

# **Beitrag zur großserientauglichen Fertigung von thermoplastischen endlosfaserverstärkten Sandwichbauteilen**

## **Dissertation**

zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktoringenieur  
(Dr.-Ing.)**

von M.-Eng. Thomas Gläßer  
geb. am 09.07.1985 in Schkeuditz

genehmigt durch die Fakultät Maschinenbau  
der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. habil. Dr.h.c.mult. Holm Altenbach

Prof. Dr.-Ing. Ulf Breuer

Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Michel

Promotionskolloquium am 13.02.2023

Einreichungsdatum 26.10.2022

## **Abstract**

This thesis deals with the development of a manufacturing technology for the large-scale production of thermoplastic continuous fiber-reinforced sandwich components with an integrated honeycomb core. The starting point for the development work is the industrially available continuous fiber-reinforced semi-finished sandwich products, which have so far only been used in flat component applications due to a lack of processing options. This is based on highly developed thermoforming injection moulding technologies, which have been increasingly used in the large-scale production of FRP structural components made of organo sheets in recent years. As part of the work, a novel thermoforming process could be derived through systematic investigations of the processing behavior of the sandwich composites and the associated development work on the tool and system technology. In combination with injection moulding, this can also be implemented as a hybrid thermoforming injection moulding process, which enables the production of multidimensionally curved and ready-to-use functionalized FRP sandwich components at minute interval. One advantage of the hybrid processing approach developed is that the sandwich components functionalized by means of injection moulding can be produced from a fiber-reinforced plastic composite without additional material input. This enables that the produced FRP sandwich components can be produced in a material-efficient manner in accordance with the "lightweight construction" design philosophy and, based on closed recycling management models, can be optimally recycled after their service life.

## Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Entwicklung einer Fertigungstechnologie zur großserientauglichen Herstellung von thermoplastischen endlosfaserverstärkten Sandwichbauteilen mit integriertem Wabenkern. Ausgangspunkt der Entwicklungsarbeiten stellen die industriell verfügbaren endlosfaserverstärkten Sandwichhalbzeuge dar, die bislang aufgrund fehlender Verarbeitungsmöglichkeiten nur in ebenen Bauteilanwendungen zum Einsatz kommen. Dabei wird auf mittlerweile sehr hochentwickelten Thermoformspritzgusstechnologien aufgebaut, die in den letzten Jahren verstärkt zur Großserienproduktion von FKV-Strukturbauteilen aus Organoblechen eingesetzt wurden. Im Rahmen der Arbeit konnte durch systematische Untersuchungen des Verarbeitungsverhaltens der Sandwichverbunde sowie damit verbundener Entwicklungsarbeiten an der Werkzeug- und Anlagentechnik ein neuartiger Thermoformprozess hergeleitet werden. Dieser ist in Kombination mit Spritzgießen auch als hybrider Thermoformspritzgussprozess umsetzbar, was die Fertigung mehrdimensional gekrümmter sowie verwertungsfertig funktionalisierter FKV-Sandwichbauteile im Minutentakt ermöglicht. Ein Vorteil des entwickelten hybriden Verarbeitungsansatzes ist, dass die mittels Spritzgießens funktionalisierten Sandwichbauteile ohne zusätzlichen Materialeintrag sortenrein aus einem Faserkunststoffverbund herstellbar sind. Somit kann ermöglicht werden, dass sich die herstellbaren FKV-Sandwichbauteile entsprechend der Konstruktionsphilosophie „Leichtbau“ materialeffizient herstellen sowie angelehnt an geschlossene Kreislaufwirtschaftsmodelle nach ihrer Lebensdauer optimal wiederverwerten lassen.

# Inhaltsverzeichnis

Abstract .....	I
Kurzfassung .....	II
Inhaltsverzeichnis .....	III
Symbol- und Abkürzungsverzeichnis .....	VI
Symbole.....	VI
Abkürzungen.....	VIII
1    Einleitung .....	1
1.1    Einführung und Problemstellung.....	1
1.2    Zielsetzung und Aufbau der Arbeit.....	2
2    Faserverstärkte Sandwichstrukturen .....	3
2.1    Biegetheorie .....	4
2.2    FKV-Deckschichten .....	7
2.2.1    Thermoplastische Matrixmaterialien.....	7
2.2.2    Verstärkungsfasern.....	13
2.2.3    Thermoplastische Prepregs .....	14
2.3    Wabenkerne.....	18
3    Wärmetransfer.....	24
3.1    Thermodynamische Grundlagen .....	24
3.2    Wärmeübertragungsmechanismen.....	26
3.2.1    Konduktion .....	27
3.2.2    Konvektion.....	29
3.2.3    Wärmestrahlung .....	29
4    Thermoformen von Organoblechen.....	34
4.1    Allgemeine Grundlagen .....	34
4.2    Formgebungsmechanismen endlofaserverstärkter Thermoplaste .....	37
4.2.1    Fließphänomene .....	37
4.2.2    Phänomene im Feststoffanteil.....	39
4.3    Stempelformen von Organoblechen .....	43
4.3.1    Allgemeiner Prozessablauf .....	43
4.3.2    Transfer und Greiferelemente.....	44

---

4.3.3	Kraft- und Spannungsverhältnisse beim Ziehformen .....	45
4.4	Hybrides Thermoformspritzgießen mit Organoblechen.....	47
5	IR-Aufheizen von thermoplastischen FKV.....	50
5.1	IR-Strahlungsquellen.....	50
5.2	Aufbau von IR-Aufheizsystemen .....	51
5.3	Prozessführung.....	54
5.3.1	Einstufiges IR-Aufheizen.....	54
5.3.2	Einstufiges IR-Aufheizen mit zwischengeschalteter Abschirmphase.....	57
5.3.3	Heizonenregelung .....	59
5.4	Abluftsteuerung.....	62
6	Thermoformen von FKV-Sandwichverbunden.....	63
6.1	Stand der Technik .....	64
6.2	Thermisches Verhalten des Sandwichverbunds beim Thermoformen.....	66
6.3	Pressformen der Bauteilränder .....	69
6.4	Einachsiges Ziehformen mit vorgespanntem Sandwichzuschnitt .....	72
6.5	Zieh-Pressformen mit niedergehaltenem Sandwichzuschnitt .....	79
7	Thermoformspritzgießen von FKV-Sandwichbauteilen.....	91
7.1	Fertigungszyklus und Funktionalisierungsmöglichkeiten .....	91
7.1.1	Prozessschritte im Überblick .....	92
7.1.2	Spritzgießen von Randfunktionalisierungen.....	93
7.1.3	Verfahrensweg zum sortenreinen Thermoformspritzgießen.....	96
7.2	Werkzeugtechnik.....	99
7.2.1	Allgemeiner Werkzeugaufbau .....	99
7.2.2	Formsegmentierung und Rückstellmechanik .....	100
7.2.3	Poröse Formeinsätze und Vakuumverteiler .....	101
7.2.4	Niederhalter .....	102
7.2.5	Heißkanalverteiler und Auswerfer.....	104
7.3	Anlagentechnik.....	105
8	Zusammenfassung und Ausblick.....	106
	Literaturverzeichnis .....	108
	Abbildungsverzeichnis.....	113
	Tabellenverzeichnis.....	117

Anhang 1 .....	118
Anhang 2 .....	120
Anhang 3 .....	121
Anhang 4 .....	122
Verfahren zur Herstellung thermoplastischer Faserverbund-Sandwich-Formteile.....	122
Verfahren zur Herstellung eines Sandwich-paneels mit einem verstärkten Schaumstoffkern.....	122
Sandwichstruktur.....	123
Weitere Veröffentlichungen.....	125

# Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

## Symbole

Symbol	Bedeutung	SI-Einheit
$R$	Radius	mm
$U$	Umfang	mm
$A$	Flächeninhalt	mm <sup>2</sup>
$V$	Volumen	mm <sup>3</sup>
$F$	Kraft	N
$D$	Biegesteifigkeit	N/mm
$E$	E-Modul	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon$	Dehnung	mm
$G_k, G_c$	Schubmodul des Kerns	N/mm <sup>2</sup>
$h$	Höhe	mm
$d$	Abstand Deckschichtmittelpunkte	mm
$w_b$	Biegung	mm
$w_s$	Scherung	mm
$b$	Zuschnittbreite	mm
$P$	Leistung	W
$M$	Maximales Biegemoment	N*mm
MFR	Schmelze-Massefließrate	g/10min
$\Delta T$	Temperaturdifferenz	K
$\nabla T$	Temperaturgradient	K/m
$\eta$	Viskosität	Ns/m <sup>2</sup>
$p$	Druck	Pa; N/mm <sup>2</sup>
$\sigma$	Normalspannung	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_t$	Tangentialspannung	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_r$	Radialspannung	N/mm <sup>2</sup>
$\tau$	Schubspannung	N/mm <sup>2</sup>
$\alpha$	Wärmeleitfähigkeit	W/mK
$c$	Wärmekapazität	kJ/kgK
$\rho$	Dichte	kg/m <sup>3</sup>
$v$	spezifischen Volumen	m <sup>3</sup> /kg

$T_g$	Glasübergangstemperatur	°C
$T_s$	Kristallitschmelztemperatur	°C
$T_z$	Zersetzungstemperatur	°C
$T_k$	Kristallisationstemperatur	°C
$T$	Temperatur	°C
$\dot{Q}$	Wärmestrom	W
$\dot{q}$	Wärmestromdichte	W/m <sup>2</sup>
$u$	Inneren Energie	J
$\lambda$	Wellenlänge	µm
$f$	Frequenz	Hz
$l$	Oberflächenemissionsleistung	W/m <sup>3</sup>
$\theta$	Ausbreitungsgeschwindigkeit	km/h
$B$	Stefan-Boltzmann-Konstante	W/mK <sup>4</sup>
$J$	Radiosität	-
$E$	Emissionsgrad	-
$\Lambda$	Absorptionsgrad	-
$\Phi$	Transmissionsgrad	-
$\Psi$	Reflektionsgrad	-
$G_{ref}$	Reflektierter Anteil	-
$G_{abs}$	Absorbierter Anteil	-
$G_{tr}$	Transmittierter Anteil	-
$y(t)$	Temperaturregelgröße	°C
$e$	Temperaturdifferenzwert	-
$u_1(t)$	Stellgröße	-
$v_S$	Schließgeschwindigkeit	m/s
$v_R$	Rückstellgeschwindigkeit	m/s

## Abkürzungen

PWM	Pulsweitenmodulierte Signale
DSC	Differenzkalorimetrie
FKV	Faserkunststoffverbunde
Y	Pyrometer
D	Deckschichttemperatur
K	Kerntemperatur
SSR	Solid-State-Relais
IR	Infrarotstrahlung
PI	Potential-Integral
Talk	Talkum
GF	Glasfaser
Z	Heizzone
LFT	Langfaserverstärkte Thermoplaste
PA	Polyamid
PC	Polycarbonate
PEI	Polyethylenimin
PET	Polyethylenterephthalat
PP	Polypropylen
PUR	Polyurethane
PVC	Polyvinylchlorid
TSG	Thermoplastschaumspritzgießen
UD	Unidirektional

# 1 Einleitung

Forschung und Entwicklung sind in den letzten Jahren infolge globaler Probleme wie dem menschengemachten Klimawandel sowie den Folgen der Corona-Pandemie unter anderem auch mit Bezug auf Rohstoffknappheit und eingebrochenen Lieferketten wieder verstärkt in den internationalen Fokus von Wirtschaft und Politik gerückt. Hierzu ist hervorzuheben, dass bereits seit ca. zwei Jahrzehnten der Leichtbau eine von mehreren Schlüsseltechnologien ist, die am Industriestandort Deutschland unter anderem durch wissenschaftliche Fördermaßnahmen vorangetrieben wird, um den oben genannten und immer offensichtlicher werdenden globalen Problemen zu begegnen. Der Leichtbau ist eine Konstruktionsphilosophie, deren Zielsetzung die maximale Ressourceneffizienz, das Einsparen von Masse, Werkstoffen und somit auch von Energie zu deren Produktion bei gleicher oder besserer Funktionserfüllung auf Bauteil- oder Baugruppenebene ist. In Bezug auf den Klimawandel und der damit verbundenen Erderwärmung trägt der Leichtbau schon heute dazu bei, die mitverantwortlichen Treibhausgasemissionen im Transportwesen zu reduzieren sowie den aktuellen Umstieg im Mobilitätssektor auf klimaneutralere Technologien, wie z.B. Fahrzeuge mit Elektroantrieben, zu begünstigen. Auch moderne Konzepte zur regenerativen Stromerzeugung profitieren von den Entwicklungen rund um den Leichtbau. Hier werden beispielsweise die hoch belastbaren Rotorblätter moderner Windkraftanlagen aus endlosfaserverstärkten Faserkunststoffverbunden (FKV) hergestellt, die in der Vergangenheit lediglich in Leichtbauanwendungen wie der Luftfahrt zum Einsatz kamen [1][2].

## 1.1 Einführung und Problemstellung

Ein Optimum an Leichtbauperformance und damit einhergehender Materialeffizienz bietet bei der Umsetzung großflächiger Strukturbauteile die Sandwichbauweise. Die Sandwichbauweise bzw. damit verbundene Sandwichstrukturen basieren auf dem Einsatz von Schichtverbunden bestehend aus zwei hochfesten und hochsteifen Deckschichten sowie einem dazwischen gelagerten ausreichend schub- und druckstabilen Kern mit geringer Dichte [3][4]. Die ersten modernen Sandwichstrukturen lassen sich auf H. Junkers ins Jahr 1915 zurückführen. Dieser setzte zum Bau von Flugzeughohlflügeln erstmals Sandwichstrukturen aus metallischen Werkstoffen mit Wabenkern sowie zwei Blechdeckschichten ein [5]. Die von Junkers entwickelten metallischen Sandwichstrukturen sind dem Strukturleichtbau zuzuordnen. Heutzutage wird ein Großteil an Sandwichbauteilen nicht mehr nur aus einem Material, sondern aus verschiedenen Werkstoffen und überwiegend in Verbindung mit FKV-Deckschichten hergestellt. Bei dieser Art von Sandwichstrukturen werden die Prinzipien des Strukturleichtbaus mit denen des werkstofflichen Leichtbaus kombiniert [6].

Die bekanntesten und auch bislang bedeutendsten Sandwichverbunde zur Umsetzung maximaler Leichtbauperformance bestehen aus endlosfaserverstärkten FKV-Deckschichten aus Glas- oder Kohlenstofffasern, die mit Hilfe von duroplastischen Matrixkunststoffen hergestellt werden. Beim Kern wird je nach Anwendung und sekundären Anforderungen, wie Wärme- und/oder Schallisolation, auf Waben- oder Schaumkerne aber auch Holz zurückgegriffen. Endlosfaserverstärkte FKV-Sandwichstrukturen finden sich z.B. im Interieur und Exterieur von Flugzeugen, im hochpreisigen Sportequipment wie Ski, Snow- oder Surfboards sowie in Yachten innerhalb eines Decks oder Rumpfes wieder. In den genannten Branchen bzw. Anwendungsbereichen werden die Sandwichstrukturen bzw.

-bauteile in geringen bis mittleren Stückzahlen hergestellt. Die Herstellung erfolgt unter hohem zeitlichem Aufwand mit Hilfe manueller Arbeitsschritte, beispielsweise zum Drapieren des faserenthaltenden Deckschichtmaterials unter Einbringung des Kerns. Zudem müssen die geschichteten Sandwichkomponenten oftmals, wie z.B. beim Vakuuminfusionsverfahren, aufwendig in einem speziellen Vakuumaufbau aus unterschiedlichen Folien und technischen Textilien luftdicht verpackt werden, um ein Imprägnieren mit Matrixkunststoff sowie ein nachträgliches Aushärten des Sandwichverbundes realisieren zu können [6][7].

Der hohe Aufwand bei der Fertigung von FKV-Sandwichbauteilen wurde 1996 von H. Altenbach in [3] als ein wesentlicher Nachteil für den Einsatz von FKV-Sandwichbauweisen mit endlosfaserverstärkten Deckschichten erwähnt. Dies ist noch immer der Hauptgrund, warum endlosfaserverstärkte FKV-Sandwichstrukturen trotz ihrer hohen Leichtbauperformance nicht in Großserienanwendungen wie der Automobilindustrie etabliert sind. Diese Problemstellung greift die vorliegende Arbeit auf, die sich mit der Entwicklung einer großserientauglichen Fertigungstechnologie zur Herstellung von endlosfaserverstärkten Sandwichbauteilen befasst. Thematisch wird auf das Thermoformen von vorgefertigten endlosfaserverstärkten Sandwichverbundhalbzeugen mit thermoplastischen Matrixsystem aufgebaut, was z.B. von U. Breuer, M. Ostgathe und M. Neitzel in [8] beschrieben wird. Die Inhalte dieser Veröffentlichung sowie Weiteres zum Stand der Technik bezogen auf das Thermoformen von endlosfaserverstärkten Sandwichverbunden können im Abschnitt 6.1 nachvollzogen werden.

## 1.2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit

Die Zielsetzung der Arbeit besteht in einer Prozessentwicklung zur großserientauglichen Fertigung von endlosfaserverstärkten Sandwichbauteilen aus industriell verfügbaren plattenförmigen Sandwichhalbzeugen mit integriertem Wabenkern. Wie für Großserienanwendungen generell üblich, bestehen die zu verarbeitenden FKV-Sandwichhalbzeuge hinsichtlich des Matrixsystems aus thermoplastischem Kunststoff. Für die Entwicklung der Fertigungstechnologie und damit verbundene Untersuchungen zum Thermoformverhalten der Sandwichstruktur dienen die in Tabelle 4 (vgl. Abs. 6) aufgeführten Sandwichverbunde mit teilkristalliner Thermoplastmatrix aus Polypropylen sowie Endlosglasfasern. Das im Bearbeitungszeitraum der Arbeit untersuchte und für die Verarbeitung der FKV-Sandwichverbunde weiterentwickelte Fertigungskonzept basiert auf dem aktuellen Stand der Technik zum hybriden Thermoformspritzgießen von endlosfaserverstärkten Strukturbauteilen aus Organoblechen und kurzfaserverstärkten Thermoplasten (vgl. Abs. 4.5).

Die ersten vier Abschnitte der Arbeit beschäftigen sich mit den wissenschaftlichen Grundlagen sowie dem Stand der Technik, auf welchem die Entwicklungsarbeiten der vorliegenden Arbeit aufbauen. Diese verteilen sich entsprechend der gewählten Überschriften interdisziplinär auf mehrere wissenschaftliche Themengebiete. Auf für die Arbeit relevante Grundlagen der Gestaltung und des mechanischen Verhaltens von endlosfaserverstärkten Sandwichstrukturen sowie deren strukturellen Aufbau wird im 1. Abschnitt eingegangen. Seitens der Verfahrenstechnik basieren die Entwicklungsarbeiten überwiegend auf dem Stand der Technik des Thermoformens und Thermoformspritzgießens von Organoblechen, was im 3. Abschnitt beschrieben ist. Mit dem Thermoformen stehen generell thermodynamische Wechselwirkungen und Fragestellungen zum Wärmetransfer in Zusammenhang, die zuvor im 2. Abschnitt beschrieben sind. Der Abschnitt 5 beschäftigt sich anfänglich mit dem aktuellen Stand

der Technik des Infrarotstrahlungs- (IR-) Aufheizens von Organoblechen. Hier wird im zweiten Teil auf Untersuchungsergebnisse des IR-Aufheizens von FKV-Sandwichverbunden sowie auf Beschreibungen der weiterentwickelten Aufheiztechnologie für das IR-Aufheizen von ebenen Sandwichzuschnitten eingegangen. Im 6. Abschnitt werden anfänglich drei Verfahrenswege zur Fertigung thermoplastischer FKV-Sandwichstrukturen bzw. -bauteilen erläutert sowie dazu veröffentlichte wissenschaftliche Arbeiten bzw. Patente beschrieben. Anschließend werden eigene Untersuchungsergebnisse des Thermoformens von Sandwichverbunden mit besonderem Fokus auf die Formgebung diskutiert. Aus den in den Abschnitten 5 und 6 diskutierten Ergebnissen zum IR-Aufheizen und zur Formgebung thermoplastischer Sandwichverbunde wurde ein Thermoformprozess abgeleitet. Dieser kann, wie im 7. Abschnitt erläutert, im Rahmen eines hybriden Fertigungszyklusses mit dem Thermoplastspritzgießen kombiniert werden. Weiterführend werden im 7. Abschnitt am Beispiel eines generischen Versuchsbauteiles erste Möglichkeiten zum Spritzgussfunktionalisieren sowie ein Verfahrensweg zur nachhaltigen Produktion von FKV-Sandwichbauteilen aufgezeigt. Zudem werden Gestaltungshinweise zur entwickelten Werkzeugtechnik für den Fertigungsprozess diskutiert.

## 2 Faserverstärkte Sandwichstrukturen

Mit Sandwichverbunden lässt sich bei großflächigen Strukturbauteilen ein optimales Verhältnis von Biegesteifigkeit zum Bauteilgewicht erzielen. Sie werden vor allem dort eingesetzt, wo Bauteile vorwiegend auf Biegung beansprucht werden oder aufgrund von Beul- oder Knickgefährdung bestimmte Mindestwandstärken erforderlich sind. Hierfür besteht ein Sandwichverbund generell aus einem dreischichtigen Aufbau aus zwei dünnen Deckschichten, die von einer dickeren Stützstruktur mit geringer Dichte, dem Kern, auf Abstand gehalten werden. Die generell hoch festen und hoch steifen Deckschichten sind im Verbund stoffschlüssig mit der Ober- und Unterseite des Kerns verbunden. Der Kern wird im Sandwichverbund als größtenteils luftgefüllte Zwischenschicht z.B. als Schaum oder Wabenstruktur ausgeführt, woraus sich dessen geringe Dichte begründet und der Gewichtsvorteil bzw. die Materialeffizienz von Sandwichstrukturen resultiert. Der Stoffschluss zwischen den Deckschichten und dem Kern kann je nach Materialzusammensetzung geschweißt oder als adhäsive Klebeschicht ausgeführt sein und muss eine ausreichend schubfeste Verbindung im Schichtaufbau sicherstellen [3][4][6][9].

Die Wirkungsweise von Sandwichverbunden lässt sich weitestgehend mit der eines Doppel-T-Trägers vergleichen. In beiden Fällen wird eine hohe Biegesteifigkeit bei gleichzeitig geringem Materialeinsatz über einen zusammengesetzten Biegequerschnitt mit erhöhtem Widerstandsmoment hergeleitet. Dieser ist so aufgebaut, dass belastbares Material gezielt auf die stärker beanspruchten Randbereiche konzentriert ist und dass bei erhöhtem Abstand zur Biegemitte. D. h., vergleichend zum Doppel-T-Träger übernehmen die Deckschichten im biegebeanspruchten Sandwichverbund die Funktionen beider Flansche und dienen hier zur Aufnahme der kritischen Normalspannungen in den Randbereichen. Der Kern nimmt hingegen die über die Deckschichten eingeleiteten Querkraftschubbeanspruchungen auf und fungiert im Sandwich zudem als materialeinsparendes sowie distanzierendes Element, wie der Steg im Doppel-T-Träger. Im Gegensatz zur linienförmigen Stützwirkung eines Steges im Doppel-T-Träger erfolgt der Support beider Deckschichten durch den Kern im Sandwichverbund jedoch nahezu flächig. Hierbei wird die Materialeinsparung über ein zu den Deckschichten oftmals andersartiges Kernmaterial und einer damit verbundenen porösen Struktur realisiert. Der Kern weist zudem grundsätzlich

deutlich reduzierte Steifigkeits- und Festigkeitseigenschaften im Vergleich zu den Deckschichten auf. Die nachfolgende Abbildung 1 veranschaulicht schematisch die grundlegend wirkenden Hauptbeanspruchungsarten von Deckschichten und Kern innerhalb einer biegebeanspruchten Sandwichstruktur sowie eine ausgewählte Gestaltungsmöglichkeit für Sandwichbauteile [3][4].

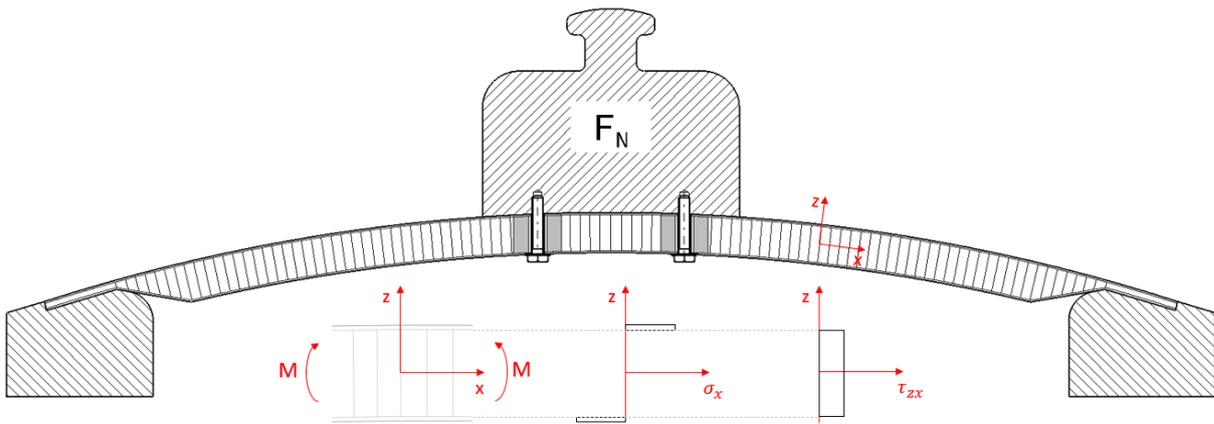


Abb. 1: Gestaltungsmöglichkeiten zur Sandwichbauweise und Spannungszustand im biegebeanspruchten Sandwichverbund

Die poröse, größtenteils luftgefüllte Kernschicht, die den Gewichtsvorteil bzw. die Materialeffizienz ermöglicht, stellt bei der Gestaltung und Fertigung von Sandwichbauteilen maßgeblich die größte Herausforderung dar. Zum Schutz des Kerns vor beispielsweise Feuchteintritt müssen die großflächig schalenförmigen Sandwichbauteile generell an den Bauteilrändern geschlossen werden. Je nach Anwendung werden die Deckschichten hierfür in den Randbereichen beispielsweise flach auslaufend zu einem kompakten Laminat zusammengeführt, was so auch als umlaufende Fügezone genutzt werden kann (vgl. Abb. 1). Zudem bedingt das lokale Einleiten von Lasten in die Sandwichstruktur Verbindungselemente, in denen der Kern eine erhöhte Dichte bzw. Druckstabilität aufweist. Hierfür kommen u.a. Methoden zum Einsatz, wobei der Kern lokal zwischen den Deckschichten mit einer Kunststoffmasse gefüllt wird. Je nach Lastfall und Stärke der Belastung werden in der Kunststofffüllmasse auch metallische Inserts in Form von profilierten Durchgangs- oder Gewindehülsen integriert [6][10]. Weitere Richtlinien bzw. Möglichkeiten, die bei der Gestaltung von Sandwichstrukturbauteilen zu berücksichtigen sind, sind ausführlich in beispielsweise [4][6] und [10] beschrieben.

## 2.1 Biegetheorie

Die nachfolgenden Erläuterungen zur Biegetheorie eines Sandwichverbundes unter linear elastischem Verhalten erfolgen nach den Ausführungen aus den Werken „The handbook of sandwich construction“ [4] und „An Introduction to Sandwich Structure“ [11] von D. Zenkert. Die hierbei aufgezeigten Sachverhalte beschränken sich auf grundlegende Ausführungen eines auf Biegung beanspruchten Sandwichbalkens. Wie in der Literatur von D. Zenkert sind alle mathematischen Formulierungen zur Berechnung der Biegesteifigkeiten und auftretenden Spannungen jeweils pro Einheitsbreite angegeben, da sich die Ausführungen auf einen einfachen Sandwichbalken mit einheitlicher Kern- und Deckschichtbreite reduziert. Die hier beschriebene Spannungsverteilung im auf Biegung beanspruchten Sandwichverbund (vgl. Abb. 2) trägt zum besseren Verständnis des im Abschnitt 6.4 und 6.5 erläuterten Verformungsverhalten von Sandwichverbunden beim Ziehformen bei.

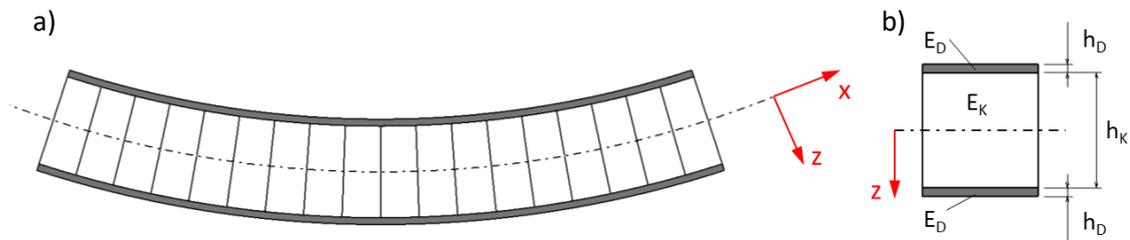


Abb. 2: Einachsige biegebeanspruchter Sandwichbalken (a) mit symmetrischem Querschnitt (b)

Zur Berechnung der Biegesteifigkeit  $D$  von Sandwichverbunden muss abweichend zur allgemeinen Balkentheorie mit isotropen Querschnitteigenschaften, welche hier aus dem Flächenträgheitsmoment  $I$  und dem E-Modul  $E$  gebildet werden, die Änderung des E-Moduls über dessen Dicke berücksichtigt werden. Die allgemeine Formel der Biegesteifigkeit  $D$  eines Sandwichverbunds ist daher wie folgt definiert.

$$D = \int E z^2 dz \quad \text{Gl.2.1.1}$$

Diese ersetzt den Steifigkeitsterm ( $I \cdot E$ ) vom isotropen Biegebalken, wie er beispielsweise zur Berechnung von Verformung eines biegebelasteten Doppel-T-Trägers gilt. Somit gilt für die Dehnung  $\varepsilon_x$  eines Sandwichbalkens, der dem Einfluss eines Biegemoments  $M_x$  ausgesetzt ist, die allgemeine Formulierung:

$$\varepsilon_x = \frac{M_x z}{D} \quad \text{Gl.2.1.2}$$

Die Dehnung  $\varepsilon_x$  steht hierbei im linearen Zusammenhang mit dem Abstand  $z$  zur Biegelinie. Für einen symmetrisch aufgebauten Sandwichverbund mit zwei gleich ausgeführten Deckschichten und einem einheitlich ausgeführten Kern kann die allgemeine Formulierung der Biegesteifigkeit aus Gleichung 2.1.1 wie folgt aufgelöst werden.

$$D = \frac{E_K \cdot h_K^3}{12} + \frac{E_D \cdot h_D^3}{6} + \frac{E_D \cdot h_D d^2}{2} = D_K + 2D_D + D_S \quad \text{Gl.2.1.3}$$

Diese Formulierung beinhaltet zwei Steifigkeitsterme: einen für den Kern  $D_K$  und einen für beide Deckschichten  $2D_D$  sowie den Steineranteil  $D_S$ , mit welchem der Abstand  $d$  der Flächenmittelpunkte beider Deckschichten zur Biegemitte berücksichtigt wird.  $E_D$  bzw.  $E_K$  stellen jeweils das E-Modul des Kerns sowie der Deckschichten dar und  $h_K$  bzw.  $h$  die zugehörige Höhe bzw. Dicke beider Verbundpartner. Unter der Voraussetzung, dass das E-Modul des Kerns  $E_K$  und die Dicke der Deckschichten  $h_D$  sehr viel kleiner sind, als die des jeweils anderen Verbundpartners ( $E_K \ll E_D$  und  $h_D \ll h_K$ ), können die beiden Steifigkeitsterme  $D_S$  und  $D_K$  aus Gleichung 2.1.3 zur vereinfachten Berechnung der Biegesteifigkeit  $D_0$  des Sandwichverbunds vernachlässigt werden (vgl. Gl.2.1.4).

$$D_0 = \frac{E_D \cdot h_D d^2}{2} \quad \text{Gl.2.1.4}$$

Die vereinfachte Biegesteifigkeit  $D_0$  verdeutlicht den beschriebenen Vergleich des Sandwichverbundes zum Doppel-T-Träger, wobei die Biegesteifigkeit maßgeblich über die normalbeanspruchten Randbereiche in den Deckschichten und deren Abstand zur Biegemitte bestimmt wird. Damit verbunden ist auch die Spannungsaufteilung von auf Biegung beanspruchten Sandwichverbunden. Unter der Berücksichtigung der allgemeinen Form der Dehnung aus Gleichung Gl.2.1.2 und der Bedingung  $E_K \ll E_D$  ergeben sich für die Spannungen im Kern und den Deckschichten folgende Zusammenhänge:

Normalspannungen:  $\sigma_D(z) \approx 0$   $\sigma_D = \frac{M_x z E_D}{(D_0 + 2D_D)}$

Schubspannungen:  $\tau_D(z) = \frac{T_x E_D h_D d}{2(D_0 + 2D_D)}$   $\tau_D(z) = \frac{T_x}{(D_0 + 2D_D)} \frac{E_D}{2} \left( \frac{h_K^2}{4} + h_K h_D + h_D^2 - z^2 \right)$

Diese vereinfachen sich nochmals, wenn neben der Bedingung eines weichen Kerns auch die Deckschichten im Verhältnis zur Kerndicke sehr dünn ausgeführt sind und  $E_K \ll E_D$  sowie  $h_D \ll h_K$  gleichermaßen zutrifft. Somit kann von folgender vereinfachter Spannungssituation ausgegangen werden:

Normalspannungen:  $\sigma_K(z) = 0$   $\sigma_D = \pm \frac{M_x}{h_D d}$

Schubspannungen:  $\tau_K(z) = \frac{T_x}{d}$   $\tau_D(z) = 0$

Damit wird deutlich, dass beide Deckschichten nahezu vollständig das Biegemoment intralaminar als Zug- bzw. Druckspannung  $\sigma_D$  übertragen. Der Kern dient hingegen zur Aufnahme der über die Deckschicht-Kern-Verbindung einwirkenden Querkraft bzw. der daraus resultierenden Querkraftschubspannungen  $\tau_K$ . Nachfolgend ist die Spannungsverteilung einer Sandwichstruktur unter Biegebeanspruchung sowie die nach Zerkert erläuterten Vereinfachungsgrade schematisch dargestellt.

