den entscheidenden Nachteil, dass diese in ihren mechanischen Eigenschaften meist unterlegen sind [78]. Um die mechanische Leistungsfähigkeit von Kunststoffen zu steigern, besteht die Möglichkeit der Einbringung von Verstärkungsfasern, welche große Anteile der mechanischen Lasten übertragen [122]. Im Spritzgussprozess werden der Extrusionsmasse dabei in der Regel kurze Fasern beigemischt, welche sich mehr oder weniger zufällig orientiert im Bauteil verteilen. Erst der Einsatz von Endlosfasern mit vorgegebener Orientierung ermöglicht eine lastpfadgerechte Konstruktion, wodurch die Werkstoffe möglichst effizient einsetzbar sind [187]. Endlosfaserverstärkte Thermoplaste bieten daher als verhältnismäßig kostengünstiges und großserienfähiges Leichtbaumaterial eine Möglichkeit, auch semistrukturale Komponenten in Kunststoff auszuführen, die heute noch überwiegend aus Stahl oder Aluminium gefertigt werden [56].

Allerdings hat sich in der Automobilindustrie noch kein Entwicklungsprozess für diese Komponenten etabliert. Es existieren einige Ansätze zur Durchführung einzelner Entwicklungsschritte; allerdings sind diese einzelnen Schritte in der Regel in keinen in sich geschlossenen Prozess eingebunden, stehen vielmehr für sich und sind isoliert betrachtet. Weiterhin sind auf Grund von teilweise stark detailorientierten Berechnungen einige dieser Schritte nicht in die industrielle Praxis eingebunden. Insbesondere fehlt eine Abschätzung, wie groß der Aufwand bei der Komponentenentwicklung für eine Serienproduktion sein muss, um belastbare Ergebnisse zu erzielen. Die flächendeckende Anwendung dieser Materialien ist wegen des Fehlens eines durchgängigen Entwicklungsprozesses erschwert. Ein solcher ist daher zu erarbeiten, wodurch gleichzeitig die Komplexität der gegenwärtigen Entwicklung reduziert werden soll.

## 2 Stand der Wissenschaft und Technik

In den nachfolgenden Kapiteln wird auf den aktuellen Stand der Wissenschaft und Technik eingegangen. Zunächst werden allgemeine Leichtbaustrategien vorgestellt, nach welchen heute das Gewicht von Komponenten und System reduziert wird. Anschließend werden die faserverstärkten Kunststoffe als Leichtbaumaterial vertieft, wobei ebenfalls ein Fokus auf die Simulation dieser Materialien gelegt ist. Darauf folgt ein Abschnitt zum allgemeinen Aufbau und zur Umsetzung von Produktentwicklungsprozessen und -methoden, welche für Spritzgusskomponenten konkretisiert werden. Außerdem werden Ansätze für den Entwicklungsprozess von Organoblechbauteilen vorgestellt.

### 2.1 Leichtbaustrategien

Es gibt verschiedene Ansätze für die allgemeine Umsetzung von Leichtbau. Diese lassen sich grundsätzlich wie in Abbildung 2.1 dargestellt unterscheiden, vgl. dazu auch Ellenrieder et al. [59] und Hopmann et al. [93]. In der Praxis hängen die verschiedenen Herangehensweisen jedoch meist voneinander ab oder werden gezielt kombiniert und lassen sich nicht eindeutig unterscheiden [59].

Unter Werkstoffleichtbau ist nach Henning et al. [87] die klassische Materialsubstitution zu verstehen. Klassische Stahlkomponenten werden aus Aluminium, Magnesium und zunehmend in Kunststoff ausgeführt [87]. Diese Materialien haben jeweils eine geringere Dichte und sind somit leichter in Relation zu einem Volumen, wie Niemann herausstellt [153].

Formleichtbau betrifft die Anpassungen von Komponenten in der Konstruktion auf die zu erfüllenden Lastfälle [59]. Hier ist das Ziel, das Material nur dort zu lokalisieren, wo es benötigt wird. Geometrien von Bauteilen können heute numerisch in einer Topologieoptimierung berechnet werden, um die Konstruktion möglichst an die vorherrschenden Belastungen anzupassen [59]. Auch die Wanddicke von schalenförmigen Bauteilen sollte nur dort besonders ausgeprägt sein, wo bspw. Spannungsspitzen auftreten können, was u.a. Klein aufzeigt [110].

Im Fertigungsprozess kann bei einigen Herstellungsverfahren direkt auf das spätere Bauteil- bzw. Materialverhalten Einfluss genommen werden [110]. Auch hier kann durch innovative Verfahren Leichtbau betrieben werden. Es können, wie von Tschätsch [202] erläutert, z.B. Stähle durch Umformung im Press- bzw. Formhärteverfahren gleichzeitig geformt und gehärtet werden. Dadurch wird

ein Bauteil in seiner spezifischen Anwendung im Vergleich zu einem im herkömmlichen Pressverfahren hergestellten Teil deutlich optimiert [202].



**Abbildung 2.1:** Unterteilung der Leichtbaustrategien vgl. [59, 93, 110, 119, 207]

Der Konzeptleichtbau ist die Zusammenfassung der Möglichkeiten, die sich aus der Integration verschiedener Teilsysteme in ein gesamtes System ergeben [59]. Indem eine einzige Komponente als Modul die Funktion von zuvor zwei oder mehr einzelnen Bauteilen übernimmt, kann häufig ebenfalls Masse eingespart werden [59].

## 2.2 Faserverstärkte Kunststoffe als Leichtbaumaterial

FKV gewinnen besonders im Bereich des Leichtbaus auf Grund der besonders hohen Festigkeiten und des großen Innovationspotenzials zunehmend an Bedeutung [122].

Unter einem Faserverbundwerkstoff ist in der Regel eine Kombination von mindestens zwei Materialien zu verstehen, bei dem ein Bestandteil als Matrix verwendet wird und der andere in Form von

hochfesten Fasern zur Verstärkung eben dieser Matrix dient [187]. Umgangssprachlich wird unter einem „Faserverbundwerkstoff“ meist ein verstärkter Kunststoff verstanden, jedoch werden auch faserverstärkte Metalle (metal matrix composites, MMC) und Keramiken (ceramic matrix composites, CMC) in einigen Industriezweigen eingesetzt, weshalb der präzisere Begriff „Faser-Kunststoff-Verbund“ verwendet werden sollte [187].

Die mechanischen Eigenschaften eines Verbundwerkstoffs wie Spannungs-Dehnungsverhalten und Festigkeit sind überwiegend durch die verwendeten Fasern festgelegt [105]. Die die Fasern umgebende Matrix bestimmt dagegen in erster Linie die chemischen Eigenschaften der Komponente gegenüber den das Bauteil umgebenden Stoffen [105]. Weiterhin fixiert die Matrix die Fasern in ihrer Form, stützt diese bei Kraftübertragung gegen Beulen und Knicken und überträgt Kräfte zwischen den Einzelfasern [187].

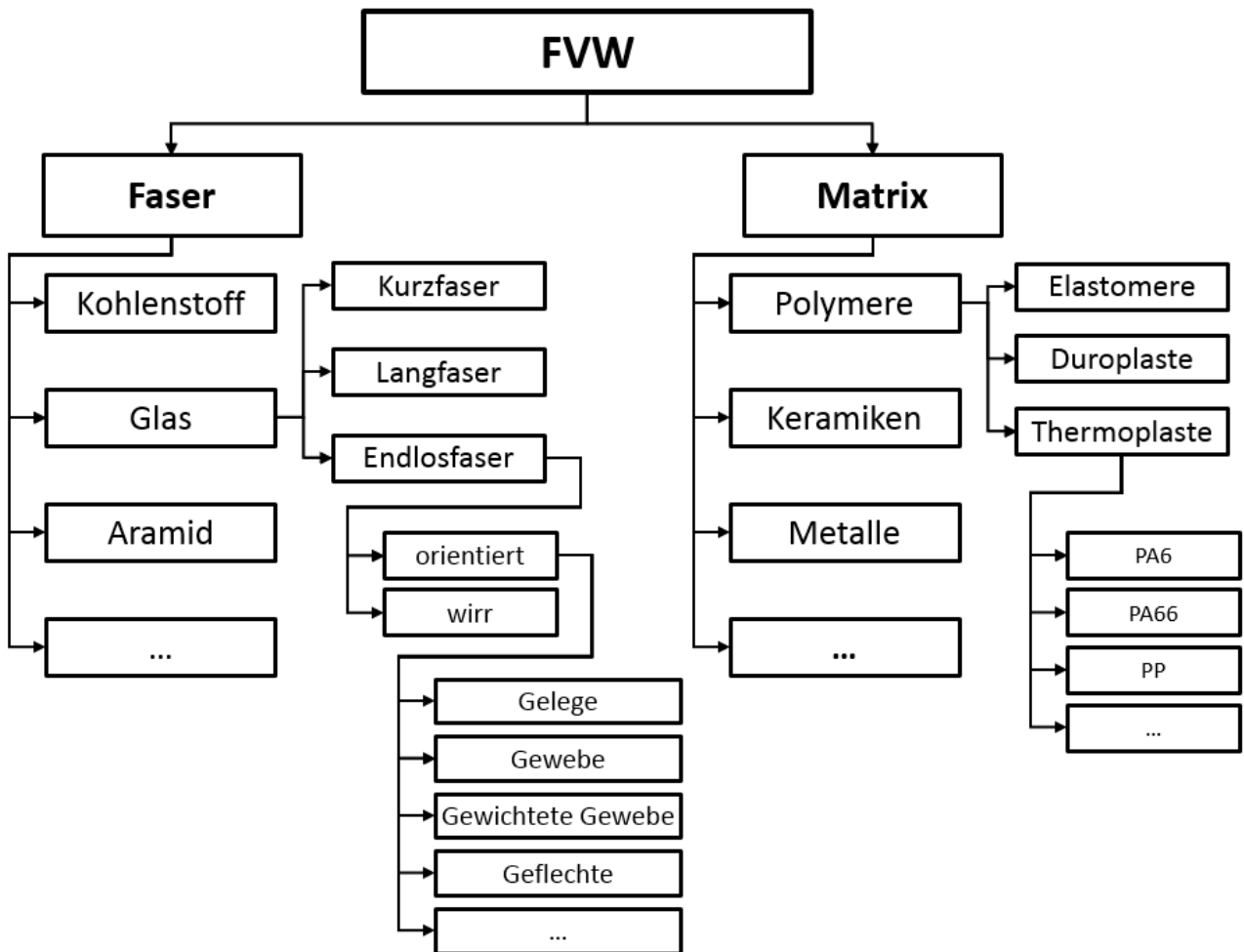


Abbildung 2.2: Übersicht zur Zusammensetzung von FKV [60, 78, 187]



Abbildung 2.2 liefert einen Überblick über Faser-Verbund-Werkstoffe (FVW) im Allgemeinen und deren Aufbau anhand eines Baumdiagramms. Eine solche Darstellung kann auf Grund der vielzähligen Verzweigungsmöglichkeiten, Varianten und Unterkategorien keinen Anspruch auf Vollständigkeit haben. Abhängig von der gewählten Feinheit lassen sich weitere Untergliederungspunkte einführen, um die Materialien noch präziser zu kategorisieren. Ein Zweig des Baumdiagramms wird für das hier untersuchte Material des Herstellers BASF, Ludwigshafen am Rhein, aufgezeichnet, welches ein sogenanntes Organoblech mit Polyamid (PA) Matrix und Verstärkung mit Glasfasergewebe darstellt. Es steht in der nachfolgenden Arbeit im Fokus. Eine Erläuterung zu den Vor- und Nachteilen verschiedener verwendbarer Faser- und Matrixwerkstoffe findet sich in „2.2.1 Faserverstärkung“ bzw. „2.2.2 Matrixsysteme und -verarbeitung“.

Sogenannte Organobleche haben eine thermoplastische Matrix und sind mit orientierten Endlosfasern verstärkt, dabei sind die Fasern in der Regel zu einem Gewebe verarbeitet, wobei einige Materialhersteller auch Gelege als Verstärkung anbieten [56]. In Kapitel „2.2.3 Organoblechherstellung“ und „2.2.4 Organoblechverarbeitung“ werden Organobleche und deren Eigenschaften konkretisiert.

### **2.2.1 Faserverstärkung**

Das Materialverhalten von FKV lässt sich nicht allein durch die Wahl des Faser-Matrix-Systems beeinflussen, wie u.a. Ku et al. [122] herausstellen. Im Gegensatz zu herkömmlichen Materialien besteht nach Wiedemann [207] durch den schichtweisen Aufbau einzelner Faserlagen bei endlosfaserverstärkten Materialien die Möglichkeit weitere Gestaltungsvariablen zu wählen. Dazu zählt Schürmann [187] die folgenden Aspekte:

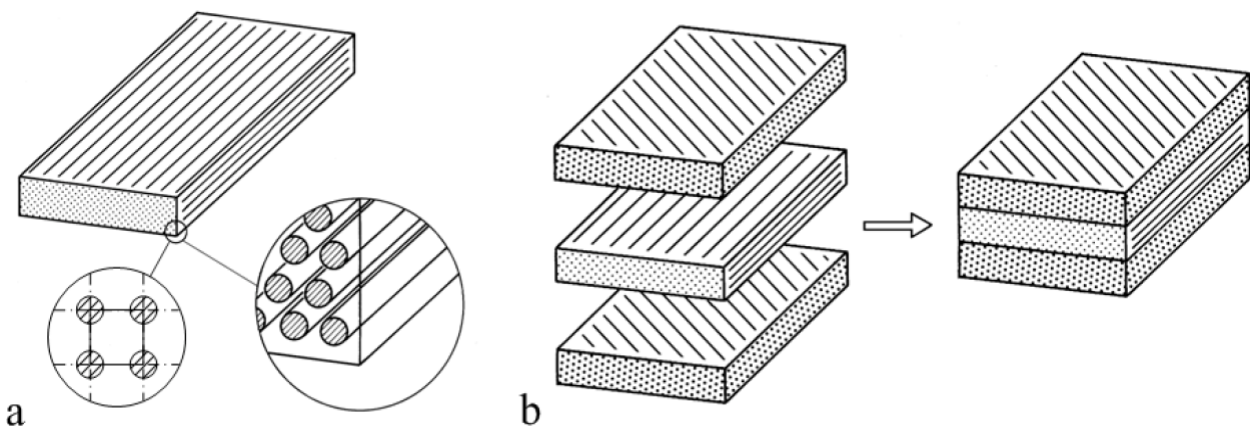
- Fasertyp,
- Faserfeinheit,
- Faserorientierung,
- Schichtdicke,
- Schichtaufbau,
- Schichtanzahl und
- Faser-Matrix-Anteil.

Johannaber et al. [99] und Breuer et al. [43] beschreiben, dass in Großserienanwendungen besonders Komponenten breite Anwendung finden, die im Kurz- und Langglasfaserspritzgussprozess hergestellt sind. Dabei werden einer Spritzgussmasse Fasern von einer Länge bis zu wenigen Millimetern bei Kurz- und bis zu einigen Zentimetern bei Langglasfasern beigemischt, welche klassisch über einen Schneckenförderer bzw. Kolben in ein Werkzeug gespritzt werden. Verstärkungsfasern werden nach ihrer Länge (Kurz-, Lang-, Endlosfasern) unterteilt [60]. Die Fasern haben eine Steigerung der Festigkeit und Steifigkeit zur Folge [60]. In erster Näherung werden die Fasern dabei als zufällig orientiert angenommen, weshalb die Materialeigenschaften bis zur ersten Berücksichtigung des Fließverhaltens in einer Rheologiesimulation als isotrop und linear gelten [99]. In der Realität orientieren sich die Fasern jedoch abhängig von der Strömungsrichtung; dies kann in einer numerischen Simulation vorhergesagt und ggf. genutzt, aber in jedem Fall berücksichtigt werden [35]. Das Verhalten bei Spritzguss ist in der Literatur bzgl. Modellierung [26, 79, 88, 89], Strömung [4, 18, 49, 203] und Rheologie [48, 158, 163] bereits umfassend beschrieben. Die Ausführungen basieren auf experimentellen Untersuchungen.

Grundsätzlich wird bei Komponenten mit einer Verstärkung aus Endlosfasern von einer ausschließlich durch die Bauteilkontur eingeschränkten Faserlänge ausgegangen [200]. Zu textilen Halbzeugen dieser Kategorie gehören Gewebe, Gelege, Geflechte und Vliese bzw. Matten [52, 187]. Beim sogenannten Fließpressen werden mit Wirrfasern gefüllte Formmassen und thermoplastische Matrix, also langfaserverstärkte Thermoplaste (LFT), thermisch geformt [42, 194]. Dieses Verfahren ermöglicht die Verarbeitung von Glasfasermatten-Thermoplast (GMT) mit endlosen Wirrfasern [187]. Vergleichbare Verfahren für duromere Halbzeuge sind der Bulk Molding Compound (BMC)-Prozess, der bei Formmassen mit Kurz- oder Langfasern industriell angewendet wird, sowie der Sheet Molding Compound (SMC)-Prozess, welcher bei der Verarbeitung von Lang- oder Endlosfasern Anwendung findet [122].

Mit zunehmender Faserlänge sind die spezifischen Materialeigenschaften höherwertig im Vergleich zu Kurz- oder Langfasern [122]. Allerdings gelten bei diesen Formverfahren einige Einschränkungen in der Designfreiheit gegenüber dem Spritzgussprozess [194]. Durch Streckung des Materials bei der Umformung muss äquivalent zum Spritzgießen eine Simulation zur Bestimmung der Faservorzugsrichtung durchgeführt werden. [21, 194]. Je nach Orientierungsgrad schlägt sich das in einer mehr oder weniger stark ausgeprägten Anisotropie nieder und sollte in einer Prozesssimulation quantifiziert werden [135].

Henning [85] und Rösler et al. [173] erläutern, dass FKV mit orientierten Endlosfaserverstärkungen besonders längs zur Faserorientierung im Vergleich zu Wirr-, Kurz- und Langfaserverstärkungen die größten Lasten ertragen. Insbesondere dünnwandige, flächige Strukturen werden in der Regel als Mehrschicht-Verbunde (MSV) ausgeführt. Dabei können mehrere Lagen von Geweben oder unidirektionalen (UD) Schichten bzw. Mischungen daraus bedarfsgerecht aufgebaut werden [86]. Ein Gelege, welches in einem beispielhaften Aufbau in Abbildung 2.3 illustriert ist, besteht aus mehreren UD-Lagen [187].



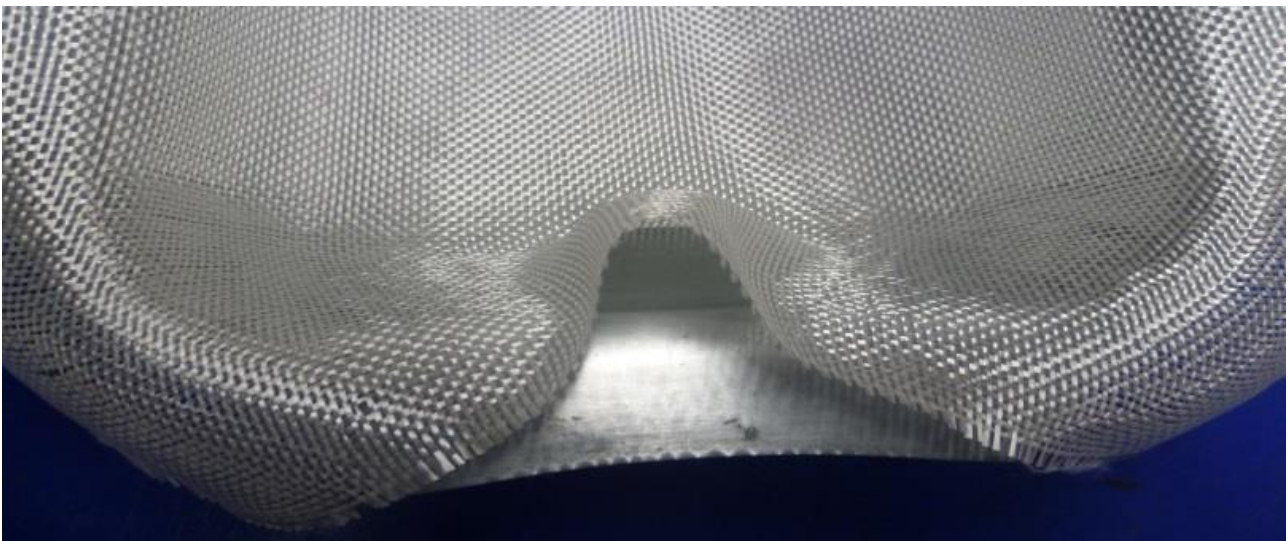
**Abbildung 2.3:** a) Unidirektionale-Schicht b) Mehrschichtverbund (Gelege) [187]

Der Einsatz von Geweben hat laut Haanappel et al. [74] und Henning et al. [86] den Vorteil, dass sich diese in der Handhabung und Umformung in einer dreidimensionalen Geometrie gutmütiger und reproduzierbarer verhalten als UD-Lagen bzw. Gelege. Bei einem Gewebe, welches nach DIN 60000 definiert ist, kommen immer zwei Faserorientierungen vor, die durch die Produktion meist in einem rechten Winkel zueinander stehen [86]. Herstellungsbedingt werden diese „Kett- und Schussfaden“ genannt [154]. Gewebe haben gegenüber UD-Gelegen weiterhin den Vorteil, dass sie, durch verschiedene Faserorientierungen, unterschiedlichen Lastrichtungen besser gerecht werden [154]. Durch den Einsatz der Fasern in einem Gewebe erfahren diese jedoch eine Ondulation und liegen nicht vollständig gestreckt vor, weshalb die maximal zu ertragende Last reduziert ist [187].

Treten keine verschiedenen Belastungsrichtungen auf, ist ein Gewebe jedoch im Nachteil, da die Fasern quer zur Belastungsrichtung fast keine Last übernehmen und somit unnötige Masse in die Komponente bringen [154]. Es ist außerdem möglich mit konfektionierten Geweben zu arbeiten [187]. Dies sind z.B. sogenannte kettstarke- oder Drehergewebe, bei denen ein hoher Prozentsatz aller Fasern in Ketttrichtung vorliegt. Alternativ können auch verschiedene Materialien mit jedem beliebigen

Kett- und/oder Schussfaden in ein sogenanntes Hybridgewebe eingebracht werden, wodurch das Material ideal auf den späteren Einsatz anpassbar ist [73, 114].

Generell lässt sich ein Zusammenhang zwischen der Anzahl der Kreuzungspunkte von Kett- und Schussfaden und dem Materialverhalten formulieren [154]. So gilt, dass bei einer Bindung mit wenigen Kreuzungspunkten die Ondulation der Fasern gering ist, wodurch Steifigkeit, Faservolumengehalt sowie Druck- und Ermüdungsfestigkeit zunehmen [187]. Dagegen verringert sich die Verschiebestabilität, was sich auf die Handhabung des Materials nachteilig auswirken kann, da sich die Faserorientierung weniger robust auf im Verarbeitungsprozess auftretende Kräfte einstellt [187]. Für die Verarbeitung kann dies jedoch auch als Vorteil zu verstehen sein, da diese Materialien weniger stark zur Faltenbildung neigen [74, 86]. Besonders die Leinwandbindung mit vielen Kreuzungspunkten hat eine schlechte Drapierbarkeit und neigt zu Faltenwurf, was das Aufbringen von flächigen Halbzeugen auf nicht abwickelbare, sphärische Konturen beschreibt und in Abbildung 2.4 gezeigt ist [52].



**Abbildung 2.4:** Faltenwurf an sphärischer Kontur eines Glasfasergewebes mit Leinwandbindung

Im industriellen Einsatz von Geweben als Verstärkung von Kunststoffen haben sich insbesondere Köperbindungen als Kompromiss zwischen Leinwand- und Atlasbindung durchsetzen können [154], was auch nachfolgend Gegenstand der Untersuchung ist. Besonders bei großen und hochbelasteten Komponenten, wie sie bspw. im Flugzeugbau eingesetzt werden, kommen häufig auch Gelege zum Einsatz [86]. Weitere Informationen zu Aufbau, Benennung und Bindungsarten von Geweben lassen sich einschlägiger Fachliteratur entnehmen und seien an dieser Stelle nicht näher ausgeführt [187].

Auf das Verhalten eines Gewebes während der Drapierung wird unter „2.2.4 Organoblechverarbeitung“ vertiefend eingegangen.

Die wichtigsten Fasermaterialien für den Einsatz als Verstärkungsfasern sind zum Vergleich in der nachfolgenden Tabelle 2.1 aufgelistet [187]. Da die Bruchdehnung jeweils im Bereich weniger Prozen- te liegt, wird auf eine Darstellung verzichtet [84]:

<b>Faser</b>	<b>Dichte [g/cm<sup>3</sup>]</b>	<b>Zugfestigkeit [MPa]</b>	<b>Elastizitätsmodul [GPa]</b>
E-Glasfaser	2,52	2500	70
R-Glasfaser	2,54	3600	85
S-Glasfaser	2,49	4500	86
C-Faser HT-Typ	1,77	2700-3500	220-240
C-Faser HM-Typ	1,90	2000-3200	350-490
Aramidfaser Kevlar 29	1,44	2800-3000	58-80
Aramidfaser Kevlar 49	1,45	2700-3000	130-132
Polyethylen-Faser (Dyneema SK 60 von DSM)	0,97	2600-3300	87

**Tabelle 2.1:** Vergleich von Fasermaterialien [vgl. 84, 105]

## 2.2.2 Matrixsysteme und -verarbeitung

In der nachfolgenden Untersuchung kommen Polymermatrixsysteme zum Einsatz, weshalb ausschließlich auf diese eingegangen wird. Wie bereits erwähnt, erfüllt die Matrix eine Vielzahl von Aufgaben im FKV. So stellt Shalin [189] heraus, dass diese u.a. für die räumliche Fixierung der Fasern sorgt und die scheuerempfindlichen Fasern gegeneinander auf Abstand hält. Des Weiteren ist die Matrix im Wesentlichen für das chemische Materialverhalten gegenüber der Umgebung verantwort- lich, da die Fasern vollständig von der Matrix umhüllt sind [86, 189].

Außerdem überträgt die Matrix die äußeren Kräfte in die Fasern selbst und verteilt sowohl Spannun- gen von der einen Faser zur nächsten als auch zwischen den Schichten im Verbund [86]. Bei Belas- tungen senkrecht zur Faser übernimmt die Matrix fast ausschließlich die Aufgabe der

Kraftübertragung und entscheidet so maßgeblich über das Verhalten unter Schub [187]. Unter Druckbelastung ist die Matrix für die Stabilisierung des Verbunds verantwortlich, verhindert ein Schubknicken bzw. -beulen der Fasern und macht dadurch überhaupt erst eine Kraftübertragung in Druckrichtung möglich [187]. Die Matrix bestimmt das Verhalten des FKV in erheblichem Maße bzgl. seiner mechanischen, chemischen und thermischen Eigenschaften und stellt zugleich meist auch die Schwachstelle dar [187]. Steifigkeit, Festigkeit und in der Regel ebenso die Temperaturbeständigkeit im Verbund sind häufig durch die Matriceigenschaften limitiert [78, 187].

Kunststoffe werden u.a. von Bonten [39] und Domininghaus et al. [53] in die Kategorien Thermoplaste, Elastomere und Duromere unterteilt. Thermoplaste sind lineare oder verzweigte Polymere, welche sich in einem bestimmten Temperaturbereich beliebig oft verformen lassen [38, 39], dadurch im Spritzgussprozess verarbeitet werden können und rezyklierbar sind [99, 127, 171]. Elastomere sind schwach vernetzt, wodurch sie ein gummitypisches Verhalten zeigen und auf Grund ihrer Vernetzung auf Makromolekülebene nicht erneut schmelzbar sind [38, 39]. Duromere werden als Monomere in Form gebracht und anschließend chemisch, physikalisch oder thermisch hoch vernetzt, wodurch sie nicht erneut schmelzbar und damit nicht rezyklierbar sind [38, 39].

Typische Zykluszeiten in der Produktion von Fahrzeugen der Kompaktklasse liegen im Bereich von einer Minute [172]. Bei der Produktion einzelner Komponenten muss es möglich sein, mindestens die benötigte Anzahl der Teile im gleichen Takt zur Verfügung zu stellen. Die chemische Vernetzung von Monomeren zu Duromeren erfordert jedoch meist eine lange Zykluszeit und müsste für Großserienanwendung durch Parallelisierung von Anlagen und Werkzeugen kompensiert werden [32, 142]. Der dafür nötige Aufwand und die daraus resultierenden Investitionen erschweren einen Einsatz in einem solchen Maßstab.

Für duromere Systeme werden zahlreiche Untersuchungen durchgeführt, welche sich mit der Verkürzung der Aushärtezeiten befassen, um so auch die Zykluszeiten zu verringern. Dazu bieten sich u.a. verschiedene Verfahren zur volumetrischen Erwärmung des Harzes an, wodurch die chemische Reaktion beschleunigt wird, so Ströhlein [198], Danilov [50] oder Yarlagadda et al. [209]. Allerdings besteht bei dieser Art von Kunststoffen weiterhin das Problem der stark eingeschränkten Recyclingfähigkeit [164].

Bei der Verarbeitung von Thermoplasten muss das schmelzviskose Polymer im Gegensatz zum Duromer nicht chemisch vernetzen, sondern durch Abkühlung erstarren, was deutlich kürzere Zykluszeiten ermöglicht [194]. In Großserienanwendungen sind besonders Spritzguss- bzw. Kurzglasfaserspritzgussverfahren Standard. Für endlosfaserverstärkte Komponenten mit thermoplastischer Matrix sind Organobleche eine Option und bieten ein hohes Leichtbaupotenzial [194].

Bei einem Blick auf das Produktportfolio der für den Markt relevanten Materialhersteller für Organobleche wie BASF, LANXESS, TenCate, DuPont, Evonik, Covestro, Arkema, Tohotenax und Quadrant zeigt sich, dass insbesondere Polyamide relevant für die Verwendung bei Organoblechen sind, wobei auch die Polypropylene nicht ganz außer Acht gelassen werden sollten. Der Fokus soll im Weiteren auf den Polyamiden liegen.

Bonten [39] und Bonnet [38] kategorisieren die hier verwendeten Polyamide als technischen Kunststoff und erläutern die grundlegenden Eigenschaften. Polyamide werden in zwei Gruppen unterteilt; die Molekülketten sind entweder aus einem oder aus zwei Grundbausteinen aufgebaut. Dabei gibt die Zahl, welche auf die Abkürzung PA folgt, an (wie bspw. bei PA6, PA11 oder PA12), wie viele Kohlenwasserstoffatome der Wiederholungseinheit angehören, wobei eine zweite Zahl (wie bei PA66, PA69 oder PA610) die Anzahl der Kohlenwasserstoffatome eines zweiten Grundbausteins angibt. Diese Kunststoffgruppe gilt im Allgemeinen als fest, hart, steif, zäh und chemisch resistent gegenüber Lösemitteln, Ölen, Fetten und Kraftstoffen. Weiterhin gehören sie zu den hochtemperaturbeständigen Thermoplasten, welche durch ihre relativ steife molekulare Hauptkette eine hohe Wärmeformbeständigkeit erreichen.

### **2.2.3 Organoblechherstellung**

Wie in „2.2 Faserverstärkte Kunststoffe als Leichtbaumaterial“ erläutert, beschreibt der Begriff des sogenannten Organoblechs einen endlosfaserverstärkten Thermoplast mit Gewebeverstärkung, welcher als Halbzeug in Blechform vorliegt vgl. [194]. Im Allgemeinen können die Fasern als Gewebe oder Gelege unidirektional, bidirektional oder multidirektional vorliegen. In der Herstellung der Halbzeuge wird der erforderliche Lagenaufbau mit den in „2.2.1 Faserverstärkung“ erläuterten Variationen für die später zu fertigende Komponente mit einem Thermoplast in Verbindung gebracht, was Mountasir et al. [145] untersucht und beschreibt. Bartz et al. [23] und Baur et al. [29] erläutern verschiedene Herstellungsverfahren von FKV und beschreiben das Extrusionskaschieren oder die Pulverimprägnierung mit anschließender Verpressung in einer kontinuierlich arbeitenden

Doppelbandpresse als gängiges Verfahren für die Organoblechproduktion, welches in Abbildung 2.5 dargestellt ist.

Alternativ kann nach der von Schürmann [187] erläuterten Methode mit einer thermoplastischen Folie im sogenannten Film-Stacking-Verfahren gearbeitet werden. Bei der anschließenden Verpressung wird ein Druck auf das Material ausgeübt, so dass der schmelzflüssige Kunststoff die Fasern vollständig benetzt [29, 187]. Bei Klein- und Kleinstserien erfolgt die Konsolidierung diskontinuierlich in einer Heißpresse oder im Autoklav vergleichbar mit der Verarbeitung von Duromeren [23]. Abhängig von der eingebrachten Kunststoffmenge wird der Faservolumengehalt des späteren Bauteils eingestellt. Nach der Konsolidierung wird das Material abgekühlt, so dass der die Fasern umgebende Kunststoff erstarrt, und anschließend in eine transportgerechte Größe zerteilt.

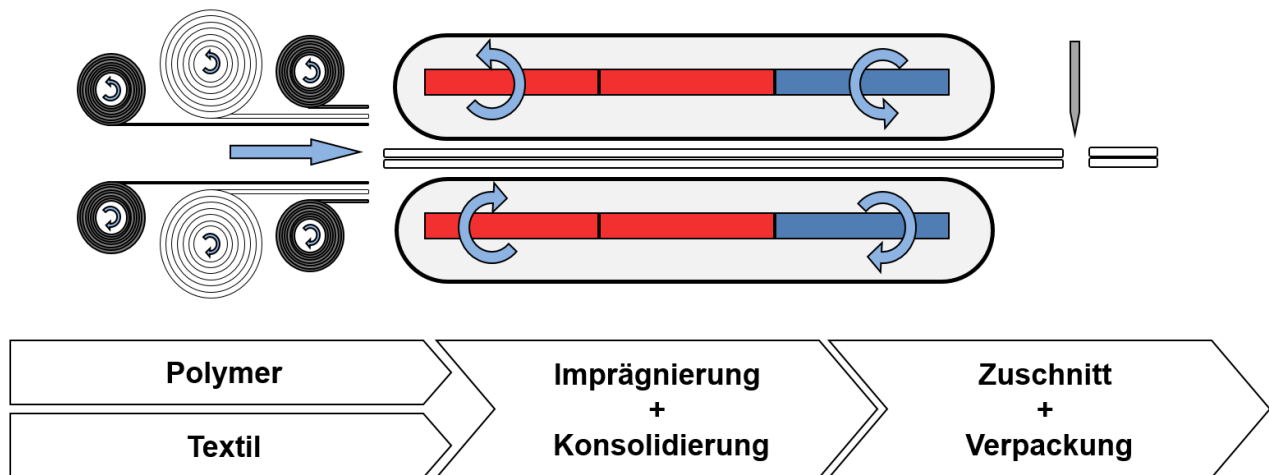


Abbildung 2.5: Schematische Darstellung der Organoblechproduktion [111]

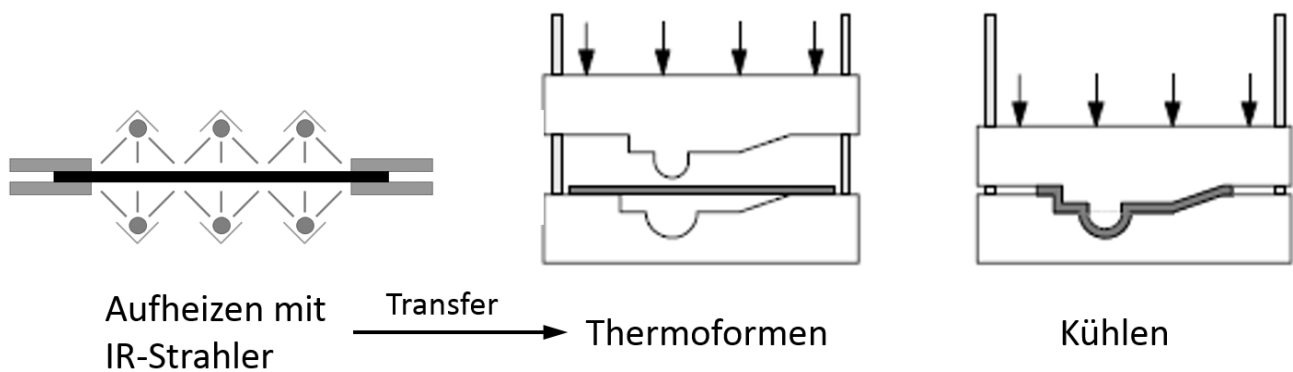
### 2.2.4 Organoblechverarbeitung

Für die Verarbeitung eines Organoblechs zu einem Bauteil wird ein Zuschnitt aus der Rohplatte erstellt [194]. Dafür wird meist ein Wasserstrahlschneider verwendet, da faserverstärkte Materialien bei mechanischen Trenn- und Spanverfahren zu starkem Werkzeugverschleiß führen und selbst eine Schädigung erfahren, was bspw. Schulze et al. [186], Abrão et al. [1] Bhatnagar et al. [34] und Aguilar-Martín [6] untersuchen. Der Zuschnitt wird in einen Spannrahmen eingespannt und mit einem Infrarotstrahler (IR-Strahler) oder einem Umluftofen auf Verarbeitungstemperatur oberhalb der Schmelztemperatur des Kunststoffes aufgeheizt, um anschließend in einer Presse in Endkontur gebracht zu werden [57]. Dieses Verfahren ist in Abbildung 2.6 illustriert und eignet sich für Großserien [194]. Bei Kleinserien besteht außerdem die Möglichkeit, mit einem isobaren Diaphragmaverfahren



zu arbeiten, bei dem auf eine teure Werkzeughälfte aus Stahl verzichtet werden kann, was Christie [47] in seiner Arbeit anwendet.

Siebenpfeiffer et al. [190] stellt den entscheidenden Vorteil bei der Verarbeitung von Organoblechen heraus und beschreibt dabei die Option auf Funktionsintegration durch einen ergänzenden Spritzgussprozess. Wird das Organoblech in eine Spritzgussmaschine statt in eine Presse eingelegt, kann noch vor dem Abkühlen ein schmelzflüssiger Kunststoff über einen Extruder in die Form gespritzt werden [194]. Im Grunde kann jede Spritzgussmaschine einen Thermoformprozess von Organoblechen ausführen, da die Werkzeugschließkräfte, welche für einen Spritzgussprozess benötigt werden, ohnehin die einer Presse übersteigen, wie Okine [155] und Rosato et al. [171] ausführen.



**Abbildung 2.6:** Schematische Darstellung der Organoblechverarbeitung vgl. [47, 57]

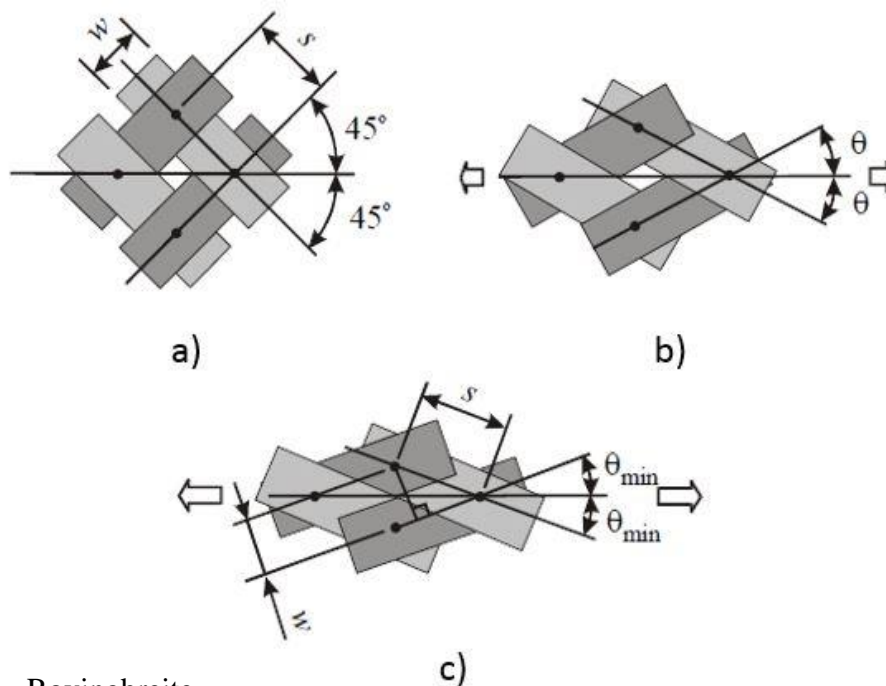
Durch die Integration von Funktionen in ein Bauteil lassen sich im Vergleich zu herkömmlichen Metallteilen weitere Bearbeitungsschritte, wie z.B. ein Schweißprozess, einsparen, was u.a. Jung [100] zusammenfasst. Anspritzen lassen sich z.B. Schraubdome, Halterungen, Laschen, Klipse oder Verstärkungsrippen [100, 152].

#### 2.2.4.1 Gewebescherung infolge der Drapierung

Während bei Umformprozessen von metallischen Bauteilen ein plastisches Fließen des Materials Voraussetzung für eine irreversible Verformung ist, werden bei Formprozessen von textilen Flächen keine plastischen Verformungen erzeugt, so Lilholt [128]. Die Formgebung erfolgt dabei durch eine Faserumorientierung, wie Sommer et al. [194] beschreiben. Bei Schubbelastungen auf Gewebe, wie sie bei Drapierung in nicht abwickelbare Konturen auftreten, rotieren die Fasern um deren Kreuzungspunkte, was nach Girdauskaite et al. [70] in der Simulation beschrieben werden muss und in Abbildung 2.7 dargestellt ist. Das Verhalten muss auf Grund der Auswirkung auf die mechanischen

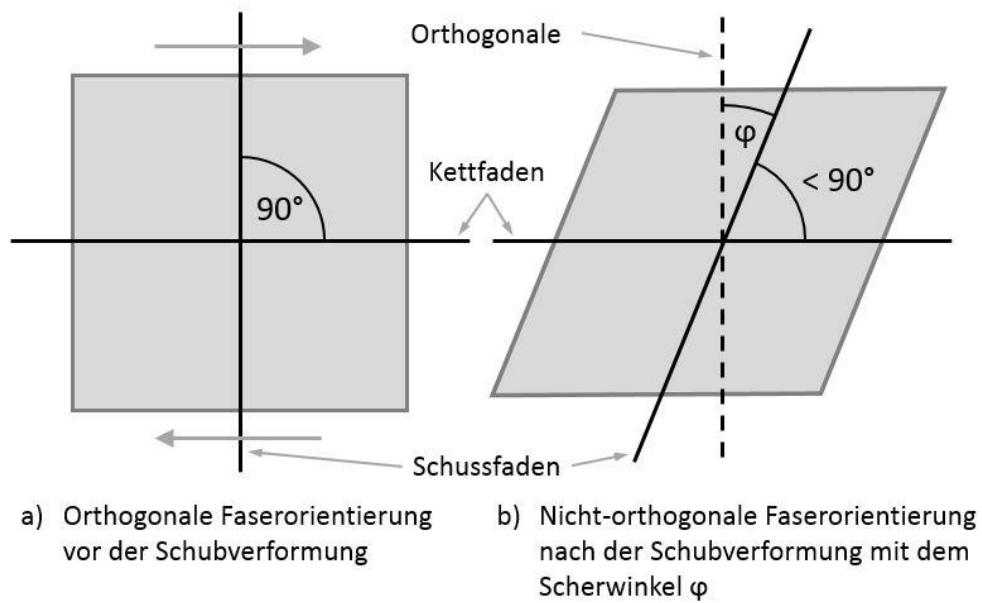
Eigenschaften einer Komponente in einer Prozess- bzw. Drapiersimulation vorhergesagt werden [194].

Der Verformungszustand des Gewebes wird nachfolgend über den Scherwinkel beschrieben, welcher als Gegenwinkel zu den ursprünglichen  $90^\circ$  zwischen Schuss- und Kettfaden definiert ist. Dies orientiert sich an Mitschang et al. [144] und Cherif et al. [46]. Zur Verdeutlichung dient Abbildung 2.8. Wie unten in Abbildung 2.7 zu erkennen ist, kommt es durch zunehmende Verformung zu einer Verdichtung der Faserbündel bis zu einem Maximum, welches bei einem kritischen Scherwinkel  $\varphi_{\text{krit}}$ , – dem sogenannten Blockierwinkel – erreicht wird [46, 134, 144].



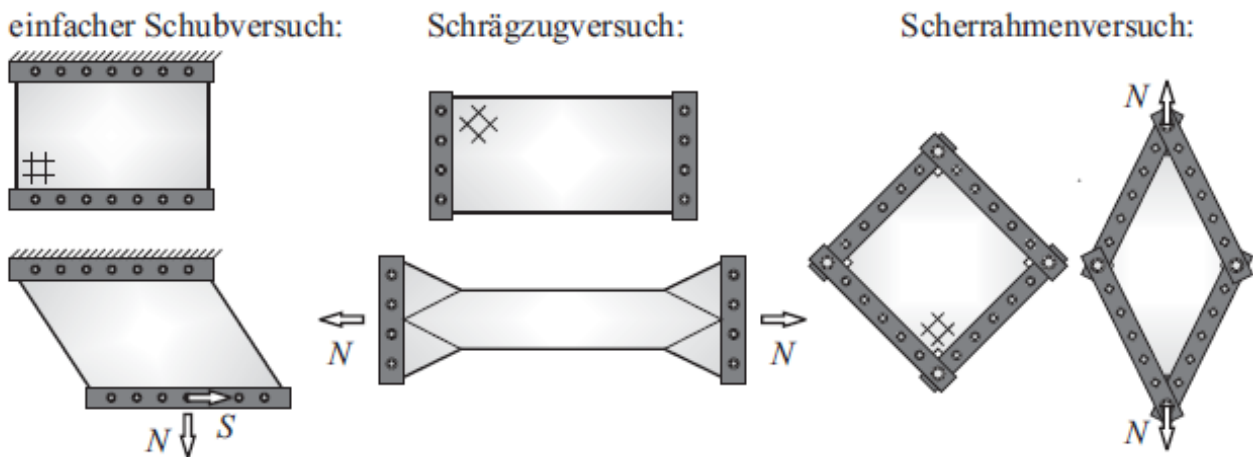
- $w$  [mm] Rovingbreite
- $s$  [mm] Rovingabstand
- $\theta$  [°] Halber Deformationswinkel
- $\theta_{\text{min}}$  [°] Minimaler, halber Deformationswinkel

**Abbildung 2.7:** Scherung einer Einheitszelle eines Gewebes mit a) unverformtem Zustand; b) Verformung unter Schub; c) Verformung unter Schub bis zum Blockierwinkel [131]



**Abbildung 2.8:** Schematische Darstellung zur Definition des Scherwinkels [eigene Darstellung vgl. 69]

Für die Prozesssimulation sind der kritische Scherwinkel sowie das Verhalten unter Schub zu charakterisieren. Neitzel et al. [151] übertragen das Verhalten bei Raumtemperatur und ohne Matrix auf den Umformprozess bei Verarbeitungstemperatur mit Matrix. Um den realen Materialverarbeitungsprozess möglichst ideal abzubilden, ist jedoch eine Materialcharakterisierung bei Prozesstemperatur durchzuführen. Prinzipiell eignen sich die in Abbildung 2.9 gezeigten Aufbauten, die u.a. von Harrison et al. [81] sowie von Chang et al. [45] gegenübergestellt und verglichen werden.



**Abbildung 2.9:** Versuchsmethoden zur Schubbelastung von Geweben [22]

Insbesondere zur Bestimmung der Schubdeformationsgrenze, nach Lomov et al. [133] und Liu et al. [129, 130], eignet sich der Scherrahmenversuch, welcher bisher jedoch nicht für Tests an Organoblech unter Verarbeitungstemperatur eingesetzt wird. Hierbei wird angenommen, dass einzig das Scherverhalten wesentlich für den Drapierprozess ist. Die Untersuchung anderer Faktoren wird dabei nicht durchgeführt.

Zur Berechnung der Schubspannung ist die wirksame Fläche zu berücksichtigen. Dabei kann die Dicke des Prüfkörpers nicht als konstant angenommen werden. Das Volumen des Prüfkörpers bleibt konstant, die Fläche verformt sich mit zunehmendem Scherwinkel jedoch von einer quadratischen Fläche zu einer Raute. Da die Fläche kleiner wird und das Volumen als konstant angenommen wird, nimmt die Dicke mit dem Scherwinkel zu. Die Dicke berechnet sich demnach aus trivialen geometrischen Zusammenhängen aus Formel 2.1 und ist wie folgt zu berücksichtigen:

$$t = \frac{t_0}{\cos(\alpha)} \tag{2.1}$$

t [mm] Dicke

t<sub>0</sub> [mm] Initiale Dicke

Die Prüfvorschrift „DIN SPEC 4885 Faserverstärkte Kunststoffe - Schubversuch mittels Schubrahmen zur Ermittlung der Schubspannungs-/Schubverformungskurve und des Schubmoduls in der Lagenebene“ dient der Ermittlung von Schubeigenschaften unter Last und eignet sich für zur Mittelebene symmetrische und ausgeglichene Lamine mit thermoplastischem oder duromerem Kunststoff [61]. Zwar erfüllt das hier verwendete Material diese Bedingungen, allerdings ist der Versuch für konsolidiertes Material vorgesehen und wird nicht auf die Charakterisierung von Materialverhalten unter Prozessbedingungen angewendet. Eine Anpassung der Prüfmethode an reale Prozessbedingungen ist daher durchzuführen.

#### **2.2.4.2 Grenzen der Drapierbarkeit bei Geweben**

Da die Überschreitung des kritischen Scherwinkels zwischen Kett- und Schussfaden zu einem Faltenwurf im Material führt, wird dessen Überschreitung u.a. nach Cherif et al. [46], Machado et al. [134] und Bartz [23] als Drapiergrenze angenommen. Die realen Faserorientierungen sind nicht mit bloßem Auge reproduzierbar zu messen. Zum einen ist an gekrümmten Oberflächen eine definierte tangential Referenzebene, in welcher die Faserwinkel ermittelt werden, nur mit viel Aufwand an zu

vermessenden Bauteilen wiederholbar aufzubringen. Außerdem haben auch geringe Abweichungen im Winkel der Referenzebene einen Einfluss auf die gemessenen, in die Ebene projizierten Faserorientierungen. Zum anderen können bei FKV lediglich die beiden äußeren Lagen ohne weitere Hilfsmittel gesehen werden. Die inneren Schichten des Lagenaufbaus bleiben von den äußeren verdeckt. Die Korrelation zwischen simulierten und realen Scherwinkeln muss nach Finckh [64] daher mit Methoden wie der Computertomographie (CT) vermessen und analysiert werden.

Hamila et al. [76, 77], Lamers et al. [126], Pickett et al. [165] und Creech [69] verwenden zum Aufzeigen der Drapiergrenzen Hemisphären, da daraus ein kontinuierlich zunehmender Scherwinkel folgt. Eine an eine Halbkugel angelehnte Geometrie wird daher als sinnhaft angenommen. Arnold et al. [16] stufen dabei einen Faltenwurf mit einer Standardabweichung von 9 % zur mittleren Amplitude als reproduzierbar ein. Durch eine andere Faserorientierung ist zwar die grundsätzliche Drapierung einer Komponente eine andere, allerdings nicht das Drapierverhalten an sich, was Kenkare et al. [106] festhalten.

## **2.3 Simulation von faserverstärkten Kunststoffen**

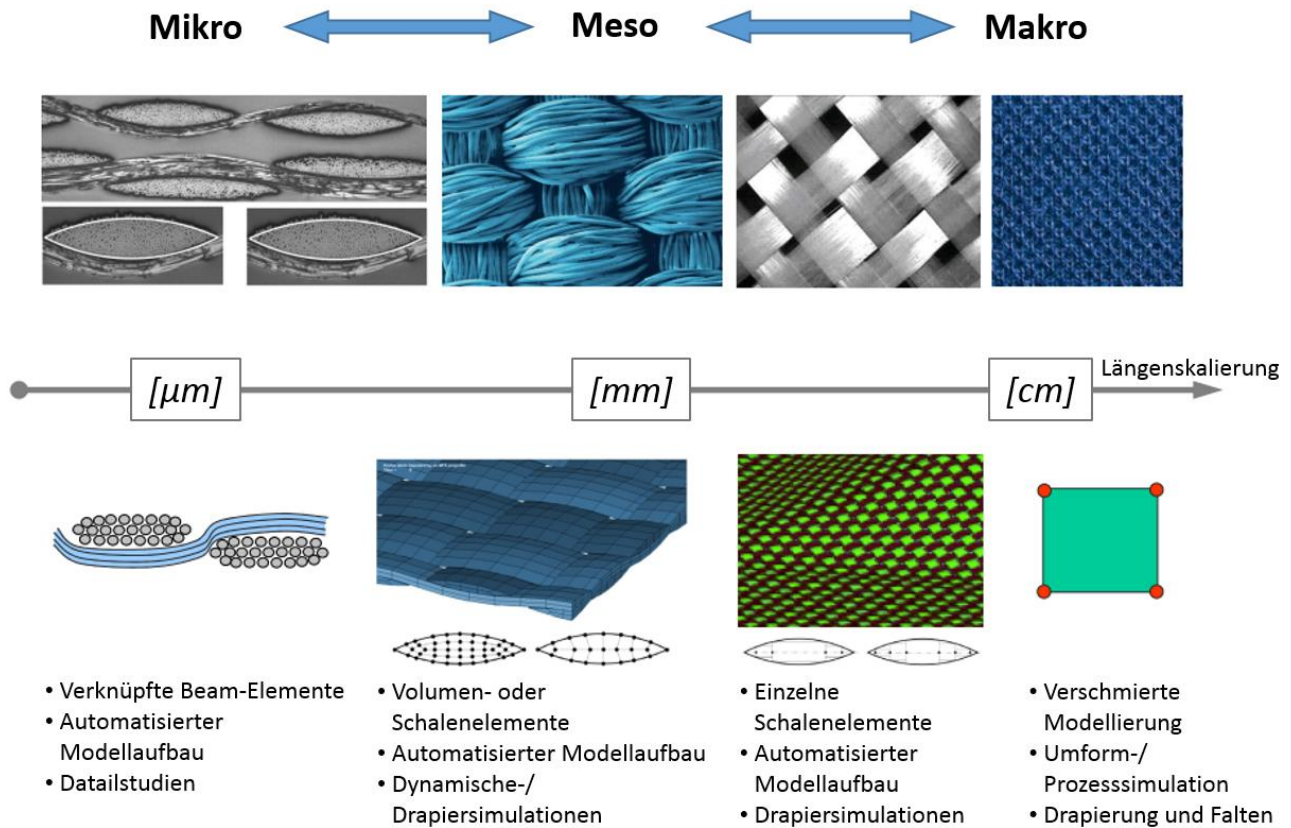
Nachfolgend wird auf verschiedene Möglichkeiten bei der Modellierung und Simulation von FKV eingegangen. Dabei wird der Fokus auf numerische Methoden gelegt.

### **2.3.1 Modellierungsebenen**

Bei der Simulation von FKV unterscheidet u.a. Kwon [124] in der Modellierungsebene verschiedene mathematische Ansätze zur Darstellung des Materials. Wie in Abbildung 2.10 gezeigt, ist eine Unterteilung der Wahl des Detaillierungsgrads möglich. Bei der feinsten Auflösung, welche im Mikrometerbereich liegt, werden einzelne Filamente über sogenannte Beam-Elemente dargestellt, die mit einer definierten Biegesteifigkeit hintereinander geschaltet sind. Klöppel et al. [112] erläutern, dass sich solche hoch aufgelösten Ansätze für Detailstudien zu Forschungszwecken eignen und einen enormen Rechenaufwand bedeuten [124].

Die gröbste Auflösung liegt im Makrobereich und beschreibt ein Modell in einer Größenordnung von wenigen Zentimetern. Dabei werden äquivalent zur Simulation von Spritzgussbauteilen weder einzelne Fasern noch Faserbündel dargestellt, sondern die anisotropen Materialeigenschaften werden

über Vektoren an einzelne Schalenelemente übergeben, siehe z.B. Wang [206]. Für die Einzelvektoren werden nach Nasdala [150] materialspezifische Kennwerte definiert, wodurch die lokale Faserorientierung berücksichtigt wird. Bei diesem Vorgehen sind die Faserbündel durch die geringe Auflösung selbst nicht erfassbar, weshalb innerhalb eines verwendeten Schalenelements mehrere Bündel zusammengefasst dargestellt werden [150]. Hier wird von Schürmann [187] und Klöppel et al. [112] auch vom „Versmieren“ von Eigenschaften gesprochen.



**Abbildung 2.10:** Verfügbare Modellierungsebenen bei der Simulation von FKV vgl. [112, 124]

Durch das Zusammenlegen mehrerer Faserbündel sind zwar Aussagen über das lokale Bauteilverhalten möglich, Effekte wie das Ziehen von Schlaufen oder ein Fasergleiten können bei einer solchen niedrigen Auflösung nicht vorhergesagt werden, siehe dazu auch Kwon [124]. Eine Modellierung in dieser Ebene benötigt verhältnismäßig wenig Rechenzeit und eignet sich für Prozesssimulationen und die Vorhersage von Falten.

Zwischen einer Modellierung in der Mikro- und der Makroebene wird in der Mesoebene im Bereich von wenigen Millimetern simuliert [124]. Mit Volumen- oder Schalenelementen wird bis hin zu einzelnen Faserbündeln aufgelöst. Abhängig von den gewählten Randbedingungen werden dabei auch

Effekte, die ein einzelnes Bündel betreffen, bestimmt [112]. Darunter fallen bspw. das Gleiten, Knicken oder Beulen von Rovingen, während Auswirkungen auf Einzelfilamente nicht darstellbar sind. Eine Abbildung in der Mesoebene eignet sich ebenso wie ein Ansatz in der Makroebene, um Drapierungen und daraus resultierende Faltenbildungen zu berechnen [112].

Ladevèze [125] stellt heraus, dass der Aufwand für die Modellierung in feiner aufgelösten Simulationen bedeutend höher ist als in der Makroebene, da für den Modellaufbau deutlich mehr Informationen benötigt werden. Im Vorfeld sind zahlreiche zusätzliche Materialtests nötig, für welche teilweise keine standardisierten Testmethoden bestehen. So muss im Vorfeld verstanden sein, durch welche Einflüsse z.B. ein Beulen von Rovingen verursacht wird, in welcher Intensität das Material auf die Einflüsse reagiert und in welchem mathematischen Zusammenhang Ursache und Wirkung stehen, außerdem muss dieser Zusammenhang in ein Materialgesetz eingebunden werden können, wie Klein [109] umfassend erläutert.

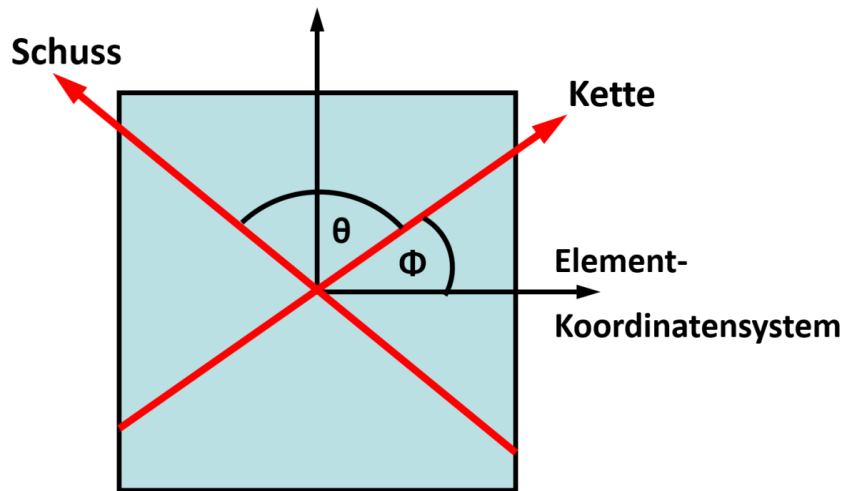
Mit zunehmendem Detaillierungsgrad müssen deutlich mehr Kontaktbedingungen berücksichtigt werden, was die Berechnungszeit ebenfalls stark ansteigen lassen kann [109]. Zusätzlich führen insbesondere komplexe Simulationen mit einer Vielzahl von zu berücksichtigenden Kontakten nicht selten zu numerischen Instabilitäten und somit zum Abbruch der Rechnung oder zu unrealistischen Ergebnissen [109].

Zu den verschiedenen Modellierungsebenen existieren bereits vielzählige Untersuchungen. Dabei wird jedoch in der Regel keine klare Empfehlung für eine Implementierung in einen konsistenten Produktentwicklungsprozess ausgesprochen. Vielmehr werden die verschiedenen Optionen einzeln untersucht, wobei eine Analyse der Fragestellung ausbleibt, ob und wie die Kombination verschiedener Detaillierungsgrade in aufeinanderfolgenden Entwicklungsschritten bei der Komponententwicklung mit Organoblech möglich ist. Eine solche Abfolge von hintereinander geschalteten Berechnungsmodellen mit unterschiedlichen Detaillierungsgraden im Rahmen eines Entwicklungsprozess muss geprüft werden.

### **2.3.1.1 Sandwich-Modellierung**

Bei der Sandwich-Methode werden Shellelemente verwendet, welche in der Mittelfläche einer Komponente liegen und eine virtuelle Dicke zugewiesen bekommen; die Elemente haben demnach keine Ausdehnung in Normalenrichtung [150]. Das gesamte Material wird anhand einer einzigen Schicht

von Shellelementen abgebildet. Bei einem Modell, welches mit der Software der Altair Engineering GmbH, Böblingen, [9] erstellt ist, wird über einen Vektor „x“ ein globales Koordinatensystem definiert; Lagen mit Fasern, die ungleich dem globalen Koordinatensystem liegen, werden durch die in Abbildung 2.11 gezeigte Definition eines lokalen Koordinatensystems mit einem Winkel  $\Phi$  zwischen globaler und lokaler x-Achse festgelegt.



$\Phi$  [°] Winkel zwischen Elementkoordinatensystem und Kettfaden

$\theta$  [°] Deformationswinkel

**Abbildung 2.11:** Faserorientierung im Schalelement [eigene Darstellung vgl. 9]

Bei dem nachfolgend verwendeten Materialgesetz LAW25 werden ein linear elastischer und ein nichtlinear plastischer Bereich angenommen, wobei zwischen dem TSAI-WU und dem CRASURV Versagenskriterium unterschieden werden kann. Diese basieren auf der maximal zu verrichtenden plastischen Arbeit [9]. Dabei steht der Ausdruck „CRASURV“ [9] für „Crash Survivability“ und stellt eine erweiterte Beschreibung nach Tsai-Wu [9, 201] dar. Damit ist eine umfassende Beschreibung des plastischen Verhaltens eines Werkstoffs möglich, weshalb diese Formulierung eine komplexere Variante des LAW25 darstellt und nachfolgend verwendet wird [12]. Die verwendeten Elemente vom Typ TYPE11 sind sowohl mit drei als auch vier Knotenpunkten kompatibel und definieren die Hauptfaserorientierungen [9].

In Abbildung 2.12 ist das Prinzip bei der Sandwich-Modellierung verdeutlicht. Die Materialeigenschaften werden über eine Materialkarte den Shellelementen hinzugefügt, wobei in der sogenannten „Property“ durchaus eine Vielzahl von Lagen mit unterschiedlichen Eigenschaften, wie z.B. Faserorientierungen oder -dicken, definierbar sind [12]. Die so erstellten einzelnen Lagen bekommen dem



Aufbau entsprechend eine Position in Dickenrichtung und einen Integrationspunkt zugewiesen, wobei Kett- und Schussfaden immer im Winkel von 90° miteinander verschränkt in der gleichen Position liegen. Die einzelnen Lagen des so definierten Aufbaus werden allerdings nicht einzeln, sondern zusammengefasst in der Mittelfläche simuliert.

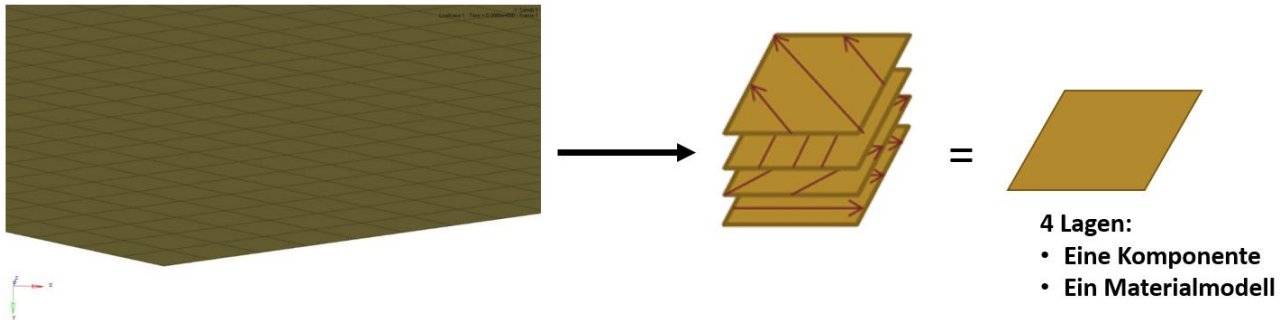


Abbildung 2.12: Prinzipdarstellung der Sandwich-Modellierung [vgl. 8]

### 2.3.1.2 Multilayer-/Independent Layer-Modellierung

Im Gegensatz zur Sandwich-Modellierung werden bei der Multilayer- oder auch Independent Layer-Modellierung genannten Herangehensweise mehrere Lagen von textilen Flächen, wie in Abbildung 2.13 gezeigt, unabhängig voneinander modelliert [24]. Vergleichbar mit der Sandwich-Modellierung werden hierbei Shellelemente verwendet, welchen die Materialeigenschaften in der Property zugewiesen werden. Allerdings wird hier für jede reale Gewebelage eine individuelle Fläche aus Shellelementen aufgebaut, welche über eine definierte Kontaktdefinition in Interaktion stehen.