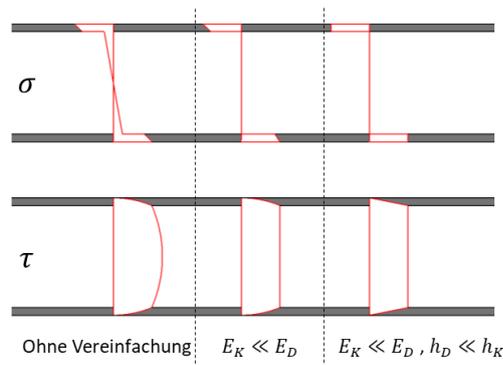


Abb. 3: Normal- und Schubspannungen des biegebeanspruchten Sandwichbalkens unter unterschiedlichen Abstraktionsstufen

Aus der dargestellten Beanspruchungssituation leitet sich auch die im biegebeanspruchten Sandwichbalken auftretende Gesamtverformung  $w$  ab. Diese setzt sich aus der Deformation infolge des einwirkenden Biegemoments  $w_b$  sowie der Scherverformung  $w_s$  zusammen, die vorrangig über die Querkraften beider Deckschichten in den Kern induziert wird (vgl. Abb 4).

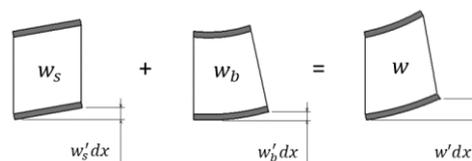


Abb. 4: Deformationen am biegebeanspruchten Sandwichbalken infolge Querkraftschub, Biegung und überlagerter Biege- Querkraftschubbeanspruchung

Im Umkehrschluss wird deutlich, dass die Antwort eines Sandwichbalkens im biegebeanspruchten Fall nicht nur von der deckschichtdominierten Biegesteifigkeit  $D$ , sondern auch von dessen Schubsteifigkeit  $S$  abhängt. Diese wird maßgeblich vom Kern bzw. dem Kernschubmodul  $G$  sowie der Kernhöhe  $t_K$  bestimmt [4][11].

## 2.2 FKV-Deckschichten

Wie im vorherigen Abschnitt erläutert, wirken die dünnen Deckschichten in den Randbereichen einer Sandwichstruktur als paarweise angeordnete Membranen und dienen hier im Belastungsfall vor allem zur Aufnahme intralaminar wirkender Normalspannungen. Daher müssen Deckschichtmaterialien höherbeanspruchter Sandwichstrukturen in erster Linie ausreichend hohe Steifigkeits- und Festigkeitskennwerte aufweisen. Neben den mechanischen Eigenschaften sind bei der Materialauswahl der Deckschichten aber auch andere Anforderungen wie Wärmefestigkeit, Witterungs- und Chemikalienbeständigkeit, Recyclbarkeit und nicht zuletzt die Verarbeitungseigenschaften zu berücksichtigen. Etablierte Deckschichtmaterialien sind sowohl metallische Werkstoffe wie Aluminium, Stahl oder Titan als auch nicht metallische Werkstoffe wie Kunststoff, Holz, Keramiken und letztlich Faserkunststoffverbunde (FKV) [4][10][12].

Die Materialklasse der FKV bzw. faserverstärkten Kunststoffe stellt im engeren Sinne kein Material dar, sondern ein Verbundsystem aus zwei Komponenten, den Fasern sowie der Matrix. Sehr allgemein formuliert liegen die Verstärkungsfasern eines FKV eingebettet in einer Matrix aus Kunststoff vor und dienen hier zur Aufnahme mechanischer Zug- und Druckspannungen. Das enthaltene Matrixmaterial ist im Verbund zuständig für den Zusammenhalt des Faserkunststoffverbundes und hat zudem einen erhöhten Einfluss auf die Beständigkeit des FKV gegen äußere Einflüsse, wie Feuchte oder UV-Strahlung. Neben den Fasern und der Matrix hat die Grenzfläche zwischen beiden Einzelkomponenten eine entscheidende Bedeutung für die mechanischen Eigenschaften des Gesamtverbunds [13][14]. Für die vorliegende Arbeit sind Deckschichtmaterialien aus endlosfaserverstärkten FKV mit thermoplastischen Matrixmaterialien relevant, auf welche im Folgenden eingegangen wird.

### 2.2.1 Thermoplastische Matrixmaterialien

Wohingegen in der Entstehungsgeschichte von faserverstärkten Laminat- und Sandwichbauteilen den duroplastischen Kunststoffen die größere Bedeutung zuzurechnen ist, steigt in den letzten Jahrzehnten die Nachfrage an thermoplastbasierten Faserverbundstrukturen und somit thermoplastischen Matrixmaterialien. Der Grund für die erhöhte Nachfrage ist der gestiegene Bedarf an Leichtbau bzw. materialeffizienten Bauweisen für Großserienanwendungen bzw. Massenmärkte. Hierfür bieten die thermoplastischen Kunststoffe signifikante Vorteile im Vergleich zu Duroplasten. Die bedeutendsten Vorteile sind:

1. eine hohe Verarbeitungsgeschwindigkeit
2. die Fähigkeit des Wiedererweichens bzw. Aufschmelzens
3. die daraus resultierende werkstoffliche Recyclebarkeit
4. eine nahezu unbegrenzte Lagerdauer der Halbzeuge

Die hohen Verarbeitungsgeschwindigkeiten der Thermoplaste sind für Großserienproduktionen von entscheidender Bedeutung, um bei der Bauteilherstellung geforderte Takt- bzw. Zykluszeiten, von teilweise wenigen Sekunden einhalten zu können. Gleichmaßen bedeutsam ist, dass thermoplastischer Kunststoff nach der Herstellung oder Erstverarbeitung wieder aufgeschmolzen werden kann. Die Wiederaufschmelzbarkeit ist für die Halbzeug- und Bauteilherstellung, die Anwendbarkeit von

Schweißprozessen für Füge- oder Reparaturarbeiten sowie für das stoffliche Recycling von ausgedienten Bauteilen oder dem Wiederverwerten von Fertigungsresten relevant. Die nahezu unbegrenzte Lagerfähigkeit thermoplastischer Halbzeuge erleichtert zudem logistische Prozesse innerhalb der Wertschöpfungsketten. Neben den verarbeitungsspezifischen Vorteilen weisen FKV mit thermoplastischen Matrizes auch Vorzüge in Bezug auf die Bauteilmechanik auf. Hier ist beispielsweise die hohe Schlagzähigkeit des thermoplastischen Kunststoffes zu nennen, die im allgemeinen zu größeren Schadenstoleranzen im FKV führt oder beispielsweise im Crashfall ein hohes Energieaufnahmevermögen bietet [12][14][15].

Die beschriebenen Vorteile von thermoplastischen Kunststoffen ergeben sich aus deren Mikrostruktur nach der Polymerherstellung, d.h. im chemisch vollkommen fertigungspolymerisierten Zustand. Diese setzt sich aus langkettigen, räumlich ineinander verschlauften Makromolekülen (Polymeren) zusammen, deren struktureller Zusammenhalt im Festkörperzustand ausschließlich auf Nebervalenzbindungen zurückzuführen ist. Im Gegensatz zu Duroplasten oder Elastomeren liegt hierbei keine räumliche Vernetzung in Form von chemischen Bindungen zwischen den einzelnen Polymerketten vor. Die Nebervalenzbindungen, allgemein auch als physikalische Bindungen bezeichnet, basieren lediglich auf elektrostatischen Anziehungskräften (Van-der-Wals-Kräften, Wasserstoffbrückenbindungen) zwischen den Makromolekülketten. Deren Wirkung bzw. Stärke ist von den Kettenabständen zwischen den Makromolekülen sowie von der vorherrschenden Temperatur abhängig. Unter Wärmeeintrag verringern sich die Nebervalenzbindungen bzw. gehen ab einer bestimmten Temperatur vollständig verloren, womit bei thermoplastischen Kunststoffen ein Phasenübergang vom festen Zustand zu einer hochviskosen Flüssigkeit verbunden ist. Das Nachlassen der Nebervalenzbindungen ist aufgrund erhöhter interstruktureller Molekularbewegung und somit größer werdenden Kettenabständen zwischen den Polymeren unter Wärmezufuhr zurückzuführen. Dies ermöglicht Verschiebungen bzw. Abgleitbewegungen zwischen den Polymerketten, was die Voraussetzung für den Schmelzezustand darstellt. Entgegengesetzt dazu erfolgt beim Abkühlen einer Thermoplastschmelze ein Erstarren der Makromoleküle, ein Verringern der Kettenabstände und somit das Verfestigen des thermoplastischen Kunststoffes. Beide Vorgänge sind, solange kein Kettenabbau infolge thermischer Überhitzung oder mechanisch zu hoher Scherkräfteinwirkung stattfindet, grundsätzlich reversibel [12][13][16][17].

Je nach Konstitution der Molekülketten können die Polymere beim Erstarren einerseits eine ausschließlich regellose, sogenannte amorphe Struktur ausbilden oder andererseits in einen Erstarrungszustand übergehen, der neben amorphen auch geordnete, kristalline Strukturbereiche aufweist. Kristalline Anordnungen bilden sich dort aus, wo die Makromoleküle weniger komplexverzweigte Kettenabschnitte aufweisen. Hier können die Polymere geringere Kettenabstände zueinander einnehmen, was mit höheren Nebervalenzkräften im Vergleich zu amorphen Strukturen bzw. Strukturbereichen verbunden ist. Nach beiden beschriebenen strukturellen Ordnungszuständen werden thermoplastische Kunststoffe in amorphe und teilkristalline Thermoplaste unterteilt [13][16][18].

In Abbildung 5 sind die bedeutendsten amorphen und teilkristallinen Thermoplaste aufgeführt und nach Weißbach et.al entsprechend der Wärmeformbeständigkeit den Hochtemperatur-, technischen und Standardkunststoffen zugeordnet. Aufgrund ihres höherwertigeren mechanischen Eigenschaftsprofils kommen vorwiegend teilkristalline Thermoplaste als Matrixsystem im FKV zum Einsatz. Hier ist hinsichtlich der kostengünstigen Standardkunststoffe für Massenanwendungen insbesondere

das isotaktische Polypropylen (PP) und bei den technischen Kunststoffen Polyamid (PA) sowie Polyethylenterephthalat (PET) zu nennen. Relevant für den Luft- und Raumfahrtsektor sind Hochtemperatur- bzw. Hochleistungsthermoplaste wie beispielsweise Polyphenylensulfid (PPS) oder Polyetheretherketon (PEEK). Aber auch amorphe Thermoplaste wie beispielsweise Polycarbonat (PC) oder Polyetherimid (PEI) werden als Matrixpolymer für FKV-Bauteile in Anwendungsbereichen verwendet, wo z. B. erhöhte Brandschutzverordnungen gelten oder eine höhere Wärmeformbeständigkeit gefordert ist [13][16][17].

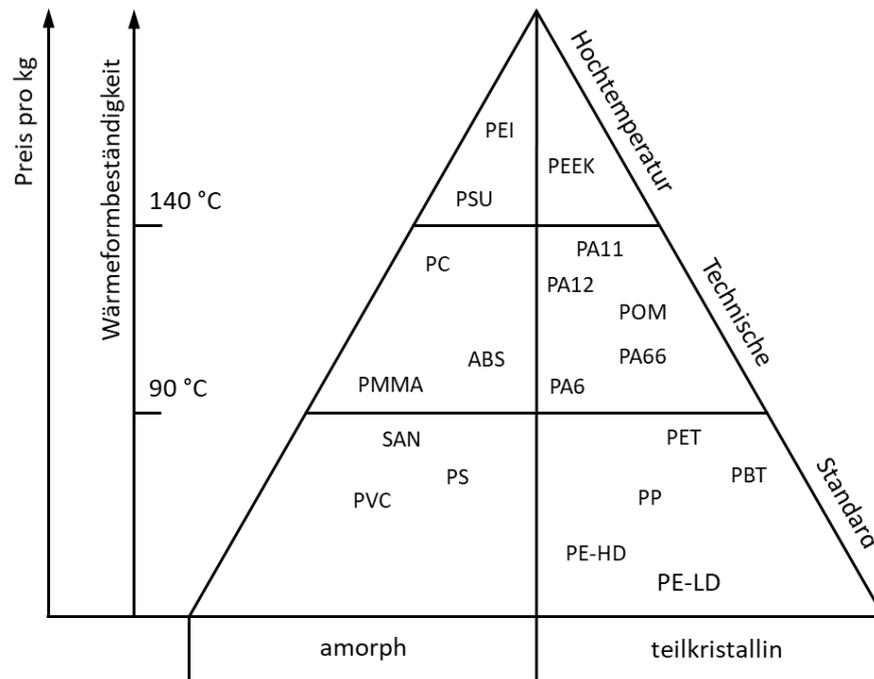


Abb. 5: Aufteilung von thermoplastischen Kunststoffen nach [17]

Alle Thermoplaste weisen grundsätzlich einen eingeschränkten Einsatztemperaturbereich auf, wobei sie unterhalb dessen verspröden oder oberhalb deutlich an Festigkeit verlieren. Des Weiteren können sowohl amorphe als auch teilkristalline Thermoplaste bei ausreichend Wärmeeintrag plastisch warmumgeformt werden bzw. gehen, wie bereits erwähnt, ab bestimmten Temperaturen in einen urformbaren Schmelzzustand über [16][19].

Ab der Glasübergangstemperatur  $T_G$  bis zum viskosen Schmelzzustand unterscheidet sich das thermomechanische Verhalten amorpher und teilkristalliner Thermoplaste deutlich voneinander. Dies ist auf den Unterschied im Ordnungszustand zurückzuführen sowie auf den Aspekt, dass amorphe Strukturen bzw. Strukturabschnitte bereits oberhalb von  $T_G$  Kettenverschiebungen zulassen. In der folgenden Abbildung 6 ist das thermomechanische Verhalten von, den für die vorliegende Arbeit relevanten, teilkristallinen Thermoplasten anhand der Bruchspannung  $\sigma_B$  und Bruchdehnung  $\varepsilon_B$  in Abhängigkeit zur Temperatur schematisch veranschaulicht.

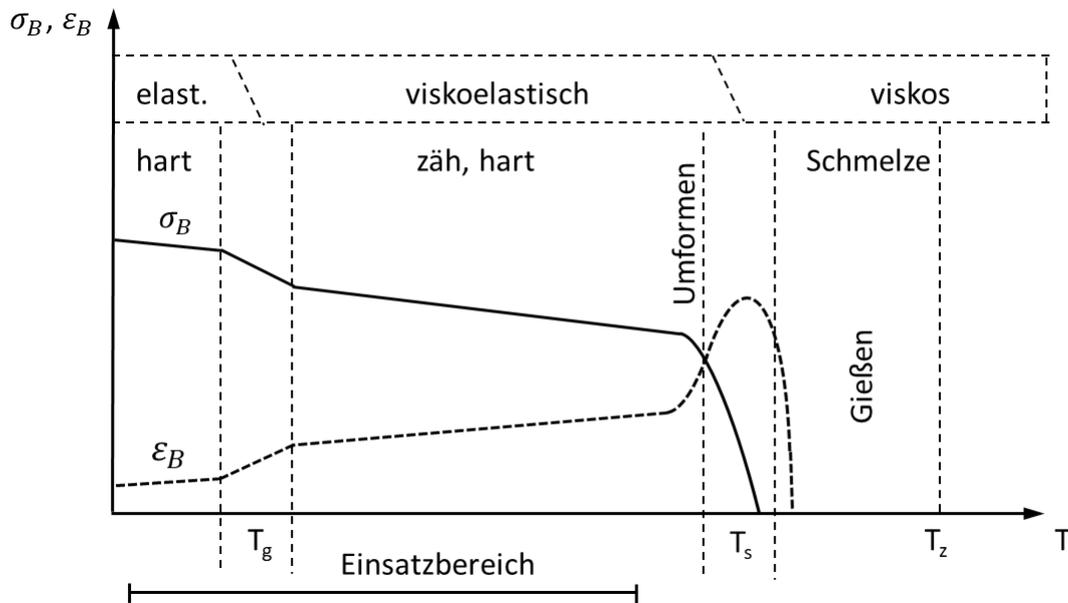


Abb. 6: Bruchspannung  $\sigma_B$  und Bruchdehnung  $\varepsilon_B$  von teilkristallinen Thermoplasten in Abhängigkeit zur Temperatur [17]

Teilkristalline Thermoplaste kommen für gewöhnlich oberhalb von  $T_G$  zum Einsatz. Sie sind hier zäh-hart und verhalten sich unter Last viskoelastisch. Der viskose Materialcharakter ist auf die amorphen Materialbereiche zurückzuführen, die oberhalb der Glasübergangstemperatur  $T_G$  bereits einen viskosen Zustand aufweisen. Der Zusammenhalt bzw. die höheren Festigkeitseigenschaften von teilkristallinen Thermoplasten sind im Einsatztemperaturbereich auf die kristallinen Strukturanteile zurückzuführen. Ein Erweichen der Kristallite erfolgt unter Temperaturerhöhung erst kurz vor  $T_S$  in einem vergleichsweise engen Temperaturbereich. Hier sind teilkristalline Thermoplaste plastisch warmumformbar. Auch der Phasenübergang zur Schmelze erfolgt in einem kurzen Temperaturintervall nahe der Schmelztemperatur  $T_S$  [16][17]. Diese wird aufgrund des Auflösens der kristallinen Strukturbereiche auch als Kristallitschmelztemperatur bezeichnet. Entsprechend umgekehrt zum Aufschmelzen erfolgt das Erstarren, was mit Rekristallisationsvorgängen zwischen den Makromolekülen verbunden ist. Die Rekristallisation geht abhängig von der Abkühlgeschwindigkeit ebenfalls in einem vergleichsweise engen Temperaturbereich vonstatten. Beide Phasenübergangsbereiche sowie die Schmelz- und Rekristallisationstemperatur lassen sich für teilkristalline Thermoplaste mittels dynamischer Differenzkalorimetrie (DSC) eindeutig ermitteln. Sie drücken sich im Kurvenverlauf einer DSC-Messung als endothermer Wärmepic um die Kristallitschmelztemperatur und als exothermer Wärmepic bei der Rekristallisationstemperatur aus [20]. Die bis hierhin beschriebenen Grundlagen zum thermischen und thermomechanischen Verhalten der Thermoplaste sind insbesondere für das in Abschnitt 6.2 beschriebene thermische Verhalten von FKV-Sandwichverbunden beim Thermiformen relevant. Die nachfolgende Abbildung veranschaulicht das Ergebnis einer DSC-Messung am Deckschichtmaterial des Sandwichverbunds TS1 (vgl. Tab. 4)

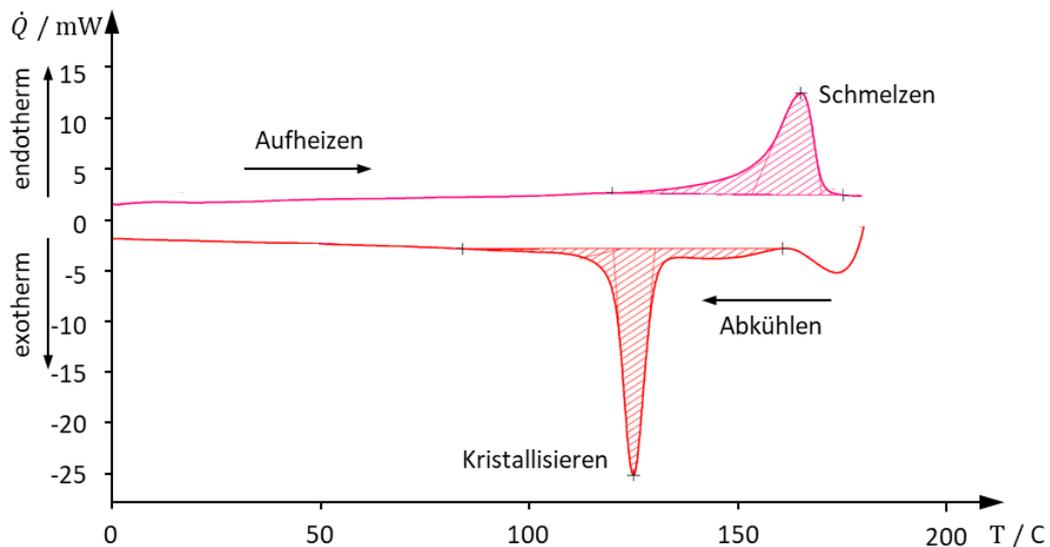


Abb. 7: DSC-Verlauf von Polypropylen

Temperaturwechsel vom Einsatztemperaturbereich bis in den Schmelzbereich bzw. umgekehrt, wie sie in der Thermoplastverarbeitung generell bzw. beim Thermoformen bzw. Thermoformspritzgießen von thermoplastischen FKV-Bauteilen auftreten (vgl. Abs. 4), gehen grundsätzlich mit größeren Veränderungen des spezifischen Volumens bzw. der Dichte der Thermoplastmatrix einher. Hierbei erfolgt unter Wärmezufuhr ein Ausdehnen und beim Abkühlen ein Kontrahieren vom Thermoplast, wobei die Kontraktion nach der Fertigung als Schwindung bezeichnet wird. Schwindung tritt als Verarbeitungs- und Nachschwindung auf und kann in beiden Fällen zu ungleichmäßigen Eigenspannungen im Material und somit zum unerwünschten Bauteilverzug führen.

Im Vergleich zu amorphen Thermoplasten weisen teilkristalline Thermoplaste eine besonders ausgeprägte Verarbeitungsschwindung, d.h. eine starke Verringerung des spezifischen Volumens, beim Phasenübergang der Schmelze zum Festkörper auf. Zurückzuführen ist dies auf das Bilden der kristallinen Strukturbereiche, in welchen die Makromoleküle im Festkörperzustand sehr geringe Kettenabstände zueinander aufweisen und somit deutlich weniger Raum in Anspruch nehmen. Die folgende Abbildung 8 veranschaulicht die Verringerung des spezifischen Volumens von teilkristallinen Thermoplasten beim Abkühlen aus dem Schmelzestadium bis in den Einsatztemperaturbereich.

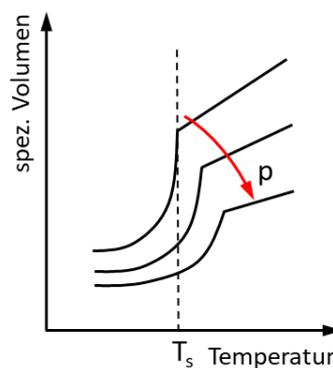


Abb. 8: Veränderung des spezifischen Volumens von teilkristallinen Thermoplasten in Abhängigkeit zur Temperatur und zum Verarbeitungsdruck [17]

Zudem verdeutlichen die jeweils drei Kurvenverläufe das kompressible Verhalten der Thermoplastschmelze. Dieses bietet die Möglichkeit, durch erhöhten Verarbeitungsdruck den volumetrischen Schwund eines Bauteils beim Erstarren zu verringern. Neben den thermomechanischen Zustandsgrößen kann das Schwindungsverhalten teilkristalliner Thermoplaste auch durch die Abkühlgeschwindigkeit sowie durch Einbringen von Zusatzstoffen wie Fasern oder Talkum beeinflusst werden [17][18].

Die Fließfähigkeit der Thermoplastschmelze ist mit vergleichsweise hohen Viskositätswerten aufgrund der enthaltenen langkettigen Makromoleküle verbunden. Durch deren steigende Beweglichkeit unter Temperaturerhöhung kann die Schmelzeviskosität in einem nach oben hin von der Zersetzungstemperatur  $T_z$  eingeschränkten Temperaturspektrum durch Einbringen von thermischer Energie verringert werden. Neben der Temperaturabhängigkeit weisen die Fließeigenschaften von Thermoplastschmelzen unter Strömungsbedingungen zudem eine Abhängigkeit zu im Fluid auftretenden Scherspannungen auf. Hier verhält sich die Schmelzeviskosität degressiv bei Erhöhung der Schergeschwindigkeit. D.h., bei gleicher Temperatur nimmt die Viskosität einer Thermoplastschmelze unter erhöhten Schergeschwindigkeiten ab, was mit der Streckung der Polymerketten in Scherrichtung zusammenhängt und als strukturviskoses Fließverhalten bezeichnet wird. Dieses Verhalten begünstigt z.B. das Spritzgießen komplexer Strukturen mit langen Fließwegen. Lediglich unter geringen Schergeschwindigkeiten, wie es beim Thermoformen der Fall ist, weisen Thermoplastschmelzen oftmals auch ein newtonsches Fließverhalten auf (vgl. Abb. 9) [16][18][20].

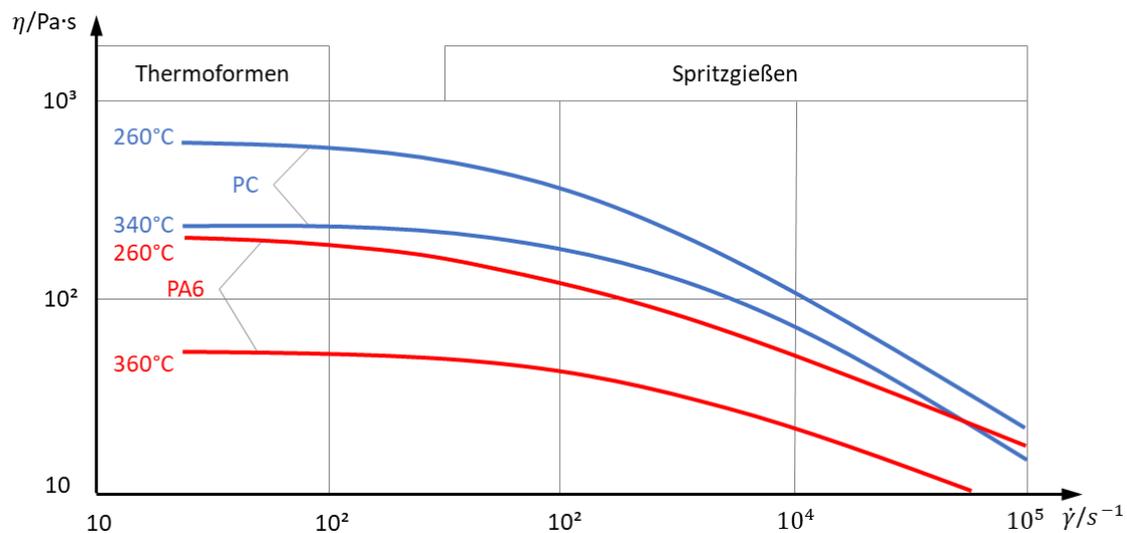


Abb. 9: Schmelzeviskosität von Polyamid 6 und Polycarbonat in Abhängigkeit zur Schergeschwindigkeit für unterschiedliche Schmelztemperaturen [18]

Für die Möglichkeit des Einstellens des in Abschnitt 5.3.2 beschriebenen thermischen Zustands im Sandwichverbund bzw. am Sandwichzuschnitt sind die thermischen Eigenschaften, d.h. die hohe Wärmekapazität sowie die geringe Wärmeleitfähigkeit der Thermoplaste von entscheidender Bedeutung. Beide thermischen Eigenschaftsgrößen sind in Tabelle 1 für Polypropylen und Polycarbonat im Vergleich zu denen von Stahl und Aluminium aufgeführt. Ebenfalls aufgeführt ist die jeweilige Dichte aller vier Werkstoffe [20].

Tabelle 1: Materialeigenschaften unterschiedlicher metallischer und thermoplastischer Werkstoffe

	Metalle	Thermoplaste
Wärmeleitfähigkeit $\alpha$ [W/mK]	St: 50; Al: 230	PP: 0,22 PC: 0,21
Wärmekapazität $c$ [kJ/kgK]	St: 0,43; Al: 0,896	PP: 1,7 PC: 1,17
Dichte $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	St: 7,87; Al: 2,7	PP: 0,9 PC 1,2

Für das Thermoformen bzw. das in Abschnitt 5 beschriebene IR-Aufheizen von endlosfaserverstärkten Thermoplasten sowie FKV-Sandwichverbunden ist zudem das besondere Reflexions-, Transmissions- und Absorptionsverhalten für mittelwellige Infrarotstrahlung von thermoplastischen Kunststoffen relevant. Hier verdeutlichen Reflexionsmessungen von Pühringer und Zitzenbacher in [21] mit unter anderen Polypropylen die sehr hohe absorbierende und somit sehr geringe reflektierende Wirkung von Thermoplastoberflächen. Typische Reflektionswerte von thermoplastischen Oberflächen, die für einen Wellenlängenbereich von 2 bis 8  $\mu\text{m}$  ermittelt wurden, liegen demnach bei ca. 3-5%. Des Weiteren sind in [21] aus Reflexions- und Transmissionsmessungen berechnete Werte für die Eindringtiefe der IR-Strahlung für Polypropylen bekannt. Die Eindringtiefe der IR-Strahlung in Polypropylen liegt demnach für einen großen Teil der elektromagnetischen Wellen im untersuchten Strahlungsspektrum zwischen 0,6 und 0,8 mm.