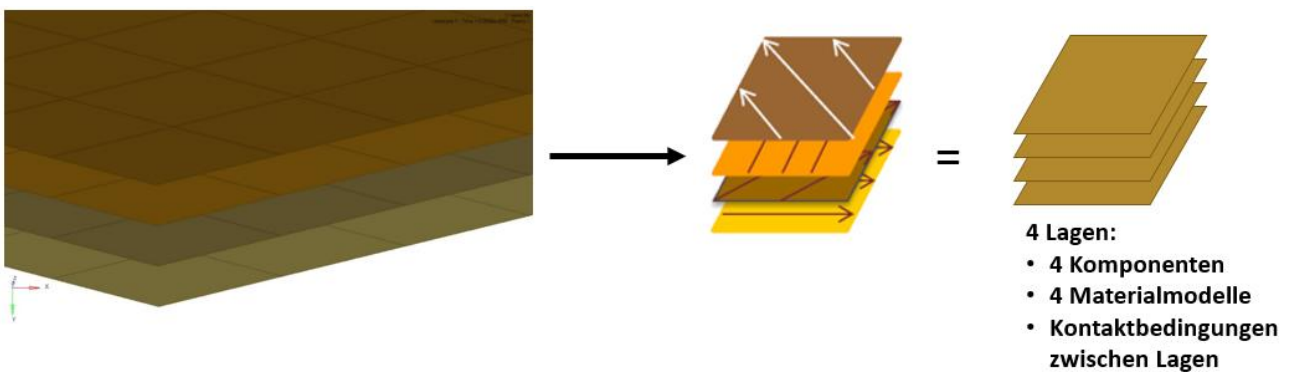


Abbildung 2.13: Prinzipdarstellung der Multilayer-/Independent Layer-Modellierung [vgl. 8]

Das bei diesem Ansatz verwendete Materialgesetz LAW58 erlaubt zwei Faserorientierungen mit unterschiedlich definierbaren nichtlinearen Eigenschaften [9]. Durch das hier implementierbare Scherverhalten eignet sich der Modellierungsansatz dazu, das in Kapitel „2.2.4 Organoblechverarbeitung“

erläuterte Umformverhalten abzubilden [104]. Die Scherspannung berechnet sich in Abhängigkeit des Scherwinkels wie folgt [9]:

$$\hat{\sigma} = G_0 \tan(\alpha) - \tau_0 \quad \text{für } \alpha \leq \alpha_T \quad 2.2$$

$$\hat{\sigma} = G \tan(\alpha) + G_A - \tau_0 \quad \text{für } \alpha > \alpha_T$$

mit:

$$G_A = (G_0 - G) \tan(\alpha_T) \quad 2.3$$

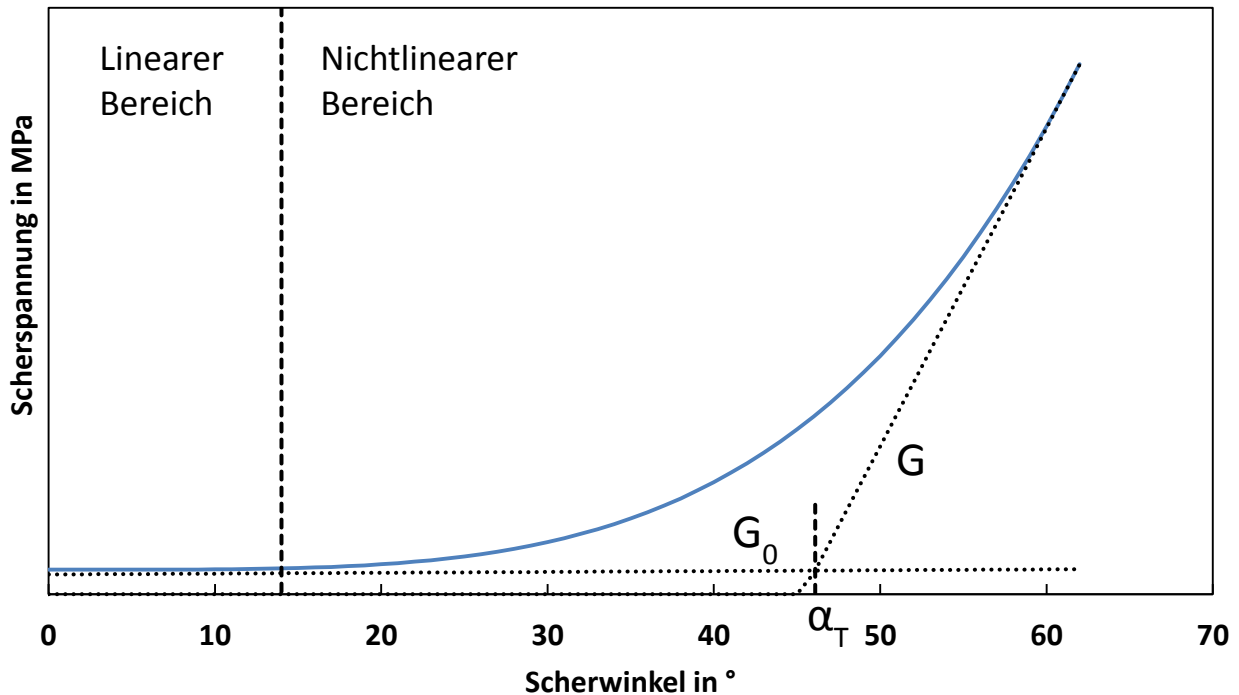
$$G = \frac{G_T}{1 + \tan^2(\alpha_T)} \quad 2.4$$

$$\tau_0 = G_0 \tan(\alpha_0) \quad 2.5$$

$\tau$	[MPa]	Schubspannung
$G_0$	[MPa]	Schubmodul bei Scherwinkeln kleiner dem kritischen Scherwinkel
$\alpha$	[°]	Scherwinkel
$\tau_0$	[MPa]	Initiale Schubspannung
$\alpha_T$	[°]	Kritischer Scherwinkel
$G$	[MPa]	Schubmodul bei Scherwinkeln größer dem kritischen Scherwinkel
$G_T$	[MPa]	Tangentialer Schubmodul bei kritischem Scherwinkel
$E$	[MPa]	Elastizitätsmodul
$\alpha_0$	[°]	Initialer Scherwinkel

Abbildung 2.14 verdeutlicht, wie über die beiden Geradengleichungen aus Formel 2.2 der reale Scherspannung-über-Scherwinkel-Verlauf angenähert wird. In erster Näherung wird dabei auf eine präzise Bestimmung des nichtlinearen Bereichs verzichtet und dieser wird durch eine abschnittsweise definierte Geradengleichung dargestellt. Gekennzeichnet sind die beiden Geraden durch ihre zugehörigen Steigungen  $G_0$  für den Schubmodul bei Scherwinkeln, welche kleiner als der kritische Scherwinkel  $\alpha_T$  sind, und  $G$  für den Schubmodul, der für Scherwinkel größer als der kritische Scherwinkel gilt.

Prinzipiell ist jedoch auch eine detailliertere Darstellung des Übergangs der beiden Gleichungen umsetzbar. Ein solcher Modellierungsansatz wird in der nachfolgenden Arbeit ebenfalls verfolgt.



**Abbildung 2.14:** Idealisierter Verlauf der Scherkraft bzw. der Scherspannung über dem Scherwinkel [eigene Darstellung vgl. 8, 70]

In der Simulationsumgebung werden in der sogenannten Property die Eigenschaften für drei oder vier Knoten Schalenelemente TYPE16 jeweils einer Gewebeschicht definiert [109].

Auf Grund der Darstellung der Einzellagen und deren Verknüpfung über Kontaktbedingungen ist der Berechnungsaufwand für die Modelle dieser Art deutlich höher als bei der Sandwich-Modellierung. Dafür können jedoch die einzelnen Lagen gegeneinander gleiten und unterschiedliche Scherwinkel annehmen [24, 25]. Besonders für Drapierungen mit verschiedenen Lagen unterschiedlicher Gewebearrichtungen ist ein solcher Ansatz sinnvoll. Eine komplexe und somit langwierige Drapiersimulation wird lediglich bei der Auslegung einer einzelnen Komponente benötigt und beeinflusst nicht wie bei einer Lastsimulation auch die Berechnungszeit einer Vielzahl von nachfolgenden Vollfahrzeugsimulationen. Daher ist die CPU-Zeit bei der Prozesssimulation nicht so kritisch wie bei der Lastsimulation; damit eignet sich der Ansatz für die Anwendung in der Drapiersimulation und wird hier verwendet.

### 2.3.2 Materialcharakterisierung für die Simulation

Es wird eine Materialcharakterisierung für die Prozesssimulation von derjenigen für die Lastsimulation unterschieden. Bei der Prozesssimulation wird das Materialverhalten unter Verarbeitungstemperatur beschrieben, also wenn die Kunststoffmatrix in schmelzviskosem Zustand vorliegt, während bei der Lastsimulation unter Betriebstemperatur ein völlig anderes Materialverhalten auftritt.

Es bestehen für Materialtests zahlreiche nationale und internationale Standards, wie die des vom „Deutschen Instituts für Normung“ (DIN) bzw. der „International Organization for Standardization“ (ISO) [96, 184]. Für einige Untersuchungen an Organoblechen bestehen jedoch zum gegenwärtigen Zeitpunkt keine genormten Vorgehensweisen oder Richtlinien.

Im aktuellen Normungsausschuss organisiert von „AVK – Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e. V. und AVK-TV GmbH“ (AVK) wird eine Standardisierung von Materialdatenblättern inkl. der zu verwendenden Normen erarbeitet. Die meisten darin diskutierten Prüfverfahren schreiben eine Dicke der Prüfkörper von 2 mm vor. Der Fokus hierfür liegt jedoch auf der Materialbeschreibung unter Last und weniger auf der Beschreibung für den Verarbeitungsprozess.

Der Stand der Technik für faserverstärkte Duomere ist bereits weiter fortgeschritten, da diese am häufigsten und bereits am längsten eingesetzt werden. Deshalb existieren bzgl. der Kategorie der faserverstärkten Materialien vielzählige Standards [187]. Diese sind jedoch nicht unmittelbar auf Organobleche übertragbar und müssen zunächst im Zusammenhang mit aktuellen Abhandlungen, die sich bspw. mit der Drapierung befassen, betrachtet werden.

Die Einträge in der Materialkarte sind so zu wählen, dass die Simulation die Realität möglichst ideal widerspiegelt und nicht etwa den realen physikalischen Parametern wie dem E-Modul entspricht. Der Entwickler der Simulationssoftware „Altair Engineering“ [65] empfiehlt für die Parameteridentifikation den Zugversuch nach DIN EN ISO 527-4 in jeweils 0°, 90°- und ±45°-Richtung. Außerdem wird ein Druckversuch nach DIN EN ISO 14126 vorgesehen, welcher sich jedoch für das vorliegende Material als ungeeignet herausstellt, da in der Norm eine Materialdicke von 4 mm statt 2 mm vorgesehen ist und somit ein Beulen oder Knicken des Materials nicht auszuschließen ist. Bei diesem Verhalten ist der Versuch nach Norm als ungültig zu betrachten.

Außerdem wird bei der Erstellung der Materialkarte nach dem bisher angewendeten Vorgehen manuell ein Parameter nach dem anderen verändert, bis der Anwender die Realität als hinreichend genau beschrieben erachtet. Dabei kann sich die Anpassung eines Parameters in einem Modell positiv und

gleichzeitig in einem anderen Modell negativ auf die Abbildegüte auswirken. Da jedoch eine Reihe von Parametern zu optimieren ist, welche sich mitunter gegenseitig beeinflussen, ist bei dieser Vorgehensweise lediglich eine subjektive Optimierung möglich. Das Materialverhalten von Organoblech unter Last sollte jedoch möglichst objektiv und unter verschiedenen Beanspruchungen gleichwertig und mathematisch genau beschrieben werden können. Ein Ansatz zur Bildung einer solchen Materialkarte ohne subjektive Einflüsse und mit einer mathematisch idealen Modellierung muss daher erarbeitet werden.

### 2.3.3 Verwendete Kontaktbedingungen

Für den Kontakt zwischen Auflagern bzw. Stempeln und Organoblech in den unten durchgeführten Versuchen bzw. Simulationen wird hier der sogenannte Starrkörperkontakt (engl. Rigid Body Contact) verwendet. Dort werden Flächen und die darauf liegenden Knoten ausgewählt, welche im Modell in Kontakt stehen oder treten, wobei die Flächen der Stempel und Auflager als sog. Master und die der Komponente als Slave definiert sind. Die Masterfläche stellt nach Alart et al. [5] somit die Referenzfläche dar, zu welcher die Abstände der einzelnen Knoten der Slavefläche bestimmt werden. Perić et al. [162] beschreiben, dass beim Eindringen eines Knotens in die Masterfläche (s. Abbildung 2.15) eine sogenannte Penalty-Kraft auf den Knoten aufgebracht wird, welche diesen aus der Masterfläche herausdrückt.

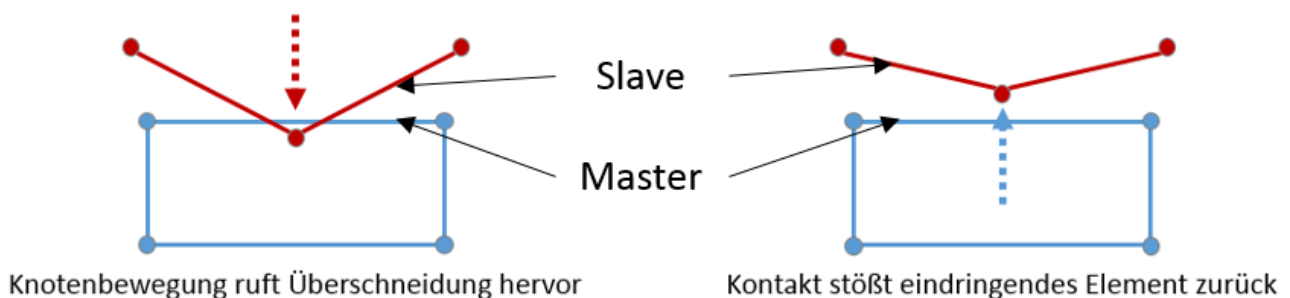


Abbildung 2.15: Kontaktbedingung zwischen zwei Flächen [eigene Darstellung vgl. 8]

### 2.3.4 Fasermapping

Unter dem Begriff des Fasermappings wird die Übertragung von Faserorientierungen zwischen verschiedenen Netzen verstanden, welches z.B. mit „Hypermesh“ der Altair Engineering GmbH, Böblingen, [9] durchgeführt werden kann. Zur Verdeutlichung des Mappings dient Abbildung 2.16. In

der Abbildung liegt ein im Vergleich zur Belastungssimulation feineres Netz in der Umformsimulation vor, in welchem Kett- und Schussfäden mit grünen bzw. orangefarbenen Vektoren eingezeichnet sind. Diese Situation wird in der anschließenden Lastsimulation mit einer gröberen Diskretisierung dargestellt. Um dies zu gewährleisten, berücksichtigen die Zielintegrationspunkte der Elemente die umliegenden Quellintegrationspunkte. Die beiden Netze werden dazu übereinander gelegt, wobei über eine Gaußverteilung die Gewichtungen der Quellintegrationspunkte bestimmt werden.

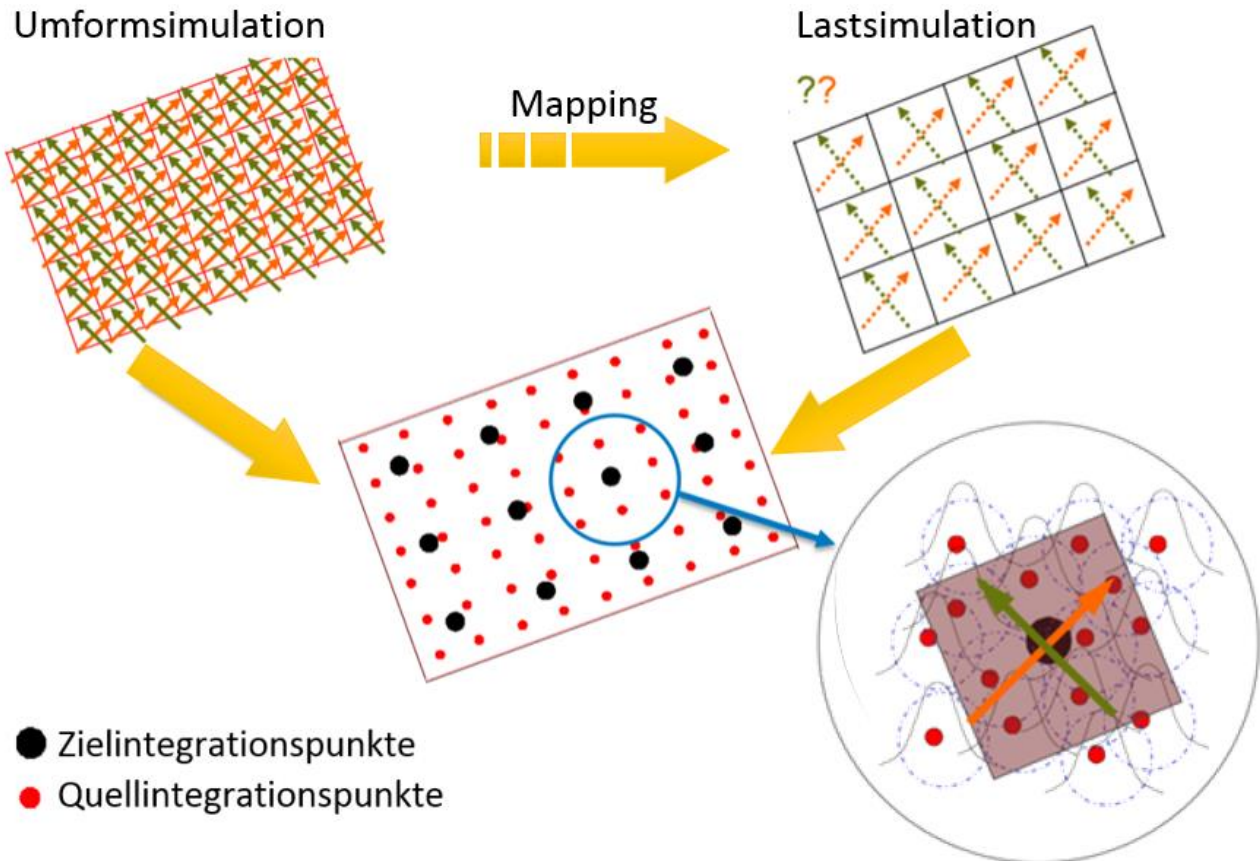


Abbildung 2.16: Schematische Darstellung des Faser mappings [vgl. 9]

Das verwendete Materialgesetz LAW25 kann im Gegensatz zu LAW58 aus der Prozesssimulation jedoch mathematisch keine nicht-orthogonale Anisotropie darstellen, darum kann jede einzelne der vier Lagen in zwei Schichten aufgeschlüsselt werden, was in Abbildung 2.17 gezeigt ist. Dabei wird einer Schicht die Kettfaserrichtung zugeordnet, während die andere Schicht die Schussfadenorientierung darstellt. Die beiden Schichten lassen sich individuell in der Faserorientierung beeinflussen, wodurch sich ein nicht-orthogonales Verhalten abbilden lässt. Die beiden UD-Schichten liegen in der gleichen Ebene wie die ursprüngliche Gewebelage, wodurch ein Einfluss durch die Positionierung im Verbund auf das gesamte Materialverhalten auszuschließen ist.

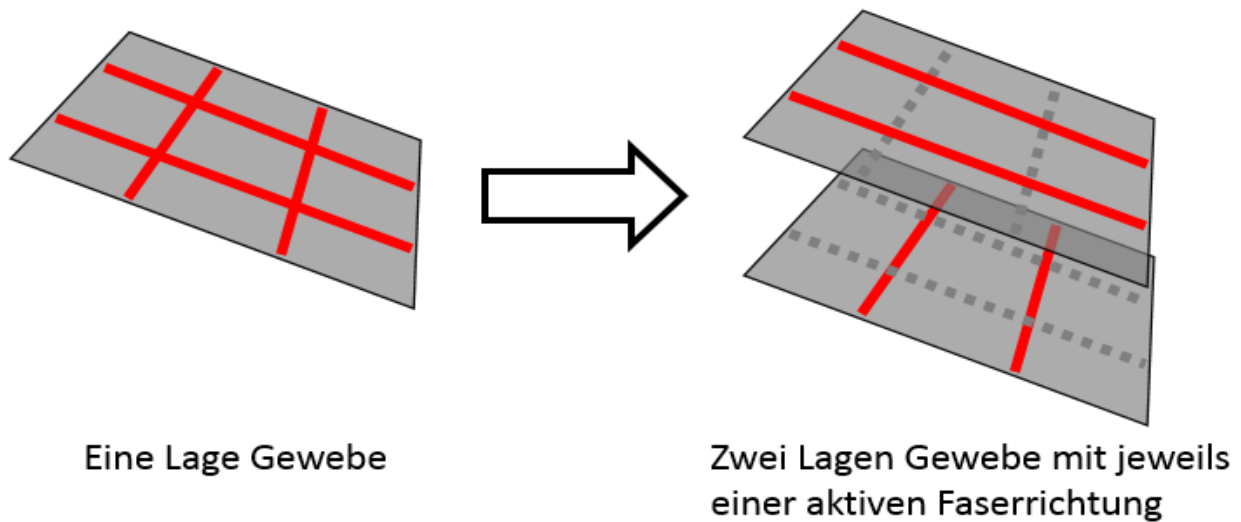


Abbildung 2.17: Zerlegung eines Gewebes in zwei UD-Schichten

## 2.4 Produktentwicklungsprozess

Ein Entwicklungs- oder Konstruktionsingenieur bzw. Entwickler oder Konstrukteur zählt zu seinen Hauptaufgaben das Lösen von technischen Problemen. Im Entwicklungs- oder Konstruktionsingenieurwesen geht es um in hohem Maße interdisziplinäre Tätigkeiten, die nach Feldhusen et al. [63] vielfältige Bereiche tangieren, um darauf basierende Lösungsansätze zu schaffen und umzusetzen. Dazu gehören u.a.

- verschiedenste Gebiete des menschlichen Lebens,
- naturwissenschaftliche Gesetze und Erkenntnisse,
- allgemeines und spezielles Erfahrungswissen,
- eigenverantwortliches Handeln.

Dabei lässt sich die Arbeit unter anderem über Ihre Neuheit kategorisieren [63]. Dies betrifft vor allem die Bereiche der

- Neukonstruktion, der
- Anpassungskonstruktion und der
- Variantenkonstruktion.

Eine Neukonstruktion kann sich aus einer Auswahl oder Kombination von bereits bekannten Technologien und Prinzipien zusammensetzen, um dadurch ein neuartiges Lösungsprinzip für eine Aufgaben- bzw. Problemstellung zu schaffen. Das ist die umfangreichste Konstruktionsart und bedarf eines kompletten Produktentwicklungsprozesses von ersten Lösungsansätzen unter Berücksichtigung von physikalischen Zusammenhängen und Wirkungen, verfahrenstechnischen Abläufen, technischen Voraussetzungen und betriebswirtschaftlichen Zielen und Gegebenheiten

Im Gegensatz zur Neukonstruktion bedient sich die Anpassungskonstruktion bereits bekannter Lösungsprinzipien und wendet diese auf veränderte, technische Randbedingungen an. Die Ursache dafür können z.B. ein veränderter Fertigungsprozess, eine andere Materialwahl oder angepasste geometrische Vorgaben sein. Bei der Konstruktion von Baugruppen kann in der Anpassungskonstruktion durchaus eine Neukonstruktion einzelner Komponenten nötig sein.

Variantenkonstruktionen werden meist für Baukastensysteme angewendet, bei denen zuvor erwartete Problemstellungen berücksichtigt werden, welche jedoch durch Anwendungen gleicher Lösungsprinzipien gelöst werden können [156, 180]. Hierzu könnte bspw. ein Getriebe gezählt werden, das einer Drehzahl- und Momentenübersetzung bedarf. Dabei wäre ein Lösungsprinzip die Anwendung von zwei ineinander greifenden Zahnrädern, welche jedoch in Abhängigkeit von Eingangs- und Ausgangsparametern auf die jeweilige Situation in unterschiedlichen Varianten der Dimensionen und Zähnezahlen ausgeführt wäre.

In einem Spannungsfeld unterschiedlichster Ziele, Ausgangsbedingungen und Möglichkeiten zur Lösungsfindung kann und muss der Entwickler verschiedene Vorgehensweisen und Arbeitsmittel anwenden [63]. Dabei ist die Orientierung an einer Vorgehensmethodik sinnvoll, was unter anderem ausführlich von Holliger [91, 92], Nadler [149, 149], Müller [146, 148] und Schmidt [183] untersucht und diskutiert wird. Außerdem sollten nach Altshuller [11] und Savransky [181] Beurteilungs- und Lösungsmethoden unter Beachtung neuer und neuartiger Lösungs- und Technologiefelder [15] angewendet werden, um ein angestrebtes Ziel zu erreichen.

Allgemein charakterisieren Feldhusen et al. [63] die folgenden Kategorien bei der Arbeit des Konstrukteurs:



- Konzeption,
- Entwurf,
- Ausarbeitung und
- Berechnung.

Hierbei kommen im Laufe der Konzeption Arbeitsmethoden zur Lösungsfindung – vgl. [11] – zum Einsatz, während in der Entwurfsphase sowohl Gestalt und Material zur Definition der Lösung genutzt werden. Dazu können bspw. Methoden von Andreasen et al. [13, 14] angewendet werden. Im Anschluss folgt in aller Regel die Ausarbeitung, bei der die endgültige Struktur der Entwicklung festgelegt wird, also Abmessungen, Fertigungsverfahren, Toleranzen usw. inklusive der Dokumentation und Zeichnungserstellung, wozu Feldhusen et al. [63] einen umfassenden Überblick liefern. Darauf folgt eine Berechnung des Bauteilverhaltens zur Überprüfung der Eignung des gefundenen und ausgearbeiteten Lösungsansatzes.

Hansen, [80], Hubka et al. [95] und Müller [146] unterscheiden die Konstruktionswissenschaft von der Konstruktionsmethodik. Bei der Konstruktionswissenschaft werden wissenschaftliche Methoden angewandt, um Wirkprinzipien einer technischen Konstruktion oder einem Zusammenbau auf dessen Umgebung zu identifizieren. Aus den identifizierten Wirkungsweisen werden Gestaltungsvorschriften und -hinweise für weitere Konstruktionen und Entwicklungen erarbeitet. In der Konstruktionsmethodik dagegen werden zuvor gewonnene Erkenntnisse für ein ideales Vorgehen im Rahmen einer Entwicklung bzw. Konstruktion angewendet. Dazu gehören mehr oder weniger klar definierte Vorgehensvorschriften mit aufeinander folgenden Entwicklungsschritten, die meist in iterativen Prozessen abgearbeitet werden vgl. [10, 14, 19, 20, 27]. Häufig agiert der Konstrukteur intuitiv bei der Entwicklung eines technischen Systems; allerdings lässt sich die Effizienz seiner Arbeit steigern, wenn er sich an eine solche Vorgehenslogik hält. Dabei ist eine vorgegebene Methodik als Unterstützung zu verstehen, wenn diese als eine Art Werkzeug angewendet wird.

Die Hauptziele bei der Anwendung einer Konstruktionsmethodik leiten sich aus der oben erwähnten einschlägigen Literatur ab und werden von Feldhusen et al. [63] zusammengefasst:

- Ermöglichung von problemorientiertem Vorgehen,
- Ersparnis von Zeit und Fehlentscheidungen,
- Übertragbarkeit auf ähnliche Aufgabenstellungen,
- Eignung für Rechnerunterstützung,
- Erleichterung von Arbeit,
- Gewährleistung von Lehr- und Lernbarkeit,
- Förderung von Erfindungen und Erkenntnissen,
- Verträglichkeit mit Begriffen, Methoden und Erkenntnissen anderer Disziplinen,
- Vermeidung zufallsbedingter Lösungen,
- Ermöglichung branchenunabhängiger Anwendung,
- Entsprechung von Erkenntnissen von Denkpsychologie und Arbeitswissenschaften,
- Unterstützung bei der Planung und Steuerung von Teamarbeit.

Auf die historische Entwicklung von Methodiken in der Konstruktion wird nicht näher eingegangen, dennoch sei auf eine äußerst umfassende Aufstellung von Feldhusen et al. [63] hingewiesen, welche im Grunde bei Leonardo da Vinci im 15. Jahrhundert beginnt, aber erst mit dem Beginn der Technisierung im 19. Jahrhundert konkret wird.

### **2.4.1 Produktentwicklungsmethoden**

Die VDI 2221 [138] befasst sich mit der Methodik zur Entwicklung bzw. der Konstruktion technischer Systeme im Allgemeinen, mit besonderem Blick auf Produkte im Maschinenbau, der Softwareentwicklung, der Feinwerktechnik und verfahrenstechnischer Anlagen. Das Ziel dieser Richtlinie ist die Definition einer branchenunabhängigen, allgemeingültigen methodischen Grundlage, die bei einer wettbewerbsfähigen Entwicklung technischer Produkte unterstützt, und bietet eine Vorgehensleitlinie für Konstrukteure und Entwickler. Dabei orientiert sich die VDI 2221 bei der Nomenklatur zur Problemlösungsmethodik an Daenzer bzw. Haberfellner [75] und Franke [67].

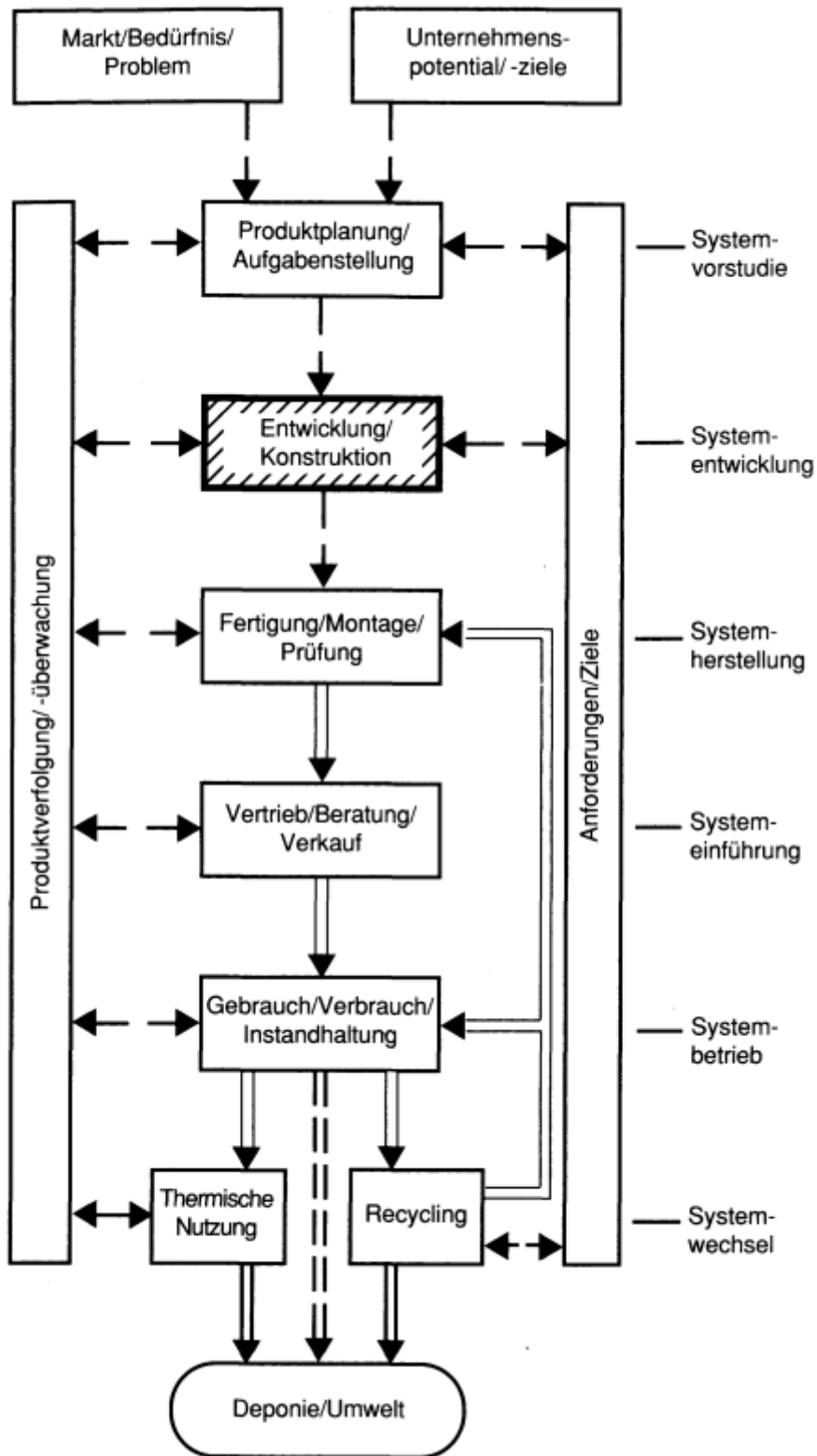
Es wird in der VDI 2221 verdeutlicht, dass bei einer Entwicklung von technischen Produkten generell ein bestehendes Problem gelöst werden muss, wodurch ein allgemeiner Problemlösungsprozess auf einen Entwicklungs- und Konstruktionsprozess übertragen werden kann. Generell wird einer Problemlösungsstrategie ein Vorgehensmodell mit den folgenden Abschnitten zu Grunde gelegt:

- Problemanalyse,
- Problemformulierung,
- Systemsynthese,
- Systemanalyse,
- Beurteilung und Entscheidung.

Dabei schlägt die VDI-Richtlinie ein iteratives Vorgehen vor, bei welchem mehrere Wiederholungszyklen das Informationsniveau der einzelnen Schritte in einem Lernprozess steigern. Nach Bertsche [33] und Wallentowitz et al. [205] ist eine zügige Abfolge von aufeinander folgenden Arbeitsschritten anzustreben, um einen effizienten Entwicklungsprozess zu erreichen.

Bei Dörner [54] und Dylla [55] werden denkpsychologische Forschungsergebnisse und empirische Konstruktionsuntersuchungen zur Optimierung von Vorgehensmethoden verwendet, welche nachfolgend nicht näher betrachtet werden. Während erfahrene Konstrukteure Vorgehensmethoden eher unbewusst und intuitiv anwenden, sollten bei komplexen und diffizilen Aufgaben Methoden eher schrittweise und bewusst Anwendung finden. Im Gegensatz zum schrittweisen Vorgehen steht das Industrial Design nach Seeger [188], bei dem ohne eine Aufgliederung in Teilprobleme und Teilaufgaben direkt die Gesamtlösung gefunden werden soll.

Aus allgemeinen Problemlösungsmethoden leitet die VDI 2221 spezielle Vorgehensstrategien für die Entwicklungsarbeit ab, und es wird eine in Abbildung 2.18 dargestellte, generelle Abfolge von Schritten erarbeitet. Dabei ist der zentrale Baustein der Entwicklung und Konstruktion innerhalb des gesamten Produktlebenszyklus fett und schraffiert hervorgehoben.



**Abbildung 2.18:** Produktkreislauf mit Produktentstehungs- und -lebensphasen einschließlich erforderlicher Informationswege nach VDI 2243 [169] und Lebensphasen eines Systems nach VDI 2221 [138]

Im Fokus steht nachfolgend die technische Entwicklung einer Komponente, weshalb der in Abbildung 2.18 hervorgehobene Schritt detailliert in Abbildung 2.19 dargestellt ist. Dabei sind die einzelnen Entwicklungsschritte mit dem jeweiligen Arbeitsergebnis und den zugehörigen Iterationsmöglichkeiten aufgezeigt.

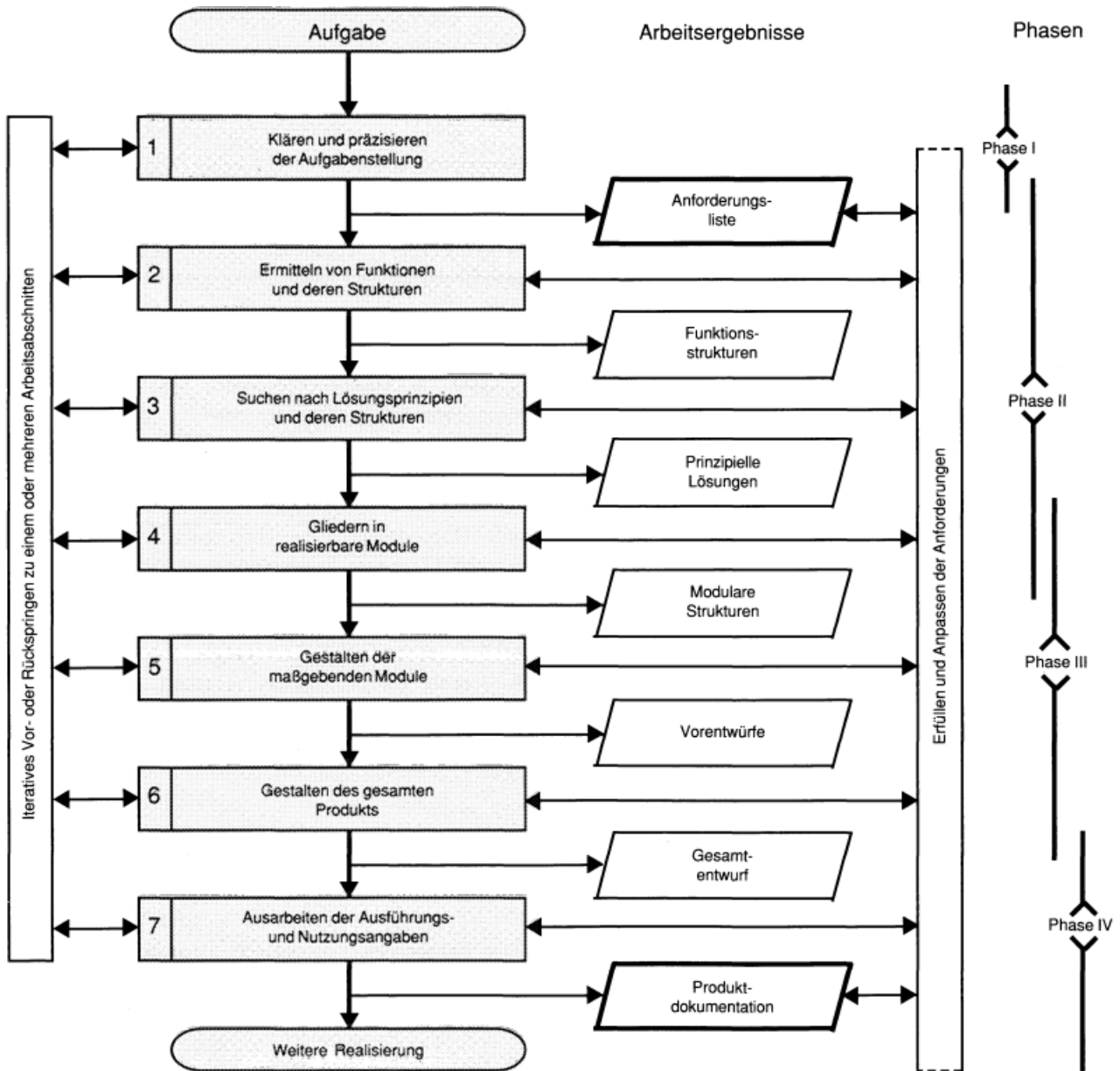


Abbildung 2.19: Allgemeiner Entwicklungsprozess nach VDI 2221 [138]

Die allgemeine Produktentwicklungsmethode beginnt demnach bei der Definition der Anforderungen im Zuge einer zu lösenden Aufgabe. Anschließend werden Lösungsansätze gesucht und entwickelt,

bis einige Lösungsvarianten optimiert werden und schließlich eine einzige Lösungsvariante ausgewählt und ausgearbeitet wird. Besonders bei der Formulierung der Anforderungen ist, um eine geeignete Ausgangsbasis für eine Entwicklung zu schaffen, auf Vollständigkeit, Genauigkeit, Gewichtung und Ordnung zu achten.

Die Suche und Entwicklung der ausgewählten Lösungsvarianten ist in einem iterativen Prozess mit unterschiedlicher Konkretisierung und Komplexität durchzuführen und immer weiter zu verfeinern. Nach der Ausarbeitung von einigen wenigen Lösungsvarianten sind diese neutral auf die zuvor definierten Anforderungen zu beurteilen. Das Ziel dabei ist es, eine ideale Lösung für das gestellte Problem zu finden.

Die Phase III nach Abbildung 2.19 wird von VDI 2223 [139] konkretisiert und ist in Abbildung 2.20 präzisiert. Diese Richtlinie unterstützt bei dem Entwurf einer Komponente und stellt dafür geeignete Methoden und Arbeitsmittel vor. Speziell sollen Gestalt- und Werkstoffeigenschaften im Gestaltungsprozess in dieser Phase festgelegt werden, wobei sich der Begriff des Gestaltens sowohl auf die Festlegung der Gestalt als auch der Werkstoffeigenschaften bezieht. Es wird erläutert, dass bei der Gestaltung einer Komponente verschiedene Tätigkeiten innerhalb der Vorgehensstrategie erforderlich sind. Diese umfassen das Variieren von Lösungsansätzen, die Berechnung von Entwürfen und dessen Analyse sowie das Experimentieren mit Prüfkörpern oder Prototypen, die Beurteilung von Ergebnissen und Entscheidungen, auch wenn darauf verwiesen wird, dass auf aufgabenspezifische Anforderungen nicht eingegangen wird.

Speziell mit dem Entwicklungsprozess mit Computerunterstützung befassen sich u.a. Bauert [28], Bohle [36], Feldhusen [62], Franke [66], Höhne [90], Klose [113], Pahl [161] und Roth [175 bis 177], wobei insbesondere Höhne auf eine durchgängige Verknüpfung einzelner Programme hinweist, welche sich mit einzelnen Entwicklungsschritten im Detail befassen. Dabei sei ein durchgängiger Datenfluss unter Berücksichtigung flexibler Aufgabenstellungen zu gewährleisten. VDI 2221 zeigt auf, dass sich auch rechnerunterstützte Methoden für die Anwendung des allgemeinen Entwicklungsprozesses nach Abbildung 2.19 eignen.

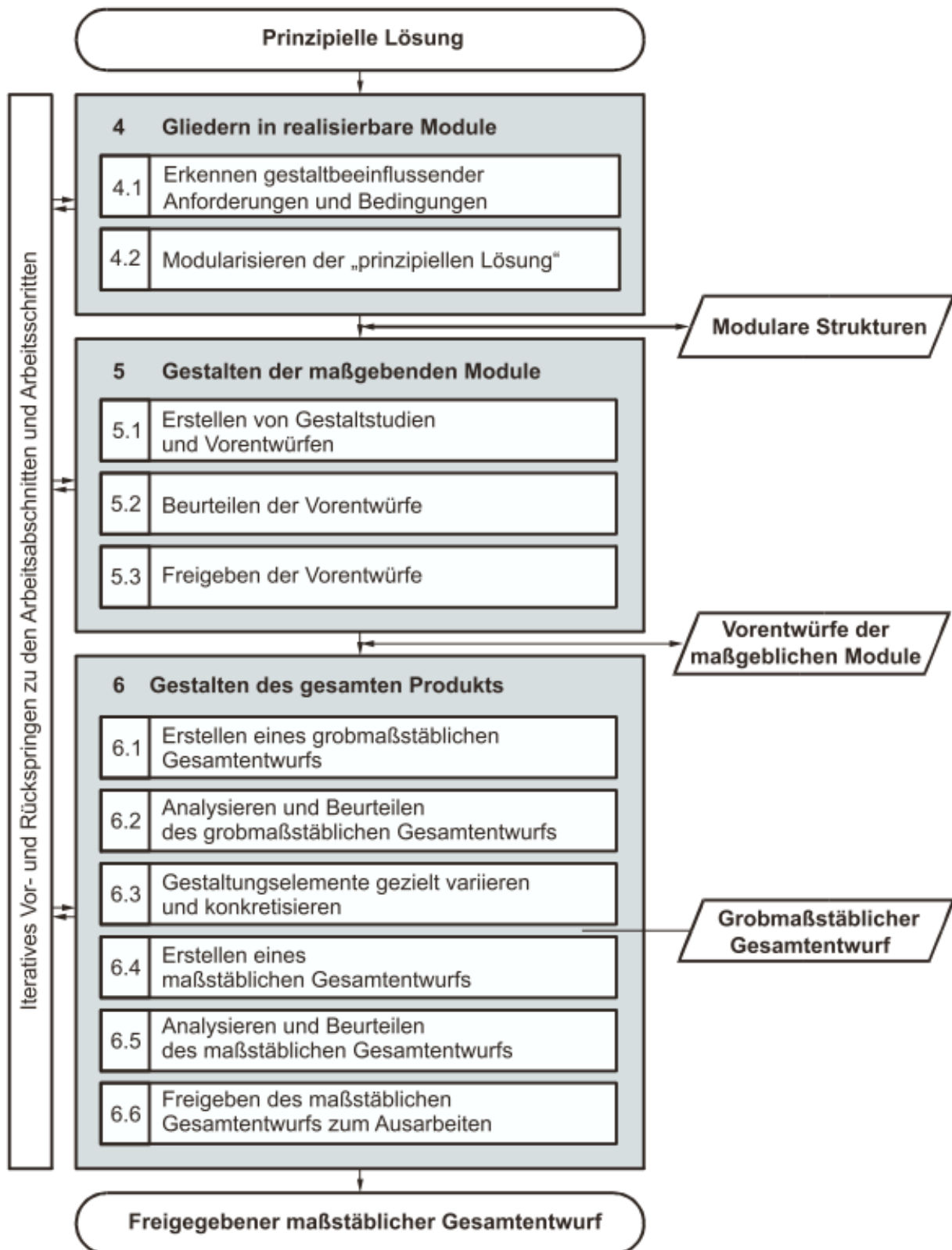


Abbildung 2.20: Vorgehensempfehlung des VDI für den allgemeinen Gestaltungsprozess [139]

Nach VDI 2222 [116] müssen für die Auslegung einer technischen Komponente erste Lösungsansätze in Form von geometrischen Parametern zur Definition von Art, Anordnung und Abmessung zur Definition eines Bauteils möglichst frühzeitig quantitativ beurteilt werden. Dadurch sollen Lösungsvarianten, welche sich als weniger oder gänzlich ungeeignet erweisen, aussortiert werden können. Kesselring [107] nennt dies „orientierende Berechnung“. Müller [147] bezeichnet das Ergebnis zu abschätzenden, quantitativen Fragestellungen u.a. als „Befund“. Weiterhin bezeichnet die VDI 2222 die Unterteilung des Konstruktionsprozess in einzelne Abschnitte als Grundlage des methodischen Vorgehens.

Um eine quantitative Aussage über die Erfüllung bspw. von bestimmten zu ertragenden Lasten zu machen, ist eine Abbildung von physikalischen Effekten unerlässlich. Diese bezeichnen den physikalischen Wirkzusammenhang zwischen Aktion und Reaktion und sind in zahlreichen Abhandlungen thematisiert. Einschlägige Literatur, Tabellenbücher und Kataloge z.B. von Koller [115], Presse [167], Roth [174], Kurth et al. [123] oder Schubert [185] führen vielzählige davon auf.

Für die Modellierung von Wirkstrukturen und Effekten empfehlen die VDI 2223 und Rude [178] ebenfalls die bereits erwähnte Unterstützung durch Rechner. Mithilfe von mathematischen Gleichungen wird dabei die Realität meist mit der Finite-Elemente-Methode (FEM) abgebildet, wie sie u.a. von Klein [109] oder Nasdala [150] umfassend vorgestellt wird. Das Ziel dabei ist, eine möglichst objektive Beurteilung der Lösung in Bezug auf die gestellten Anforderungen zu gewährleisten, wie Feldhusen et al. [63] und Roth [174] vertiefend ausführen. Wobei die geometrische Festlegung des Produkts mit einem Konstruktionsprogramm (engl. Computer Aided Design, CAD [83]) ausgeführt wird und von u.a. Pahl [161] erläutert wird.

Es erfolgt in VDI 2223 eine explizite Empfehlung, bereits in Arbeitsschritt 5.1 „Erstellen von Gestaltstudien und Vorentwürfen“ der Abbildung 2.20 die angedachten Fertigungsverfahren für die Einzelkomponenten zu berücksichtigen. Im Zuge dieses Schritts sollen ebenfalls erste überschlägige Berechnungen in Bezug auf die Anforderungen durchgeführt werden, um frühzeitig die Schwachstellen eines Entwurfs zu identifizieren. CAD Systeme sind in diesem Schritt ungeeignet, da die erforderliche Genauigkeit in der Gestalt, welche für Konstruktionsprogramme benötigt wird, in dieser Phase noch nicht vorliegt.



Im Arbeitsschritt 5.2 „Beurteilen von Vorentwürfen“ der VDI 2223 wird eine FE-Berechnung in Kombination mit einem iterativen Vorgehen empfohlen, um sukzessive die Lösungsansätze zu präzisieren. In den folgenden Arbeitsabschnitten 6.4 „Erstellen des Gesamtentwurfs“ und 6.5 „Analysieren und Beurteilen des maßstäblichen Gesamtentwurfs“ wird die FEM zur weiteren Unterstützung ebenfalls integriert, bleibt bei der Erläuterung jedoch insgesamt oberflächlich und geht gar nicht auf faserverbandspezifische Anforderungen ein. Zur Freigabe des Entwurfs werden umfangreiche FE-Berechnungen in 6.6 „Freigeben des maßstäblichen Gesamtentwurfs zum Ausarbeiten“ explizit gefordert, allerdings wird auf diese Methoden nicht weitergehend eingegangen. Auf materialspezifische Einflüsse wird hingewiesen, diese werden jedoch nicht vertiefend erläutert. Es wird lediglich allgemein erwähnt, dass die Effektivität und Effizienz des Gestaltungsprozess von der Qualität der gewählten Arbeits- und Hilfsmittel in jedem einzelnen Entwicklungsschritt abhängt. Insgesamt seien Berechnungen stets mit einer Restunsicherheit in der Ergebnisinterpretation behaftet, es sei jedoch das Ziel diese durch kontinuierliche Optimierung der Modelle zu minimieren, um so den Entwicklungsprozess zu verkürzen, wie Beater [30] herausstellt.

Vom VDI [117] werden Bewertungsmethoden zur technisch-wirtschaftlichen Eignung von Lösungsansätzen vorgestellt. Diese konzentrieren sich jedoch nicht auf die Bereitstellung von Informationen, wie z.B. hinsichtlich der Berechnung von Kräften oder Temperaturen, sondern beginnen erst bei der Abwägung, welche Anforderungen von welchem Lösungsansatz technisch und/oder wirtschaftlich besser erfüllt werden.

Weiterhin befassen sich einzelne Methoden mit Themen wie der Arbeitsorganisation im Team und dessen Leitung, Gestaltungsprinzipien und -richtlinien, Kostenkalkulationen, Analyse von Problemstellungen, Variationen im Lösungsfindungsprozess, Planungs-, Steuerungs- und Kontrollsystemen uvm., worauf hier nur verwiesen sei [63, 116, 118, 138, 146, 169], da diese nicht im Fokus der Arbeit stehen.

Als Zwischenfazit lässt sich ein bedeutender Nachteil bei den genannten VDI-Richtlinien festhalten. Diese sind so allgemein gefasst, dass sie zwar für nahezu alle Produkte eine Basis schaffen, im Einzelnen jedoch den individuellen Anforderungen nicht gerecht werden. So ist eine direkte Anwendung bspw. auf Organobleche ohne zusätzliche Methoden und Werkzeuge nicht möglich und sie gibt dem Entwickler somit eine ungenügende Hilfestellung. Nachfolgend wird zunächst auf den aktuellen Entwicklungsprozess von Spritzgusskomponenten und die dafür geltenden Erfordernisse eingegangen.

Anschließend werden Ansätze für eine Entwicklungsmethode von Organoblechkomponenten und einzelne erforderliche Entwicklungsschritte erläutert. Eine umfassende Untersuchung von zusammenhängenden, aufeinander aufbauenden Entwicklungsschritten ist nötig, wie bereits Albers et al. [7] herausstellen und in „4 Methodenentwicklung“ vertiefend erläutert wird.

#### **2.4.2 Entwicklungsprozess von Spritzgusskomponenten**

Johannaber und Michaeli [99] oder Bertsche und Bullinger [33] zeigen die Entwicklungsschritte innerhalb einer Produktentwicklung für Spritzgusskomponenten auf, was in Abbildung 2.21 dargestellt ist. Der konkrete Inhalt der einzelnen Punkte lässt sich der angegebenen Fachliteratur entnehmen. In der Abbildung sind die Inhalte der einzelnen Punkte stichpunktartig aufgeführt, nachfolgend sei auf die besonderen Schwierigkeiten bei den aufgezeigten Schritten hingewiesen.

Zum einen stehen die Werkstoffauswahl und die mechanische Auslegung in direkter Wechselwirkung. So kann bspw. eine Konstruktion bzw. Dimensionierung einer Komponente so angepasst werden, dass etwa weniger Material eines technisch höherwertigen Werkstoffs die gleiche Funktion erfüllt wie eine größere Menge eines Materials mit technisch niederwertigeren Werkstoffeigenschaften [39, 99]. Es sind jedoch mehrere Iterationen mit anschließenden Kostenkalkulationen notwendig, um das vermeintlich ideale Werkstoff-Konstruktionskonzept zu finden [99]. Es wird deutlich, dass eine rein sequenzielle Entwicklungskette hier nicht oder nur mit langen Iterationsschritten zu einem zufriedenstellenden Ergebnis führt. Die Wechselwirkungen von Konstruktion und Werkstoff sollten frühzeitig und parallel beachtet werden.

Weiterhin steht die rheologische Auslegung in direkter Wechselwirkung mit den mechanischen Eigenschaften einer Komponente, was Domininghaus herausstellt [53]. Spur [195] beschreibt, dass insbesondere bei faserverstärkten Materialien die Faserorientierung stark von geometrieabhängigen fließtechnischen Prozessen beeinflusst ist. Bei Organoblechen ist eine äquivalente Simulation für die Drapierung nötig. Bei einer Füllsimulation werden Effekte wie thermische Schwindung, Kühlung und eine strömungsinduzierte Faserorientierung vorhergesagt.

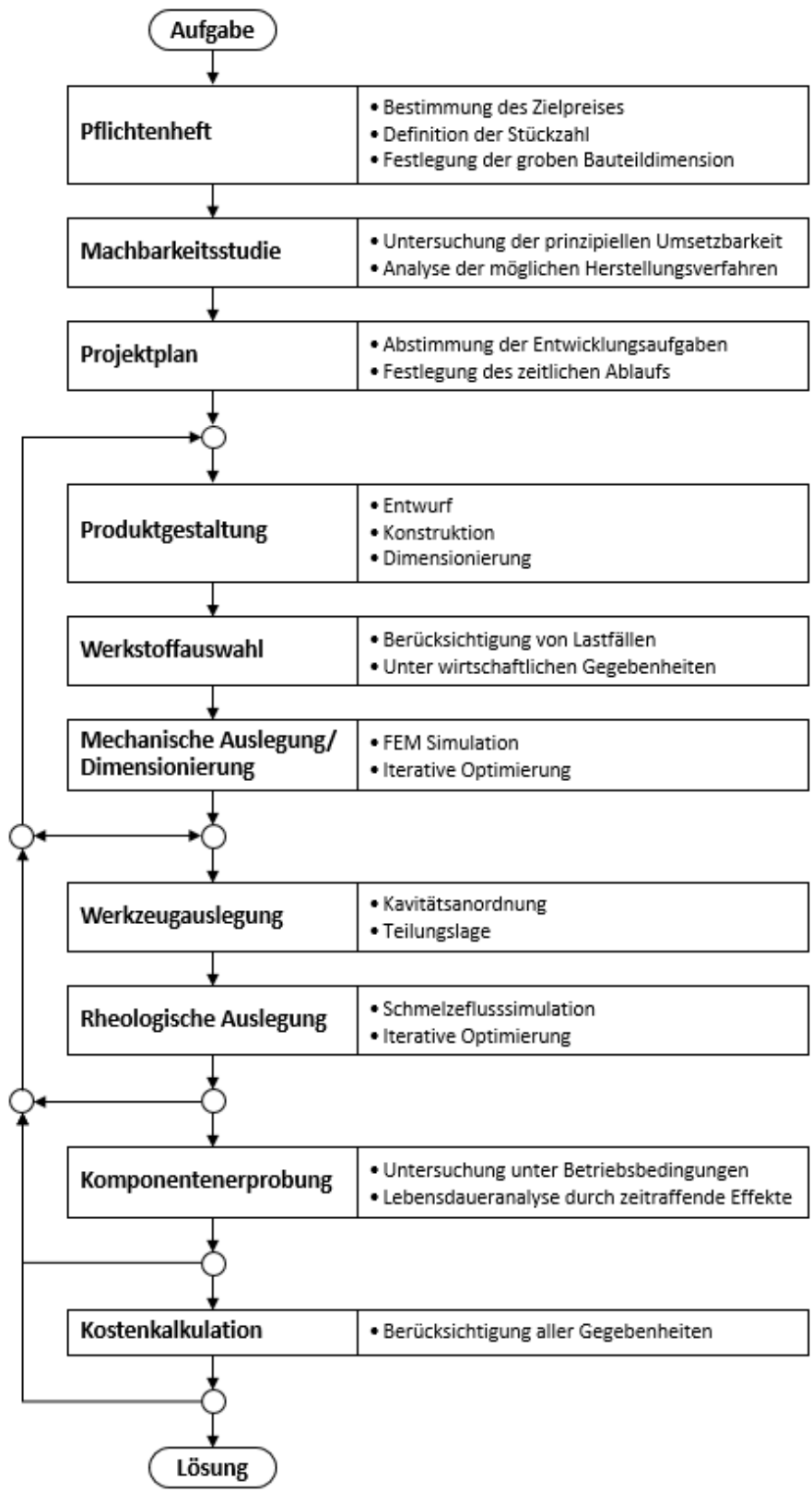


Abbildung 2.21: Schematische Entwicklungskette für Spritzgusskomponenten [eigene Darstellung vgl. 33, 99]

Die Ergebnisse einer solchen Prozesssimulation werden für eine anschließende Strukturanalyse über ein Schnittstellenprogramm übertragen und berücksichtigt [195]. Hierbei wird meist der englische Begriff „mapping“ verwendet. Zusammenfassend wird erkennbar, dass die mechanische Auslegung einen Einfluss auf die Geometrie einer Komponente hat, wodurch die Rheologie in der Herstellung beeinflusst wird. Die veränderte Rheologie wirkt sich maßgeblich auf die Faserorientierung aus, was wiederum das Bauteilverhalten und somit die Auslegung affektiert.

Auch hier ist ersichtlich, dass eine rein sequenzielle Entwicklung unzulänglich ist, da mehrere Iterationsschritte für eine optimale Bauteilauslegung notwendig sind. Daher ist auch eine Betrachtung des Entwicklungsprozesses von Organoblechkomponenten über einzelne Entwicklungsschritte hinweg unabdingbar und muss in der zu entwickelnden Methode als fester Bestandteil berücksichtigt werden.

### **2.4.3 Entwicklungsprozess von Organoblechkomponenten**

Eine standardisierte Entwicklungskette, die dem Beispiel für Spritzgusskomponenten folgt, hat sich für endlosfaserverstärkte Thermoplaste bisher nicht etabliert. Häufig ist der Entwicklungsprozess um den wesentlichen Entwicklungsschritt der Drapiersimulation reduziert, wobei in der Lastsimulation, welche im Rahmen einer Machbarkeitsstudie durchgeführt wird, die Faserorientierung manuell vorgenommen und als orthotrop angenommen wird.

Neitzel et al. [151] erläutern zwar allgemein den Herstellungsprozess von Organoblechkomponenten und weisen explizit auf die unerlässliche Drapiersimulation hin, binden diese jedoch nicht in einen zusammenhängenden Entwicklungsprozess ein. Ehleben [57] weist ausdrücklich drauf hin, dass eine durchgängige Entwicklungskette einzuhalten ist, bei der ein Umformprozess abgebildet werden muss, erläutert jedoch nicht weiter, wie das konkret umgesetzt werden kann..

Zwar existieren einige Abhandlungen zur Bestimmung der Faserorientierung in Folge der Drapierung durch Simulationen, wie bei Lamers et al. [126], Kenkare et al. [106] oder Kang et al. [104] uvm., dennoch sind diese in der Regel auf Grund Ihrer Komplexität im industriellen Entwicklungsprozess nicht nachvollzogen. Außerdem beziehen sich diese Abhandlungen meist auf trockene Gewebe oder auf duromerbasierte PrePreps und berücksichtigen nicht das Materialverhalten bei dem realen Formprozess oberhalb der Schmelztemperatur der Matrix.

Ebenso verhält es sich bei zahlreichen Anstrengungen bspw. von Girdauskaite et al. [70], Potluri et al. [166], Zhu et al. [210] Orawattanasrikul [157], Boisse et al. [37], Cao et al. [44], Lomov et al.

[132], Harrison et al. [81] und Launay et al. [97], welche das Ziel haben das Drapierverhalten zu charakterisieren. Diese haben besonders eine Abbildung des Umformprozesses als Ziel und untersuchen u.a. auch die in „2.3.1 Modellierungsebenen“ näher erläuterten Modellierungsebenen. Hier findet jedoch keine spezielle Untersuchung für Organobleche statt, sondern es stehen Verstärkungsgewebe im Allgemeinen im Fokus. Außerdem werden die Untersuchungen nicht in den Kontext eines Entwicklungsprozesses eingeordnet.

Bspw. fokussieren sich Riedel et al. [170] auf die Abbildung von Leichtbauwerkstoffen in Simulationsmodellen, konzentrieren sich dabei jedoch auf die Lastsimulation und binden diese nicht in einen allgemeinen Entwicklungsprozess ein. Es wird nicht erläutert, wie die oben mehrfach erwähnte, nicht vernachlässigbare Faserorientierung als Folge der Drapierung zu berücksichtigen ist.

Einen äußerst umfassenden Überblick über FKV bietet Schürmann [187]. Er widmet sich speziell den Fasern, der Matrix, den Werkstoffgesetzen, der Materialcharakterisierung, den Festigkeitsanalysen, dem Langzeitverhalten, dem Laminatentwurf und den Füge Technologien. Aber auch er bindet all diese einzelnen und überaus wichtigen Themen nicht in einen Produktentwicklungsprozess ein. Speziell auf Simulationmöglichkeiten wird überhaupt nicht eingegangen.

Einen Ansatz zur Entwicklung und Dimensionierung fassen Ku et al. [122] zusammen und stützen sich dabei im Wesentlichen auf einen Forschungsbericht von Michaeli et al. [140]. Zur Verdeutlichung dient Abbildung 2.22. Allerdings zielt diese Arbeit stark auf Komponenten aus FKV mit duromerer Matrix ab und konzentriert sich nicht auf Organobleche. Eine Übertragbarkeit auf die Materialgruppe der endlosfaserverstärkten Thermoplaste ist weder gewährleistet noch untersucht. Dies findet aus diesem Grund in den nachfolgenden Ausführungen statt. Weiterhin stehen dort die Lastsimulationen speziell im Hinblick auf den Mehrlagenaufbau im Vordergrund. Eine Drapiersimulation mit einer Materialkarte, die unter Prozesstemperatur erstellt wurde, findet nicht statt. Der angegebene Entwicklungsprozess schafft jedoch eine Grundlage, welche für Organobleche erweitert werden kann und wird daher in Auszügen verwendet. Diese werden im Rahmen von „4 Methodenentwicklung“ konkretisiert.

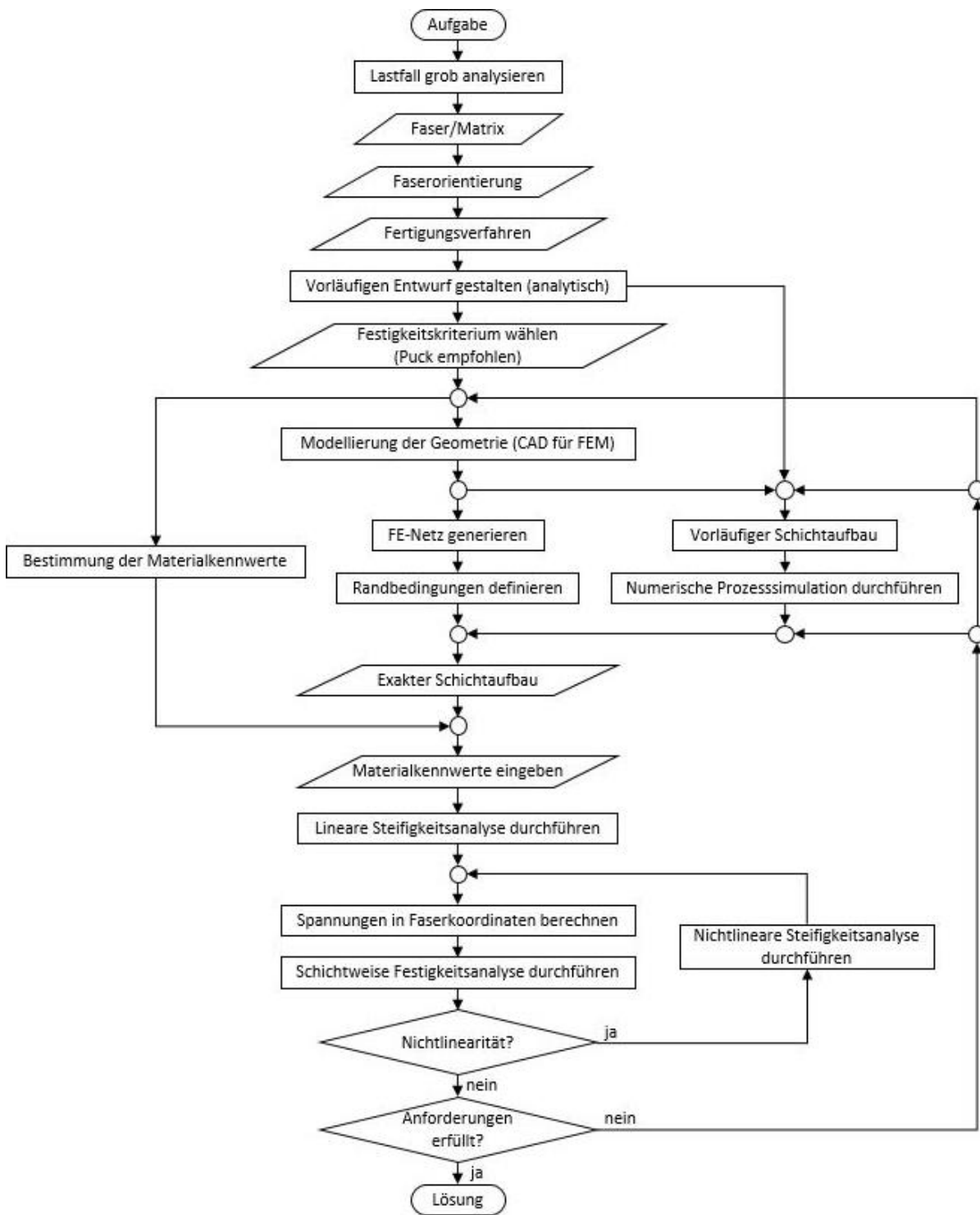


Abbildung 2.22: Ablaufdiagramm für die Entwicklung einer FKV-Komponente mit duromerer Matrix [122, 140]

Aktuell findet die mechanische Auslegung und Dimensionierung in der industriellen Praxis meist ohne die berechnete Faserorientierung aus der Prozesssimulation statt und es wird in diesem Entwicklungsschritt eine manuelle, orthotrope Faserorientierung angenommen. Nachfolgend wird zur klaren Unterscheidung in den Begrifflichkeiten bei einer Vorauslegung im Rahmen einer Machbarkeitsstudie keine simulierte Prozesssimulation vorangestellt, während bei einer mechanischen Auslegung und Dimensionierung zunächst diese Prozesssimulation durchgeführt und berücksichtigt wird. Nach dieser Definition findet aktuell die Auslegung und Dimensionierung lediglich im Rahmen einer Vorauslegung statt.

### 3 Zielsetzung und Arbeitshypothese

Das Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung einer Methode, mit welcher endlosfaserverstärkte Thermoplaste für den Großserieneinsatz in der Automobilindustrie mit weniger experimentellem Aufwand durch realitätsnähere und anhand weniger Unsicherheiten belasteten Simulationen ausgelegt werden können.