### 2.2.2 Verstärkungsfasern

Verstärkungsfasern dienen im Belastungsfall innerhalb eines FKV in erster Linie der Aufnahme und Übertragung von mechanischen Beanspruchungen. Dieser Aspekt bedingt, dass die mechanischen Kennwerte von Fasermaterialien wie das E-Modul oder die Festigkeit in der Regel um ein Vielfaches höher sind, als die von Matrixkunststoffen. Aber auch die Wärmeformbeständigkeit sowie die Zersetzungstemperatur von Fasermaterialien liegen deutlich über den Kennwerten der Matrix, was im Besonderen für die Verarbeitung thermoplastischer FKV relevant ist. Im engeren Sinne wird die Belastbarkeit und Verarbeitbarkeit eines FKV neben dem Fasermaterial aber auch von der Länge der Fasern sowie deren Positionierung im Verbundsystem bestimmt, worauf im folgenden Abschnitt 2.2.3 genauer eingegangen wird [14][22].

Als Verstärkungsfasern von Deckschichten hochbelastbarer FKV-Sandwichverbunde kommen üblicherweise künstlich gewonnene Verstärkungsfasern aus Glas, Kohlenstoff oder Aramid zum Einsatz. Künstliche Fasern werden als kontinuierliche Filamente mit wenigen Mikrometern Durchmesser hergestellt und als aufgespultes Faserbündel bzw. Faseroving bei der Verbundherstellung weiterverarbeitet. Neben künstlich hergestellten Fasern werden im FKV aber auch Naturfasern aus beispielsweise Holz, Hanf

oder Flachs sowie Metallfasern aus Stahl- oder Aluminium eingesetzt. Die folgende Tabelle veranschaulicht, die wichtigsten Kennwerte künstlich hergestellter Fasermaterialien im Vergleich zu Stahl [6][14][23][24].

Tabelle 2: Ausgewählte Fasermaterialien und deren Materialeigenschaften [14]

Material	E-Modul [GPa]	Zugfestigkeit [GPa]	Dehnung [%]	Dichte [g/ cm <sup>3</sup> ]	T <sub>max</sub> [°C]
Stahl	200	2,8	4,8	7,8	1000
S-Glas	90	4,5	5,7	2,46	250 – 300
E-Glas	80	3,5	4	2,54	300 – 350
Kohlenstoff	240	3,75	1,6	1,78	500
Kohlenstoff	800	3,5	0,4	2,15	600
Aramid	135	3,5	2,8	1,45	250 – 300

Obwohl Verstärkungsfasern aus verarbeitungstechnischer Sicht als nicht dehnbar gelten, sind die mechanischen Kennwerte der Fasern neben der mechanischen Bauteilauslegung auch für verarbeitungsspezifische Fragestellungen relevant. Hier muss z.B. deren eingeschränkte Dehnbarkeit, insbesondere die von Kohlenstoff- bzw. Carbonfasern, bei der Auslegung von kleinen Krümmungsradien am herzustellen Bauteil berücksichtigt werden [14][23]. Hinsichtlich der Faserlängen sind Verstärkungsfasern drei Kategorien zugeordnet. Zum Ersten den Kurzfasern, die im Verbund mit einer Länge kleiner als 4,5mm vorliegen, zum Zweiten Langfasern die Faserlängen zwischen 4,5 bis 40mm aufweisen und drittens Endlosfasern die grundsätzlich länger als 40 mm sind bzw. die in annähernd gestreckter Form ein Bauteil vollständig durchlaufen. Mit steigender oder abnehmender Faserlänge ergibt sich für die mechanische Performance sowie für die realisierbare Bauteilkomplexität ein gegensätzlicher Zusammenhang, was im folgenden Abschnitt anfänglich thematisiert wird [14][18].

### 2.2.3 Thermoplastische Prepregs

Unter einen Prepreg versteht man ein flächiges Halbzeug, in dem Endlosfasern vorimprägniert im Matrixsystem vorliegen. Prepregs werden hergestellt, um die Bauteilfertigung im Vergleich zum ursprünglichen Laminieren von FKV-Strukturen mit trockenen Fasern bzw. daraus gewonnenen trockenen Textilien zu begünstigen. Das Verarbeiten von Prepregs ist auf den ursprünglichen Faserverbundleichtbau mit duroplastischen Matrixkunststoffen beim Bau von Passagierflugzeugen zurückzuführen. Mittlerweile hat sich aber auch bei der Großserienproduktion von endlosfaserverstärkten Strukturbauteilen der Einsatz von vorimprägnierten thermoplastischen Prepregs bewährt. Hierfür gibt es eine Vielzahl an Varianten, wobei die relevantesten endlosfaserenthaltenden thermoplastischen Prepregs Wirrfasermatten, UD-Tapes und Gewebe sowie daraus hergestellte mehrschichtige Organobleche sind [13][14].

Für massentaugliche Leichtbauanwendungen sind neben den endlosfaserenthaltenden Prepregs auch kurz- und langfaserverstärkte Thermoplaste relevant, die für die Bauteilfertigung als Granulat verfügbar sind. Kurz- und langfaserverstärkte FKV-Systeme enthalten überwiegend im niedrigen Millimeterbereich lange Fasern, weshalb sie lediglich eine leichte bis mittlere Belastbarkeit aufweisen. Die Limitation der mechanischen Eigenschaften von kurz- und langfaserverstärkten Thermoplasten ist zudem auf deren vergleichsweise geringe Faservolumenanteile zurückzuführen. Diese liegen in der Regel bei ca. 10 bis maximal 40%, um eine ausreichend gute Fließfähigkeit des Verbunds zur Fertigung komplexer Bauteilformen in Spritz- oder Fließpressprozessen sicherzustellen. Abbildung 10 fasst die für Großserienanwendungen relevantesten vorimprägnierten Verbundsysteme zusammen. Hier ist zudem der Zusammenhang veranschaulicht, dass mit steigender Faserlänge und höherem Faservolumengehalt höhere mechanische Eigenschaften im FKV erzielbar sind, was zugleich mit einer Reduzierung der Formfreiheit zur Bauteilgestaltung einher geht [14][24].

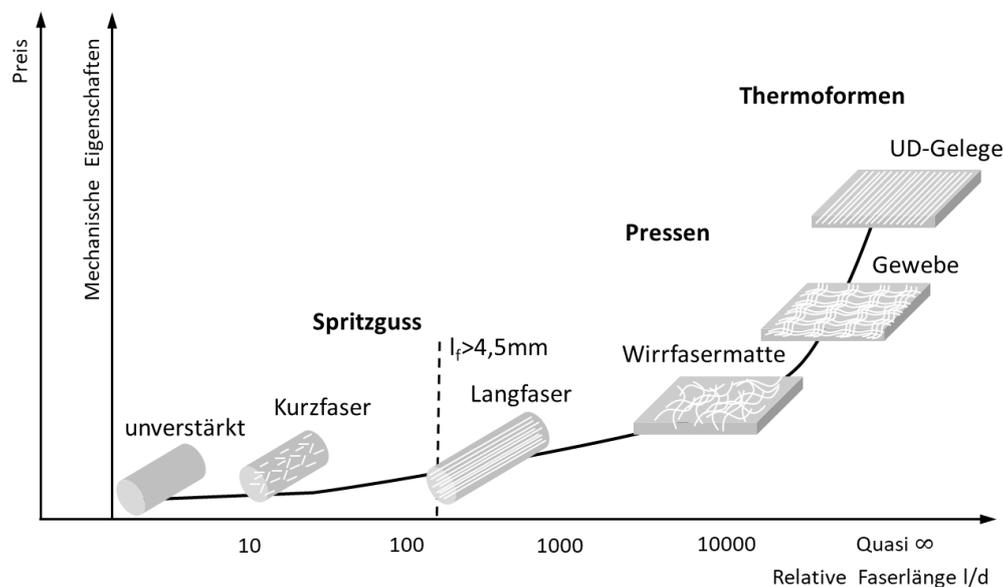


Abb. 10: Thermoplastische FKV-Systeme sowie der Zusammenhang von den mechanischen Eigenschaften zur Faserlänge in Anlehnung an [24]

Bei Organoblechen haben die Faserverläufe bzw. die Anordnung der Endlosfasern im FKV sowohl direkten als auch indirekten Einfluss auf dessen mechanische Performance. Der indirekte Einfluss begründet sich darin, dass mit steigender Geradlinigkeit in den Faserverläufen die Endlosfasern mit höherer Packungsdichte imprägniert werden können. Das bedeutet, dass über gestrecktere Fasern höhere Faservolumenanteile und somit grundsätzlich höhere mechanische Steifigkeits- und Festigkeitskennwerte im FKV erzielbar sind. Der direkte Einfluss der Faserverläufe auf die Verbundmechanik bezieht sich auf mögliche Relaxationseffekte der Endlosfasern im vergleichsweise weichen Thermoplast bei Lastangriff. Hier gewährleisten gestrecktere Endlosfasern bei Lastangriff einen direkteren Kraftfluss, weshalb die mechanische Performance, wie in Abbildung 10 dargestellt, von wirren Faserstrukturen, über Gewebe mit leichten Faserondulationen, bis hin zu unidirektionalen Faseranordnungen zunimmt. Dies begünstigt neben dem E-Modul des FKV insbesondere dessen Dauerfestigkeit bei wechselnder bzw. dynamischer Belastung. Der Nachteil der durchgängigen Faserverläufe sowie der hohen Faservolumenanteile ist, dass UD-Gelege und gewebeverstärkte Organobleche keine

Fließfähigkeit aufweisen. Daher können diese, wie im Abschnitt 6 erläutert, lediglich mittels Thermoformen zu schalenförmigen Bauteilen verarbeitet werden. Dies bedingt eine deutlich reduzierte Formfreiheit der damit herstellbaren Teile im Vergleich zu kurz- und langfaserverstärkten Systemen und begründet jüngst entwickelte hybride Fertigungsverfahren, wie das in Abschnitt 4.4 vorgestellte Thermoformspritzgießen [13][14][24].

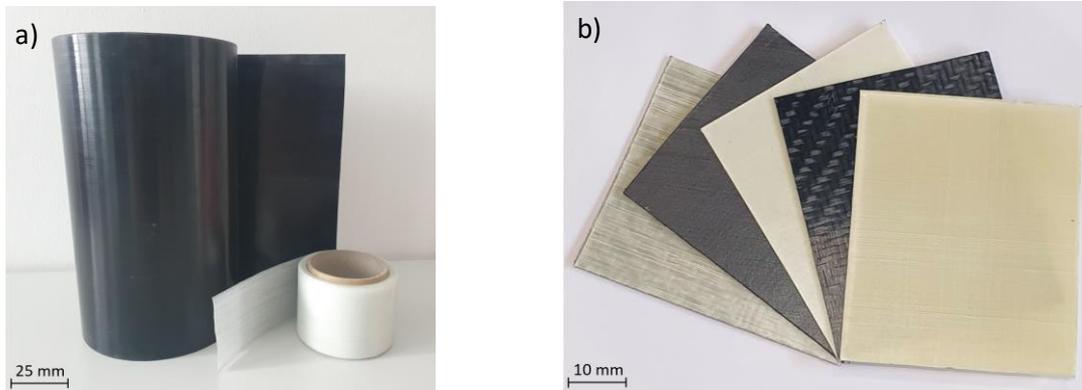


Abb. 11: Aufgewickeltes UD-Tape (a) und unterschiedliche Organobleche (b)

UD-Gelege-Organobleche werden aus UD-Tapes hergestellt. Dies sind dünne Einschichtverbunde, die in einer Richtung im Thermoplast verlaufende unidirektional angeordnete Endlosfasern enthalten. UD-Tapes werden in kontinuierlich arbeitenden Pultrusionsanlagen aus einer Vielzahl an nebeneinander aufgespreizten Faserrovings hergestellt. Die Imprägnierung mit thermoplastischem Kunststoff kann innerhalb der Anlagen über unterschiedliche Verfahrensweisen wie Schmelze-, Pulver- oder Filmimprägnierung erfolgen. Generell endet die Pultrusion der flächigen Tapes mit dem Pressen des FKV auf eine einheitliche Dicke von wenigen Zehntel Millimetern. Hierbei wird dieser unter Druck und Wärmeabfuhr verfestigt, was als Konsolidieren bezeichnet wird. Auch die Produktion von fertigimprägnierten Geweben bzw. Gewebe-Organoblechen erfolgt in ähnlicher Verfahrensweise mit entsprechend vorgelegtem Webprozess. Das Weben bedingt, dass die Faserrovings jeweils senkrecht zueinander im Gewebe verlaufen, d.h. die Endlosfasern eine  $0^\circ/90^\circ$ -Faserorientierung im Verbund aufweisen. Auch UD-Gelege-Organobleche sind kommerziell als zweischichtiger Verbund mit  $0^\circ/90^\circ$ -Faserorientierung erhältlich. Diese einfache Form eines UD-Gelege-Organoblechs wird auch als CrossPly bezeichnet. Das Herstellen von CrossPlys sowie generell mehrschichtigen Organoblechen, erfolgt industriell mit kontinuierlich oder semikontinuierlich arbeitenden Heißpresssystemen wie Doppelband- oder Transferpressen [13][14][24].

Endlosfaserverstärkte FKV mit geordneter Faserstruktur, wie UD-Gelege oder Gewebe, weisen aufgrund der systematischen Faseranordnung im Matrixkunststoff und der stark unterschiedlichen Werkstoffcharakteristik beider Verbundkomponenten eine sehr ausgeprägte Anisotropie im Materialverhalten auf. D.h. im Vergleich zu isotropen Konstruktionswerkstoffen, wie Stahl oder Aluminium, wo in allen Richtungen dasselbe Eigenschaftsspektrum vorliegt, unterscheiden sich die Werkstoffeigenschaften eines endlosfaserverstärkten FKV in Abhängigkeit zur Faserorientierung. Dies betrifft sowohl das mechanische Verhalten des Verbundes unter Last, als auch dessen thermische und thermomechanische Eigenschaften [13][14].

Einschichtige UD-Tapes bzw. UD-Einzelschichten weisen eine besondere Form von Anisotropie auf, die als transversale Isotropie bezeichnet wird. Das bedeutet, dass normal zur Vorzugsrichtung entlang der Fasern eine isotrope Ebene existiert und somit in allen senkrecht zur isotropen Ebene verlaufenden Richtungen die gleichen Materialeigenschaften vorliegen (vgl. Abb. 12) [13].

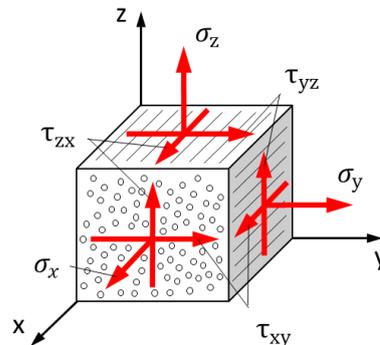


Abb. 12: Modellstellung der transversalen Isotropie am Beispiel einer UD-Schicht [13]

In der Vorzugsrichtung parallel zum Faserverlauf, weisen die UD-Schichten faserdominierte Steifigkeits- und Festigkeitskennwerte auf. Diese liegen abhängig vom Faservolumengehalt etwas unterhalb der Kennwerte des reinen Faserwerkstoffs. Gegensätzlich dazu verhält es sich senkrecht zur Faserrichtung, wo die Fasern keine Verstärkungswirkung ausüben und das Materialverhalten eher matrixdominiert ist. Hier ist zu berücksichtigen, dass dies im Besonderen für die Festigkeitswerte zutrifft. Hinsichtlich der Dehnbarkeit stellen die Fasern quer zur Faserrichtung eine Schwächung des Kunststoffes dar, was sich in einer stark reduzierten Bruchdehnung der Verbundschicht im Vergleich zum reinen Matrixwerkstoff widerspiegelt. Die transversale Isotropie verdeutlicht sich auch in den Wärmeleiteigenschaften speziell von Carbonfaserverstärkten UD-Schichten. Hier weist der FKV, aufgrund der sehr guten Wärmeleiteigenschaften von Kohlenstoff und der schwachen Wärmeleitfähigkeit von Thermoplast in Faserrichtung deutlich höhere Wärmeleiteigenschaften als quer dazu auf [13][14][24].

Mehrschichtige UD-Gelege- oder Gewebe-Organobleche werden normalerweise orthotrop aufgebaut. Orthotrope Material- bzw. Verbundsysteme beinhalten drei voneinander unabhängige Vorzugsrichtungen, welche normal zu den Symmetrieebenen liegen. Die Normalspannungen und Schiebungen als auch die Schubspannungen sowie Dehnungen sind durch die Symmetrien vollständig entkoppelt (vgl. Abb. 13) [13].

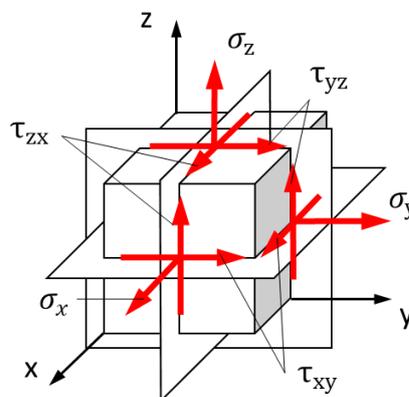


Abb. 13: Modellstellung der Orthotropie [13]

Hierfür müssen Laminat so aufgebaut sein, dass sich der Schichtaufbau in der Mittelebene spiegelt bzw. eine Symmetrie bezogen auf die enthaltenen Schichtdicken und Faserorientierungen aufweist. Vorteilhaft bei derart symmetrischen Aufbauten ist, dass unter einachsiger Beanspruchung in der jeweiligen Vorzugsrichtung nicht bereits ein mehrachsiger Spannungszustand aufgrund des Lagenaufbaus resultiert. Ähnliches gilt bei der Laminat- bzw. Bauteilherstellung. Hier verhindern orthotrope Laminataufbauten, dass beim Abkühlen ungleichmäßige Eigenspannungen im Verbund entstehen. Somit sind nach der Herstellung von flächigen Erzeugnissen unerwünschte Krümmungen oder Verdrillungen infolge von thermomechanischem Verzug fast vermeidbar [24].

## 2.3 Wabenkerne

Die primäre Aufgabe des Kerns innerhalb einer biegebeanspruchten Sandwichstruktur ist das auf Abstand bringen beider Decklagen zum Erreichen eines ausreichend hohen Widerstandsmoments des Sandwichverbundes ohne nennenswerte Gewichtserhöhung. Sekundär muss der Kern im Einsatzfall den zwischen beiden Deckschichten resultierenden Querkraftschubbeanspruchungen standhalten sowie dem Knittern der Deckschichten entgegenwirken. Auch das Aufnehmen von externen, flächig eingeleiteten Druckbeanspruchungen ist eine der sekundären Aufgaben des Kerns. Die mechanischen Grundlagen dazu wurden bereits im Abschnitt 2.1 erläutert. Die nachfolgenden Beschreibungen dieses Abschnitts fokussieren auf strukturierte Kerne mit wabenförmiger Zellgeometrie, die verallgemeinert auch als Wabenkerne bezeichnet werden. Die Ausführungen beschränken sich grundlegend auf das von der Wabenmorphologie abhängige mechanische Eigenschaftsprofil sowie auf ausgewählte polymerbasierte Wabenkerne und deren Herstellung. Bevor auf diese Themen detaillierter eingegangen wird, werden zunächst die für industrielle Anwendungen in FKV-Sandwichstrukturen zum Einsatz kommenden Kerne vorgestellt.

Kernstrukturen im mechanischen Kontext können, wie in [25] erläutert, nach der Kernmorphologie und der daraus resultierenden Stützwirkung für die Deckschichten unterteilt werden. Hieraus ergeben sich zwei Oberkategorien, wobei zwischen homogenen und strukturierten Kernen unterschieden wird. Strukturierte Kerne lassen sich weiterführend nach deren Stützwirkung in punktuell, regional, unidirektional und bidirektional stützend unterteilen. Nachfolgend sind die einzelnen Kernkategorien, angelehnt an die Unterteilung nach Pflug in [25], schematisch veranschaulicht.

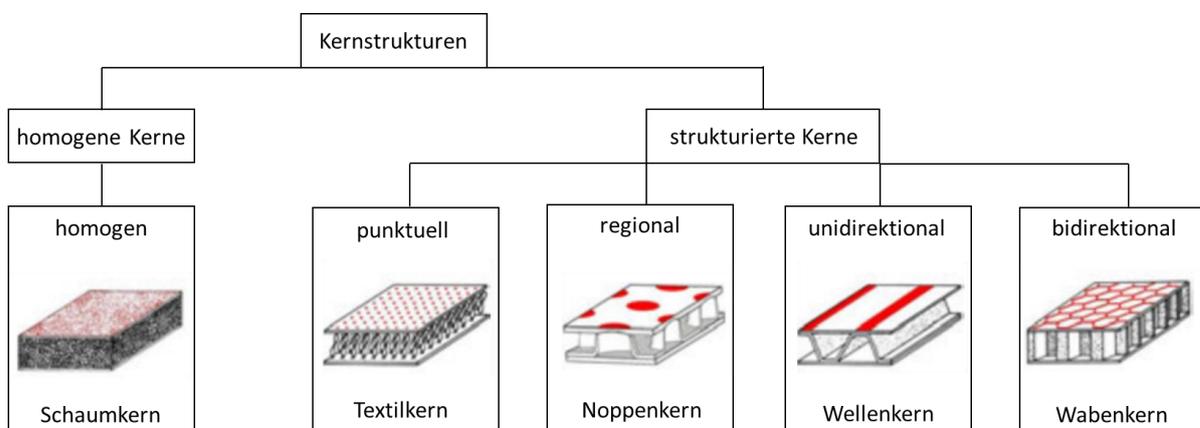


Abb. 14: Sandwichkerne unterteilt nach Struktur und Stützwirkung in Anlehnung an [25]

Für technische Anwendungen im heutigen Flug- und Fahrzeugbau, sind homogene Kerne in Form von Schäumen sowie strukturierte Wabenkerne von übergeordneter Bedeutung. Wohingegen Schaumkerne eine homogene Stützwirkung aufweisen, werden Wabenkerne den bidirektional stützenden Kernstrukturen zugeordnet. Beide Kernstrukturen kommen heutzutage industriell für mechanisch mittel- und hochbeanspruchte Bauteilanwendungen zum Einsatz und sind aus verschiedensten Materialsystemen verfügbar. Hier reicht die Auswahl vom metallischen Werkstoff über Keramiken hin zu duroplastischen und thermoplastischen Kunststoffen. Die Auswahl ob ein Schaum oder eine Wabenstruktur zum Einsatz kommt, richtet sich generell nach den individuellen Bauteilanforderungen [12][25].

Für einen Schaumkern mit homogener Stützwirkung sprechen neben dem über die Poren erzeugten Gewichtsvorteil im Unterschied zu Vollmaterialien sehr gute thermische und akustische Isolationseigenschaften sowie die bis hierhin besseren Verarbeitungsmöglichkeiten zur Bauteilfertigung. Polymerbasierte Schaumkerne werden für kostensensitive Märkte wie den Automotivsektor beispielsweise aus Polyurethan (PU), Polyvinylchlorid (PVC) oder Polypropylen (PP) hergestellt. Für Luftfahrtanwendungen kommen höherpreisige Kunststoffe wie z.B. Polymethacrylimid (PMI) oder Polyetherimid (PEI) zur Anwendung. Industriell bedeutsame Schaumkerne aus derartigen Kunststoffen sind unter dem Markennamen Rohacell® und Airex® erhältlich [26][27].

Die signifikantesten Vorteile der Wabenkerne liegen in deren mechanischem Eigenschaftsprofil, was bis heute ein Maximum an Leichtbauperformance und ein Optimum an Materialeffizienz innerhalb großflächiger Sandwichstrukturen ermöglicht. D.h. über Wabenkerne mit sechseckiger Wabengeometrie sind bislang die höchsten gewichtsspezifischen Steifigkeits- und Festigkeitskennwerte in einem Sandwichverbund erzielbar. Zurückzuführen ist dies auf die topologisch optimal ausgeführte Struktur von Wabenkernen zur Erfüllung der anfänglich erwähnten sekundären Kernaufgaben. Einerseits bildet hierfür das zusammengesetzte Wabenmuster eine Art selbststützendes Tragwerk, was im biegebelasteten Sandwichverbund eine optimale Aufnahme und Verteilung der Querkraftschubspannungen im Kernmaterial zwischen den interlaminar Zug-Druckbeanspruchten Deckschichten sicherstellt. Andererseits werden die orthogonal zu den Deckschichten ausgerichteten geraden Zellwände eines Wabenkerns unter einwirkenden Flächenlasten idealerweise ausschließlich normal beansprucht. Beides stellt vom mechanischen Standpunkt aus einen Optimalfall dar, was beispielsweise nicht über die regellose Struktur sowie die gekrümmten Zellwände von Schaumkernen realisierbar ist [26][28].

Wabenkerne weisen hinsichtlich ihrer Mechanik ein orthotropes Verhalten auf, was hier als orthotropes Strukturverhalten bezeichnet wird. D.h. sie beinhalten, wie die im vorherigen Abschnitt erläuterten orthotropen Laminataufbauten, drei voneinander unabhängige Vorzugsrichtungen. Diese weisen unterschiedliche mechanische Eigenschaften bzw. ein voneinander abweichendes Deformationsverhalten auf. Die Vorzugsrichtungen des Kerns werden auch als Hauptrichtungen bezeichnet, da man diese im Einsatzfall optimalerweise auch entsprechend der Hauptbelastungsrichtung im Bauteil ausrichtet. Abbildung 15 veranschaulicht schematisch eine Wabenstruktur sowie die drei Hauptrichtungen eines Wabenkerns. Die drei Hauptrichtungen werden typischerweise mit den Indizes  $T$  für die Dickenrichtung,  $W$  für die Richtung der Zellbreite und  $L$  für die Richtung der Zelllänge bezeichnet [6][11][10][28].

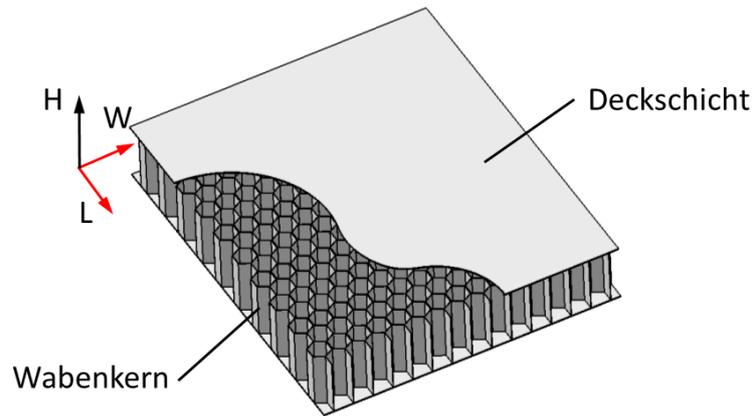


Abb. 15: Die drei Hauptrichtungen von Wabenkernen in Anlehnung an [6]

Beim orthotropen Strukturverhalten eines Wabenkerns gilt es zu berücksichtigen, dass signifikante Unterschiede zwischen beiden Hauptrichtungen, d.h. in dessen W- und L-Richtung, bestehen. Dies ist sowohl für den mechanischen Einsatz von Sandwichstrukturen aber auch für das in Abschnitt 6.4 und 6.5 erläuterte Verhalten thermoplastischer Wabenkerne beim Ziehformen von übergeordneter Bedeutung. Aus der Literatur sind Schubsteifigkeits- und Schubfestigkeitskennwerte von Wabenkernen aus metallischen sowie polymerbasierten Materialsystemen in L- und W-Richtung bekannt, die sich annähernd um den Faktor zwei und höher unterscheiden. Der hohe Performanceunterschied resultiert im Besonderen aus den Fertigungsmöglichkeiten industriell hergestellter Wabenkerne. Die meisten Fertigungsverfahren für Wabenkerne mit sechseckiger Zellgeometrie bedingen bislang ein Einbringen von doppelten Zellwänden in L-Richtung. Diese fertigungsbedingte Verdopplung an in L-Richtung eingebrachten Zellwänden trägt bei diesen Wabenkernen maßgeblich zu den deutlich höheren Schubsteifigkeiten und Festigkeiten vergleichend zur W-Richtung bei [11][10][28].

Auch im Deformationsverhalten treten bezogen auf eine einachsige Biegung Unterschiede abhängig von der Ausrichtung des Wabenkerns zur Biegeachse auf. Diese lassen sich auf abweichende Spannungszustände innerhalb der schubbeanspruchbaren Einzelzellwände einer Sechseckwabe zurückführen. Bei einer einachsigen Biegung um die W-Achse werden die in L-Richtung maßgeblich schubbeanspruchbaren Zellwände aufgrund ihrer parallelen Anordnung zur Schubebene im Idealfall bis zum Ausknicken ausschließlich schubbeansprucht. Gegensätzlich dazu verhält es sich bei den schubbeanspruchbaren Zellwänden in W-Richtung, die mit leichtem Winkelversatz zur Hauptrichtung ausgeführt sind. Hier führt der Querkraftschub bei einachsiger Biegung um die L-Achse zu überlagerten Spannungszuständen in den Zellwänden, was in diesen direkt zu mehrachsigen Verzerrungen führt. Numerische Untersuchungsergebnisse zum Deformationsverhalten eines thermoplastischen Wabenkerns aus [29] verdeutlichen die beschriebenen mehrachsigen Verzerrungen der in W-Richtung mit leichtem Winkelversatz zur Hauptrichtung ausgerichteten Zellwände (vgl. Abb. 16).

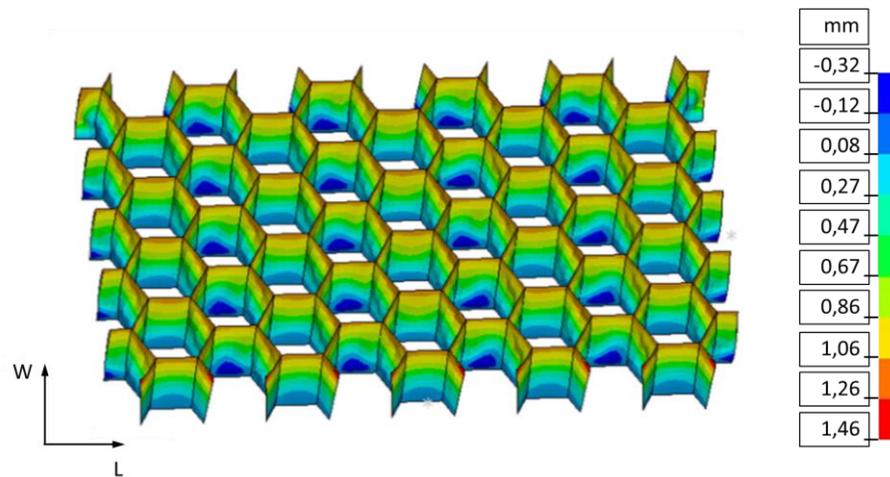


Abb. 16: Deformationsverhalten eines in W-Richtung schubbeanspruchten Wabenkerns [29]

Der im Luft- und Raumfahrtsektor eingesetzte Benchmark-Wabenkern mit polymerbasiertem Materialsystem und sechseckiger Zellgeometrie ist der Nomex®-Wabenkern. Nomex®-Wabenkerne weisen sehr hohe gewichtsspezifische Druck- und Schubsteifigkeiten sowie Festigkeiten auf und sind zudem schwer entflammbar. Sie bestehen aus phenolharzgetränktem Aramidpapier. Zur Herstellung der Wabenkerne werden mehrere Aramidpapierlagen schichtweise über eine vergleichsweise einfache Klebe-Expansionstechnik zu einem Wabenkernblock verarbeitet. Nach der Expansion des Wabenkernblocks wird dieser mit Phenolharz getränkt und abschließend zu mehreren Wabenkernen mit jeweils definierter Kernhöhe zugeschnitten (vgl. Abb. 17) [25][30].

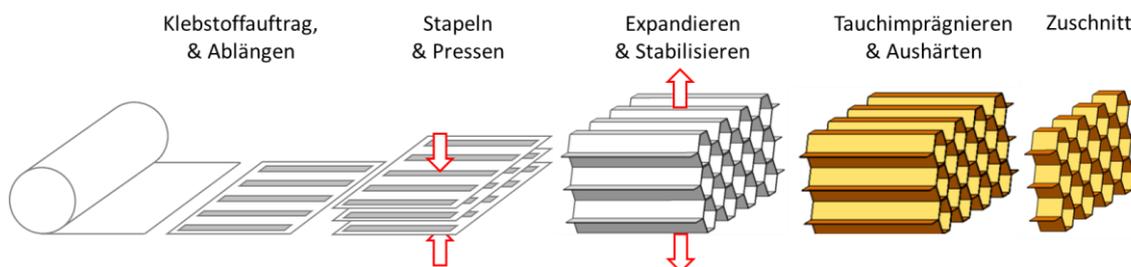


Abb. 17: Herstellung von Nomex®-Wabenkernen [30]

Wabenkerne aus thermoplastischen Kunststoffen können heutzutage in vielfältiger Art und Weise hergestellt werden. Hier gibt es Verfahren, die einzelne, extrudierte Röhrcen aber auch einzelne extrudierte Wabenkernsegmente zu großen Wabenkernblöcken zusammensetzen und verschweißen. Diese werden anschließend ähnlich wie bei der Nomex®-Wabenkernherstellung final zu mehreren Wabenkernen mit definierter Kernhöhe zugeschnitten. Ein für Schienen und Nutzfahrzeuge eingesetzter PP-Wabenkern, der auf Grundlage von extrudierten Röhrcen hergestellt wird, ist der TUBUS®-Wabenkern. Für die Herstellung thermoplastischer Wabenkerne sind neben den Extrusionstechniken auch Expansionstechniken zur Folienverarbeitung bekannt. Ausführliche Beschreibungen hierfür und weitere Herstellungsverfahren zur Produktion von thermoplastischen Wabenkernen sind in [25] und [26] zu finden. Beide Arbeiten beschäftigen sich zudem mit der Entwicklung eines mittlerweile industriell bedeutenden thermoplastischen Faltwabenkerns, der nach dem patentierten ThermHex®-Verfahren kontinuierlich herstellbar ist. Der ThermHex®-Wabenkern ist für die vorliegende Arbeit von übergeordneter Bedeutung, da dieser aufgrund der kontinuierlichen Produktionstechnik sowohl in Bezug

auf die Produktivität als auch den Preis/m<sup>2</sup> für Großserienanwendungen als zukunftsweisend einzuschätzen ist. Hinweise und Vergleiche, die sich mit diesen wirtschaftsrelevanten Fragestellungen beschäftigen, sind z.B. in den Ausführungen von Pflug und Verpoest in [31] zu finden.

Die kontinuierliche Produktion von Wabenkernen in einer industriellen Fertigungsanlage nach dem ThermHex<sup>®</sup>-Verfahren gliedert sich in vier Hauptprozessschritte. Der erste Prozessschritt beinhaltet das Extrudieren einer dünnen Thermoplastfolie. Diese wird nachträglich über eine profilierte Walze mittels Vakuumtechnik rotationsziehgeformt. In Abhängigkeit zur Walzenprofilierung entstehen hierbei über die Folienoberfläche halbe Wabenzellen, die jeweils als halbe Wabenzellreihe über die Folielänge miteinander verbunden sind. Die halben Wabenzellreihen werden unmittelbar nach dem Rotationsziehformen in der Produktionslinie zum nahezu finalen Wabenkern aufgestellt bzw. aufgefaltet. Nach dem Aufstellen des Wabenkerns werden im vierten Prozessschritt die aneinander gefalteten Wabenzellreihen mittels Kontaktschweißen an den Stirnseiten in einer Doppelbandpresse verbunden. Der Fügeprozessschritt in der Doppelbandpresse ermöglicht zusätzlich zur Verbindung der Wabenzellen ein gleichzeitiges Aufkaschieren unterschiedlicher Deckschichten wie z.B. Dekorfolien, Glasfaservliese sowie dünne endlosfaserverstärkte Organobleche. Am Ende einer Produktionslinie werden die Kern- bzw. Sandwichplatten auf die finale Plattenlänge zugeschnitten und weggestapelt. Die plattenförmigen Halbzeuge sind mit der kontinuierlichen Anlagentechnik (vgl. Abb. 18) in Produktionsgeschwindigkeiten von bis zu 10 m/min herstellbar (vgl. Abb. 12) [25].

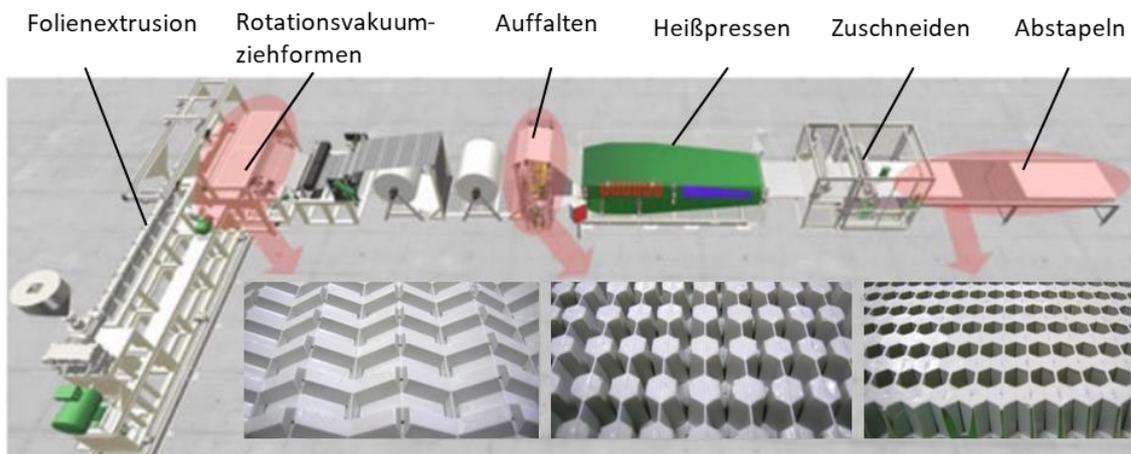


Abb. 18: Wabenkernherstellung im ThermHex<sup>®</sup>-Verfahren [25]

Auf die allgemeinen Grundlagen zum Ziehformen von Kunststofffolien wird im Abschnitt 4.1 kurz eingegangen. Diese Verfahrensweise des Thermoformens bedingt, dass die Formgebung ausschließlich auf plastischem Verstrecken vom thermoplastischen Material basiert, was teilweise mit ausgeprägten Wandstärkenunterschieden an final geformten Teilen bzw. Strukturen einher geht. D.h. auch der ThermHex<sup>®</sup>-Wabenkern beinhaltet Wandstärkenunterschiede, die sich pro Einzelzelle systematisch wiederholen. Auf die Ausprägung der Wandstärken in Abhängigkeit zum Rotationsziehformen, wird in [25] und [32] näher eingegangen. Grundsätzlich lässt sich hieraus zusammenfassen, dass die später in W-Richtung verlaufenden einzelnen Zellwände des Wabenkerns während der Fertigung stärkere Dehnungen erfahren und somit geringere Wandstärken aufweisen als die doppelten Zellwände in L-Richtung.

Ergänzend zu den bereits erläuterten strukturbezogenen Einflüssen zum orthotropen Strukturverhalten von Wabenkernen mit doppelter Zellgeometrie und deren Deformationsverhalten unter einachsiger Biegung, ergeben sich hierfür somit beim ThermHex®-Wabenkern zwei weitere fertigungsbedingte Einflussfaktoren. Diese sind der sich systematisch wiederholende Dickenunterschied der stärker verreckten Zellwände in W-Richtung und der nicht stoffschlüssige Verbund zwischen den doppelten Zellwänden in L-Richtung. Nachfolgend sind alle Einflüsse, die zum Unterschied der Schubeigenschaften und dem Deformationsverhalten beider Hauptrichtungen unter einachsiger Biegung führen, für den aktuell industriell verfügbaren ThermHex-Wabenkern stichpunktartig zusammengefasst:

- Fertigungsbedingte Verdopplung an in L-Richtung verlaufenden Zellwänden
- Ausrichtung der Zellwände bezogen auf die jeweilige Hauptrichtung (parallel und winklig)
- keine stoffschlüssige Fügeverbindung zwischen den doppelten Einzelzellwänden in L-Richtung
- Wandstärkenunterschiede schubbeanspruchbarer Zellwände in W- und L-Richtung

Die ThermHex®-Wabenkernproduktion kann auch zur Herstellung von vollständig thermoplastbasierten Sandwichplatten bzw. Halbzeugen eingesetzt werden. Diese sind als Sandwichverbund mit Polypropylenmatrix und Endlosglasfaserverstärkung unter dem Markennamen Organosandwich® erhältlich. Die Deckschichten sind im kommerziell erhältlichen Sandwichsystem als zweischichtiges 0°/90°-UD-Gelege auf dem Wabenkern geschweißt. Verfügbar sind die Standardsandwichplatten mit unterschiedlichen Zellweiten, Kernhöhen sowie Kerndichten. Die Variationsvielfalt, die über die in Abbildung 18 dargestellte Anlagentechnik umgesetzt werden kann, ist im Vergleich zum Standardprodukt deutlich weitreichender und umfasst hinsichtlich der Matrix Thermoplaste wie beispielsweise Polycarbonat, Polyamid oder Polyetherimid. Auch bei den Deckschichten sind verschiedene Variationen z.B. auch mit Kohlefasern oder gewebten Endlosfasern realisierbar. Die für die vorliegende Arbeit relevanten Sandwichverbunde mit ThermHex-Wabenkern und Polypropylen als Matrixkunststoff sind in der Tabelle 4 nachvollziehbar (vgl. Abs. 6).

## 3 Wärmetransfer

Im Folgenden Abschnitt wird zunächst auf die Thermodynamik von rigid geschlossenen Systemen eingegangen sowie nachfolgend auf die Grundlagen zu den drei Wärmetransfermechanismen Konduktion, Konvektion und Wärmestrahlung. Beides ist relevant, um die teilweise sehr schnellen Änderungen des thermischen Zustands von Organoblechen oder thermoplastbasierten FKV-Sandwichverbunden beim nichtisothermen Thermoformen nachvollziehen zu können.

### 3.1 Thermodynamische Grundlagen

Thermodynamische Prozesse gehen immer mit einer wechselseitigen Beeinflussung eines Systems zu einem Zweiten oder seiner Umgebung einher. Zur Beschreibung dieser Wechselwirkungen werden in der Thermodynamik unterschiedliche Systemarten eingesetzt. Deren Einteilung definiert sich nach der Form der Energieübertragung, welche die innere Energie bzw. Enthalpie eines Systems über dessen Grenzen hinaus beeinflusst. Dies kann stoffgebunden, mechanisch oder thermisch erfolgen [33]. Für die vorliegende Arbeit sind im Besonderen Zusammenhänge von rigid geschlossenen Systemen relevant.

Ein rigid geschlossenes System kann auf Fälle angewendet werden, bei denen äußere mechanische Einflüsse in Bezug auf dessen gespeicherte innere Energie vernachlässigbar sind. Die Systemgrenzen sind in diesem Fall diatherm, d. h., über diese kann nur Energie in Form von Wärme übertragen werden. Die Temperatur  $T$  ist neben dem Druck  $p$  und dem Volumen  $V$  eine von drei thermischen Zustandsgrößen, die den thermodynamischen Zustand von Systemen im Allgemeinen festlegen. Für das rigid geschlossene System (vgl. Abb. 19), was aufgrund der rigid und diathermen Systemgrenzen grundsätzlich nur von Wärmeströmen beeinflusst wird, ist die Temperatur somit die bestimmende Zustandsgröße. Sie ist definiert als das Maß der mittleren thermischen Energie einer einfachen Stoffmenge. Die thermische Energie, welche im rigid geschlossenen System gespeichert ist, wird als innere Energie  $U$  bezeichnet. Sie ist eine kalorische Zustandsgröße, die grundsätzlich von zwei thermischen Variablen abhängig ist. Die Abhängigkeit der inneren Energie besteht für geschlossene Systeme im Allgemeinen zur Temperatur und zum spezifischen Volumen  $v$  der enthaltenen Stoffmenge. Die allgemeine kalorische Zustandsgleichung, die die spezifische innere Energie  $u$  beschreibt, ist wie folgt definiert [33].

$$u = u(T, v) \quad \text{Gl. 3.1.1a}$$

Die Verbindung zwischen den thermischen Zustandsgrößen  $T$  und  $v$  und der inneren Energie erhält man aus dem totalen Differential der kalorischen Zustandsgleichung (Gl. 3.1.1b).

$$du = \left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_v \cdot dT + \left(\frac{\partial u}{\partial v}\right)_T \cdot dv \quad \text{Gl. 3.1.1b}$$

Der erste partielle Differentialquotient stellt die spezifische Wärmekapazität bei konstantem Volumen dar, die als spezifische isochore Wärmekapazität  $c_v$  bezeichnet wird. Sie ist eine stoffspezifische Größe und weist nach der Gleichung 3.1.1e eine Abhängigkeit von der Temperatur und vom spezifischen Volumen einer Stoffmenge auf. Wenn das Volumen einer Stoffmenge bei einer Zustandsänderung als konstant angenommen werden kann, was für inkompressible Stoffmengen im rigid geschlossen

System der Fall ist, geht der Anteil der Volumenänderung  $dv$  gegen Null. Für diese Fälle ist die spezifische isochore Wärmekapazität ausschließlich von der Temperatur abhängig und leitet sich aus Gl. 3.1.1b wie folgt ab.

$$c_v = \frac{\partial u}{\partial T} = c_v(T) \quad \text{Gl. 3.1.1c}$$

Bei vernachlässigbarer Volumenänderung unter Druck weist die spezifisch isobare Wärmekapazität  $c_p$  ebenfalls nur eine Abhängigkeit von der Temperatur auf. Für diese Fälle gilt folgende vereinfachende Formulierung.

$$c_v(T) = c_p(T) = c(T) \quad \text{Gl. 3.1.1d}$$

Hierbei kann auf den Index, wie im letzten Ausdruck der Gleichung dargestellt, verzichtet werden [34]. Für Zustandsänderungen der spezifischen inneren Energie  $du$  kann dann die Änderung der inneren Energie aus Gl. 3.1.1b wie folgt vereinfacht dargestellt werden [33][34][35].

$$du = \frac{\partial u}{\partial T} \cdot dT = c(T) \cdot dT \quad \text{Gl. 3.1.1e}$$

Die Beschreibung thermodynamischer Wechselwirkungen erfolgt generell nicht anhand absoluter Energiewerte, sondern über die Betrachtung von relativen Zustandsänderungen, die innerhalb einer bestimmten Zeit von statten gehen [35]. Hierfür sind neben den thermischen und kalorischen Zustandsgrößen die Prozessgrößen, welche Ursache oder Folge von thermodynamischen Wechselwirkungen darstellen, von Bedeutung. Der „Erste Hauptsatz der Thermodynamik“ liefert die Gesetzmäßigkeiten zur Energieerhaltung, -umwandlung und -übertragung, welche zwischen Zustands- und Prozessgrößen gelten [33]. Da die Zustandsänderung der inneren Energie eines rigid geschlossenen Systems lediglich auf die Übertragung von Wärme zurückzuführen ist, ist ausschließlich der Wärmestrom  $\dot{Q}_{12}$  die prozessbestimmende Größe, die als Randbedingung über die diathermen Systemgrenzen hinauswirkt. Die Indizes „1“ und „2“ weisen auf den energetischen Anfangs- und Endzustand des Systems vor und nach einem Prozess hin.

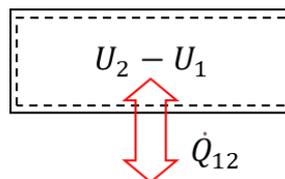


Abb. 19: Zustands- und Prozessgrößen eines rigid geschlossenen Systems [33]

Wert und Verlauf des Wärmestroms wird von der Zustandsänderung im System bestimmt, weshalb der Wärmestrom  $\dot{Q}_{12}$  grundsätzlich immer eine Wegabhängigkeit aufweist. Wie in Abbildung 19 dargestellt, entspricht die Differenz zwischen Ausgangswert  $U_1$  und Endwert  $U_2$  der inneren Energie über die Systemgrenzen dem ausgetauschten Wärmestrom  $\dot{Q}_{12}$ . Da für rigid geschlossene Systeme die Einflüsse von mechanischen Prozessgrößen vernachlässigbar sind, gilt für diese die folgende Energiebilanzgleichung [33].

$$\dot{Q}_{12} = U_2 - U_1 = m(u_2 - u_1) \quad \text{Gl. 3.1.1f}$$

Gleichung 3.1.1f ist somit die Fassung des „Ersten Hauptsatz der Thermodynamik“ für rigid geschlossene Systeme [33]. Diese wird in differentieller Schreibweise, wie folgt ausgedrückt [35].

$$dQ = dU = m \cdot du \quad \text{Gl. 3.1.1g}$$

Die über einen Wärmestrom zugeführte thermische Energie  $dQ$  sowie die im System gespeicherte innere Energie  $dU$ , ergibt sich für inkompressible Stoffmengen im rigid geschlossenen System durch Zusammenführen von Gleichung 3.1.1g mit Gleichung 3.1.1e, woraus sich folgender Zusammenhang ableitet.

$$dQ = dU = m \cdot c(T) \cdot dT \quad \text{Gl. 3.1.1h}$$

Für bestimmte Bereiche von Temperaturerhöhungen kann die Abhängigkeit der spezifischen Wärmekapazität  $c$  von der Temperatur vernachlässigt werden. Dies erlaubt eine einfache Integration der allgemeinen Formulierung aus Gl. 3.1.1h mit der Wärmekapazität  $c$  als Konstante. Dies ergibt die folgende Formulierung, die zur Berechnung des Wärmestroms in ein rigid geschlossenes System für einen bestimmten Temperaturbereich anwendbar ist [35].

$$\dot{Q} = \Delta U = mc \cdot \int_1^2 dT = mc \cdot (T_2 - T_1) \quad \text{Gl. 3.1.1i}$$

Die gemittelte spezifische Wärmekapazität  $c$  kann als Produkt mit der Dichte  $\rho$  eines Stoffes zu dessen volumetrischer Wärmekapazität ( $\rho c$ ) zusammengefasst werden. Diese beschreibt die Fähigkeit einer Stoffmenge bzw. eines Materials Wärme zu speichern. Das Verhältnis von Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  zur volumetrischen Wärmekapazität ( $\rho c$ ) ergibt das Wärmediffusionsvermögen bzw. die Wärmeleitfähigkeit  $\alpha$  eines Materials (vgl. Gl. 3.1.1d).

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \quad \text{Gl. 3.1.1j}$$

Die Wärmeleitfähigkeit  $\alpha$  beschreibt die Wechselbeziehung von Wärmespeichern zu Wärmeleiten von ruhenden Stoffmengen. Materialien mit einer hohen Wärmeleitfähigkeit reagieren schnell auf Temperaturänderungen in ihrer Umgebung. Eine niedrige Wärmeleitfähigkeit  $\alpha$  beschreibt hingegen ein träges Materialverhalten, was bei thermischen Veränderungen in der Umgebung längere Zeit braucht, um in einen neuen Gleichgewichtszustand überzugehen [36]. Diese thermische Trägheit trifft auf thermoplastische Kunststoffe zu, was die physikalische Voraussetzung ist, um den im Abschnitt 5.3.2 erläuterten thermischen Zustand im FKV-Sandwichverbund mit dem dort ebenfalls erläuterten IR-Aufheizprozess überhaupt zum Thermoformen einstellen zu können. Zudem verdeutlichen die Gleichungen Gl. 3.1.1g-i, dass die beim Aufheizen eingebrachte innere Energie und somit der thermische Zustand der zum Thermoformen von Organoblechen bzw. FKV-Sandwichverbunde einen Bezug zur Masse aufweist. Die geringe Masse dieser für den Leichtbau entwickelten Verbundsysteme begründet die Notwendigkeit der hohen Transfer- und Verarbeitungsgeschwindigkeiten sowie den damit verbundenen hohen Aufwand an entsprechender Anlagentechnik (vgl. Abs. 4.4).

## 3.2 Wärmeübertragungsmechanismen

Wohingegen die bereits beschriebenen thermodynamischen Betrachtungen die Wärmeströme und Wärme lediglich als Randbedingungen oder Prozessgrößen berücksichtigen, beschäftigen sich die folgenden Abhandlungen detaillierter mit der Wärmeübertragung selbst. Grundsätzlich wird in Bezug auf Wärmeübertragungsphänomene zwischen drei Transfermechanismen der Konduktion, Konvektion

und Wärmestrahlung unterschieden. Diese treten generell in technischen Anwendungen nie allein auf. Daher gilt es zur optimalen Beschreibung eines Wärmeübertragungsproblems signifikante Überlagerungen der Mechanismen von Sekundäreffekten zu unterscheiden [36][37].

### 3.2.1 Konduktion

Die Konduktion, auch Wärmeleitung genannt, beschreibt die Übertragung von thermischer Energie in Feststoffen oder ruhenden Fluiden. Die Mechanismen, die dem konduktiven Wärmetransfer zu Grunde liegen, beruhen auf unregelmäßigen Bewegungen der Teilchen innerhalb einer Stoffmenge, ausgelöst durch ein thermisches Ungleichgewicht der inneren Energie bei einem vorhandenen Temperaturgradient. Bei Fluiden oder Kunststoffen ist von vibrationsartigen Bewegungen der enthaltenen Moleküle auszugehen, wobei höhere Temperaturen mit stärkeren Molekularbewegungen einhergehen und niedrigere mit entsprechend schwächeren. Die daraus resultierenden Kollisionen der Molekülketten bewirken den Energietransfer vom energetisch höheren zum energetisch niedrigeren Molekül. In ähnlicher Weise erfolgt die Wärmeleitung innerhalb elektrisch nichtleitender Festkörper mit kristalliner Struktur, dies jedoch mittels Atomaktivität in Form von Gitterwellen. Bei elektrisch leitfähigen Feststoffen überlagern sich die Gitterwellen zudem mit der Bewegung der freien Elektronen. Allgemein gilt, dass Feststoffe die besseren Wärmeleiter im Vergleich zu Flüssigkeiten oder Gasen sind. Hierbei weisen elektrisch leitfähige Materialien wie Metalle die höheren Wärmetransporteigenschaften im Gegensatz zu elektrischen Nichtleitern wie Kunststoffe auf. Fluide und insbesondere Gase wirken hingegen als thermisch isolierend [37][37].

Wärmeleitprobleme werden anhand ihres zeitlichen Verlaufes in zwei Kategorien unterteilt. Einerseits, wenn durch einen stetigen Wärmeeintrag der Wärmestrom durch eine Stoffmenge konstant ist, wodurch im System ein zeitlich unveränderliches Temperaturprofil resultiert. Dieser Zustand wird als stationäre Wärmeleitung bezeichnet. Andererseits und der wesentlich häufiger auftretende Fall ist als transiente Wärmeleitung definiert. Sie liegt vor, wenn der Wärmestrom und somit die Temperaturverteilung innerhalb einer Stoffmenge zeitliche Veränderungen erfährt [37].

Der Fall von stationärer eindimensionaler Wärmeleitung ist in Abbildung 20 am Beispiel eines beidseitig unterschiedlich temperierten Stabes dargestellt. Hieraus lässt sich der grundlegende Zusammenhang, zwischen Temperaturdifferenz, Wärmestrom und Wärmeleitfähigkeit eines Stoffes ableiten. Der Stab stellt hierbei ein rigid geschlossenes System mit einer adiabaten Mantelfläche und zwei diathermen Stirnflächen dar. Somit verläuft der Wärmestrom  $\dot{Q}_x$  zwischen den zwei unterschiedlich konstant temperierten diathermen Übertragungsflächen auf einer senkrechten Ebene zur Übertragungsrichtung  $x$ .

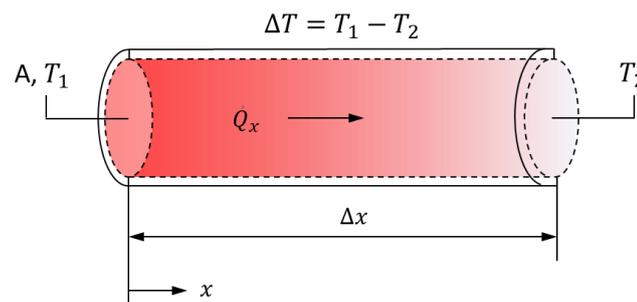


Abb. 20: Eindimensionale Wärmeleitung [36]

Innerhalb der homogenen Stoffmenge vom Stab ist der Wärmestrom  $\dot{Q}_x$  direkt proportional zu dessen Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  und dem Quotienten aus Temperaturdifferenz  $\Delta T$  und zugehöriger Verschiebung der Ortskoordinate  $\Delta x$ . Im dargestellten Fall stellt  $\Delta x$  den Abstand zwischen den beiden diathermen Übertragungsflächen dar. Somit ergibt sich für den Stab mit konstantem Querschnitt  $A$  unter stationären Wärmeleitbedingungen für den Wärmestrom folgender Zusammenhang.

$$\dot{Q}_x = -\alpha A \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad \text{Gl. 3.2.1a}$$

Diese Formulierung für den Wärmestrom überführt in eine Differentialform, wobei die Verschiebung  $\Delta x$  gegen Null geht sowie der Wärmestrom auf ein Flächenelement der Übertragungsfläche reduziert ist, stellt das Fouriersche Gesetz für eindimensionale Wärmeleitung wie folgt dar [36].

$$\dot{q}_x = \frac{\dot{Q}_x}{A} = -\alpha \cdot \frac{dT}{dx} \quad \text{Gl. 3.2.1b}$$

Die daraus resultierende Wärmestromdichte ist der Normalvektor, der senkrecht zur isothermen Übertragungsfläche ausgerichtet ist [37]. Das negative Vorzeichen im beschreibenden Term ist notwendig, da die Wärmeübertragung stets in Richtung der niedrigeren Temperaturen erfolgt. Die Wärmeleitfähigkeit gibt die materialspezifischen Wärmetransporteigenschaften einer homogenen Stoffmenge wieder [36]. Für die Berechnung von mehrdimensionalen Wärmeleitproblemen kann das Fouriersche Wärmeleitungsgesetz auch in folgender Vektorform verwendet werden.

$$\dot{q} = -\alpha \nabla T = -\lambda \left( i \frac{\partial T}{\partial x} + j \frac{\partial T}{\partial y} + k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad \text{Gl. 3.2.1c}$$

Der Temperaturgradient wird hierfür aus dem dreidimensionalen Nabla-Operator  $\nabla$  zu einem skalaren Temperaturfeld  $T$  zusammengesetzt. Zur Berücksichtigung der entsprechenden Materialeigenschaften kann die Wärmeleitfähigkeit für isotrope Werkstoffe als Skalar sowie für anisotrope Materialien als Tensor eingesetzt werden. In den partiellen Ableitungen des dritten Ausdrucks der Gleichung Gl. 3.2.1c ist implizit enthalten, dass der Wärmeflussvektor stets senkrecht zu seinen isothermen Oberflächen verläuft. In der folgenden Abbildung 21 ist dies am Beispiel von zweidimensionaler Wärmeleitung durch einen trapezförmigen Körper mit adiabaten Mantelflächen veranschaulicht [36].

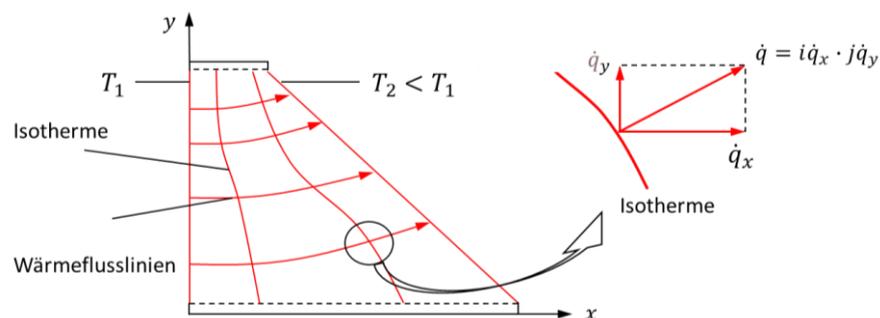


Abb. 21: Zweidimensionale Wärmeleitung [36]

Die trapezförmige Anordnung von Übertragungs- und Mantelflächen ist mit unterschiedlich langen Übertragungswegen verbunden, weshalb der Wärmestrom abweichend zur Querschnittsachse also mehrdimensional verläuft. Die Richtung des Wärmeflusses ist durch die isothermen Wärmeflusslinien dargestellt. Die Wärmeflussdichte, die als Normalvektor auf den Isothermen verläuft, muss in diesem Fall aus einer Wärmeflusskomponente in x- und y-Richtung gebildet werden.

Im Fall von transienter Wärmeleitung weisen mehrdimensionale Temperaturprofile zudem zeitliche Veränderung der Isothermen sowie der zugehörigen Wärmeflussdichte auf. Für deren Bestimmung gilt die folgende allgemeine Differentialgleichung.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \cdot \nabla^2 T \quad \text{Gl. 3.2.1d}$$

Aus der Gleichung wird deutlich, dass bei transienter Wärmeleitung innerhalb einer Stoffmenge der zeitliche Verlauf von der Temperaturleitfähigkeit und den zeitlich veränderlichen Temperaturunterschieden bestimmt wird. Gleichung 3.2.1d ist zur Beschreibung komplexer dreidimensionaler Temperaturfelder oftmals ausschließlich nur numerisch mittels Finite-Elemente-Methode lösbar [37].

### 3.2.2 Konvektion

Wenn innerhalb eines Fluiden ein Wärmetransfer erfolgt, der neben der durch die vibrationsartigen Bewegungen der Moleküle bedingten Wärmeleitung auch auf die übergeordnete makroskopische Bewegung der Flüssigkeit bzw. des Gases selbst zurückzuführen ist, wird dies als Konvektion bezeichnet. Die Klassifikation der konvektiven Wärmeübertragung erfolgt nach der Ursache, auf welcher die strömende Massebewegung eines Fluiden basiert. Hier wird zwischen erzwungener und freier Konvektion unterschieden. Wenn die Bewegung eines Fluiden aus den Auftriebskräften resultiert, die auf Grund von temperaturbedingten Dichteänderungen nahe einer Wärmequelle begründet sind, liegt freie Konvektion vor. Bekannt ist diese Art der Konvektion in der Nähe warmer Festkörper unter atmosphärischen Umgebungsbedingungen, wobei die Erwärmung der kälteren Luft mit einer Verringerung der Luftdichte einhergeht. Dies führt zum Induzieren von Auftriebskräften und somit zur Massebewegung entgegen der Gravitationsrichtung. Eine Zwangskonvektion erfolgt, wenn die einen Wärmetransfer begünstigende Strömung durch externe Einflüsse wie ein Gebläse oder eine Pumpe verursacht wird [36][37].

### 3.2.3 Wärmestrahlung

Wärmestrahlung ist thermische Energie, die von allen Formen von Materie emittiert wird, die Temperaturen über dem absoluten Nullpunkt aufweisen. Im Gegensatz zur Konduktion erfolgt der Wärmetransfer im Fall von Wärmestrahlung am effizientesten im Vakuum, d.h. ohne das Vorhandensein eines Mediums. Neben Festkörpern und Flüssigkeiten können auch Gase, die aus Molekülen mit mehr als zwei Atomen bestehen, Wärmestrahlung emittieren sowie absorbieren. Die Träger der thermischen Energie sind masselose Teilchen, die auch als Photonen oder Quanten bezeichnet werden und sich in Form von elektromagnetischen Wellen im Raum ausbreiten. Die Geschwindigkeit  $c_0$  mit der sich Lichtquanten im Vakuum bewegen, beträgt  $2.998 \cdot 10^8$  m/s. In den meisten technisch relevanten Fällen erfolgt der Wärmetransfer jedoch nicht innerhalb eines Vakuums, sondern in oder durch Materie hindurch. Hierbei kann es abhängig von der Transparenz des Transportmediums zur Absorption der Strahlung kommen, was einen Temperaturanstieg induziert und generell zu weiteren Wärmetransfermechanismen führt. Das Emittieren von Wärmestrahlung kann sowohl diffus als auch gerichtet erfolgen.