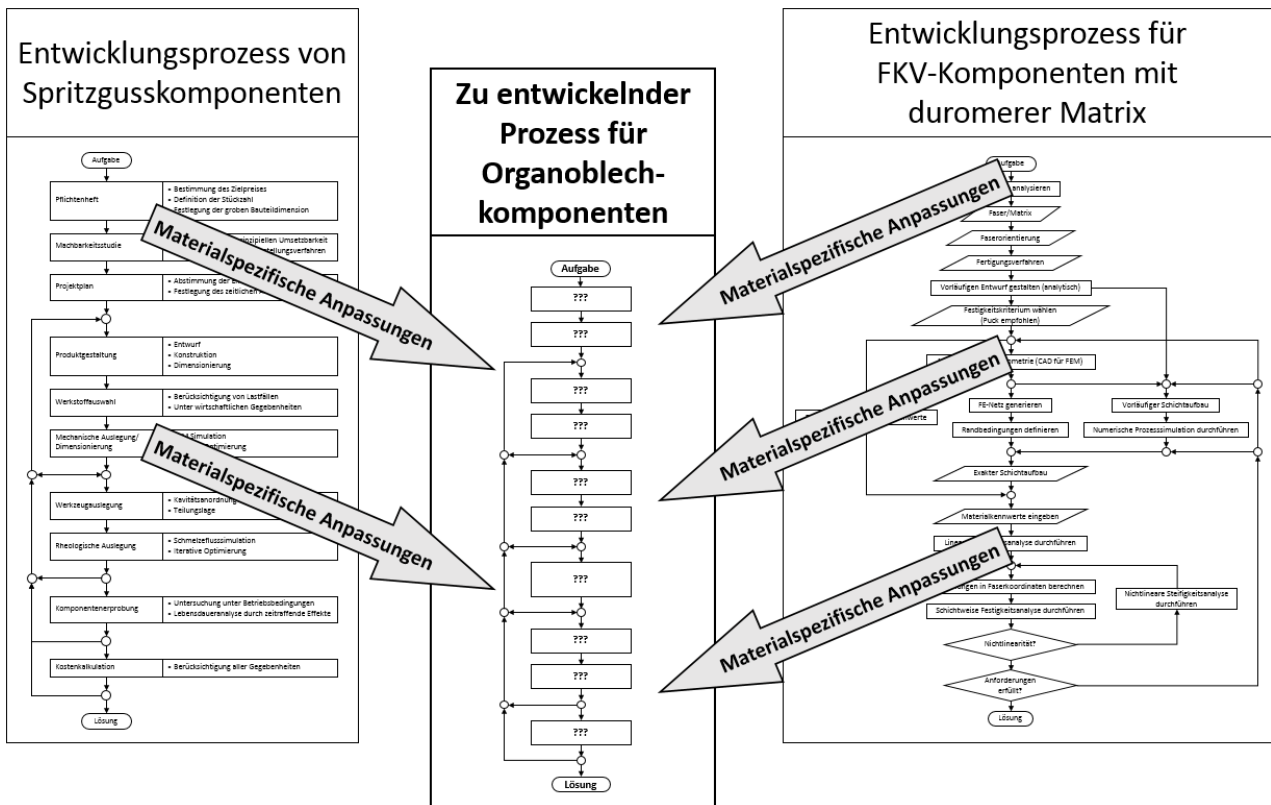
Eine auf alle zu entwickelnde Organoblechkomponenten in der Automobilindustrie übertragbare Methodik soll entstehen, anhand derer hohe Anforderungen an Sicherheit, Qualität und Leistung in der Großserie der Automobilindustrie bei gleichzeitigem Kosten- bzw. Konkurrenzdruck effizient erfüllt werden können. Dazu müssen die Entwicklungsschritte innerhalb kurzer Zeit und aufeinander abgestimmt erfolgen. Dies muss durch robuste Simulationen erfolgen, welche in der Lage sind, die Realität mit hoher Güte numerisch und stabil abzubilden. Auf Grund der vielzähligen Anforderungen an verschiedenste Komponenten werden jedoch vereinzelt Einschränkungen getroffen werden müssen.

Im Fokus der nachfolgenden Untersuchung stehen lediglich die technischen Aspekte des Produktentwicklungsprozesses und nicht die Lösungsansätze von technischen Problemen im Zusammenhang mit Organoblech. Es soll daher insbesondere eine Methode erarbeitet und validiert werden, welche es ermöglicht bereits gefundene Lösungen auf deren Eignung zu überprüfen. Die Werkzeugauslegung für die Verarbeitung solcher Materialien wird nicht näher untersucht, da sie den Rahmen der Arbeit auf Grund der komplexen Zusammenhänge überschreiten würde. Außerdem sind insbesondere Auslegung und Konstruktion von Bauteilen relevant für die Automobilindustrie, wohingegen der Werkzeugbau und die Produktion von Einzelteilen häufig bei Zulieferern stattfinden [137].

Zwar ergeben sich auch bei der Herstellung, der Reparatur und beim Recycling von Organoblechkomponenten einige andere und teilweise neue Herausforderungen und Probleme im Vergleich zu Bauteilen aus herkömmlichen Materialien, jedoch wird nicht der vollständige Produktlebenszyklus untersucht. Es sei jedoch auf die mit dem Leichtbau verbundenen Vorteile und auf die im Vergleich zu duromeren FKV gute Rezyklierbarkeit hingewiesen. Die mit dem Material einhergehenden neuen Anforderungen bzgl. dieser Herausforderungen sind als bereits im Lastenheft definiert anzunehmen und werden somit in der vorliegenden Arbeit nicht thematisiert.



In „2. Stand der Wissenschaft und Technik“ wurden bereits einige Lücken in aktuellen Vorgehensweisen und Prüfmethode aufzeigt, die zum aktuellen Zeitpunkt einem effizienten Entwicklungsprozess für Organoblechkomponenten entgegenstehen. Dazu gehört insbesondere eine nicht vorhandene Prüfmethode, welche es ermöglicht, die Gewebescherung und den kritischen Scherwinkel fertigungsprozessnah zu bestimmen. Außerdem gibt es keinen durchgängig betrachteten Entwicklungsprozess, welcher unterschiedliche Modellierungsebenen enthält, um einem dem Entwicklungsschritt angepassten Modellierungsaufwand gerecht zu werden. Es mangelt weiterhin an einer Beurteilung, welche Einträge in der Materialkarte einen maßgeblichen Einfluss auf die Drapiersimulation von Organoblechen haben.



**Abbildung 3.1:** Schematische Darstellung der Kombination bestehender Vorgehensstrategien zu einem optimierten Organoblechentwicklungsprozess

Durch eine Anpassung der aktuellen Entwicklungskette für Organoblechkomponenten gemäß der Vorgehenslogik aus erarbeiteten VDI-Richtlinien soll die Effizienz bei der Komponentenentwicklung gesteigert werden. Dabei soll eine Anpassung und Übertragung bereits bestehender Entwicklungsschritte zur Entwicklung von Spritzgusskomponenten und duromeren FKV-Bauteilen stattfinden, was

in Abbildung 3.1 schematisch dargestellt ist, um so die Vorhersagegüte der Modelle zur Charakterisierung des Bauteilverhaltens in verschiedenen Lastfällen zu optimieren. Dadurch soll es möglich sein, die Anzahl zeit- und kostenintensiver Komponententests zu reduzieren und somit die gesamte Entwicklungsdauer zu verkürzen.

## 4 Methodenentwicklung

Nachfolgend wird dargelegt, wie eine Methode zur Auslegung und Dimensionierung von Organoblechkomponenten zu gestalten ist, damit diese in einen allgemeinen Entwicklungsprozess, wie er in der VDI 2221 vorgeschlagen ist, effizient eingebunden werden kann. Die VDI Richtlinie befasst sich mit Methoden und integriert diese in eine allgemeine Vorgehensstrategie. Je nach Anwendungsfall und Entwicklungsschritt werden verschiedene Methoden von der Richtlinie zur Bearbeitung des jeweils vorliegenden Problems vorgeschlagen und sollten vom Anwender als eine Art Werkzeug aufgegriffen und in den Entwicklungsprozess eingebunden werden.

Durch die Bereitstellung einer allgemeinen Vorgehensstrategie, welche sich verschiedener einzelner Methoden bedient, besteht die Möglichkeit diese einzelnen Methoden zu optimieren oder um weitere Methoden zu ergänzen, ohne dass die gesamte Vorgehensweise betroffen oder gar beeinträchtigt ist. Vielmehr ist anzunehmen, dass durch die Optimierung, Präzisierung bzw. Erarbeitung einzelner Entwicklungsbausteine das gesamte Vorgehen in seiner Effektivität und Effizienz gesteigert wird. Z.B. wird durch Optimierung einer Simulationsmethode, wie sie als einzelner Baustein eines gesamten Produktentwicklungsprozesses nach „2.4 Produktentwicklungsprozess“ eingebunden ist, die Vorhersagegüte eines Bauteilverhaltens verbessert. Dadurch wird der Entwicklungsprozess effizienter, ohne dass die gesamte Vorgehensweise im Wesentlichen anzupassen ist. Daher ist es als sinnvoll angenommen, dass die Erarbeitung und Bereitstellung einer Methode, welche bei der Auslegung und Dimensionierung unterstützt, ebenfalls das gesamte Vorgehen in der Bauteil- oder Systementwicklung optimiert.

Insbesondere in der Simulation ist bei zusammenhängenden oder stark aufeinander aufbauenden Entwicklungsschritten auf eine durchgehende Informationsübertragung zwischen einzelnen Softwaresystemen zu achten. Die Verwendung von Programmschnittstellen birgt dabei immer die Gefahr eines Informationsverlustes. Obwohl also Untersuchungen zu einzelnen Entwicklungsschritten vorliegen, lassen sich diese bei der Verwendung von unterstützenden Softwarelösungen nicht ohne weiteres kombinieren. Es muss also eine stringente Durchgängigkeit der CAE-Software unter Berücksichtigung von Datenkompatibilitäten beachtet werden. Für die meisten einzelnen Bestandteile einer Entwicklungskette existieren bereits vielfältige Untersuchungen, welche detailliert und umfassend durchgeführt wurden. Jedoch sind diese Ergebnisse meist stark isoliert betrachtet und werden nicht im Kontext einer gesamten Entwicklungskette betrachtet.

Auf Grund des hier gelegten Schwerpunkts bei der Entwicklungsmethode soll die oben in Abbildung 2.20 aufgezeigte allgemeine Vorgehenslogik in den Punkten 5 und 6 für Organobleche fokussiert werden.

Der Schwerpunkt bei diesem Vorgehen liegt in der Projektierung aus der Perspektive eines Automobilherstellers. Besondere Probleme ergeben sich dadurch, dass die Verantwortung für die Entwicklung meist nicht vollständig bei einem Unternehmen liegt, sondern aus einem komplexen Zusammenspiel z.B. von Materialherstellern, Werkzeugbauern, Zulieferern und ggf. zusätzlichen Prüflaboren oder Entwicklungsdienstleistern besteht. Es ist daher sinnvoll, die einzelnen Entwicklungsschritte klar voneinander zu trennen, um ggf. verschiedene Teams u.U. auch bei verschiedene Unternehmen oder Instituten mit unterschiedlichen Aufgaben zu beauftragen.

Auf Grund der engen Verzahnung der verschiedenen Entwicklungsschritte ist ein umfassender Informationsaustausch nötig, um ein reibungsloses Vorgehen zu ermöglichen und einen eventuellen Konflikt mit wirtschaftlichen Interessen des Unternehmens zu vermeiden. So ist es für die einzelnen Unternehmen unerlässlich, das Fachwissen und die Fertigkeiten im jeweiligen Zuständigkeitsbereich umfassend zu schützen, um auch langfristig am Markt bestehen zu können. Gleichzeitig ist es nötig die wesentlichen Informationen für die Entwicklung bereitzustellen. Da in dieser Arbeit die wirtschaftlichen Zusammenhänge nicht untersucht werden, wird an dieser Stelle auf evtl. auftretende Schwierigkeiten beim Informationsaustausch hingewiesen, allerdings kann hier nicht der Anspruch erhoben werden diese Schwierigkeiten auszuräumen.

Durch die Abarbeitung einer Reihe von Entwicklungsschritten, wie sie in der nachfolgenden Ausarbeitung im Einzelnen vorgestellt werden, und durch Einhaltung der an den jeweiligen Stellen vorgeschlagenen Iterationsschritte, kann mit vertretbarem Arbeits- und Kostenaufwand ein Bauteil entwickelt werden. Einen entscheidenden Anteil wird dabei die Entwicklung eine Prüfmethode haben, welche den aktuell verwendeten Scherrahmenversuch an trockenem Gewebe auf Organobleche bei Prozessbedingungen erweitert.

In zwei verschiedenen Ansätzen zur Durchführung von Lastsimulationen, welche sich im Wesentlichen in Komplexität und Vorhersagegüte von der Realität unterscheiden, werden zwei verschiedene Iterationsschleifen voneinander getrennt durchlaufen. Im Rahmen einer Vorauslegung kann dabei – mit Abstrichen in der Genauigkeit – mittels einer weniger aufwändigen Simulation vorgegangen wer-

den. In einer End- bzw. Detailauslegung erhöht sich durch die Berücksichtigung des realen Herstellungsverfahrens in einer Prozesssimulation zwar der zu betreibende Aufwand, gleichzeitig steigt dadurch aber auch die Vorhersagegüte.

#### **4.1 Übertragbarkeit von bestehenden Entwicklungsschritten auf die Entwicklung von Organoblechkomponenten**

Die Grundmaterialien bei einem Organoblech bestehen aus den sonst bereits umfangreich untersuchten thermoplastischen Matrices und den ebenfalls gängigen Geweben, welche in Strukturbauteilen überwiegend mit duromeren Matrixsystemen im Einsatz sind. Deutlich länger im Einsatz und weiter verbreitet sind thermoplastische Spritzgussmaterialien, weshalb eine Anlehnung an dafür etablierte Entwicklungsmethoden anzustreben ist. Das Materialverhalten beim Form- bzw. Drapierprozess, wie er in „2.2.4 Organoblechverarbeitung“ beschrieben ist, lässt sich thematisch jedoch insbesondere auch mit dem Drapierverhalten von endlosfaserverstärkten Duromeren vergleichen, weshalb das Organoblech bzw. dessen Materialbeschreibung zur Durchführung einer Prozesssimulation inklusive der zugehörigen Materialtests an die duromeren FKV angelehnt sein müssen.

Folglich muss es möglich sein, durch eine Kombination und Anpassung von bestehenden Entwicklungsschritten aus dem thermoplastischen Spritzgussbereich und den FKV auf Duromerbasis eine Entwicklungsmethode zu erstellen, welche sich für Organobleche eignet. Aus der aufgezeigten Entwicklungskette für Spritzgussbauteile lassen sich die wesentlichen Unterschiede und somit die notwendigen Anpassungen für Organobleche herausarbeiten. Dabei wird analysiert, welche Informationen für den jeweiligen Entwicklungsschritt vorhanden sein müssen bzw. woher diese kommen können.

Insbesondere die Drapiersimulation und die anschließende Lastsimulation werden genauer betrachtet und validiert, um die Eignung der Entwicklungskette zu bestätigen. Hierdurch ist die Übertragbarkeit aus der Entwicklungskette für Spritzgusskomponenten mit der Charakteristik von duromeren FKV als bestätigt anzunehmen.

## 4.2 Analoge Anwendung der Entwicklungsmethode

Bei der Entwicklung von verschiedenen technischen Systemen haben sich bereits vielzählige Vorgehensstrategien für unterschiedlichste Bedürfnisse etabliert. Diese bauen bei komplexen Herausforderungen in der Regel auf einem stark schrittweisebasiertem Vorgehen mit mehreren Iterationsschleifen auf, bei welchen der Informationsgehalt sukzessive erhöht wird und eine vermeintlich ideale Lösung zu einem technischen Problem angenähert wird. Da diese allgemeine Arbeitsmethodik seit nahezu dem Beginn der wissenschaftlichen Aufarbeitung von Arbeitsmethoden etabliert und auch in praktischen Anwendung in Entwicklungsprozessen weit verbreitet ist, soll die hier entwickelte Vorgehensmethodik ebenfalls darauf basieren.

Wie bereits in „2.4.3 Entwicklungsprozess von Organoblechkomponenten“ beschrieben, ist es bei der Simulation von Organoblechen unerlässlich, die Faserorientierung in Folge der Drapierung zu berücksichtigen, da sich die Faserorientierung maßgeblich auf das Bauteilverhalten unter Last auswirkt. Äquivalent ist dies für den Spritzgussprozess vorgesehen, wodurch eine Ableitung dieses Entwicklungsschritts für die Entwicklung von Organoblechkomponenten einzubinden ist. Das zu Grunde liegende Berechnungsmodell, welches dazu in der Lage ist, muss dafür geschaffen werden.

Bei der Entwicklung von Spritzgusskomponenten ist die Durchführung von Füllsimulationen, aus welchen die Faserorientierung hervorgeht, mit relativ viel Aufwand verbunden. Deshalb ist meist eine Machbarkeitsstudie vorangestellt, um nicht zielführende Lösungsansätze aus der Entwicklung frühzeitig auszuschließen. Es ist auf Grund der oben erwähnten Abhandlungen anzunehmen, dass die Komplexität in Prozesssimulationen in der Tendenz bei Organoblechen vergleichbar oder sogar höher ist als die von Spritzgusskomponenten oder FKV mit duromerer Matrix. Deshalb sollte auch bei dem Organoblechentwicklungsprozess eine Simulation in Form einer Machbarkeitsstudie bzw. einer Vorauslegung durchgeführt werden, um nicht jeden einzelnen Lösungsansatz in einer aufwändigen Prozesssimulation abzubilden.

Erst im Anschluss an die Prozesssimulation ist eine Lastsimulation durchzuführen, bei welcher zu ertragende Lasten, Durchbiegungen o.ä. zu berechnen sind. Hierzu muss jedoch speziell die Schnittstelle zwischen den beiden Simulationen dazu in der Lage sein, die Faserorientierung als Ergebnis zu übertragen. Dagegen sind das Materialgesetz und die zugehörige Materialkarte auszutauschen, um das Verhalten bei Raumtemperatur abzubilden.

Äquivalent zu Spritzgussmaterialien wird es nötig sein, die Materialien für Prozess- und Lastsimulation zu charakterisieren. Da die übrigen Entwicklungsschritte nicht innerhalb der Kette verschoben sind, kann die Materialauswahl bzw. die Charakterisierung an der gleichen Position der Vorgehenslogik stattfinden. In VDI 2222 wird erläutert, dass physikalische Effekte genutzt werden müssen, um Funktionen und Funktionsstrukturen zu realisieren. Diese Effekte werden dementsprechend in den Simulationen abgebildet und quantifiziert.

Abbildung 4.1 zeigt die Entwicklungskette, welche dieser Logik folgt. Im Vergleich zur bisherigen Entwicklungsmethode wurden die beiden Punkte „Prozesssimulation“ und „Mechanische Auslegung/Dimensionierung“ ergänzt, wobei diese stark an den Spritzgussmaterialien angelehnt ist.

Die Analyse und Anpassung der einzelnen Entwicklungsschritte, welche eine Komponente im Zuge ihrer Entwicklung zu durchlaufen hat, wird nachfolgend untersucht. Diese dienen im Endeffekt der Prädiktion des Bauteilverhaltens im jeweiligen Lastfall, um so zeit- und kostenintensive reale Versuche weitestgehend zu minimieren. Dies inkludiert wiederum die Prozess- bzw. Umformsimulation, da hier die Faserorientierung bestimmt wird, welche sich direkt auf das spätere Verhalten auswirkt.

Speziell untersucht wird die Entwicklungskette ab der Machbarkeitsstudie, wohingegen die Projektplanung in dieser Arbeit nicht fokussiert wird, da sich die Kommunikation und Koordinierung von Teams durch die Verwendung von endlosfaserverstärkten Materialien nicht maßgeblich ändern. Die Werkstoffauswahl ist weitestgehend hinfällig, da die Methode unabhängig vom jeweiligen Material innerhalb der Kategorie der endlosfaserverstärkten Thermoplaste übertragbar sein soll, allerdings wird dafür eine Untersuchung stattfinden, wie Materialien für die nachfolgenden Simulationen charakterisiert werden müssen.

Eine Komponentenerprobung allgemein in eine Entwicklungsmethode zu integrieren ist auf Grund der vielfältigen Anforderungen und Lastfälle, welche für jede Komponente individuell stark unterschiedlich sein können, nicht möglich. Je nach konkreter Anwendung muss ein besonderer Test zur Validierung der Funktion eines Bauteils vorgenommen werden. Daher kann für diesen Entwicklungsschritt kein Anspruch auf Allgemeingültigkeit erhoben werden. In der vorliegenden Arbeit soll jedoch beispielhaft eine solche Erprobung stattfinden.

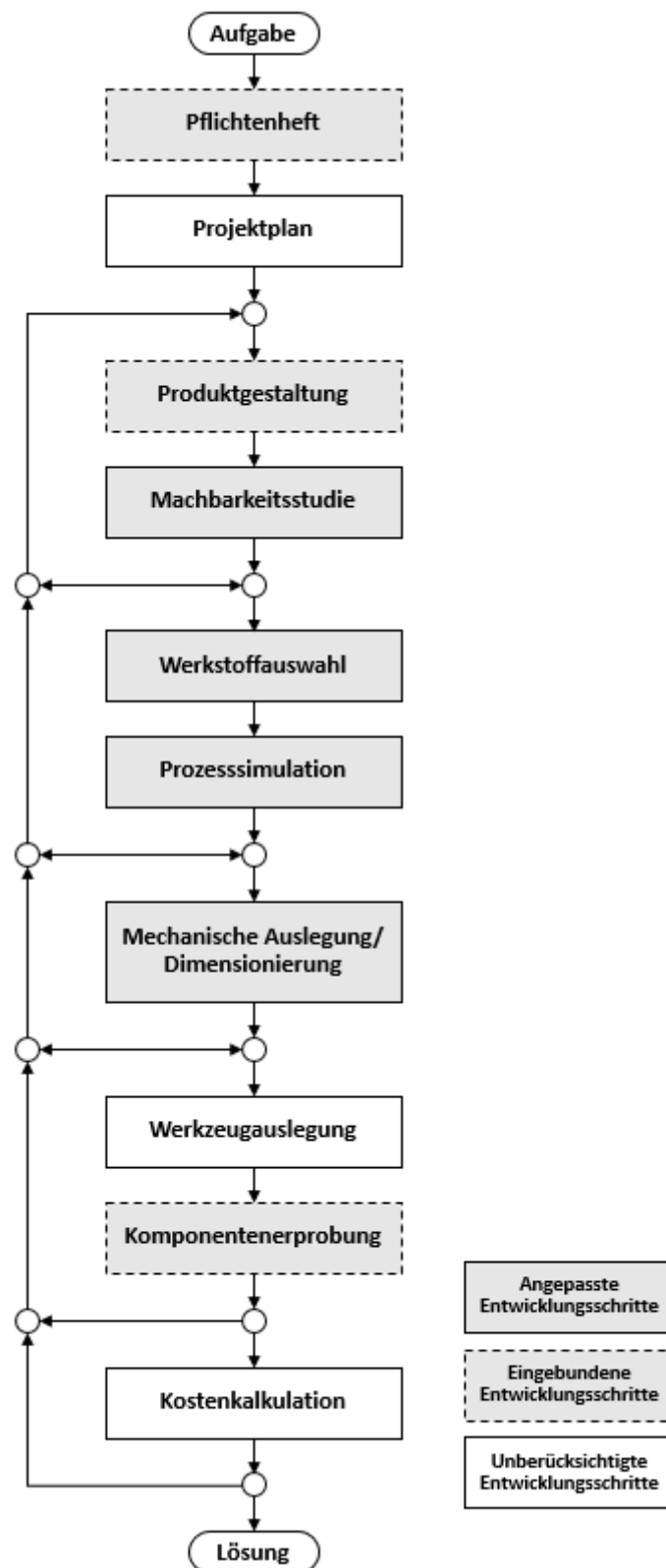


Abbildung 4.1: Angestrebte Entwicklungskette zur Optimierung des Produktentstehungsprozesses



Wie eine Kostenkalkulation für Organoblechkomponenten aufgebaut wird, wird ebenfalls nicht im Fokus stehen, da betriebswirtschaftliche Zusammenhänge für diese Arbeit nicht im Detail betrachtet werden. Lediglich die technischen Aspekte der aufzubauenden Entwicklungskette werden nachfolgend thematisiert.

Es wird außerdem festgestellt, ob auf Basis von mechanischen Materialkennwerten, welche einem Datenblatt entnommen werden können, eine mechanische Auslegung bzw. Dimensionierung einer Komponente möglich ist. Die Materialkennwerte im Datenblatt werden anhand von Prüfungen nach verschiedenen Normen am unverarbeiteten Organoblech erzeugt. Unter der Annahme, dass sich die Materialparameter nicht wesentlich durch die Verarbeitung verändern, werden diese Kennwerte in einer Lastsimulation verwendet. Die Zulässigkeit dieser Annahme wird ebenso überprüft.

### **4.3 Adaptierung der Entwicklungsschritte**

Um die Ziele dieser Arbeit zu erreichen und alle Aufgaben zu erfüllen, wird die angestrebte Entwicklungskette anhand eines Musterbauteils in zwei geometrisch verschiedenen Varianten und jeweils zwei unterschiedlichen Faserorientierungen umgesetzt. Die zu entwickelnde Komponente wird exemplarisch die Entwicklungskette durchlaufen und dazu dienen, aufkommende Probleme und Fragestellungen zu identifizieren, zu lösen bzw. zu beantworten und im Anschluss das Vorgehen zu validieren. Da eine reale Fahrzeugkomponente meist sehr speziell auf bestimmte Anforderungen zugeschnitten ist, kann nicht davon ausgegangen werden, dass die Untersuchung eines einzigen Bauteils alle Probleme aufzeigen oder gar beantworten kann. Daher wird speziell hierfür eine Komponente entwickelt, die insbesondere für die Drapier- und Lastsimulation möglichst anspruchsvoll ist.

Das zu entwickelnde Bauteil ist demnach kein Bestandteil eines Fahrzeugs und wird nachfolgend zur klaren Unterscheidung von einer regulären Fahrzeugkomponente als „Demonstrator“ bezeichnet, da dieser zur Demonstration einer realen Entwicklung dient und gleichzeitig bei der Beantwortung einer Vielzahl von offenen Fragen unterstützende Funktion haben wird. Das geplante Vorgehen wird in Abbildung 4.2 schematisch aufgezeigt. Die konkret zu untersuchenden Inhalte sind darin stichpunktartig beschrieben.

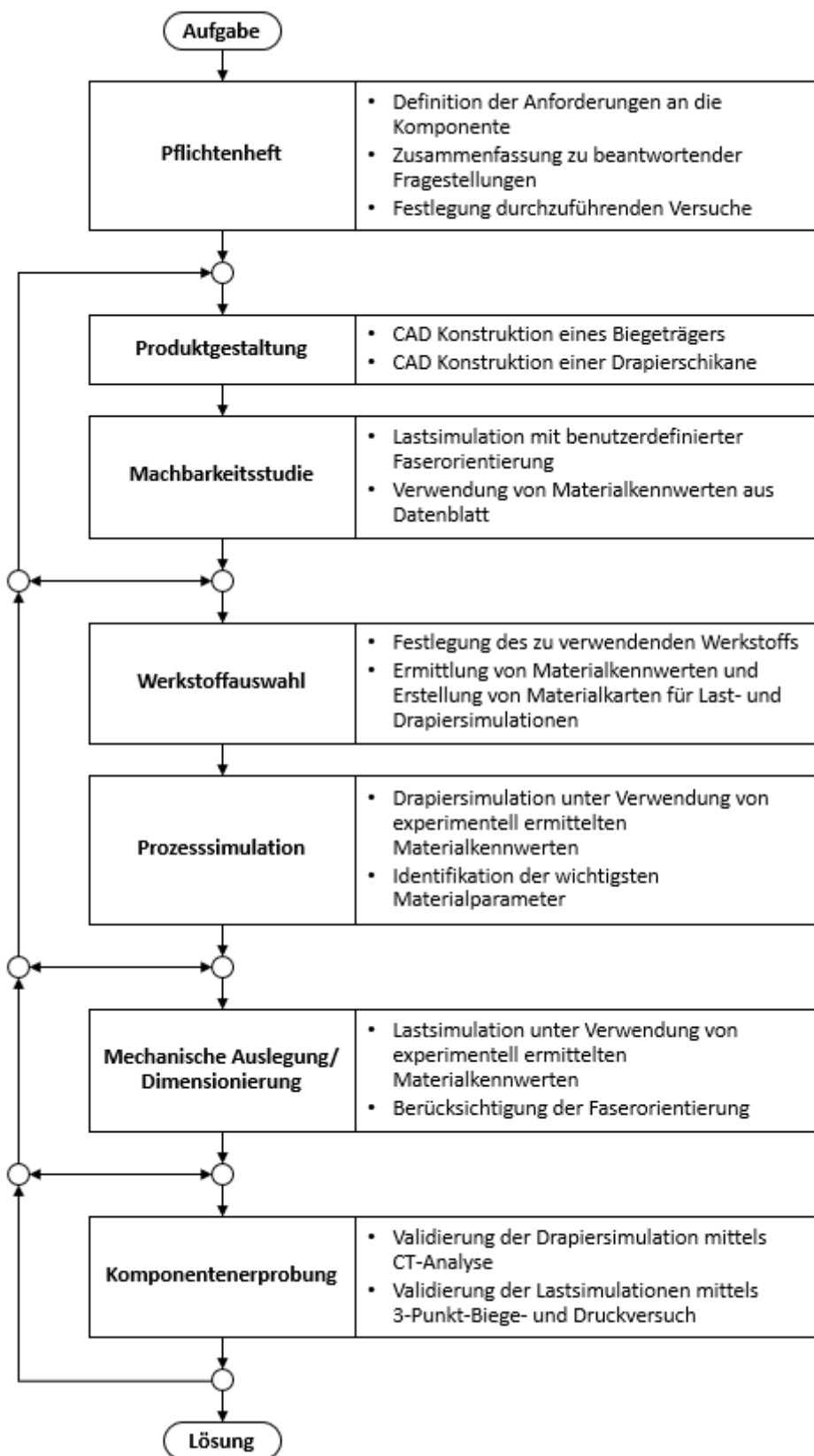


Abbildung 4.2: Darstellung des zu beschreitenden Lösungswegs

Dem Demonstrator wird eine möglichst komplexe Drapierung für das Material abverlangt, welche in der Prozesssimulation vorhersagbar sein muss. Durch eine erfolgreiche simulative Vorhersage der Drapierung wird gezeigt, dass das zu Grunde liegende Simulationsmodell ebenso dazu in der Lage ist, bei der Entwicklung einer Fahrzeugkomponente den gleichen Zweck zu erfüllen. Anschließend wird zusätzlich auf Basis der Prozesssimulation eine Lastsimulation durchgeführt, bei welcher Spannungszustände und resultierende Verformungen vorhergesagt werden. Durch eine Erhöhung der Genauigkeit in der Vorhersagegüte im Vergleich zur bisherigen Entwicklungskette wird die Eignung der angepassten Methode festgestellt.

Eine gängige Fahrzeugkomponente ist nicht als Grundlage zur Überprüfung für das gesamte Vorgehen geeignet, da nicht gewährleistet werden kann, dass Prozess- und Lastsimulation an Prozess- und Materialgrenzen herankommen oder über sie hinausgehen. Um diese Grenzen aufzuzeigen, müssen diese überschritten werden, was bei einer Fahrzeugkomponente nicht zulässig ist.

Die einzelnen Entwicklungsschritte und deren Inhalt werden für das geplante Vorgehen nachfolgend näher erläutert. Die Punkte „Machbarkeitsstudie“, „Werkstoffauswahl“, „Prozesssimulation“ und „Mechanische Auslegung und Dimensionierung“ enthalten jeweils eine Modellbildung für die Simulation, welche nachfolgend beschrieben sind. Die übrigen Entwicklungsschritte werden nicht für die Anwendung dieser Entwicklungsmethode angepasst und sind daher hier nur zur Vollständigkeit kurz erwähnt, werden aber im Zuge der Validierung dennoch durchlaufen.

#### **4.3.1 Pflichtenheft und Produktgestaltung**

Das Pflichtenheft wird nicht auf Anpassungen für Organoblechbauteile untersucht, da sich die Anforderungen an eine Komponente nicht mit dem Material verändern. Technische und betriebswirtschaftliche Bedingungen sind nicht materialspezifisch und werden somit nicht berücksichtigt. Dennoch wird ein Abschnitt zum Pflichtenheft erstellt, in dem die Anforderungen an den zu entwickelnden Demonstrator definiert sind. Die Hauptpunkte „Projektziel“, „Projektdefinition“ und „Projektbeschreibung“, welche ein Lastenheft beinhaltet, werden für den entwickelnden Demonstrator erarbeitet [99]. Darin wird spezifiziert, welche Material- und Bauteilprüfungen am Demonstrator durchgeführt werden, um eine Übertragbarkeit des gesamten Entwicklungsablaufs auf Fahrzeugkomponenten zu gewährleisten.

Im vorliegenden Fall ist der Fertigungsprozess des Thermoformens von Organoblechen vorgegeben, weshalb eine Machbarkeitsstudie im eigentlichen Sinne an dieser Stelle entfällt. An Stelle der Machbarkeitsstudie folgt zunächst die digitale „Produktgestaltung“ des Demonstrators in einem Konstruktionsprogramm. Es wird eine Geometrie entworfen, welche nach Möglichkeit alle definierten Anforderungen erfüllt und den weiteren Entwicklungsprozess durchläuft. Dafür werden zwei Demonstratorvarianten erstellt, welche mit einem Werkzeugwechseleinsatz herstellbar sind.

### **4.3.2 Machbarkeitsstudie**

Das Ziel der Durchführung einer Machbarkeitsstudie ist eine erste Auslegung bzw. Dimensionierung. Diese wird hier durchgeführt, um den aktuellen Stand der Technik widerzuspiegeln und die Optimierung durch die beiden ergänzten Entwicklungsschritte aufzuzeigen. Prinzipiell wird hier eine erste Abschätzung getroffen, ob ein Entwurf mit einem vorgesehenen Material dazu in der Lage ist, die im Pflichtenheft definierten Ziele zu erreichen [99, 108]. Die Machbarkeitsstudie hat dabei nicht den Anspruch, bereits alle Anforderungen zu erfüllen, sondern es sollen erste Ergebnisse im Zuge einer Simulation entstehen, um diese mit den Vorgaben vergleichen und bewerten zu können [108].

In Kapitel „2.4.2 Entwicklungsprozess von Spritzgusskomponenten“ ist erläutert, dass eine Berücksichtigung von Faserorientierungen zur Auslegung von Komponenten unerlässlich ist. Dies gilt bei Spritzgussbauteilen und ebenso für Organoblechkomponenten [35, 194]. Für eine genaue Kenntnis der lokalen Faserausrichtung ist eine Prozesssimulation nötig, welche einigen zeitlichen Aufwand erfordert und Kosten verursacht. Dieser Aufwand soll nach Möglichkeit nicht bei jedem Gestaltungsentwurf anfallen, sondern nur für die Konstruktion, welche, gemessen an den Randbedingungen, die vermutlich beste Lösung darstellt. Im Rahmen der Validierung der Entwicklungsmethode wird ein geeigneter Modellaufbau erläutert und verwendet.

### **4.3.3 Werkstoffauswahl**

Bei der Werkstoffauswahl werden die benötigten Tests am Ausgangsmaterial durchgeführt, womit die Materialkarten sowohl für die Prozess- als auch für die Lastsimulation erstellt werden. Es wird eine Prüfmethode entwickelt, welche dazu dient, sowohl das Scherverhalten als auch den Blockierwinkel des Gewebes zu ermitteln. Angelehnt ist die zu entwickelnde Prüfmethode an „DIN SPEC 4885 Faserverstärkte Kunststoffe - Schubversuch mittels Schubrahmen zur Ermittlung der Schubspannungs-/Schubverformungskurve und des Schubmoduls in der Lagenebene“. Ergänzt wird

diese Methode um die realen Verarbeitungsbedingungen unter Prozesstemperatur. Die gleichmäßige Erwärmung des Materials wird für eine hohe Reproduzierbarkeit besonders beachtet.

Zur Ermittlung des Elastizitätsmoduls der verwendeten Glasfasern werden Tests nach „ISO 4046-1:2016-03 Papier, Pappe, Faserstoffe und verwandte Begriffe - Vokabular - Teil 5: Eigenschaften von Faserstoff, Papier und Pappe“, „DIN EN ISO 6892-1:2009-12 Metallische Werkstoffe - Zugversuch - Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur“ durchgeführt und eine Diskussion zur Einspannproblematik geführt.

Für die Erstellung der Materialkarte für die Lastsimulation werden Zugprüfungen nach „DIN EN ISO 527-4:1997-04 Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften - Teil 4: Prüfbedingungen für isotrop und anisotrop faserverstärkte Kunststoffverbundwerkstoffe“ bzw. „DIN EN ISO 14129:2014-05 Faserverstärkte Kunststoffe - Zugversuch an 45°-Laminaten zur Bestimmung der Schubspannungs/Schubverformungs-Kurve des Schubmoduls in der Lagenebene“ und Biegeprüfungen nach „DIN EN ISO 14125:2013-09 Faserverstärkte Kunststoffe - Bestimmung der Biegeeigenschaften“ am Rohmaterial bei Raumtemperatur nach Norm durchgeführt. Mit einer Multimodelloptimierung werden die Materialkennwerte in der Materialkarte angepasst, um bei gegebener Elementkantengröße und Umformgeschwindigkeit die Realität möglichst detailgetreu abzubilden.

#### **4.3.3.1 Materialcharakterisierung für die Prozesssimulation**

Organisiert durch die AVK [17] wird aktuell im Normungsausschuss eine Standardisierung von Materialdatenblättern erarbeitet, die sich auf die vorliegenden verwendeten Materialien beziehen. Im Zuge dessen findet ebenfalls eine Diskussion zu erforderlichen Angaben für die Durchführung einer Prozesssimulation statt, wobei sich dafür noch kein einheitliches Vorgehen identifizieren lässt.

Für die Materialkarte der Gewebelagen werden die folgenden Informationen benötigt [9]: E-Moduln für Kett- ( $E_{11}$ ) und Schussfaden ( $E_{22}$ ), die Dichte des Fasermaterials ( $\rho_f$ ), die Reibung zwischen den Fasern ( $\mu_f$ ), der initiale und der tangentielle Schubmodul  $G_0$  und  $G_T$  und die Dämpfung der Fasern ( $d_f$ ). Der schmelzviskose Kunststoff wird über ein sogenanntes „Connect“-Material LAW59 simuliert und bedarf daher der folgenden Parameter [9]: Fließspannung in Abhängigkeit der Auslenkung  $E/s$ , Schubmodul  $G_m$ . Dafür ist insbesondere die Charakterisierung des Verhaltens unter Schub bei Prozesstemperatur noch nicht weiter untersucht und wird nachfolgend erarbeitet. Zusätzlich wird zur Ermittlung der E-Moduln Glasfasern in Kett- und Schussrichtung der in „2 Stand der Wissenschaft

und Technik“ beschriebene Ansatz verwendet, bei dem die Fasern ohne Matrix und bei Raumtemperatur untersucht werden, wobei diese Ergebnisse auf den Verarbeitungsprozess übertragen werden.

#### 4.3.3.2 Zugprüfung an trockenen Fasern zur Bestimmung von E11 und E22

Zur Ermittlung des Spannungs-Dehnungsverhaltens der Fasern wird das Gewebe untersucht, welches auch im Organoblech zum Einsatz kommt. Der Versuch wird angelehnt an „ISO 4046-1:2016-03 Papier, Pappe, Faserstoffe und verwandte Begriffe - Vokabular - Teil 5: Eigenschaften von Faserstoff, Papier und Pappe“ durchgeführt. Da sich dieser Versuch jedoch nicht ohne weiteres durchführen lässt, wird das Ergebnis einem Versuch angelehnt an „DIN EN ISO 6892-1:2009-12 Metallische Werkstoffe - Zugversuch - Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur“ gegenübergestellt. Eine Beschreibung des Vorgehens sowie eine Diskussion der Ergebnisse findet sich unter „5 Validierung der Entwicklungsmethode“.

#### 4.3.3.3 Schubprüfung an Organoblech bei Prozesstemperatur

Wie oben gezeigt muss zur Simulation der Drapierung das Materialverhalten unter Schub besondere Beachtung finden. Da der reale Verarbeitungsprozess unter Prozesstemperatur mit schmelzviskoser Matrix stattfindet, sollte ein Versuch zur Materialcharakterisierung unter realitätsnahen Bedingungen durchgeführt werden. Bisher wurden Versuche primär an trockenen Geweben durchgeführt und deren Resultate übertragen. Aus diesem Grund muss ein daran angelehnter, alternativer Versuchsaufbau entwickelt und untersucht werden.

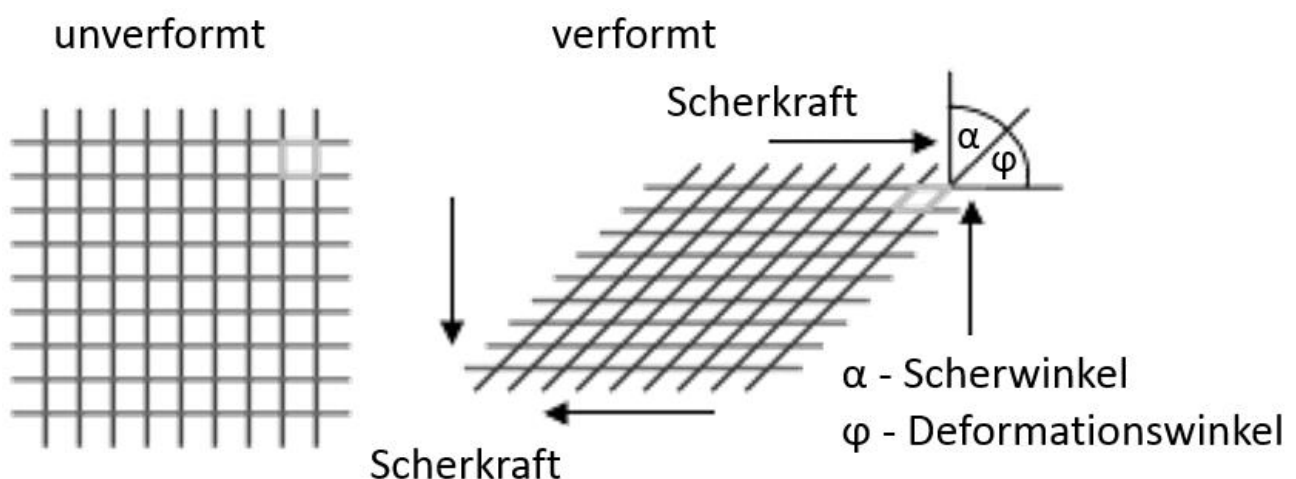
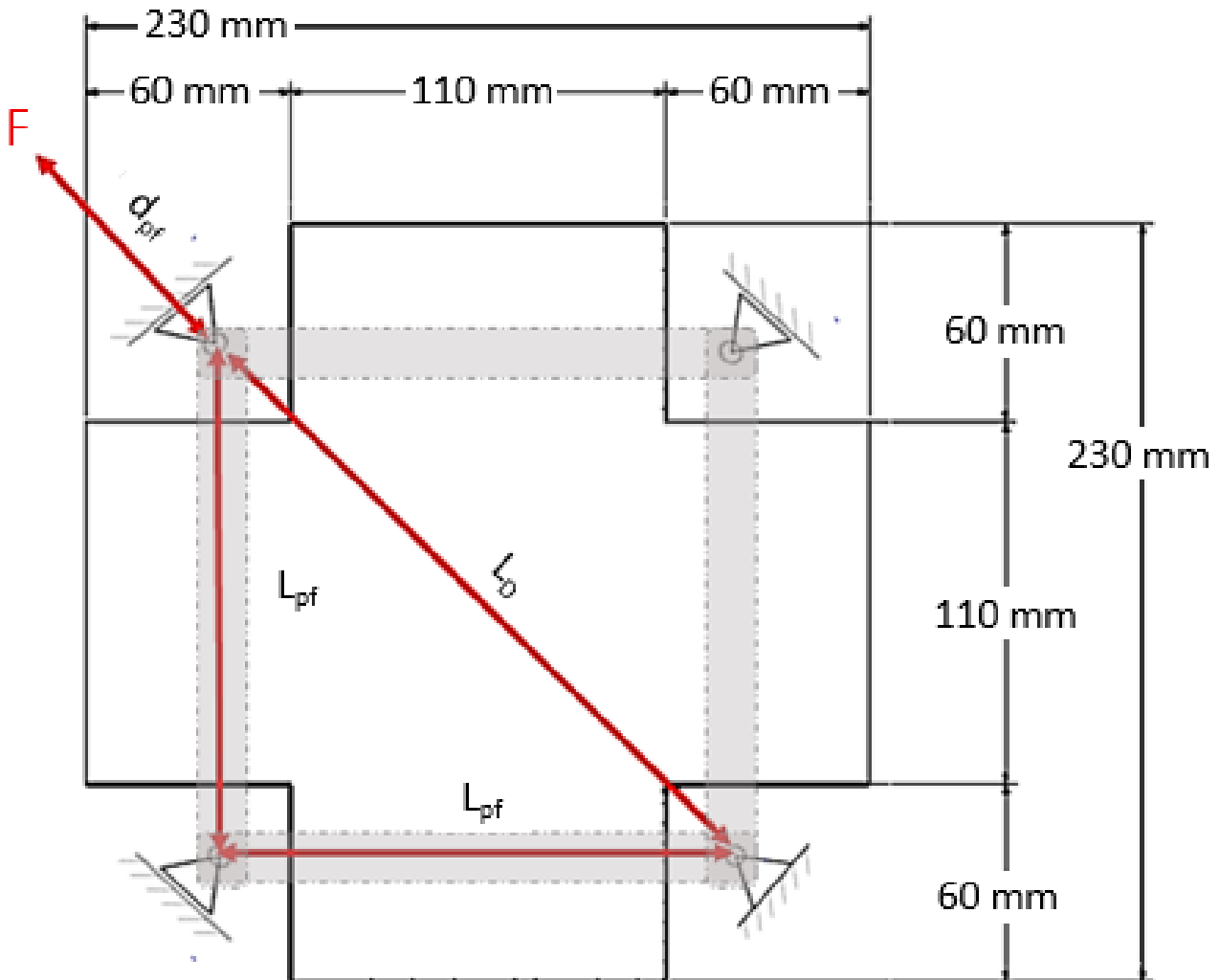


Abbildung 4.3: Scherung durch Scherrahmen [eigene Darstellung vgl. 70, 94, 120, 121]

Um eine, wie in Abbildung 4.3 gezeigte, reine Schubverformung im Material zu erzeugen, wird ebenfalls ein Rahmen äquivalent zu DIN SPEC 4885 entwickelt und für Prüfkörper mit den in Abbildung 4.4 gezeigten Abmessungen ausgeführt. In der Zeichnung stellen die grauen Bereiche die Einspannung dar, welche über drehbare Gelenke miteinander verbunden sind.



**Abbildung 4.4:** Illustration der verwendeten Prüfkörpergeometrie

Der Aufbau muss dafür geeignet sein das Material unter Prozesstemperatur zu testen. Zur Erwärmung des Materials kommt ein Umluftofen in Frage, welcher den Prüfkörper umschließt. Nach dem Erreichen der Verarbeitungstemperatur kann die Verformung auf das Material aufgebracht werden, wobei die dafür benötigte Kraft aufgezeichnet wird. Der Scherrahmen kann in eine herkömmliche Zugprüfmaschine eingespannt werden. Nach der in „2.2.4 Organoblechverarbeitung“ beschriebenen weiteren Vorgehensweise lassen sich der kritische Scherwinkel und die Schubmoduln bestimmen.

Alternativ kommt ein Aufbau mit IR-Strahlern in Frage, welche das Material auf die vorgegebene Verarbeitungstemperatur erhitzen. Allerdings ist dabei zu erwarten, dass ein Temperaturgradient zwischen Stahl und Kunststoff entsteht, daher ist ein quadratischer Prüfkörper, welcher nach DIN SPEC 4885 bis zu den Gelenken des Rahmens reicht, nicht für den Aufbau geeignet.

#### **4.3.3.4 Materialcharakterisierung für die Lastsimulation**

Die Lastsimulation spiegelt das Verhalten einer Komponente bei einer realen Belastung wider [110]. Dafür werden am Organoblech-Rohmaterial Zug- und Biegeversuche durchgeführt, mit welchen die in der Simulation verwendete Materialkarte angepasst wird. Mit der Ermittlung realer Kraft-Weg-Verläufe und der Nachmodellierung der gleichen Versuche in der Simulation wird das Materialverhalten in der Simulation an die Realität in einer numerischen Optimierung angepasst.

Zunächst wird die Materialkarte für die Simulation zwar ohne Bruchverhalten implementiert, dennoch werden die realen Versuche gemäß den Prüfvorschriften bis zum Bruch und darüber hinaus durchgeführt. Somit liegen die Messdaten für die Erweiterung des Simulationsmodells in einer anschließenden Untersuchung bereits vor.

#### **4.3.3.5 Multimodelloptimierung zur Erstellung der Materialkarte**

Durch die Anwendung einer Multimodelloptimierung sollen die wesentlichen Nachteile der vom Hersteller empfohlenen Herangehensweise, welche in „2.3.2 Materialcharakterisierung für die Simulation“ aufgeführt sind, weitestgehend umgangen werden. Dazu werden die in Kapitel „5.1.4“ durchgeführten Versuche verwendet. Diese werden jeweils in einem FEM-Modell abgebildet und simuliert. Äquivalent zur realen Datenerfassung werden Kraft und Stempelweg als Ergebnisse protokolliert und dem realen Versuch gegenübergestellt. Weiterhin werden die festzulegenden Einträge in der Materialkarte entsprechend den realen physikalischen Parametern mit je einer minimalen und einer maximalen Grenze von ca. 15 % als variabel gestaltet. Mit der Simulationssoftware HyperStudy der Altair Engineering GmbH, Böblingen, [9] werden vollautomatisiert 132 Simulationrechnungen der jeweils vier einzelnen Modelle durchgeführt, wobei die Materialkarteneinträge innerhalb der festgelegten Grenzen variiert werden.

$$A(x) = \int f_{\text{Versuch}}(x)dx - \int f_{\text{Simulation}}(x)dx \quad 4.1$$



Als Antwort wird für jedes einzelne Modell die Differenzfläche zwischen Kraft-Weg-Diagramm der realen und der simulierten Kurve nach Formel 4.1 festgelegt, da bei einer idealen Abbildung der Realität keine Differenzfläche entstehen würde. Durch eine Minimierung der Differenzfläche wird somit die Simulation der Realität soweit wie möglich angenähert. Weiterhin werden die Punkte des Materialversagens und die Übergänge zwischen linear-elastischem und elasto-plastischem Bereich explizit festgelegt. Das Vorgehen entspricht der Darstellung in Abbildung 4.5. Die Umsetzung dieses Ansatzes zur Erstellung der Materialkarte wird in „5 Validierung der Entwicklungsmethode“ konkretisiert.

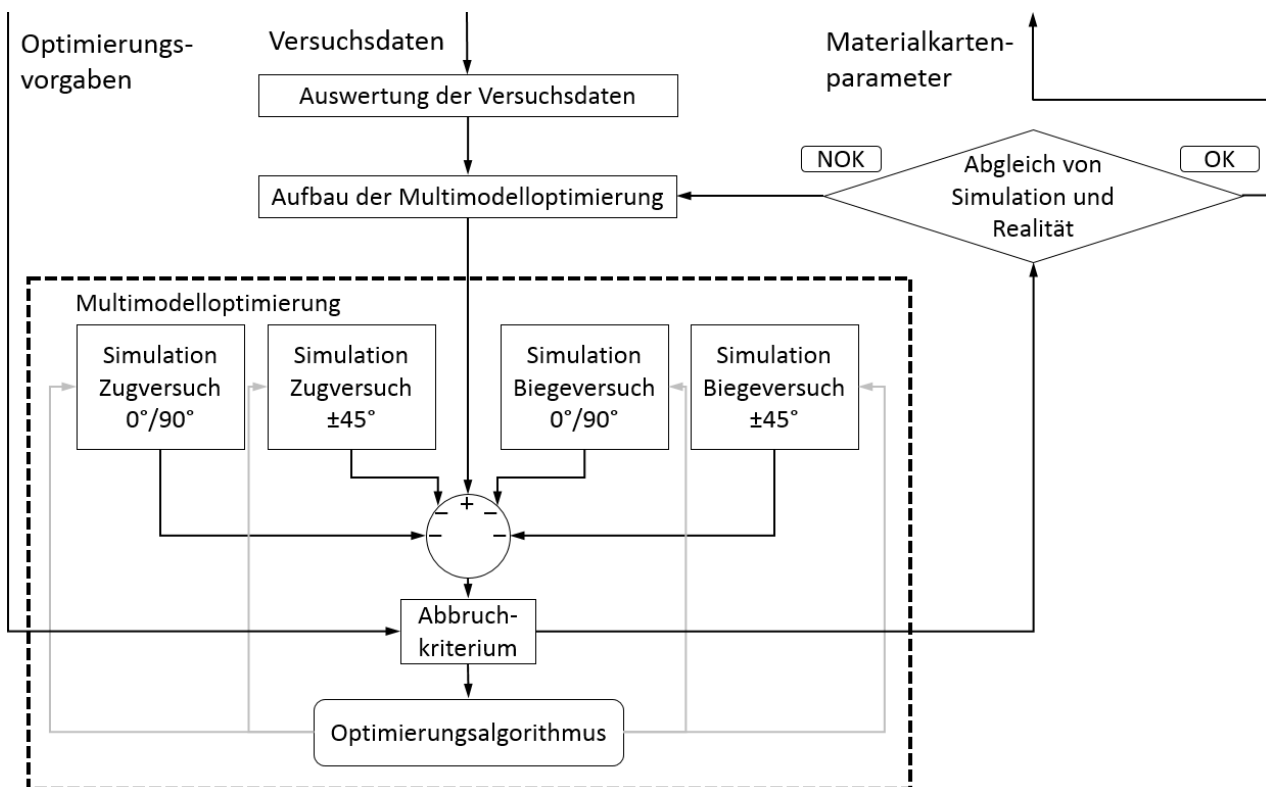


Abbildung 4.5: Schematische Darstellung der Multimodelloptimierung

#### 4.3.4 Prozesssimulation

Für die Prozesssimulation wird der reale Herstellungsprozess des Demonstrators nachgestellt und abgebildet. Dafür wird die zuvor erstellte Materialkarte des Werkstoffs bei Verarbeitungstemperatur verwendet. Es wird eine Independentlayermodellierung verfolgt, bei der alle vier einzelnen Glasfaserschichten und der Thermoplast getrennt voneinander dargestellt werden. Als Ergebnis wird die Faserorientierung nach dem Herstellungsprozess vorhergesagt.

Für Organoblech muss untersucht werden, welche Materialparameter in der Prozesssimulation einen signifikanten Einfluss auf das Modellverhalten haben. Im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse wird festgestellt, wie robust ein System, hier die Prozesssimulation, auf äußere Einfluss- bzw. Störgrößen reagiert. In diesem Fall liegt der Fokus auf der Untersuchung des Einflusses der einzelnen Materialkennwerte auf den resultierenden Scherwinkel.

Dafür ist zunächst ein Screening zur Einschränkung auf signifikante Parameter durchzuführen, welche anschließend in einer statistischen Variation von Eingabeparametern (engl. Design of Experiments, DoE) nach Hammersley bzw. über dessen Auswertung auf nicht-lineare Einflüsse und Wechselwirkungen untereinander untersucht werden [103, 192].

Anhand der Simulationsergebnisse aus der DoE wird ein Metamodell nach Kriging abgeleitet und mit einer Varianzanalyse (engl. Analysis of Variance, ANOVA) ausgewertet. Hierdurch wird eine Einschätzung des zu betreibenden Zeit- und Kostenaufwands gegeben, welcher zur Festlegung der Eingabeparameter in der Prozesssimulation betrieben werden muss. Insbesondere der Aufwand für die durchzuführende Materialcharakterisierung, wie in Kapitel „4.3.3.1 Materialcharakterisierung für die Prozesssimulation“ ausgeführt, kann u.U. eingegrenzt werden. Anhand der Prozesssimulation ist nicht nur die reale Faserorientierung der Komponente vorhersagbar, sondern es wird außerdem die prinzipielle Drapierfähigkeit der gewählten Bauteilgeometrie festgestellt. Dies wird hier an der Komponente mit 0/90° Faserorientierung durchgeführt. In Kapitel „5.1.5 Modellbildung für die Prozesssimulation“ wird das Vorgehen bei der Durchführung einer solchen Simulation vertiefend erläutert.

Ebenfalls können Einflussgrößen aus dem realen Prozess eine weitreichende Wirkung auf das zu berechnende Ergebnis haben. Sollte bspw. die Reibung zwischen Organoblech und Werkzeug hochgradig sensitiv für die resultierende Faserorientierung sein, müssen dafür umfangreiche Tests durchgeführt werden, um diesen Parameter so genau wie möglich zu bestimmen. Außerdem müsste in der Fertigung sichergestellt sein, dass eine konstante Reibung über die gesamte zu produzierende Stückzahl gewährleistet wird, und es müssten zusätzliche Qualitätskontrollen stattfinden, um dies zu gewährleisten. So soll der zu betreibende Aufwand für die vorangegangenen Versuche einschätzbar und ggf. reduzierbar werden.

Im Zuge dieses Abschnitts wird außerdem die Drapiersimulation validiert. Mittels CT-Analysen am Demonstrator werden lokale Faserorientierungen, welche sich durch die Verarbeitung des Materials eingestellt haben, überprüft. An verschiedenen Positionen des Demonstrators wird ein Vergleich mit

der Prozesssimulation gezogen. Anhand dessen wird ermittelt, mit welcher Genauigkeit in der Simulation zu rechnen ist und wie groß ein einzuhaltender Sicherheitsfaktor bei der Auslegung gewählt werden sollte.

#### **4.3.5 Mechanische Auslegung und Dimensionierung**

Nachdem die Prozesssimulation abgeschlossen ist, wird die berechnete Faserorientierung auf ein anderes Berechnungsmodell übertragen. Mit diesem Modell werden auf den Demonstrator aufgebrachte mechanische Lasten simuliert. Die Materialkarte aus der Drapiersimulation bei Prozesstemperatur wird dafür durch die Materialkarte bei Bauteilbetriebstemperatur aus der Multimodelloptimierung ausgetauscht. Lediglich die lokal verschiedenen Faserorientierungen, die in Form von Vektoren dargestellt werden und die Anisotropie des Werkstoffs widerspiegeln, müssen dazu übertragen werden. Die anisotrope Materialkarte für das Organoblech bei Raumtemperatur wird für jedes Element anhand der Richtungsvektoren einzeln festgelegt, wodurch die Faserorientierung bei einer mechanischen Belastung berücksichtigt wird.

Wird bei der Auslegung einer Fahrzeugkomponente in diesem Entwicklungsschritt die Unter- oder Übererfüllung der gestellten Anforderungen festgestellt, muss dementsprechend bei der Produktgestaltung oder der Werkstoffauswahl ein neuer Iterationsschritt begonnen werden. Da beim Demonstrator jedoch keine spezielle mechanische Anforderung zu erfüllen ist, wird keine weitere Iteration angeschlossen. Stattdessen werden die Validierung der Entwicklungsmethode und die Komponentenerprobung angeschlossen.

Zwei unterschiedliche Varianten des Demonstrators werden zur Validierung der Methode verschiedenen Belastungstests unterzogen. Dafür werden für eine statistische Absicherung sowohl ein Biegeversuch als auch der in „5.1.9 Aufbau des Domversuchs am Demonstrator der Variante B“ näher erläuterte Domversuch an mehreren Demonstratoren durchgeführt. Es werden für jeden Versuch bzw. für jede Variante jeweils Demonstratoren mit  $0/90^\circ$  und  $\pm 45^\circ$  herangezogen. Demnach wird die Entwicklungsmethode im Grunde an vier verschiedenen Komponenten geprüft.

Das Verhalten unter Belastung wird mit den Resultaten der verschiedenen Ansätze in den Lastsimulationen verglichen, um diese zu validieren. Darauf basierend wird eine Aussage darüber getroffen, inwieweit im Rahmen einer Simulation eine Komponente mit einer vom Konstrukteur abgeschätzten

Faserorientierung optimiert werden kann und ab wann diese durch eine vorangestellte Drapiersimulation zu berechnen ist.

Die Ergebnisse aus den Komponententests werden von den Belastungssimulationen mit den zusätzlich eingeführten Entwicklungsschritten in höherer Übereinstimmung als zuvor vorhergesagt. Somit kann der auf ein Organoblech anzuwendende Entwicklungsprozess als validiert angenommen werden. Alle vorangegangenen Schritte zur korrekten Beschreibung des Verhaltens des realen Demonstrators unter Last müssen mit ausreichender Genauigkeit vorgenommen worden sein, da das Modell sonst nicht hinreichend mit der Realität korreliert. Eine Übertragbarkeit auf andere Bauteilentwicklungen ist demnach mit Einschränkungen gewährleistet.

Weiterhin wird in der Entwicklungsmethode eine Komponentenerprobung durchgeführt, welche in dieser Arbeit jedoch ebenfalls den Zweck der Validierung des gesamten Vorgehens erfüllt. Aus diesem Grund wird dieser Abschnitt, obwohl er inhaltlich auch zur erarbeiteten Methode gehört, erst bei der anschließenden Validierung aufgeführt.

## 5 Validierung der Entwicklungsmethode an vier ausgewählten Beispielen

Die Entwicklungsmethode wird am Demonstrator exemplarisch durchlaufen. Dabei werden die Inhalte der jeweiligen Entwicklungsschritte an die Bedürfnisse von Organoblechen angepasst sowie um die beiden Schritte „Prozesssimulation“ und „Mechanische Auslegung und Dimensionierung“ ergänzt. Die mechanische Auslegung und Dimensionierung nach bisherigem Stand findet in der Regel ohne Berücksichtigung der Faserumorientierung durch den Umformprozess statt und wird hier weiterhin in der Vorauslegung im Rahmen der Machbarkeitsstudie integriert.

In der Komponentenerprobung werden der 3-Punkt-Biege- und der Domversuch an realen Bauteilen mit jeweils  $0/90^\circ$  und  $\pm 45^\circ$ -Faserorientierung durchgeführt. Es wird ein Vergleich zu den Simulationen aus der Vorauslegung aus Kapitel „4.3.2 Machbarkeitsstudie“ und der Lastsimulation mit vorangestellter Prozesssimulation aus Kapitel „4.3.5 Mechanische Auslegung und Dimensionierung“ gezogen. Damit wird gezeigt, dass die dargestellte Entwicklungskette in der Lage ist, ein reales Bauteilverhalten bis zum Bruch vorherzusagen. Den Anspruch ein Nachbruchverhalten abzubilden hat das verwendete Materialmodell nicht.

Nachfolgend wird auf die Herstellung der vier Bauteilvarianten eingegangen und es werden sowohl die Versuchsaufbauten als auch deren Durchführungen erläutert. Zur Auswertung werden Kraft-Weg-Verläufe aller Simulationen mit den realen Tests verglichen. Anschließend werden die Ergebnisse auf Abweichungen hin diskutiert und etwaige zu treffende Abhilfemaßnahmen zur weiteren Optimierung erörtert.

### 5.1 Versuchsaufbau

Nachfolgend wird der Versuchsaufbau für alle in der Methodenentwicklung erläuterten Entwicklungsschritte erläutert.

### **5.1.1 Erstellung des Pflichtenhefts**

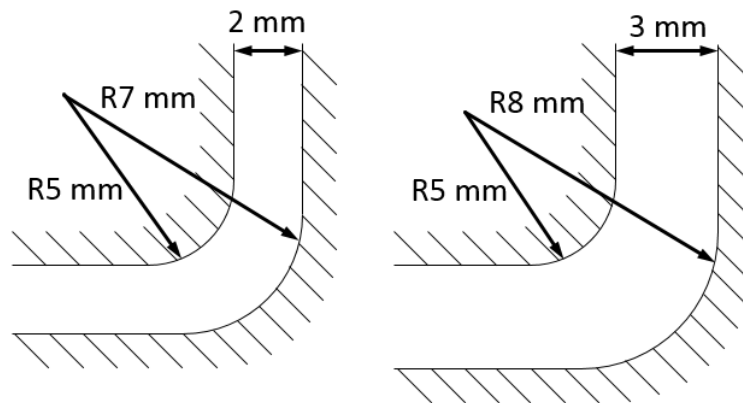
Im Unterschied zu einer konventionellen Entwicklung, bei welcher eine Komponente bestimmte mechanische, chemische, thermische oder sonstige Anforderungen [99] erfüllen muss, hat der zu entwickelnde Demonstrator kein konkret definiertes Anforderungsprofil im eigentlichen Sinne. Im Vordergrund steht die Überprüfung von Prozess- und Lastsimulationen, welche in erster Linie die Realität hinreichend genau abbilden können müssen, ohne dass ein spezielles Verhalten verlangt wird. Kann mit der nachfolgend aufgezeigten Entwicklungskette die Realität hinreichend genau abgebildet werden, ermöglicht dies die Beurteilung eines Verhaltens einer Komponente und somit die Überprüfung, ob im Lastenheft gesteckte Ziele erreicht werden oder weitere Iterationen benötigt werden.

#### **5.1.1.1 Darstellung der Drapiergrenze**

Die Geometrie erfordert eine besonders anspruchsvolle Drapierung. Um Grenzen der möglichen Drapierung aufzuzeigen, müssen diese überschritten werden. Die durchzuführende Prozesssimulation muss in der Lage sein, zu bestätigen, dass geometrische Drapiergrenzen einer zu entwickelnden Komponente eingehalten werden. Würde die Geometrie lediglich eine unterkritische Drapierung benötigen, könnte in der Simulation nicht überprüft werden, ob eine überkritische Drapierung erkannt wird. Der Demonstrator verlangt dem Material dementsprechend große Scherwinkel ab. Gleichzeitig können neben dem zu erwartenden Faltenwurf etwaige Materialschädigungen untersucht werden.

#### **5.1.1.2 Einschränkung verarbeitbarer Materialien**

Der Demonstrator wird mit dem Material „B3WG13 WR01 black Exp.“ des Herstellers BASF, Ludwigshafen am Rhein, ausgeführt, welches ein Organoblech mit Polyamid Matrix und Glasfasergewebeverstärkung ist. Grundsätzlich ist der Demonstrator aus Organoblechen basierend auf verschiedenen Matrixsystemen und Fasermaterialien zu fertigen, um insbesondere die gängigen Polyamid- und Polypropylen- bzw. Glas-, C- und Aramidfasern untersuchen zu können. Des Weiteren sollen verschiedene in Kapitel „2.2.1 Faserverstärkung“ beschriebene Bindungsarten der Gewebe sowie verschiedene Orientierungen gegenüberstellbar sein. Da die Verarbeitung verschiedener Materialdicken nicht ohne eine Anpassung der Radien wenigstens einer Werkzeughälfte (s. Abbildung 5.1) möglich ist, muss der Demonstrator mit einer festgelegten Dicke entwickelt werden.



**Abbildung 5.1:** Auswirkung der Materialdicke auf erforderliche Werkzeugradien

### 5.1.1.3 Vergleichbarkeit von Rohmaterial und verarbeitetem Material

Eine weitere Anforderung an den Demonstrator ist, dass dieser nach seiner Herstellung in relevante Prüfkörpergeometrien für Materialtests nach Norm zerlegbar ist. Somit soll nicht nur das gesamte Bauteil getestet werden können, sondern es soll zusätzlich in einzelne Prüfkörper für Materialtests geschnitten werden, damit der Einfluss des Verarbeitungsprozesses auf das Material quantifiziert werden kann.

Insbesondere Prüfkörper nach „DIN EN ISO 527-4:1997-04 Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften - Teil 4: Prüfbedingungen für isotrop und anisotrop faserverstärkte Kunststoffverbundwerkstoffe“, „DIN EN ISO 14129:2014-05 Faserverstärkte Kunststoffe - Zugversuch an 45°-Laminaten zur Bestimmung der Schubspannungs/Schubverformungs-Kurve des Schubmoduls in der Lagenebene“ und „DIN EN ISO 14125:2013-09 Faserverstärkte Kunststoffe - Bestimmung der Biegeeigenschaften“ sollen reproduzierbar an den gleichen Positionen entnehmbar sein, weshalb eine Markierung direkt im Werkzeug vorzusehen ist.

### 5.1.1.4 Validierbarkeit von Drapier- und Lastsimulation

Der Demonstrator bietet die Möglichkeit, sowohl Drapier- als auch Lastsimulationen und die Übertragung der Ergebnisse von der Drapier- auf die Lastsimulation zu validieren. Die Geometrie ist dementsprechend so komplex gestaltet, dass die Drapierung einen signifikanten Einfluss auf die berechneten Ergebnisse hat.