Für die vorliegende Arbeit sind im Besonderen diffuse Strahlungsquellen relevant. Diffuse Strahler weisen einen richtungsabhängigen Verlauf der Strahlungsintensität auf, was in der nachfolgenden Abbildung 22 veranschaulicht ist [36][37].

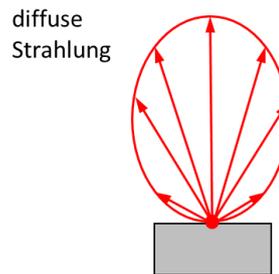


Abb. 22: Richtungsabhängigkeit emittierter Wärmestrahlung am diffusen Strahler [36]

Die Beschreibung von Wärmestrahlung erfolgt über die Standardwelleneigenschaften Frequenz  $f$  und Wellenlänge  $\lambda$ . Beide Größen sind für die Ausbreitung oder Absorption der elektromagnetischen Wellen in Materie von signifikanter Bedeutung. Unter Berücksichtigung der im Transportmedium möglichen Ausbreitungsgeschwindigkeit  $\theta$  gilt für die Strahlungseigenschaften der folgende Zusammenhang [36].

$$\lambda = \frac{\theta}{f} \quad \text{Gl. 3.2.3a}$$

Das elektromagnetische Spektrum, was für Wärmestrahlung relevant ist, reicht von 0,1 bis 100  $\mu\text{m}$  Wellenlänge. Es umfasst einen Teil des UV-Lichtes, das sichtbare Licht sowie den gesamten Bereich der Infrarotstrahlung. Die von einer Oberfläche emittierte Wärmestrahlung beinhaltet stets einen Teil von diesem elektromagnetischen Spektrum, d.h. Wellenlängen in einem bestimmten Wellenlängenbereich. Die Geschwindigkeit, mit der sich Wärmestrahlung pro Flächeneinheit freisetzt, wird als Oberflächenemissionsleistung  $E$  bezeichnet. Sie ist, wie auch die emittierten Wellenlängen  $\lambda$ , von der Oberflächentemperatur  $T_s$  sowie von Art und Beschaffenheit der Oberfläche selbst abhängig [36]. Der Zusammenhang zwischen den drei Größen wurde von Max Planck am theoretischen Fall des schwarzen Körpers beschrieben und ist als „Plancksches Strahlungsgesetz“ bekannt (Gleichung...).

$$I_{\lambda s}(\lambda, T) = \frac{c_1}{\lambda^5 \cdot (e^{c_2/(\lambda T)} - 1)} \quad \text{Gl. 3.2.3b}$$

Folgende Abbildung 23 zeigt die Zusammenhänge der Oberflächenemissionsleistung  $I_{\lambda, b}$  zur Wellenlänge  $\lambda$  für ausgewählte Oberflächentemperaturen, die sich nach dem planckschen Strahlungsgesetz für den schwarzen Körper ergeben [36].

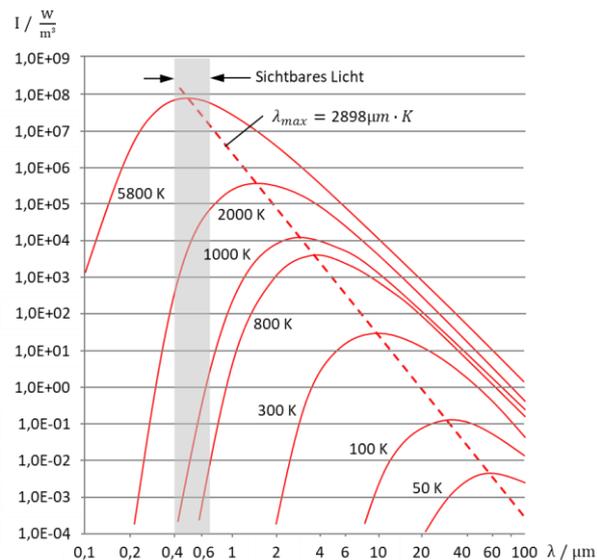


Abb. 23: Oberflächenemissionsleistung am schwarzen Körper in Abhängigkeit zur Wellenlänge [36]

Wie in der Abbildung 24 ersichtlich, nimmt mit steigender Oberflächentemperatur die Emissionsleistung der abgegebenen Wärmestrahlung zu. Zudem stellt sich zu einer beliebigen isothermen Oberflächentemperatur immer ein zugehöriges Wellenlängenspektrum ein. Jedes einzelne Spektrum weist einen Scheitelpunkt auf, um welchen die emittierte Strahlungsleistung auf bestimmte Wellenlängen konzentriert ist. Zwischen den maximalen Wellenlängen der bei einer bestimmten Temperatur emittierten Strahlung, besteht im Fall des schwarzen Körpers ein linearer Zusammenhang, der im Diagramm als gestrichelte Linie dargestellt ist. Diese lineare Abhängigkeit ist als Wiensches Verschiebungsgesetz definiert. Es beschreibt das Phänomen, dass sich mit abnehmender Oberflächentemperatur die maximale spektrale Emissionsleistung der emittierten Strahlung auf längere elektromagnetische Wellen verschiebt. Zur Berechnung der Gesamtstrahlungsmenge bei einer bestimmten Temperatur des schwarzen Körpers, kann das Stefan-Boltzmann-Gesetz verwendet werden (vgl. Gl. 3.2.3c). Nach diesem ergibt sich die maximale Emissionsleistung  $E_B$  mit der Stefan-Boltzmann-Konstante  $B = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4}$  proportional zur vorherrschenden Oberflächentemperatur  $T_s$  [36].

$$I_B = B \cdot T_s^4 \quad \text{Gl. 3.2.3c}$$

Der Schwarze Körper, dessen Emission stets diffus erfolgt, ist definiert als idealer Strahler mit einhundertprozentigem Absorptions- sowie Emissionsvermögen [37]. Im Vergleich zum schwarzen Körper emittieren reale Oberflächen bei gleicher Temperatur stets eine geringere Strahlungsleistung. Aus diesem Grund erfolgt die Beschreibung des Emissionsvermögens realer Oberflächen immer im Vergleich zum schwarzen Körper (vgl. Gl. 3.2.3d). Der notwendige Verhältnisfaktor, mit einem Wert zwischen 0 und 1, ist der sogenannte Emissionsgrad  $E$ .

$$I = E \cdot B \cdot T_s^4 \quad \text{Gl. 3.2.3d}$$

Sowohl das Material als auch die Beschaffenheit bestimmen den Emissionsgrad einer Oberfläche. Hierfür gibt es in der Literatur Tabellen, in welchen der Emissionsgrad von unterschiedlichsten Materialien nachvollziehbar ist [36].

Während die emittierte Strahlung einer Oberfläche die Wärmeenergie der jeweils angrenzenden Stoffmenge verringert, erfolgt in Folge von Absorption ein Anstieg der inneren Energie. Wie beim Emissionsverhalten, erfolgt auch die Beschreibung des Absorptionsverhaltens realer Oberflächen vergleichend zum schwarzen Körper. Dieser ist als perfekter Absorber definiert und nimmt das gesamte Spektrum einer einfallenden Bestrahlung unabhängig von Einfallswinkel und Wellenlänge auf. Die Rate an Wärmestrahlung, welche von ein oder mehreren Strahlungsquellen auf eine Oberfläche einfällt, wird als Bestrahlung  $G$  bezeichnet. Diese kann entsprechend der Oberflächeneigenschaften nahezu vollständig oder auch nur teilweise absorbiert werden. Der Vergleichswert zum schwarzen Körper, der zur Beschreibung des Absorptionsvermögens realer Oberflächen dient, ist der Absorptionsgrad  $\Lambda$ . Dieser ist neben dem Oberflächenmaterial und dessen Beschaffenheit auch vom Spektrum der einfallenden Strahlung abhängig. Die Berechnung des absorbierten Strahlungsanteils  $G_{abs}$  erfolgt nach Gleichung 3.2.3f und beschreibt die Rate, mit der die Strahlungsenergie pro Flächeneinheit absorbiert wird [36][37].

$$G_{abs} = \Lambda \cdot G \quad \text{Gl. 3.2.3f}$$

Der Absorptionsgrad stellt somit bei einer Bestrahlungsphase auch den Verhältniswert zwischen absorbiertem Anteil  $G_{abs}$  und Bestrahlung  $G$  dar. Die Interaktion der Wärmestrahlung an realen Oberflächen kann neben dem Absorbieren auch mit Reflektion und Transmission verbunden sein oder nahezu vollständig von einem der beiden bestimmt werden. Reflektierte und transmittierte Strahlungsanteile haben keinen Einfluss auf die innere Energie der an einer bestrahlten Oberfläche angrenzenden Stoffmenge. Neben dem Absorptionsgrad können sich beim Auftreffen von Wärmestrahlung auf eine Oberfläche demnach auch ein Verhältniswert  $\Phi$  aus reflektiertem Anteil  $G_{ref}$  zur Bestrahlung  $G$  sowie ein Verhältniswert  $\Psi$  aus transmittiertem Anteil  $G_{tr}$  zur Bestrahlung  $G$  ergeben. Alle drei Verhältniswerte fassen das energetische Verhältnis einer Bestrahlungsphase zusammen und ergeben in der Summe immer 1 (vgl. Gl. 3.2.3g) [36][33].

$$\Lambda + \Phi + \Psi = 1 \quad \text{Gl. 3.2.3g}$$

Oberflächen, welche eine Bestrahlung  $G$  nahezu vollständig reflektieren und somit unter Einfluss von Wärmestrahlung ein energetisches Verhältnis von  $\Psi = 1$  aufweisen, werden als weiße Körper bezeichnet. Die totale Reflektion von Wärmestrahlung an Weißkörperoberflächen bedingt, wie in der folgenden Abbildung 24 dargestellt, zudem eine Strahlungsundurchlässigkeit der angrenzenden Stoffmenge.

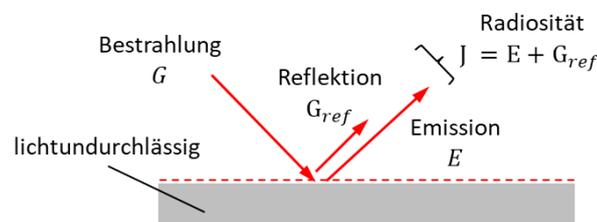


Abb. 24: Verhalten von Wärmestrahlung an strahlungsreflektierenden Oberflächen [36]

Die reflektierten Strahlungsanteile können je nach Oberflächenbeschaffenheit und einfallender Strahlung gerichtet oder diffus in den Raum zurückgeworfen werden. Für reale Oberflächen stellt die totale Reflektion immer eine Idealisierung dar, wobei der absorbierte Anteil vernachlässigbar ist. Ein relevantes Beispiel für einen annähernd idealen Reflektor stellen Aluminiumoberflächen dar, die für IR-

Strahlung ab  $1\mu\text{m}$  Wellenlänge ein Reflektionsvermögen von über 95% aufweisen. In Abbildung 24 ist zu erkennen, dass bei einer totalen Reflexion neben der vollständig reflektierten Bestrahlung  $G$  sich auch die emittierte Strahlung  $I$  der reflektierenden Oberfläche zurück in den Raum bewegt. Die Summation beider Strahlungsanteile wird als Radiosität  $J$  bezeichnet und ist für den weißen Körper wie folgt definiert [36][37].

$$J = I + G_{ref} = \varepsilon BT_s^4 + \Psi G \quad \text{Gl. 3.2.3h}$$

Für Oberflächen, die ebenfalls für Wärmestrahlung undurchlässig sind, jedoch ein nicht vernachlässigbares Absorptionsvermögen aufweisen, setzt sich das energetische Verhältnis aus absorbiertem und reflektiertem Anteil  $\Lambda + \Psi = 1$  zusammen (vgl. Abb.) [36].

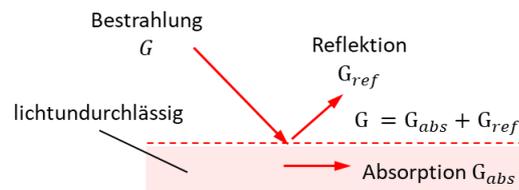


Abb. 25: Verhalten von Wärmestrahlung an strahlungsundurchlässigen Stoffen [36]

Hierbei findet unter dem Einfluss von Wärmestrahlung ein Transfer der thermischen Energie in die zur Übertragungsfläche angrenzende Stoffmenge statt. Die Nettostrahlungsleistung  $\dot{q}_{rad}$  repräsentiert den Anteil der Wärmestromdichte, welcher sich innerhalb einer Bestrahlungsphase aus der Bilanz von einfallender und abgehender Strahlung ergibt und berechnet sich demnach aus der Differenz von Radiosität  $J$  und Bestrahlung  $G$ .

$$\dot{q}_{rad} = J - G = I + \rho G - G = \varepsilon BT_s^4 - \Lambda \quad \text{Gl. 3.2.3i}$$

Im allgemeinsten Fall interagiert die Wärmestrahlung mit einer semitransparenten Oberfläche, wobei alle drei Strahlungsanteile für das energetische Verhältnis der Bestrahlungsphase relevant sind (vgl. Abb 26). Auftreten kann dies beispielsweise beim Wärmetransfer an dünnen Polymerschichten oder Glasplatten. Neben der Oberflächenbeschaffenheit und dem an der Oberfläche angrenzenden Material ist für derartige Fälle auch das Spektrum der Wärmestrahlung von Bedeutung. Hier sind verschiedenste Oberflächen bekannt, die für kurzwellige Strahlung semitransparent sind, jedoch für langwelligeres Licht undurchlässig wirken.

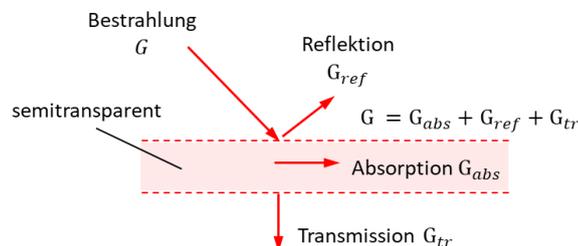


Abb. 26: Absorptions-, Reflexions- und Transmissionsprozesse an halbtransparenten Stoffen

Die Bestimmung aller Strahlungskomponenten an semitransparenten Stoffmengen ist unter Berücksichtigung von deren Zusammensetzung und Dicke, dem Eigenanteil der emittierten Strahlung sowie den Umgebungsbedingungen an Vorder- und Rückseite generell sehr komplex und auf rein analytischem Weg nicht ohne Weiteres nachvollziehbar [36].

## 4 Thermoformen von Organoblechen

Das Thermoformen ist ein Fertigungsverfahren zur Herstellung von schalenförmigen Formteilen aus ebenen thermoplastischen Halbzeugen in Form von Folien oder Platten. Das bereits vorhandene Wissen zum Thermoformen von unverstärkten Thermoplasten als auch thermoplastischen FKV's ist für die vorliegende Arbeit sowie zum Verständnis der hierfür geleisteten Entwicklungsarbeiten von essenzieller Bedeutung. Einen Überblick über die Grundlagen und die ursprünglichen Verfahrensweisen des Thermoformens unverstärkter Thermoplaste, vermittelt der Abschnitt 4.1. In diesem wird auf die vier Formgebungsmethoden Druck-, Biege-, Streck- und Ziehformen eingegangen. Zudem werden Wirkmechanismen und Werkzeugelemente genannt und kurz erläutert, womit das Verformen des zuvor erhitzten Halbzeugs, während des Formgebungsprozessschritts induziert ist bzw. sich auch in Grenzen kontrollieren lässt. Darauf aufbauend werden im Abschnitt 4.2 Verformungsmechanismen erläutert, die allgemein beim Thermoformen von Organoblechen auftreten. Nachfolgend wird im Abschnitt 4.3 auf das Stempelformen von Organoblechen nach dem Ziehformprinzip eingegangen sowie die im endlosfaserverstärkten Verbund auftretenden Spannungsverhältnisse erläutert. Der letzte der beiden Abschnitte 4.4 vermittelt Überblickswissen zur Organoblechverarbeitung mittels modernster Verarbeitungsanlagen zum hybriden Thermoformspritzgießen.

### 4.1 Allgemeine Grundlagen

Thermoformverfahren weisen generell eine sehr hohe Produktivität in Serienanwendungen auf, weshalb sie beispielsweise zur Massenproduktion von Verpackungsbehältern verwendet werden. Hier können mithilfe von Mehrfachformen bis zu 10.000 Teile pro Stunde hergestellt werden. Mittlerweile sind zahlreiche Verfahrensvariationen des Thermoformens im industriellen Einsatz, mit denen Materialsysteme vom reinen Thermoplast bis zum endlosfaserverstärkten Verbundwerkstoff großserientauglich verarbeitbar sind. In diesem Abschnitt ist der Fokus auf diskontinuierliche Verfahrensweisen gerichtet, wobei durch beispielsweise Säge-, Schneid- oder Stanztechniken vorkonfektionierte Halbzeuge zu teilweise sehr komplexgeformten schalenförmigen Strukturen verarbeitbar sind. Grundsätzlich weisen Thermoformverfahren mit diskontinuierlicher Arbeitsweise die vier nachfolgend genannten Hauptprozessschritte auf:

- Aufheizen eines ebenen Halbzeugs auf Formgebungstemperatur
- werkzeugbestimmende Formgebung
- Abkühlen des fertig ausgeformten Formteils unter Formzwang
- Entformen des Formteils

Der Wärmeeintrag zum Aufheizen sowie die Formgebung weichen bei den unterschiedlichen Verfahrensvarianten teilweise stark voneinander ab. Das Erwärmen kann beispielsweise mittels Konduktion, Konvektion oder Wärmestrahlung in einem separaten Aufheizsystem getrennt von der Formgebung ablaufen. Es sind aber auch Verfahren bekannt, wo das Aufheizen in einem gekoppelten Prozessschritt zusammen mit der Formgebung vonstattengeht. Auch die Mechanismen, die zur Formgebung eingesetzt werden, sind teilweise sehr unterschiedlich. Hier gibt es rein mechanische Verfahrensvarianten

mit zweiseitig metallischem Werkzeug, wo die Formgebung während einer translatorischen Schließbewegung zwischen zwei festen Werkzeughälften stattfindet. Es werden aber auch Ziehringe zur Formgebung eingesetzt oder statt zwei fester Werkzeughälften ist eine aus elastischem Material oder als aufblasbarer Stempel ausgeführt. Neben mechanisch geführten Formgebungsprozessen werden auch Druckluft sowie Vakuum zum Herleiten des Formzwangs an eine feste Werkzeugform verwendet. Dies kann je nach Material ohne Einsatz von zusätzlichen Hilfsmitteln durch direkte Druck- oder Unterdruckbeaufschlagung des zu verformenden Halbzeugzuschnitts erfolgen. Als Hilfsmittel können aber auch superelastische Membranen bzw. Diaphragmen zum Einsatz kommen, in oder unter welchen eine druckinduzierte Formgebung stattfindet. Des Weiteren sind auch kombinierte Formgebungsprozesse bekannt, wie das Formgeben mit mechanischem Vorstreckstempel und druckluft- oder vakuumgesteuertes Fertigformen [14][18][19][23].

Allen Thermoformverfahren gemein ist, dass die Formgebung mindestens eine feste Werkzeugform erfordert, in der bzw. um die das zuvor ebene Halbzeug ausgeformt wird. Beim Krümmungsverlauf einer Werkzeugform unterscheidet man in Negativ- und Positivformen bzw. -formverläufe. Eine Negativform weist grundsätzlich eine überwiegend konkave Werkzeugkrümmung auf, in welcher das zuvor ebene Halbzeug ausgeformt wird. Gegensätzlich dazu ist der Krümmungsverlauf einer Positivform. Hier ist die geometriestimmende Werkzeugform, um die die Formgebung erfolgt, überwiegend konvex. Positivformen, welche mechanisch die Formgebung erzwingen, werden oftmals auch vereinfacht als Stempel bezeichnet. Zweiseitige Werkzeuge mit festen Formhälften enthalten grundsätzlich eine Negativ- und eine Positivform, zwischen denen die Formgebung des thermoplastischen Kunststoffes stattfindet (vgl. Abb. 27). Werkzeugformen werden zumeist aus Stahl oder Aluminium gefertigt, um eine ausreichende Verschleißfestigkeit für den Serieneinsatz sowie eine hohe Wärmeleitfähigkeit zur Werkzeugtemperierung sicherzustellen. Im Prototypenbereich bzw. für Kleinserien werden Werkzeugformen aber auch aus duoplastischen Kunststoffen oder Holz hergestellt. Für vakuuminduzierte Formgebungsprozesse werden Werkzeugformen auch aus feinporigen luftdurchlässigen Metallen gefertigt, um beim Fertigformen ein gleichmäßiges Ansaugen des Kunststoffes an die Werkzeugwand zu ermöglichen. Typische Werkzeugelemente die in Thermoformwerkzeugen zur Unterstützung des Formgebungsprozesses enthalten sein können, sind Spann- bzw. Niederhalter, Vorläufer oder Vorlaufstempel sowie Entlüftungsöffnungen in Form von Bohrungen oder Schlitzfenstern [19][38].

Formgebungsmethoden werden beim Thermoformen ebener thermoplastischer Halbzeuge wie Folien oder Tafeln nach Press- bzw. Druck-, Biege-, Streck- und Ziehformen unterschieden. Diese können sich während der Formgebung auch überlagern oder nacheinander stattfinden. Die nachfolgende Tabelle stellt eine überblicksartige Zusammenfassung der vier Formgebungsmethoden angelehnt an die Beschreibungen aus [18][38] dar.

Tabelle 3: Formgebungsmethoden für das Thermoformen von thermoplastischen Kunststoffen [38]

<b>Formgebung</b>	<b>Ausführungsformen</b>	<b>Merkmale</b>
Druckformen	Prägen, Rändeln, Stauchern, Pressformen	Stauchern des Materials unter Werkstoffverdrängung
Biegeformen	Bördeln, Biegen, Abkanten	Formgebung um gerade oder gekrümmte Achsen geringe Wandstärkenveränderungen
Streckformen	Streckformen	Formgebung verbunden mit starker Oberflächen- vergrößerung bei gleichzeitiger ausgeprägter Wandstärkenverringern
Ziehformen	Ziehformen, Tiefziehen	Formgebung verbunden mit stetiger Materialnach- führung und geringer Wandstärkenverringern

Das Druckformen erfolgt generell im Rahmen eines Pressprozessschritts, wobei es in der druckinduzierten Stelle zu Materialverdrängungen kommt. Es kann beispielsweise zum Einprägen von Konturen oder zum Oberflächentexturieren verwendet werden. Beim Biegeformen findet die Formgebung oftmals nur um gerade oder gekrümmte Kanten bzw. Flächen statt. Für sehr lokales Verformen um Kanten ist oftmals auch ein lokales Einbringen von Wärme vor der Formgebung ausreichend. Biegeformen ist generell mit geringen Wandstärkenveränderungen verbunden und wird neben dem Abkanten von beispielsweise Kunststofftafeln auch für das Verformen von Kunststoffrohren eingesetzt.

Die Fertigung mehrfachgekrümmter Schalenstrukturen erfolgt generell nach dem Streck- oder Ziehformprinzip. Beim Streckformen erfolgt das Ausformen des Formteils und die damit verbundene Materialverteilung in oder um das Formgebungswerkzeug ausschließlich durch plastisches Dehnen des erwärmten Thermoplasts. Infolge des stark gedehnten Materials weisen die mittels Streckformen hergestellten Schalenstrukturen nach der Formgebung eine deutlich verringerte Wandstärke, im Vergleich zur Ausgangsdicke des Halbzeugs, auf. Aufgrund der hohen Dehnung setzen Streckformverfahren grundsätzlich eine sehr gute plastische Verformbarkeit des zu verarbeitenden Halbzeugs unter Verarbeitungstemperatur voraus [18][19][38].

Das Herstellen von mehrfachgekrümmten Schalenstrukturen nach dem Ziehformprinzip ist für die vorliegende Arbeit von übergeordneter Bedeutung. Es eignet sich auch zur Verarbeitung thermoplastischer Materialsysteme mit eingeschränkter plastischer Verformbarkeit sowie von Halbzeugen mit höherer Wandstärke. Die meisten Formgebungsprozesse bekannter Verfahrensabläufe für das Thermoformen von thermoplastischer FKVs, die unter anderem in [14][39][40] beschrieben sind, basieren grundsätzlich auf dem Prinzip des Ziehformens. Hier ist die Ausformung der Schalengeometrie neben dem plastischen Verformen mit einem stetigen Nachführen des zu verformenden Halbzeugs vom Werkzeugrand in die Werkzeugform verbunden. Durch das Nachführen wird die Wandstärke des zu verarbeitenden Halbzeugs nur unwesentlich zu dessen Ausgangsdicke verringert. Um Falten beim Einziehen des Halbzeugs in die Werkzeugform zu vermeiden, kommen im Bereich der Einzugskante oftmals druck- bzw. flächenlasteninduzierende Niederhalter zum Einsatz. Je nach Verfahrensweise kann

beim Ziehformen der Formzwang mechanisch durch die Krafteinwirkung eines Stempels, mittels Druckluftbeaufschlagung der Halbzeugoberseite, durch Ansaugen der Halbzeugunterseite oder in kombinierter Verfahrensweise erzeugt werden. Die nachfolgende Abbildung 27 veranschaulicht den Formgebungsablauf beim Ziehformen eines dickwandigeren Kunststoffteils mit zweiseitigem Formgebungswerkzeug [18][19][38].

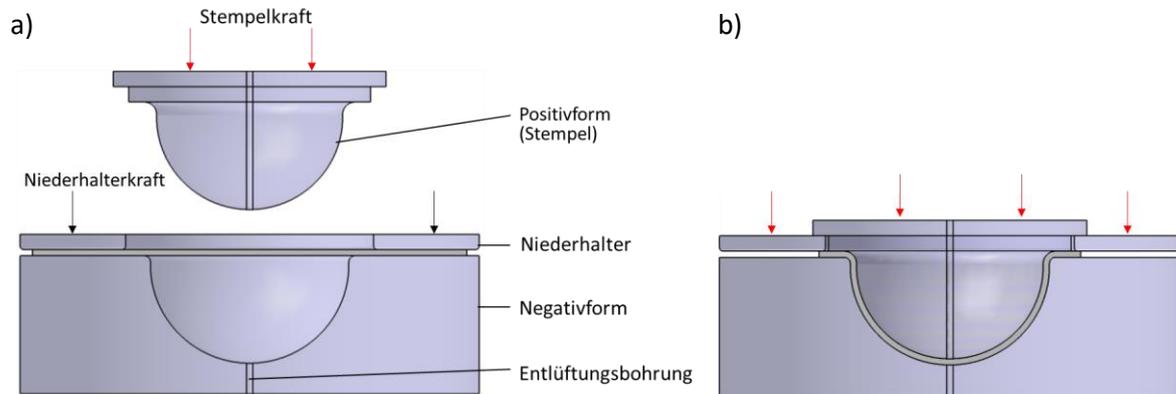


Abb. 27: Ziehformen mit kraftgesteuertem Niederhalter vor (a) und nach der Formgebung (b) in Anlehnung an [18]

Auf das Stempelformen von Organoblechen mit einer Formgebung nach dem in Abbildung 27 dargestellten Ziehformprinzip wird im Abschnitt 4.3 vertiefend eingegangen.

## 4.2 Formgebungsmechanismen endlosfaserverstärkter Thermoplaste

Nachfolgend werden die Verformungsmechanismen, die generell beim Thermoformen von Organoblechen während des Formgebungsschritts im endlosfaserverstärkten Thermoplastverbund auftreten bzw. auftreten können, erläutert. Die Inhalte beschränken sich auf Verformungsmechanismen, die für das Thermoformen von UD-Gelege- sowie Gewebe-Organoblechen zutreffend sind. Die Formgebung von Organoblechen bedingt grundsätzlich, dass die Thermoplastmatrix des endlosfaserverstärkten FKV einen schmelzflüssigen Zustand aufweist. Somit liegt der Faser-Kunststoff-Verbund beim Verformen als Zweiphasenstoffsystem vor, wonach sich die Verformungsmechanismen zum einen in Fließ- bzw. Strömungseffekte der flüssigen Schmelze und zum anderen in mechanische Verformungs- und Verschiebungsmechanismen innerhalb der Verstärkungsfasern unterteilen.

### 4.2.1 Fließphänomene

Stark vereinfacht bezeichnet Cogswell in [41] die Thermoplastschmelze als eine Art dickflüssigen Schmierfilm, welche Gleitvorgänge zwischen den Endlosfasern sowie zwischen den endlosfaserenthaltenden Einzelschichten begünstigt. Seinen und weiteren Veröffentlichungen zum Strömungsverhalten der Schmelze im endlosfaserverstärkten FKV beim Thermoformen kann entnommen werden, dass die schmelzeabhängigen Fließphänomene jedoch weitaus vielfältiger sind. Die Fließphänomene, die beim Verformen von Organoblechen auftreten, lassen sich in Matrixperkolation und transversalen Matrixfluss unterteilen [41][42][43].

### Matrixperkolation

Die Matrixperkolation beschreibt die reine Fließbewegung der Schmelze im FKV, welche einerseits durch die Fasern hindurch und andererseits entlang der Endlosfasern gerichtet sein kann [41]. In den weiterführenden Beschreibungen dieser Arbeit wird die von Cogswell beschriebene Matrixperkolation richtungsabhängig als Matrixquerperkolation oder Matrixlängsperkolation bezeichnet.

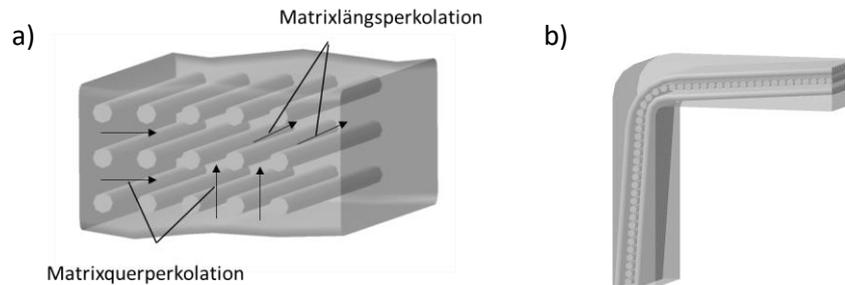


Abb. 28: Matrixperkolation durch und entlang einer UD-Einzelschicht (a) und daraus resultierender Separierungseffekt beim Biegeformen (b) [41]

Je nach Drucksituation, die auf das Organoblech ausgeübt wird, kann es im FKV auch stärker zum Matrixfluss in einer der genannten Strömungsrichtungen und somit zum verstärkten Auftreten von einer der beiden Perkolationsarten kommen. Abbildung 28b veranschaulicht schematisch das Resultat von erhöhter Matrixquerperkolation am Beispiel einer ziehgeformten Kante. Hier bewirkt das Spannen der Endlosfasern über die Kante des Stempels ein Trennen bzw. Auswringen der Schmelze aus den Faseranordnungen, was in [41], auch mit einer zu dünnflüssig eingestellten Viskosität der Thermoplastschmelze in Zusammenhang gebracht wird.

### Transversaler Faserfluss

Neben dem reinen Fließen der Schmelze kann die komprimierende Wirkung eines auf den FKV einwirkenden Stempels neben der Matrixperkolation auch zu transversalem Faserfluss führen. Dies ist im Besonderen bei UD-Gelege-Organoblechen der Fall. UD-Gelege weisen keine mechanischen Verbindungen wie Webpunkte in den Faseranordnungen auf, worin sich eine geringere Verschiebefestigkeit zwischen den Endlosfasern, verglichen mit Gewebe, begründet [24]. Somit neigen die im UD-Gelege enthaltenen Endlosfasern unter der Einwirkung einer flächigen Normalbelastung intralaminar zum Querfließen mit der Thermoplastschmelze. Diese Modellvorstellung zum transversalen Faserfluss aus [41] und [42] ist in Abbildung 29 schematisch veranschaulicht.