Ein Ziel der Arbeit ist die Erstellung und Validierung von Materialkarten für Prozess- und Lastsimulationen. Die jeweiligen Materialkarten bilden anhand von definierten Materialgesetzen das reale

physikalische Materialverhalten in gewissen Grenzen ab. Grenzen können bspw. bestimmte Temperaturbereiche oder Dehnraten sein. Zur Erstellung der Materialkarten werden materialspezifische Kennwerte experimentell ermittelt. Die Eignung der gewählten Materialkarten und deren Inhalte werden durch die Multimodelloptimierung an Prüfkörpern nach Norm und bei der Gesamtvalidierung des Vorgehens gezeigt.

Das Fasermapping mit den Ergebnissen aus Kapitel „5.3.4 Auswertung der Prozesssimulation“ wird gemeinsam mit der Lastsimulation aus „5.3.5 Gegenüberstellung von Lastsimulationen und Komponententests“ und zusätzlich durch CT-Untersuchungen verifiziert. Dazu wird der entwickelte Demonstrator hergestellt und in Prüfmaschinen mit Kräften beaufschlagt, was in „5.1.8 Aufbau der Biegeprüfung am Demonstrator der Variante A“ und „5.1.9 Aufbau des Domversuchs am Demonstrator der Variante B“ thematisiert wird. Resultierende Kräfte, Verformungen und Dehnungen werden dabei aufgezeichnet und mit den vorhergesagten Ergebnissen aus den durchgeführten Lastsimulationen verglichen. Es wird dabei ebenfalls das Resultat aus „5.3.2 Auswertung der Machbarkeitsstudie“ mit den realen Ergebnissen verglichen, um dessen Aussagegenauigkeit zu beurteilen.

#### **5.1.1.5 Feststellung minimaler Aushebeschrägen**

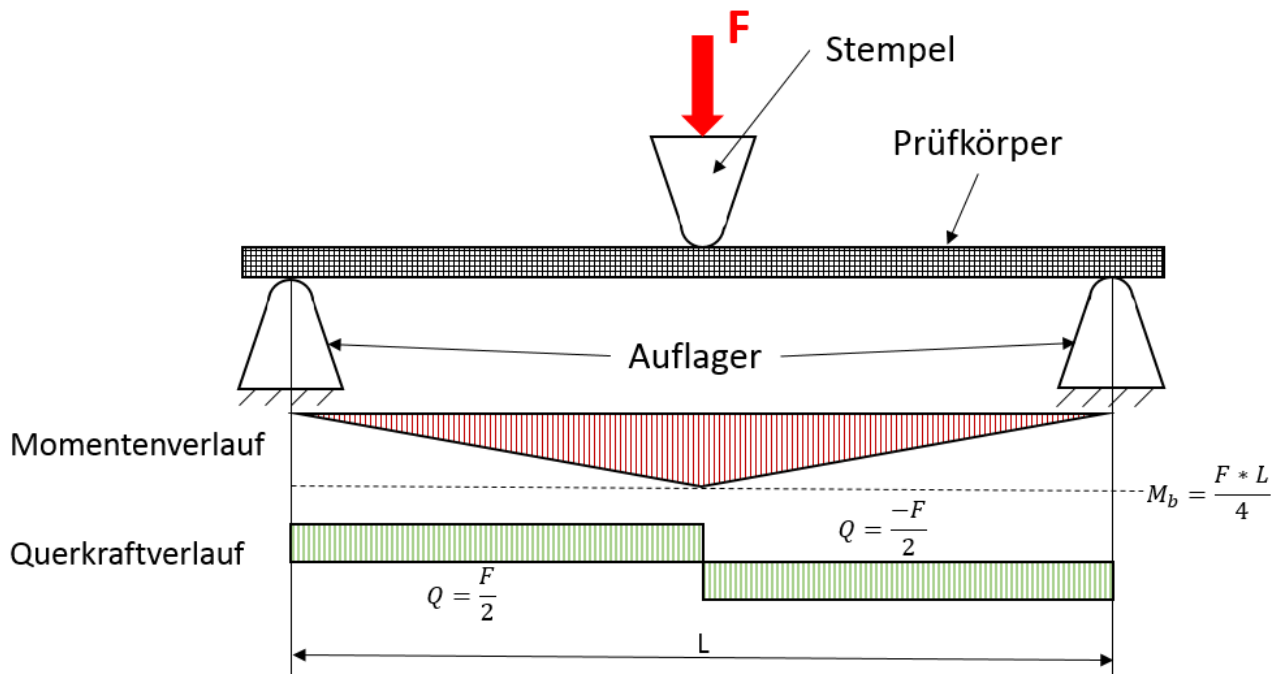
Nicht in dieser Arbeit untersucht werden minimale Aushebeschrägen; dennoch wird die Anforderung im Pflichtenheft erwähnt. Flächen, die senkrecht zur Werkzeugschließrichtung liegen, erfahren den höchsten Druck, während Flächen parallel zur Schließrichtung keinen Druck erfahren. Um den erforderlichen Konsolidierungsdruck zu erreichen und um den Demonstrator entformen zu können, ist daher zwingend eine minimale Aushebeschräge einzuhalten, welche tendenziell umso flacher sein muss, je länger die Fläche ist. Um weiterführende Untersuchungen zu ermöglichen, sollen daher verschiedene Winkel in die Geometrie eingebracht werden.

#### **5.1.1.6 Validierbarkeit im 3-Punkt-Biegeversuch**

Durch Anlehnung der Demonstratorgeometrie an den Erlanger Träger erfüllt dieser die Voraussetzung für eine Untersuchung im 3-Punkt Biegeversuch [58, 141]. Auf Grund des Momentenverlaufs, wie er in 3-Punkt-Biegeversuchen induziert wird (s. Abbildung 5.2), ist im Bereich des Stempels die höchste Spannung zu erwarten. Es wird daher eine Verjüngung der Demonstratorhöhe in Richtung



der beiden Auflager eingebracht, um die nach außen abnehmende Spannung auf einen kleinen Querschnitt zu verteilen. Da jedoch die Prüfkörpergeometrien für Norm-Prüfungen enthalten sein müssen, darf die Geometrieanpassung nicht den mittleren Bereich der Demonstratorgeometrie beeinflussen.



**Abbildung 5.2:** Spannungsverlauf im 3-Punkt-Biegeversuch vgl. [71]

Durch Verkleinerung des Profilquerschnitts fällt die Spannung mit Annäherung an die beiden Auflager im Vergleich zu einer Geometrie mit konstantem Querschnitt weniger stark ab. Gleichzeitig wird durch Veränderung der Bauteilhöhe eine nicht abwickelbare Kontur erzeugt, wodurch eine Scherwinkeländerung durch die Drapierung induziert wird [182]. Somit wird im 3-Punkt-Biegeversuch eine Geometrie mit geschertem Material getestet und zugleich ist eine hinreichend große, ungescherte Fläche für anschließende Prüfungen nach Norm vorgehalten.

Da eine individuelle Prüfkörpergeometrie untersucht wird, existiert keine Norm zur Durchführung der beiden Komponententests. Der 3-Punkt-Biegeversuch wird in Anlehnung an „DIN 53293:1982-02 Prüfung von Kernverbunden; Biegeversuch“ durchgeführt. Allerdings beschreibt diese Prüfvorschrift einen 4-Punkt-Biegeversuch, bei dem zwei Stempel statt eines einzigen verwendet werden. Auf Grund der Asymmetrie des Demonstrators kann jedoch, anders als bei einem symmetrischen Biegeträger, keine gleichmäßige Verteilung der Kräfte auf die Stempel angenommen werden. Durch die Verwendung nur eines Stempels wird das Problem vermieden.

### **5.1.1.7 Validierbarkeit im Domversuch**

Die Validierung der Drapiersimulation bzw. der Berücksichtigung der Faserorientierungen wird an der Domgeometrie durchgeführt, da hier überkritische Scherwinkel zu erwarten sind, was in Kapitel „5.1.2.1 Geometrieerzeugung zur Überschreitung der Drapiergrenze“ erklärt ist. In der Sphäre werden die Scherwinkel im Material mit zunehmender Entfernung vom höchsten Punkt kontinuierlich größer. Damit sind die erzielten Scherwinkel in Realität und Simulation besonders gut vergleichbar. Durch einen symmetrischen Aufbau der Geometrie ist weiterhin ein Schluss auf etwaige äußere Einflüsse im Produktionsprozess oder auf schwankende Materialqualität möglich.

Bei Belastung des Doms stehen Einflüsse aus hohen und sogar überkritischen Scherwinkeln im Vordergrund. Die in Kapitel „5.1.2.1 Geometrieerzeugung zur Überschreitung der Drapiergrenze“ erläuterte Vertiefung in der Mitte des Doms, welche primär zur Untersuchung von Einflüssen durch im Produktionsprozess verwendete Voreiler benötigt wird, wird ebenfalls von der Simulation abgebildet. Durch das Aufbringen der Kraft in der Vertiefung wird der Dom in nur einem Versuch sowohl auf Druck als auch auf Zug belastet. Die Materialkarte muss für beide Belastungsarten die Realität abbilden können, um das Bauteilverhalten möglichst exakt zu beschreiben.

Bei einer hohen Korrelation zwischen Belastungsversuch und -simulation müssen demnach auch bei hohen Scherwinkeln oberhalb des Blockierwinkels die vorangestellte Drapiersimulation und die Übertragung der Ergebnisse durch das Fasermapping erfolgreich und hinreichend genau erfolgt sein.

### **5.1.2 Entwicklung der Geometrie**

Die Produktgestaltung ist der erste Entwicklungsschritt, der bei einer Nichterfüllung der mechanischen Anforderungen wiederholt werden muss. In einem iterativen Prozess werden Flächen, Radien, Wanddicken, Faserlagenaufbau usw. variiert, um die im Lastenheft definierten Ziele zu erreichen. Die Auswirkungen der Anpassungen können erst nach nochmaligem Durchlauf der gesamten Entwicklungskette erneut beurteilt werden. Je nachdem, ob die Anforderungen durch die vorgenommenen Veränderungen erfüllt werden können, müssen weitere Iterationen angeschlossen werden. Nachfolgend wird die Herangehensweise für die Erstellung der Geometrien zur Validierung der Simulationen erläutert.

### **5.1.2.1 Geometrieerzeugung zur Überschreitung der Drapiergrenze**

Eine sogenannte Kofferecke, bei der drei Flächen in Winkeln von jeweils nahezu  $90^\circ$  zueinander stehen, wird als zusätzliche Schwierigkeit auf einer Seite des Demonstrators eingebracht. Innerhalb dieses Bereichs werden ähnlich wie im Umfeld des Doms große Scherwinkel hervorgerufen, außerdem wird durch eine zum Rand hin auslaufende Tasche mit jeweils zwei Kofferecken anstatt eines Hutprofils eine „M-Form“ produziert. Die Konsequenz ist eine längere Schnittlänge im Bereich dieser Form. Um der Form zu folgen, werden ebenfalls große Bereiche eine Materialscherung erfahren, was die Prozesssimulation widerspiegeln muss.

Es werden zusätzliche Sicken in die Halbkugel eingebracht, welche dort einen Faltenwurf induzieren. Zur anschließenden Untersuchung soll jeweils an der gleichen Stelle eine Falte entstehen. An diesen Sicken wechselt die konvexe Form der Sphäre in eine konkave Form, wodurch das Material an dieser Position in besonderem Maße geschert wird und eine Falte an dieser definierten Position entsteht. Nachfolgend wird die resultierende Geometrie mit Sicken als „Dom“ bezeichnet.

Nicht im Fokus dieser Untersuchung steht eine am höchsten Punkt des Doms eingebrachte Vertiefung, welche werkzeugtechnisch mit Voreiler hergestellt wird. Hieran werden Untersuchungen mit verschiedenen Voreilerlängen und -kräften durchgeführt. Zusätzlich kann die Vertiefung, wie in Kapitel „5.1.1.7 Validierbarkeit im Domversuch“ erläutert, bei der Validierung der Drapier- und Lastsimulation genutzt werden.

### **5.1.2.2 Geometrieerzeugung im Hinblick auf verarbeitbare Materialien und Faserorientierungen**

Wie in Kapitel „5.1.1.2 Einschränkung verarbeitbarer Materialien“ beschrieben, sind sowohl verschiedene Matrix- und Fasermaterialien als auch verschiedene Faserorientierungen für die Herstellung des Demonstrators verwendbar. Dabei wird lediglich eine Dicke von 2 mm festgelegt, da auch die meisten Prüfkörper der relevanten Prüfungen für die Materialcharakterisierung nach Norm mit dieser Dicke auszuführen sind. Die geometrieabhängige Herstellbarkeit hängt in erster Linie mit der Drapierung zusammen, welche sich wiederum in verschiedenen Blockierwinkeln der Materialien widerspiegelt.

Das Materialverhalten ändert sich nicht mit dem Zuschnitt, auf Grund des anisotropen Verhaltens sind dennoch Unterschiede in der resultierenden Faserorientierung und den Scherwinkeln zu erwarten. In der Domgeometrie ist bei anderen Faserorientierungen im Zuschnitt ein anderer Faltenwurf zu erwarten, was jedoch nicht in Konflikt mit den Anforderungen an den Demonstrator steht. Somit ist keine Anpassung der Geometrie für verschiedene Materialien vorzunehmen.

Besonders durch die Verwendung verschiedener Matrixmaterialien, bspw. mit verschiedenen Schmelz- und empfohlenen Verarbeitungstemperaturen, ist in erster Linie der Verarbeitungsprozess zur Gewährleistung der Herstellbarkeit betroffen, nicht jedoch die Gestaltung der Geometrie.

### **5.1.2.3 Geometrieerzeugung für Vergleichbarkeit von Rohmaterial mit verarbeitetem Material**

Der Demonstrator wird an den Erlanger Träger angelehnt, welcher ein Hutprofil beschreibt und aus einem flächigen Material in Kombination mit einer thermoplastischen Verrippung zur Erhöhung des Flächenträgheitsmoments besteht [39]. Er wird häufig zur Demonstration von Versteifungsmöglichkeiten durch Spritzguss verwendet [58]. Das Hutprofil bietet die Möglichkeit, bis zu fünf Seitenflächen ohne Krümmung und daher ohne Veränderung des Scherwinkels zu drapieren. Daher kann diese Geometrie dazu verwendet werden, um aus den planen Flächen Prüfkörper entsprechend den Spezifikationen für Prüfungen nach Norm zu entnehmen. Der Organoblechdemonstrator ist auf das Thermoformverfahren beschränkt, weshalb lediglich die Verwendung eines Hutprofils ohne Spritzguss Anwendung findet.

### **5.1.2.4 Geometrieerzeugung zur Validierung von Drapier- und Lastsimulation**

Die Validierung sowohl der Drapier- als auch der Lastsimulation wird anhand zweier verschiedener realer Versuche mit jeweils zwei verschiedenen Faserorientierungen durchgeführt. Durch die Wahl zweier Versuche werden stark unterschiedliche Spannungszustände im Material erreicht. Somit ist eine umfassende Validierung der vier zugehörigen Simulationen gewährleistet. Bei der Wahl von nur einem Versuch zur Validierung müssten umfassende Einschränkungen der Gültigkeit der Simulationsmodelle getroffen werden. Sagen alle vier Simulationen im Zusammenspiel, also zunächst durch Drapiersimulation mit Fasermapping in die folgende Lastsimulation, ein hinreichend genaues Ergebnis in unterschiedlichen Versuchen voraus, so ist ein größerer Gültigkeitsbereich anzunehmen [101].

### 5.1.2.5 Geometrieerzeugung zur Feststellung minimaler Aushebeschrägen

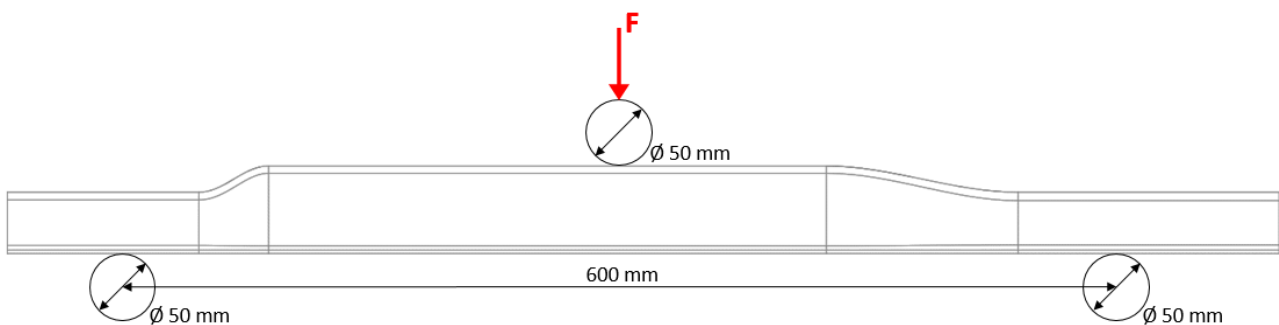
Der Demonstrator lässt sich in drei Abschnitte untergliedern, welche jeweils an einen Erlanger Träger angelehnt sind bzw. einem Hutprofil entsprechen. Dabei unterscheiden sich im Wesentlichen die Flankenhöhen und erlauben damit für jeden Bereich unterschiedliche Flankenwinkel, wodurch eine Untersuchung von Wechselwirkungen zwischen Werkzeugschließkräften bzw. -drücken, Verarbeitungstemperaturen, Materialarten und sonstigen Einflüssen möglich wird. Wie in „5.1.1.5 Feststellung minimaler Aushebeschrägen“ beschrieben, wird für die höchste Flanke die flachste Aushebeschräge gewählt.

### 5.1.3 Modellbildung für die Machbarkeitsstudie

Nachfolgend wird die Modellbildung für die Durchführung der Machbarkeitsstudie bzw. der Vorauslegung erläutert. Diese entspricht weitestgehend dem heutigen Stand in der industriellen Praxis, wird jedoch mit verschiedenen Simulationsprogrammen und Materialmodellen angewendet. Nach diesem Prinzip wird hier beispielhaft ein Modell erstellt.

#### 5.1.3.1 Modellaufbau in der Vorauslegung

Die Vorauslegung wird hier mit dem Softwarepaket der Altair Engineering GmbH „Hyperworks 14.0“, Böblingen, mit einem Simulationsansatz basierend auf der FE-Methode durchgeführt. Für das Modell werden ein Ansatz mit der Sandwichmodellierung und das Materialgesetz LAW25 verwendet.



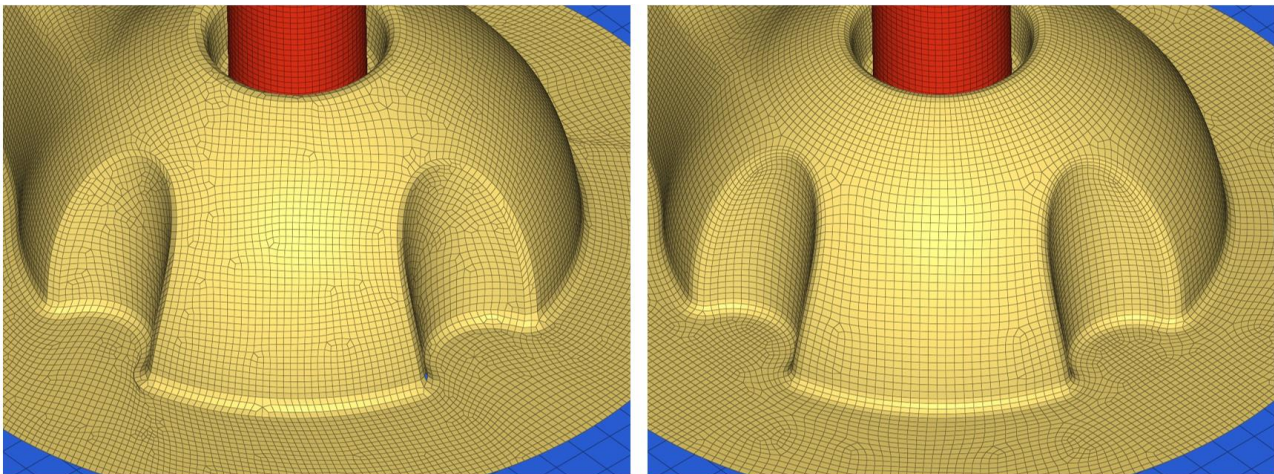
**Abbildung 5.3:** Geometrischer Aufbau des 3-Punkt-Biegeversuchs in NX9

Beide Bauteilversuche, der 3-Punkt-Biegeversuch und der Druckversuch, werden zur Validierung des gesamten Vorgehens in der Machbarkeitsstudie dargestellt. Für den Aufbau des Berechnungsmodells wird HyperMesh als Präprozessor verwendet, worin die Geometrie zunächst als STEP-Datei aus

NX 9 von der Siemens Industry Software GmbH, Köln, importiert und wie in Abbildung 5.3 positioniert wird. Der in der Simulation nachgestellte Versuchsaufbau und die Durchführung entsprechen der realen Versuchsdurchführung, welche in Kapitel „5.2.3 Materialprüfung in der Werkstoffauswahl“ erläutert ist.

### 5.1.3.2 Bauteilvernetzung

Anschließend wird die Geometrie vernetzt. Für das vorliegende Modell wird eine Elementkantenlänge von 2 mm in Form von Viereck-Schalenelementen verwendet. Das Netz wird direkt bei der Bauteilvernetzung durch den Anwender auf stark verzerrte Elemente überprüft und, wie in Abbildung 5.4 gezeigt, optimiert.



**Abbildung 5.4:** Reduktion verzerrter Elemente am Beispiel des Doms vorher (links) und nachher (rechts)

### 5.1.3.3 Einbindung der Materialeigenschaften und Modellierungsebenen in der Simulation

Im Präprozessor „HyperCrash“ der Altair Engineering GmbH, Böblingen, [9] werden material- und versuchsspezifische Eigenschaften definiert. Je nachdem, ob in Versuchen ermittelte Materialkennwerte- bzw. kurven vorliegen, werden nach Rust [179] diese oder Angaben aus dem Produktdatenblatt des Herstellers verwendet. Die Materialkennwerte werden im vorliegenden Fall aus dem Datenblatt des Materialherstellers entnommen. Obwohl Produktdatenblätter in der Regel eine Einschränkung der Eignung zur Auslegung von Bauteilen beinhalten, eignen sich diese für eine erste

Abschätzung. Für die endgültige Dimensionierung sind die in Kapitel „5.1.4“ aufgeführten Materialtests nach Norm zu verwenden. Für den Einsatz im Fahrzeug sind ggf. abweichend vom Normklima oder unter zu berücksichtigenden Dehnraten weitere Tests durchzuführen.

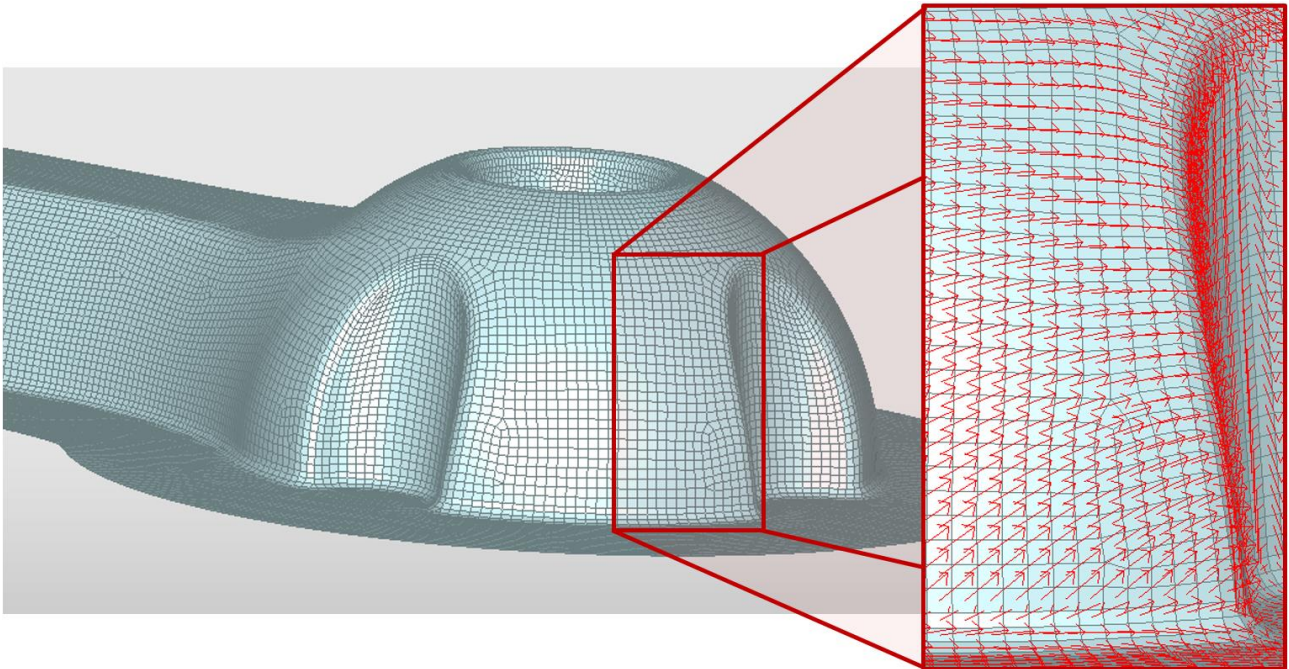
Da Stempel, Auflager und Prüfmaschine im Vergleich zur Organoblechgeometrie als sehr steif gelten, wird auf die Simulation der Maschine gänzlich verzichtet und die Auflager bzw. der Stempel zur Krafteinleitung werden nach Wissmann et al. [208] als „Rigid Body“ definiert. Es wird demnach keine Verschiebung der Knotenpunkte der Krafteinleitungselemente relativ zueinander berechnet, um so die Berechnungszeit zu reduzieren [109].

Da die angestrebte Entwicklungskette auf eine Etablierung in der Automobilindustrie abzielt und dort besonders kurze Entwicklungszeiten verlangt sind, wird in der vorliegenden Arbeit eine Modellierung in der Makroebene angewendet, welche für einen Mehrlagenaufbau weiter unterteilt werden kann. So werden bei der Materialdefinition die Materialeigenschaften von einzelnen Lagen festgelegt, welche in der „Property“ bauteilabhängig und individuell zusammengesetzt sind. So wird z.B. für den Aufbau des Verbunds des Demonstrators mit  $\pm 45^\circ$ -Faserorientierung bzw. einer Kettrichtung in  $45^\circ$  relativ zum Elementkoordinatensystem definiert. Der Schussfaden liegt durch die orthotrope Materialdefinition in  $-45^\circ$ -Richtung. Dem realen Material entsprechend sind die einzelnen Lagen mit einer Dicke von je 0,5 mm vorgegeben. Aus dem Lagenaufbau wird entsprechend der Zusammensetzung ein Materialverhalten berechnet und in die Mittelfläche des SHELLELEMENTS projiziert. Auch dabei wird vom „Verschmieren“ gesprochen, da das materialabhängige Bauteilverhalten nicht den einzelnen Lagen zugeordnet werden kann [193].

Durch diesen Umstand ist es möglich, sowohl die Anzahl der Elemente als auch der Kontaktbedingungen, wie sie zur Darstellung der einzelnen Schichten benötigt werden, erheblich zu reduzieren. Die benötigte Zeit zur Berechnung – auch Central Processing Unit (CPU)-Zeit genannt – wird dadurch deutlich gesenkt. Ein solcher Simulationsansatz eignet sich für Lastsimulationen, die einer geringen Berechnungsdauer bedürfen, wie bspw. Einzelkomponenten, die im Zuge einer Crashanalyse im Vollfahrzeug simuliert werden. Eine zu hohe Detaillierung im Modell beeinträchtigt die Berechnung des gesamten Fahrzeugs [109]. Daher wird dieser Modellierungsansatz für die Machbarkeitsstudie gewählt.

Für eine solche Abschätzungssimulation werden die Einflüsse der Drapiersimulation nicht berücksichtigt, daher wird eine manuelle Faserorientierung vorgenommen. Dabei wird die Kettfaserrichtung

an einem Element vorgegeben und erstreckt sich über die gesamte Bauteilgeometrie [9]. Abbildung 5.5 zeigt einen solchen manuell erzeugten Faserverlauf. In allen Elementen liegt die Schussfaserrichtung senkrecht dazu.



**Abbildung 5.5:** Manuelle Faserorientierung in der Sandwich-Modellierung

Effekte wie interlaminares Gleiten, die einer feineren Modellauflösung bedürfen, können dadurch nicht oder nur bedingt abgebildet werden [24]. Insbesondere für die Drapierung von Mehrlagenaufbauten mit unterschiedlichen Faserorientierungen ist dieser Ansatz daher nicht geeignet. Verschiedene Gewebeausrichtungen können eine deutlich unterschiedliche Drapierung nach sich ziehen, weshalb ein Verschmieren der Schichten einen unzulässigen Eingriff in die Freiheitsgrade bedeutet.

#### 5.1.3.4 Definition der Randbedingungen, Lasten und Ausgabeparameter

Die Randbedingungen des Versuchsaufbaus, die auf die Komponente wirkenden Lasten sowie die zu berechnenden Ausgabeparameter werden nachfolgend definiert. Sowohl im 3-Punkt-Biegeversuch als auch im Domversuch wird auf Grund der Symmetrie zur  $x$ - $z$ -Ebene die Modellierung auf eine Hälfte beschränkt. Dadurch wird die Anzahl der Elemente halbiert und die Berechnung beschleunigt. Für die Knoten in der Symmetrieebene werden in Form von Randbedingungen die Bewegungen in  $y$ -Richtung und die Rotationen um die  $x$ - und die  $z$ -Achse gesperrt. Außerdem werden Auflager so-



wohl in ihren translatorischen Bewegungen als auch in ihren Rotationen fixiert. Als Kontaktbedingungen wird die in „2.3.3 Verwendete Kontaktbedingungen“ erwähnte Modellierung gewählt und hier nicht weiter vertieft.

Entsprechend dem realen Versuch wird in beiden Versuchen der Stempelverfahrweg vorgegeben, wobei der Weg eine Funktion der Zeit darstellt. Um die reale Verfahrgeschwindigkeit von 2 mm/min zu simulieren, wäre auf Grund des kleinsten stabilen Zeitschritts eine Simulation durch die dafür benötigte CPU-Zeit nicht vertretbar, weshalb die simulierte Stempelgeschwindigkeit mit 1000 mm/s angesetzt wird. Da kein Dämpfungsverhalten im Material hinterlegt ist und das Materialmodell auf diese Geschwindigkeit validiert wird, kann diese Vereinfachung als zulässiger Kompromiss zwischen Berechnungszeit und realer Versuchsdurchführung angenommen werden. Um eine impulsartige Kraftapplizierung zu vermeiden, wird als Beschleunigung des Stempels eine Sinus-Funktion beschrieben.

Andere Bewegungs- und Rotationsfreiheiten der Stempel werden als Randbedingung verhindert. Die für die Translation der Stempel benötigte Kraft wird als zu berechnender Parameter definiert. Ergebnisprotokollierung für Spannungen und Dehnungen aller Elemente werden ebenfalls für alle Zeitschritte durchgeführt.

#### **5.1.4 Werkstoffauswahl und Materialuntersuchung zur Materialcharakterisierung**

Im vorliegenden Fall ist der Werkstoff auf ein Organoblech auf Polyamid-Basis mit Glasfasergewebe als Verstärkung festgelegt. Eine Werkstoffauswahl im eigentlichen Sinne findet nachfolgend nicht statt, sondern es wird aufgezeigt, welche Materialinformationen vorliegen müssen, um ein Organoblech in der Simulation beschreiben zu können. Darauf basierend, neben zusätzlichen anwendungsspezifischen Anforderungen, kann bei der Entwicklung einer Komponente eine Werkstoffauswahl getroffen werden.

##### **5.1.4.1 Zugprüfung an trockenen Fasern**

Für den Testaufbau nach „ISO 4046 1:2016 03“ wird eine Prüfmaschine „Zug/Druck Prüfmaschine Instron 5585; 2525-174/43769“ mit einer Kraftmessdose „Kraftmessdose Instron bis 200 kN“ und ein „Advanced Video Extensometer 2663-821“ verwendet. Die Abmessungen der Prüfkörper betra-

gen dabei 300 x 50 mm, wobei sich durch eine Einspannung von je 50 mm im Bereich der Klemmbacken eine freie Einspannlänge von 200 mm ergibt. Die in Abbildung 5.6 gezeigte Einspannung mit auf schiefen Ebenen geführten Klemmbacken soll ein Lösen der Einspannung während der Versuchsdurchführung verhindern, da die Normalkraft auf den Prüfkörper mit zunehmender Zugbelastung steigt.

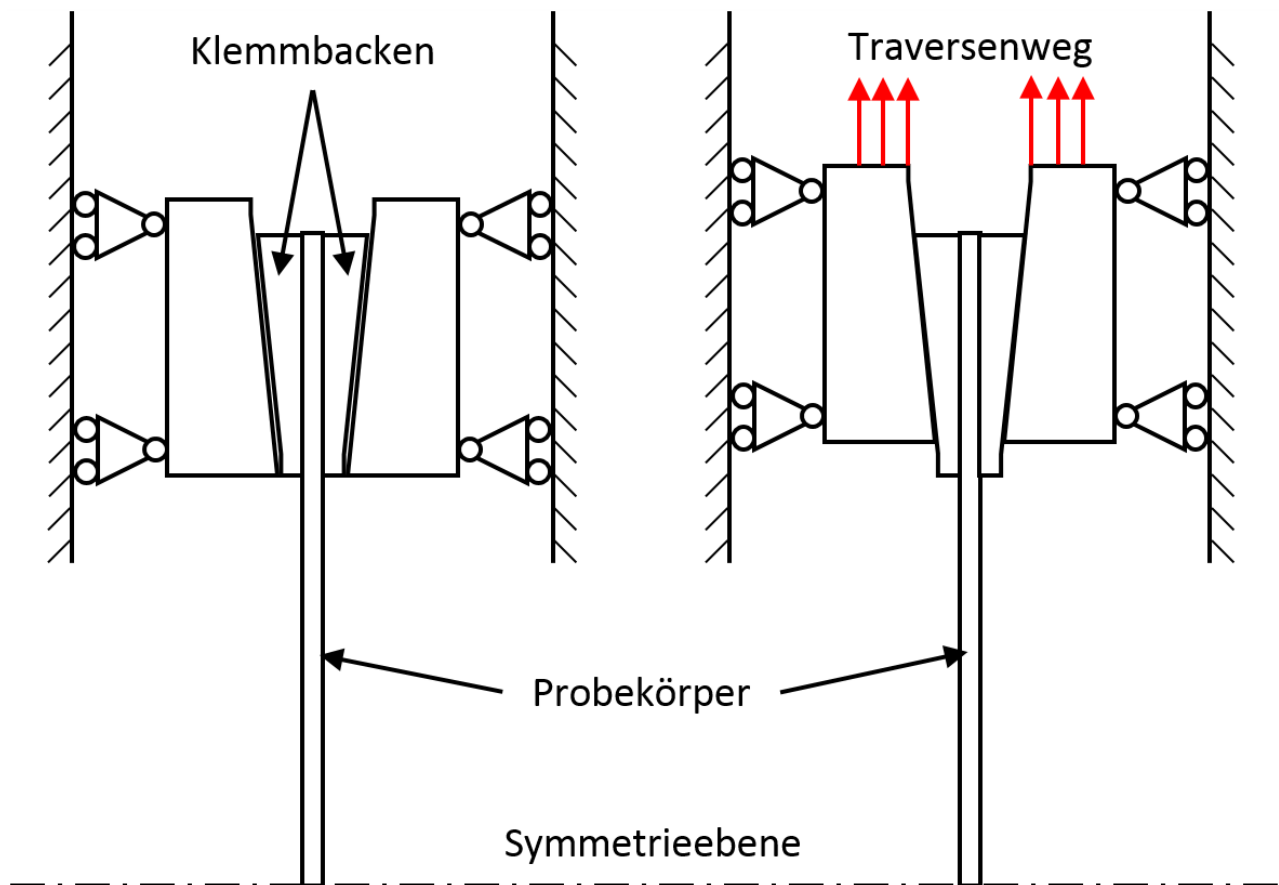


Abbildung 5.6: Prinzip der Einspannung nach ISO 4046 [vgl. 136]

Eine Prüfung angelehnt an „DIN EN ISO 6892-1:2009-12 Metallische Werkstoffe - Zugversuch - Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur“ soll ein am Gewebestreifen ermitteltes Ergebnis verifizieren. Dazu wird eine Prüfmaschine „Zwick/Roell 1445 ZMART.PR BZ1-EXZW002 813332/06“ mit einer Messdose „U2A FC87442“, verwendet. Bei dieser Untersuchung wird ein einzelner aus dem Gewebe entnommener Roving auf seine Zugeigenschaften getestet; dafür ist dieser über eine Wicklung und Fixierung mit einer Rändelschraube, wie in Abbildung 5.7 gezeigt, eingespannt.



**Abbildung 5.7:** Zugprüfung eines einzelnen Rovings angelehnt an DIN EN ISO 6892-1:2009-12

#### **5.1.4.2 Schubprüfung an Organoblech bei Prozesstemperatur**

Gemäß der Ausführung in Kapitel „4.3.3.3 Schubprüfung an Organoblech bei Prozesstemperatur“ wird ein Versuchsaufbau umgesetzt, welcher die Verarbeitungstemperatur berücksichtigt. In einem iterativen Prozess werden der Aufbau und die zugehörige Durchführung des Versuchs optimiert.

##### ***Aufbau 1: Erwärmung im Ofen***

Für den ersten Versuchsaufbau wird ein Ofen „MPC Traction 22391 PH1“ verwendet, der bis 300 °C arbeitet. Mittels einer Prüfmachine „Zwick/Roell 1445 ZMART.PR BZ1-EXZW002 813332/06“ mit einer Messdose „U2A FC87442“, wird eine Kraft-Weg-Kennlinie ermittelt. Um bei allen Prüfkörpern die gleiche Einspannsituation zu erreichen, werden die jeweils drei Schrauben pro Spannereich mit einem Drehmomentschlüssel auf 5 Nm angezogen.

### ***Aufbau 2: Erwärmung mit IR-Strahlern***

Ein Versuchsaufbau mit zwei IR-Strahlern, die den Prüfkörper von beiden Seiten flächig erhitzen, wird umgesetzt. Dazu werden Strahler vom Hersteller „IWT Infrarot-Wärmetechnik GmbH“ vom Typ „IR-Stativstrahler 6kW IWT 6000-ST 2007 – 101“ nach Norm „VDE 0113 Teil 1, VDE 0680 Teil 500“ verwendet. Mit einem Thermometer „Testo 635-2, 01213483/606“ mit einem Messbereich von -200 bis +400 °C, wird die Temperatur des Organoblechs auf beiden Seiten gemessen. Jeweils ein integriertes IR-Thermometer ermöglicht eine Regelung der Strahler. Für die Prüfung wird eine Maschine vom Typ „Zwick/Roell Z020“ mit einer Kraftmessdose bis 20 kN „GTM Gassmann Thies Messtechnik GmbH, B066040.02.00 146948/200“, genutzt.

### ***Aufbau 3: Erwärmung mit IR-Strahlern und Vorheizen im Ofen***

Um den Einfluss des Temperaturgradienten zwischen Rahmen und Prüfkörper zu reduzieren, wird der Testaufbau aus „Aufbau 2: Erwärmung mit IR-Strahlern“ um einen Umluftofen „Heraeus Instruments Function Line Typ T6 95108733 1N/PE“, erweitert, der mit 1,22 kW bis 250 °C arbeitet. Dieser Ofen ermöglicht eine Vortemperierung des Scherrahmens mit eingespanntem Prüfkörper.

### ***Aufbau 4: Ergänzung eines Freiheitsgrades in der Einspannung***

Eine Befestigung des Scherrahmens über einen Stift mit Spiel lässt minimale Rotationen zu und verhindert eine Verspannung durch die Klemmbacken der Zugprüfmaschine. Durch den Stift wird keine laterale Bewegung des Scherrahmens relativ zu der Prüfmaschine ermöglicht, weshalb ein Einfluss auf das Ergebnis der Prüfung nicht zu erwarten ist. Der übrige Testaufbau entspricht „Aufbau 3: Erwärmung mit IR-Strahlern und Vorheizen im Ofen“.

### ***Aufbau 5: Ergänzung um eine Abschirmung freier Konvektion***

Abbildung 5.8 zeigt den realen Versuchsaufbau, in welchem eine zusätzliche Abschirmung der freien Konvektion unterhalb des Scherrahmens angebracht ist. Da die Konvektion nicht vollständig unterbunden werden kann, werden die IR-Strahler schräg zur Materialoberfläche gestellt, so dass sich diese im unteren Bereich des Prüfkörpers näher am Versuchsmaterial befinden als oben. Somit trifft unten eine Strahlung höherer Intensität bzw. Leistung auf die Oberfläche und wirkt somit der stärkeren Kühlung in diesem Bereich entgegen. Ansonsten entspricht der Versuchsaufbau dem „Aufbau 4: Ergänzung eines Freiheitsgrades in der Einspannung“.



**Abbildung 5.8:** Versuchsaufbau mit Abschirmung der freien Konvektion

### 5.1.4.3 Zugprüfung an Organoblech-Rohmaterial

Wie bereits in Kapitel „5.1.1.3 Vergleichbarkeit von Rohmaterial und verarbeitetem Material“ erwähnt, werden für die 0°- und 90°-Richtung Prüfungen nach „DIN EN ISO 527-4:1997-04 Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften - Teil 4: Prüfbedingungen für isotrop und anisotrop faserverstärkte Kunststoffverbundwerkstoffe“ durchgeführt. Bei der Erprobung der Prüfkörpergeometrie „Typ 1“ sind Klemmbrüche und somit nicht für die Auswertung verwendbare Kraft-Weg-Verläufe die Folge. Nach einem von der DIN vorgeschriebenen Wechsel auf Prüfkörpergeometrie „Typ 2“ werden Aufleimer des gleichen Materials mit der gleichen Dicke jedoch unter  $\pm 45^\circ$  aufgebracht.

Als Klebstoff stellen sich die in Tabelle 5.1 gelisteten drei Klebstoffe als geeignet heraus, d.h. alle gegenübergestellten Klebstoffe führen zu einem Bruch des Prüfkörpers in der freien Einspannlänge und lassen sich qualitativ und quantitativ nicht anhand der ermittelten Kraft-Weg-Kurven unterscheiden. Für die nachfolgenden Untersuchungen wird der Klebstoff „Scotch Weld DP490“ von 3M Deutschland GmbH, Kleinostheim, verwendet.

Hersteller	Klebstoffbezeichnung
3M Deutschland GmbH	Scotch Weld DP490
Henkel AG & Co. KGaA	Teroson PU 9225
Henkel AG & Co. KGaA	Sicomet Thixotrop

**Tabelle 5.1:** Auflistung verwendeter Klebstoffe

Bei den Zugprüfungen für Faserorientierungen von  $\pm 45^\circ$  Faserorientierung nach „DIN EN ISO 14129:2014-05 Faserverstärkte Kunststoffe - Zugversuch an 45°-Laminaten zur Bestimmung der Schubspannungs/Schubverformungs-Kurve des Schubmoduls in der Lagenebene“ wird die gleiche Prüfkörpergeometrie wie nach DIN EN ISO 527-4 verwendet. Da bei dieser Faserorientierung keine Klemmbrüche auftreten, kann hier auf das Aufbringen von Aufleimern verzichtet werden. Für die Versuchsdurchführung wird eine Prüfmaschine „Zwick/Roell RetroLine Z100“ mit einer integrierten Kraftmessdose mit einem Messbereich bis 98 kN und „MakroXtens BT2-EXMACRO.H12“ verwendet.

#### **5.1.4.4 Biegeprüfung an Organoblech-Rohmaterial**

Zur Bestimmung der Biegeeigenschaften werden Prüfkörper aus dem Rohmaterial nach „DIN EN ISO 14125:2013-09 Faserverstärkte Kunststoffe - Bestimmung der Biegeeigenschaften“ untersucht. Auf Grund des geringen Moduls des glasfaserverstärkten Organoblechs im Vergleich mit Kohlenstofffasersystemen wird die Prüfkörpergeometrie „Klasse III“ verwendet. Eingesetzt wird dafür eine Prüfmaschine „UTS-Testsysteme Universalmaschine“ mit einer Kraftmessdose des Typs „Interface 1020-AJ“, welche einen Messbereich bis ca. 111 kN abdeckt.

#### **5.1.4.5 Multimodelloptimierung zur Erstellung der Materialkarte**

Mit HyperStudy wird eine Sensitivitätsanalyse der Eingangsparameter, jedoch hier unter Ausschluss der Versagensmechanismen, durchgeführt und in einem iterativen Prozess gemäß der Ausführung in „4.3.3.5 Multimodelloptimierung zur Erstellung der Materialkarte“ optimiert. Das Resultat der Vorgehensweise ist die optimale Parameterkonfiguration für alle vier Simulationsmodelle mit einer Genauigkeit von acht Nachkommastellen. Zwar wird auf die Durchführung eines Druckversuchs verzichtet, jedoch setzt sich der Biegeversuch im Wesentlichen aus Zug- und Druckbeanspruchungen zusammen, weshalb auch ohne Druckversuch die Charakterisierung des realen Druckverhaltens möglich ist.

Analog des Versuchsaufbaus für die Machbarkeitsstudie wird die Modellierung für die beiden Versuche aus jeweils „5.1.4.3 Zugprüfung an Organoblech-Rohmaterial“ und „5.1.4.4 Biegeprüfung an Organoblech-Rohmaterial“ umgesetzt. Äquivalent zu den realen Versuchsaufbauten werden die Randbedingungen angewendet. Allerdings wird auch hier – wie in „5.1.3“ und „5.1.6 Modellbildung für die mechanische Auslegung und Dimensionierung“ – der Stempelweg auf 1000 mm/s erhöht, damit eine Vergleichbarkeit zur Vorauslegung gewährleistet ist. Beispielhaft ist der Simulationsaufbau für die real durchgeführte Biegeprüfung nach DIN EN ISO 14125:2013-09 in Abbildung 5.9 dargestellt.

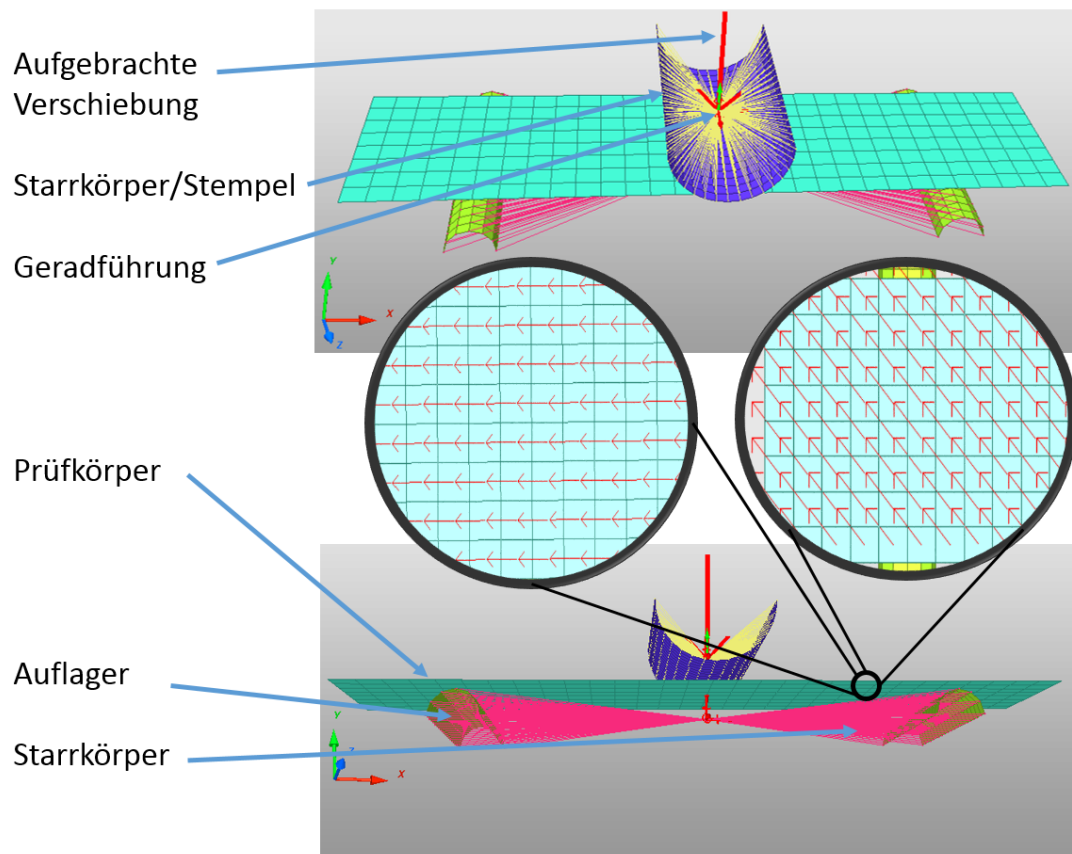


Abbildung 5.9: Modellaufbau der Biegeprüfung nach DIN EN ISO 14125:2013-09

### 5.1.5 Modellbildung für die Prozesssimulation

Zeigt das Ergebnis bei der Machbarkeitsstudie, dass eine bestimmte Geometrie bzw. Konstruktion einer Komponente prinzipiell dazu in der Lage sein sollte das Lastenheft zu erfüllen, folgt eine Prozesssimulation für die Komponentenherstellung. Hier wird der Aufbau einer solchen Drapiersimulation anhand der beiden Demonstratoren erläutert. Die dafür erstellte Konstruktion ist in Kapitel „5.1.2 Entwicklung der Geometrie“ erläutert.

#### 5.1.5.1 Modellaufbau der Drapiersimulation

In Abbildung 5.10 ist der Modellaufbau für die durchzuführende Prozesssimulation gezeigt. Dabei sind die Hauptelemente gekennzeichnet, die den realen Fertigungsprozess widerspiegeln. Äquivalent zum realen Prozess ist die obere Werkzeughälfte unbeweglich und als Matrize (blau) gekennzeichnet. Der Stempel (gelb) fährt von unten nach oben und formt das Organoblech (grün) um. Analog zur Simulation in der Machbarkeitsstudie wird hier nur eine Hälfte aufgebaut, simuliert und im Anschluss



gespiegelt. Außerdem sind in der Abbildung die Federn zur Halterung des Organoblechs gekennzeichnet. In den nachfolgenden Unterkapiteln wird die Vorgehensweise bis zum simulationsfähigen Modell erläutert.

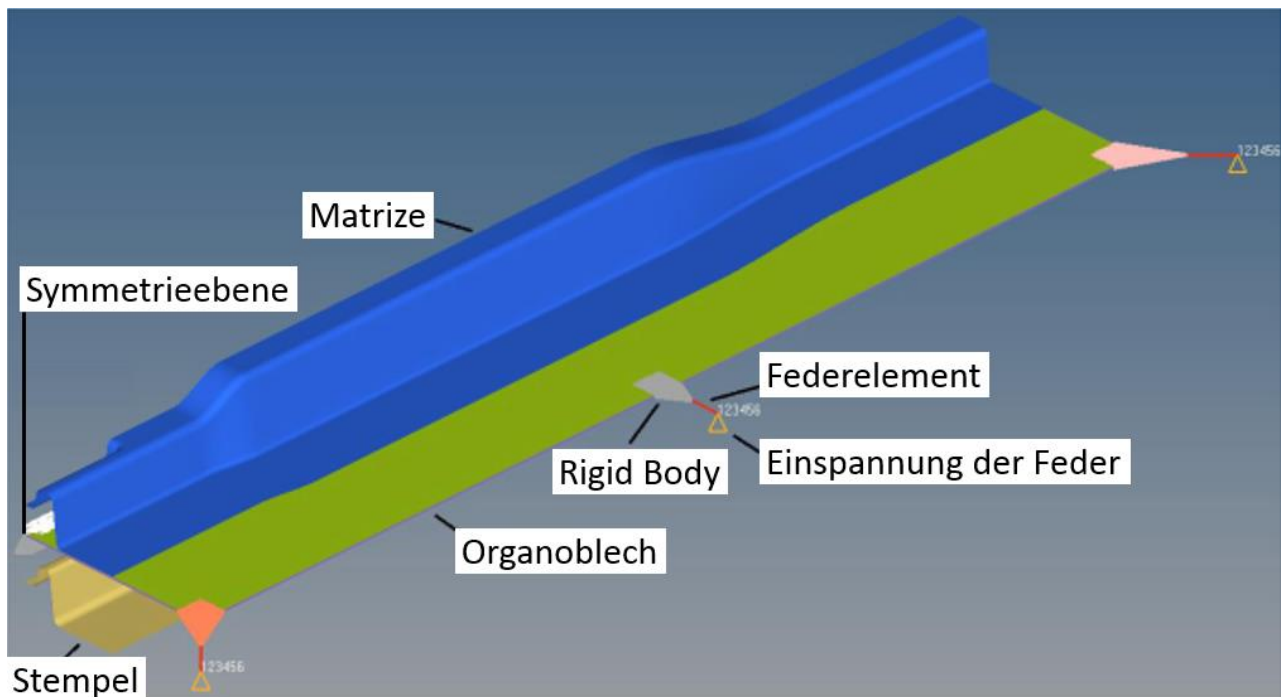


Abbildung 5.10: Modell für die Prozesssimulation

#### 5.1.5.1.1 Modellierung des Werkzeugs

Die CAD-Daten werden aus der Konstruktion des Demonstrators in HyperMesh importiert; dies lässt sich alternativ auch durch die bereits vorliegenden Simulationsdaten aus der Machbarkeitsstudie durchführen. Die Fläche der Oberseite des Demonstrators wird als Matrize und die Fläche der Unterseite als Stempel abgeleitet.

Dabei wird jeweils eine neue Komponente im Aufbau erzeugt, um anschließend automatisch mit Viereck- (Quads, von engl. quadrangle) und Dreieck- (Trias, von engl. triangle) Schalenelementen diskretisiert zu werden. Um die kleinen Radien, insbesondere in der Kofferecke, möglichst genau abzubilden, werden Elemente mit einer Kantenlänge von 1 mm verwendet. Die automatische Vernetzung verwendet Quads zur Diskretisierung; abhängig von der Kantenlänge und den maximal zulässigen Innenwinkeln der Elemente werden vereinzelt Trias eingesetzt, wie im Detailausschnitt der Abbildung 5.11 in der Kofferecke zu erkennen ist. Die Werkzeuge werden beide als Rigid Body

definiert und wirken sich dadurch trotz geringer Elementkantenlänge nicht auf den kleinstmöglichen stabilen Zeitschritt aus [9].

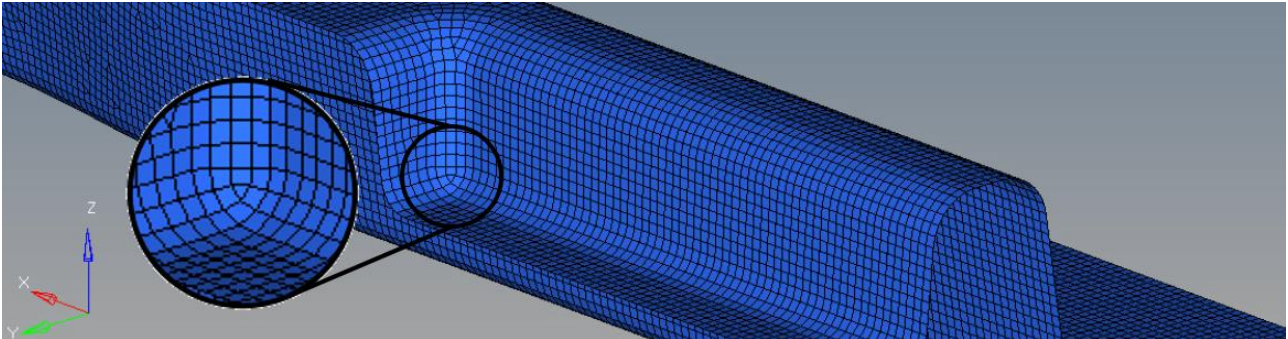


Abbildung 5.11: Diskretisierung des Werkzeugs im Detailausschnitt

### 5.1.5.1.2 Modellierung des Organoblechs

Für die Durchführung der Prozesssimulation wird der in Kapitel „2.3.1.2 Multilayer-/Independent Layer-Modellierung“ beschriebene Multilayer-Ansatz verwendet. Auf Grund der Erläuterung der daraus resultierenden Vor- und Nachteile wird dieser Ansatz für die Darstellung des Organoblechs verwendet. Demnach werden die einzelnen Gewebelagen mit dazwischen liegender Matrix modelliert, was eine Materialcharakterisierung erforderlich macht, bei der Gewebe und Kunststoff getrennt voneinander betrachtet werden. Dafür finden die Materialgesetze LAW58 und LAW59 Anwendung.

Entsprechend des realen Lagenaufbaus werden vier Lagen von je 0,5 mm Dicke, die das Gewebe abbilden, erstellt und zueinander positioniert. Die Lagen werden mit Quads einer Elementkantenlänge von 2 mm diskretisiert. Zur Verbindung der Lagen miteinander werden drei Lagen mit Volumenelementen (engl. Solids) eingefügt, welche die Matrix darstellen. Es ergibt sich ein Aufbau wie in Abbildung 5.12 gezeigt.

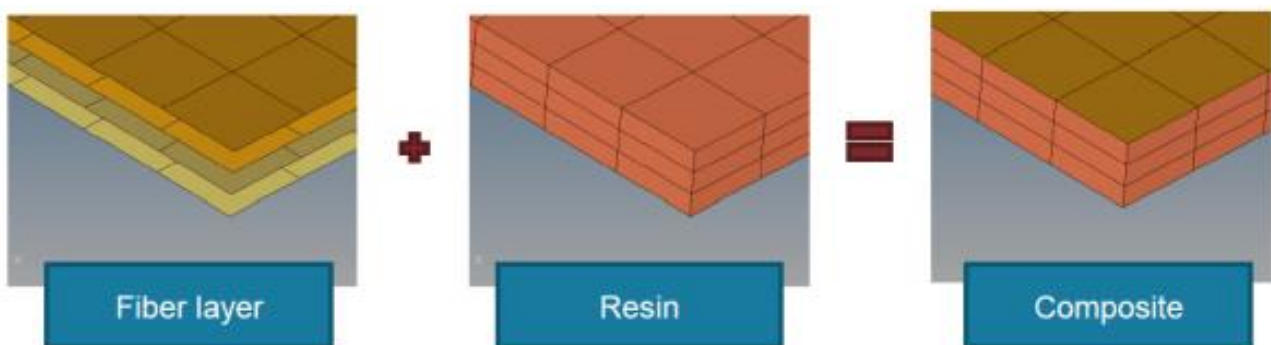


Abbildung 5.12: Materialmodellierung mit der Multilayer-Methode [8]

Da die Knotenpunkte der Volumenelemente deckungsgleich mit denen der Schalenelemente sind, wird über die Funktion „Äquivalenz“ (engl. Equivalence) das Modell von gedoppelten Knotenpunkten bereinigt [9]. Dabei werden Knoten gelöscht, welche weniger als eine bestimmte Distanz auseinander liegen. Da die gedoppelten Knotenpunkte hier die gleichen globalen Koordinaten haben, wird ein minimaler Abstand von 0,1 mm gewählt. Ohne eine Bereinigung des Modells stellt der Solver Radios initiale Penetrierungen fest und erzeugt im Modell Kontaktkräfte, die in der Realität nicht auftreten.

#### **5.1.5.1.3 Festlegung der Umformparameter**

Mit HyperForm wird der Umformvorgang spezifiziert. Zur Reduktion der Simulationszeit wird die Stempelbewegung mit 1000 mm/s definiert, während in der Realität lediglich ca. 150 mm/s erreicht werden. Tendenziell sind die Kräfte bei einer zu hoch gewählten Geschwindigkeit ebenfalls überhöht. Da hier jedoch nicht die erforderliche Kraft zur Umformung, sondern die resultierende Faserorientierung im Vordergrund steht, ist eine nicht ideale Abbildung der Kraft als zulässig angenommen.

#### **5.1.5.1.4 Definition der Randbedingungen**

Wie bereits in „5.1.5.1 Modellaufbau der Drapiersimulation“ erwähnt, wird die Symmetrieebene als Randbedingung analog zur Lastsimulation in Kapitel „5.1.3.4 Definition der Randbedingungen, Lasten und Ausgabeparameter“ eingefügt.

Außerdem werden drei bzw. sechs Bereiche von jeweils 20 mm x 20 mm im Organoblech als Rigid Body definiert. Dieser Bereich repräsentiert die mit Aluminiumfolie vor der IR-Strahlung geschützte Zone, unter welcher der Kunststoff nicht die Schmelztemperatur erreicht. Die Erläuterung dafür findet sich in Kapitel „5.1.7 Herstellung der Demonstratoren“, welche sich mit dem realen Herstellungsprozess befasst. Die in dem Bereich auftretenden elastischen Verformungen im realen Organoblech sind außerhalb des eigentlichen Bauteils und auf Grund der geringen Haltekraft durch die Federn ohnehin vernachlässigbar klein, weshalb die Festlegung als „Rigid Body“ in dem Bereich zulässig ist.

Mittig in jedem Rigid Body im Organoblech wird ein Masterknoten definiert, an welchem in der realen Geometrie die Feder eingehängt ist. Zur Repräsentation des Rahmens, an welchem im realen

Prozess die Federn befestigt sind, wird jeweils ein Knotenpunkt festgelegt, bei dem alle Freiheitsgrade gesperrt sind und der sich somit unbeweglich im Raum befindet. Jeweils eine lineare Feder verbindet die Masterknoten der Rigid Bodies mit dem zugehörigen unbeweglichen Knoten und wird entsprechend der realen Federsteifigkeit mit 0,276 N/mm versehen.

#### **5.1.5.1.5 Einbindung der Materialeigenschaften unter Fertigungstemperatur und Kontaktdefinition**

In Kapitel „2.3.1.2 Multilayer-/Independent Layer-Modellierung“ sind die verwendeten Materialgesetze für Gewebe LAW58 erläutert, und in „4.3.3.1 Materialcharakterisierung für die Prozesssimulation“ ist erwähnt, dass für die Darstellung des schmelzviskosen Kunststoffes LAW59 angewendet wird. Das Material nach LAW59 wird in erster Linie für die Simulation von Schweißpunkten und Klebungen eingesetzt; es eignet sich laut [9] jedoch auch für schmelzviskose Matrices.

Bei Verwendung eines Materials nach LAW59 steigen sowohl E- als auch G-Moduln linear mit der Verformung an. Da bei Klebungen für das Fließen des Werkstoffs eine gewisse Spannung vorliegen muss, ist bei dem Material eine Fließgrenze definierbar, bis zu welcher das Materialverhalten als linear elastisch angenommen ist. Der schmelzflüssige Kunststoff ist hingegen bereits zu Beginn der Simulation fließfähig, weshalb hier eine sehr geringe Fließgrenze von 0,001 MPa gewählt wird, die somit direkt bei Werkzeugkontakt überschritten wird.

Zwischen den Lagen wird der Kontakt Type7 (General Contact) mit einer Reibung von 0,2 definiert. Als Verbindung zwischen dem Organoblech und den Werkzeughälften wird jeweils der Kontakt Type21 (node to rigid surface) ebenfalls mit einer Reibung von 0,2 verwendet. Am Rand des Organoblechs haben die vier Gewebelagen jeweils eine umlaufende Kante, welche über den Kontakt Type11 (edge to edge) von einem Eindringen ineinander abgehalten werden. In der Sensitivitätsanalyse, welche in Kapitel „5.1.5.2 Sensitivitätsanalyse“ durchgeführt wird, findet eine Abschätzung des Einflusses der Kontaktreibung statt, wobei weitere Untersuchungen zur Kontaktreibung zu empfehlen sind.

### 5.1.5.2 Sensitivitätsanalyse

Unter einer DoE wird eine Versuchsplanung, -durchführung und -auswertung verstanden. Die dabei anzuwendende Vorgehensweise wurde in den 1920er Jahren entwickelt [191]. Mit einer solchen Methode soll eine maximale Informationsmenge mit einem Minimum an Versuchen bzw. Simulationen gewonnen werden [191, 196]. Im Gegensatz zu einem Verfahren, bei dem ein Faktor nach dem anderen variiert wird (engl. one factor at a time, OFAT), werden bei der statistischen Auswertung mehrere Parameter gleichzeitig verändert [191]. Hierbei ist – bei einer gewissen Unschärfe – dennoch eine eindeutige Zuordnung des Größeneffekts einzelner Einflussvariablen möglich [191, 196].

#### 5.1.5.2.1 Aufbau des Screenings

In Kapitel „4.3.4 Prozesssimulation“ ist begründet, dass ein Screening der relevanten Einflussparameter zur Einschätzung der Effektgrößen zu treffen ist. Die E-Moduln für Kett- und Schussfäden werden auf Grund der problematischen Zugprüfung nach ISO 4046 und DIN EN ISO 6892, welche in Kapitel „5.3.3.1 Zugprüfung an trockenen Fasern“ erläutert ist, an die ebenfalls dort aufgeführten Literaturwerte angelehnt. Hierbei werden die E-Moduln halbiert, da sich die Angaben jeweils auf eine Belastung parallel zur Faserrichtung beziehen. Jedoch setzt sich hier die Materialdicke zur Hälfte aus den senkrecht dazu verlaufenden Fasern zusammen.

Die maximale Kraft der Einspannfeder berechnet sich aus der initialen Auslenkung und einer Variation der Steifigkeit der Feder. Der Faktor „Insert Error“ stellt einen Einlegefehler des Organoblechs dar, welcher bspw. durch ein Schwingen der Federn in der Einspannung induziert sein könnte. Eine Veränderung der Prozesstemperatur schlägt sich ggf. in einer Änderung der aufgeführten Materialparameter nieder, weshalb eine zusätzliche Variation der Verarbeitungstemperatur nicht erforderlich ist, sondern bereits im verwendeten Aufbau berücksichtigt wird. Die in Tabelle 5.2 aufgeführten Parameter werden innerhalb der dort gezeigten Grenzen als variabel definiert.

Als Ausgabe in der Simulation (engl. Response) wird der maximale Scherwinkel im Bauteil zwischen Kett- und Schussfaden festgelegt. Dieser liegt bei jedem Lauf in der Kofferecke und wird gewählt, da der maximale Scherwinkel  $\alpha_T$  deutlich überschritten werden muss. Ansonsten kommt  $G_T$  nicht zum Tragen und zeigt somit keinen Einfluss. Somit wird untersucht, welchen Einfluss eine Variation der Eingabegrößen auf den simulierten Scherwinkel hat.

<b>Bezeichnung</b>	<b>Minimum</b>	<b>Maximum</b>
<b>Gewebe</b>		
E-Modul der Fasern in Kettrichtung	30000 MPa	40000 MPa
E-Modul der Fasern in Schussrichtung	30000 MPa	40000 MPa
Dichte der Fasern	2250 kg/m <sup>3</sup>	2750 kg/m <sup>3</sup>
Reibung zwischen Gewebelagen	0,1	0,3
Einlegefehler der Gewebelagen	0°	6°
G-Modul der Gewebelagen vor dem kritischem Scherwinkel	0.0012 MPa	0.0415 MPa
Kritischer Scherwinkel	30°	60°
G-Modul der Gewebelagen nach dem kritischem Scherwinkel	0.021 MPa	0.530 MPa
Dämpfungskoeffizient der Fasern	0,03	0,07
Reibungskoeffizient der Fasern	0,03	0,07
<b>Matrix</b>		
E-Modul der Matrix pro mm	80 MPa/mm	2000 MPa/mm
G-Modul der Matrix pro mm	80 MPa/mm	2000 MPa/mm
Dichte der Matrix	900 kg/m <sup>3</sup>	1100 kg/m <sup>3</sup>
<b>Spannfeder</b>		
Maximale Kraft der Spannfedern	17,5 N	52,5 N
<b>Werkzeug</b>		
Reibung der Werkzeugoberfläche	0,1	0,3

Tabelle 5.2: Auflistung untersuchter Einflussparameter auf die Prozesssimulation im Screening

### 5.1.5.2.2 Aufbau der DoE nach Hammersley

Die in „5.3.4.1 Auswertung des Screenings“ herausgearbeiteten Parameter sind mit den zugehörigen Minima und Maxima in Tabelle 5.3 aufgeführt. In der DoE werden im Gegensatz zum Screening die Parameter nicht stufenweise abgeprüft, sondern durch ein sogenanntes „Space Filling Design“ kontinuierlich zwischen Minimum und Maximum verteilt [192]. Mit einem Zufallsgenerator, der auf den Hammersley-Punkten basiert, werden die Faktoren gleichförmig in der Faktorenbreite permutiert

[192]. Der Vorteil gegenüber einer Gaußverteilung liegt in einer genaueren Abbildung in den Grenzbereichen [9, 102]. Der Aufbau nach Hammersley gehört zu den Quasi-Monte Carlo Verfahren und bildet den Faktorraum homogener ab als bspw. unter Verwendung der Latin Hypercube Methode [9, 102, 192].