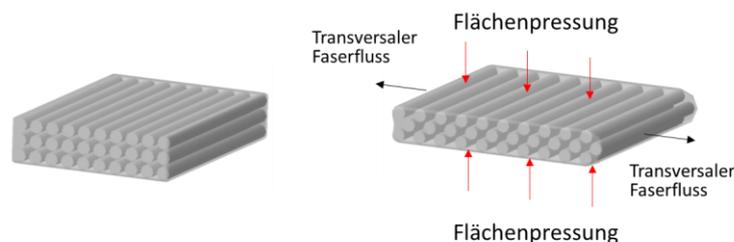


Abb. 29: Transversaler Faserfluss [41]

### Matrixlängsperkolation und transversaler Faserfluss

In [42] wird zudem auf die Kombination von Matrixlängsperkolation und transversalem Faserfluss eingegangen, was beim Heißpressen von ebenen UD-Laminaten beobachtet werden kann. Hier führt der in der Heißpresse auf den Verbund einwirkende Druck beim Komprimieren eines ausschließlich unidirektionalen Geleges einerseits zu transversalem Faserfluss. Der transversale Faserfluss zeichnet sich teilweise als „Barrelling-Effekt“ in den Randbereichen des UD-Gelege-Organoblechs quer zu den Fasererläufen ab. Andererseits kann gleichermaßen Matrixlängsperkolation auftreten. Diese verdeutlicht sich durch reine Matrixauslagerungen an den faserendenden Seiten des gepressten Organoblechs (vgl. Abb. 30) [42].

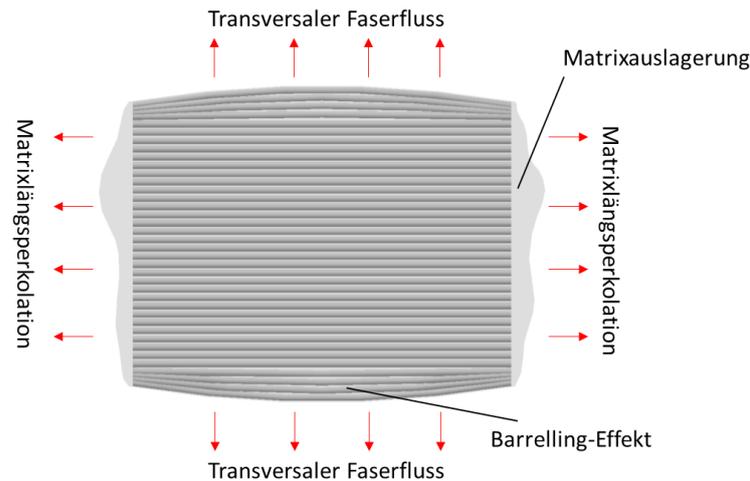


Abb. 30: Transversaler Matrixfluss und Matrixlängsperkolation beim Pressen von Organoblechen [42]

Auch beim nicht-isothermen Stempelformen mit dreidimensionaler Stempelgeometrie kann es über den einwirkenden Stempeldruck zum Induzieren von Matrixlängsperkolation und transversalem Faserfluss kommen. Friedrich, Hou und Krebs wiesen in Stempelformversuchen mit UD-Gelege- und Gewebe-Organoblechen mit sphärischer Stempelgeometrie ebenfalls die stärkere Neigung von UD-Gelege-Organoblechen zu transversalem Matrixfluss im Vergleich zu Gewebe-Organoblechen nach. Dies ist in [39] und [44] veröffentlicht. Der transversale Matrixfluss geht hierbei mit einer nicht unerheblichen Dickenreduzierung des hergestellten Versuchsbauteils einher, welche vom Bereich des Stempelerstkontakts in Richtung Bauteilaußenseiten abnimmt. Ein direkter Zusammenhang zur Dickenreduzierung in Bezug auf Matrixlängsperkolation ist in den Veröffentlichungen nicht erwähnt.

#### 4.2.2 Phänomene im Feststoffanteil

Neben den Fließphänomenen gehen während der Formgebung beim nicht-isothermen Stempelformen im Feststoffanteil des FKV's mechanische Verformungen sowie Scher- bzw. Abgleitmechanismen in und zwischen den Endlosfasern vor. Diese zu kontrollieren ist für eine optimale Bauteilformung von übergeordneter Bedeutung. Wichtig für das Verständnis ist, dass die hochfesten und hochsteifen Endlosfasern beim Verformen des Verbundes vom verarbeitungstechnischen Standpunkt aus keine plastische Dehnbarkeit in Längsrichtung aufweisen [39][42]. Sie können und werden jedoch aufgrund ihres sehr feinen Querschnitts beim Verformen der Verbundstruktur unter der Krafteinwirkung des Stempels gebogen bzw. biegeverformt.

## Faserbiegen

Die Biegerichtung, d.h. die Achsen, um welche die Endlosfasern während der Formgebung eines Organoblechs gebogen werden, ist von der herzuleitenden Bauteilgeometrie sowie von den Faserverläufen im Schichtaufbau abhängig. Hierbei kann das Biegen der Endlosfasern nach diesen beiden Abhängigkeiten erstens ausbleiben, zweitens einachsig erfolgen sowie drittens mehrachsig von statten gehen. Ein ausschließlich einachsiges interlaminares Biegen von Endlosfasern innerhalb eines Organoblechs tritt generell nur beim einachsigen Biege- oder Ziehformen von Organoblechen auf. Verläuft in diesem Fall eine der beiden Faserhaupttrichtungen eines  $0^\circ/90^\circ$ -Kreuzverbundes oder einer gewebten Struktur parallel zur Biegelinie, werden die parallel verlaufenden Endlosfasern einachsig interlaminar gebogen und die  $90^\circ$  dazu verlaufenden Endlosfasern bleiben trotz Formgebung ideal betrachtet unverformt.

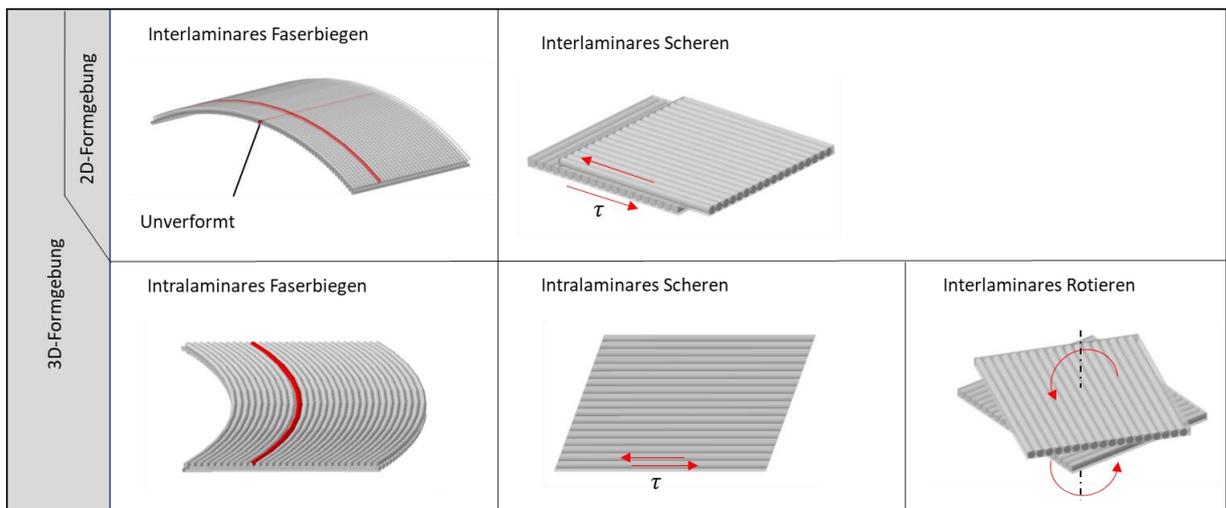


Abb. 31: Verformungsmechanismen im Feststoffanteil von Organoblechen in Anlehnung an [45]

Beim Ausformen von 3D-Geometrien tritt generell in den Kontaktbereichen zu den 3D-gekrümmten Werkzeugoberflächen ein mehrachsiges Biegen der Endlosfasern auf. Dieses resultiert aus einem überlagerten Biegen der Endlosfasern in Richtung der Stempelvorschubbewegung gekoppelt mit einem intralaminaren Biegen in Fasereinzugsrichtung. Auch ein einachsiges intralaminare Biegen der Endlosfasern kann auftreten. Dies ist beispielsweise beim Ziehformen zwischen einem ebenen Einzugsbereich und einem ebenfalls ebenen Niederhalter bei zuvor rechtwinklig zur Haupteinzugsrichtung verlaufenden Endlosfasern der Fall. Das intralaminare Biegen der Endlosfasern wird nach einer 3D-Verformung als Veränderung der Faserverläufe bezogen auf deren Ursprungsorientierung deutlich. Hierbei treten zudem Winkeländerungen zwischen den einzelnen Fasern benachbarter Schichten auf (vgl. Abb. 32). Das Verändern der Winkel von im Schichtaufbau aneinander liegenden Endlosfasern wird in [45] als interlaminares Rotieren bezeichnet.

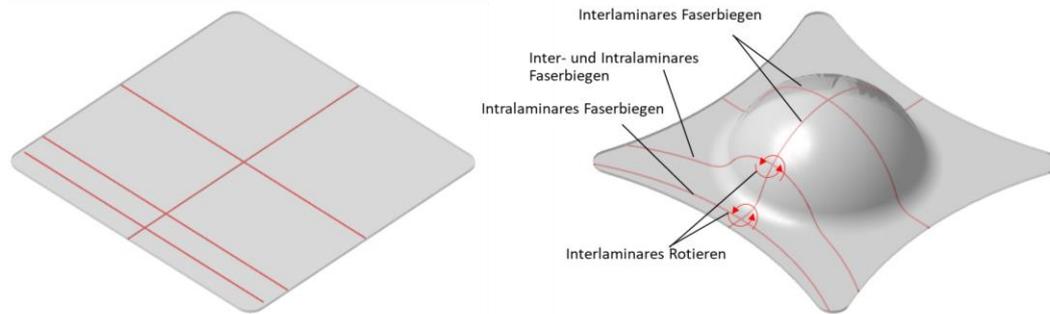


Abb. 32: Faserverlaufsänderungen beim dreidimensionalen Ziehformen von UD-Gelege-Organoblechen

Die Formgebung beim Thermoformen eines FKV's und das damit verbundene Biegen der Endlosfasern gehen im Idealfall immer mit einem gegenseitigen Abgleiten der Endlosfasern aneinander im schmelzflüssigen Matrixkunststoff einher. Hierbei treten je nach herzustellender Geometrie in den Faseranordnungen unterschiedliche Scherphänomene auf. Bei den Scherphänomenen wird in der Literatur zwischen inter- und intralaminarer Scherung unterschieden [41][42][45]. Das Biegen der Fasern in Richtung Stempelbewegung sowie das intralaminare Biegen der Fasern stehen grundsätzlich im direkten Zusammenhang mit den inter- und intralaminaren Scherungen. Daher richtet sich auch das Auftreten von Scherphänomenen, wie das beschriebene Biegen der Endlosfasern, nach der herzustellenden Bauteilgeometrie sowie nach den Faserverläufen im Schichtaufbau.

#### Interlaminares Scheren:

Reines interlaminares Scheren nach [41][42][45], was in [22][46] auch als interlaminares Lagengleiten bezeichnet wird, tritt wie einachsiges Faserbiegen generell nur bei einem einachsigen Biege- oder Ziehformen auf (vgl. Abb. 31). Dies geht idealerweise mit einem aufeinander Abgleiten der Einzellagen einher. Das Abgleiten der Einzellagen wird bei einem faltenfrei biegeverformten Organoblech nach der Formgebung am stufenhaften Erscheinungsbild, an mit der Biegelinie endenden Kanten deutlich (vgl. Abb. 33a). Vereinfacht kann angenommen werden, dass der Gleiteffekt zweier benachbarter Lagen auf Strömungen innerhalb der zwischen den Lagen befindlichen schmelzreichen Kontaktschicht basiert. Aus diesem Ansatz heraus lässt sich die Scherung zwischen den Lagen als „Couette-Strömung“ beschreiben, d.h. als viskose Scherströmung der Schmelze zwischen zwei Platten mit über den Plattenabstand konstanter Scherviskosität. Der Widerstand gegen interlaminares Scheren ist somit von der Viskosität der Schmelze sowie der Schergeschwindigkeit abhängig. Eine unzureichend fließfähige Matrix verhindert die Scherströmung, führt zum Blockieren des Abgleitens und somit zu Faltenbildung im Biegeradius (vgl. Abb. 33b) [41][42][47].

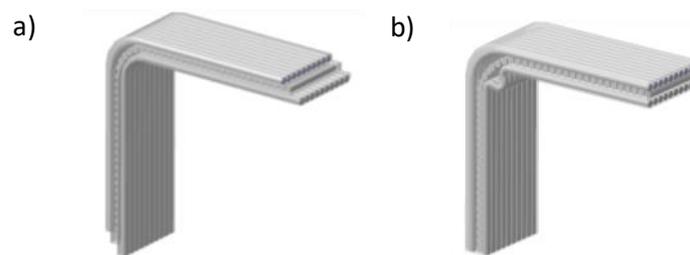


Abb. 33: Interlaminares Lagengleiten (a) und Faltenbildung (b) [41]

**Intralaminare Scheren:**

Intralaminare Scherungen innerhalb der Einzelschichten (vgl. Abb. 31) treten während der Formgebung generell beim Ausformen dreidimensionaler Schalenstrukturen auf. Die intralaminaren Scherungen stehen hierbei im direkten Zusammenhang mit dem bereits erläuterten intralaminaren Biegen der Fasern. Beides ist von der 3D-gekrümmten Oberfläche einer Werkzeugform bzw. Formhälfte abhängig. Die Unterschiede von intralaminarem Scherverhalten von UD-Gelege-Organoblechen und Gewebe-Organoblechen werden von Murtagh und Mallon in [42] sowie Breuer in [48] beschrieben. Demnach gleiten in UD-Gelege-Organoblechen die benachbarten Endlosfasern innerhalb einer Einzelschicht idealerweise parallel aneinander ab. Dies geht mit zu den Fasern tangential gerichteten Scherspannungen einher. Die Scherspannungen sind ähnlich wie beim interlaminaren Scheren insbesondere von der Scherviskosität der fasernumgebenden Thermoplastschmelze abhängig. Beim 3D-Verformen von Geweben kommt es intralaminar neben dem Längsgleiten der Fasern zum sogenannten „Trellis Effect“. Dieser beschreibt die Winkeländerung zwischen den in den Webpunkten senkrecht zueinander verwobenen Faserrovings. Beim 3D-Verformen der Gewebe kommt es während der Stempelvorschubbewegung durch die stetig zunehmende Winkeländerung in den Webpunkten zu einem allmählichen Zuzschnüren dieser mechanischen Verbindungsstellen. Dies geht mit einem größer werdenden Scherwiderstand im Webpunkt einher. Die Winkeländerung kann nur bis zu einem vom Gewebe abhängigen Grenzwinkel erfolgen, der auch als kritischer Scherwinkel bezeichnet wird. Nach Erreichen des kritischen Scherwinkels, kommt es zum Blockieren der Scherbewegungen, was nachfolgend mit einem lokalen Ausknicken der Fasern aus der Laminebene am Webpunkt einhergeht [42][48].

**Gewebestreckung:**

Ein signifikanter Unterschied, was die mechanischen Verformungen sowie Schermechanismen beim Stempelformen von Gewebe- im Vergleich zu UD-Gelege-Organoblech betrifft, ist mit der im Gewebe vorliegenden Ondulation der Fasern verbunden. Als Ondulation wird die Welligkeit zwischen den miteinander verwobenen Faserrovings bezeichnet. Insbesondere beim einachsigen Ziehformen kommt es in den zur Biegelinie verlaufenden Endlosfasern zunächst zum Ausgleichen der Ondulationen, bevor es infolge der vom Stempel induzierten Einzugskräfte zum Auftreten von interlaminaren Scherungen kommt. Das Ausgleichen der Ondulationen wird auch als Gewebestreckung bezeichnet [42][48].

**Loften und Konsolidieren:**

Neben den erläuterten Verformungsmechanismen, die im Organoblech während der Formgebung stattfinden, sind für ein vollständiges Verständnis des Verarbeitungsverhaltens des FKV's beim Thermoformen auch Kenntnisse über das Loften und Konsolidieren der Verbundstruktur von Bedeutung. Das Loften des FKV's tritt grundsätzlich beim Aufschmelzen vom Matrixkunststoff insbesondere beim Einsatz kontaktloser Aufheiztechnologien auf. Hierbei werden die beim Laminieren mittels Heißpresstechnik druckinduzierten Eigenspannungen in der Verbundstruktur aufgehoben. Dies führt besonders in Dickenrichtung des Organoblechs durch das Aufbauschen der Verstärkungsfasern zu Expansionseffekten, die grundsätzlich als Loften bezeichnet werden. Das Aufbauschen der Verstärkungsfasern verdeutlicht sich nach dem Aufheizen neben der geringfügigen Dickenzunahme durch ein verstärktes Abzeichnen der Fasern an den wiederaufgeschmolzenen Oberflächen des Organoblechs. Zudem kommt es interstrukturell beim Loften zu feinen Delaminationen sowie zu Lufteinschlüssen innerhalb der

Verbundstruktur. Das Bilden von Luft einschlüssen bzw. Blasen beim Aufheizen kann durch das Erwärmen nichtvorgetrockneter Organobleche mit stark hydrophiler Kunststoffmatrix verstärkt werden. Diese verstärkte Blasenbildung ist auf ein Verdampfen des im Thermoplast eingelagerten Wassers zurückzuführen [48][49][50].

Zum Ende eines Formgebungsprozesses muss der beim Aufheizen expandierte FKV wieder verdichtet und verfestigt werden. Dieser Vorgang wird als Konsolidieren bezeichnet. Vor dem Einsetzen der Verfestigung der Thermoplastschmelze muss der verformte Faserverbund so verpresst werden, dass die beim Loften und Verformen eingeschlossene Luft wieder aus diesem herausgedrückt wird [40][42].

### 4.3 Stempelformen von Organoblechen

#### 4.3.1 Allgemeiner Prozessablauf

Das nicht-isotherme Stempelformen von endlosfaserverstärkten Organoblechen mit metallischem Werkzeug kommt heutzutage für Großserienproduktionen z.B. in der Automobilindustrie zum Einsatz. Hier wird es, wie in Abschnitt 4.4 beschrieben, direkt mit dem Thermoplastspritzgießen kombiniert, um die im Stempelformprozess geformten FKV-Strukturen direkt zu komplex funktionalisierten Fertigteilen zu verarbeiten. Im industriellen Umfeld hat sich für das nicht-isotherme Stempelformen ein Prozessablauf mit vorgeschaltetem IR-Aufheizprozessschritt vor der werkzeugbestimmenden Formgebung etabliert. Dieser Prozessablauf ist nachfolgend in Abbildung 34 schematisch veranschaulicht [51][52][53].

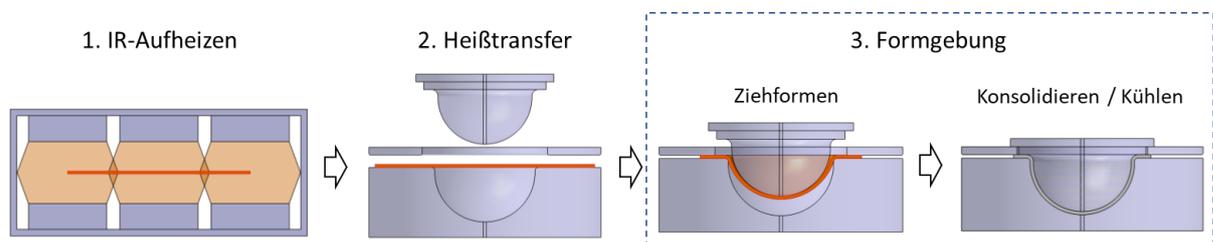


Abb. 34: Schematische Darstellung zum nicht-isothermen Stempelformen in Anlehnung an [54]

Die Formulierung „Nicht-isotherm“ bezieht sich auf den thermischen Zustand des Organoblechs, der während der gesamten Prozessführung stetigen Änderungen unterliegt. Abbildung 34 veranschaulicht im ersten Prozessschritt das IR-Aufheizen des Organoblechs in einem doppelseitigen IR-Strahlerfeld. Hierbei wird das Organoblech generell flächig auf eine Temperatur deutlich oberhalb der Schmelztemperatur der im FKV enthaltenen Thermoplastmatrix erwärmt. Direkt danach, d.h. beim Heißtransfer, hier als 2. Prozessschritt gekennzeichnet, verliert das Organoblech bereits beim Öffnen des Ofens und während des Transfers ins Formgebungswerkzeug an zuvor beim IR-Aufheizen gespeicherter Wärme. Dies spiegelt sich in zu den Randbereichen niedriger werdenden Temperaturen wieder. Die Wärmeabgabe beim Transfer ist auf konvektive Wärmeübertragung an die Umgebungsluft über die Organoblechoberflächen zurückzuführen. Beim dritten Prozessschritt, der Formgebung, erfolgt im deutlich unter dem Schmelztemperaturbereich des Matrixkunststoffs temperierten Formgebungswerkzeug die Wärmeabfuhr über Konduktion sowie Konvektion. Dies erfolgt in Abhängigkeit von den kontaktierten bzw. nicht kontaktierten Organoblechoberflächen mit den metallischen Werkzeugwänden. Nach dem Verformen kommt es zu einer reinen konduktiven Wärmeabfuhr über die Werkzeugwände, wobei die

Thermoplastmatrix und somit der FKV unter dem einwirkenden Druck des Werkzeugs erstarrt (vgl. Abb. 34). Das Verfestigen des Faserverbunds unter Druck und Wärmeabfuhr wird, wie in Abschnitt 4.2.2 erläutert, als Konsolidieren bezeichnet. Zum Ende der Formgebung wird das hergestellte Bauteil gekühlt und abschließend entformt [54][55].

### 4.3.2 Transfer und Greiferelemente

Beim Stempelformen von Organoblechen ist vor und nach dem Aufheizprozess jeweils ein Transfervorgang notwendig, um den kalten Organoblechzuschnitt aus dem Halbzeugmagazin in den IR-Ofen und von dort aus unter Verarbeitungstemperatur ins Werkzeug zu transportieren. Hierfür kommen in industriellen Fertigungsanlagen Robotersysteme wie Knickarm- oder Linearroboter mit unterschiedlichen Greifersystemen zur Anwendung. Nach dem jeweiligen thermischen Zustand wird vom fertigungstechnischen Standpunkt aus der erste Transferschritt als Kalt- und der zweite als Heißtransfer bezeichnet. Zu berücksichtigen ist das für den Kalt- und Heißtransfer vom Organoblech oftmals unterschiedliche Greiferelemente am Roboter greifer verwendet werden müssen. Der Transfer im kalten Zustand hat generell keinen Einfluss auf das Ergebnis der Formgebung. Auch das Greifen vom Organoblech ist beim Kalttransfer generell mit vergleichsweise geringem technischem Aufwand umsetzbar und kann über einfache Sauggreifer aus beispielsweise Silikon oder Polyurethan erfolgen (vgl. Abb. 35a) [56].

Im Gegensatz dazu hat der Heißtransfer bzw. der Transfervorgang nach dem Aufheizprozessschritt signifikanten Einfluss auf das Verarbeitungsverhalten des Verbundsystems. Der Transfer des heißen Zuschnitts muss innerhalb weniger Sekunden erfolgen, um ein zu starkes Abkühlen des Organoblechs unter Raumtemperatur vor der Formgebung zu vermeiden. Zudem sind für den Transfervorgang neben dem schnellen Bewegungsablauf eine hohe Positioniergenauigkeit sowie reproduzierbare Transferzeiten von Bedeutung. Das Greifersystem am Roboter kann neben einem einfachen Greifvorgang beim Heißtransfer auch weitere Funktionen für den nachfolgenden Formgebungsschritt übernehmen. Dies kann beispielsweise ein Vorformen des aufgeheizten Organoblechs sein oder auch ein Vorspannen des Verbunds während der Formgebung im Werkzeug [57][58][54]. Für das Greifen des heißen Organoblechzuschnitts mit schmelzeflüssigem Matrixsystem sind unterschiedliche Greiferelemente verfügbar, wobei die drei für die Arbeit relevanten Greiferelemente beispielhaft in der folgenden Abbildung 35 dargestellt sind.

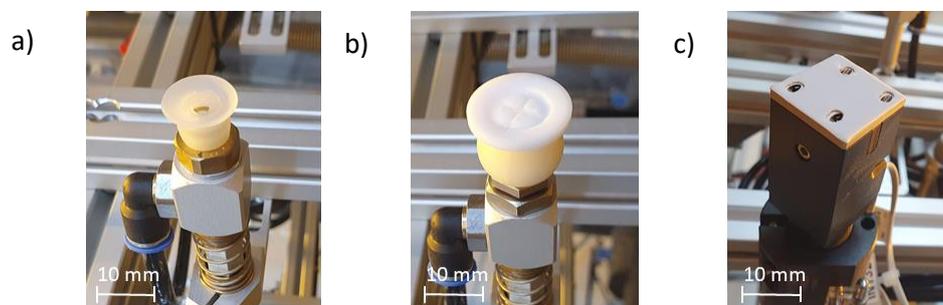


Abb. 35: Vakuumsauggreifer aus Silikon für den Kalttransfer (a) sowie Vakuumsauggreifer aus Teflon (b) und Nadelgreifer (c) für den Heißtransfer

Für vakuum- bzw. unterdruckbasiertes Greifen von aufgeheizten Organoblechen sind beispielsweise Sauggreifer aus Teflon verfügbar. Diese ermöglichen ein Greifen des Organoblechs bis zu einer

Verarbeitungstemperatur von 300°C. Der Vorteil der Teflonsauggreifer gegenüber konventionellen Sauggreifern aus beispielsweise Silikon besteht in den Antihafteigenschaften des Teflons. Diese verhindern ein Festkleben des schmelzflüssigen Matrixsystems beim Transfer [59]. Für den Transfer des vertikal hängenden oder auch vorgespannten Organoblechs eignen sich Klemmzangen. Diese werden zum Greifen pneumatisch betätigt. Ebenfalls pneumatisch betätigt werden Nadelgreifer (vgl. Abb. 35c). Mit Nadelgreifern wird die Kraftübertragung zum Greifen durch ein Verhaken mehrerer winklig ins heiße Organoblech einstechenden Nadeln sichergestellt [60].

### 4.3.3 Kraft- und Spannungsverhältnisse beim Ziehformen

Die Kraft- und Spannungsverhältnisse sowie die Materialantwort, welche beim Stempelformen von rotationssymmetrischen FKV-Strukturen nach dem Ziehformprinzip auftreten, sind grundsätzlich mit denen, die aus der Näpfchenprüfung nach Swift für das Metallblechtiefziehen bekannt sind, vergleichbar. Breuer schlägt in [48] einen angepassten Versuchsaufbau zur Näpfchenprüfung vor, um unterschiedliche Gewebe-Organobleche hinsichtlich ihrer Tiefzieheignung zu quantifizieren. Neben dem Ermitteln von Grenzziehverhältnissen der Organobleche, die hier mit denen von Stahl- und Aluminiumblechen verglichen werden, zeigen die dargestellten Versuchsergebnisse die Wichtigkeit des Aufrechterhaltens von Membranspannungen im FKV beim Ziehformen. Diese werden im Versuch über einen druckinduzierenden Niederhalter mit dem Auftreffen des Stempels ins Organoblech eingeleitet und während des Ziehformens über den Niederhalter aufrechterhalten. Dies trägt dazu bei, ein Bilden von Falten während der Formgebung zu vermeiden. Die nachfolgende Abbildung 36 veranschaulicht die Spannungssituation, die aus [61] zur Näpfchenprüfung nach Swift bekannt ist und mit den Beschreibungen aus [39] korreliert.

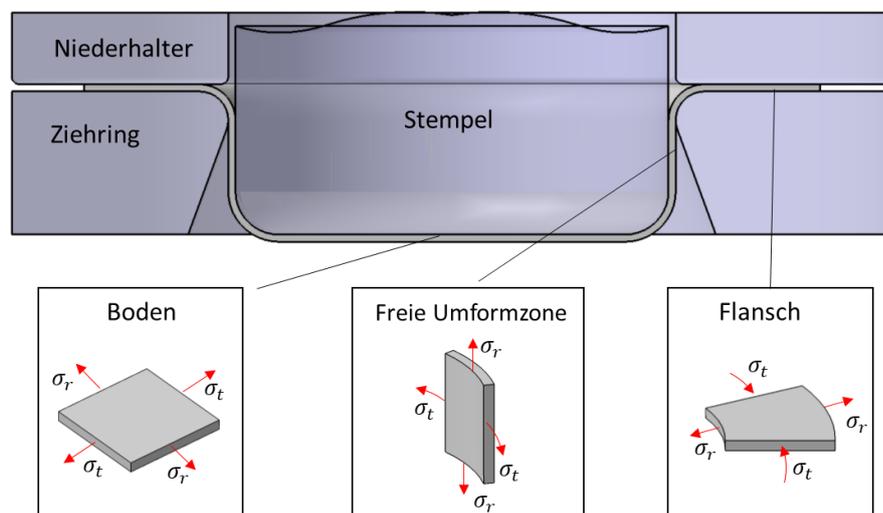


Abb. 36: Spannungsverhältnisse beim Tiefziehen [61]

Das einzuziehende Material unterliegt im Flanschbereich während der Formgebung einer Überlagerung von Radialzug- und Tangentialdruckspannungen. Infolge der Tangentialdruckspannungen kann es im Flanschbereich zum Ausknicken des einzuziehenden Halbzeugs und somit zur Bildung von Falten quer zur Radialbeanspruchung kommen. Ein derartiges Verhalten ist auch aus den Veröffentlichungen [48][39] beim Stempelformen rotationssymmetrischer Versuchsstrukturen aus Organoblechen bekannt. Falten im Einzugsbereich werden in der Literatur zum Tiefziehen als Falten 1. Art definiert.

Falten 1. Art können grundsätzlich über einen erhöhten Druck des Niederhalters, der umlaufend im Randbereich eine definierte Flächenlast auf das einzuziehende Material aufbringt, reduziert oder vollständig unterbunden werden. Hierbei ergibt sich eine Superposition aus Radialzug-, Tangentialdruck- sowie Normaldruckspannungen im Flanschbereich des einzuziehenden Halbzeugs. Während der Formgebung befindet sich zwischen den Kontaktbereichen von Stempel und Halbzeugmitte sowie von Einzugs-kante und Flansch eine freie Umformzone, an der das Halbzeug zeitweise keinen Kontakt zum Werkzeug aufweist. Bei einem ungünstigen Spannungsverhältnis kann es hier beim Einziehen des Blechs zum Bilden von Falten kommen. Falten, die mit der Tiefziehtechnik in der freien Umformzone auftreten, werden den Falten 2. Art zugeordnet. Im Bodenbereich wirken vom Bodenmittelpunkt aus in Richtung Kraftübertragungszone radiale und tangentielle Zugspannungen. In der Kraftübertragungszone kann es bei zu hohen Einzugskräften zu Reißern kommen, was ggf. über eine Verringerung der Niederhalterkraft korrigiert werden kann [61]. In Bezug auf einen Faserverbund ist das Einreißen des Organoblechs mit einem Brechen der Fasern verbunden [48]. Darüber hinaus können beim Stempel-formen von Organoblechen während der Formgebung eine Vielzahl an weiteren Fehlern auftreten, auf welche in [48][54][57] vertiefend eingegangen wird.