Bezeichnung	Minimum	Maximum
<b>Gewebe</b>		
E-Modul der Fasern in Kettrichtung	30000 MPa	40000 MPa
Dichte der Fasern	2250 kg/m <sup>3</sup>	2750 kg/m <sup>3</sup>
Reibung zwischen Gewebelagen	0,1	0,3
Einlegefehler der Gewebelagen	0°	6°
Kritischer Scherwinkel	30°	60°
G-Modul der Gewebelagen nach dem kritischem Scherwinkel	0.021 MPa	0.530 MPa
Reibungskoeffizient der Fasern	0,03	0,07
<b>Matrix</b>		
G-Modul der Matrix pro mm	80 MPa/mm	2000
Dichte der Matrix	900 kg/m <sup>3</sup>	1100 kg/m <sup>3</sup>
<b>Werkzeug</b>		
Reibung der Werkzeugoberfläche	0,1	0,3

**Tabelle 5.3:** Auflistung untersuchter Einflussparameter auf die Prozesssimulation in der DoE nach Hammersley

Als minimale Anzahl von Simulationen zur Erfassung der Zusammenhänge ergibt sich aus Formel 5.1 eine Anzahl von mindestens 66 Simulationsläufen [9]:

$$n_r = \frac{(n_f + 1)(n_f + 2)}{2} \quad 5.1$$

$n_r$  [-] Anzahl durchzuführender Versuche

$n_f$  [-] Anzahl zu variierender Faktoren

### 5.1.5.3 Ermittlung der realen Faserorientierung

Zur Validierung der Prozesssimulation werden die Ergebnisse in Form von berechneten Scherwinkeln aus der Drapiersimulation an verschiedenen Positionen mit CT-Aufnahmen überprüft. Die simulierte Faserorientierung lässt sich für jedes Element ausgeben; an jeweils der gleichen Position des zu prüfenden Elements wird nach dem in Kapitel „5.2.4.4 Ermittlung der realen Faserorientierung“ beschriebenen Vorgehen der reale Scherwinkel gemessen.

Für die Ermittlung der realen Faserorientierung werden die Demonstratoren mit einem CT vom Typ „Y.CT Precision“ der YXLON International GmbH mit einer Röntgenröhre „Mikrofokus Y.FXE 225.48“ mit offenem Direktstrahlkopf und einem Detektor „Flachdetektor Perkin Elmer Y.XRD 1620AN1x“ mit 2048 x 2048 Pixeln von je 200  $\mu\text{m}$  x 200  $\mu\text{m}$  analysiert.

Die Auflösung des zu untersuchenden Objekts hängt bei gegebenem Detektor und gegebener Röntgenröhre bzw. gegebenem Brennfleck von den Abmessungen der Prüfkörpergeometrie ab [31, 204]. In Abbildung 5.13 wird ersichtlich, dass ein Bauteil mit geringer Größe näher an der Röntgenröhre positioniert werden kann, wodurch das Bauteil auf dem Bildsensor eine größere Anzahl von Pixeln abdeckt. Aus diesem Grund werden die Demonstratoren nicht im Ganzen gescannt, sondern mit der Bandsäge in einzelne kleinere Abschnitte zerteilt. Bei den vorliegenden Demonstratorausschnitten ergibt sich eine Volumen-Pixel-Größe – auch Voxel genannt – von 38-47  $\mu\text{m}$ ; bis zu dieser Größe können etwaige Effekte dargestellt werden.

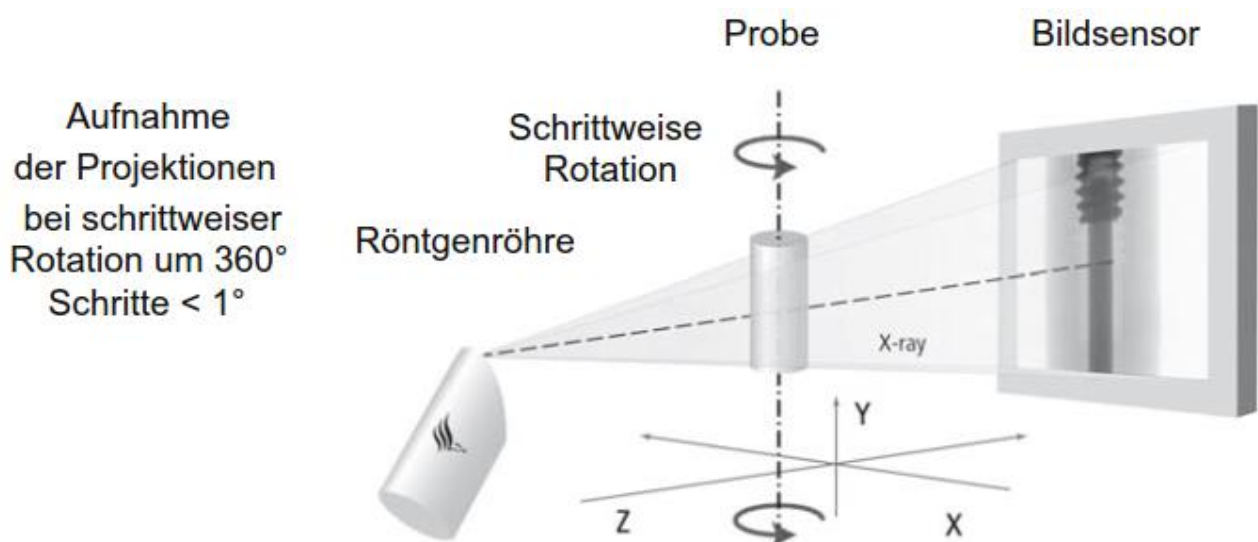


Abbildung 5.13: Prinzipielle Darstellung der Bildaufnahme in der Röntgentomographie [204]



### **5.1.6 Modellbildung für die mechanische Auslegung und Dimensionierung**

Bei der hier durchgeführten Auslegung und Dimensionierung, bei der die Faserorientierung als Ergebnis der Drapiersimulation berücksichtigt wird, wird auf kein bestimmtes Bauteilverhalten hingearbeitet. Aus diesem Grund besteht im vorliegenden Fall kein Bedarf an weiteren Iterationsschritten zur Optimierung der Konstruktion. Für die Serienentwicklung einer Komponente müssten anhand der Ergebnisse der hier durchgeführten Lastsimulation die entsprechenden Veränderungen an der Konstruktion vorgenommen werden, um den im Lastenheft definierten Anforderungen zu entsprechen. Mit der angepassten Geometrie ist eine neue Prozesssimulation anzuschließen, auf deren Basis eine neue Lastsimulation durchzuführen ist. In mehreren Iterationsschritten ist so die Komponente bis zur Erfüllung der definierten Randbedingungen zu optimieren.

Das prinzipielle Vorgehen bei der Lastsimulation im Zuge der mechanischen Auslegung und Dimensionierung entspricht der Herangehensweise bei der Simulation in der Vorauslegung in Kapitel „5.1.3“. Es wird weiterhin mit dem Softwarepaket der Altair Engineering GmbH „Hyperworks 14.0“, Böblingen, gearbeitet, wobei der wesentliche Unterschied im Material liegt, da hier nicht länger mit einer ideal orthotropen Faserorientierung gerechnet wird, sondern basierend auf den Ergebnissen der Drapiersimulation.

#### **5.1.6.1 Modellaufbau und Vernetzung für die mechanische Auslegung und Dimensionierung**

Es werden sowohl der 3-Punkt-Biege- als auch der Domversuch aufgebaut, um einen Vergleich zwischen den Resultaten aus den realen Versuchsdurchführungen mit den Ergebnissen der Simulation in der Vorauslegung zu ziehen. Dafür werden in HyperCrash die CAD Daten in Form von STEP-Dateien, entsprechend dem realen Aufbau bzw. dem Vorgehen in Kapitel „5.1.4“, importiert und zueinander positioniert.

Um eine möglichst hohe Vergleichbarkeit zwischen Simulation mit und ohne Berücksichtigung der Faserorientierung zu erreichen, werden auch für beide Simulationen die gleichen Diskretisierungen verwendet. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass bei einer Fahrzeugsimulation eine Komponente mit lediglich 2 mm Elementkantenlänge den größten stabilen Zeitschritt unwirtschaftlich klein werden lassen kann. Eine Anpassung auf eine andere Netzgröße ist demnach ggf. erforderlich.

### 5.1.6.2 Einbindung der Materialeigenschaften und Import der Faserorientierung aus der Prozesssimulation

Zunächst wird die Materialkarte in das Modell eingebunden, welche im Rahmen der Multimodelloptimierung in Kapitel „5.3.3.5 Multimodelloptimierung zur Erstellung der Materialkarte“ erstellt wurde. Diese Materialkarte ist allerdings unabhängig von der realen Faserorientierung. Während in der Vorauslegung in Kapitel „5.1.3“ ein perfekt orthotropes Materialverhalten im Zusammenhang mit dem Materialgesetz LAW25 vorausgesetzt wurde, soll diese Vereinfachung hier nicht länger getroffen werden. Es wird stattdessen auf das Ergebnis aus der Drapiersimulation zurückgegriffen.

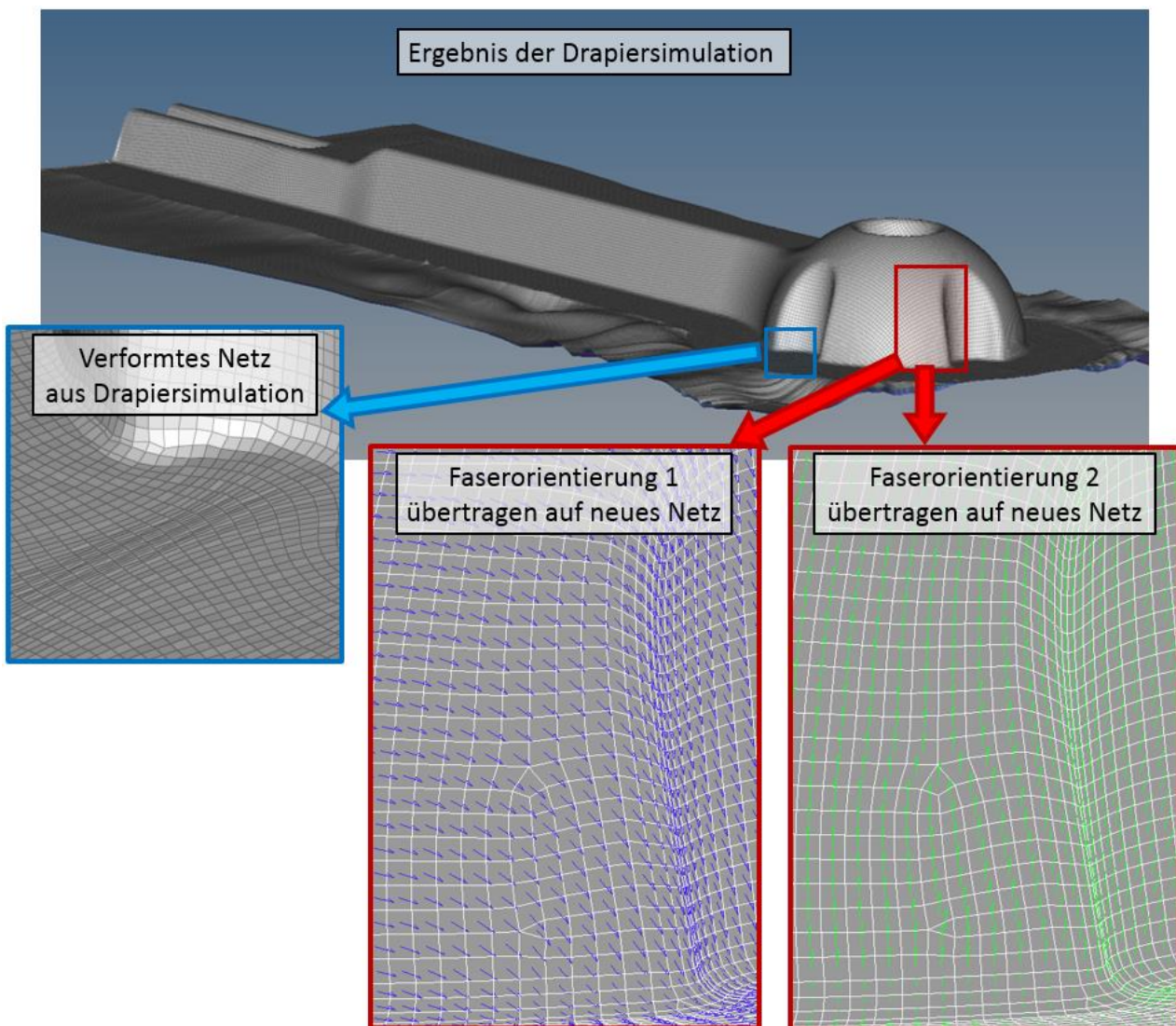


Abbildung 5.14: Elementverformung und Faserorientierungen nach der Drapiersimulation

Für die Durchführung der Lastsimulation muss zwar vom Resultat der Prozesssimulation ausgegangen werden, dennoch werden die Ergebnisse auf ein neues Netz übertragen und nicht das bereits verformte Netz verwendet. Wie in Abbildung 5.14 zu erkennen ist, kann das Netz in Folge der Drapiersimulation mitunter starke Verformungen erfahren und ein Seitenverhältnis von 1:10 deutlich überschreiten. Die verzerrten Elemente eignen sich nicht für eine anschließende Lastsimulation. Außerdem sind unterschiedliche Elementkantenlängen für die jeweiligen Simulationen vorteilhaft, weshalb ein neues Netz verwendet wird.

In Kapitel „2.3.1 Modellierungsebenen“ wird ausführlich auf die verschiedenen Modellierungsebenen eingegangen. Insbesondere in den Kapiteln „2.3.1.1 Sandwich-Modellierung“ und „2.3.1.2 Multilayer-/Independent Layer-Modellierung“ werden Vor- und Nachteile der Ansätze für Prozess- und Lastsimulation erläutert. Auf Grund der dort geführten Diskussion liegen die Faserorientierungen nach der Prozesssimulation in Form von Vektoren für jede Lage einzeln vor, was beispielhaft in Abbildung 5.14 anhand der Kett- und Schussfasern der obersten Lage gezeigt ist. In der Lastsimulation wird jedoch eine Modellierung nach dem Sandwich-Ansatz verfolgt, bei welchem nur eine einzige Lage simuliert wird. Daher ist es nötig, die Faserorientierungen der vier einzelnen Lagen in eine einzige Schicht zu projizieren.

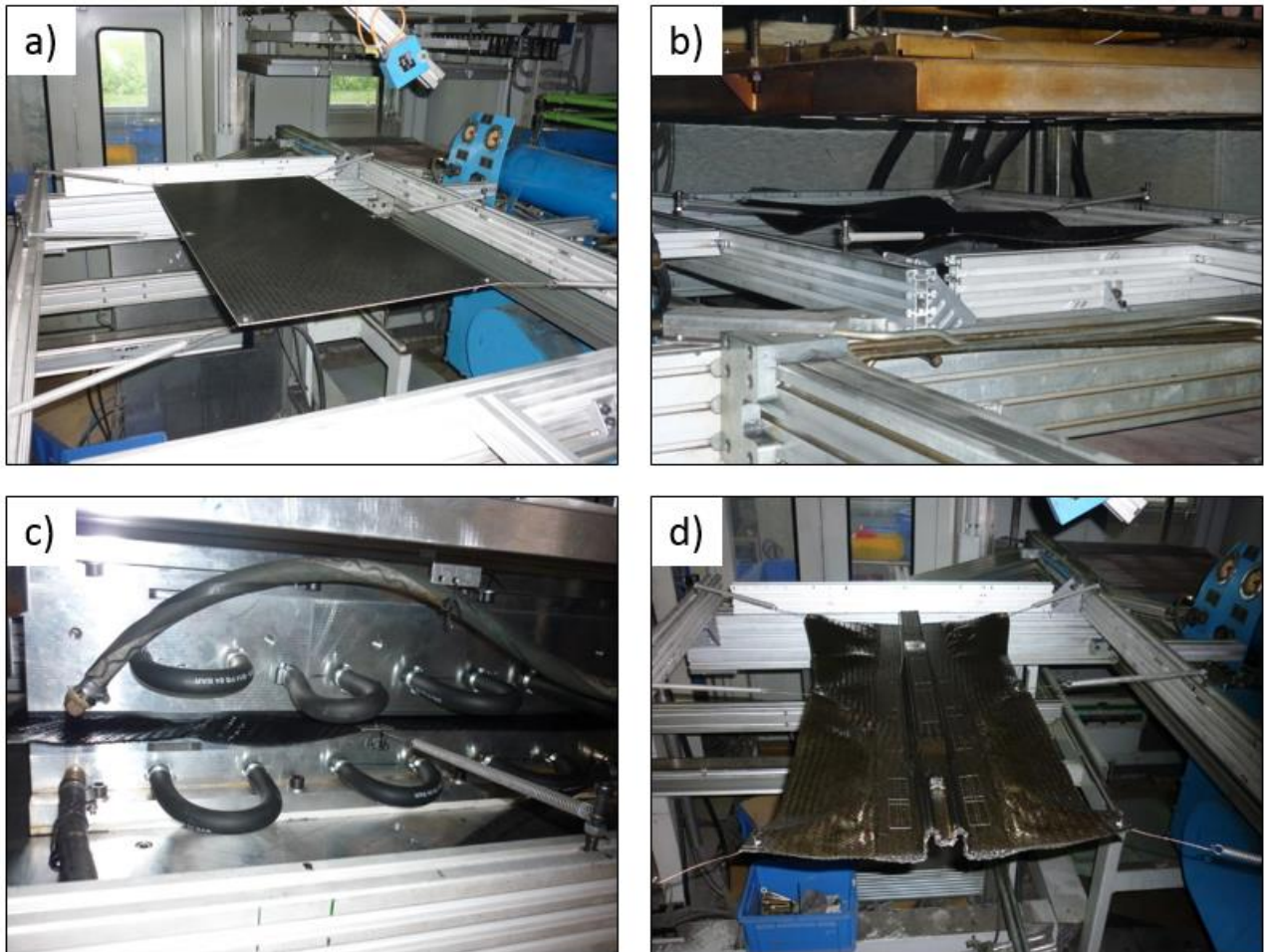
Der übrige Aufbau des Modells bzgl. Kontakten, Randbedingungen, Lastapplikation usw. entspricht dem Vorgehen nach Kapitel „5.1.3 Modellbildung für die Machbarkeitsstudie“ und wird hier nicht erneut beschrieben.

### **5.1.7 Herstellung der Demonstratoren**

Der Herstellungsprozess des Thermoformens ist zur Erläuterung des Aufbaus in Abbildung 5.15 mit Fotos dokumentiert. Verwendet wird eine Thermoformmaschine „Kiefel KD80/120-4“. Die Ober- und Unterheizung werden mit jeweils 50 Quarzstrahlern umgesetzt, welche eine maximale Einzelleistung von je 500 W erreichen. In Summe entspricht das 25 kW pro Heizfeld. Die Schließgeschwindigkeit der Formhälften beträgt bis zum ersten Organoblechkontakt 150 mm/s und wird für den Drapiervorgang auf 50 mm/s reduziert.

In Abbildung 5.15 a) ist der Organoblechzuschnitt in einen Rahmen eingespannt. Für die Drapierung werden für die stattfindende Untersuchung möglichst wenige Freiheitsgrade gesperrt, um Abweichungen in der Simulation nicht durch Einschränkungen in der Komplexität zu unterdrücken. In einer

Serie würde die Einspannung möglicherweise anders gelöst. Hier wird das Organoblech an sechs Punkten mit jeweils einer Feder „RZ-115 FI“ des Herstellers „Gutekunst + Co.KG“ über einen Haken zum Rahmen fixiert. Damit die Haken bei schmelzviskoser Matrix nicht aus dem Material herausgezogen werden, wird über die Fixierungsposition ein Streifen Aluminiumfolie aufgebracht, welche die IR-Strahlung im Aufheizvorgang weitestgehend reflektiert und so das darunter befindliche Material nicht die Schmelzphase erreicht.



**Abbildung 5.15:** Herstellungsprozess des Organoblech-Demonstrators, Variante A

Die Position zwischen den IR-Strahlern beim Aufheizen des Materials auf 290 °C Verarbeitungstemperatur zeigt Abbildung 5.15 b). Zunächst sind vier Fixierungspunkte an den Eckpunkten des Zuschnitts vorgesehen. Da das Material jedoch nach dem Übergang in die Schmelzviskosität durchhängt, nähert es sich den unteren IR-Strahlern an. Die dadurch erhöhte Intensität der Strahlung

auf das Material führt zu einer bräunlichen Verfärbung, was auf eine lokale Zersetzung des Kunststoffes hinweist [38]. Um dies zu vermeiden, wird mittig auf jeder Seite jeweils ein zusätzlicher Spannungspunkt eingebracht.

Nachdem das Organoblech auf Prozesstemperatur aufgeheizt ist, wird es zwischen die beiden Werkzeughälften aus Stahl geschwenkt. Dieses schließt mit einer Presskraft von 2000 kN und bringt das Organoblech in Form, was in Abbildung 5.15 c) zu sehen ist. Dabei wird die Oberflächentemperatur mit einem Temperatursensor in der Mitte der Kontur überwacht. Das Werkzeug wird hier mit Wasser auf 100 °C temperiert. Es kühlt das Material 90 s lang ab, bis es wie in Abbildung 5.15 d) entformt wird.

Aus dem untersuchten Material werden Zuschnitte mit den Abmessungen 880 mm x 460 mm x 2 mm auf einer Wasserstrahlschneidanlage aus Blechen mit den Abmessungen 3600 mm x 1200 mm x 2 mm generiert. In Tabelle 5.4 sind alle produzierten Demonstratorteile beider Varianten aufgelistet.

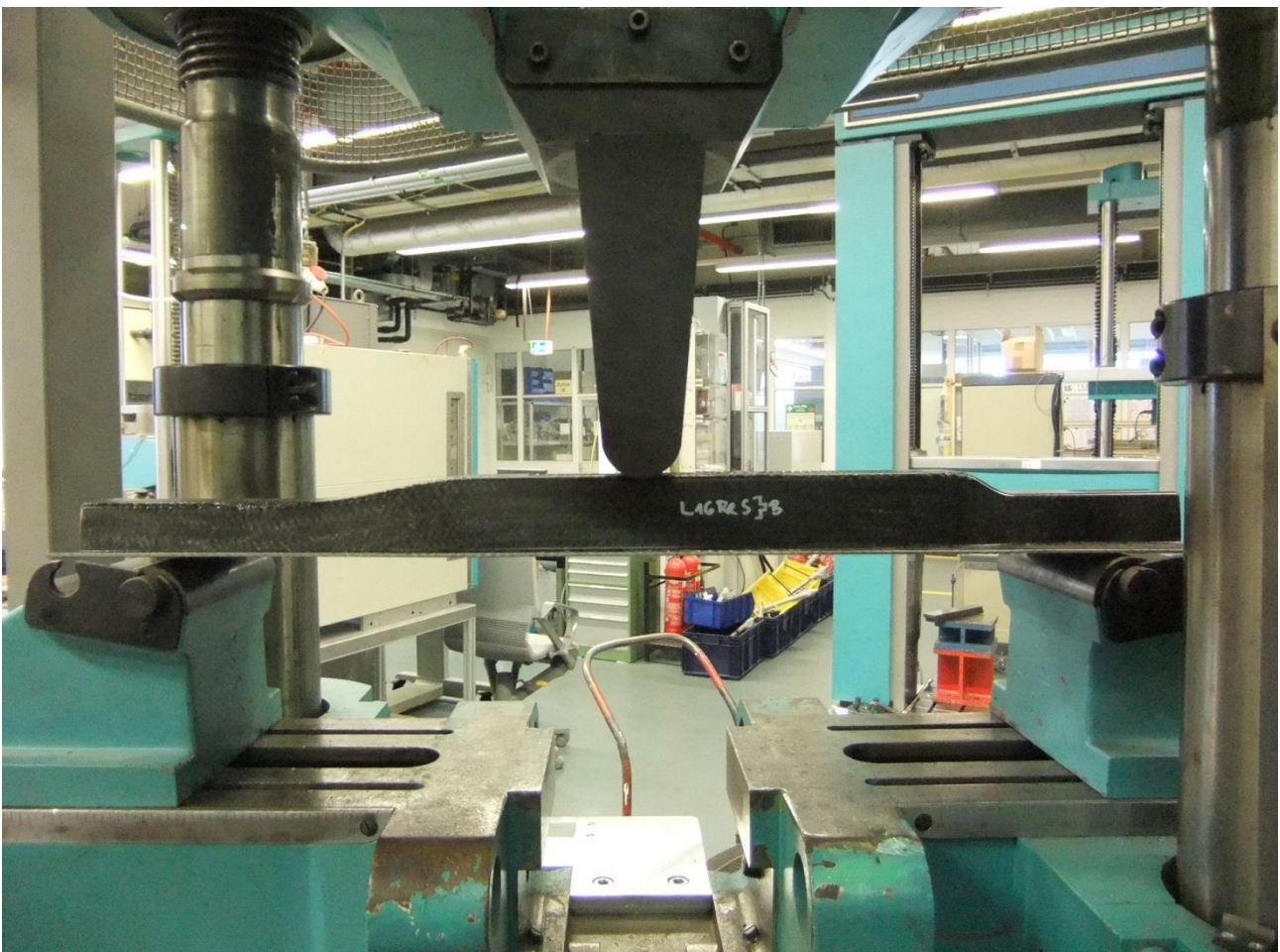
Bezeichnung	Faserorientierung	Anzahl
Demonstrator Variante A (ohne Dom)	0/90°	22
	±45°	10
Demonstrator Variante B (mit Dom)	0/90°	12
	±45°	6

**Tabelle 5.4:** Auflistung produzierter Demonstratorteile

### 5.1.8 Aufbau der Biegeprüfung am Demonstrator der Variante A

Der Versuch zur Untersuchung des Demonstrators Variante A wird in einem Biegeversuch in Anlehnung an „DIN 53293:1982-02 Prüfung von Kernverbunden; Biegeversuch“ durchgeführt. Dabei wird jedoch auf Grund der asymmetrischen Bauteilgeometrie kein 4-Punkt-, sondern ein 3-Punkt-Biegeversuch verwendet, was in Kapitel „5.1.1.6 Validierbarkeit im 3-Punkt-Biegeversuch“ erläutert ist. Versuchsaufbau und -durchführung sind dabei für die Demonstratoren mit 0/90° und ±45°-Faserorientierung identisch.

Auf einer Prüfmaschine „MAN-HBV Universalprüfmaschine (Blattfederprüfmaschine)“ mit integrierter Kraftmessdose, die einen Messbereich bis 600 kN hat, wird der 3-Punkt-Biegeversuch aufgebaut. Der Demonstrator wird mittig in der Prüfvorrichtung positioniert. Der Auflagerabstand beträgt 600 mm, während der Stempel mit jeweils 300 mm Abstand zu beiden Auflagern eine Verformung auf die Komponente aufbringt. Abbildung 5.16 dokumentiert den Versuchsaufbau fotografisch. Die Auflager sind mit einem Durchmesser von 50 mm ausgeführt, der Stempel weist einen Durchmesser von 49 mm auf.



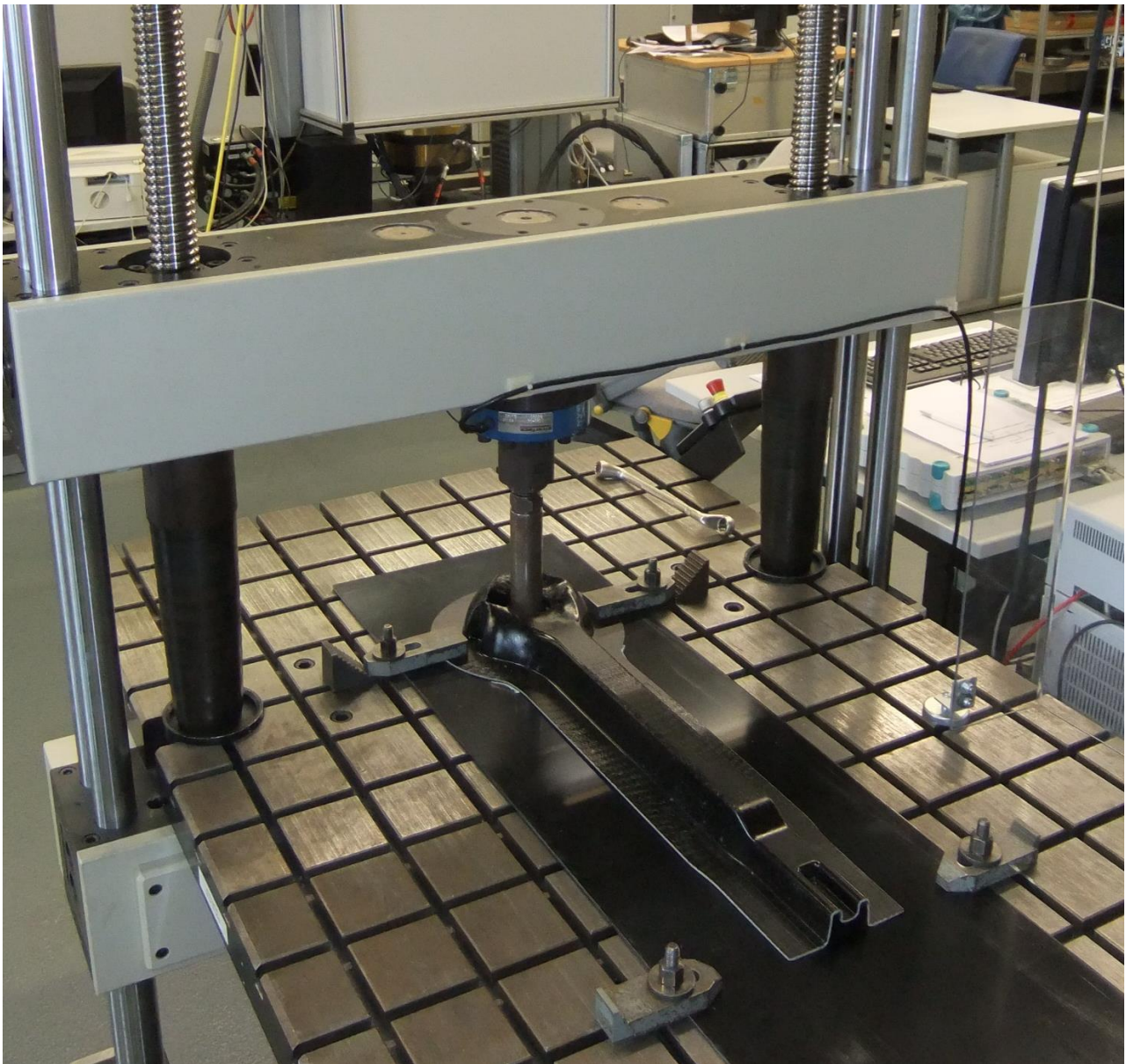
**Abbildung 5.16:** Versuchsaufbau des 3-Punkt-Biegeversuchs

### **5.1.9 Aufbau des Domversuchs am Demonstrator der Variante B**

Der Domversuch ist an keine genormte Prüfung angelehnt und dient zur Prüfung des Bauteilverhaltens in Bereichen von großen Scherwinkeln am Demonstrator der Variante B. Die Intention des Versuchs ist bereits in Kapitel „5.1.1.7 Validierbarkeit im Domversuch“ erläutert. Wie bei der

Biegeprüfung am Demonstrator der Variante A sind Versuchsaufbau und -durchführung mit denjenigen für die Demonstratoren der Variante B mit  $0/90^\circ$  und  $\pm 45^\circ$ -Faserorientierung identisch.

Auf einer „UTS-Testsysteme Universalprüfmaschine“, Ulm, wird der Versuch durchgeführt; die Kraft wird mit einer Kraftmessdose des Typs „Interface 1020-AJ“ ermittelt, welche einen Messbereich bis 111 kN aufweist. Der Prüfkörper wird, wie in Abbildung 5.17 zu sehen, auf einer 1 mm dicken PA6-Platte verspannt. Ein Stempel befindet sich mittig über dem Dom und hat einen Durchmesser von 50 mm, was zusätzlich in Abbildung 5.4 veranschaulicht ist.



**Abbildung 5.17:** Versuchsaufbau des Domversuchs

## 5.2 Versuchsdurchführung

In den nachfolgenden Ausführungen werden alle Entwicklungsschritte durchgeführt, welche zuvor aufgebaut und erläutert wurden.

### 5.2.1 Umsetzung des Demonstrators in CAD

Der Demonstrator wird hier mit der CAD-Software NX 9 der Siemens Industry Software GmbH, Köln, konstruiert. Dieser wird als Volumenmodell erstellt und ist in Kapitel „5.3.1 Betrachtung zur Konstruktion des Demonstrators“ gezeigt.

### 5.2.2 Berechnung in der Machbarkeitsstudie

Das zu berechnende Modell wird in Form eines Input-Files an den Solver Radioss 14 übergeben, welcher die Lösung bestimmt. Die Berechnung wird mit der Hardwarespezifikation nach Tabelle 5.5 und den Berechnungsdaten nach Tabelle 5.6 durchgeführt:

Bezeichnung	Typ
Desktop Workstation	HP Z620
CPU Art	Intel Xeon E5-2680 (2.70 GHz, 64 Bit)
CPU Anzahl	2
CPU Kerne	8 per CPU
CPU Threads	16 per CPU
RAM	32 GB DDR3 1600

**Tabelle 5.5:** Hardwarespezifikation für die Simulation

Bezeichnung	Einstellung
Nodal Timestep	1E-07 s
CPU Kerne	31
Double Precision	On

**Tabelle 5.6:** Berechnungsinformationen bei der Vorauslegung

Explizite Lösungsverfahren eignen sich für Berechnungen mit starken Verformungen und Belastungen mit hohen Geschwindigkeiten, weshalb diese für die Drapiersimulation eingesetzt werden [101,



109]. Für quasistatische Belastungen wie bspw. dem vorliegenden 3-Punkt-Biegeversuch und dem Domversuch sollte sich der implizite Solver Optistruct prinzipiell zwar besser eignen, dennoch wird auch für die Belastungssimulation das explizite Verfahren verwendet, um Schnittstellenprobleme bei der Übertragung der Ergebnisse aus der Prozesssimulation zu vermeiden [109].

Zwar wird in der Machbarkeitsstudie keine Prozesssimulation vorangestellt, wodurch auch keine Schnittstellenproblematik entsteht. Dennoch wird für eine Vergleichbarkeit zwischen den in der Machbarkeitsstudie erzielten Ergebnissen und den Resultaten der Lastsimulation, welche auf einer Prozesssimulation basieren, in allen Fällen der gleiche explizite Solver Radioss verwendet. Außerdem soll das hier entwickelte Vorgehen für Komponenten im hochdynamisch belasteten Bereich erweiterbar sein, weshalb ohnehin auch für Belastungssimulationen der explizite Solver eingesetzt werden muss. Somit soll der Aufwand für die Validierung der Materialkarten bei quasistatischen Belastungen vermieden werden.

### **5.2.3 Materialprüfung in der Werkstoffauswahl**

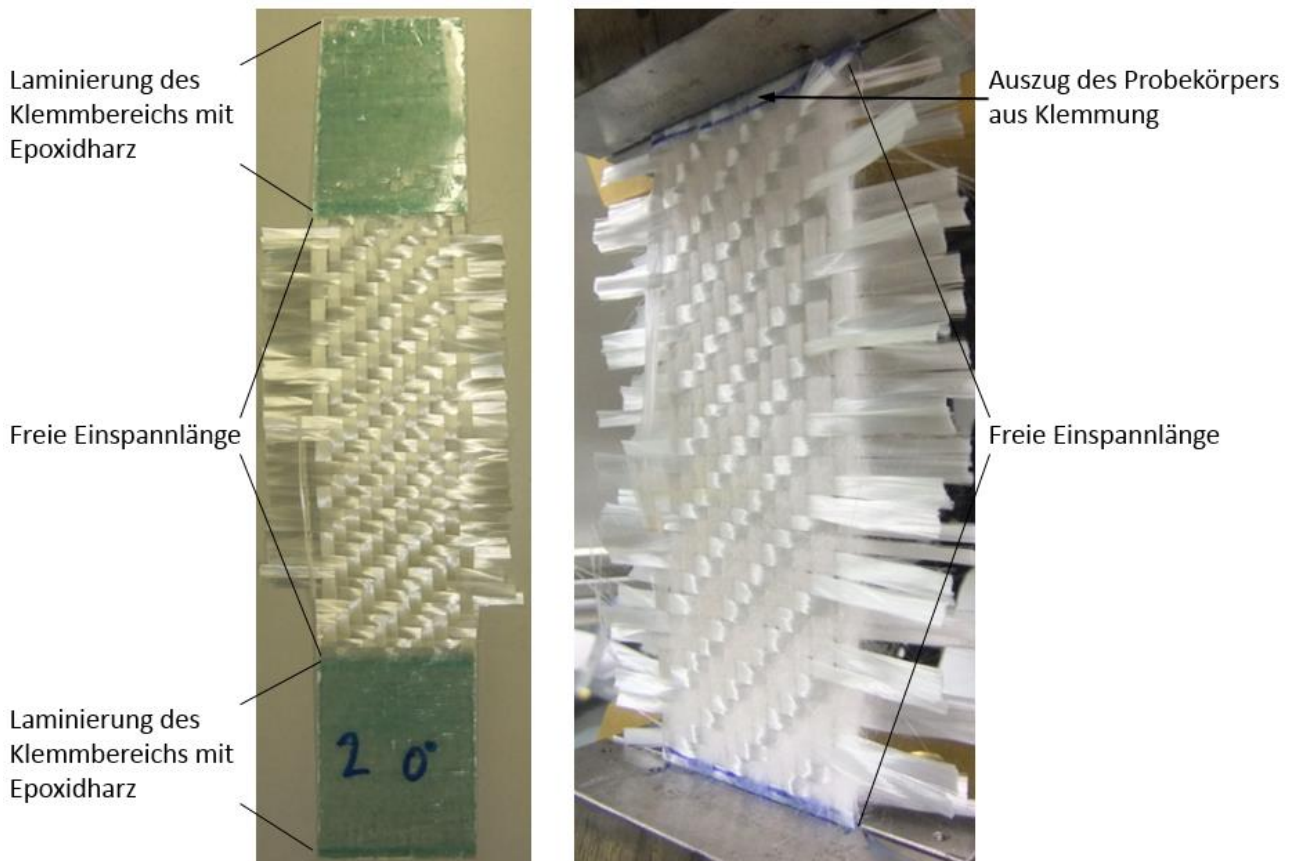
Es wird hier im Einzelnen auf alle durchgeführten Materialprüfungen eingegangen.

#### **5.2.3.1 Zugprüfung an trockenen Fasern**

Auf Grund der geringen Reibung sowohl zwischen Glasfaserrovings und Klemmbacken als auch zwischen den Glasfasern untereinander wird die Haftreibung überwunden, bevor ein Reißen der Fasern erreicht wird [68]. Die Folge ist ein Kraftanstieg bis zur Überwindung der Haftreibung mit einem anschließenden Ausziehen der Fasern aus der Einspannung. Auch eine Aufbringung von Klebeband im Bereich der Einspannung verändert nichts an diesem Verhalten, da dadurch die Reibung zwischen den Fasern nicht beeinflusst werden kann.

Eine in der Einspannung partielle Laminierung mit Epoxidharz zur Fixierung der Fasern untereinander verhindert ebenfalls nicht bei allen Prüfkörpern ein Ausziehen aus dem Kunststoff. Abbildung 5.18 zeigt links die Laminierung im Spannbereich und rechts das eingespannte Gewebe bei Kraftapplikation, wobei die oben und unten eingezeichnete blaue Linie die Position des Gewebes im Klemmbereich vor dem Herausziehen anzeigt. Das Ausziehen aus dem Epoxidkunststoff lässt sich auf eine mit Polyamid abgestimmte Schlichte auf den Fasern zurückführen, wodurch keine ausrei-

chende Fasermatrixanhaftung erreicht wird. Außerdem ist ein Eindringen des Harzes bei der Prüfkörpervorbereitung in die freie Einspannlänge, verursacht durch einen Kapillareffekt zwischen den Fasern, nicht auszuschließen.



**Abbildung 5.18:** Zugversuch am trockenen Gewebe mit Laminierung im Einspannbereich

Auch der Versuchsaufbau zur Verifizierung nach „DIN EN ISO 6892-1:2009-12 Metallische Werkstoffe - Zugversuch - Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur“ stellt sich als ungeeignet heraus, da auch hier die Einspannung problematisch ist. Die Bestimmung der Dehnung ergibt sich aus Formel 5.2 [72]:

$$\varepsilon = \frac{l}{l_0} \quad 5.2$$

$l$  [mm] Länge

$l_0$  [mm] Ausgangslänge

Hierbei stellt  $l_0$  die Ausgangslänge, also die freie Einspannlänge, dar. Der Bruch der Filamente ereignet sich jedoch nicht innerhalb der Prüflänge, sondern direkt unter der Rändelschraube, selbst bei

einer Erhöhung der Wicklungen auf 10. Demnach wird dort die für den Roving kritische Spannung überschritten, was auf eine Kraftübertragung und eine Dehnung innerhalb der Wicklungen hinweist. Da sich der Roving offenbar durch die Wicklungen dehnt, ist die Ausgangslänge bei der Berechnung der Dehnung nach Formel 5.2 nicht mit der freien Einspannlänge gleichzusetzen und somit fehlerbehaftet. Auf Grund dessen können aus diesem Versuchsaufbau keine Materialparameter ermittelt werden.

### **5.2.3.2 Schubprüfung an Organoblech bei Prozesstemperatur**

#### ***Aufbau 1: Erwärmung im Ofen***

Der Rahmen mit eingespanntem Prüfkörper wird auf Prozesstemperatur gebracht, wobei der Versuchsaufbau in kaltem Zustand erfolgen muss und für eine gleichmäßige Temperaturverteilung in Rahmen und Material ein bis zwei Stunden benötigt werden. Der Traversenweg  $d_{pf}$ , welcher bereits in Kapitel „4.3.3.3 Schubprüfung an Organoblech bei Prozesstemperatur“ in Abbildung 4.4 gezeigt wird, wird mit einer konstanten Geschwindigkeit von 20 mm/min beschritten. Bei einem Scherwinkel von ca.  $65^\circ$  wird der Versuch beendet, da der Scherrahmen nach nur wenigen weiteren Grad an Verscherung seine maximale Auslenkung erreicht.

#### ***Aufbau 2: Erwärmung mit IR-Strahlern***

Damit eine vom Hersteller angegebene maximale Verweilzeit von 5 min oberhalb der Schmelztemperatur nicht überschritten wird, muss die Verfahrensgeschwindigkeit der Traverse auf konstante 100 mm/min erhöht werden. Der integrierte IR-Thermometer ermöglicht eine Regelung der Strahler, so dass das Material, an den realen Fertigungsprozess angelehnt, innerhalb von zwei Minuten auf die erforderliche Zeit aufgeheizt wird. Analog zu der Versuchsdurchführung von „Aufbau 1: Erwärmung im Ofen“ wird der Versuch abgeschlossen.

#### ***Aufbau 3: Erwärmung mit IR-Strahlern und Vorheizen im Ofen***

Im Ofen wird der Scherrahmen mit dem bereits eingespannten Prüfkörper innerhalb von 50 min auf  $200^\circ\text{C}$  knapp unter dem Schmelzbereich vorgewärmt. Dabei kann gewährleistet werden, dass der Kunststoff nicht zu lange oberhalb der Schmelztemperatur verweilt. Außerdem ist der Rahmen ebenfalls auf diese Temperatur durchgeheizt und somit der Temperaturgradient beim folgenden Erwärmen reduziert.

Der Schmelzbereich wird zuvor durch dynamische Differenzkalorimetrie (DSC) nach „DIN EN ISO 11357-3:2013-04 Kunststoffe - Dynamische Differenz-Thermoanalyse (DSC) - Teil 3: Bestimmung der Schmelz- und Kristallisationstemperatur und der Schmelz- und Kristallisationsenthalpie“ ermittelt. Überprüft wird das Durchheizen des Rahmens ebenfalls mit dem Temperaturfühler „Testo 635-2“.

Nachdem der Aufbau von Scherrahmen und Prüfkörper durchgeheizt ist, wird dieser aus dem Ofen entnommen und innerhalb von 2 min in die Zugprüfmaschine montiert. Entsprechend der Versuchsdurchführung von „Aufbau 2: Erwärmung mit IR-Strahlern“ wird der Versuch abgeschlossen.

#### ***Aufbau 4: Ergänzung eines Freiheitsgrades in der Einspannung***

Durch den angepassten Prüfaufbau verändert sich in der Versuchsdurchführung im Vergleich zu der aus „Aufbau 3: Erwärmung mit IR-Strahlern und Vorheizen im Ofen“ lediglich, dass die Zeit für den Einbau des Scherrahmens in die Zugprüfmaschine nach der Entnahme aus dem Ofen auf ca. eine Minute gekürzt werden kann, da nur ein Stift gesetzt werden muss, um den Rahmen zu fixieren. Dadurch kühlt der Rahmen weniger ab und der Temperaturgradient zum Organoblech nach der Erwärmung auf Prozesstemperatur wird weiter verringert.

#### ***Aufbau 5: Ergänzung um eine Abschirmung freier Konvektion***

In einem iterativen Prozess werden mehrere Prüfkörper nacheinander auf Schmelztemperatur gebracht. Bei einer Neigung der Strahler von ca. 20° stellt sich ein über die Fläche homogener Übergang in die schmelzflüssige Phase ein.

Der Versuch wird ansonsten nach der Erläuterung in „Aufbau 4: Ergänzung eines Freiheitsgrades in der Einspannung“ durchgeführt. Um durch den Rahmen verursachte Reibungskräfte auf das Versuchsergebnis auszuschließen, wird der Rahmen dem Versuch ohne Prüfmaterial unterzogen. Die daraus ermittelte Kraft wird von den resultierenden Kräften in allen Versuchsdurchläufen subtrahiert. Entsprechend dem erläuterten Aufbau werden die Versuche für 280, 290 und 300 °C durchgeführt.

### **5.2.3.3 Zugprüfung an Organoblech-Rohmaterial**

Die Prüfung wird gemäß DIN EN ISO 527-4:1997-04 durchgeführt. Prüfkörper, die in der Einspannung versagen und einen sogenannten Klemmbruch erleiden, werden aus der Auswertung ausgeschlossen.

#### 5.2.3.4 Biegeprüfung an Organoblech-Rohmaterial

Der Materialtest wird nach „DIN EN ISO 14125:2013-09 Faserverstärkte Kunststoffe - Bestimmung der Biegeeigenschaften“ absolviert. Da die Prüfkörper mit einer Faserorientierung von  $\pm 45^\circ$  nicht eindeutig zu einem bestimmten Zeitpunkt brechen, wird der Versuch erst gestoppt, wenn diese soweit durchgebogen sind, bis diese aus den Auflagern gleiten.

#### 5.2.3.5 Multimodelloptimierung zur Erstellung der Materialkarte

Die Berechnung wird mit der Hardwarespezifikation nach Tabelle 5.5 und den Berechnungsdaten nach Tabelle 5.7 durchgeführt:

Bezeichnung	Einstellung
Nodal Timestep	
Zugversuch mit $0/90^\circ$ -Faserorientierung	$2.4 \cdot 10^{-7}$ s
Zugversuch mit $\pm 45^\circ$ -Faserorientierung	$2.4 \cdot 10^{-7}$ s
3-Punkt-Biegeversuch $0/90^\circ$ -Faserorientierung	$5.15 \cdot 10^{-8}$ s
3-Punkt-Biegeversuch $\pm 45^\circ$ -Faserorientierung	$5.15 \cdot 10^{-8}$ s
CPU Kerne	31
Double Precision	On

**Tabelle 5.7:** Berechnungsinformationen bei der Multimodelloptimierung

Ansonsten wird äquivalent zu dem Vorgehen in der Machbarkeitsstudie vorgegangen. Entsprechend des Modellaufbaus wird im Gegensatz zur Machbarkeitsstudie jedoch nicht jeweils eine Simulation pro Modell durchgeführt, sondern es werden pro Modell jeweils 132 Simulationsläufe mit jeweils variierten Materialkartenparametern durchgeführt. Daraus lässt sich ein statistischer Zusammenhang zwischen der Auswahl der Parameter und den Ergebnissen ableiten, und eine Parameterkonfiguration, welche alle vier Versuche möglichst ideal abbildet, kann gefunden werden.

#### 5.2.4 Berechnung in der Prozesssimulation

Anschließend werden die Berechnungen erläutert, welche im Rahmen der Prozesssimulation durchgeführt werden.

### 5.2.4.1 Berechnung der Drapierung

Die Berechnung der Umformung erfolgt wie in der Machbarkeitsstudie ebenfalls mit dem expliziten Solver Radioss 14 und benötigt ca. 30-40 min bei gleicher Hardwarespezifikation wie in Tabelle 5.5. Mit den in Tabelle 5.8 angegebenen Eingabedaten zur Berechnung wird diese durchgeführt:

Bezeichnung	Einstellung
Nodal Timestep	$5.855400 \cdot 10^{-7}$ s
AMS Timestep	$5.855400 \cdot 10^{-6}$ s
CPU Kerne	31
Double Precision	On

**Tabelle 5.8:** Berechnungsinformationen bei der Prozesssimulation

### 5.2.4.2 Durchführung des Screenings

Zur automatischen Abarbeitung aller Simulationsaufträge wird HyperStudy verwendet, und die in Tabelle 5.2 aufgeführten Simulationsparameter werden in den angegebenen Grenzen variiert. Dabei lehnen sich die Werte für E1, E2, G0, GT und  $\alpha T$  an die in Abschnitt „5.3.3 Auswertung der Materialtests in der Werkstoffauswahl“ ermittelten realen Materialparameter an, während sich die anderen Werte an den zugehörigen Datenblättern orientieren.

Im ersten teilfaktoriellen Screening werden alle Faktoren auf ihre Signifikanz überprüft. Dazu werden mit 20 Simulationen alle 15 Faktoren randomisiert in jeweils zwei Stufen durchgeführt. In jeder Berechnung werden jeweils die dem Minimum bzw. Maximum entsprechenden Stufen verwendet. Durch eine Prüfung mit nur zwei Stufen werden nicht-lineare Einflüsse und Wechselwirkungen zwischen den Eingabeparametern nicht ermittelt, außerdem lässt sich kein Metamodell für eine schnelle Prüfung weiterer, nicht simulierter Parameterkonfigurationen ableiten [168].

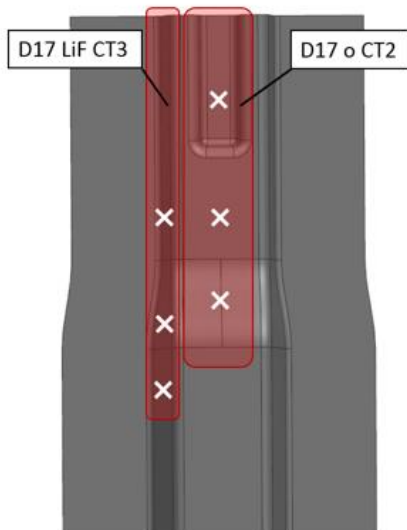
Mit der Statistiksoftware „Minitab 17“ der Minitab Inc., State College PA 16801-3210 (USA), wird die vom Solver abzuarbeitende Liste mit Parameterkonfigurationen erstellt, an HyperStudy übergeben und nach der Berechnung aller Ergebnisse ausgewertet. Mit dem gleichen Rechner und den gleichen Berechnungsvorgaben wie bereits in Tabelle 5.5 bzw. Tabelle 5.8 aufgeführt beträgt die Rechendauer ca. 13 Stunden.

### 5.2.4.3 Berechnung der DoE nach Hammersley

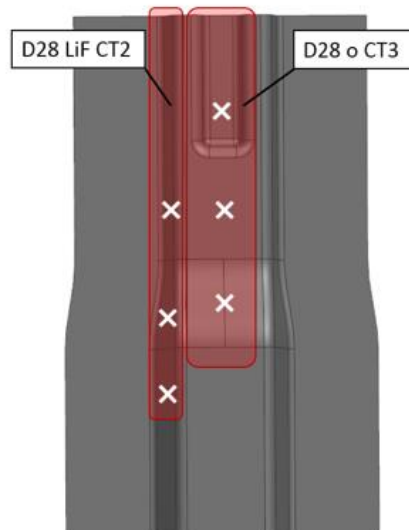
Um die Genauigkeit der Aussage über die Effektgrößen zu erhöhen, werden in der DoE 132 Läufe automatisch mit HyperStudy durchgeführt. Dementsprechend werden in den 132 Simulationsläufen 132 Levels pro Faktor gewählt; dabei ergibt sich bei gleicher Hardwarekonfiguration wie in Tabelle 5.5 und bei gleichen Berechnungsdaten wie in Tabelle 5.8 eine gesamte Berechnungsdauer von ca. 82 Stunden. Das Vorgehen entspricht ansonsten dem bei der Durchführung des Screenings.

### 5.2.4.4 Ermittlung der realen Faserorientierung

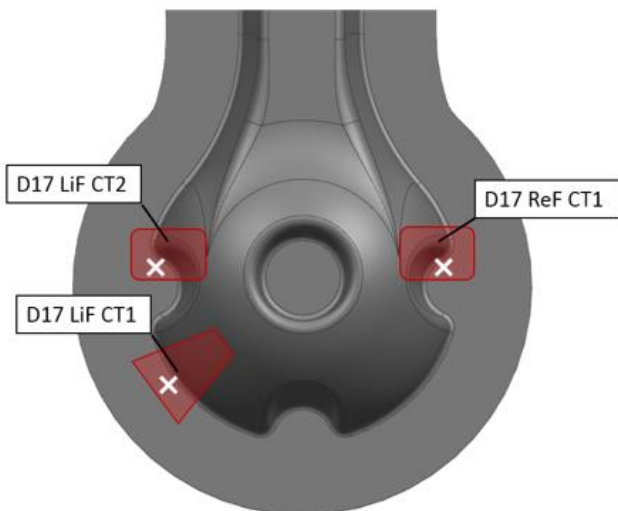
Demonstrator Variante A mit 0/90°-Faserorientierung



Demonstrator Variante A mit ±45°-Faserorientierung



Demonstrator Variante B mit 0/90°-Faserorientierung



Demonstrator Variante B mit ±45°-Faserorientierung

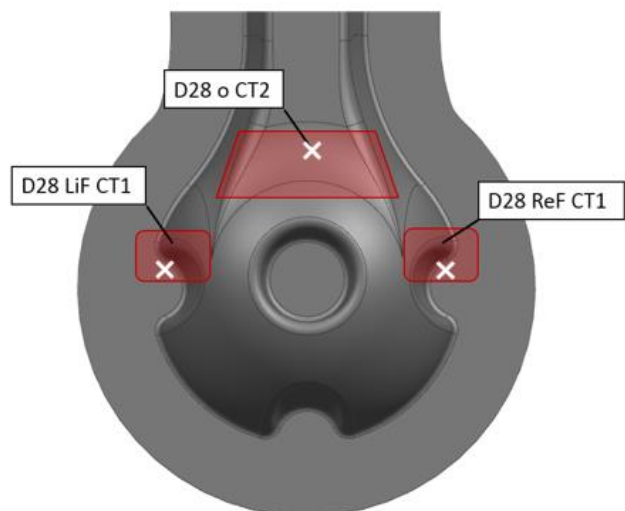
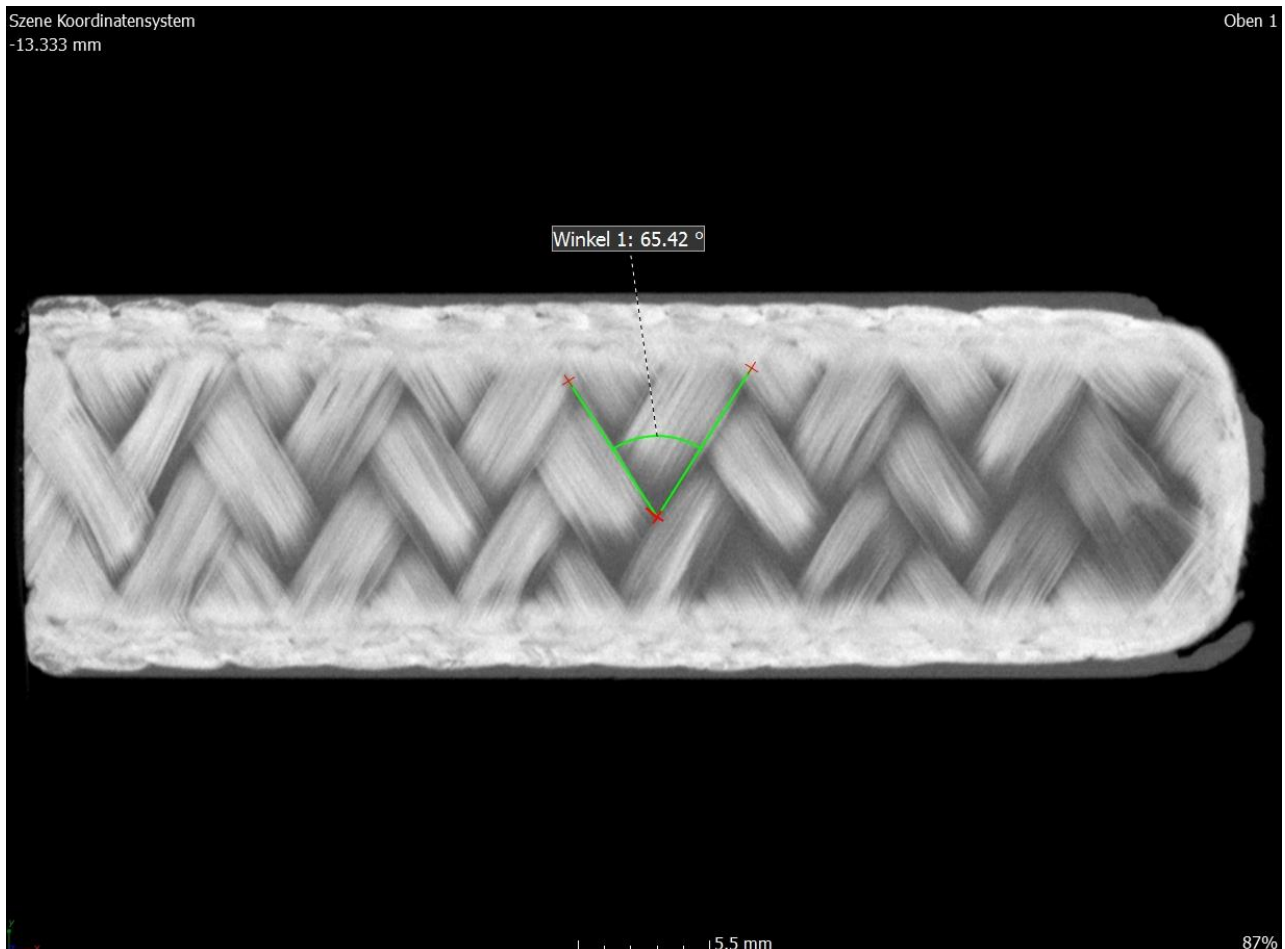


Abbildung 5.19: Prüfpunkte am Demonstrator zum Vergleich des Scherwinkels mit der Simulation

Für die Überprüfung der Scherwinkel werden die in Abbildung 5.19 aufgezeigten Messpunkte aus den rot dargestellten Ausschnitten mit der Simulation verglichen. Die Positionen zur Kontrolle der Simulation werden nach den in Kapitel „5.1.2 Entwicklung der Geometrie“ erläuterten Kriterien ausgewählt. Diese Bereiche zeigen sowohl in der Simulation als auch visuell am realen Bauteil, dass hier Scherwinkel größer  $0^\circ$  erreicht werden. Für jede Position wird für jede der vier Lagen der Scherwinkel ermittelt.



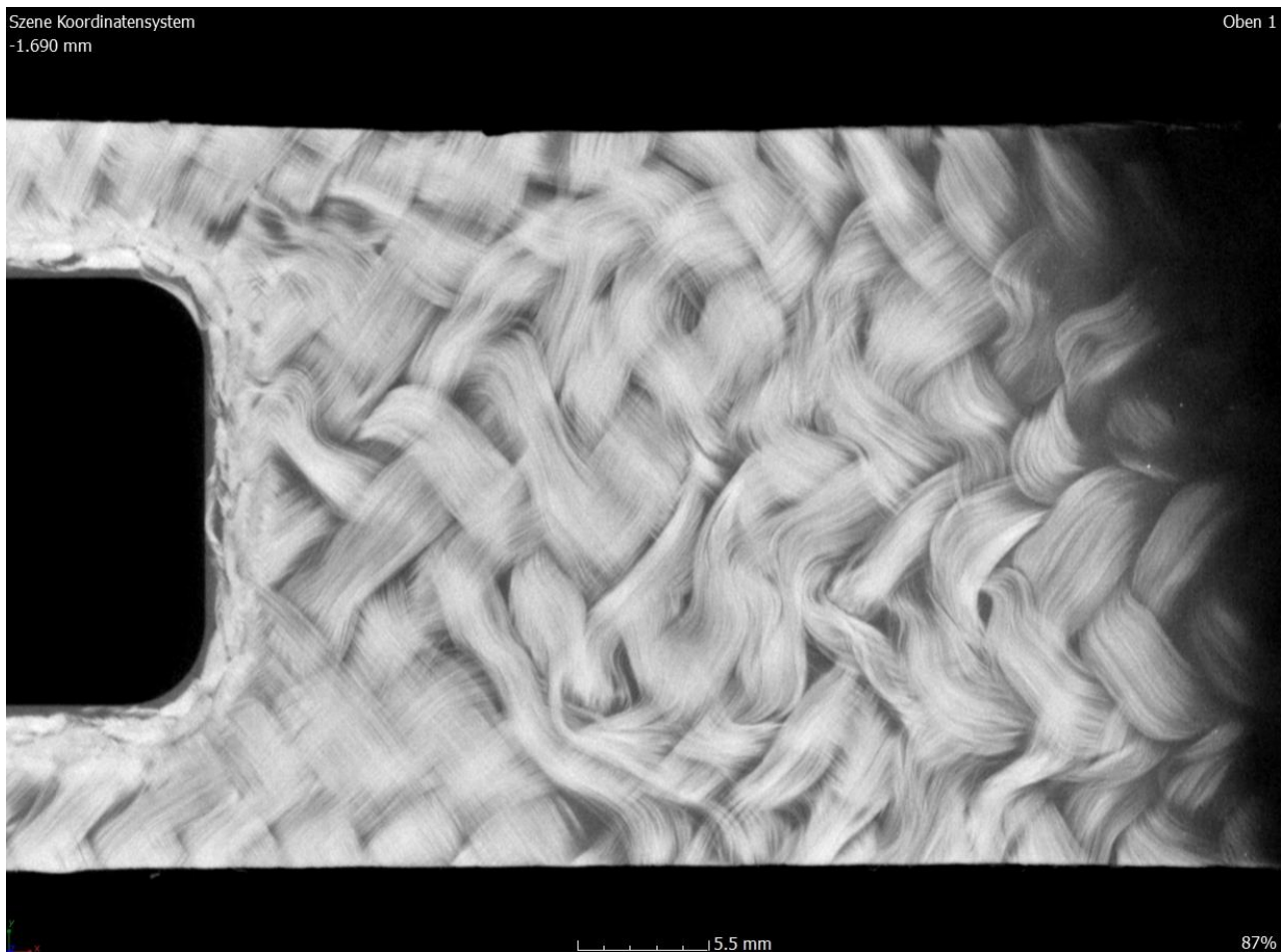
**Abbildung 5.20:** CT-Aufnahme am Demonstrator der Variante B am Messpunkt D17oCT2

Zur Bestimmung der Scherwinkel im CT wird, wie in Abbildung 5.20 gezeigt, eine Ansicht tangential zum Messpunkt gewählt und der Winkel zwischen den Faserbündeln gemessen. Besonders bei gekrümmten Flächen ist hier von einem Messfehler auszugehen, welcher nachfolgend quantifiziert wird. Um die Wiederholgenauigkeit der Messung festzustellen, wird ein Messpunkt zehn Mal hinter-



einander und unabhängig voneinander lokalisiert, eine CT-Ansicht gewählt und die Messung wiederholt, wobei sich eine Messunschärfe von maximal  $1,9^\circ$  bei einer Standardabweichung von  $1,3^\circ$  feststellen lässt.

Faserlagen, die im realen Fertigungsprozess mit Druck beaufschlagt werden, sind mitunter stark onduliert, was in Abbildung 5.21 gezeigt ist. Ein Scherwinkel lässt sich an solchen Positionen nicht sinnvoll messen. Diese Messpunkte werden demzufolge in der nachfolgenden Auswertung nicht in die Berechnung der Simulationsgenauigkeit einbezogen.



**Abbildung 5.21:** CT-Aufnahme an stark ondulierter Faserlage

### 5.2.5 Berechnung in der mechanischen Auslegung und Dimensionierung

Die Simulation wird mit dem gleichen Computer nach der gelisteten Spezifikation in Tabelle 5.5 und unter den Berechnungsdaten nach Tabelle 5.9 für beide Demonstratorvarianten mit jeweils zwei berechneten Faserorientierungen durchgeführt.

Bezeichnung	Einstellung
Nodal Timestep	$1 \cdot 10^{-7}$ s
CPU Kerne	31
Double Precision	On

**Tabelle 5.9:** Berechnungsinformationen bei der mechanischen Auslegung und Dimensionierung

Das Vorgehen entspricht sonst der Erläuterung in Kapitel „5.2.2 Berechnung in der Machbarkeitsstudie“.

### 5.2.6 Durchführung der Biegeprüfung am Demonstrator der Variante A

Mit einem konstanten Stempelverfahrweg von 20 mm/min erzwingt der Stempel eine Durchbiegung des Demonstrators. Die dafür benötigte Kraft wird von der Kraftmessdose aufgezeichnet. Obwohl die Simulation nicht das Versagen abbildet, wird auch über den Bruch der Komponente hinaus eine weitere Verformung aufgebracht und die benötigte Kraft gemessen. Allerdings wird nach dem Bauteilversagen und weiteren 10 mm Stempelverfahrweg der Vorschub auf 50 mm/min erhöht, um die Versuchsdurchführung zu beschleunigen. Insgesamt werden jeweils fünf Prüfkörper mit  $0/90^\circ$  bzw.  $\pm 45^\circ$ -Faserorientierung geprüft und dokumentiert.

Die Auswertung des Versuchs erfolgt in Kapitel „5.3.5 Gegenüberstellung von Lastsimulationen und Komponententests“. Dabei werden die Simulationen dieses Versuchs mit und ohne Berücksichtigung der Prozesssimulation in Vergleich gestellt.