Der Stempelkraft sind im Stempelformprozess, angelehnt an die Nüpfchenprüfung nach Swift, der Widerstand des Organoblechs gegen Verformung, eine Kompressionskraft im Bereich des Niederhalters sowie diverse Reibungskräfte entgegen gerichtet. Der Widerstand des Organoblechs gegen ein Verformen ergibt sich aus den im Vorfeld erläuterten Verformungsmechanismen, hierbei ist noch ein lokales Kompaktieren der Endlosfasern in intralaminar druckbeanspruchten Bereichen zu erwähnen. Die Reibungskräfte, die sich beim Einziehen des Halbzeugs ergeben, sind im Bereich der Einzugs-kante sowie im Kontaktbereich zwischen dem Niederhalter und der Negativform lokalisiert. Auch beim Stempelformen besteht ein direkter Zusammenhang zwischen der notwendigen Stempelkraft und beiden Reibe-kräften. Diese steigen mit dem Erhöhen der vom Niederhalter aufgebrauchten Flächenlast an. Das Überschreiten einer maximalen Niederhalterkraft führt nach den Untersuchungen aus [48][39] zum vorzeitigen Reißen des Organoblechs. Auf Grund dessen kann die Niederhalterkraft zum Erhalt einer falten-freien Ausformung nur in einem bestimmten Bereich variiert werden. Im Unterschied zum Tiefziehen muss über den Stempel zum Ende der Formgebung eine Kompressionskraft aufgebracht werden, mit der der thermoplastische FKV im Werkzeugspalt verdichtet und somit optimal konsolidiert werden kann. Hierfür kommen teilweise sehr leistungsfähige Pressen zum Einsatz. Um den minimalen Hohlraum- bzw. Porengehalt zu erzielen, sind aus der Literatur Konsolidierungsdrücke von bis zu 7 bar bekannt. Diese variieren je nach Verbundsystem und Organoblechdicke [40].

#### 4.4 Hybrides Thermoformspritzgießen mit Organoblechen

Das Stempelformen von Organoblechen wird mittlerweile industriell in ausgereiften Fertigungsanlagen mit dem Thermoplastspritzgießen kombiniert. Diese Verfahrenskombination aus Stempelformen und Spritzgießen ermöglicht es, die aus einem Organoblech hergestellte endlosfaserverstärkte Schalenstruktur noch im gleichen Werkzeug mit geometrisch komplexen Funktionselementen aus kurz- oder langfaserverstärktem Thermoplast bzw. Spritzgusscompound zu erweitern. Relevante Funktionselemente, die an den schalenförmigen Strukturen hinter- bzw. angespritzt werden, sind oftmals Verstärkungsrippen und Anschraubdomen. Um nachträgliche Besäumungsprozesse einzusparen, wird generell auch ein definierter Randabschluss um die thermogeformte Schalenstruktur spritzgegossen. Somit eignet sich das hybride Thermoformspritzgießen, was unter dem Markennamen „Organomelt“ oder „Fiberform“ vermarktet wird, zur Herstellung von verwertungsfertigen Strukturbauteilen. Die erreichbaren Zykluszeiten liegen entsprechend dem Anspruch an Großserientauglichkeit im Bereich von ca. einer Minute. Zur Veranschaulichung sind in der nachfolgenden Abbildung 37 zwei mittels Thermoformspritzgießen hergestellte Versuchsstrukturen aus GF/PP-Organoblech als Gelege und Gewebe sowie kurzfaserverstärkten Polypropylen dargestellt [24][51][62].

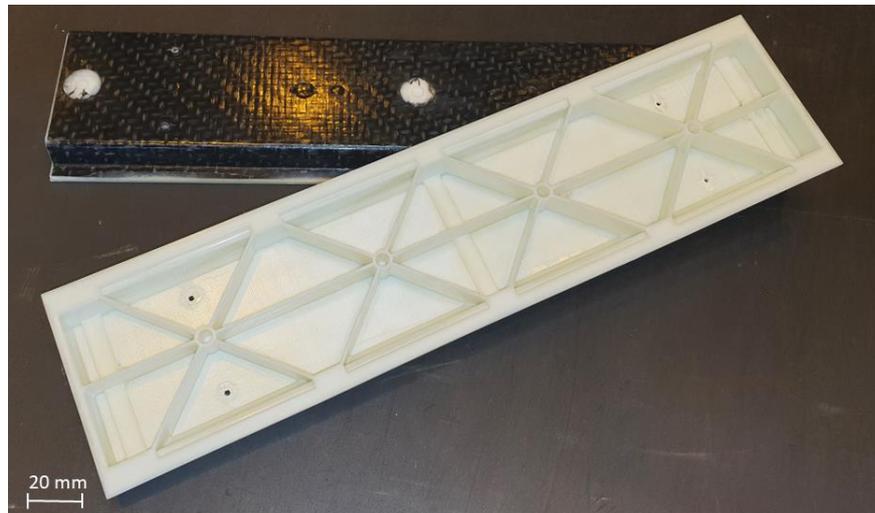


Abb. 37: Mittels Thermoformspritzgießen hergestellte Versuchsstrukturen

Im Vergleich zu einer Anlage zum selektiven Thermoformen eines Organoblechs in einer Presse, erfolgt der Formgebungsprozess beim Thermoformspritzgießen innerhalb einer Spritzgussmaschine. Als weitere Anlagenkomponenten verfügen hybride Thermoformspritzgussanlagen neben der Spritzgussmaschine über ein IR-Aufheizsystem bzw. IR-Ofen, ein oder mehrere Transferroboter sowie ein Halbzeugmagazin für die zu verarbeitenden Organoblechzuschnitte. Die nachfolgende Abbildung 38 veranschaulicht eine in der dargestellten Form industriell verfügbare Thermoformspritzgussanlage mit vertikalschließender Spritzgussmaschine sowie einem IR-Aufheizsystem bzw. IR-Ofen mit horizontal ausgeführter Arbeitsebene.

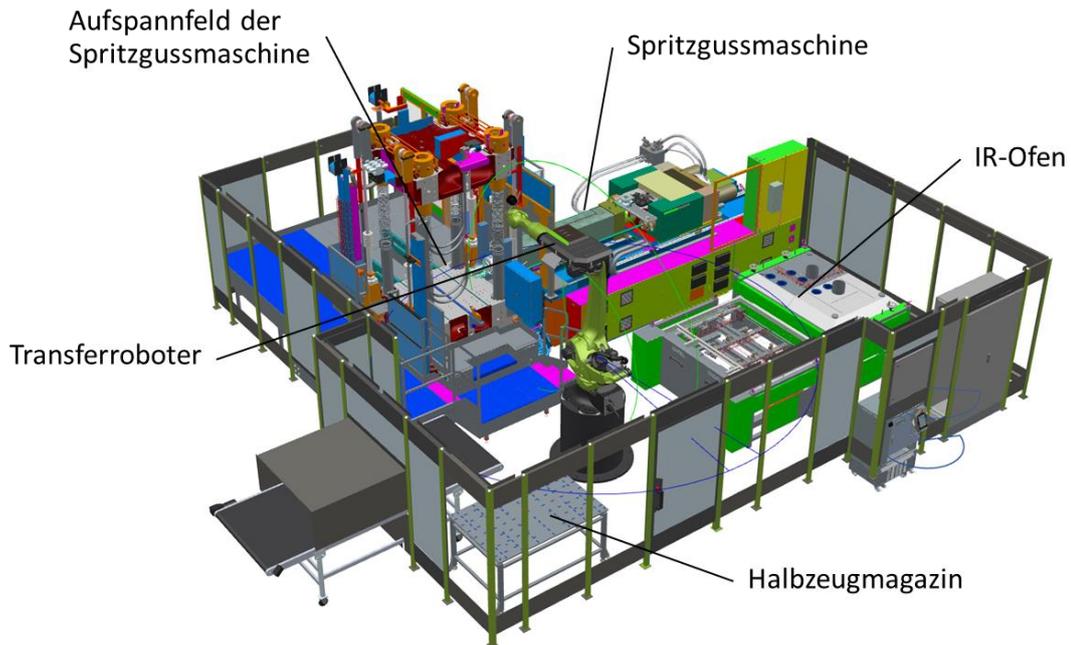


Abb. 38: Industrielle Thermoformspritzgussanlage mit vertikalschließender Spritzgussmaschine

Technologisch vorteilhaft am dargestellten Anlagenaufbau mit horizontal arbeitendem IR-Aufheizsystem ist, wie in Abschnitt 3.3.2 erläutert, dass das Organoblech zwischen den Strahlerfeldern ohne zusätzliche Spannsysteme auf einem Gitterrost positioniert werden kann. Dies erleichtert im Besonderen das IR-Aufheizen von komplexeren Organoblechzuschnitten, die im verformbaren Zustand nur bedingt mittels Spannrahmen oder Spannklemmen im IR-Aufheizsystem ohne Abschattungseffekte gehalten werden können. Gleichermäßen ermöglicht der Einsatz des vertikal schließenden Aufspannfelds der dargestellten Spritzgussmaschine ein einfaches Ablegen des Organoblechs auf der Unterseite des horizontal ausgerichteten Werkzeugs. Wie in [51] erläutert, sind industriell auch Verarbeitungsanlagen mit horizontal schließender Spritzgussmaschine und vertikal arbeitendem IR-Aufheizsystem verfügbar. Hier ist das IR-Aufheizsystem generell oberhalb des Werkzeugaufspannbereichs der Spritzgussmaschine angeordnet. Essentieller Vorteil eines solchen Anlagenaufbaus ist der kürzere Transferweg und somit die geringere Transferzeit vom robotergeführten Transport des nach dem IR-Aufheizen heißen Organoblechs ins hybride Thermoformspritzgusswerkzeug. Ein weiterer industriell bedeutsamer Vorteil der horizontal schließenden Spritzgussmaschine ist, dass das hergestellte Bauteil nach Vollendung eines Fertigungszyklus werkzeugfallend, d.h. ohne Zutun eines Entnahmeroboters entformt werden kann.

Der Thermoformprozess mit einer Thermoformspritzgussanlage unterscheidet sich nicht bzw. nur unwesentlich von dem in Abschnitt 4.3.1 grundsätzlich erläuterten Stempelformen von Organoblechen bzw. dem in Abbildung 34 dargestellten Prozessablauf. Hier ergänzen sich lediglich die konventionellen Prozessschritte eines Standardspritzgusszyklus nach der Formgebung des Organoblechs. Das Spritzgießen startet generell nach dem Schließen des Werkzeugs, d. h. mit der einsetzenden Konsolidierungsphase des endlosfaserverstärkten FKV. Hierbei erfolgt zunächst das Einspritzen der Spritzgussmasse in die bis dahin nicht gefüllten Kavitätsbereiche des Werkzeugs. Nach der vollständigen Formfüllung der Spritzgussbereiche wird die Spritzgussmasse im Rahmen einer direkt anschließenden Nachdruckphase zur Schwundreduktion kompaktiert. Direkt nach dem Nachdrücken erfolgt die finale

Abkühlphase, wobei fortschreitend beide Materialsysteme verfestigt werden. Hierbei wird im deutlich unterhalb der Schmelztemperatur des thermoplastischen Kunststoffes temperierten Werkzeug das hybride Bauteil auf einen formstabilen Zustand gebracht. Nach Erreichen des formstabilen Zustands wird das Werkzeug geöffnet und das Bauteil abschließend entformt. Da das Spritzgießen des kurz- oder langfaserverstärkten Thermoplasts direkt zu Beginn der Konsolidierungsphase eingeleitet wird und zu diesem Zeitpunkt die Thermoplastmatrix des endlosfaserverstärkten FKV's noch nicht gänzlich erstarrt ist, wird zwischen beiden Materialsystemen ein stoffschlüssiger Verbund vergleichbar mit einer Kunststoffschweißverbindung herbeigeführt. Um eine optimale Anbindung vom Spritzgussmaterial am Organoblech sicherzustellen, wird generell auf die Verarbeitung von artgleichen Matrixpolymeren bei beiden Materialsystemen zurückgegriffen. Aktuellste Forschungsarbeiten beschäftigen sich mit dem Recyceln von hybriden Thermoformspritzgussbauteilen. Hier wird die Verarbeitung von Organoblechen und Spritzgusscompound mit artgleichem Grundpolymer mit Bezug auf das Matrixsystem empfohlen, was zur besseren Recyclbarkeit der hergestellten Bauteile nach dem Produktlebenszyklus beitragen soll [51][53][62].

## 5 IR-Aufheizen von thermoplastischen FKV's

Die fertigungsbedingten Aspekte zum Thermoformen von Organoblechen, mit besonderem Bezug auf die Formgebung, wurden bereits vertiefend im Abschnitt 4 erläutert. Dieser 5. Abschnitt beschäftigt sich mit dem IR-Aufheizen von Organoblechen sowie thermoplastischen FKV-Sandwichzuschnitten, was die Grundlage für einen optimalen Formgebungsschritt darstellt. Hierzu werden zunächst industriell verfügbare Strahlungsquellen für das IR-Aufheizen von thermoplastischen FKV's erläutert. Weiterführend werden der grundsätzliche Aufbau, die Funktionsweise sowie die Steuerung von industriell eingesetzten IR-Aufheizsystemen am Beispiel des im Bearbeitungszeitraum an den aktuellen Stand der Technik angepassten IR-Ofens des Fraunhofer IMWS erläutert. Zudem wird auf Untersuchungen und Weiterentwicklungen zur Prozess- und Anlagentechnik eingegangen, die ein IR-Aufheizen von thermoplastischen FKV-Sandwichzuschnitten passend zu den in Abschnitt 6.3 bis 6.4 erläuterten Formgebungsprozessschritten ermöglicht.

### 5.1 IR-Strahlungsquellen

Um plattenförmige thermoplastische FKV's beim Thermoformen optimal auf eine vom thermoplastischen Matrixmaterial abhängige Verarbeitungstemperatur zu erwärmen, sind IR-Aufheizsysteme mit unterschiedlichen diffusen IR-Strahlungsquellen verfügbar. Die in den IR-Aufheizsystemen eingesetzten bzw. einsetzbaren Strahlungsquellen unterscheiden sich im zu emittierenden IR-Strahlungsspektrum bzw. Wellenlängenbereich. Relevant für das IR-Aufheizen von thermoplastischen FKV's sind im Wesentlichen mittel- und kurzwellige IR-Strahlung emittierende Strahlungsquellen. Zur Strahlungsemission von mittel- oder kurzwelliger IR-Strahlung besteht, wie auch in Abbildung 24 nachvollziehbar ist, ein deutlicher Unterschied bezüglich der an den Strahlungsquellen vorliegenden Oberflächentemperaturen. Beispielsweise bedingt das Emittieren von überwiegend kurzwelliger IR-Strahlung, d.h. Strahlung mit einem Intensitätsmaximum im Wellenlängenbereich von 1-1,5  $\mu\text{m}$ , Oberflächentemperaturen von 1800-2200°C. Im Gegensatz dazu sind zum Erzeugen technisch nutzbarer mittelwelliger IR-Strahlung, in einem Wellenlängenbereich von 2-3  $\mu\text{m}$ , bereits Oberflächentemperaturen von ca. 800-950°C ausreichend. Angepasst an die zu erreichende Oberflächentemperaturen kommen für die Strahlungsquellen unterschiedliche Materialien wie Stahl, Kohlenstoff oder auch Wolfram zum Einsatz. Die Strahlungsquellen werden innerhalb der IR-Strahler entweder frei als beispielsweise dünne Folienbänder auf stark wärmeisolierenden Trägerplatten befestigt oder sind filamentartig ausgeführt und zum Schutz vor Umgebungseinflüssen in Glasröhren aus Quarz gelagert. Abbildung 39 visualisiert den für die vorliegende Arbeit relevanten mittelwelligen IR-Strahler der Firma „Krelus AG“ [63][64][65].

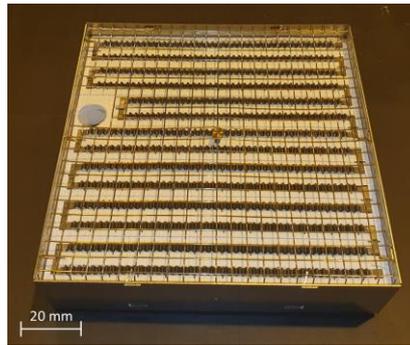


Abb. 39: Mittelwelliger IR-Strahler für das IR-Aufheizen von Organoblechen

Der signifikante Unterschied beim IR-Aufheizen von thermoplastischen FKV's mit kurz- oder mittelwelliger IR-Strahlung liegt in der Eindringtiefe der Wärmestrahlung in das aufzuheizende Objekt. Hiervon leitet sich auch das Einsatzfeld der jeweiligen Strahlungsquellen in technischen Anwendungen ab. Kurzwellige IR-Strahlung emittierende Strahlungsquellen kommen dann zum Einsatz, wenn tiefere Eindring- bzw. Absorptionstiefen notwendig sind. Dies ist beispielsweise in der Kunststoffschweißtechnik der Fall oder beim IR-Aufheizen von Halbzeugen mit höherer Plattenstärke bzw. Blechdicke. Gegensätzlich verhält es sich mit mittelwelliger IR-Strahlung. Hier dringen die elektromagnetischen Wellen generell nur wenige Zehntel Millimeter tief ins thermoplastische Material bzw. Verbundsystem ein, was zu einer schnellen oberflächlichen Erwärmung führt. Aus diesem Grund kommen mittelwellige IR-Strahlungsquellen generell in IR-Aufheizsystemen zur Verarbeitung von Organoblechen bis maximal 3mm Blechdicke bei beidseitiger Bestrahlung zur Anwendung [64][66][19].

## 5.2 Aufbau von IR-Aufheizsystemen

Die in Abbildung 39 dargestellten mittelwelligen IR-Strahler der „Krelus AG“ kommen in den IR-Aufheizsystemen von Thermoformspritzgussanlagen, der derzeit weltweit führenden Maschinenhersteller, „Krauss Maffei GmbH“ und „Engel Austria GmbH“, zum Einsatz. Detailliertere Beschreibungen zu den technologisch sehr weit entwickelten IR-Aufheizsystemen bzw. IR-Öfen beider Maschinenhersteller sind in [66] und [55] zu finden. Mit diesen lassen sich carbon- und glasfaserverstärkte Organobleche mit thermoplastischen Matrixkunststoffen wie z.B. PP, PA oder PEI flächig homogen auf eine einheitliche Verarbeitungstemperatur erwärmen. Wie im Abschnitt 6 erläutert, konnte im Rahmen der Arbeit zudem nachgewiesen werden, dass derartige IR-Aufheizsysteme auch zum prozesssicheren Erwärmen von thermoplastischen FKV-Sandwichverbundstrukturen mit endlosfaserverstärkten Deckschichten und Wabenkern geeignet sind. Der Nachweis erfolgte mit dem in der Abbildung 40 dargestellten IR-Ofen des Fraunhofer IMWS. Dieser wurde nach dem in [66] und [55] erläuterten Stand der Technik angepasst. Des Weiteren erfolgte eine Weiterentwicklung der Prozesstechnik, um beim IR-Aufheizen zwei flächenhaft voneinander abgrenzbare Bereiche am zu erwärmenden Zuschnitt mit unterschiedlich hohen Temperaturniveaus einzustellen.

Der IR-Ofen ist analog zu industriell verfügbaren IR-Strahlungssystemen zum IR-Aufheizen von 1-3mm dicken Organoblechen mit zwei gegeneinander gerichteten Strahlerfeldern ausgestattet. Dies ermöglicht eine doppelseitige Bestrahlung und somit einen annähernd symmetrischen Wärmeeintrag über beide Oberflächen eines Organoblech- oder FKV-Sandwichzuschnitts. Die Arbeitsebene des IR-Aufheizsystems ist horizontal ausgeführt. Auf Höhe der Arbeitsebene befindet sich ein Gitterrost, bestehend aus einem Rahmen und federgespannten Stahldrähten. Auf diesen lassen sich die zu erwärmenden Zuschnitte in liegender Position zentral zwischen beiden Strahlerfeldern erhitzen. Zum IR-Aufheizen der in Tabelle 4 aufgeführten FKV-Sandwichzuschnitte mit vergleichsweise dünnen Deckschichten ist ein kleiner Drahtdurchmesser (hier

0,5mm) notwendig, um von den Stahldrähten ausgehende Abschirm- sowie Abkühlereffekte zu vermeiden. Das horizontale Positionieren des Zuschnitts auf einem Drahtgitter vereinfacht das robotergeführte Ablegen und Entnehmen beim Halbzeugtransfer, vermeidet unerwünschte Verformungen des Zuschnitts bei Erreichen der Verarbeitungstemperatur und ermöglicht eine IR-Strahlungserwärmung ohne lokale Abschirmeffekte durch ansonsten notwendige Spann- bzw. Haltevorrichtungen an den entsprechenden Haltepunkten. Der Strahlungsraum vom IR-Aufheizsystem ist bei geschlossenem Arbeitszustand nahezu vollständig durch eine Einhausung aus nichtrostenden Stahlblechen nach außen hin abgeschirmt. Oberhalb des Gehäuses befindet sich der Halbzeugvorrat, wo die kalten Zuschnitte vor der Prozessführung zu platzieren sind. Die Abstände beider Strahlerfelder zur Arbeitsebene sind so gewählt, dass die Unterbrechungen zwischen den einzelnen diffusen Strahlungsquellen der aneinandergereihten IR-Strahler sich nicht negativ auf die Homogenität der Bestrahlung der beiden aufzuheizenden Zuschnittsoberflächen auswirken. Dies wurde angelehnt an Untersuchungen zum IR-Aufheizen von naturfaserverstärkten Organoblechen von J. Džalto in [50] umgesetzt. Džalto ermittelte zum Erhalt eines ausreichend homogenen Aufheizergebnis mit den IR-Strahlern der Firma „Krelus AG“ jeweils einen Abstand größer 10 cm zwischen der Arbeitsebene und den Strahlerfeldern. Die folgende Abbildung 40 zeigt den beschriebenen IR-Ofen im geöffneten Zustand (vgl. Abb. 40a) sowie eine CAD-Darstellung der doppelseitigen Strahlerfelder, einschließlich Gitterrost, Pyrometer, Blendensystem und im Arbeitsbereich ausgerichtetem Sandwichzuschnitt (vgl. Abb. 40b).

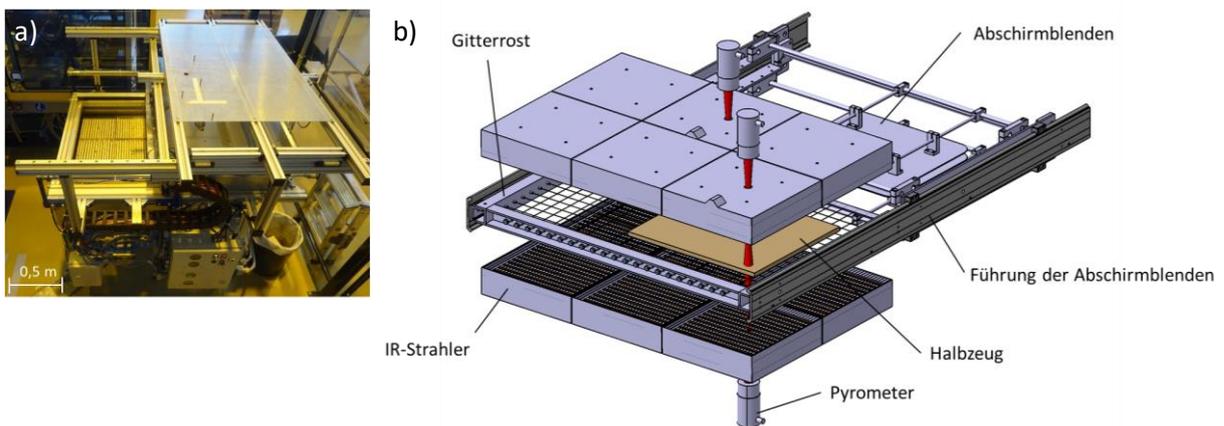


Abb. 40: Weiterentwickelter IR-Ofen (a) sowie CAD-Darstellung des Strahlerfelds einschließlich Pyrometer Gitterrost und Blendensystem (b)

Wie auch in [67] näher erläutert, dienen die Pyrometer der Regelung der einzustellenden Oberflächentemperatur am aufzuheizenden Zuschnitt. Von den Pyrometern wird jeweils nur für einen kleinen kreisförmigen Messbereich die für die Regelung notwendige Oberflächentemperatur erfasst. Um dennoch einen gleichmäßigen Wärmeeintrag beim IR-Aufheizen eines großflächigen Zuschnitts zu erzielen, kann die Regelung der Oberflächentemperatur beidseitig über vier Messstellen am aufzuheizenden Objekt erfolgen. Die berührungslose Messung der Oberflächentemperatur am jeweiligen kreisförmigen Messbereich erfolgt indirekt, durch die Erfassung der von dort aus emittierten IR-Strahlungswärme auf ein im Pyrometer befindliches Detektorelement. Als Detektorelemente von Pyrometern kommen beispielsweise pyroelektrische oder thermopile Sensoren zum Einsatz, über die sich die Wärmestrahlung in ein elektrisches Signal wandeln lässt. Das Fokussieren der vom Messfleck emittierten Strahlung auf das Detektorelement erfolgt über die im Pyrometer enthaltene Eingangsoptik bzw. dem darin befindlichen Linsensystem [68][69]. Die Eingangsoptik bestimmt somit den für die Messung relevanten Strahlengang, welcher in Abbildung 40b für die im IR-Ofen

verbauten Pyrometer dargestellt ist. Dieser ist so ausgelegt, dass die Messung mit dem Pyrometer ohne das Erfassen von weiteren Strahlungseinflüssen anderer am IR-Aufheizsystem befindlichen Oberflächen erfolgt. Dies bedingt, wie in Abbildung 40b dargestellt, dass der Strahlengang zum Pyrometer sowie die im IR-Strahler enthaltene Durchgangsbohrung optimal fluchten. Das über die Strahlung im Detektorelement erzeugte elektrische Signal wird als analoge Regelgröße von der Steuerung des IR-Aufheizsystems verarbeitet.

Zum Einstellen von zwei unterschiedlichen Temperaturniveaus am zu erwärmenden Zuschnitt nach dem im Abschnitt 5.3.2 erläuterten einstufigen IR-Aufheizprozess mit zwischenzeitlicher Abschirmphase wurde das IR-Aufheizsystem um eine hierfür entwickelte Abschirmtechnik erweitert. Diese beinhaltet das in Abbildung 41 dargestellte Blendensystem sowie eine in der SPS hinterlegte Steuerungsroutine. Das Blendensystem wird, angelehnt an bekannte Kunststoffschweißtechniken, die zum Herleiten einer linienförmigen Fügezone mit flächigen IR-Strahlern einsetzbar sind, mit metallischen Abschirmblenden ausgestattet. Diese müssen passend zum aufzuheizenden Zuschnitt sowie zur herzustellenden Bauteilgeometrie ausgeführt sein. Die Abschirmbleche sind translatorisch zur Arbeitsebene bzw. zum Gitterrost im IR-Ofen gelagert. Dies ermöglicht, abweichend zu bekannten festgelagerten Abschirmblenden aus der Kunststoffschweißtechnik, ein lediglich zeitlich begrenztes Abschirmen von Flächenbereichen des aufzuheizenden Zuschnitts. Diese zeitlich begrenzt abgeschirmten Flächenbereiche weisen, wie in Abschnitt 5.3.2 näher erläutert, nach Ablauf des IR-Aufheizprozesses ein niedrigeres Temperaturniveau im Vergleich zu den nichtabgeschirmten Zuschnittsbereichen auf.

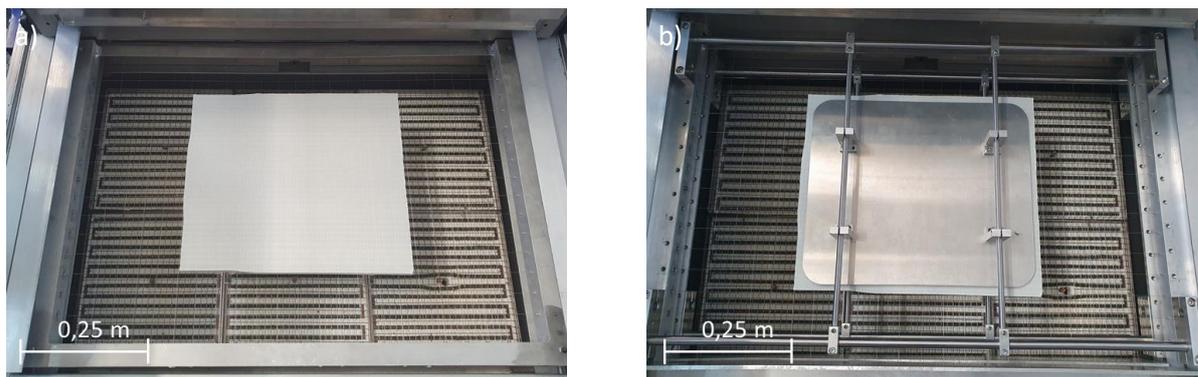


Abb. 41: Abschirmblenden im IR-Ofen in der Position zur flächigen Strahlungsbeaufschlagung (a) sowie für das zwischengeschaltete Abschirmen (b)

Als Abschirmblenden eignen sich blanke Aluminiumbleche, die generell Oberflächen mit einem hohen Reflektionsgrad für mittelwellige IR-Strahlung aufweisen. Neben der abschirmenden Wirkung sind die reflektierenden Oberflächen zudem vorteilhaft, um ein unnötig starkes Aufheizen der Abschirmblenden während der Abschirmphase zu vermeiden. Die Befestigungswinkel für die Abschirmblenden, befinden sich an einer lineargeführt sowie translatorisch angetriebenen Rahmenkonstruktion. Innerhalb dieser sind die Befestigungswinkel an Führungswellen gelagert, die eine variable Aufnahme von unterschiedlichen Abschirmblenden ermöglichen. Durchmesser und Abstand der Führungswellen, welche sich beim IR-Aufheizen zwischen aufzuheizendem Zuschnitt und den IR-Strahlerfeldern während der Abschirmphase befinden, sind so ausgeführt, dass nachweislich keine signifikanten Abschattungseffekte davon ausgehen. Beim Einrichten der Abschirmblenden muss deren genaue Positionierung zur Ablageposition des Zuschnitts sowie zu den Messbereichen der Pyrometer sichergestellt werden. Das

Ausrichten der Blenden sowie der Ablageposition des Zuschnitts im IR-Ofen, ist über jeweils an den Pyrometern enthaltene Laservisiere möglich.

### 5.3 Prozessführung

Für das IR-Aufheizen beim großserientauglichen Thermoformen von Organoblechen sind zwei Schwerpunkte relevant, um eine ausreichend gute und gleichzeitig auch reproduzierbare Bauteilqualität sowie die vorausgesetzten Zykluszeiten zu gewährleisten. Der erste Schwerpunkt ist der Wärmeeintrag in den Organoblechzuschnitt, um diesen binnen kürzester Zeit über die Blechdicke auf eine annähernd einheitliche Verarbeitungstemperatur zu erhitzen. Der zweite Schwerpunkt bedingt ein Regeln der Strahlungsintensität aller in beiden Strahlerfeldern enthaltenen IR-Strahler. Hier gilt es einen homogenen Wärmetransfer über die modular aufgebauten Strahlerfelder in die Ober- und Unterseite des Organoblechzuschnitts sicherzustellen [66][55]. Die nachfolgenden Abhandlungen erläutern die hierfür angewandte Prozessführung des IR-Aufheizens von Organoblechen mit den beschriebenen Aufheizsystemen. Zudem wird das darauf aufbauende und für den in Abschnitt 6.5 erläuterten Thermoformprozess entwickelte einstufige IR-Aufheizen mit zwischengeschalteter Abschirmphase erläutert.