### 5.2.7 Durchführung des Domversuchs am Demonstrator der Variante B

Der Stempel fährt mit einer konstanten Geschwindigkeit von 20 mm/min in die Geometrie des Doms, während die dafür benötigte Kraft von der Kraftmessdose erfasst wird. Auch bei diesem Versuch wird die Verformung noch deutlich über den Bruch hinausgeführt. Erst bei einem Weg von ca. 40 mm wird der Versuch beendet. Für die  $0/90^\circ$  und  $\pm 45^\circ$ -Faserorientierung werden jeweils fünf Versuche durchgeführt und aufgezeichnet.

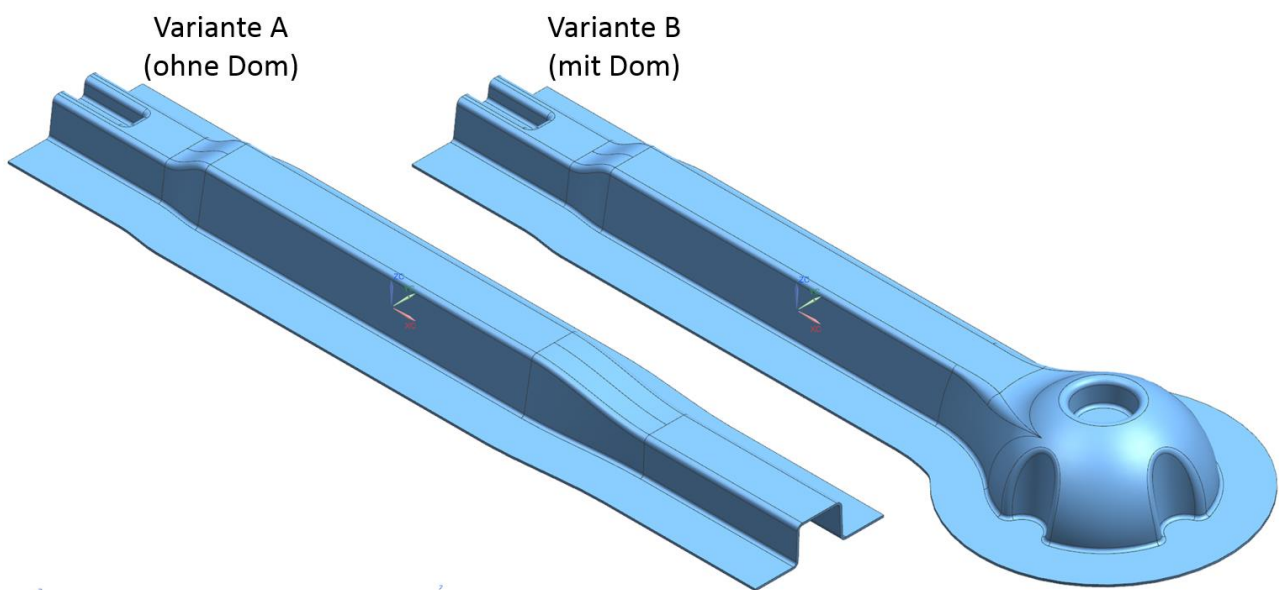
Auch die Auswertung zu diesem Versuch erfolgt in Kapitel „5.3.5 Gegenüberstellung von Lastsimulationen und Komponententests“. Im Zuge dessen wird ein Vergleich mit den Simulationen angestellt, welche die Faserorientierung nach dem Prozess berücksichtigen bzw. nicht berücksichtigen.

## 5.3 Ergebnisse

In den folgenden Ausführungen werden die Resultate aus den einzelnen Entwicklungsschritten der Reihe nach ausgeführt und diskutiert.

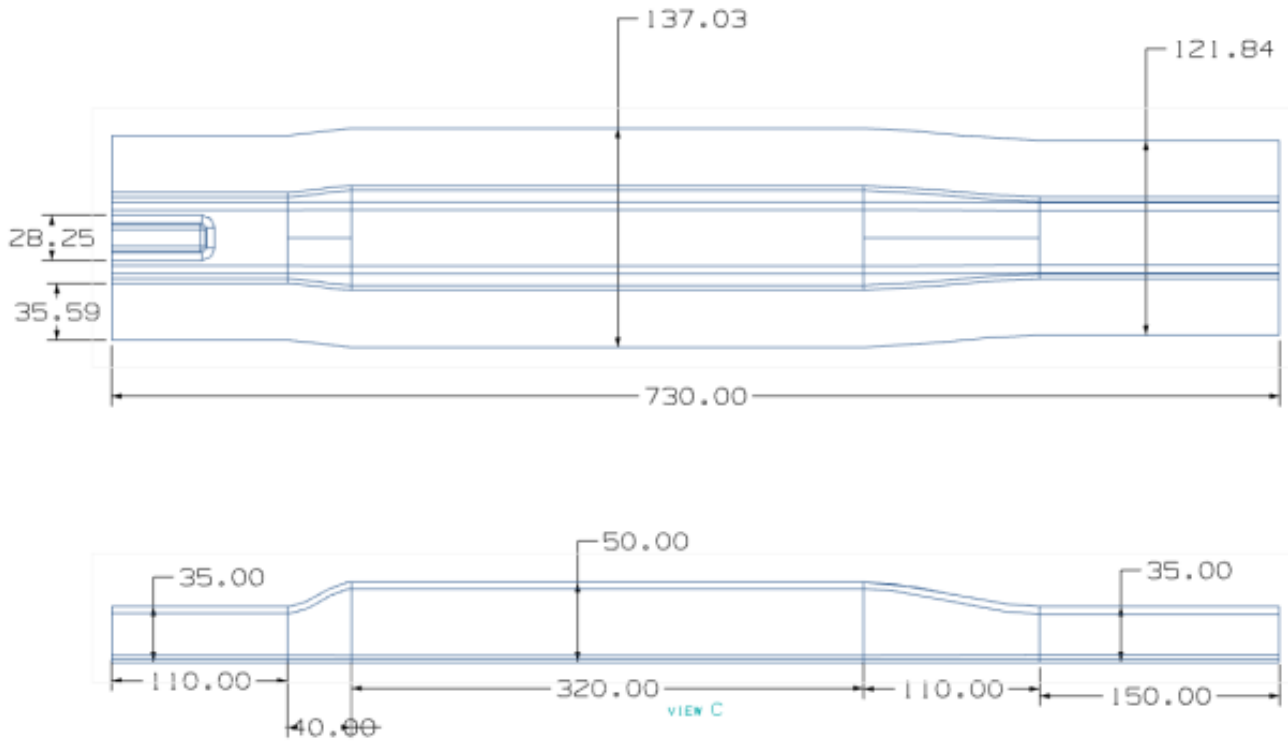
### 5.3.1 Betrachtung zur Konstruktion des Demonstrators

Die gestellten Anforderungen werden in der in Abbildung 5.22 - Abbildung 5.27 gezeigten Konstruktion erfüllt. Der zu fertigende Dom enthält überkritische Scherwinkel und provoziert somit einen Faltenwurf, der bei einer regulären Komponentenentwicklung als nicht reproduzierbar und somit als nicht herstellbar einzustufen ist [23, 46, 134]. Der Gültigkeitsbereich der durchzuführenden Drapiersimulation wird dementsprechend nicht über den Blockierwinkel hinausgehen, nach welchem die prinzipielle Herstellbarkeit ausgeschlossen ist. Im Bereich des Doms wird eine solche Überschreitung der Modellgültigkeit bewirkt. Um auszuschließen, dass eine solche Nichteinhaltung der gesetzten Grenzen einen Einfluss auf den im 3-Punkt-Biegeversuch zu prüfenden Bereich hat, wird der Demonstrator in zwei Varianten ausgeführt, welche in Abbildung 5.22 dargestellt sind.

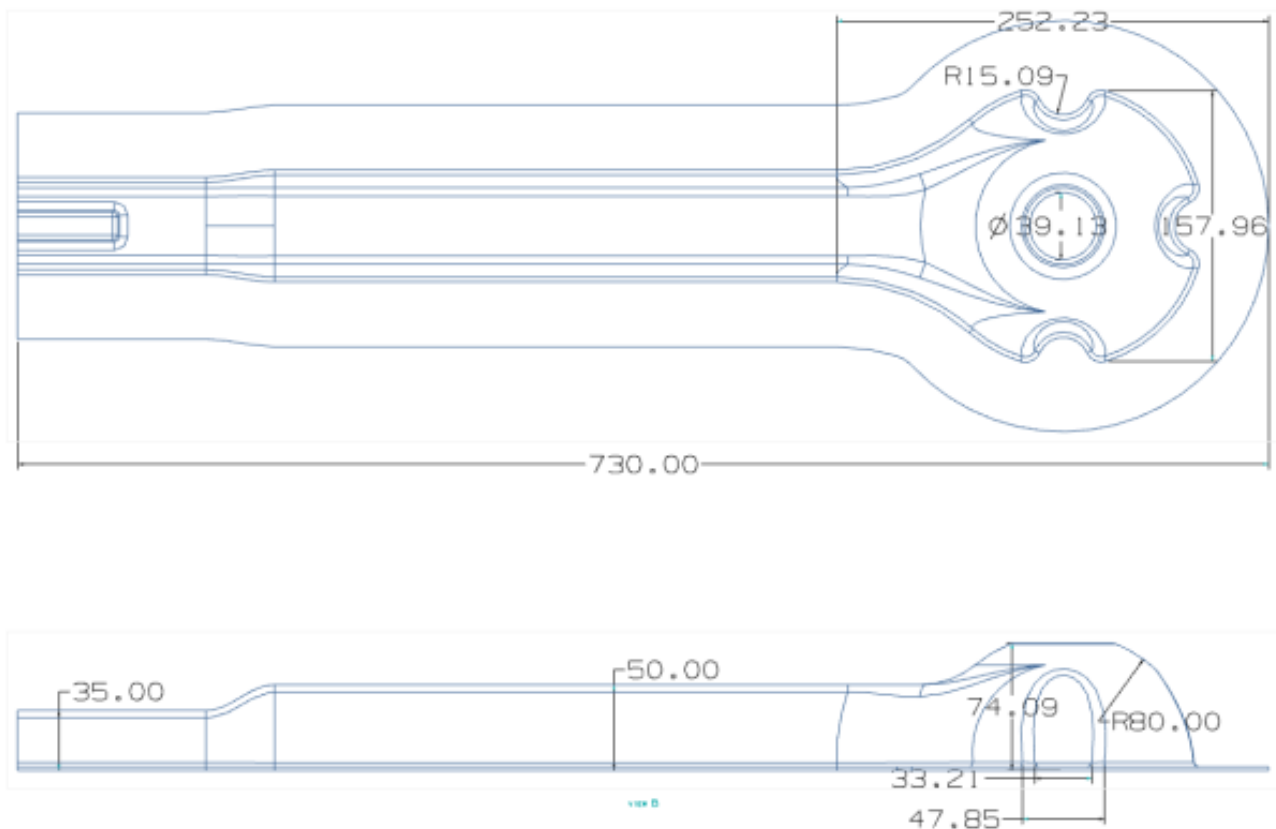


**Abbildung 5.22:** Perspektivische Darstellung des Demonstrators in Variante A und B

Bemaßte Skizzen zu beiden Demonstratoren befinden sich in Abbildung 5.23 für den Demonstrator der Variante A und in Abbildung 5.24 für Variante B.

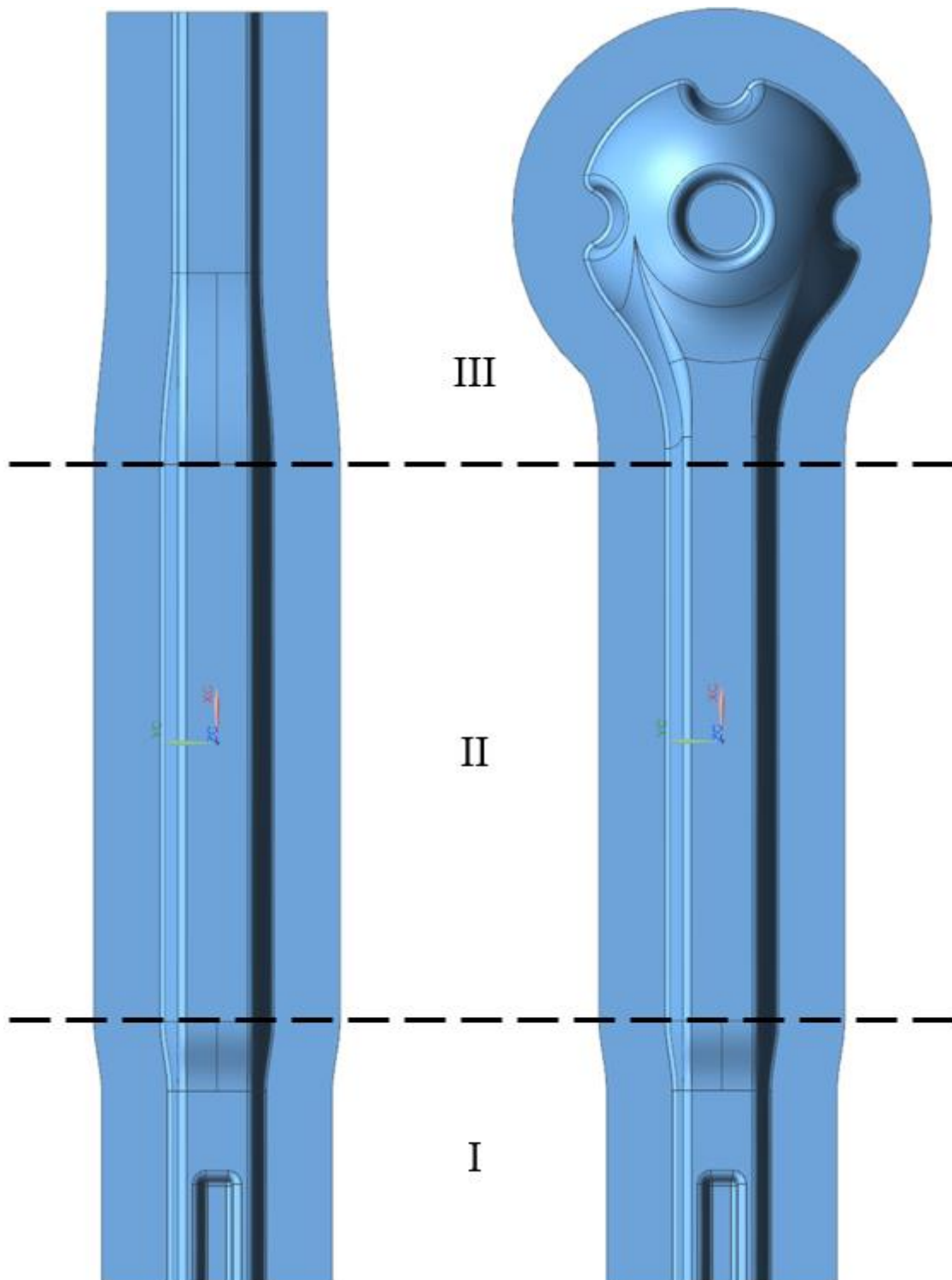


**Abbildung 5.23:** Bemaßte Skizze des Demonstrators in Variante A



**Abbildung 5.24:** Bemaßte Skizze des Demonstrators in Variante B

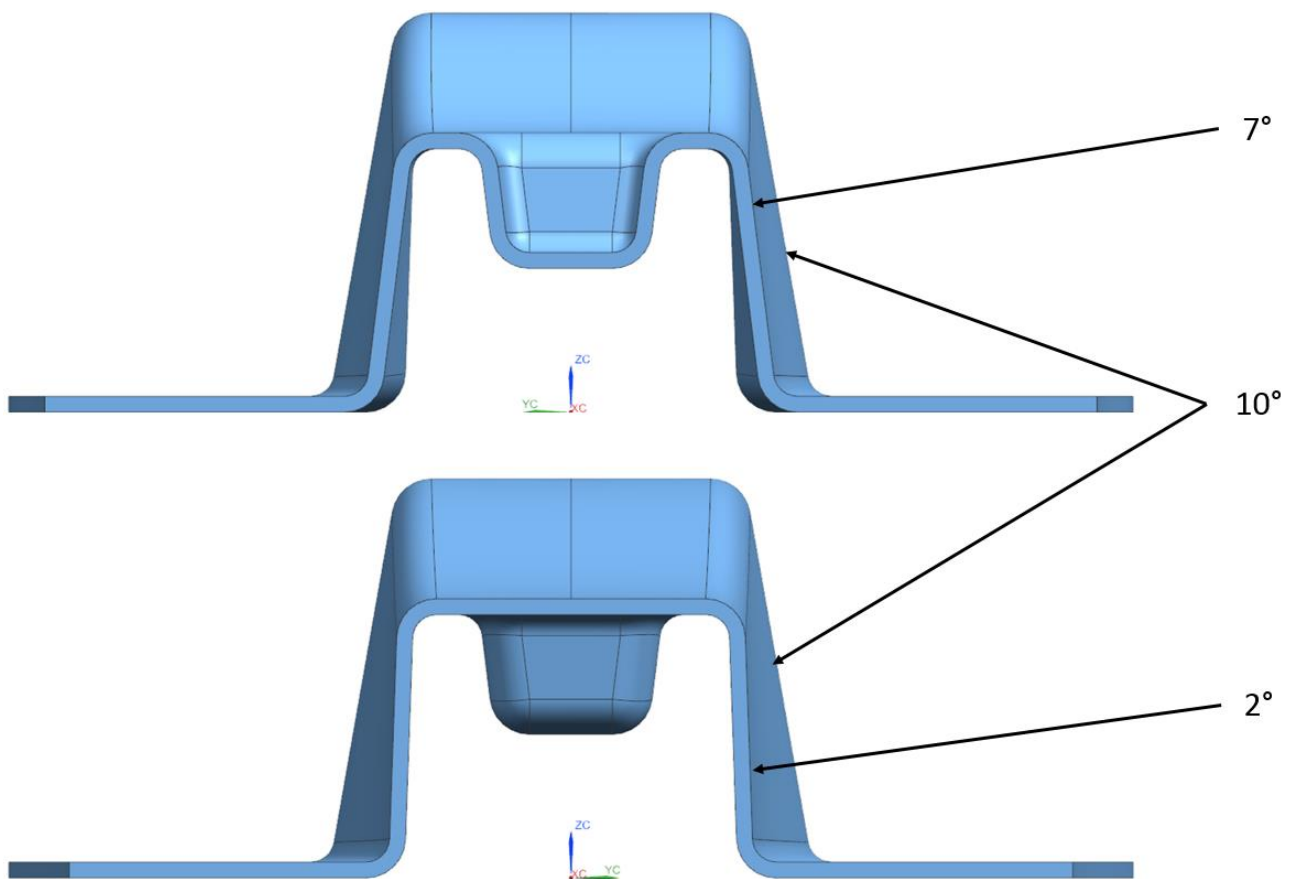
Abbildung 5.25 zeigt die Variante A ohne Dom und die Variante B mit Dom in der Draufsicht. Die Zone I beinhaltet die in „5.1.2.1 Geometrierzeugung zur Überschreitung der Drapiergrenze“ beschriebene auslaufende Tasche mit den beiden Kofferecken. Bei Betrachtung der Vorderansicht in Abbildung 5.26 ist die beschriebene M-Form deutlich erkennbar. Im Bereich der Tasche wird eine Aushebeschräge von  $7^\circ$  eingesetzt. Zusätzlich enthält Zone I den Übergang zu Zone II, welche durch den sich vergrößernden Querschnitt eine Scherung des Gewebes erfordert.



**Abbildung 5.25:** Draufsicht des Demonstrators in Varianten A und B

Zone II untergliedert den Demonstrator in den Bereich, in welchem ein kontinuierlicher Querschnitt beibehalten wird und somit die Entnahme von Prüfkörpern nach Norm ermöglicht (s. Kapitel „5.1.2.3

Geometrieerzeugung für Vergleichbarkeit von Rohmaterial mit verarbeitetem Material“). Dabei befindet sich sowohl im Flansch als auch in den Flanken sowie im oberen Bereich des Profils jeweils eine kontinuierliche Fläche, wodurch eine zusätzliche Analyse des Materialverhaltens in Abhängigkeit des Umformgrads und des Konsolidierungsdrucks möglich ist. Die Aushebeschräge beträgt in diesem Bereich  $10^\circ$  und stellt somit die flachste Aushebeschräge auf Grund der höchsten Flanke dar. Da die maximale Profilhöhe in Variante A in Zone II umgesetzt ist, kann davon ausgegangen werden, dass sich die Einflüsse der Drapierung in erster Linie von dort auf die niedrigeren Bereiche auswirken und nicht umgekehrt. Somit bleibt Bereich II ungeschert und kann ideal für einen Vergleich des verarbeiteten zum unverarbeiteten Material eingesetzt werden.

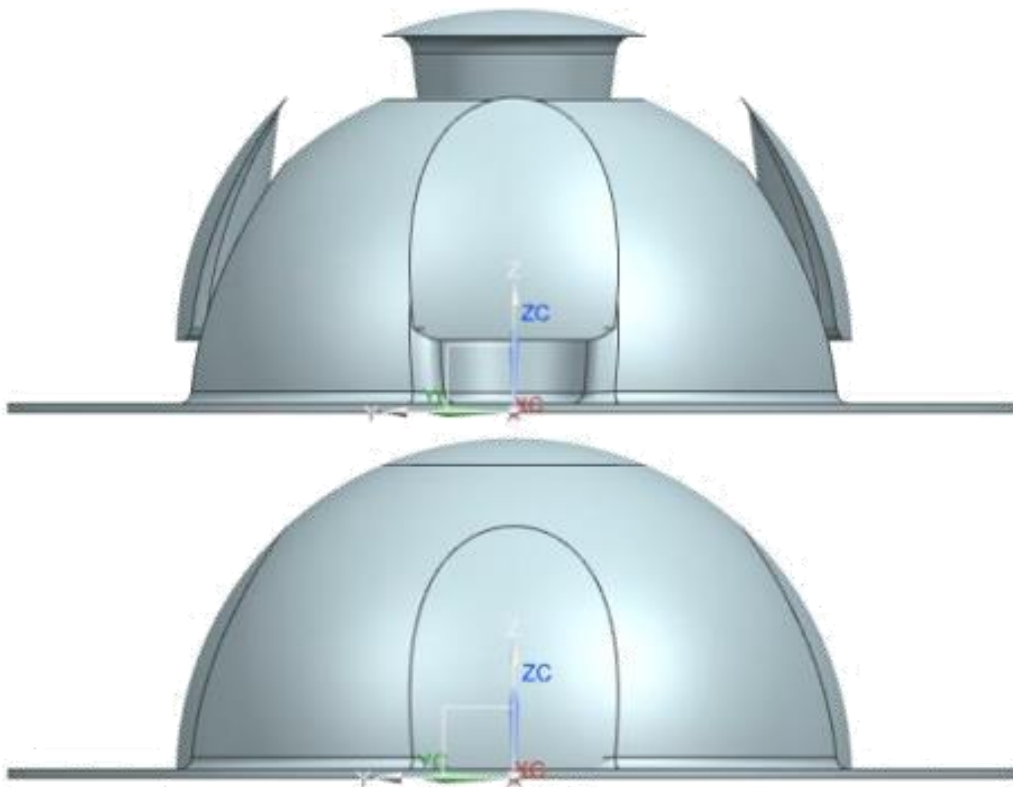


**Abbildung 5.26:** Vorderansicht (oben) und Rückansicht (unten) des Demonstrators Variante A

Die Zone III unterscheidet Variante A und B voneinander. Umgesetzt werden die beiden Varianten durch Verwendung eines Wechseleinsatzes im Werkzeug. Je nach Verwendungszweck wird entweder der Einsatz für Variante A oder derjenige für B in das Werkzeug eingebracht. Für die Prüfung des

Demonstrators nach Kapitel „5.1.1.6 Validierbarkeit im 3-Punkt-Biegeversuch“ wird Variante A verwendet, um etwaige Drapierungsfehler aus der komplexen Domgeometrie ohne Auswirkung auf den 3-Punkt-Biegeversuch zu vermeiden. Durch die Verjüngung des Profilquerschnitts in Bereich III der Variante A wird eine Materialscherung ausgelöst, was in der Simulation beschreibbar sein muss. Außerdem ist ein Flankenwinkel von lediglich  $2^\circ$  vorgesehen, was die steilste Aushebeschräge im gesamten Demonstrator darstellt.

In Variante B der Zone III kommt der in Kapitel „5.1.2.1 Geometrieerzeugung zur Überschreitung der Drapiergrenze“ beschriebene Dom mit der durch einen Voreiler hergestellten Vertiefung in der Mitte der Sphäre und den Sicken zur definierten Faltenbildung zum Einsatz. Die Sicken in der Sphäre werden hier mit einer Aushebeschräge von  $7^\circ$  versehen. Bei Bedarf kann der Dom durch Verwendung von Einlegern in der Werkzeugunterseite, wie in Abbildung 5.27 gezeigt, und durch Austausch des Voreilers zu einer Halbkugel umfunktioniert werden; dies ist jedoch nicht Gegenstand der vorliegenden Untersuchung.



**Abbildung 5.27:** Rückansicht des Demonstrators Variante B ohne (oben) und mit (unten) Einlegern



Bei der Entwicklung einer Komponente für den Einsatz in einem Fahrzeug läge zu diesem Zeitpunkt ebenfalls eine CAD-Konstruktion vor, welche die gestellten Anforderungen erfüllen soll. Im nächsten Schritt wird in einer ersten Abschätzung geprüft, ob der verfolgte Ansatz zielführend sein kann oder ob eine alternative Konstruktion sinnvoll ist.

### **5.3.2 Auswertung der Machbarkeitsstudie**

Im Postprozessor HyperView werden die Ergebnisse visualisiert und bewertet. Je nach Ergebnis kann mit einem solchen Vorgehen eine Abschätzung für einen ersten Gestaltungsentwurf getroffen werden. Die Ergebnisse der hier durchgeführten Machbarkeitsstudie werden in Form von Kraft-Weg-Diagrammen den realen Ergebnissen für 3-Punkt-Biege- und Domversuche in Kapitel „5.3.5 Gegenüberstellung von Lastsimulationen und Komponententests“ gegenübergestellt. Da hier als Ergebnis kein bestimmter Kraft-Weg-Verlauf angestrebt wird, sondern lediglich die Simulierbarkeit im Rahmen einer ersten Näherung bestätigt wird, folgt keine Neugestaltung bzw. Anpassung des Demonstrators.

Durch Übertragung auf die Entwicklung einer realen Komponente kann mit dem vorgestellten Vorgehen eine Vorauslegung durchgeführt werden. Dabei wird mit reduzierter Vorhersagegenauigkeit ein späteres Bauteilverhalten in bestimmten Lastfällen ermittelt. So kann abgeschätzt werden, ob eine gewählte Konstruktion prinzipiell dazu in der Lage sein kann, durch weitere Optimierung die gestellten Anforderungen zu erfüllen. Als nächstes muss das konkrete Materialverhalten charakterisiert werden, um die nächsten Entwicklungsschritte einzuleiten. In gewisser Weise steht dieser Schritt bei einer Serienauslegung im Konflikt mit der Vorauslegung, da auch hier bereits ein bestimmtes Material für die Simulation angenommen werden muss. Hier ist ggf. ein Iterationsprozess bis zur endgültigen Materialauswahl notwendig.

### **5.3.3 Auswertung der Materialtests in der Werkstoffauswahl**

Auf Basis der hier erzeugten Materialkarte ist es möglich, auch ein Bauteil für den Serieneinsatz zu simulieren; eine Einschränkung auf den Demonstrator ist nicht notwendig. Dennoch sei erneut auf die Grenzen der Gültigkeit der Materialkarte hingewiesen, welche lediglich dazu in der Lage ist, quasistatische Lastfälle bis zum Bruch, aber mit Berücksichtigung der Faserorientierung abzubilden. Dazu wird der oben bestimmte maximale Scherwinkel als Kriterium verwendet. Die Ergebnisse der einzelnen Materialprüfungen und der Multimodelloptimierung werden nachfolgend vorgestellt.

### 5.3.3.1 Zugprüfung an trockenen Fasern

Für die Bestimmung des E-Moduls der Glasfasern aus Formel 5.3 [72] wird zur Berechnung der Spannung aus Formel 5.4 die wirksame Querschnittsfläche benötigt:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad 5.3$$

mit

$$\sigma = \frac{A}{F} \quad 5.4$$

$\sigma$  [MPa] Spannung

$\varepsilon$  [-] Dehnung

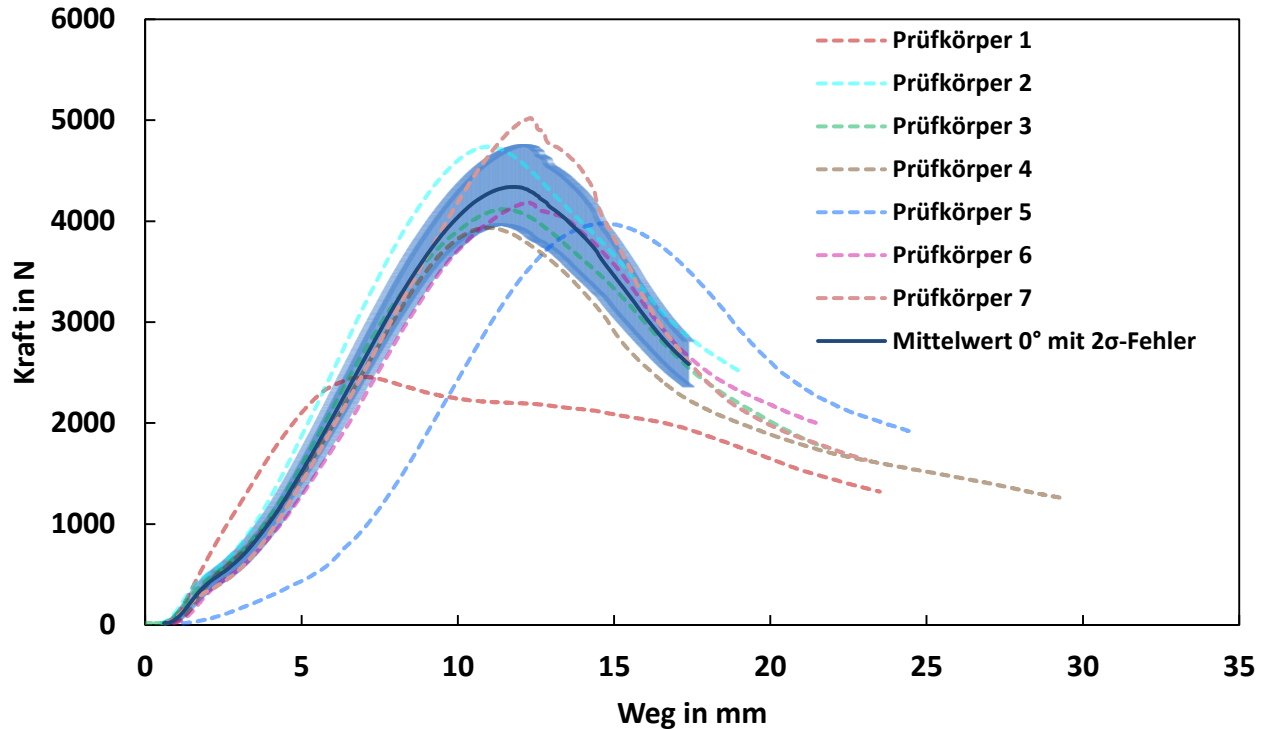
F [N] Kraft

Die Querschnittsfläche bestimmt sich aus Prüfkörperbreite und -dicke, wobei die Breite des Prüfkörpers über einen Messschieber mit relativ hoher Genauigkeit gemessen werden kann. Die Dicke hingegen ist sehr sensitiv bzgl. Messfehler, und eine Bestimmung mit einem Messschieber stellt sich als schwierig heraus, da sich der Messwert mit aufgebrachtem Druck verändert. Als Alternativen kommen eine Bestimmung der Dicke über die Feinheit der Rovinge, das Flächengewicht des Gewebes, das Gewicht bzw. die Dichte der Fasern oder die Messung der Dicke an Schlibfbildern am Mikroskop in Frage. Dabei variiert die effektive Querschnittsfläche zwischen 4,7 mm<sup>2</sup> bis 8,5 mm<sup>2</sup>. Das zieht Schwankungen im E-Modul zwischen ca. 17 GPa bis 36 GPa nach sich, wobei sich in der Literatur Angaben zwischen 70 GPa bis 90 GPa finden lassen [187].

Abbildung 5.28 zeigt das Kraft-Weg-Diagramm des untersuchten Gewebes in Kettrichtung. Deutlich zu erkennen ist der nichtlineare Kraftanstieg innerhalb der ersten 2-3 mm, was durch ein Geradeziehen der durch die Schussfäden verursachten Ondulation erklärt ist. Ab einer Prüfkraft von ca. 4 kN wird die Haftreibung in der Einspannung überwunden und die Fasern ziehen sich aus der Einspannung heraus.

Prüfkörper 1 wird aus der Auswertung ausgeschlossen, da hier das Ausziehen aus der Klemmung bereits bei einer deutlich geringeren Kraft auftritt und auf eine unzureichende Laminierungsqualität zurückzuführen ist. Prüfkörper 5 wird ebenfalls nicht in die Bewertung einbezogen, da hier zwei der

jeweils zwölf getesteten parallel liegenden Rovinge durch die Prüfkörpervorbereitung nicht vollständig gestreckt vorliegen. Dadurch bedarf es hier eines längeren Weges um die Ondulation auszugleichen.



**Abbildung 5.28:** Kraft-Weg-Diagramm im Zugversuch der Kettrichtung von trockenem Glasfasergewebe

Bei der Verarbeitung des Organoblechs liegen die Fasern zusätzlich in schmelzflüssigem Kunststoff eingebettet vor, weshalb davon ausgegangen werden kann, dass eine Krafteinleitung in die Fasern über die Bruchgrenze hinaus weitestgehend ausgeschlossen ist. Wahrscheinlicher scheint ein Gleiten entlang des Werkzeugs. Dennoch sollte bei der Drapiersimulation überprüft werden, ob besonders hohe Zugspannungen, welche sich im Bereich der Zugfestigkeit befinden, durch die Verarbeitung induziert werden. Richtwerte zur Orientierung lassen sich einschlägiger Literatur, Tabellenbüchern oder Materialdatenblättern entnehmen [84, 105].

Die Zugfestigkeit lässt sich auf Grund des frühzeitigen Ausziehens der Glasfasern aus der Einspannung nach ISO 4046 gar nicht und der E-Modul wegen der nicht eindeutig bestimmbar wirksamen Querschnittfläche nicht eindeutig ermitteln. Der Versuchsaufbau nach DIN EN ISO 6892 eignet sich weder für die Ermittlung des Moduls, noch für die Bestimmung der Zugfestigkeit der Fasern. Die

Haftreibung der Glasfasern untereinander und zur Einspannung ist zu gering, als dass eine Bestimmung der Dehnung eindeutig festzustellen wäre, wie bereits im Zuge der Versuchsdurchführung erläutert wurde. In der Sensitivitätsanalyse, welche im Rahmen von Kapitel „5.3.4 Auswertung der Prozesssimulation“ ausgewertet wird, findet eine Abschätzung statt, ob eine weiter gehende Feststellung der Materialkennwerte am trockenen Gewebe zielführend ist.

### 5.3.3.2 Schubprüfung an Organoblech bei Prozesstemperatur

#### ***Aufbau 1: Erwärmung im Ofen***

Der Versuch im Ofen stellt sich als ungeeignet heraus. Im realen Verarbeitungsprozess wird das Material mittels IR-Strahler innerhalb von 1-2 Minuten auf Prozesstemperatur erhitzt, weshalb das Material bei der Prüfung über einen deutlich längeren Zeitraum hinweg den Temperaturen oberhalb der Schmelztemperatur ausgesetzt ist, was bei Kunststoffen zu vermeiden ist [57]. Dadurch sind in Versuch und realem Verarbeitungsprozess chemische Einflüsse auf das Material, wie in Kapitel „5.1.1.3 Vergleichbarkeit von Rohmaterial und verarbeitetem Material“ beschrieben, nicht auszuschließen, weshalb eine solche Versuchsdurchführung nicht zulässig ist.

#### ***Aufbau 2: Erwärmung mit IR-Strahlern***

Nach der Versuchsdurchführung ist am Prüfkörper in Abbildung 5.29 an der Oberflächenbeschaffenheit zu erkennen, dass das Material unterhalb des Klemmbereichs nicht die Schmelztemperatur erreicht hat. Auch der Scherrahmen bleibt von der IR-Strahlung nahezu unbeeinflusst und befindet sich im Bereich von 30-40 °C. Das zu prüfende Material wird dagegen auf bis zu 300 °C aufgeheizt, was in einem Temperaturgradienten zwischen Material und Einspannung resultiert.



**Abbildung 5.29:** Klemmbereich des Prüfkörpers nach Scherversuch

Ein Übergangsbereich, wie in Abbildung 5.30 gezeigt, von bei ca. 40 °C erstarrtem und bei knapp 300 °C schmelzviskosem Polyamid ist die Folge, welche nicht weiter quantifizierbar ist. Daher ist im verwendeten Scherrahmen der Prüfkörper nicht quadratisch, wie in DIN SPEC 4885, ausgeführt, sondern mit einem zusätzlichen Sicherheits- bzw. Übergangsbereich von 20 mm, der die wirksame Fläche verkleinert. So soll der Einfluss des Temperaturgefälles zum Rand des Prüfkörpers hin minimiert werden.

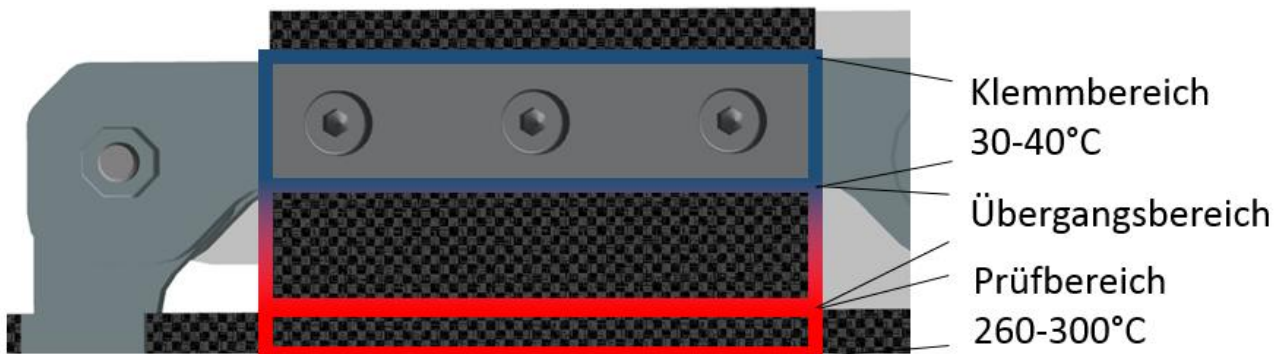


Abbildung 5.30: Temperaturbereiche am Prüfkörper im Scherversuch

### **Aufbau 3: Erwärmung mit IR-Strahlern und Vorheizen im Ofen**

Nach Lomov et al. [133] und Liu et al. [129, 130] ist ein Faltenwurf durch die Umformung zu erwarten, welcher bei diesem Versuchsaufbau nicht nach jeder Versuchsdurchführung zu beobachten ist. Stattdessen ist eine Verspannung des Scherrahmens bei den Versuchen ohne Faltenwurf zu erkennen, welche durch eine minimale Winkelabweichung des Befestigungsflanschs erklärbar und skaliert in Abbildung 5.31 verdeutlicht ist. Eine äquivalente Krümmung im Organoblech ist die Folge, wodurch auf der konvexen Seite der Krümmung ein längerer Weg für eine Falte zu überwinden ist und auf der konkaven Seite ein kürzerer. Eine von beiden Seiten resultierende Kraft in die Krümmungsebene wirkt einem Faltenwurf entgegen. Da die Verspannung einen Einfluss auf die Messergebnisse hat, ist eine weitere Auswertung nicht sinnvoll und eine Anpassung am Versuchsaufbau vorzunehmen.

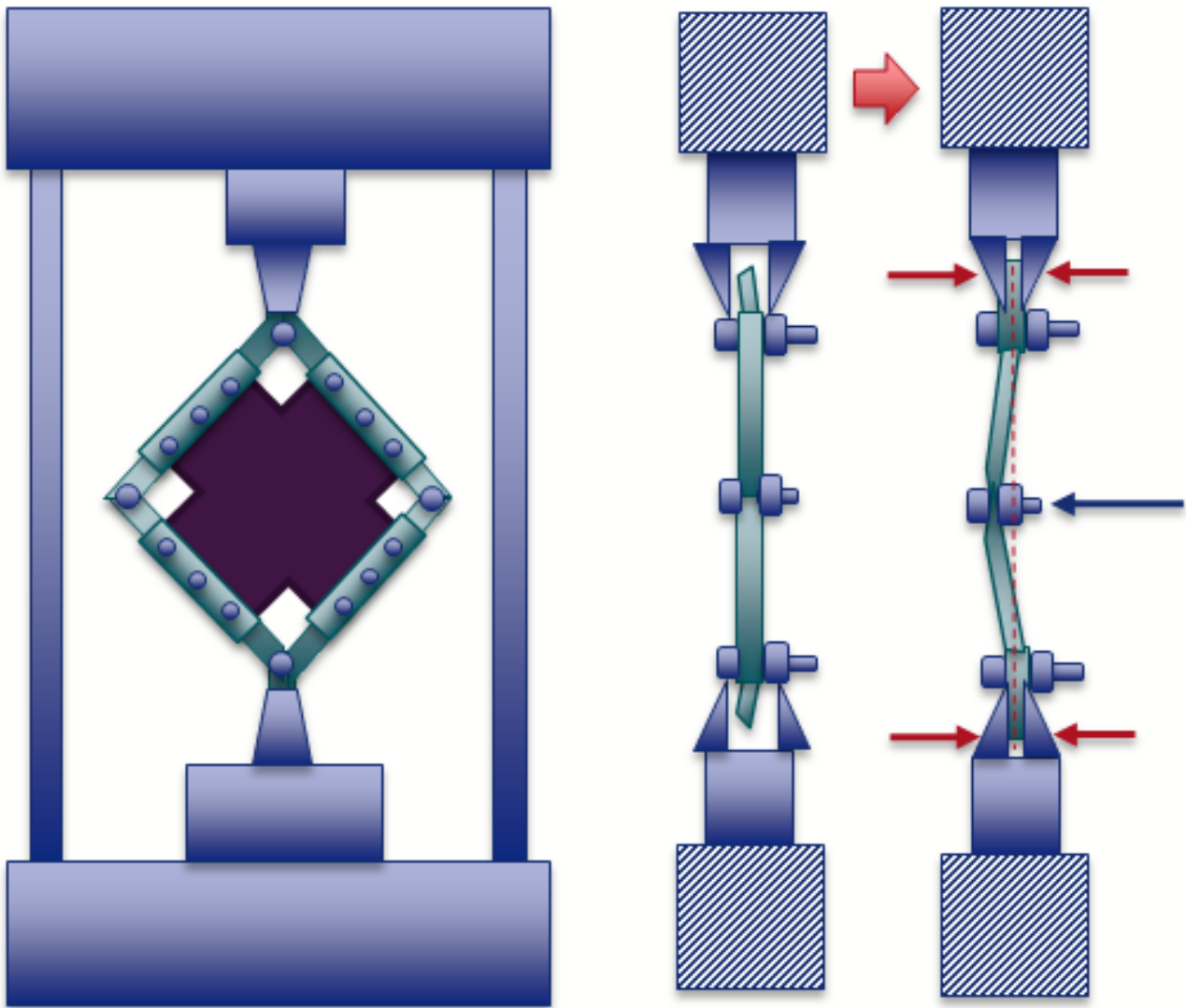
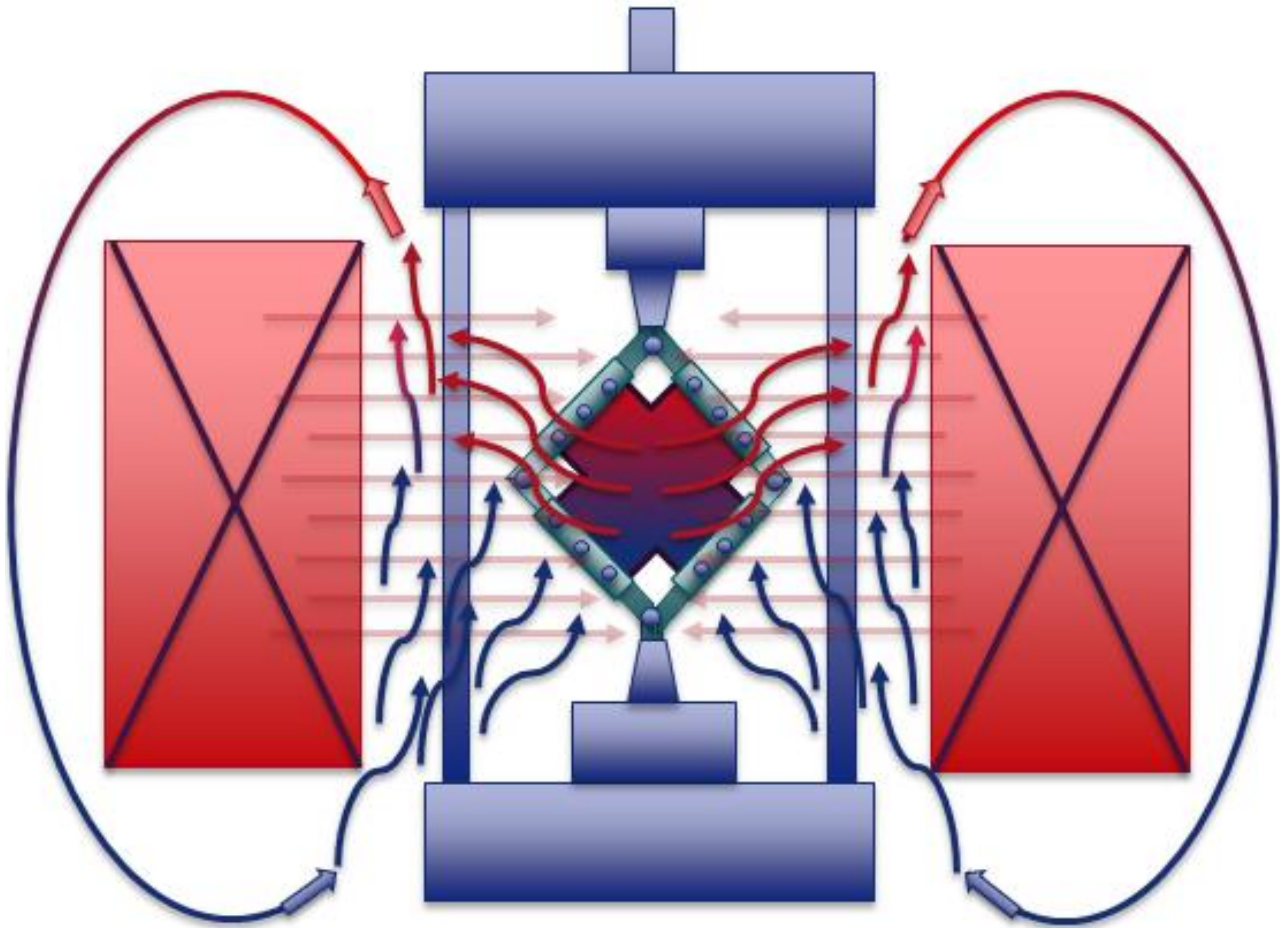


Abbildung 5.31: Verspannung des Scherrahmens

#### **Aufbau 4: Ergänzung eines Freiheitsgrades in der Einspannung**

Durch die Anpassung im Versuchsaufbau ist ein reproduzierbarer Faltenwurf in durchgeführten Versuchen ausgeprägt. An der Oberflächenbeschaffenheit des Organoblechs ist jedoch ein klarer Unterschied zwischen schmelzviskosen und konsolidierten Bereichen zu erkennen. In den oberen Bereichen des Prüfkörpers beginnt der Übergang in die schmelzflüssige Phase früher als unten, was für eine inhomogene Temperaturverteilung im Material spricht. Durch freie Konvektion, welche sowohl an den Oberflächen der IR-Strahler als auch am Testmaterial entsteht, steigt warme Luft nach oben aus dem Aufbau heraus auf und lässt kalte Luft von unten nachströmen. Dadurch gibt das Material in den unteren Bereichen Wärmeenergie an die vorbeiströmende Luft ab und heizt diese auf,

während die Luft im oberen Bereich bereits eine höhere Temperatur hat und der daraus resultierende Temperaturgradient eine geringere Wärmeabgabe nach sich zieht. Verdeutlicht ist der Vorgang in Abbildung 5.32, wobei zur Darstellung der Scherrahmen mit Prüfkörper um 90° gedreht dargestellt ist. Hingegen stehen die IR-Strahler in der Realität senkrecht zur Fläche.



**Abbildung 5.32:** Schematische Darstellung der Wärmeübertragung

### ***Aufbau 5: Ergänzung um eine Abschirmung freier Konvektion***

Beispielhaft sind die Kraft-Scherwinkelverläufe in Abbildung 5.33 für eine Versuchstemperatur von 290 °C aufgeführt.

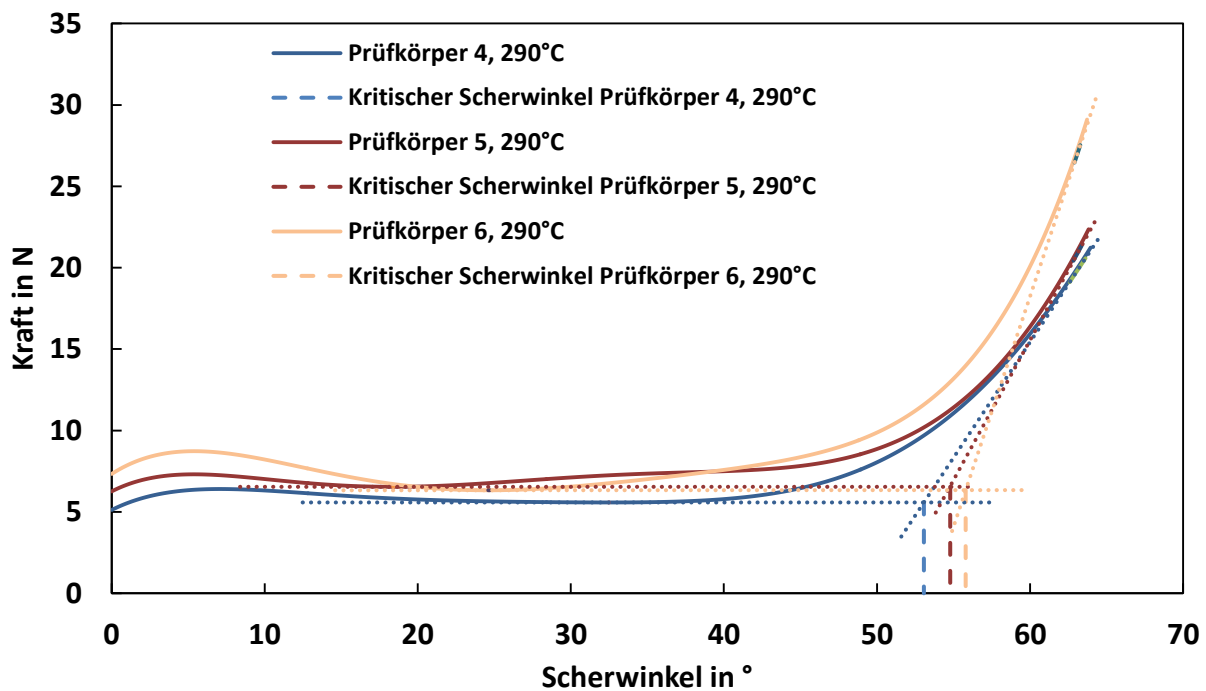
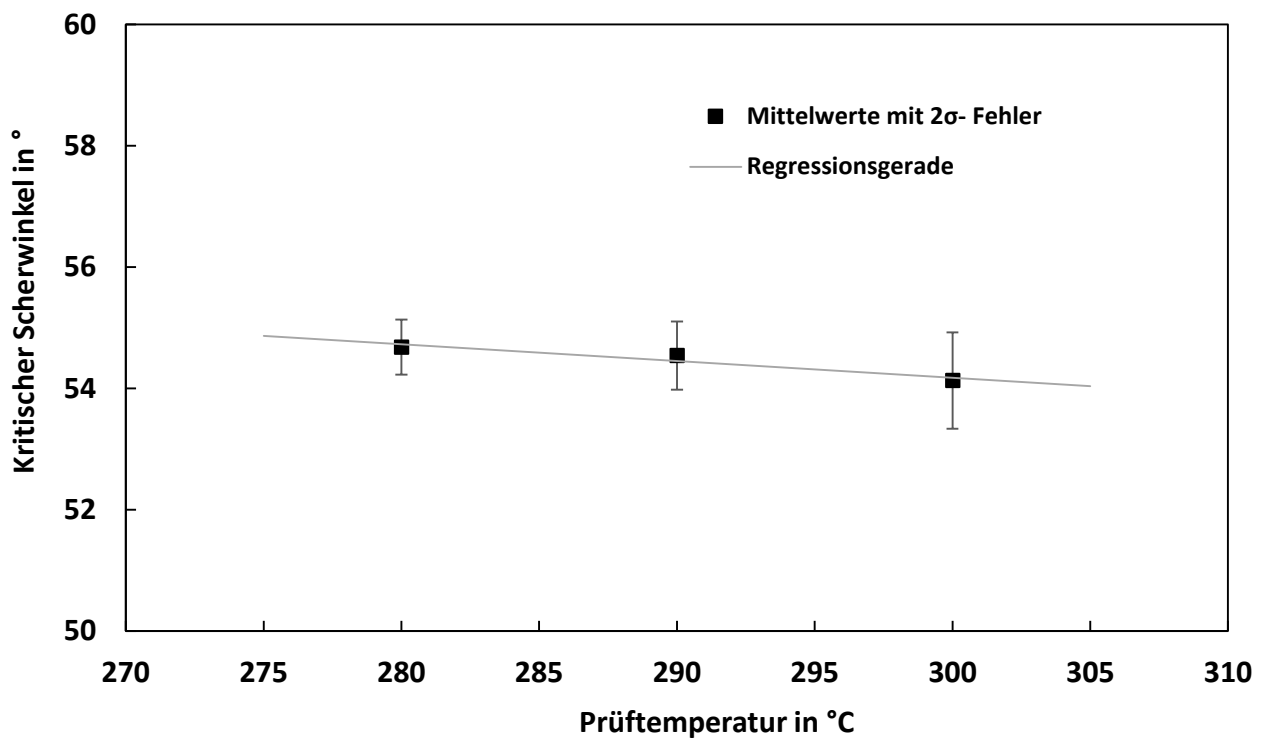


Abbildung 5.33: Kraft-Scherwinkelverläufe bei 290 °C Verarbeitungstemperatur

Abbildung 5.34 stellt die Mittelwerte der bestimmten kritischen Scherwinkel mit  $2\sigma$ -Fehler über den Prüftemperaturen dar. Anhand der geringen Steigung der angelegten Regressionsgeraden lässt sich erkennen, dass der kritische Scherwinkel innerhalb des geprüften Temperaturbereichs weitestgehend unabhängig von der Temperatur ist. Insgesamt ergibt sich über alle Temperaturen ein gemittelter kritischer Scherwinkel von  $54,5^\circ$  bei einer Standardabweichung von  $1,3^\circ$ .

Das Diagramm in Abbildung 5.35 zeigt die Schubmoduln unterhalb und oberhalb des kritischen Scherwinkels. Sowohl der initiale als auch der tangentielle Schubmodul beschreiben ein nahezu kraftfreies Rotieren um die Knotenpunkte des Gewebes. Dennoch ist der Schubmodul nach dem Erreichen des kritischen Scherwinkels um einen Faktor von ca. 100 höher.





**Abbildung 5.34:** Kritischer Scherwinkel in Abhängigkeit von der Temperatur

Auch wenn bei Betrachtung der Regressionsgeraden auf einen Anstieg mit zunehmender Temperatur zu schließen ist, wird dieser hier in Näherung als konstant angenommen, da im Aufbau der Sensitivitätsanalyse in Kapitel „5.1.5 Modellbildung für die Prozesssimulation“ keine Temperaturveränderung innerhalb einer Simulation berücksichtigt wird. Um eine valide Aussage zu einem Anstieg des Moduls mit der Temperatur treffen zu können, ist eine größere Anzahl von Versuchen durchzuführen. Außerdem sollte die Standardabweichung reduziert werden. Bspw. wäre dies durch Verwendung eines Rahmens mit geringerer Reibung oder einer Kraftmessdose mit kleinerem Messbereich bzw. einer höheren Auflösung möglich.

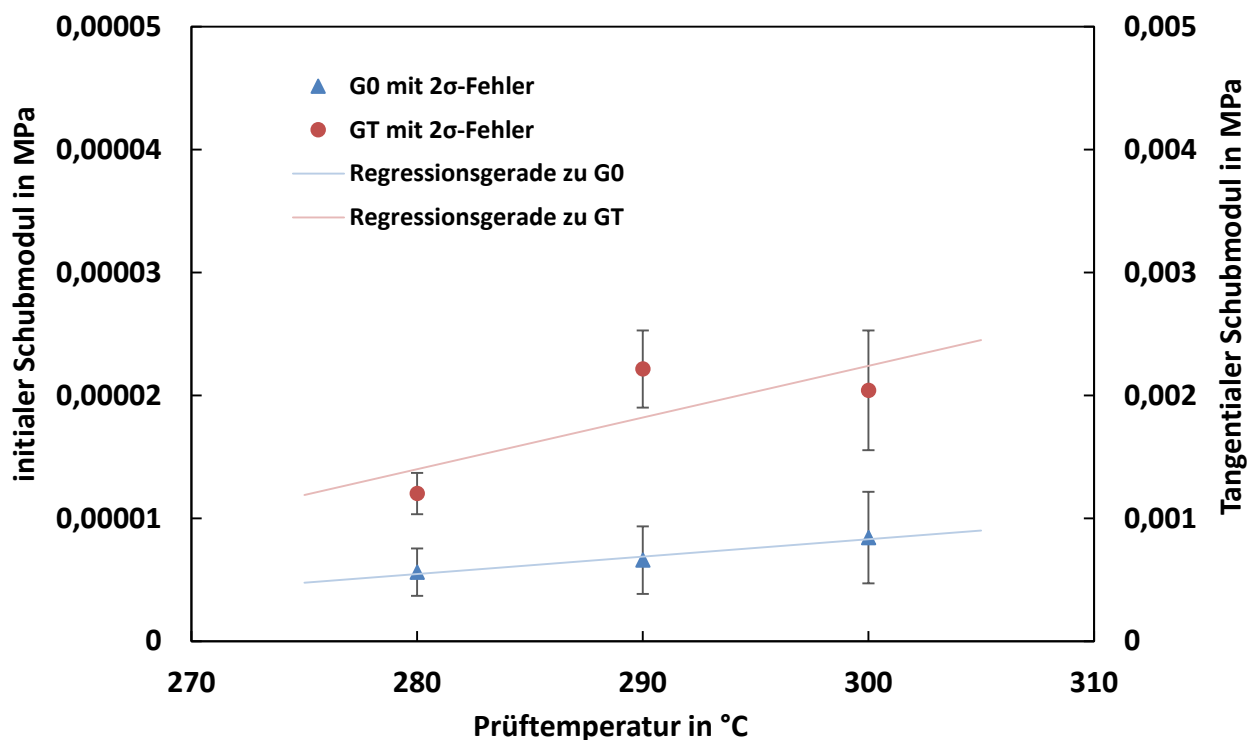


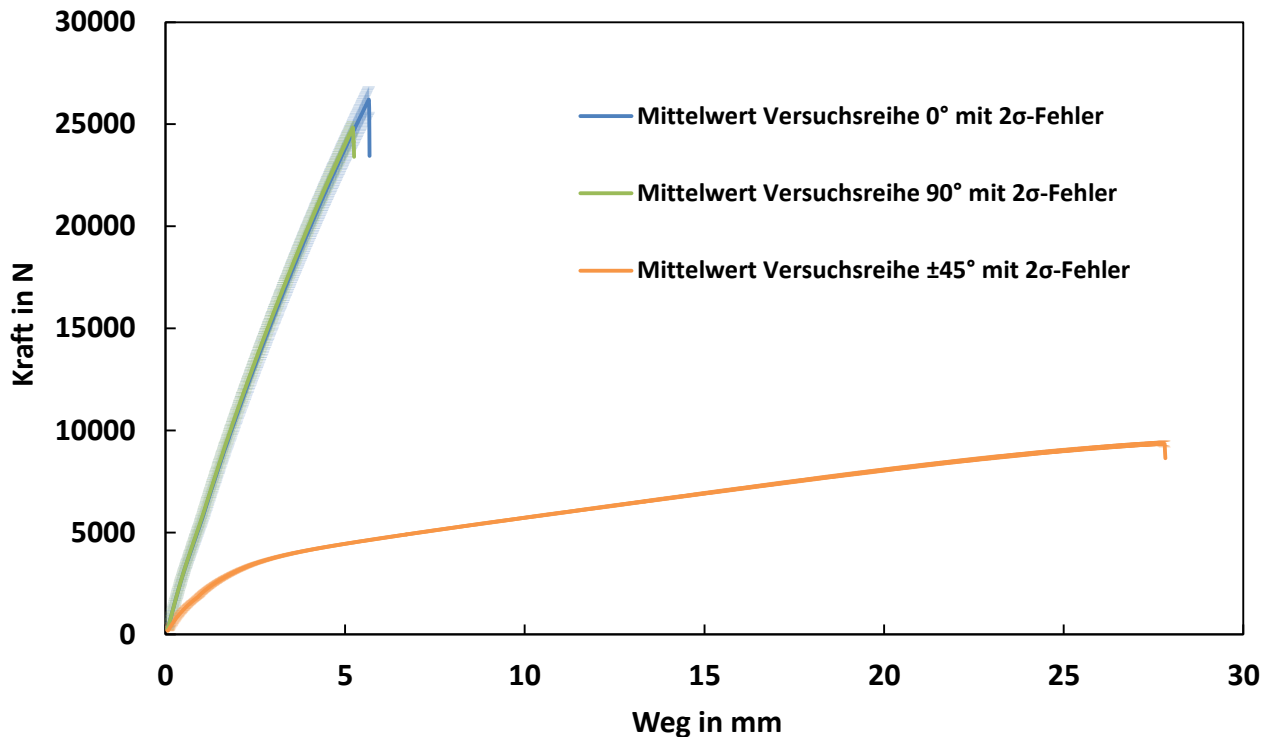
Abbildung 5.35: Schubmoduln  $G_0$  und  $G_T$  in Abhängigkeit von der Temperatur

### 5.3.3.3 Zugprüfung an Organoblech-Rohmaterial

In Abbildung 5.36 werden die gemittelten Kraft-Weg-Diagramme für alle drei Versuchskonfigurationen einander gegenübergestellt.

Da die Kraft-Weg-Verläufe bei  $0^\circ$ - und  $90^\circ$ -Faserorientierung nahezu deckungsgleich übereinander liegen, werden diese nachfolgend durch eine gemeinsame, gemittelte Kurve dargestellt. Charakteristisch für gewebeverstärkte Materialien ist die Belastung in  $\pm 45^\circ$ -Faserorientierung, bei der die Kraft mit dem Weg deutlich flacher ansteigt [86]. Dafür ist die maximale Dehnung in diesem Belastungsfall ca. fünf Mal höher.

Alle drei Verläufe dienen der Abstimmung von Materialkarten mit dem realen Materialverhalten in positiver Belastungsrichtung.



**Abbildung 5.36:** Kraft-Weg-Verläufe für 0° und 90° ermittelt nach DIN EN ISO 527-4 und ±45°, ermittelt nach DIN EN ISO 14129

#### 5.3.3.4 Biegeprüfung an Organoblech-Rohmaterial

Abbildung 5.37 zeigt die gemittelten Kraft-Weg-Verläufe für 0°, 90° und ±45° Faserorientierung. Erneut stellen sich die Verläufe für 0° und 90° als nahezu deckungsgleich heraus, dennoch ist die maximale Kraft bis zum Bruch bei der 90°-Orientierung nahezu 9 % höher als bei 0°. In beiden Fällen steigt die Standardabweichung im Bereich des Bruchs deutlich an. Zurückzuführen ist dies auf einen entlang des Wegs verschobenen Bruch und einen darauf folgenden rapiden Abfall der Kraft. Wegen des steilen Kraftabfalls kommt es daher lokal zu vergleichsweise stark unterschiedlichen Werten.

Äquivalent zum Zugversuch nach DIN EN ISO 14129 bei ±45°-Faserorientierung steigt die Kraft bei dieser Belastung mit zunehmender Durchbiegung deutlich geringer als bei den Prüfkörpern mit 0° und 90° Faserausrichtung. Statt eines hohen Kraftanstiegs bei ±45° ist wie im Zugversuch auch hier die maximale Dehnung um mehr als vier Mal höher als bei 0° oder 90°-Faserorientierung. Da die vorherrschenden Spannungen im Biegeversuch von Zugspannungen auf der Prüfkörperunterseite und Druckspannungen auf der Stempelseite geprägt sind, ist das Verhalten im Biegeversuch demjenigen im Zugversuch qualitativ ähnlich.

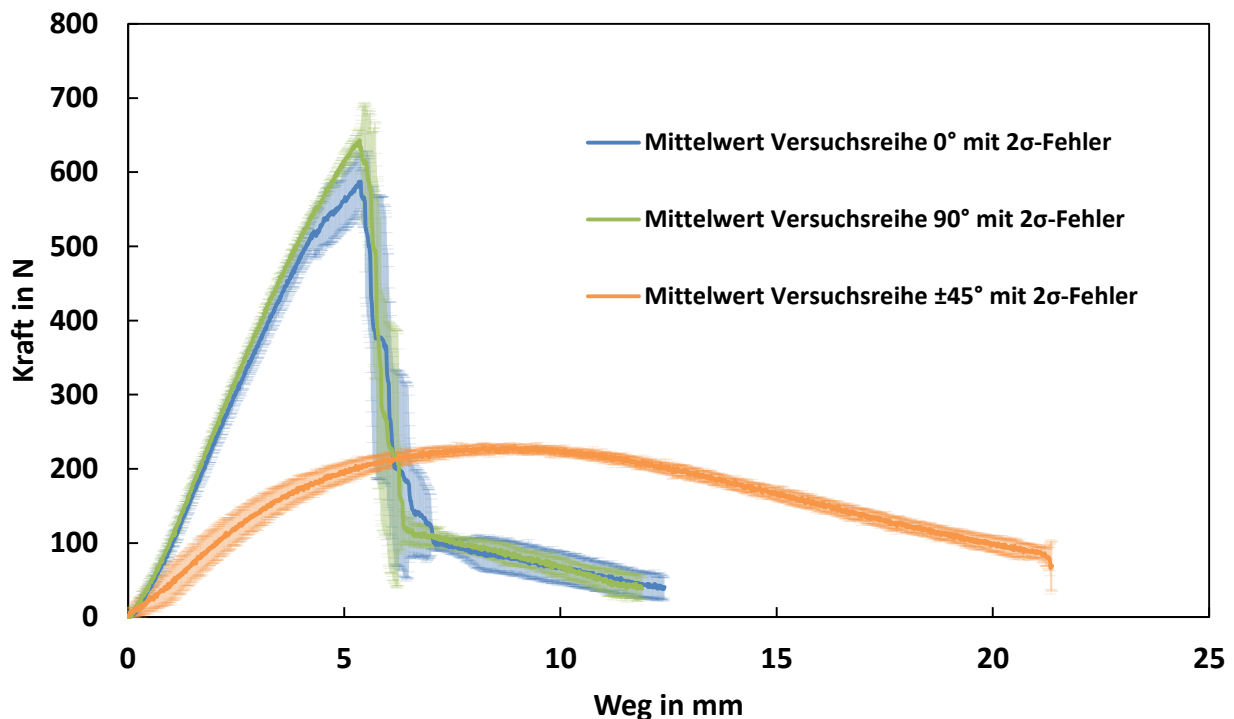


Abbildung 5.37: Kraft-Weg-Verläufe für 0°, 90° und ±45°, ermittelt nach DIN EN ISO 14125

Da über den Zugversuch in Kapitel „5.3.3.3 Zugprüfung an Organoblech-Rohmaterial“ das Materialverhalten charakterisierbar ist, kann über die Ergänzung des Biegeversuchs, bei dem komplexe Spannungszustände vorkommen, die Materialkarte auch für negative Spannungszustände abgeleitet werden.

### 5.3.3.5 Multimodelloptimierung zur Erstellung der Materialkarte

Abbildung 5.38 zeigt die realen Kraft-Weg-Verläufe aus den oben beschriebenen Versuchen. Gegenübergestellt werden diese den nachsimulierten einzelnen Versuchen. Dabei liegt allen vier Modellen die gleiche, optimierte Materialkarte zu Grunde. Die Modelle haben hier den Anspruch, das Materialverhalten bis zum Bruch möglichst ideal abzubilden. Die beiden Biegeversuche verlaufen in der Berechnung auf Grund der definierten Kontaktbedingung durch einen Slip-Stick-Effekt an den Auflagern relativ unstetig, was jedoch hier für die Materialkarte nicht relevant ist und daher nicht weiter beleuchtet wird.

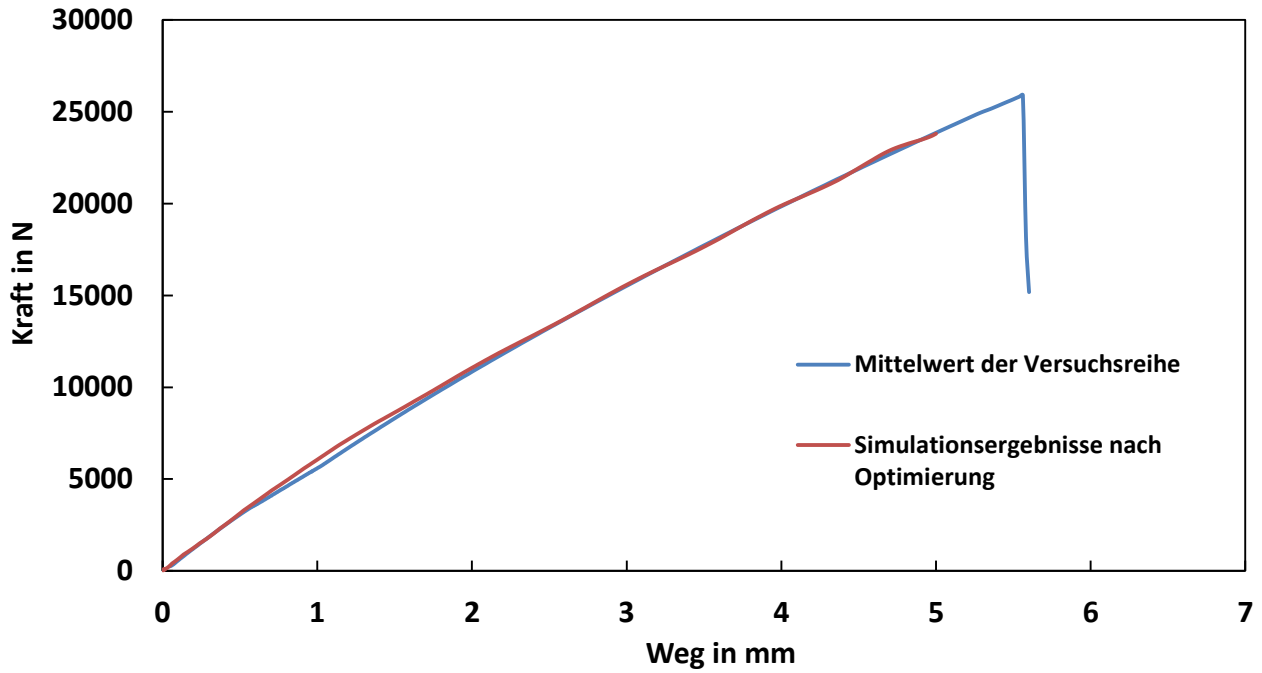
Da im Berechnungsmodell keine Versagensmechanismen implementiert sind, muss die Simulation kurz vor dem realen Versagen abgebrochen werden. Andernfalls würde die Multimodelloptimierung

die Materialkarte auf einen realen Verlauf hin modellieren, welcher ohne Versagensmechanismen nicht erreicht werden kann. Die Folge wäre ein Simulationsverlauf, der einen Kompromiss zwischen Verhalten vor dem Bruch und nach dem Bruch darstellt. Ein solches Ergebnis wäre nicht zu gebrauchen.

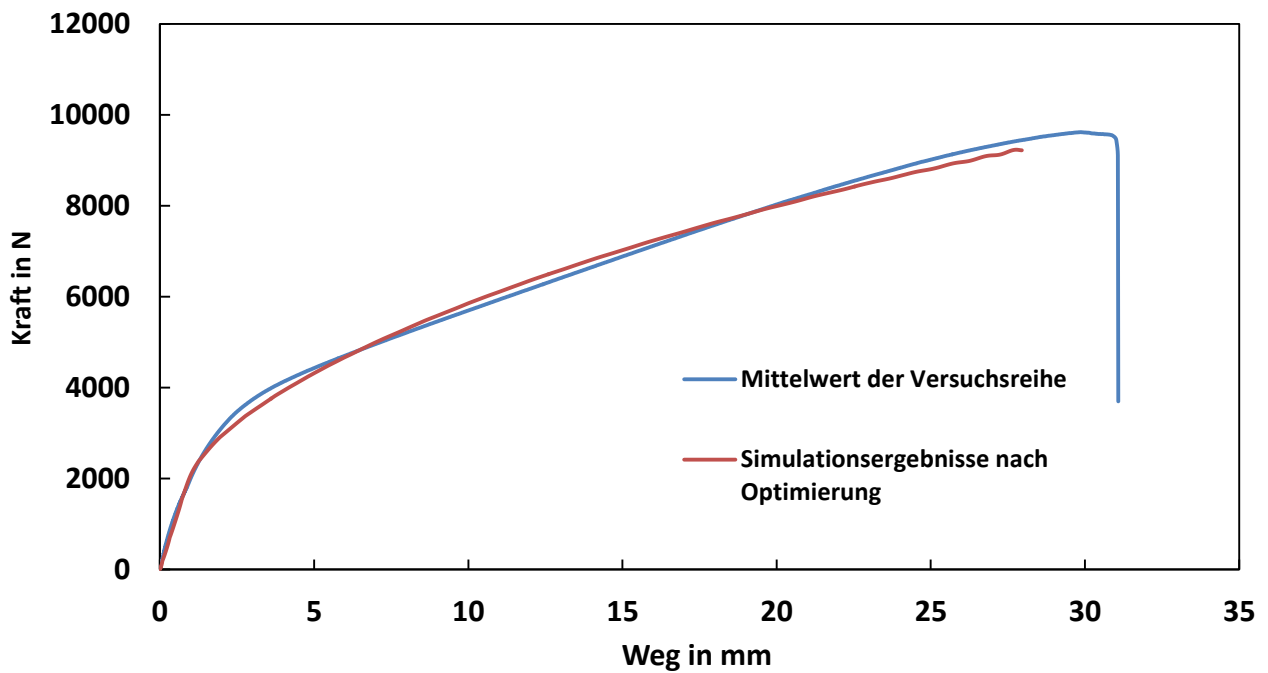
Es ist festzustellen, dass alle Kraft-Weg-Verläufe aus den vier Versuchen von der Simulation nahezu deckungsgleich bis zum Materialversagen abgebildet werden können. Die oben entwickelte Multimodelloptimierung ist demnach dazu in der Lage eine Materialkarte automatisiert zu erstellen. Somit ist eine Optimierung gegenüber der vom Softwarehersteller vorgesehenen Materialkartenerstellung erzielt worden.

Auf Basis dieser Materialkarte wird in der mechanischen Auslegung und Dimensionierung weitergerechnet. Daher wird durch die Gegenüberstellung der Lastsimulationen der Demonstratoren und der zugehörigen Versuche gleichzeitig die Übertragbarkeit der Materialkarte auf andere Simulationsmodelle überprüft. Bei einer hohen Korrelation zwischen Simulation und Realität in diesen Versuchen ist von einem möglichen Transfer auf andere Modelle auszugehen.

Zugversuch mit 0/90°-Faserorientierung



Zugversuch mit ±45°-Faserorientierung



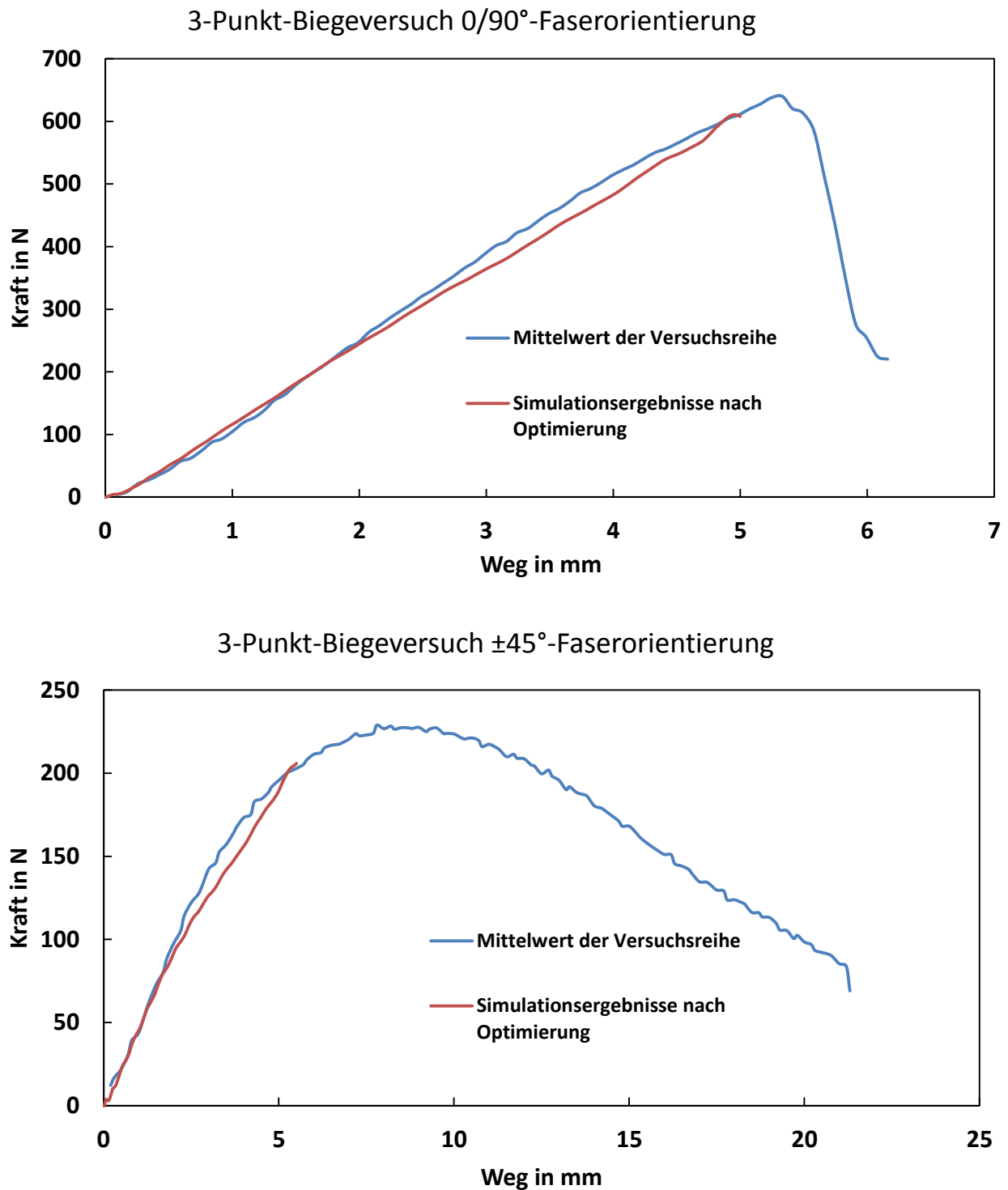


Abbildung 5.38: Gegenüberstellung der Versuche am Rohmaterial mit der Simulation

### 5.3.4 Auswertung der Prozesssimulation

An dieser Stelle wird die Auswertung der Prozesssimulationen angeschlossen. Dabei wird auch auf die durchgeführten statistischen Untersuchungen eingegangen.

#### 5.3.4.1 Auswertung des Screenings

Das Pareto-Diagramm zu den berechneten maximalen Scherwinkeln in Abbildung 5.39 vergleicht die standardisierten Effektgrößen der 15 einzelnen Parameter. Je höher der standardisierte Effekt eines Parameters, desto stärker widerspricht er der Nullhypothese, nach welcher gezeigt wird, dass ein Parameter keinen Einfluss hat. Es wird ein Signifikanzlevel von  $\alpha = 0,1$  gewählt, was hier alle Parameter mit einem standardisiertem Effekt von größer als 1,77 als signifikant einstuft.

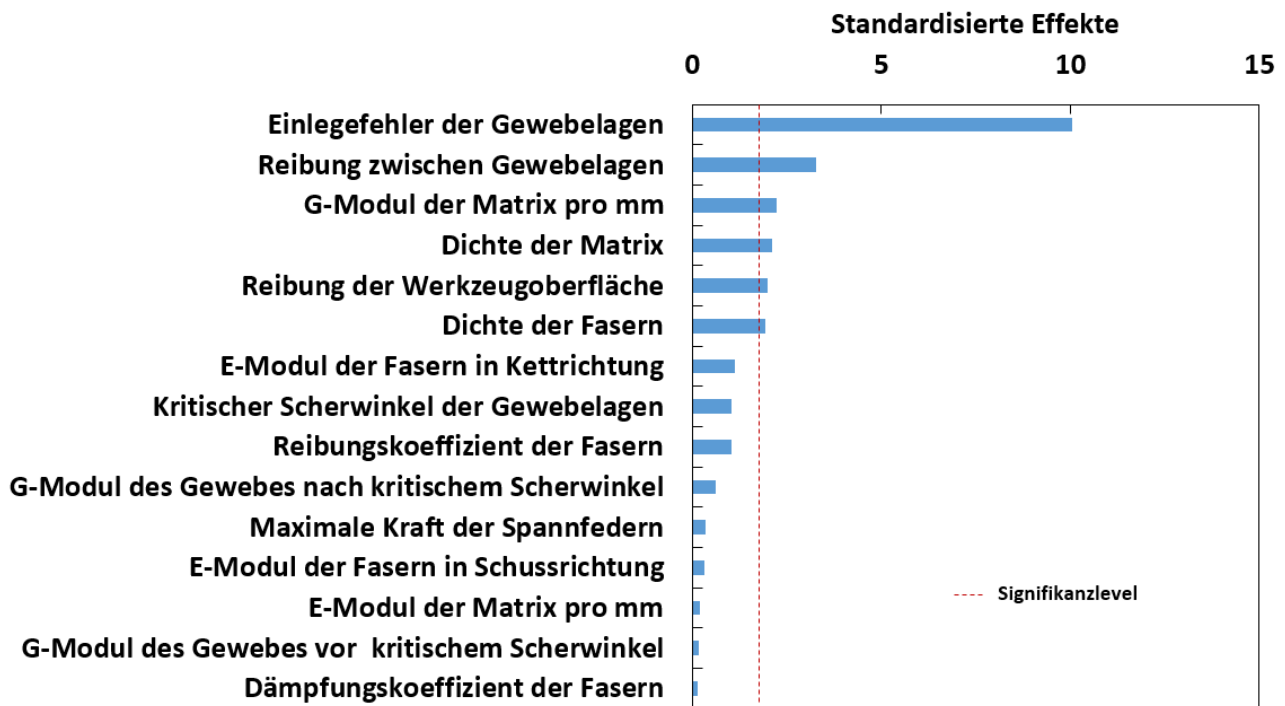


Abbildung 5.39: Pareto-Diagramm der standardisierten Effekte mit einem Signifikanzlevel von 1,77

Der Einlegefehler bei der Positionierung des Organoblechs im Werkzeug dominiert die Effektgrößen in Bezug auf den maximalen Scherwinkel. Darauf folgen die interlaminare Reibung der Fasern, der Schubmodul der Matrix, dessen Dichte und die Werkzeugreibung. Die im Modell auftretende Varianz kann im vorliegenden Screening mit einem Bestimmtheitsmaß von 90,83 % durch die gegenübergestellten Parameter erklärt werden. Die hier nicht abbildbaren Effekte lassen sich vermutlich durch



Wechselwirkungen beschreiben, welche in einem Screening mit so wenigen Läufen nicht quantifiziert werden können. Im vorliegenden Fall lassen sich mit einer Wahrscheinlichkeit von 80 % der Faktoren mit einem Einfluss vom 1,36-Fachen der Standardabweichung feststellen. Mit einer Wahrscheinlichkeit von 60 % werden Einflüsse vom 1,03-Fachen der Standardabweichung detektiert.

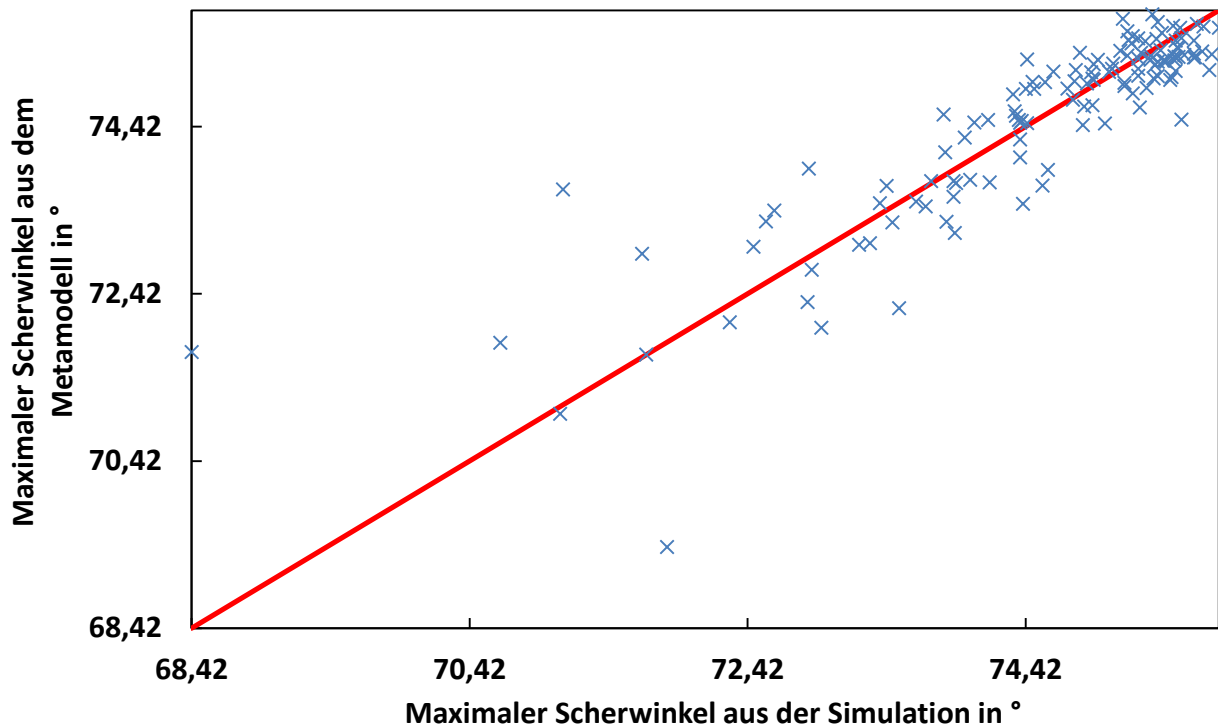
Die als signifikant eingestuften Parameter werden in der nachfolgenden DoE nach Hammersley näher untersucht, womit die Zusammenhänge mit einer höheren Wahrscheinlichkeit erklärt werden. Zwar werden  $\alpha_T$ ,  $G_T$ , die interlaminare Reibung und E-Moduln der Fasern als nicht signifikant für das Resultat eingestuft, da diese jedoch unter den nicht relevanten Parametern den größten Einfluss haben, sollen sie zusätzlich untersucht werden. Dabei wird nachfolgend der jeweilige E-Modul für Kett- und Schussfaden als gleich angenommen.

#### **5.3.4.2 Auswertung der DoE nach Hammersley**

Durch die Erzeugung einer Fläche für die berechneten Datenpunkte der 132 Stützpunkte wird zunächst ein Metamodell erstellt. In einem systematischen Vergleich verschiedener Metamodelle auf Genauigkeit, Robustheit, Nachvollziehbarkeit usw. gibt es keinen Ansatz, der klar dominiert [98]. Da als Hauptnachteil der Kriging Methode lediglich die Berechnungszeit genannt ist, wird diese hier gewählt [98]. Mit Hilfe des GM Kriging Plug-Ins für MS Excel wird ein Metamodell erzeugt und die DoE mit einer ANOVA ausgewertet.

Nach den ersten 32 Simulationsläufen wird hier bei der Auswertung das erste Metamodell erstellt, bei welchem alle Datenpunkte auf der durch Kriging angenäherten Fläche liegen. Für alle weiteren Stützpunkte werden mit der Krigingfläche die neu zu berechnenden Datenpunkte vorhergesagt und mit dem Ergebnis aus der Simulation verglichen. Anschließend wird mit dem neuen Datenpunkt eine neue Krigingfläche erzeugt, welche diesen ebenfalls exakt trifft. Mit jedem neuen Stützpunkt wird so die Krigingfläche bzw. das Metamodell dem Simulationsmodell angenähert.

Das Vorgehen entspricht im Prinzip dem „Leave one out“-Verfahren, bei welchem nach Fertigstellung der Fläche einzelne Stützpunkte ausgelassen werden und ein neues Metamodell erzeugt wird [199]. Bei einer ideal angenäherten Fläche kann jeder einzelne Stützpunkt ohne Einfluss auf das Ergebnis ausgelassen werden.



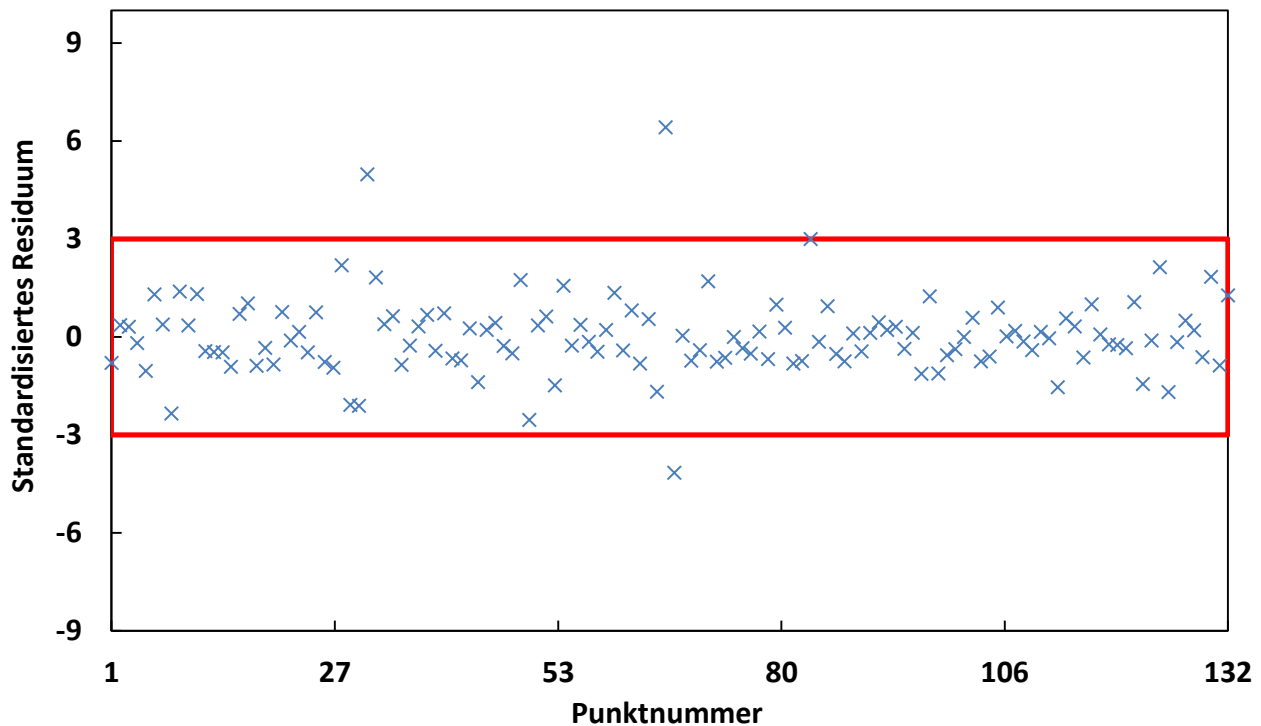
**Abbildung 5.40:** Gegenüberstellung der maximalen Scherwinkel aus Metamodell mit denen aus der Simulation

Durch Gegenüberstellung von im Metamodell vorhergesagten und simulierten Datenpunkten in Abbildung 5.40 lässt sich eine Aussage über die Güte des Modells treffen. Im Idealfall liegen alle Punkte auf der rot eingezeichneten Geraden. Eine weitere Darstellung zur Bewertung der Vorhersagegüte befindet sich in Abbildung 5.41, in welcher die standardisierten Residuen aller Stützpunkte aufgezeigt werden [191]. Standardisierte Residuen berechnen sich allgemein mittels Formel 5.5 [143, 159]:

$$ZRE = \frac{Y - \hat{Y}}{SD_{res}} \quad 5.5$$

ZRE	[-]	standardisiertes Residuum
Y	[-]	vorhergesagtes Ergebnis
$\hat{Y}$	[-]	tatsächliches Ergebnis
$SD_{res}$	[-]	Standardabweichung der Residuen

Liegen die Standardresiduen im rot gekennzeichneten Vertrauensbereich der Abbildung 5.41 von  $\pm 3$ , so wird hier angenommen, dass die Krigingfläche dazu in der Lage ist, weitere Punkte innerhalb der Systemgrenzen ohne Simulation mit einer gewissen Unschärfe abzubilden. Bis auf drei Ausreißer kann das Metamodell die Realität somit hinreichend genau beschreiben.



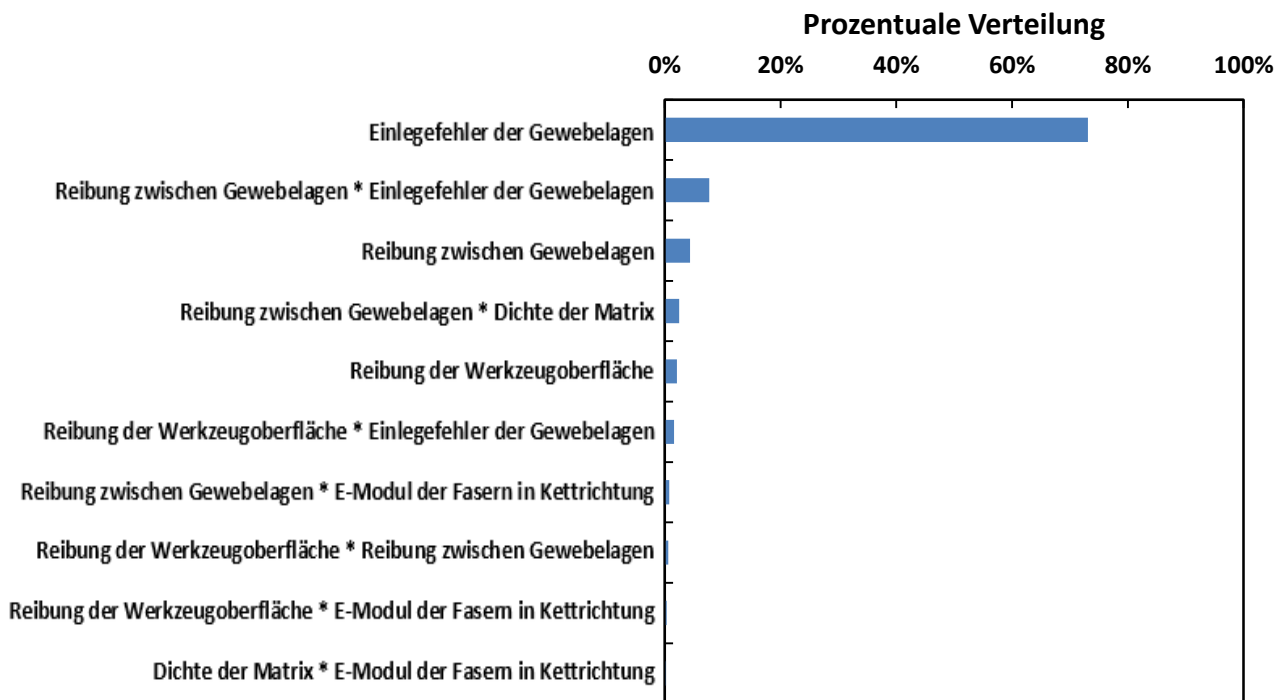
**Abbildung 5.41:** Gegenüberstellung standardisierter Residuen mit einzelnen Datenpunkten

Mit einer ANOVA basierend auf dem Metamodell werden die Einflussfaktoren  $X_1, X_2, \dots, X_n$  auf die Ergebnisse  $Y_1, Y_2, \dots, Y_n$  ermittelt und in Abbildung 5.42 visualisiert [143, 191]. Dabei wird das Ergebnis  $Y$  mit einer Funktion um einen konstanten Mittelwert von  $74,5^\circ$  bei einer Standardabweichung von  $1,1^\circ$  dargestellt.

Wie bereits aus dem Screening hervorging hat der Einlegefehler mit ca. 73 % den größten Einfluss auf den maximalen Scherwinkel. Insgesamt ist dies in Relation zur Standardabweichung von lediglich  $1,1^\circ$  zu setzen, was bedeutet, dass alle Parameter einen nur sehr geringen und somit vernachlässigbaren Einfluss auf das Ergebnis haben. Der sich einstellende Scherwinkel ist primär durch die geometrischen Bedingungen bestimmt. Der Einlegefehler ist mit bis zu  $6^\circ$  vorgegeben, wodurch es zunächst unwahrscheinlich erscheint, dass die Standardabweichung lediglich  $1,1^\circ$  beträgt. Dies ist jedoch damit zu erklären, dass der Scherwinkel und nicht der absolute Winkel als Antwort definiert ist. Somit wirkt sich die Winkelabweichung durch den Einlegefehler nicht direkt auf den Scherwinkel aus.

Da die resultierenden Scherwinkel, wie sich zeigt, weitestgehend unabhängig von den Materialeigenschaften sind, bedarf es keiner besonderer Bemühungen, diese in hochgenauen, zeit- und kostenaufwändigen Tests festzustellen. Es sollten zur abschließenden Bestätigung weitere Scherwinkel auch

unterhalb des kritischen Scherwinkels mittels einer weiteren DoE untersucht werden. Zusätzlich sollten äquivalente Untersuchungen für Materialien, die sich stark vom untersuchten Material unterscheiden, durchgeführt werden. Als ähnlich sind Materialien zu betrachten, die sich zwischen den in der DoE festgelegten minimalen und maximalen Parametern befinden.



**Abbildung 5.42:** Prozentualer Einfluss einzelner Eingabeparameter auf den maximalen Scherwinkel

Außerdem ist die Aussage über die Unabhängigkeit der Einflussgrößen auf die Gültigkeit des Modells einzuschränken. So ist das Simulationsmodell nicht darauf ausgelegt, Faltenbildungen ab einer Überschreitung des kritischen Scherwinkels darzustellen. Sobald dieser Winkel überschritten ist, wird hier angenommen, dass die Simulation nicht länger die Realität abbilden kann. Die experimentelle Bestimmung dieser Grenze, wie in Kapitel „5.3.3.2 Schubprüfung an Organoblech bei Prozesstemperatur“ gezeigt, ist daher zur Prüfung der Modellgültigkeit zu empfehlen.

Die Prozesssimulation stellt den ideal ablaufenden, realen Prozess nach, bei dem davon ausgegangen wird, dass keine die Systemgrenzen überschreitenden Störungen auftreten. Zum Beispiel könnte eine zu rasche Abkühlung der schmelzviskosen Matrix zu einer vorzeitigen Erstarrung des Materials führen und so die Randbedingungen maßgeblich beeinflussen. Sollen solche Effekte berücksichtigt werden, sind die Materialdaten auf Temperaturabhängigkeit zu erweitern und umfassend zu prüfen.

Nicht berücksichtigt wird hier die Dickenänderung durch große Scherwinkel. Der Spalt im Werkzeug, welcher Raum für das Organoblech lässt, wird konstant mit 2 mm modelliert. Der benötigte Raum zum spannungsfreien Umformen wird nicht ermittelt; etwaige dadurch induzierte Fehlstellen lassen sich hier nicht detektieren. Außerdem wird ein Verzug durch Erstarrung der Schmelze, durch Abkühlung auf Raumtemperatur oder durch im Prozess eingebrachte Spannungen vernachlässigt. Für eine Serienentwicklung sollte eine solche Berechnung erfolgen und eingebunden werden.

### 5.3.4.3 Gegenüberstellung der simulierten und realen Faserorientierung

Insgesamt werden 72 Messpunkte erfasst und ausgewertet, wobei die Hälfte der Messpunkte bei Demonstratoren der Variante B mit einer ursprünglichen Faserorientierung von  $0/90^\circ$  und die andere Hälfte mit  $\pm 45^\circ$  vorliegen. Abbildung 5.43 zeigt die jeweilige Abweichung der einzelnen Messpunkte für die unterschiedlichen Lagen inklusive der Standardabweichungen. Dabei ergibt sich für  $0/90^\circ$  Faserorientierung eine Standardabweichung von lediglich  $2,3^\circ$ , wohingegen bei  $\pm 45^\circ$  eine deutlich höhere Standardabweichung von  $5,7^\circ$  erreicht wird. Insgesamt ergibt sich daraus eine Standardabweichung von  $4,6^\circ$ .

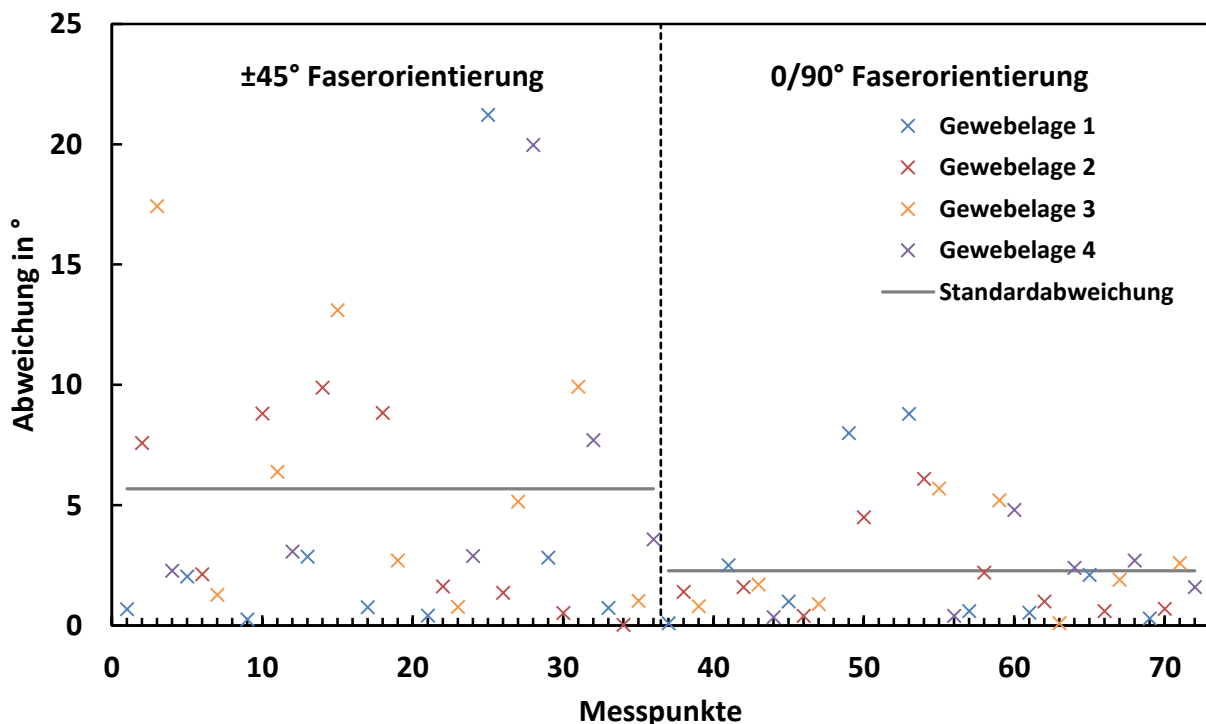


Abbildung 5.43: Darstellung der Abweichungen des simulierten Scherwinkels vom realen Scherwinkel

In der Tendenz weichen die Scherwinkel der mittleren beiden Lagen – insbesondere bei  $\pm 45^\circ$  – weiter von der Realität ab als die der äußeren Lagen. Weiterhin ist festzustellen, dass höhere Abweichungen bei komplexen Konturen erzielt werden. Besonders wenn die realen Faserorientierungen von Lage zu Lage stark voneinander abweichen, ist ebenfalls die Abweichung des jeweiligen simulierten Scherwinkels verhältnismäßig hoch, was demnach für ein unzureichend abgebildetes interlaminares Gleiten im Modell spricht. Der Anwender der Entwicklungsmethode ist daher angehalten bei der Komponentenauslegung individuell zu prüfen, ob der jeweils zu wählende Sicherheitsfaktor entsprechend zu erhöhen ist, wenn die Vorhersagegüte der Berechnung noch nicht ausreicht. Um die Entwicklungsmethode weiter zu optimieren, ist gleichzeitig eine weiterführende Untersuchung des interlaminaren Gleitens und dessen Einbindung in das Berechnungsmodell aufgezeigt.

Da die durch Druckbeaufschlagung ondulierten Fasern nicht in der Berechnung der Genauigkeit erfasst sind, ist bei einer Komponentenauslegung ein Sicherheitsfaktor zu berücksichtigen. Dieser ist abhängig vom Formungsprozess und der Position der auftretenden Druckspannung im Bauteil zu wählen. Ist während des Prozesses keine Druckbeanspruchung im Bauteil zu erwarten, kann der Sicherheitsfaktor dementsprechend klein ausfallen.

Die hier verwendete Messmethode liefert räumlich stark begrenzte Aussagen zur Güte der Simulationsergebnisse bzw. des Berechnungsmodells. Auch andere zerstörungsfreie Prüfverfahren sollten eingehend auf ihre Eignung zur Untersuchung erprobt werden, z.B. stellen Hassen et al. [82] verschiedene Prüfverfahren für glasfaserverstärkte Thermoplaste gegenüber, die im Fließpressverfahren hergestellt wurden. Eine hochaufgelöste CT, wie von Finckh [64] vorgestellt, ermöglicht eine Rückführung der CT-Aufnahmen in ein CAD- oder FEM-Programm und somit eine Beurteilung von Flächengebilden. Sie ist nicht auf eine punktuelle Beurteilung beschränkt.

#### **5.3.4.4 Fazit zur Prozesssimulation**

Mit dem vorgestellten Aufbau der Drapiersimulation lässt sich die Faserorientierung in der Realität mit einer Standardabweichung von lediglich  $4,6^\circ$  vorhersagen, was mittels CT-Untersuchung an mehreren Punkten bestätigt ist. Mit diesem Resultat kann eine Lastsimulation angeschlossen werden, welche die reale Faserorientierung mit dieser Unschärfe berücksichtigt. Hierbei erreicht die Simulation mit  $0/90^\circ$  Faserorientierung in diesem Modell eine deutlich höhere Genauigkeit mit einer Standardabweichung von nur  $2,3^\circ$ .

Allerdings sind auch einige Abweichungen von der Realität zu identifizieren, welche vorwiegend in Bereichen liegen, die kurz vor Abschluss der Simulation mit Druck beaufschlagt werden. Es ist anzunehmen, dass die Fasern unter Druck zu einer hohen Ondulation neigen und dadurch nicht ideal ausgerichtet im Kunststoff vorliegen. Liegt ein solcher Bereich unter Last in einer kritischen Zone, müssen zusätzliche Prüfungen zur besseren Beschreibung dieses Bereichs durchgeführt werden.

Abweichungen zwischen gemessenen und realen Scherwinkeln lassen sich nicht direkt durch die gewählte Position zur Auswertung erklären, da die Abweichungen nicht in allen vier Lagen gleich hoch sind. Es ist daher anzunehmen, dass insbesondere das interlaminare Gleiten nicht ausreichend beschrieben wird. Hierzu sollten weitere Untersuchungen unter Prozesstemperatur durchgeführt werden. Möglicherweise sind auch andere Materialgesetze als das vom Softwareentwickler vorgeschlagene LAW59 besser geeignet als Verbindung der einzelnen Lagen zu fungieren.

Nicht überprüft wurden voreilende Dorne zur Einbringung bspw. von Schraublöchern, was in der Industrie jedoch von Bedarf sein kann. Es empfiehlt sich eine genauere Untersuchung der Möglichkeit einer simulativen Erfassung solcher Effekte mit einer Kontrolle an realen Versuchen. Die Einflüsse auf die Faserorientierung sollten an solchen Stellen umfassend untersucht werden, da diese Punkte in der Regel zur Krafterleitung dienen und dementsprechend kritisch für das Bauteil sind. Auch sollten weitere gängige Einspannungen zur Fixierung des Organoblechs und deren Auswirkungen geprüft werden.

Es wurde in einer DoE nach Hammersley und einer ANOVA festgestellt, dass der maximal erreichte Scherwinkel in der Simulation bei dem verwendeten Material robust auf Materialeigenschaften und andere Randbedingungen reagiert, wenn der vorliegende prinzipielle Aufbau der Simulation die Realität widerspiegelt und die Grenzen der Modellgültigkeit eingehalten werden. Die Modellgültigkeit beschränkt sich hierbei auf Scherwinkel unterhalb des kritischen Scherwinkels. Bei Überschreitung dieses Scherwinkels wird die Geometrie als nicht reproduzierbar herzustellen angenommen, weshalb keine weitere Bauteilvorhersage getroffen werden muss. Außerdem sind Temperaturschwankungen im Material vernachlässigt sowie verschiedene Umformgeschwindigkeiten unberücksichtigt.

Zumindest so lange die hier erreichte Vorhersagegenauigkeit als ausreichend angenommen wird, kann auf umfassendere Materialanalysen bei Prozesstemperatur verzichtet werden. Dies gilt nicht für diejenigen zur Bestimmung der Modellgültigkeit in Form des kritischen Scherwinkels.

### 5.3.5 Gegenüberstellung von Lastsimulationen und Komponententests

In Bezug auf eine Entwicklung einer Fahrzeugkomponente muss an dieser Stelle eine Bewertung der Resultate in Bezug auf das erstellte Lastenheft stattfinden. Es ist davon auszugehen, dass die Komponente nicht auf Anhieb die Anforderungen voll erfüllt, sondern es ist zunächst eine Über- oder Unterdimensionierung anzunehmen. Damit ist ein ab der Produktgestaltung zu beginnender iterativer Prozess gestartet werden. Je nachdem wie stark die Veränderungen zur ursprünglichen Konstruktion sind, kann jedoch auf eine erneute Machbarkeitsstudie verzichtet werden. Wenn nicht auf ein anderes Material geschwenkt werden soll, kann ebenso auf eine neue Werkstoffauswahl inklusive der Erstellung der Materialkarte verzichtet werden.

Gemeinsam mit den Resultaten aus der Lastsimulation in der Vorauslegung und den realen Ergebnissen aus den in den Kapiteln „5.2.6 Durchführung der Biegeprüfung am Demonstrator der Variante A“ und „5.2.7 Durchführung des Domversuchs am Demonstrator der Variante B“ durchgeführten Versuchen werden die Simulationen in Form von Kraft-Weg-Verläufen vorgestellt und diskutiert.

#### 5.3.5.1 Auswertung am Demonstrator der Variante A mit 0/90° Faserorientierung

In Abbildung 5.44 ist der reale Verlauf der Kraft über dem Weg mit  $2\sigma$ -Fehler dargestellt. Gleichzeitig sind die äquivalenten Verläufe für beide Simulationen aufgetragen. Für das reale Bauteil lässt sich ein Versagen ab ca. 17,5 mm Stempelweg feststellen. Nach dem Bruch fällt die Kraft bei zunehmendem Weg kontinuierlich ab. Festzustellen ist, dass die Kraft nicht abrupt nachlässt, sondern durch das relativ zähe Polyamid ein ebenfalls zähes Nachbruchverhalten beobachtet wird. Selbst bei einem Verfahrweg von über 150 mm bleibt der Zusammenhalt der beiden Bauteilhälften erhalten und zumindest einige Fasern gewährleisten strukturelle Integrität.

Nahezu deckungsgleich mit dem realen Versuch verlaufen die Kraft-Weg-Kurven beider Simulationen bis zum Bauteilversagen. Ab dem Bruch in der realen Komponente, welcher ohne Versagenkriterium in der Simulation nicht dargestellt wird, steigt die Kraft bei zunehmender Verformung weiter an. Die Abweichung bei Bruch liegt mit manueller Faserorientierung bei 6 % und bei berücksichtigter Prozesssimulation bei lediglich 3 %. Offenbar ist hier die Berücksichtigung einer Prozesssimulation nicht essenziell wichtig, um die Realität widerzuspiegeln, dennoch führt diese zu einer geringen Verbesserung der Genauigkeit. Dies wird mit der vernachlässigbaren Faserumorientierung bei der Umformung erklärt. Weder in der Simulation noch in der Realität sind die hauptsächlich belasteten



Bereiche von einem ausschlaggebenden Scherwinkel betroffen. Dadurch kann die manuelle Faserorientierung, welche überhaupt keine Scherwinkel berücksichtigt, die Realität ebenfalls mit nur geringer Abweichung abbilden.

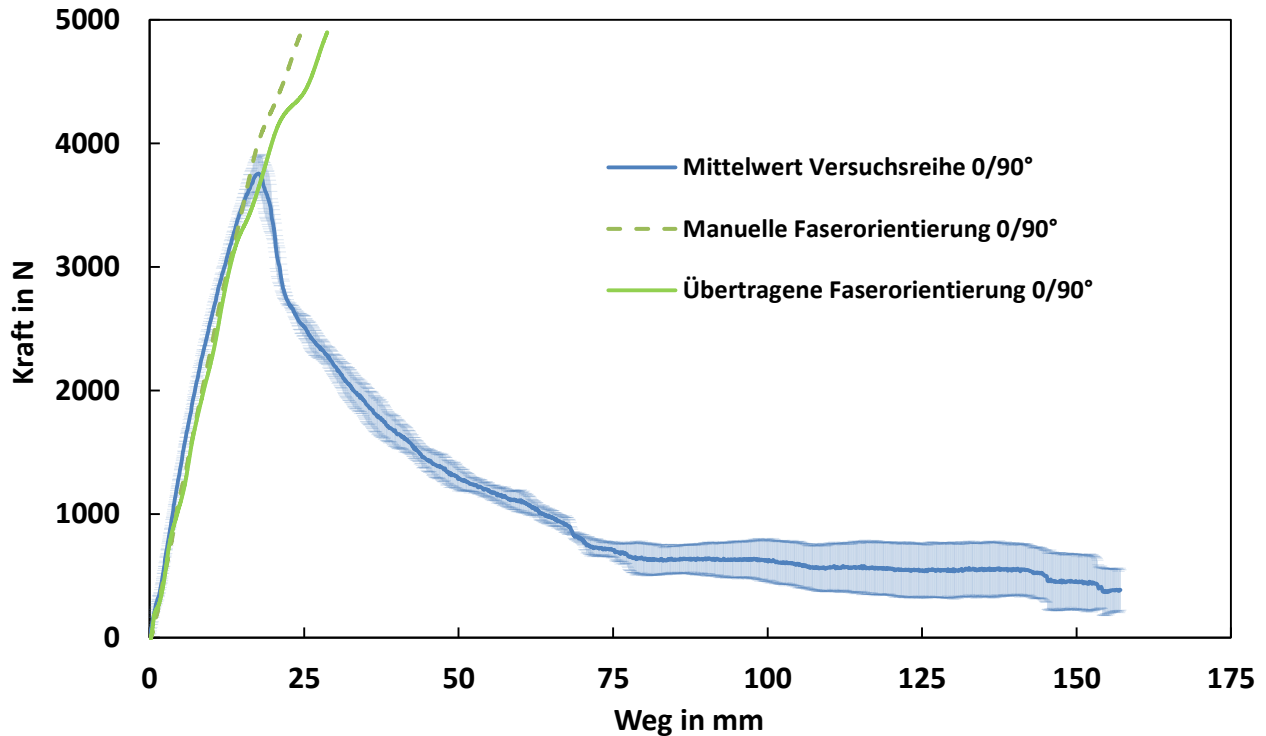
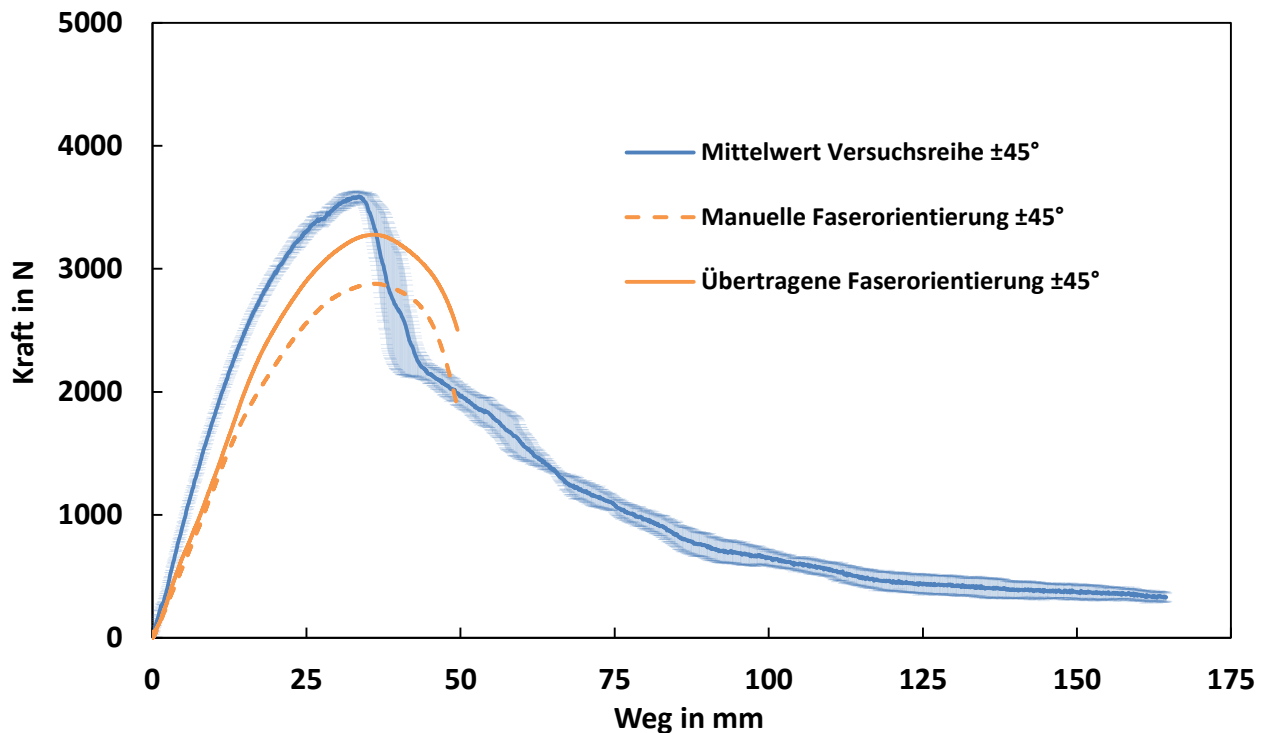


Abbildung 5.44: Vergleich der Kraft-Weg-Verläufe am Demonstrator der Variante A mit 0/90° Faserorientierung

### 5.3.5.2 Auswertung am Demonstrator der Variante A mit $\pm 45^\circ$ Faserorientierung

Die dargestellten Kraft-Weg-Verläufe in Abbildung 5.45 entsprechen den realen Versuchsdurchführungen für den Demonstrator der Variante A mit  $\pm 45^\circ$  Faserorientierung mit  $2\sigma$ -Fehler. Qualitativ vergleichbar sind die Biegeversuche am Demonstrator mit den Biegeversuchen am Rohmaterial. In beiden Fällen sind jeweils die Steifigkeit und die maximale Kraft bei der 0/90° Faserorientierung höher, während  $\pm 45^\circ$  bei der maximalen Dehnung und der Energieabsorption höherwertige Ergebnisse erzielen. Wie bei dem Versuch mit 0/90° Faserorientierung bleibt der Verbund erhalten. Der Kraftabfall in der Simulation wird auch hier nicht auf Grund von Versagen erreicht, sondern allein durch die geometrische Verformung erzeugt.



**Abbildung 5.45:** Vergleich der Kraft-Weg-Verläufe am Demonstrator der Variante A mit  $\pm 45^\circ$  Faserorientierung

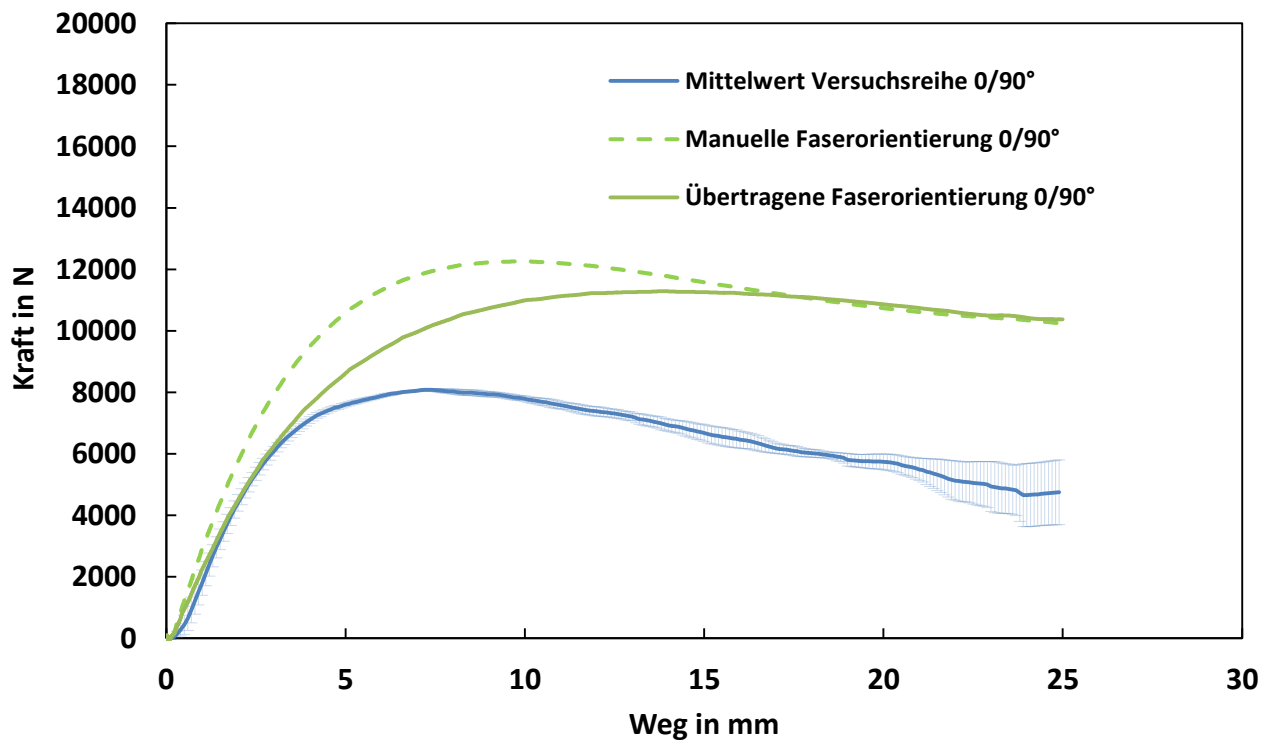
Ebenfalls aufgetragen sind die äquivalenten Simulationsläufe mit und ohne Berücksichtigung der vorangestellten Prozesssimulation. Hierbei erreicht die Lastsimulation mit übertragener Faserorientierung aus der Prozesssimulation bei der maximal zu ertragenden Kraft eine Genauigkeit von ca. 9,5 %, wohingegen die manuelle Faserorientierung diese mit einer Abweichung von 25 % vorhersagt. Es kann also durch die Fertigungssimulation eine signifikante Verbesserung der Genauigkeit erreicht werden. Dies lässt sich durch die Verscherung des Materials bei der Umformung erklären, welche bei der ursprünglichen  $\pm 45^\circ$  Faserorientierung höher ist als bei  $0/90^\circ$ . Dadurch steigt auch der Einfluss der Prozesssimulation auf die Lastsimulation.

Dennoch ist in beiden Simulationen das gesamte Komponentenverhalten im Vergleich mit der Realität zu nachgiebig. Erklärbar ist dies durch die verwendete Materialkarte. Diese ist nicht dazu in der Lage, das Schubverhalten in positiver und negativer Richtung unterschiedlich darzustellen [9]. Da die Materialkarte, wie in Kapitel „2.3 Simulation von faserverstärkten Kunststoffen“ beschrieben, in einer Optimierung Zug- und Druckbeanspruchungen möglichst exakt abbilden muss, wird ein Mittelwert aus diesen Bereichen gebildet, welcher vom Zugverhalten dominiert wird. Dementsprechend ist

die Auswirkung der Vereinfachung in der Materialkarte bei der Biegeprüfung mit  $\pm 45^\circ$  Faserorientierung signifikant, denn in diesem Lastfall dominieren die Schubbelastungen. Eine Anpassung des Materialgesetzes ist demnach erforderlich, um die Aussagegüte zu erhöhen.

### 5.3.5.3 Auswertung am Demonstrator der Variante B mit $0/90^\circ$ Faserorientierung

Für den Demonstrator der Variante B mit  $0/90^\circ$  Faserorientierung werden in Abbildung 5.46 ebenfalls die Kraft-Weg-Verläufe der realen Tests mit  $2\sigma$ -Fehler und der Simulationen dargestellt. Für den realen Versuch ist erneut ein sehr zähes Bauteilverhalten zu beobachten. Nach dem Bruch bei ca. 3,5 mm Stempelweg, welcher zwar zu diesem Zeitpunkt noch nicht visuell feststellbar, jedoch eindeutig akustisch wahrnehmbar ist, besteht bis über 25 mm eine weiterhin relativ konstante, nur leicht abnehmende Rückstellkraft. Wie bei den Biegeversuchen bricht die Geometrie nicht in mehrere Teile und die Integrität bleibt weitestgehend erhalten.



**Abbildung 5.46:** Vergleich der Kraft-Weg-Verläufe am Demonstrator der Variante B mit  $0/90^\circ$  Faserorientierung

Bis auf eine Kraftanlaufverschiebung, welche in der Simulation ausbleibt, beschreibt die Simulation mit übertragener Faserorientierung – mit einer Abweichung von 9 % zum Zeitpunkt des Bruchs – die

Realität mit relativ hoher Genauigkeit. Hingegen weicht die Simulation mit orthotroper Faserorientierung zu diesem Zeitpunkt mit über 28 % ab und verhält sich deutlich zu steif. Eine Vernachlässigung der resultierenden Scherwinkel könnte in diesem Fall zu einer deutlichen Überschätzung der Komponente und somit zu einer Unterdimensionierung führen.

Das in Abbildung 5.47 gezeigte Verformungsbild am realen Domversuch korreliert qualitativ ebenfalls besser mit dem Modell, das die Prozesssimulation durch ein Fasermapping berücksichtigt. Rot gestrichelt eingezeichnet sind in allen drei Darstellungen die jeweiligen Beul- bzw. Knickkanten. Dabei wird erkenntlich, dass die Kanten in allen Fällen ein annähernd quadratisches Bild ergeben; allerdings liegt bei manueller Faserorientierung ein um  $45^\circ$  verdrehtes Bild vor. Dementsprechend ist zu erwarten, dass auch bei einer Simulation mit orthotroper Faserorientierung und zusätzlichem Versagenskriterium ein der Realität nicht entsprechendes Versagen vorhergesagt wird.

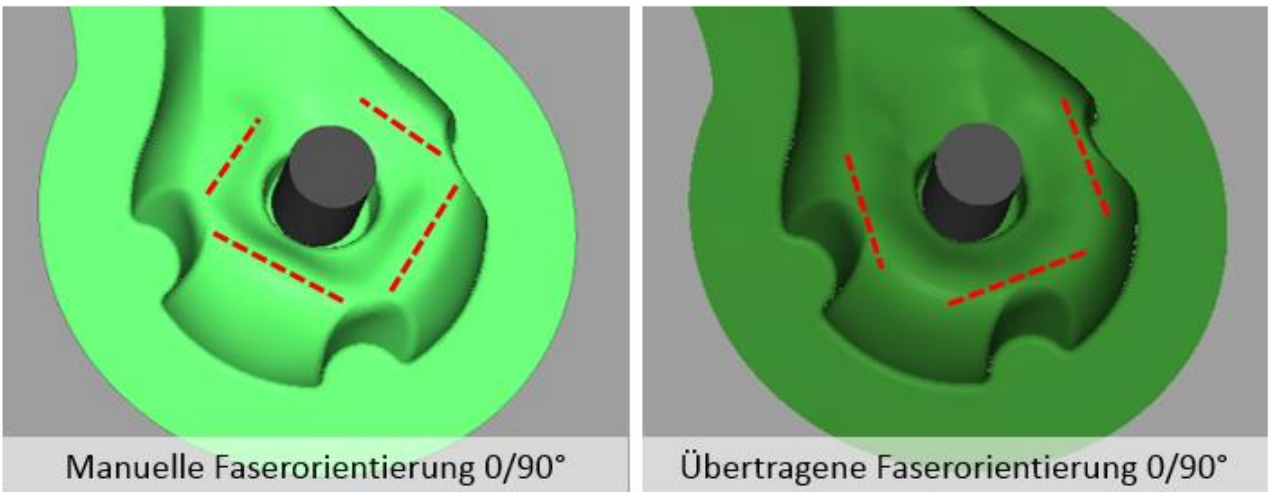
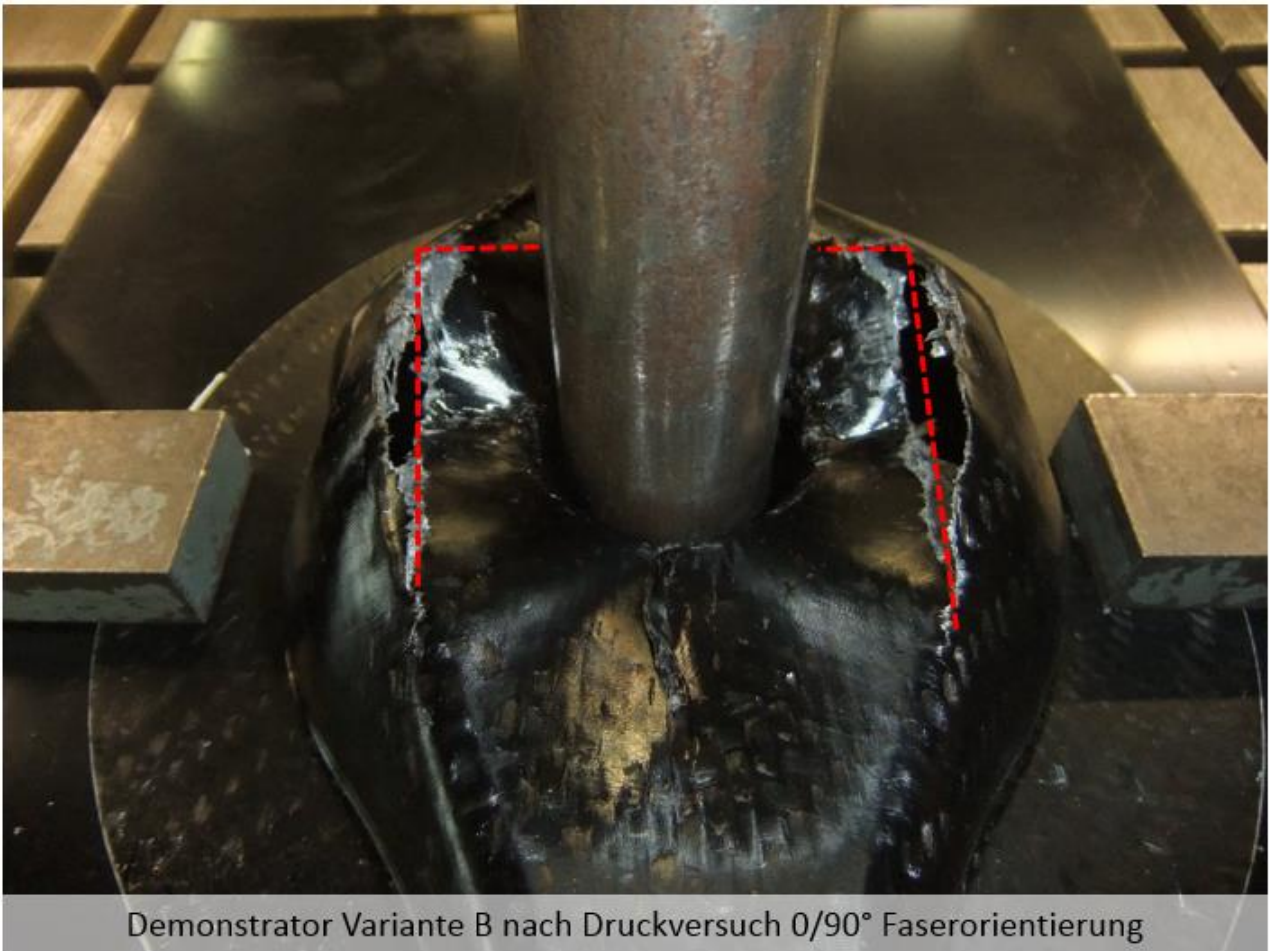
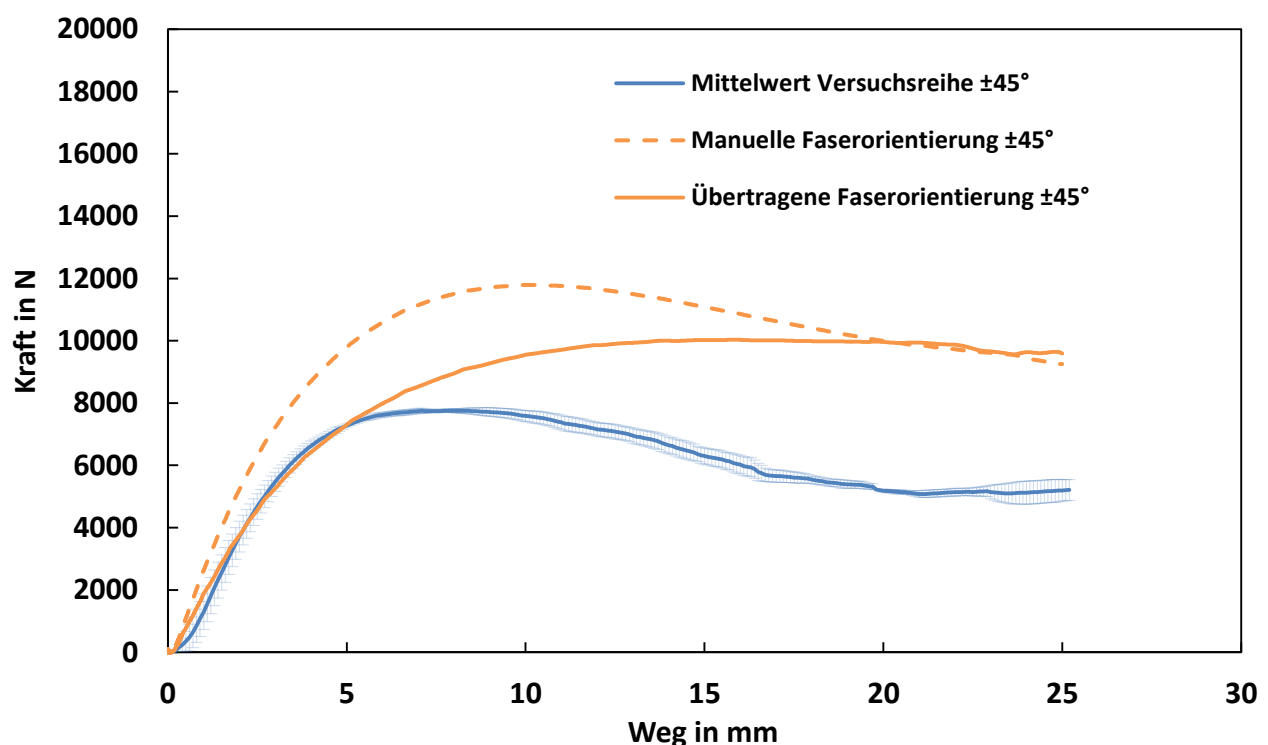


Abbildung 5.47: Bruchbild des Demonstrators der Variante B mit 0/90° Faserorientierung

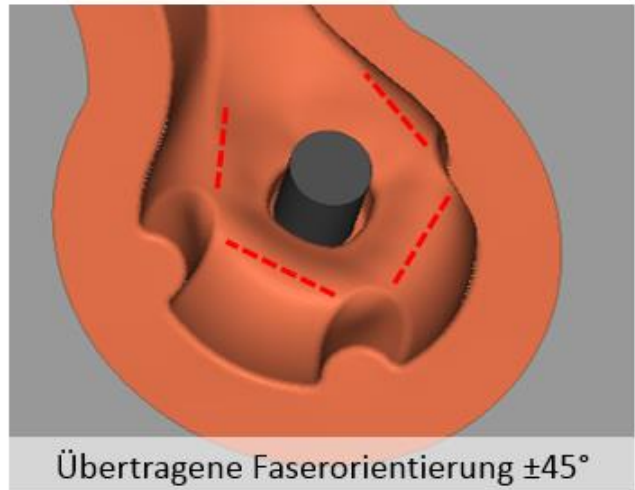
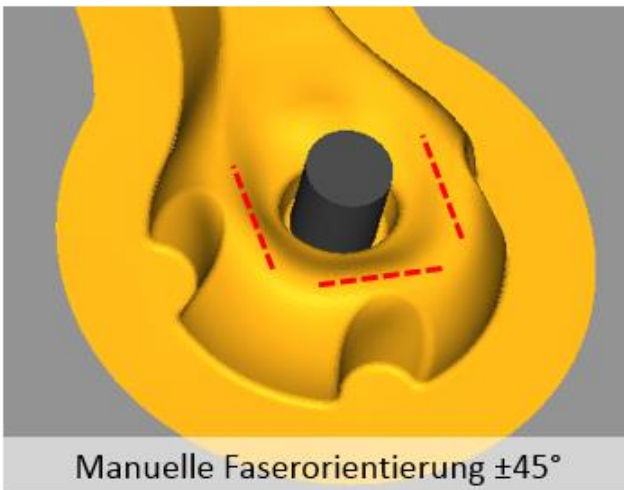
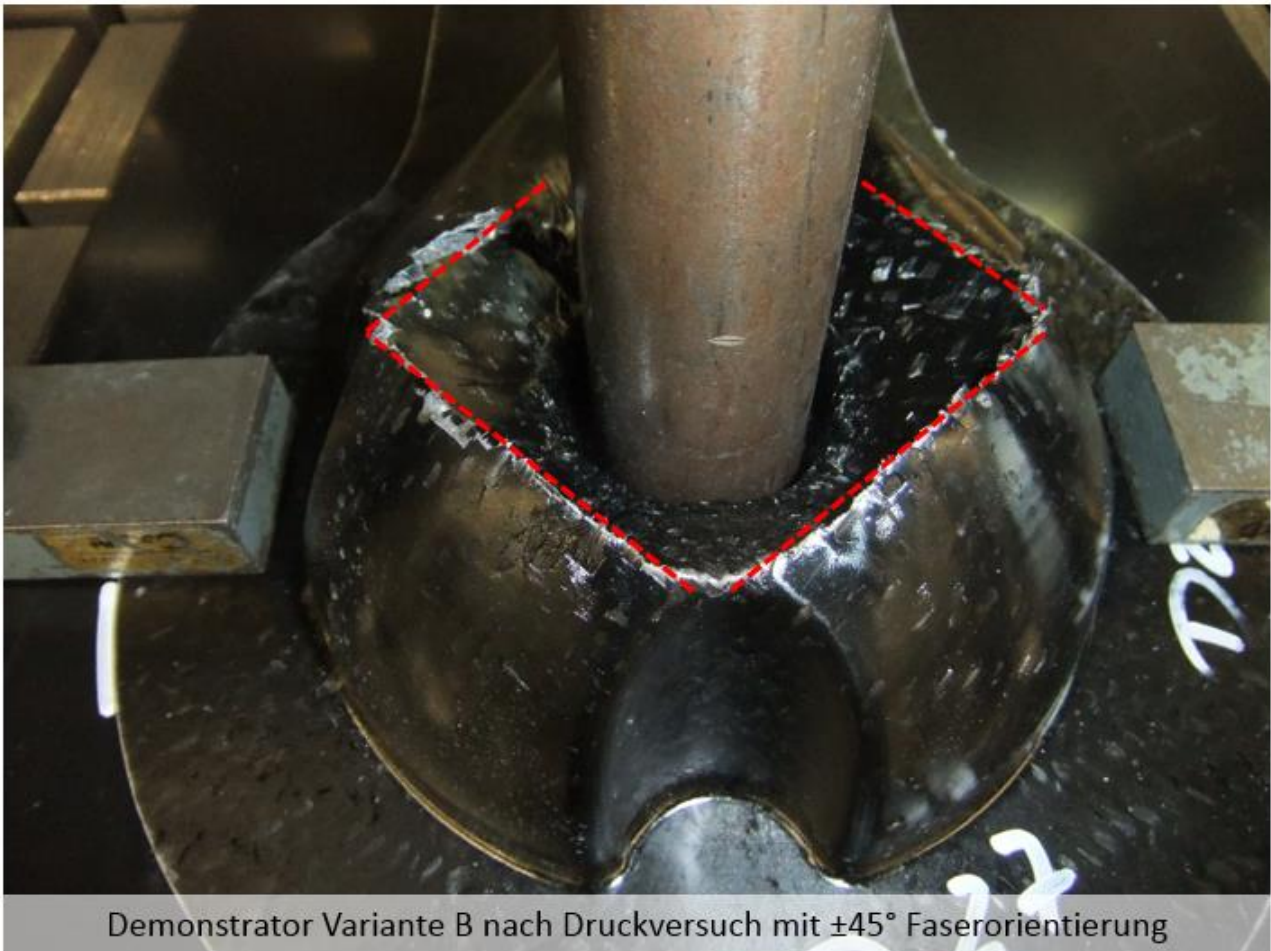
#### 5.3.5.4 Auswertung am Demonstrator der Variante B mit $\pm 45^\circ$ Faserorientierung

Nahezu identisch verhält sich der Kraft-Weg-Verlauf des Demonstrators der Variante B mit  $0/90^\circ$  Faserorientierung zum Demonstrator mit  $\pm 45^\circ$  in Abbildung 5.48. Bei einer perfekten Sphäre spielt die Ausrichtung des Organoblechs keine Rolle, da eine solche Geometrie punktsymmetrisch aufgebaut ist. Von einer perfekten Sphäre unterscheidet sich die Domgeometrie lediglich durch drei Sicken und die Anbindung an das Hutprofil. Offenbar spielt in dieser Geometrie die Ausrichtung des Gewebes vor der Fertigung keine signifikante Rolle für das Verhalten des Doms unter dieser Belastung, da der Unterschied im Kraft-Weg-Verlauf vernachlässigbar klein ist.



**Abbildung 5.48:** Vergleich der Kraft-Weg-Verläufe am Demonstrator der Variante B mit  $\pm 45^\circ$  Faserorientierung

Dennoch ist eine Berücksichtigung der resultierenden Scherwinkel unerlässlich, um die Realität abzubilden. Zu Beginn des Versagens bei erneut ca. 3,5 mm Stempelweg weicht die Simulation mit berücksichtigter Faserorientierung um ca. 4 % ab, dagegen stehen ca. 24 % bei manueller, orthotroper Faserorientierung, was eine deutlich höhere Unschärfe bedeutet. Wie bei der  $0/90^\circ$  Faserorientierung verhält sich das orthotrope Material zu steif, was für eine reale Komponente drastische Konsequenzen haben kann, da diese in der Realität dadurch unterdimensioniert wird.



**Abbildung 5.49:** Bruchbild des Demonstrators der Variante B mit  $\pm 45^\circ$  Faserorientierung

Wie bei der Auswertung des Demonstrators der Variante B mit  $0/90^\circ$  Faserorientierung werden in Abbildung 5.49 die Versagensbilder gegenübergestellt. Auch hier sind die Knick- bzw. Beulkanten rot gestrichelt gekennzeichnet. Ebenso ergibt sich hier ein annähernd quadratisches Bruchbild, wobei

die manuelle Faserorientierung im Vergleich zum realen Versagensbild um  $45^\circ$  gedreht liegt und sich somit von der Realität stark unterscheidet. Die Berechnung mit übertragener Faserorientierung trifft das reale Verhalten qualitativ genauer. Auch in diesem Fall ist davon auszugehen, dass durch Ergänzung von Versagenskriterien in der Materialkarte bei manueller Faserorientierung das Versagen weniger genau abbildbar ist.



## 6 Fazit und Ausblick

Die vorliegende Arbeit zeigt eine durchgängige Methode auf, die es erlaubt, endlosfaserverstärkte Komponenten mit thermoplastischer Matrix mit erhöhter Vorhersagegenauigkeit zu entwickeln. Dazu werden bisher vorhandene Entwicklungsschritte, die sich überwiegend an FKV mit duromerer Matrix orientieren, in einen Prozess eingebunden, welcher auf einem Entwicklungsprozess für Spritzgusskomponenten basiert und an die speziellen Bedürfnisse von Organoblechen angepasst ist. Durch die erarbeitete Entwicklungsmethode unter Verwendung der herausgestellten Materialtests sowie der vorgestellten Simulationsansätze wird eine realitätsnahe Vorhersage eines Bauteilverhaltens ermöglicht. Der resultierende Entwicklungsprozess gilt in seinem zeitlichen Ablauf als optimiert, da die Vorhersagegüte der Berechnungsmodelle zunimmt und somit eine geringere Anzahl an Iterationen bis zum Erreichen des angestrebten Ergebnisses zu erwarten ist. Außerdem kann der Sicherheitsfaktor in der Konstruktion verkleinert werden, wodurch Komponenten mit weniger Material und somit geringeren Kosten und Gewicht eingesetzt werden können.

In der Arbeit wird an einem Demonstrator die komplette Entwicklungskette durchlaufen. Davon ausgehend wird erarbeitet, in welchen Entwicklungsschritten welche Informationen vorliegen müssen, um eine möglichst realitätsnahe Simulation durchführen zu können. Eine solche Simulation wird bei der Entwicklung für eine Komponente im Serieneinsatz die Realität in verschiedenen Lastfällen widerspiegeln, um so iterationsweise den Entwurf bis zur Erfüllung des Pflichtenhefts zu optimieren. Für eine Funktionsintegration mit Spritzguss muss die Organoblechentwicklungskette mit der des Spritzgusses zu kombiniert werden. Dafür muss weiterhin erarbeitet werden, wie diese beiden optimal zusammenführbar sind. Da sich der hier entwickelte Prozess jedoch bereits an dem für Spritzguss orientiert, ist eine Kombination ohne großen zusätzlichen Aufwand denkbar.

Nach dem Stand der Technik kann im Rahmen einer Machbarkeitsstudie, die in Form einer Voraussetzung durchgeführt wird, in einer ersten Abschätzung und ohne aufwändige Prozesssimulation eine Aussage über die prinzipielle Erfüllbarkeit der Anforderungen an ein Bauteil getroffen werden. Ein funktionsfähiges Berechnungsmodell ist dafür entwickelt und erläutert. Dafür wird lediglich mit Angaben aus einem Materialdatenblatt des Herstellers gearbeitet. Die Faserorientierung wird ohne Drapiersimulation als orthogonal angenommen und es kann mit einer gewissen Abweichung eine valide Aussage über das reale Bauteilverhalten getroffen werden. Allerdings ist der dafür verwendete Ansatz nicht dazu geeignet die Realität im Detail abzubilden.

Auch wenn die Simulationen zeigen, dass eine für die Lastsimulation vorgeschaltete Prozesssimulation die Vorhersagegüte signifikant verbessert, ist für eine erste Abschätzung auch eine manuelle Faserorientierung sinnvoll. Dadurch kann mit relativ geringem Aufwand überprüft werden, ob ein Konstruktionsentwurf zumindest ansatzweise die gestellten Anforderungen erfüllen kann. Bei Komponenten mit abwickelbaren Oberflächen ist die Annäherung an die Realität in der Tendenz höher als bei Komponenten, die in der Drapierung große Scherwinkel induzieren.

Stellt sich ein Bauteilentwurf als vielversprechend heraus, werden mit anschließenden Materialtests, welche speziell entwickelt und spezifiziert werden, Materialkarten für eine Prozess- und eine Lastsimulation erstellt. Für die Durchführung der Drapiersimulation wird ein Scherrahmenversuch bei Prozessstemperatur entworfen und umgesetzt, bei dem Schubmoduln unterhalb und oberhalb des Blockierwinkels ermittelt werden. Dafür wird mit einer Kombination aus Ofen und IR-Strahlern gearbeitet, was den realen Fertigungsprozess widerspiegelt. Somit wird im Versuch ein dem Fertigungsverfahren entsprechendes Materialverhalten charakterisierbar. Insbesondere die Bestimmung des maximalen Scherwinkels wird zur Sicherstellung der Drapier- bzw. Fertigbarkeit einer Komponente genutzt.

Es wird gezeigt, dass mit nach Norm durchgeführten Zug- und Biegeversuchen an Prüfkörpern mit jeweils  $0/90^\circ$  und  $\pm 45^\circ$ -Faserorientierung eine Materialcharakterisierung für quasistatische Belastungen durchgeführt werden kann. Die aus den Versuchen resultierenden Kraft-Weg-Verläufe dienen in einer Multimodelloptimierung der Erstellung einer elementspezifischen Materialkarte, welche für Lastsimulationen genutzt wird. Dabei werden in der Materialkarte die Materialparameter als variabel gesetzt und mit minimalen und maximalen Grenzwerten versehen. Mit insgesamt 132 Simulationsläufen, wobei ein Lauf jeweils eine Simulation aller vier realen Versuche enthält, werden die variablen Parameter in einer DoE überprüft und optimiert, bis die simulierten und realen Kraft-Weg-Verläufe möglichst deckungsgleich sind. Dazu wird mit der Methode der kleinsten Fehlerquadrate vorgegangen. Das Resultat aus dem Vorgehen ist eine numerisch optimierte Materialkarte, welche sowohl positive als auch negative Zug-, Druck- und Schubspannungen entsprechend dem realen Auftreten abbilden kann.

In der vorliegenden Arbeit ist kein Versagenskriterium im Materialmodell implementiert. Für weitere Untersuchungen an Faserverbundmaterialien empfehlen sich hierfür z.B. das Versagen nach Puck,

Tsai Wu oder das Crasurv-Kriterium. Die hochkomplexen Versagensmechanismen bzw. das Nachbruchverhalten einer Komponente und deren Umsetzung in der Simulation sind Gegenstand aktueller Forschung und noch nicht abschließend untersucht. Thematisch ist das Versagen im Rahmen der Werkstoffauswahl mit zusätzlichen Materialtests in die Multimodelloptimierung zu integrieren. Der gleiche Abschnitt sollte außerdem um temperatur- und dehnratenabhängige Materialtests erweitert werden, um diese ebenfalls in die Materialkarte einzuarbeiten.

Darauf folgend wird ein Ansatz für die Drapiersimulation erörtert und umgesetzt, in welcher der Fertigungsprozess der Komponente nachstellbar ist. Dieser Ansatz ermöglicht eine Aussage über die bzw. eine Berücksichtigung der sich im Verarbeitungsprozess ändernden Faserorientierung. Weiterhin wird hierbei der maximale Scherwinkel als Indiz zur Feststellung der Herstellbarkeit herangezogen. Wird dieser überschritten, muss mit einem nicht reproduzierbaren Faltenwurf gerechnet werden und die Komponente gilt als nicht herstellbar.

In der Prozesssimulation wird in einer umfassenden DoE nach Hammersley durch Annäherung eines Metamodells nach Kriging und anschließender ANOVA untersucht, welche Parameter einen signifikanten Einfluss auf die Faserorientierung haben. Das Ergebnis aus dieser Untersuchung ermöglicht einen Rückschluss auf den zu betreibenden Aufwand sowohl bei der Materialcharakterisierung für die Prozesssimulation als auch bei der Einhaltung der realen Prozessparameter wie bspw. der Reibung zwischen Werkzeug und Material. Es stellt sich heraus, dass die Faserorientierung in erster Linie von der Bauteilgeometrie abhängt und weniger stark vom Prozess und dem Material

Die Ergebnisse aus der Prozesssimulation sind darüber hinaus unmittelbar im Werkzeugbau umsetzbar. Die lokale Materialdicke, welche mit dem Scherwinkel zunimmt, muss bei der Prozesssimulation berechnet und in der Werkzeugauslegung berücksichtigt werden. Wird dieser Effekt vernachlässigt, ist kein homogener Konsolidierungsdruck auf die Komponente applizierbar, was Materialdefekte zur Folge haben kann. Außerdem führt eine nicht berücksichtigte Aufdickung bei der Fertigung zu einer Blockbildung und somit zu einem unvollständigen Werkzeugschluss, was bei der Kombination mit Spritzguss zu austretender Schmelze führen kann.

Die mittels CT durchgeführten Untersuchungen weisen eine hohe Korrelation zwischen realen Faserorientierungen und den in der Simulation vorhergesagten nach. In der Gegenüberstellung wird eine Standardabweichung über alle Messpunkte von  $4,6^\circ$  erreicht. Hier sind insbesondere bei den Komponenten mit  $\pm 45^\circ$ -Faserorientierung einige Ausreißer in den Resultaten zu beobachten, was auf eine

ungenügende Modellierung der Verbindung zwischen den einzelnen Lagen zurückzuführen ist. Wenngleich mit der aktuellen Simulationsgüte das Verhalten der Komponente prädiziert werden kann, so ist bei einer Komponente mit Abweichungen in der Faserorientierung in kritisch belasteten Bereichen der Einfluss und somit die Differenz zur Realität ggf. dennoch problematisch. Da im Prozess insbesondere mit Druck beaufschlagte Fasern und Lagen mit starkem interlaminaren Gleiten die größten Abweichungen von der Realität aufweisen, sollten diese Effekte näher betrachtet werden. Eine Optimierung des interlaminaren Gleitens lässt sich aller Voraussicht nach durch eine Anpassung des Connect Materials gewährleisten.

Es wird herausgestellt, dass der Fertigungsprozess durch eine Übertragung der vektoriell dargestellten Faserorientierungen auf die anschließende Lastsimulation berücksichtigt werden kann. Für die Lastsimulation wird ein neues, unverzerrtes Netz verwendet, welches nicht die gleiche Elementkantenlänge wie in der Prozesssimulation aufweist. Weiterhin wird dafür nicht die Independent Layer-, sondern die Sandwich-Modellierung angewendet, was eine Implementierung der Komponente in eine Vollfahrzeugsimulation ermöglicht, ohne diese durch eine zu feine Diskretisierung zu verlangsamen.

Durch die Validierung der vorgestellten Entwicklungskette wird deutlich, dass die Vorauslegung mit orthogonalem Materialverhalten die Realität mit relativ großen Abweichungen abbilden kann und dass für eine detaillierte Auslegung und Dimensionierung eine Drapiersimulation unerlässlich ist. Wird eine solche Simulation durchgeführt und in der nachfolgenden Lastsimulation berücksichtigt, ist die Realität in allen vier real durchgeführten Versuchen mit einer maximalen Abweichung von 9,5 % darstellbar. Im Vergleich zum bisherigen Ansatz in der Auslegung kann nach dieser Methode eine signifikante Verbesserung in der Vorhersagegüte erzielt werden.

Durch die Verwendung der Entwicklungsmethode lässt sich die Prädiktion eines mechanischen Bauteilverhaltens optimieren. Zum einen können dabei die Entwicklungsdauer und somit die Entwicklungskosten reduziert werden, da eine Reduktion der benötigten Prototypkomponenten zur Komponentenvolidierung zu erwarten ist. Zum anderen wird die Möglichkeit geschaffen, eine Materialcharakterisierung für die Prozess- und Lastsimulation durchzuführen, bei welcher gleichzeitig die Relevanz der einzelnen Materialtests festgestellt wird und somit der Aufwand für Materialuntersuchungen mit geringem oder gar vernachlässigbarem Einfluss auf das Materialverhalten minimiert werden kann.

## Literaturverzeichnis

- [1] Abrão, A., Faria, P., Campos Rubio, J., Reis, P. u. Paulo Davim, J.: Drilling of fiber reinforced plastics: A review. *Journal of Materials Processing Technology*, 186, 2007 1–3. S. 1–7
- [2] Achleitner, A., Antony, P., Ascher, F., Berger, E., Burgers, C., Döllner, G., Friedrich, J. K.-H., Futschik, H. D., Gruber, M., Kiesgen, G., Mohrdieck, C. H., Noreikat, K. E., Schulze, H., Wagner, M. u. Wöhr, M.: Formen und neue Konzepte. In: Braess, H.-H. (Hrsg.): *Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*. Mit 50 Tabellen. ATZ/MTZ-Fachbuch. 9783658016913. Wiesbaden: Springer Vieweg. 2013. S. 119–220
- [3] Adomeit, P., Baar, R., Beck, M., Bönnen, D., Dorenkamp, R., Drescher, I., Greiner, J., Gumpoltsberger, G., Heintl, E., Jean, E., Kurz, G., Lanzer, H., Pecnik, H., Pinggen, B., Pischinger, F., Sasse, C., Schindler, K.-P., Spindler, K. u. Steinel, K.: Antriebe. In: Braess, H.-H. (Hrsg.): *Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*. Mit 50 Tabellen. ATZ/MTZ-Fachbuch. 9783658016913. Wiesbaden: Springer Vieweg. 2013. S. 221–496
- [4] Advani, S. G.: *Flow and rheology in polymer composites manufacturing*. Composite materials series, Bd. 10. 9780444893475. Amsterdam: Elsevier, 1994
- [5] Alart, P. u. Curnier, A.: A mixed formulation for frictional contact problems prone to Newton like solution methods. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 92, 1991 3. S. 353–375
- [6] Alberdi, A., Su?rez, A., Artaza, T., Escobar-Palafox, G. A. u. Ridgway, K.: Composite Cutting with Abrasive Water Jet. *Procedia Engineering*, 63, 2013. S. 421–429
- [7] Albers, A. u. Braun, A.: Der Prozess der Produktentstehung. In: Henning, F. u. Moeller, E. (Hrsg.): *Handbuch Leichtbau*. Methoden, Werkstoffe, Fertigung. 9783446422674. München: Carl Hanser. 2011. S. 7–30
- [8] Altair Engineering GmbH: *HyperWorks 13 Composite Training Documents*, 2016
- [9] Altair Engineering GmbH: *HyperWorks 14 Theory Manual*, 2016
- [10] Al'tšuller, G. S.: *Erfinden - Wege zur Lösung technischer Probleme*. 9783000027000. Cottbus: PI - Planung und Innovation, 1998
- [11] Al'tšuller, G. S.: *Theory of Inventive Problem Solving*. Sinferoble, Ukraine: Management Schule, 1986
- [12] Andersson, M. u. Liedberg, P.: *Crash behavior of composite structures. A CAE benchmarking study*, Chalmers University of Technology Masterarbeit. Göteborg, 2014
- [13] Andreasen, M. M., Hansen, C. T. u. Cash, P.: *Conceptual design. Interpretations, mindset and models*. 978-3319198385. Cham: Springer, 2015

- [14] Andreasen, M. M. u. Hein, L.: Integrated product development. 978-3540166795. Bedford u.a.: IFS (Publications) Ltd [u.a.], 1987
- [15] Antonsson, E. K. u. Cagan, J.: Formal Engineering Design Synthesis. 9780521017756. Cambridge University Press, 2005
- [16] Arnold, S., Sutcliffe, M. u. Oram, W.: Experimental measurement of wrinkle formation during draping of non-crimp fabric. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 82, 2016. S. 159–169
- [17] AVK – Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e. V. und AVK-TV GmbH: Arbeitskreise. *Composites Germany - Arbeitskreis Normung*, Frankfurt 2015. <http://www.avk-tv.de/expertsworkinggroups.php>, abgerufen am: 09.09.2016
- [18] Azaiez, J., Chiba, K., Chinesta, F. u. Poitou, A.: State-of-the-Art on numerical simulation of fiber-reinforced thermoplastic forming processes. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 9, 2002 2. S. 141–198
- [19] Bach, C. von: *Die Maschinenelemente: Ihre Berechnung und Konstruktion mit Rücksicht auf die neueren Versuche*. Tübingen: J.G. Cottaschen, 1881
- [20] Bach, C. von u. Krosigk, E. von: *Die Maschinen-Elemente. Ihre Berechnung und Konstruktion mit Rücksicht auf die neueren Versuche. Edition classic*. 978-3836440165. Saarbrücken: VDM Dr. Müller, 2007, [2007
- [21] Balaji Thattai parthasarathy, K., Pillay, S., Ning, H. u. Vaidya, U. K.: Process simulation, design and manufacturing of a long fiber thermoplastic composite for mass transit application. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 39, 2008 9. S. 1512–1521
- [22] Ballhause, D.: *Diskrete Modellierung des Verformungs- und Versagensverhaltens von Gewebemembranen*, Universität Stuttgart Dissertation. Stuttgart, 2007
- [23] Bartz, W. J. (Hrsg.): *Faserverbundwerkstoffe mit thermoplastischer Matrix. Hochleistungswerkstoffe für rationelle Verarbeitung*. 978-3-8169-1390-0. Renningen: Expert, 1997
- [24] Başar, Y., Itskov, M. u. Eckstein, A.: Composite laminates: nonlinear interlaminar stress analysis by multi-layer shell elements. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 185, 2000 2–4. S. 367–397
- [25] Başar, Y. u. Schultz, R.: On a layerwise finite element for the finite-rotation analysis of composite laminates. *American Society of Mechanical Engineers Pet Div Publ PD*, New York, USA, 64, 1994 2. S. 213–221
- [26] Batchelor, G. K.: The stress system in a suspension of force-free particles. *Journal of Fluid Mechanics*, 41, 1970 03. S. 545–570
- [27] Bauer, C.-O.: Anforderungen aus der Produkthaftung an den Konstrukteur. Beispiel: Verbindungstechnik. *Konstruktion*, 1990 42. S. 261–265

- [28] Bauert, F.: Methodische Produktmodellierung für den rechnerunterstützten Entwurf. Schriftenreihe der TU Berlin: Konstruktionstechnik, 1991 18
- [29] Baur, E., Brinkmann, S., Osswald, T. A. u. Schmachtenberg, E.: Saechtling Kunststoff Taschenbuch. Hanser eLibrary. 9783446437296. München: Carl Hanser, 2013
- [30] Beater, P.: Modellbildung und Simulation technischer Systeme mit Modelica 3: Eine kurze Einführung für Ingenieure und Studenten. 9783739248226. Books on Demand, 2016
- [31] Bergmann, R. B.: Methoden der zerstörungsfreien Prüfung. In: Gevatter, H. J., Abel, H. B., Grünhaupt, U., Blume, H. J., Skabron, K., Beikirch, H., Boller, S., Frey, G., Kraft, D., Löhr, W. u. others (Hrsg.): Handbuch der Mess- und Automatisierungstechnik im Automobil: Fahrzeugelektronik, Fahrzeugmechatronik. VDI-Buch. 9783540299806. Springer Berlin Heidelberg. 2006. S. 363–410
- [32] Berins, M. L.: SPI Plastics Engineering Handbook of the Society of the Plastics Industry, Inc. 9781461576044. Springer US, 2012
- [33] Bertsche, B. u. Bullinger, H. J.: Entwicklung und Erprobung innovativer Produkte - Rapid Prototyping: Grundlagen, Rahmenbedingungen und Realisierung. (VDI-Buch) Chemische Technik Verfahrenstechnik. 9783540698791. Springer, 2007
- [34] Bhatnagar, N., Singh, I. u. Nayak, D.: Damage Investigation in Drilling of Glass Fiber Reinforced Plastic Composite Laminates. Materials and Manufacturing Processes, 19, 2004 6. S. 995–1007
- [35] Binetruy, C., Chinesta, F. u. Keunings, R.: Flows in Polymers, Reinforced Polymers and Composites: A Multi-Scale Approach. SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology. 9783319167572. Springer International Publishing, 2015
- [36] Bohle, D.: Rechnerunterstütztes Konstruieren im Rahmen des algorithmischen Auswahlverfahrens zur Konstruktion mit Katalogen, TU Braunschweig Dissertation, 1982
- [37] Boisse, P., Gasser, A. u. Hivet, G.: Analyses of fabric tensile behaviour: determination of the biaxial tension-strain surfaces and their use in forming simulations. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 32, 2001 10. S. 1395–1414
- [38] Bonnet, M.: Kunststofftechnik. Grundlagen, Verarbeitung, Werkstoffauswahl und Fallbeispiele. Lehrbuch. 978-3-658-03138-1. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014
- [39] Bonten, C.: Kunststofftechnik. Einführung und Grundlagen. 978-3-446-45223-7. München: Carl Hanser, 2016
- [40] Braess, H.-H., Fritzsche, E., Nettleau, H.-J., Seiffert, U. u. Zinke, E.: Anforderungen, Zielkonflikte. In: Braess, H.-H. (Hrsg.): Handbuch Kraftfahrzeugtechnik. Mit 50 Tabellen. ATZ/MTZ-Fachbuch. 9783658016913. Wiesbaden: Springer Vieweg. 2013. S. 11–46

- 
- [41] Braess, H.-H., Goßmann, H., Hamm, L., Herpel, T., Konorsa, R., Lachmayer, R., Laukart, G., Neukirchner, E. P., Pecho, W., Peitz, V., Stauber, R., Teske, L., Thomer, K. W., Timm, H., Vorberg, T., Wagner, P.-O. u. Wawzyniak, M.: Aufbau. In: Braess, H.-H. (Hrsg.): Handbuch Kraftfahrzeugtechnik. Mit 50 Tabellen. ATZ/MTZ-Fachbuch. 9783658016913. Wiesbaden: Springer Vieweg. 2013. S. 497–630
- [42] Brast, K. u. Michaeli, W.: Processing of long-fibre reinforced thermoplastics using the direct strand-deposition process, Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen Dissertation. Aachen, 2001
- [43] Breuer, U. u. Mitschang, P.: Einführung. In: Neitzel, M., Mitschang, P. u. Breuer, U. (Hrsg.): Handbuch Verbundwerkstoffe. Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung. 9783446436978. München: Carl Hanser. 2014. S. 1–30
- [44] Cao, J, Akkerman, R., Boisse, P., Chen, J., Cheng, H. S., Graaf, E. F. de, Gorczyca, J. L., Harrison, P., Hivet, G., Launay, J. u. others: Characterization of mechanical behavior of woven fabrics: experimental methods and benchmark results. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 39, 2008 6. S. 1037–1053
- [45] Chang, S., Sharma, S. u. Sutcliffe, M.: Microscopic investigation of tow geometry of a dry satin weave fabric during deformation. *Composites Science and Technology*, 63, 2003 1. S. 99–111
- [46] Cherif, C. (Hrsg.): Textile Werkstoffe für den Leichtbau. Techniken, Verfahren, Materialien, Eigenschaften. SpringerLink : Bücher. 9783642179921. Heidelberg u.a.: Springer, 2011
- [47] Christie, R. G.: Numerical modelling of fibre-reinforced thermoplastic sheet forming, University of Auckland Ph.D. Thesis. Auckland, New Zealand, 1997
- [48] Crowson, R. J., Folkes, M. J. u. Bright, P. F.: Rheology of short glass fiber-reinforced thermoplastics and its application to injection molding I. Fiber motion and viscosity measurement. *Polymer Engineering & Science*, 20, 1980 14. S. 925–933
- [49] Cueto, E., Monge, R., Chinesta, F., Poitou, A., Alfaro, I. u. Mackley, M. R.: Rheological modeling and forming process simulation of CNT nanocomposites. *International Journal of Material Forming*, 3, 2010 2. S. 1327–1338
- [50] Danilov, M.: Energieeffiziente Mikrowellentemperierung von kohlenstofffaserverstärkten Duroplasten, DLR, Bibliotheks- und Informationswesen Forschungsbericht. TU Braunschweig, 2013
- [51] Dauensteiner, A.: Der Weg zum Ein-Liter-Auto: Minimierung aller Fahrwiderstände mit neuen Konzepten. 9783642593789. Springer Berlin Heidelberg, 2013
- [52] Degischer, P. H., Poletti, C. u. Skrna-Jakl, I.: Werkstoffangebot für den Leichtbau. In: Degischer, H. P. u. Lüftl, S. (Hrsg.): Leichtbau. 9783527659869. Wiley. 2012. S. 77–172
-



- [53] Domininghaus, H., Peter, E., Peter, E. u. Thomas, H.: Kunststoffe. Eigenschaften und Anwendungen. VDI-Buch. 9783642161735. Heidelberg u.a.: Springer, 2012
- [54] Dörner, D.: Die Logik des Misslingens. Strategisches Denken in komplexen Situationen. 9783644011618. Reinbek: Rowohlt Digitalbuch, 2011
- [55] Dylla, N.: Denk- und Handlungsabläufe beim Konstruieren. Zugl.: München, Techn. Univ., Diss., 1990. Konstruktionstechnik München, Bd. 5. 9783446163270. München: Carl Hanser, 1991
- [56] Eggers, U., Furrer, P., Müller, A., Mütze, S., Geffert, A., Kröff, A., Kopp, G., Schöneburg, R., Scherzer, D., Hahn, O., Janzen, V., Meschut, G., Olfermann, T., Süllentrop, S., Gadow, R. u. Gaul, L.: Werkstoff- und Halbzeugtechnologien für Leichtbau-Anwendungen. In: Friedrich, H. E. (Hrsg.): Leichtbau in der Fahrzeugtechnik. ATZ / MTZ-Fachbuch. 9783834821102. Wiesbaden, s.l.: Springer Fachmedien Wiesbaden. 2013. S. 443–726
- [57] Ehleben, M.: Neue Verfahren zur Herstellung thermoplastischer Faserverbundbauteile für die automobiler Serienfertigung. Neue Technologien für faserverstärkte thermoplastische Halbzeuge und Bauteile. Technische Universität Chemnitz, 2014
- [58] Ehrenstein, G. W., Amesöder, S., Diaz, L. F., Niemann, H. u. Deventer, R.: Werkstoff- und prozessoptimierte Herstellung flächiger Kunststoff-Kunststoff und Kunststoff-Metall-Verbundbauteile. Tagungsband zum Berichts- und Industriekolloquium, 2003
- [59] Ellenrieder, G., Gänsicke, T., Goede, M. u. Herrmann, H. G.: Die Leichtbaustrategien. In: Friedrich, H. E. (Hrsg.): Leichtbau in der Fahrzeugtechnik. ATZ / MTZ-Fachbuch. 9783834821102. Wiesbaden, s.l.: Springer Fachmedien Wiesbaden. 2013. S. 43–118
- [60] Evertz, T., Flaxa, V., Georgeou, Z., Gronebaum, R.-H., Kwiaton, N., Lesch, C., Otto, M., Schöttler, J., Schulz, T., Springub, B., Furrer, P., Müller, A., Dieringa, H., Kainer, K. U., Leyens, C., Peters, M., Gadow, R., Drechsler, K. u. Ziegmann, G.: Die Leichtbauwerkstoffe für den Fahrzeugbau. In: Friedrich, H. E. (Hrsg.): Leichtbau in der Fahrzeugtechnik. ATZ / MTZ-Fachbuch. 9783834821102. Wiesbaden, s.l.: Springer Fachmedien Wiesbaden. 2013. S. 199–442
- [61] DIN SPEC 4885; 2014-01. Faserverstärkte Kunststoffe – Schubversuch mittels Schubrahmen zur Ermittlung der Schubspannungs-/Schubverformungskurve und des Schubmoduls in der Lagenebene
- [62] Feldhusen, J.: Systemkonzept für die durchgängige und flexible Rechnerunterstützung des Konstruktionsprozesses. Schriftenreihe der TU Berlin: Konstruktionstechnik, 1989 16
- [63] Feldhusen, J. u. Grote, K.-H.: Pahl/Beitz Konstruktionslehre - Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung. 978-3-642-29569-0. Berlin Heidelberg New York: Springer, 2013

- [64] Finckh, H.: Hochaufgelöste Computertomographie – wichtiger Bestandteil der numerischen Simulation. In: Siebenpfeiffer, W. (Hrsg.): Leichtbau-Technologien im Automobilbau: Werkstoffe - Fertigung - Konzepte. ATZ/MTZ-Fachbuch. 9783658040253. Springer Fachmedien Wiesbaden. 2013. S. 134–140
- [65] Fokin, D. u. Mouillet, J.-B.: Radioss: Composites for Crash and Impact Simulation. Altair Training. Köln, 2015
- [66] Franke, H.-J.: Der Lebenszyklus technischer Produkte. VDI-Berichte, 1984 512
- [67] Franke, H.-J.: Methodische Schritte beim Klären konstruktiver Aufgabenstellungen. Konstruktion im Maschinen-, Apparate- und Gerätebau, 1975. S. 395–402
- [68] Freudenberg, C.: Textile Faserstoffe. In: Cherif, C. (Hrsg.): Textile Werkstoffe für den Leichtbau. Techniken, Verfahren, Materialien, Eigenschaften. SpringerLink : Bücher. 9783642179921. Heidelberg u.a.: Springer. 2011. S. 39–109
- [69] G. Creech: Mesoscopic Finite Element modelling of Non-Crimp Fabrics for drape and failure analyses, School of Applied Sciences PhD Thesis. Cranfield University, 2006
- [70] Girdauskaite, L., Haasemann, G. u. Krzywinski, S.: Modellierung und Simulation. In: Cherif, C. (Hrsg.): Textile Werkstoffe für den Leichtbau. Techniken, Verfahren, Materialien, Eigenschaften. SpringerLink : Bücher. 9783642179921. Heidelberg u.a.: Springer. 2011. S. 573–636
- [71] Gross, D., Hauger, W., Schnell, W. u. Schröder, J.: Technische Mechanik. Statik. Springer-Lehrbuch. 9783662102565. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1998
- [72] Gross, D., Hauger, W., Schröder, J. u. Wall, W. A.: Technische Mechanik 2: Elastostatik. Springer-Lehrbuch. 9783642409660. Springer Berlin Heidelberg, 2014
- [73] Ha, K. N.: Hype um Hybridität: Kultureller Differenzkonsum und postmoderne Verwertungstechniken im Spätkapitalismus. Cultural Studies. 9783839403099. transcript, 2015
- [74] Haanappel, S. P., ten Thije, R., Sachs, U., Rietman, B. u. Akkerman, R.: Formability analyses of uni-directional and textile reinforced thermoplastics. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 56, 2014. S. 80–92
- [75] Haberfellner, R.: Systems engineering. Methodik und Praxis. 9783857439988. Zürich: Verl. Industrielle Organisation, 1999
- [76] Hamila, N. u. Boisse, P.: Simulations of textile composite reinforcement draping using a new semi-discrete three node finite element. Composites Part B: Engineering, 39, 2008 6. S. 999–1010
- [77] Hamila, N., Boisse, P. u. Chatel, S.: Finite element simulation of composite reinforcement draping using a three node semi discrete triangle. International Journal of Material Forming, 1, 2008 1. S. 867–870

- [78] Hamm, L., Krautkrämer, B., Malik, R., Peitz, V., Plank, R. u. Solfrank, P.: Werkstoffe und Fertigungsverfahren. In: Braess, H.-H. (Hrsg.): Handbuch Kraftfahrzeugtechnik. Mit 50 Tabellen. ATZ/MTZ-Fachbuch. 9783658016913. Wiesbaden: Springer Vieweg. 2013. S. 1040–1131
- [79] Hand, G. L.: A theory of anisotropic fluids. *Journal of Fluid Mechanics*, 13, 1962 01. S. 33–46
- [80] Hansen, F.: Konstruktionswissenschaft. Grundlagen und Methoden. Studienbücher der technischen Wissenschaften. 3-446-11957-4. München: Carl Hanser, 1974
- [81] Harrison, P., Clifford, M. u. Long, A.: Shear characterisation of viscous woven textile composites: a comparison between picture frame and bias extension experiments. *Composites Science and Technology*, 64, 2004 10–11. S. 1453–1465
- [82] Hassen, A. A., Taheri, H. u. Vaidya, U. K.: Non-destructive investigation of thermoplastic reinforced composites. *Composites Part B: Engineering*, 97, 2016. S. 244–254
- [83] Hehenberger, P., Vajna, S., Weber, C., Bley, H. u. Zeman, K.: CAx für Ingenieure: Eine praxisbezogene Einführung. 9783540360391. Springer Berlin Heidelberg, 2009
- [84] Hellerich, W., Harsch, G. u. Baur, E.: Werkstoff-Führer Kunststoffe. Eigenschaften, Prüfungen, Kennwerte. 9783446424364. München: Carl Hanser, 2010
- [85] Henning, F.: Verarbeitung faserverstärkter Kunststoffe. In: Henning, F. u. Moeller, E. (Hrsg.): Handbuch Leichtbau. Methoden, Werkstoffe, Fertigung. 9783446422674. München: Carl Hanser. 2011. S. 602–668
- [86] Henning, F., Drechsler, K. u. Chatzigeorgiou, L.: Faserverstärkte Kunststoffe. In: Henning, F. u. Moeller, E. (Hrsg.): Handbuch Leichtbau. Methoden, Werkstoffe, Fertigung. 9783446422674. München: Carl Hanser. 2011. S. 335–392
- [87] Henning, F. u. Moeller, E. (Hrsg.): Handbuch Leichtbau. Methoden, Werkstoffe, Fertigung. 9783446422674. München: Carl Hanser, 2011
- [88] Hinch, E. J. u. Leal, L. G.: Constitutive equations in suspension mechanics. Part 2. Approximate forms for a suspension of rigid particles affected by Brownian rotations. *Journal of Fluid Mechanics*, 1976 76. S. 187–208
- [89] Hinch, E. J. u. Leal, L. G.: Constitutive equations in suspension mechanics. Part 1. General formulation. *Journal of Fluid Mechanics*, 1975 71. S. 481–495
- [90] Höhne, G.: Methodisches Konstruieren in Verbindung mit CAD. *Konstruktion*, 1990 42. S. 305–311
- [91] Holliger, H.: Handbuch der Morphologie. Elementare Prinzipien und Methoden zur Lösung kreativer Probleme. Zürich: MIZ, 1972

- [92] Holliger, H.: Morphologie - Idee und Grundlage einer interdisziplinären Methodenlehre. Kommunikation 1 Bd. 1. Quickborn: Schnelle, 1970
- [93] Hopmann, C., Bastian, R., Karatzias, C., Greb, C. u. Ozolin, B.: Faserverstärkte Kunststoffe – tauglich für die Großserie. In: Siebenpfeiffer, W. (Hrsg.): Leichtbau-Technologien im Automobilbau: Werkstoffe - Fertigung - Konzepte. ATZ/MTZ-Fachbuch. 9783658040253. Springer Fachmedien Wiesbaden. 2013. S. 44ff
- [94] Hörsting, K.: Rationalisierung der Fertigung langfaserverstärkter Verbundwerkstoffe durch den Einsatz multiaxialer Gelege; Als Ms. gedr., Dissertation. Aachen, 1994
- [95] Hubka, V. u. Schregenberger, J. W.: Eine Ordnung konstruktionswissenschaftlicher Aussagen. VDI-Z, 1989 131. S. 33–36
- [96] ISO: International Organization for Standardization. About us. <http://www.iso.org/iso/home/about.htm>, abgerufen am: 01.06.2016
- [97] Jean, Hivet, G., Duong, A. V. u. Boisse, P.: Experimental analysis of the influence of tensions on in plane shear behaviour of woven composite reinforcements. Composites Science and Technology, 68, 2008 2. S. 506–515
- [98] Jin, R., Chen, W. u. Simpson, T. W.: Comparative studies of metamodelling techniques under multiple modelling criteria. Structural and multidisciplinary optimization, 23, 2001 1. S. 1–13
- [99] Johannaber, F. u. Michaeli, W.: Handbuch Spritzgießen. 9783446440982. München: Carl Hanser, 2004
- [100] Jung, A.: Technologische Gestaltbildung: Herstellung von Geometrie-, Stoff- und Zustandseigenschaften feinwerktechnischer Bauteile. Hochschultext. 9783642845895. Springer Berlin Heidelberg, 2013
- [101] K. Vanclooster, S.V. Lomov u. I. Verpoest: Experimental validation of forming simulations of fabric reinforced polymers using an unsymmetrical mould configuration. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 40, 2009 4. S. 530–539
- [102] Kalagnanam, J. R. u. Diwekar, U. M.: An efficient sampling technique for off-line quality control. Technometrics, 39, 1997 3. S. 308–319
- [103] Kalagnanam, J. R. u. Diwekar, U. M.: An efficient sampling technique for off-line quality control. Technometrics, 39, 1997 3. S. 308–319
- [104] Kang, T. J. u. Yu, W. R.: Drape Simulation of Woven Fabric by Using the Finite-element Method. The Journal of The Textile Institute, 86, 1995 4. S. 635–648
- [105] Karger-Kocsis, J.: Werkstoffe. In: Neitzel, M., Mitschang, P. u. Breuer, U. (Hrsg.): Handbuch Verbundwerkstoffe. Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung. 9783446436978. München: Carl Hanser. 2014

- [106] Kenkare, N. u. May-Plumlee, T.: Evaluation of drape characteristics in fabrics. *International Journal of Clothing Science and Technology*, 17, 2005 2. S. 109–123
- [107] Kesselring, F.: Technische Kompositionslehre. Anleitung zu technisch-wirtschaftlichem und verantwortungsbewußtem Schaffen. 978-3-642-92624-2. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1954
- [108] Keuerleber, M. u. Eyerer, P.: Gestalten, Fügen, Berechnungsansätze und Simulation EDV-unterstützter Konstruktionen und Auslegung von Kunststoffbauteilen. In: Eyerer, P., Hirth, T. u. Elsner, P. (Hrsg.): *Polymer Engineering: Technologien und Praxis*. VDI-Buch. 9783540724193. Springer Berlin Heidelberg. 2008. S. 466–544
- [109] Klein, B.: FEM: Grundlagen und Anwendungen der Finite-Element-Methode im Maschinen- und Fahrzeugbau. 9783658060541. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014
- [110] Klein, B.: Leichtbau-Konstruktion. Berechnungsgrundlagen und Gestaltung. SpringerLink : Bücher. 9783658022723. Wiesbaden, s.l.: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013
- [111] Klocke, M.: LANXESS Business Units – Energizing Chemistry. Introduction of Business Unit - High Performance Materials (HPM). Rüsselsheim, 2014
- [112] Klöppel, T., Liebold, C. u. Haufe, A.: Recent developments for process simulations of composite structures in LS-Dyna. Stuttgart, 2013
- [113] Klose, J.: Konstruktionsinformatik im Maschinenbau. 9783341007785. Berlin: Verl. Technik, 1990
- [114] Klußmann, N. u. Malik, A.: Lexikon der Luftfahrt. 9783662083697. Springer Berlin Heidelberg, 2013
- [115] Koller, R.: Konstruktionslehre für den Maschinenbau. Grundlagen zur Neu- und Weiterentwicklung technischer Produkte mit Beispielen. 978-3-642-80417-5. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1998
- [116] VDI 2222 Blatt 1; 1997-06. Konstruktionsmethodik - Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien
- [117] VDI 2225 Blatt 3; 1998-11. Konstruktionsmethodik - Technisch-wirtschaftliches Konstruieren - Technisch-wirtschaftliche Bewertung
- [118] VDI 2222 Blatt 2; 1982-02. Konstruktionsmethodik; Erstellung und Anwendung von Konstruktionskatalogen
- [119] Kopp, G., Burkardt, N. u. Majic, N.: Leichtbaustrategien und Bauweisen. In: Henning, F. u. Moeller, E. (Hrsg.): *Handbuch Leichtbau. Methoden, Werkstoffe, Fertigung*. 9783446422674. München: Carl Hanser. 2011. S. 57ff

- [120] Körwien, T.: Konfektionstechnisches Verfahren zur Herstellung von endkonturnahen textilen Vorformlingen zur Versteifung von Schalensegmenten, Universität Bremen Dissertation. Bremen, 2003
- [121] Krzywinski, S.: Verbindung von Design und Konstruktion in der textilen Konfektion unter Anwendung von CAE, Technische Universität Dresden Habilitation. Dresden, 2005
- [122] Ku, A.: Handbuch Faserverbundkunststoffe/Composites. Grundlagen, Verarbeitung, Anwendungen. 9783658027551. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014
- [123] Kurt, J., Busch, K. u. Busch, H.: Rechnerunterstützte Prinzipierarbeit in der Gerätekonstruktion. Feingerätetechnik, 1981 11. S. 490–492
- [124] Kwon, Y. W.: Multiscale and Multilevel Modeling of Composites. In: Kwon, Y., Allen, D. H. u. Talreja, R. R. (Hrsg.): Multiscale Modeling and Simulation of Composite Materials and Structures. 9780387363189. Springer US. 2007. S. 165–202
- [125] Ladevèze, P.: A Damage Mesomodel of Laminate Composites. In: Lemaitre, J. (Hrsg.): Handbook of Materials Behavior Models: Deformations of materials. Vol. I. 9780124433410. Academic Press. S. 1004–1013
- [126] Lamers, E., Wijskamp, S. u. Akkerman, R.: Modelling of fabric draping: Finite elements versus a geometrical method. In: Habraken, A. M., International Conference on Material Forming, Université de Liège, Université de Liège. Département de mécanique des structures et matériaux u. European Scientific Association for Material Forming (Hrsg.): Proceedings of the 4th International ESAFORM Conference on Material Forming. Belgium: University of Liège. 2001
- [127] Larson, E. R.: Thermoplastic Material Selection: A Practical Guide. Plastics Design Library. 9780323312653. Elsevier Science, 2015
- [128] Lilholt, H.: Strengthening and its mechanisms. In: Ochiai, S. (Hrsg.): Mechanical Properties of Metallic Composites. Materials Engineering. 9780824791162. Taylor & Francis. 1993. S. 389–472
- [129] Liu, L., Chen, J., Gorczyca, J. L. u. Sherwood, J. A.: Modeling of friction and shear in thermostamping of composites-Part II. Journal of Composite Materials, 38, 2004 21. S. 1931–1947
- [130] Liu, L., Chen, J., Li, X. u. Sherwood, J.: Two-dimensional macro-mechanics shear models of woven fabrics. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 36, 2005 1. S. 105–114
- [131] Keyword User's Manual. Volume II Material Models, LIVERMORE SOFTWARE TECHNOLOGY CORPORATION, Livermore, California

- [132] Lomov, S. V. u. Verpoest, I.: Model of shear of woven fabric and parametric description of shear resistance of glass woven reinforcements. *Composites Science and Technology*, 66, 2006 7. S. 919–933
- [133] Lomov, S. V., Willems, A., Verpoest, I., Zhu, Y., Barburski, M. u. Stoilova, T.: Picture frame test of woven composite reinforcements with a full-field strain registration. *Textile Research Journal*, 76, 2006 3. S. 243–252
- [134] Machado, M., Murenu, L., Fischlschweiger, M. u. Major, Z.: Analysis of the thermomechanical shear behaviour of woven-reinforced thermoplastic-matrix composites during forming. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 86, 2016. S. 39–48
- [135] Mayer, R. M.: *Design with Reinforced Plastics: A Guide for Engineers and Designers*. 9789401122108. Springer Netherlands, 2012
- [136] Menchawi, M. u. Almgren, L.: *Modeling of fiberglass reinforced epoxy composites in LS-Dyna*, Linköping University Masterarbeit. Linköping, 2014
- [137] Mercer-Management-Consulting: *Future automotive industry structure (FAST) 2015: die neue Arbeitsteilung in der Automobilindustrie ; eine Studie von Mercer-Management-Consulting in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA und dem Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik IML*. Materialien zur Automobilindustrie. VDA, 2004
- [138] VDI 2221; 1993-05. *Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte*
- [139] VDI 2223; 2004-01. *Methodisches Entwerfen technischer Produkte*
- [140] Michaeli, W.: *Entwicklung einer ingenieurgerechten Auslegungsstrategie für Bauteile aus Faserverbundkunststoffen anhand verschiedener Beispielbauteile*, RWTH Aachen Schlussbericht für den Zeitraum: 01.02.1998 bis 31.01.2000. Aachen, 2000
- [141] Michel, P.: Hybrid-Plus in Struktur-Leichtbauweise? *Lightweight Design*, 1, 2008 3. S. 42–46
- [142] Miller, E.: *Introduction to Plastics and Composites: Mechanical Properties and Engineering Applications*. Mechanical Engineering. 9780824796631. Taylor & Francis, 1995
- [143] Minitab Inc. 2016: *Minitab 17.0 Theory Manual*. , 2014
- [144] Mitschang, P., Arnold, M., Duhovic, M., Christmann, M., Hildebrandt, K., Maurer, D., Stadtfeld, H., Stöven, T., Weyrauch, F., Latrille, M., Louis, M., Neitzel, M. u. Beresheim, G.: *Grundlagen der Verarbeitungsprozesse*. In: Neitzel, M., Mitschang, P. u. Breuer, U. (Hrsg.): *Handbuch Verbundwerkstoffe. Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung*. 9783446436978. München: Carl Hanser. 2014. S. 201–275

- [145] Mountasir, A., Hoffmann, G., Cherif, C., Löser, M. u. Großmann, K.: Competitive manufacturing of 3D thermoplastic composite panels based on multi-layered woven structures for lightweight engineering. *Composite Structures*, 133, 2015. S. 415–424
- [146] Müller, J.: *Arbeitsmethoden der Technikwissenschaften: Systematik, Heuristik, Kreativität*. 9783642934421. Berlin Heidelberg: Springer, 2013
- [147] Müller, J.: Möglichkeiten und Ergebnisse der analytischen Darstellung konstruktiver Entwurfsprozesse im aktivitäts- und ereignisorientierten Graph. *Konstruktion*, 1989 41. S. 25–34
- [148] Müller, J.: *Grundlagen der systematischen Heuristik*. Berlin: Dietz, 1970
- [149] Nadler, G.: *Work Design*. Homewood, Illinois: Richard D. Irwin Inc., 1963
- [150] Nasdala, L.: *FEM-Formelsammlung Statik und Dynamik. Hintergrundinformationen, Tipps und Tricks*. Springer Vieweg. 9783834822604. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2012
- [151] Neitzel, M., Mitschang, P. u. Breuer, U. (Hrsg.): *Handbuch Verbundwerkstoffe. Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung*. 9783446436978. München: Carl Hanser, 2014
- [152] New Media Publisher GmbH: Georg Kaufmann: Serientaugliches Werkzeug für Faserverbundteile. Organoblech-Umformung mit Langfaser-Spritzgießen kombinieren, Kaarst 2013. [http://plasticker.de/Kunststoff\\_News\\_20304\\_Georg\\_Kaufmann\\_Serientaugliches\\_Werkzeug\\_fuer\\_Faserverbundteile?begriff=Serientaugliches%2BWerkzeug%2Bf%FCr%2BFaserverbundteile&div=n](http://plasticker.de/Kunststoff_News_20304_Georg_Kaufmann_Serientaugliches_Werkzeug_fuer_Faserverbundteile?begriff=Serientaugliches%2BWerkzeug%2Bf%FCr%2BFaserverbundteile&div=n), abgerufen am: 10.05.2016
- [153] Niemann, G., Winter, H. u. Höhn, B. R.: *Maschinenelemente: Band 1: Konstruktion und Berechnung von Verbindungen, Lagern, Wellen*. 9783662085202. Springer Berlin Heidelberg, 2013
- [154] Ogale, A., Weimer, C., Grieser, T. u. Mitschang, P.: Textile Halbzeuge. In: Neitzel, M., Mitschang, P. u. Breuer, U. (Hrsg.): *Handbuch Verbundwerkstoffe. Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung*. 9783446436978. München: Carl Hanser. 2014. S. 73–93
- [155] Okine, R. K.: Processing of Thermoplastic Matrix Composites. In: Mallick, P. K. (Hrsg.): *Composites Engineering Handbook. Materials Engineering*. 9780824793043. Taylor & Francis. 1997
- [156] Opitz, H. u. und andere: Die Konstruktion – ein Schwerpunkt der Rationalisierung. *Industrie Anzeiger* 93, 1971. S. 1491–1503
- [157] Orawattanasrikul, S.: Experimentelle Analyse der Scherdeformation biaxial verstärkter Mehrlagengestricke, TU Dresden Dissertation. Dresden, 2006
- [158] Orgéas, L., Dumont, P. u. Le Corre, S.: 5 - Rheology of Highly Concentrated Fiber Suspensions. In: Chinesta, F. u. Ausias, G. (Hrsg.): *Rheology of Non-Spherical Particle Suspensions*. 978-1-78548-036-2. Elsevier. 2015. S. 119–166



- [159] Osborne, J. W.: *Regression & Linear Modeling: Best Practices and Modern Methods*. 9781506302751. Sage Publications, 2016
- [160] Ostermann, F.: *Anwendungstechnologie Aluminium*. VDI-Buch. 9783662438077. Springer Berlin Heidelberg, 2015
- [161] Pahl, G.: *Konstruieren mit 3D-CAD-Systemen. Grundlagen, Arbeitstechnik, Anwendungen*. 978-3-642-47593-1. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1990
- [162] Perić, D. u. Owen, D. R.: Computational model for 3-D contact problems with friction based on the penalty method. *International journal for numerical methods in engineering*, 35, 1992 6. S. 1289–1309
- [163] Petrie, C. J.: The rheology of fibre suspensions. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 87, 1999 2–3. S. 369–402
- [164] Pickering, S. J.: Recycling technologies for thermoset composite materials—current status. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 37, 2006 8. S. 1206–1215
- [165] Pickett, A. K., Creech, G. u. de Luca, P.: Simplified and advanced simulation methods for prediction of fabric draping. *Revue Européenne des Éléments*, 14, 2005 6-7. S. 677–691
- [166] Potluri, P., Ciurezu, D. P. u. Ramgulam, R. B.: Measurement of meso-scale shear deformations for modelling textile composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 37, 2006 2. S. 303–314
- [167] Presse, G.: *Beitrag zum Aufbau und Einsatz von Katalogen für die Prinzipphase des konstruktiven Entwicklungsprozesses*, TU Dresden Dissertation. Dresden, 1978
- [168] Rasch, D. u. Schott, D.: *Mathematische Statistik: Für Mathematiker, Natur- und Ingenieurwissenschaftler*. 9783527692101. Wiley, 2015
- [169] VDI 2243; 2002-07. *Recyclingorientierte Produktentwicklung*
- [170] Riedel, H., Sun, D.-Z. u. Hiermaier, S. In: Henning, F. u. Moeller, E. (Hrsg.): *Handbuch Leichtbau. Methoden, Werkstoffe, Fertigung*. 9783446422674. München: Carl Hanser. 2011. S. 993–1040
- [171] Rosato, D. V. u. Rosato, M. G.: *Injection Molding Handbook*. 9781461545972. Springer US, 2012
- [172] Roscher, J.: *Bewertung von Flexibilitätsstrategien für die Endmontage in der Automobilindustrie*, Universität Stuttgart Dissertation. Stuttgart, 2007
- [173] Rösler, J., Harders, H. u. Bäker, M.: *Mechanisches Verhalten der Werkstoffe*. 9783834818188. Wiesbaden: Springer, 2012
- [174] Roth, K.-H.: *Konstruieren mit Konstruktionskatalogen. Band 1: Konstruktionslehre*. 978-3-642-17466-7. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2000

- [175] Roth, K.-H.: Modellbildung für das methodische Konstruieren ohne und mit Rechnerunterstützung (CAD). VDI-Z, 1986 128
- [176] Roth, K.-H.: Modellbildung für die Lösung konstruktiver Aufgaben mit Rechenanlagen. Konstruktion, 1984 36. S. 41–45
- [177] Roth, K.-H.: Verkürzung des Konstruktionsablaufs durch bestimmte Modellbildung beim rechnerunterstützten Konstruieren. VDI-Berichte, 1983 492. S. 79–87
- [178] Rude, S.: Rechnerunterstützte Gestaltfindung auf der Basis eines integrierten Produktmodells, Universität Karlsruhe Dissertation. Karlsruhe, 1991
- [179] Rust, W.: Nichtlineare Finite-Elemente-Berechnungen: Kontakt, Geometrie, Material. 9783835102323. Vieweg+Teubner, 2009
- [180] Saling, K.-H.: Prinzip- und Variantenkonstruktion in der Auftragsabwicklung. Voraussetzungen und Grundlagen. VDI-Berichte, 1970 152
- [181] Savransky, S. D.: Engineering of Creativity: Introduction to TRIZ Methodology of Inventive Problem Solving. 9781420038958. CRC Press, 2000
- [182] Schmidbauer, H.: Abwickelbare Flächen: Eine Konstruktionslehre für Praktiker. 9783642473531. Springer Berlin Heidelberg, 2013
- [183] Schmidt, H. G.: Heuristische Methoden als Hilfen zur Entscheidungsfindung beim Konzipieren technischer Produkte. Schriftenreihe Konstruktionstechnik. 9783798306974. Inst. für Maschinenkonstruktion, Konstruktionstechnik, 1980
- [184] Schröder, A.: DIN e. V. Über Normen und Standards. <http://www.din.de/de/ueber-normen-und-standards/din-norm>, abgerufen am: 01.06.2016
- [185] Schubert, J.: Physikalische Effekte. Anwendungen, Beschreibungen, Tabellen. 3-87664-082-2. Weinheim: Physik-Verl., 1984
- [186] Schulze, V. u. Klotz, S.: Trennen von faserverstärkten Kunststoffen. In: Spur, G. (Hrsg.): Handbuch Spanen und Abtragen. Editon Handbuch der Fertigungstechnik. 9783446436992. Carl Hanser. 2014. S. 1241–1251
- [187] Schürmann, H.: Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden. VDI-Buch. 9783540721901. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2007
- [188] Seeger, H.: Design technischer Produkte, Programme und Systeme. Anforderungen, Lösungen und Bewertungen. 9783662065587. Berlin, Heidelberg, s.l.: Springer Berlin Heidelberg, 1992
- [189] Shalin, R. E.: Polymer Matrix Composites. Soviet Advanced Composites Technology Series. 9789401105156. Springer Netherlands, 2012

- [190] Siebenpfeiffer, W. (Hrsg.): Leichtbau-Technologien im Automobilbau: Werkstoffe - Fertigung - Konzepte. ATZ/MTZ-Fachbuch. 9783658040253. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013
- [191] Siebertz, K., van Bebber, D. u. Hochkirchen, T.: Statistische Versuchsplanung: Design of Experiments (DoE). VDI-Buch. 9783642054938. Springer Berlin Heidelberg, 2010
- [192] Simpson, T. W., Lin, D. K. J. u. Chen, W.: Sampling strategies for computer experiments: design and analysis. International Journal of Reliability and Applications, 2, 2001 3. S. 209–240
- [193] Soldatos, K. P.: Accurate Stress Analysis of Laminated Composite Structures. In: Altenbach, H. u. Becker, W. (Hrsg.): Modern Trends in Composite Laminates Mechanics. International Centre for Mechanical Sciences, Courses and Lectures, Bd. 448. 978-3-7091-2544-1. Vienna, s.l.: Springer Vienna. 2003. S. 69–132
- [194] Sommer, M., Edelmann, K., Lahr, R. u. Hildebrandt, K.: Pressverfahren. In: Neitzel, M., Mitschang, P. u. Breuer, U. (Hrsg.): Handbuch Verbundwerkstoffe. Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung. 9783446436978. München: Carl Hanser. 2014. S. 383–432
- [195] Spur, G., Michaeli, W. u. Bührig-Polaczek, A.: Handbuch Urformen. Edition: Handbuch der Fertigungstechnik. 9783446434066. Carl Hanser, 2013
- [196] Stander, N.: LS-OPT User's Manual. Livermore Software Technology, 2011
- [197] Steinberg, P. u. Goßlau, D.: Kraftstoffverbrauch. In: van Basshuysen, R. u. Schäfer, F. (Hrsg.): Handbuch Verbrennungsmotor: Grundlagen, Komponenten, Systeme, Perspektiven. ATZ/MTZ-Fachbuch. 9783658046781. Springer Fachmedien Wiesbaden. 2014. S. 1013–1041
- [198] Ströhlein, T.: Volumetrische Erwärmung von Kohlenstofffaserhalbzeugen. DLR-FB-2012-07, TU Braunschweig Dissertation, 2012
- [199] Suykens, J.: Advances in Learning Theory: Methods, Models, and Applications. NATO science series: Computer and Systems Sciences. 9781586033415. IOS Press, 2003
- [200] DIN 60000; 1669.01.01. Textilien; Grundbegriffe
- [201] Tsai, S. W. u. Wu, E. M.: A general theory of strength for anisotropic materials. Journal of Composite Materials, 5, 1971 1. S. 58–80
- [202] Tschätsch, H. u. Dietrich, J.: Praxis der Umformtechnik: Arbeitsverfahren, Maschinen, Werkzeuge. Praxis : Fertigung. 9783834810137. Vieweg+Teubner, 2010
- [203] Tucker, C. L.: Flow regimes for fiber suspensions in narrow gaps. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 39, 1991 3. S. 239–268
- [204] Tutsch, R.: Fertigungs- und Qualitätsmesstechnik. In: Gevatter, H. J., Abel, H. B., Grünhaupt, U., Blume, H. J., Skabron, K., Beikirch, H., Boller, S., Frey, G., Kraft, D., Löhr, W. u. others

- (Hrsg.): Handbuch der Mess- und Automatisierungstechnik im Automobil: Fahrzeugelektronik, Fahrzeugmechatronik. VDI-Buch. 9783540299806. Springer Berlin Heidelberg. 2006. S. 197–362
- [205] Wallentowitz, H., Freialdenhoven, A. u. Olschewski, I.: Strategien in der Automobilindustrie: Technologietrends und Marktentwicklungen. ATZ/MTZ-Fachbuch. 9783834893116. Vieweg+Teubner, 2009
- [206] Wang, J.: Improved Fiber Orientation Predictions for Injection Molded Composites. 9780549463627. Illinois: University of Illinois at Urbana-Champaign, 2007
- [207] Wiedemann, J.: Leichtbau. Elemente und Konstruktion. Klassiker der Technik. 9783540336570. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2007
- [208] Wissmann, J. u. Sarnes, K. D.: Finite Elemente in der Strukturmechanik. 9783540292777. Springer Berlin Heidelberg, 2006
- [209] Yarlagadda, S., Kim, H. J., Gillespie, J. W., Shevchenko, N. B. u. Fink, B. K.: A study on the induction heating of conductive fiber reinforced composites. Journal of Composite Materials, 36, 2002 4. S. 401–421
- [210] Zhu, B., Yu, T. X. u. Tao, X. M.: An experimental study of in-plane large shear deformation of woven fabric composite. Composites Science and Technology, 67, 2007 2. S. 252–261