#### 5.3.1 Einstufiges IR-Aufheizen

Das IR-Aufheizen von Organoblechen, zum Erreichen einer einheitlichen Verarbeitungstemperatur über die Blechdicke, erfolgt mit den in [66] und [55] beschriebenen IR-Aufheizsystemen im Rahmen eines einstufigen Aufheizprozesses (vgl. Abb. 42). Dieser ist in eine Aufheiz- und eine Durchwärmphase unterteilt. Innerhalb der Aufheizphase erfolgt der Wärmeeintrag mit maximaler Aufheizrate, d.h. ohne nennenswerte Leistungsbegrenzung aller beim IR-Aufheizen verwendeten IR-Strahler. Hierbei ergibt sich beim IR-Aufheizen mit den mittelwelligen IR-Strahlern der „Krelus AG“, wie in Abbildung 42 dargestellt, ein annähernd linear ansteigender Verlauf der Oberflächentemperatur am Organoblech während der Aufheizphase. Mit dem Annähern der gemessenen Oberflächentemperatur an eine vordefinierte maximale Soll-Temperatur erfolgt der Übergang zur Durchwärmphase. Bei diesem Übergang wird die Strahlungsintensität so reduziert, dass die Oberflächentemperatur ohne ein Überschwingen der Soll-Temperatur in den konstanten Temperaturverlauf der Durchwärmphase übergeht. Während der Durchwärmphase wird die Oberflächentemperatur nahe der Soll-Temperatur für eine vor der Prozessführung zu definierende Haltezeit konstant gehalten. Die maximale Soll-Temperatur  $T_{max}$  sowie die Haltezeit  $t_{max}$  der Durchwärmphase stellen sowohl die relevanten Prozessparameter als auch die Abbruchkriterien der Prozessführung des einstufigen Aufheizprozesses dar.

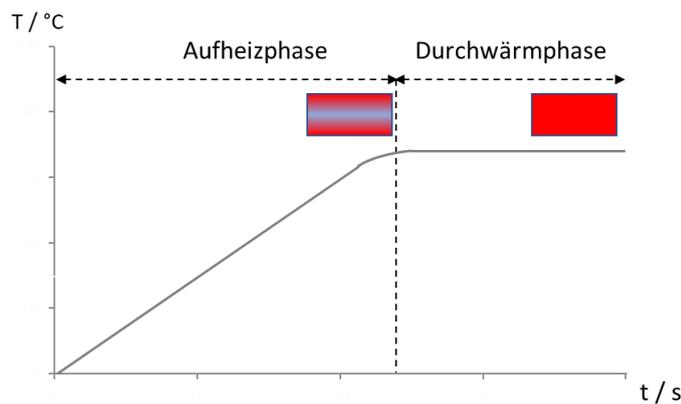


Abb. 42: Verlauf der Oberflächentemperatur beim einstufigen IR-Aufheizen von Organoblechen sowie schematisch veranschaulichter Temperaturgradient über die Blechdicke vor und nach der Durchwärmphase [66]

Die im Aufheizprozess zu erreichende maximale Soll-Temperatur wird bei teilkristalliner Thermoplastmatrix oberhalb der Kristallitschmelztemperatur gewählt. Hier weist der Thermoplast einen schmelzflüssigen Zustand auf, was die Voraussetzung für den anschließenden Formgebungsschritt beim Thermoformen ist. Der Tiefenbereich, der ab ca. 1mm Blechdicke durch konduktiven Wärmetransfer von den Randzonen mit erwärmt wird und ein trägeres Aufheizverhalten aufweist, muss innerhalb der Durchwärmphase an die vorliegende Oberflächentemperatur angeglichen werden. Der träge Wärmetransfer in den Tiefenbereich von Organoblechen ergibt sich aus den schwachen matrixdominierten Wärmeleiteigenschaften in Dickenrichtung des thermoplastischen FKV's [66]. Da die Wärmeleitfähigkeiten thermoplastischer Matrixkunststoffe grundsätzlich vergleichbar sind, ist die notwendige Haltezeit, die innerhalb der Durchwärmphase zum Durchwärmen des FKV's notwendig ist, eher mit Bezug zur Blechdicke zu wählen.

Umfangreiche Studienergebnisse zum Thermoformen mit den in Tabelle 4 aufgeführten Sandwichhalbzeugen belegen, dass mit dem im Abschnitt 5.2 erläuterten IR-Aufheizsystem sowie dem hier beschriebenen einstufigen IR-Aufheizprozess auch ein thermischer Zustand in FKV-Sandwichhalbzeugen mit Wabekern erzielbar ist, welcher eine nachträgliche Formgebung der Sandwichstruktur nach dem in Abschnitt 6.4 erläuterten Ziehformprinzip ermöglicht. Hierfür müssen die beiden erläuterten Aufheizparameter, Soll-Temperatur und Haltezeit, so gewählt werden, dass beim einstufigen IR-Aufheizen ein Temperaturgradient über die Sandwichhöhe eingestellt wird, über welchen zum Ende der einstufigen Prozessführung folgende Kriterien in der Sandwichstruktur erfüllt sind:

- Schmelzflüssiger Zustand der Deckschichtmatrix
- Schmelzflüssiger Zustand der Fügezone zwischen Deckschicht und Kern
- Plastisch formbarer Kern mit ausreichend Restdruckfestigkeit

Eine Korrelation der beiden Prozessparameter, Soll-Temperatur und Haltezeit, zu den genannten thermomechanischen Zuständen innerhalb der Verbundstruktur erfolgte im Rahmen der Arbeit über die in Abschnitt 6 vertiefend erläuterten Thermoformstudien. Ein Ergebnis von parallel zu diesen Studien durchgeführten Aufheizuntersuchungen ist in Abbildung 43 veranschaulicht. Im Diagramm sind mittels

Thermoelemente gemessene Temperaturverläufe dargestellt, die sich beim zweistufigen IR-Aufheizen innerhalb eines GF-PP-Sandwichzuschnitts aus dem Sandwichverbund TS1 ergeben. Zudem ist auch der von einem Pyrometer erfasste und über die Steuerung geregelte Verlauf der Oberflächentemperatur (Y) nachvollziehbar. Abbildung 43 veranschaulicht zudem die im Versuch gewählten Messpositionen innerhalb des Sandwichverbunds, wobei die Messungen der Temperaturverläufe innerhalb der Deckschicht (D) zwischen beiden UD-Schichten des CrossPly und die Messungen im Kern (K1, K2, K3) an drei über die Kernhöhe verteilten Stellen erfolgte.

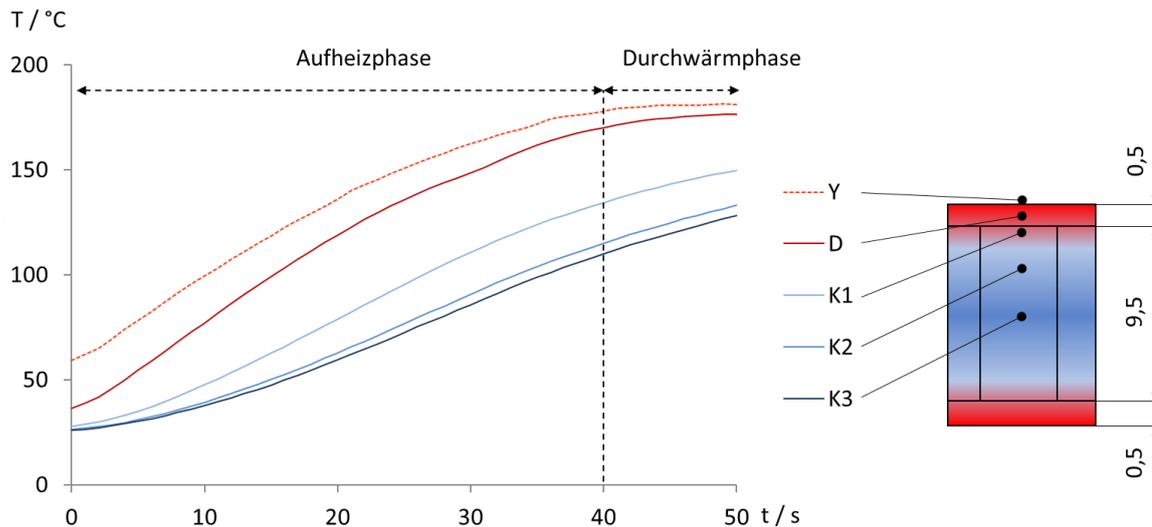


Abb. 43: Einstufiges IR-Aufheizen von thermoplastischen FKV-Sandwichverbunden sowie schematisch veranschaulichtem Temperaturgradient über die Sandwichhöhe zum Ende der Durchwärmphase

Die dargestellten Temperaturverläufe und das daran ersichtliche Aufheizverhalten des Sandwichverbunds TS1 über die Sandwichhöhe beim einstufigen IR-Aufheizprozess lassen sich in ähnlicher Charakteristik für die restlichen untersuchten Sandwichverbunde aus Tabelle 4 reproduzieren. Hier ergibt sich während der Aufheizphase generell eine höhere Aufheizrate innerhalb der Deckschichten (D) verglichen mit allen gemessenen Bereichen im Kern (K1, K2, K3). Die höhere Aufheizrate in den Deckschichten wird durch die bereits beschriebenen überwiegend oberflächlichen Absorption der mittelwelligen IR-Strahlung im thermoplastischen FKV bedingt. Der Temperaturverlauf an der Messstelle K1, direkt unterhalb der Deckschicht, zeigt ebenfalls eine deutlich höhere Aufheizrate im Vergleich zu beiden zentraleren Messstellen (K2, K3) im Kern. Zurückzuführen ist dies auf den begrenzten Einflussbereich von über die Deckschichten konduktiv übertragbare Wärme in Richtung Kern aufgrund der geringen Wärmeleitfähigkeit des Kernmaterials. Dieses Phänomen trägt dazu bei, dass bei passend gewählten Aufheizparametern es neben dem Aufschmelzen der Deckschichtmatrix auch zum Aufschmelzen der Fügezonen unterhalb beider Deckschichten ohne ein Kollabieren des Kerns kommt. Des Weiteren wird aus den Temperaturverläufen ersichtlich, dass sich im Rahmen einer kurzen Durchwärmphase trotz reduzierter Strahlungsintensität und somit verringerter Aufheizrate an der Deckschicht (D) die Kerntemperaturen sowohl nahe der Fügezone (K1) als auch in den zentraleren Kernbereichen (K2, K3) an die der Deckschichten angleichen lassen. Es ist anzunehmen, dass der Wärmetransfer in die zentraleren Kernbereiche (K2, K3) verstärkt auf konvektive Wärmeübertragungseffekte, über die in den Zellen mit erwärmte Luft sowie auf Strahlungsabsorption von durch die Deckschichten transmittierte IR-

Strahlungsanteile basiert. Der Versuchsaufbau, der unter anderem zur Erhebung der hier beschriebenen Temperaturverläufe im Sandwichverbund verwendet wurde, ist im Anhang 2 dargestellt.

### 5.3.2 Einstufiges IR-Aufheizen mit zwischengeschalteter Abschirmphase

Um einen FKV-Sandwichzuschnitt in mindestens zwei voneinander abgrenzbaren Flächenbereichen auf ein unterschiedlich hohes Temperaturniveau zu erwärmen, kann der nachfolgend erläuterte und im Bearbeitungszeitraum entwickelte einstufige IR-Aufheizprozess mit zwischengeschalteter Abschirmphase verwendet werden. Dieser ist, wie in Abschnitt 6.5 nachzuvollziehen, für ein kombiniertes Zieh- und Pressformen des Sandwichverbunds während der Formgebung von signifikanter Bedeutung. Im Wesentlichen unterscheidet sich die Prozessführung verglichen mit dem einstufigen IR-Aufheizen nur durch eine während der Aufheizphase zwischenzeitlich ablaufende Abschirmphase (zwischengeschaltete Abschirmphase). Während der Abschirmphase werden über die im Abschnitt 5.2 erläuterte Blendenmechanik mindestens zwei metallische Abschirmblenden direkt ober- und unterhalb des abzuschirmenden Zuschnittsbereichs positioniert. Diese unterbinden hier den strahlungsbestimmten Wärmeeintrag über die IR-Strahler. Das Abschirmen erfolgt zeitlich begrenzt, wofür während des einstufigen IR-Aufheizens von der Regelung der Oberflächentemperatur als Regelgröße auf eine zeitgesteuerte Prozessführung mit maximaler Strahlungsintensität gewechselt wird. Nach der Abschirmphase werden die Blenden aus dem Wirkungsbereich der Strahlerfelder entfernt und im IR-Aufheizprozess wird wieder auf die einstufige Prozessführung mit der Oberflächentemperatur als Regelgröße gewechselt. Nach dem vollständigen Prozessablauf, d.h. zum Ende der Durchwärmphase liegen aufgrund der geringen Wärmeleitfähigkeit der Matrix des Sandwichzuschnitts zwei Flächenbereiche mit jeweils unterschiedlichem Temperaturniveau vor. Die nachfolgende Abbildung 44 veranschaulicht schematisch das beschriebene einstufige IR-Aufheizen mit zwischengeschalteter Abschirmphase.

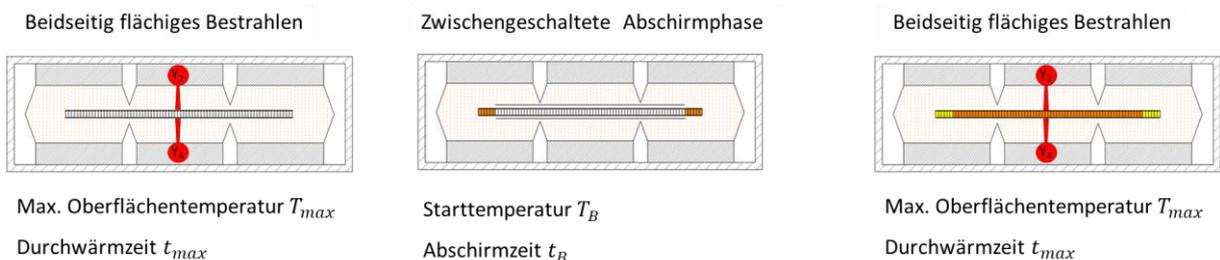


Abb. 44: Schematische Darstellung des einstufigen IR-Aufheizens mit zwischengeschalteter Abschirmphase

Die Soll-Temperatur  $T_{max}$  sowie die Haltezeit  $t_{max}$  der Durchwärmphase stellen wie beim einstufigen Prozessablauf die relevanten Prozessparameter und Abbruchkriterien für die Einstufenregelung dar. Als weitere Prozessparameter ergeben sich für die zeitgesteuerte, zwischengeschaltete Abschirmphase die Starttemperatur  $T_B$ , ab welcher beim IR-Aufheizen die Blenden ober- und unterhalb des Zuschnitts positioniert werden, sowie die Abschirmzeit  $t_B$ . Mit der Abschirmzeit wird die Dauer der Abschirmphase definiert. Die in Abbildung 45 von zwei Pyrometern ( $Y_2$ ,  $Y_4$ ) erfassten Temperatur-Zeit-Kurven verdeutlichen einen für den Prozess repräsentativen Verlauf der Oberflächentemperaturen während des IR-Aufheizens mit zwischengeschalteter Abschirmphase. Aufgeheizt wurde der Sandwichverbund TS1 auf eine maximale Solltemperatur von 185°C mit einer abschließenden Haltezeit von 5s. Im veranschaulichten Fall erfolgte das IR-Aufheizen mit der Zweizonenregelung Z2, wobei das

Einleiten der Abschirmphase mit einer Abschirmzeit von 10s bereits zu Beginn der Aufheizphase beim Erreichen einer bis dahin einheitlichen Oberflächentemperatur von 60°C erfolgte.

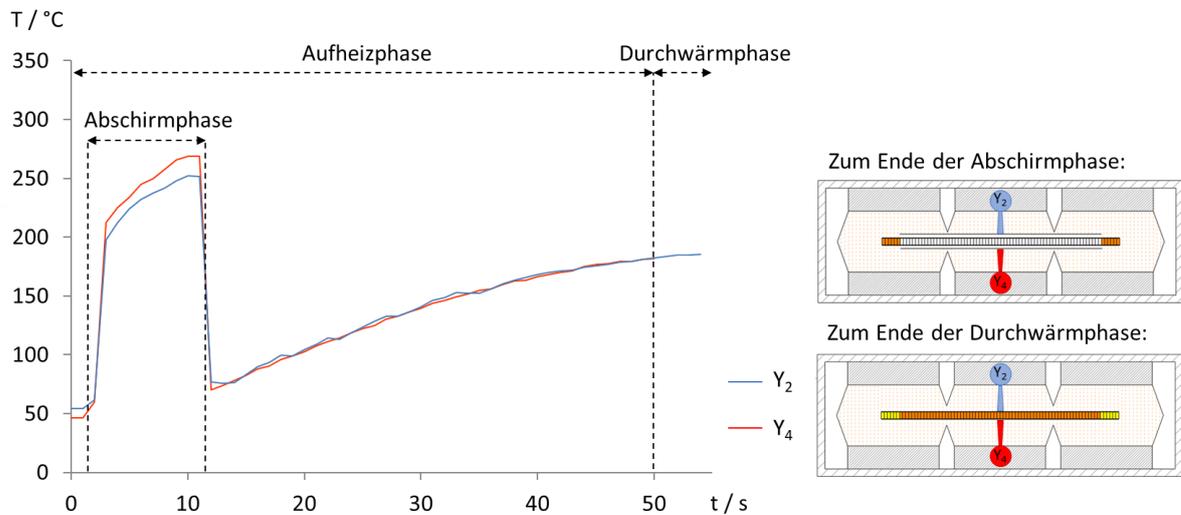


Abb. 45: Oberflächentemperatur der Deckschichten beim einstufigen IR-Aufheizen eines FKV-Sandwichverbundes mit zwischengeschalteter Abschirmphase im abgeschirmten Zuschnittsbereich

In den Verläufen der durch die Pyrometer  $Y_2$  und  $Y_4$  gemessenen Oberflächentemperaturen wird die Abschirmphase durch einen deutlichen Temperatursprung sichtbar. Die hohen Temperaturwerte während der Abschirmphase stellen keine realen Temperaturwerte dar. Die fehlerhaften Messwerte beim Erfassen der Oberflächentemperaturen an den Abschirmblechen ergeben sich, aufgrund der stark abweichenden Emissionseigenschaften der Aluminiumoberflächen im Vergleich zum aufzuheizenden FKV-Deckschichtmaterial, nach welchem die Pyrometer kalibriert sind. Prozessseitig hat der Messfehler beim Erfassen der Oberflächentemperatur an den Abschirmblenden aufgrund der zeitgesteuerten Prozessführung während der Abschirmphase keinen negativen Einfluss. Jedoch muss der Temperatursprung im zur Prozessführung programmierten Programmablauf berücksichtigt werden, um nicht als Abbruchkriterium des einstufigen IR-Aufheizprozesses wahrgenommen zu werden.

Das Ergebnis nach dem IR-Aufheizen lässt sich durch das Erfassen von Wärmebildern während bzw. nach dem Transfer des erwärmten Zuschnitts in die Werkzeugform überprüfen. Abbildung 46 veranschaulicht vergleichend Wärmebildaufnahmen von aufgeheizten Sandwichzuschnitten nach dem einstufigen Aufheizen ohne (vgl. Abb. 46a) und mit zwischengeschalteter Abschirmphase (vgl. Abb. 46b). Ersichtlich wird das im Unterschied zum lediglich einstufig aufgeheizten Zuschnitt in dem Bereich, in dem die Abschirmblenden den IR-strahlungsbestimmenden Wärmeeintrag zwischenzeitlich unterbinden. Dort liegt nach dem IR-Aufheizen das niedrigere Temperaturniveau am Sandwichzuschnitt vor. Im ganzseitlich mit IR-Strahlung beaufschlagten Randbereich ergibt sich nach dem einstufigen IR-Aufheizen mit zwischengeschalteter Abschirmphase das höhere Temperaturniveau. Beide Wärmebildaufnahmen verdeutlichen, dass sich im Randbereich eines Sandwichzuschnitts beim IR-Aufheizen aufgrund des seitlichen IR-Strahlungseinfalls ein Temperaturgradient mit zu den Zuschnittsrändern erhöhten Temperaturwerten ausbildet. Dieser wird durch die Abschirmphase in den Absolutwerten deutlich verstärkt.

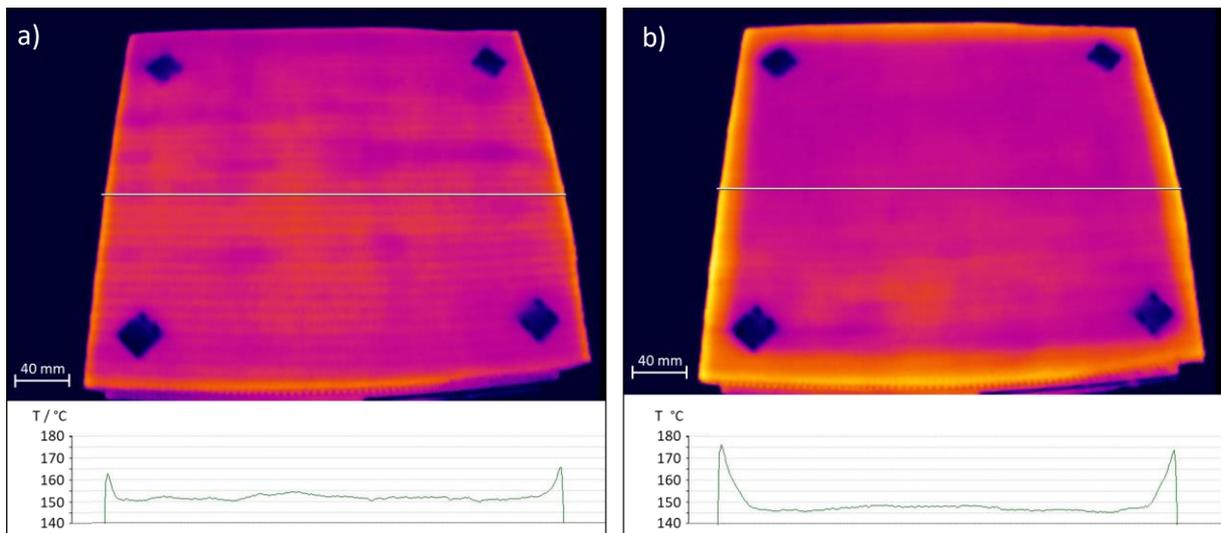


Abb. 46: Vergleich der Oberflächentemperatur eines Sandwichzuschnitts nach dem einstufigen IR-Aufheizen ohne (a) und mit (b) zwischengeschalteter Abschirmphase

### 5.3.3 Heizonenregelung

Sowohl für das Ziehformen von Organoblechen als auch von thermoplastischen FKV-Sandwichzuschnitts ist beim IR-Aufheizen ein beidseitig gleichmäßiger Wärmeeintrag relevant. Hierfür ist eine Aufteilung der in den Strahlerfeldern enthaltenen IR-Strahler auf mehrere sinnvoll ausgewählte Heizonen sowie eine entsprechende Heizzonensynchronisation von besonderer Bedeutung. Mit diesen lassen sich Störeinflüsse wie beispielsweise im Strahlungsraum aufsteigende Heißluft oder Temperatur-Hotspots aufgrund von Strahlungsüberlagerungen in Richtung Zuschnittsmitte kompensieren (vgl. Abb. 48). Die nachfolgende Abbildung 47 veranschaulicht die im IR-Ofen nutzbaren Zonenaufteilungen.

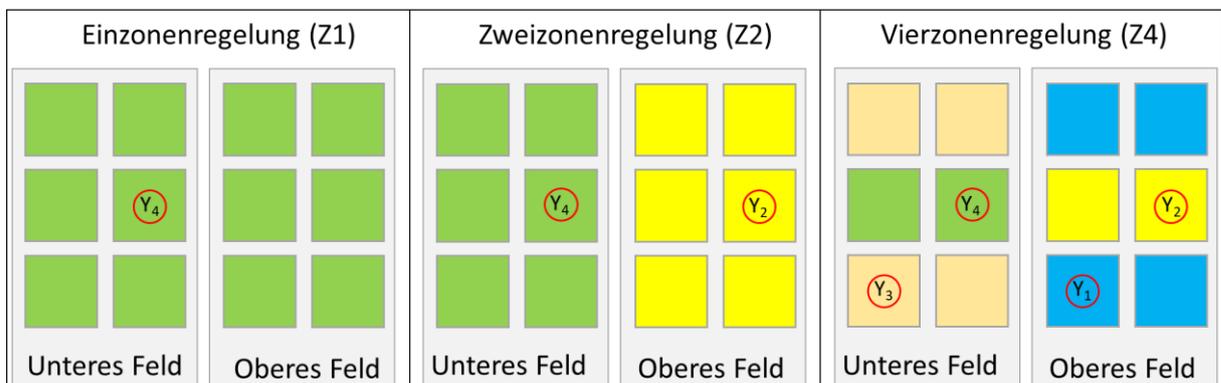


Abb. 47: Mögliche Heizzonenaufteilung im IR-Ofen

Die einfachste Form der möglichen Zonenaufteilung ist die Einzoneregulation (Z1) des doppelseitigen IR-Strahlerfelds. Hier wird zur Regelung aller IR-Strahler lediglich eine Regelgröße von einem Pyrometer ( $Y_4$ ) verwendet. Mit der Einzoneregulation kann grundsätzlich keinem der in Abbildung 48 dargestellten Störeinflüsse entgegengewirkt werden. Die Zweizonenregelung (Z2), bei der das obere und untere Strahlerfeld einer Heizzone jeweils einem Pyrometer ( $Y_2, Y_4$ ) zugeordnet ist, ist vornehmlich zum IR-Aufheizen von flächig kleineren Organoblechen geeignet. Hier kann über die im Nachgang erläuterte Heizzonensynchronisation der Wärmeeintrag über beide Strahlungsfelder synchronisiert

werden. Dies ist insbesondere notwendig, um dem verstärkten Wärmeeintrag an der Unterseite des aufzuheizenden Zuschnitts infolge aufsteigender Heißluft entgegenzuwirken. Die Vierzonenregelung (Z4), wobei alle Pyrometer ( $Y_1, Y_2, Y_3, Y_4$ ) zum Einsatz kommen, ermöglicht es, beim IR-Aufheizen neben den im Strahlungsraum aufsteigenden konvektiven Wärmeströmen zudem Strahlungsüberlagerungen entgegenzuwirken, die sich zur Feldmitte hin ergeben. Hier kann der erhöhte Strahlungseinfluss, ausgehend von den äußeren IR-Strahlern zur Zuschnittmitte hin, durch ein automatisiertes Reduzieren der Strahlungsintensität der mittleren IR-Strahlern entgegengewirkt werden. Die nachfolgende Abbildung 48 veranschaulicht schematisch die genannten Störeinflüsse, denen im IR-Ofen mit horizontal ausgerichteten Strahlerfeldern über die umgesetzte Zonenaufteilung und Zonensynchronisation entgegengewirkt werden kann.

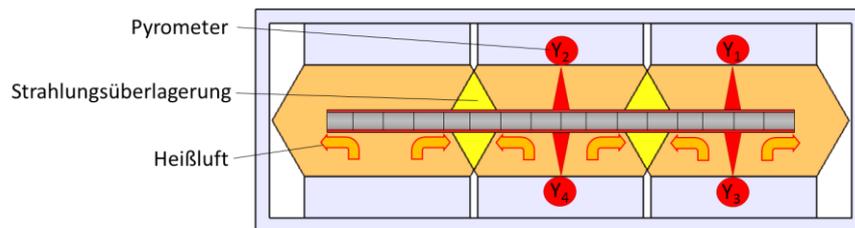


Abb. 48: Schematisch veranschaulichte Störeinflüsse beim IR-Aufheizen eines Sandwichzuschnitts im IR-Ofen mit horizontal ausgerichteten doppelseitigen Strahlerfeldern

Die Erfassung der Regelgrößen  $y(t)$ , d.h. der Oberflächentemperatur am jeweilig zugehörigen Flächenbereich des aufzuheizenden Zuschnitts, erfolgt pro Heizzone durch das entsprechende Pyrometer. Dieses ist im Strahlerfeld zentral hinter einem Leit-IR-Strahler angeordnet. Die jeweilige Stellgröße im zugehörigen Regelkreis ist die über die im IR-Strahler in Wärme umgesetzte elektrische Leistung ( $P$ ). Mit dieser lässt sich die Emission der mittelwelligen IR-Strahlung und somit der Anstieg der Oberflächentemperatur an der Messstelle beeinflussen. Zur Regelung der Oberflächentemperatur kommt beim erläuterten IR-Aufheizsystem pro Regelkreis ein PI-Regler zur Anwendung. Abhängig vom PI-Regler und der gemessenen Oberflächen- und Soll-Temperatur wird über pulsweitenmodulierte Signale (PWM) der Leit-IR-Strahler mittels Solid-State-Relais (SSR) zu- oder abgeschaltet. Alle weiteren zur Heizzone gehörenden aktiven Strahler werden parallel vom zum Leit-IR-Strahler zugehörigen PWM-Signal mit gesteuert. Die nachfolgende Abbildung 49 veranschaulicht den Regelkreis, welcher in dieser einfachen Form nur beim einstufigen Aufheizprozess unter Verwendung der Einzonenregelung (Z1) der Strahlerfelder verwendet wird.

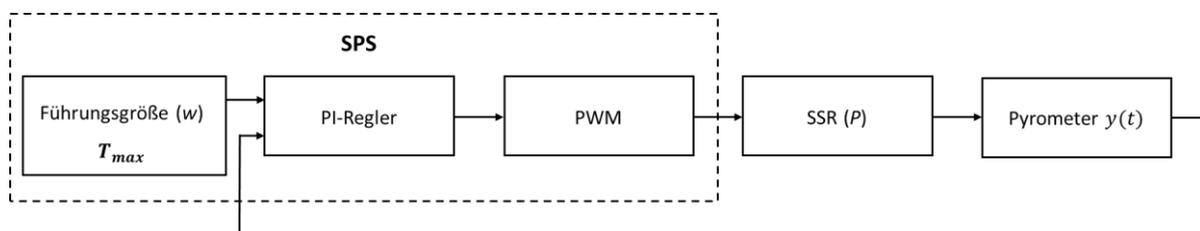


Abb. 49: Einfacher Regelkreis zur Prozessführung beim einstufigen IR-Aufheizen

Zur automatisierten Kompensation der oben genannten Störeinflüsse kann das Strahlerfeld auf mehrere Heizzonen mit jeweils separaten aber miteinander synchronisierten Regelkreisen unterteilt werden. Der Grundaufbau der Regelkreise unterscheidet sich nicht von dem bereits beschriebenen Regelkreis der Einzonenregelung (Z1). Die Erweiterung der Regelkreise ist, angelehnt an die Beschreibungen

aus [66] und [55], mit einem zonensynchronisierenden on/off-Kompensator umgesetzt. Die nachfolgende Abbildung 50 veranschaulicht exemplarisch den erweiterten Regelkreis für eine in der Vierzonenregelung zu synchronisierende Heizzone mit Index „1“.

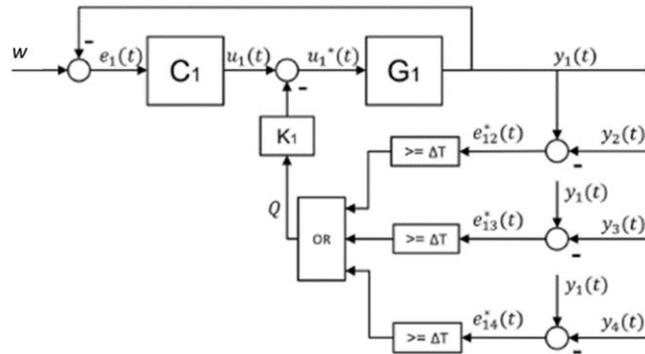


Abb. 50: Erweiterter Regelkreis zur Prozessführung beim einstufigen IR-Aufheizen mit zusätzlicher Heizzonensynchronisation

Wie dargestellt ist der erweiterte Regelkreis so aufgebaut, dass mit jeder Rückkopplung der Regelgröße  $y_1(t)$  jeweils ein Aufstellen von drei Temperaturdifferenzwerten  $e_{12}^*(t)$ ,  $e_{13}^*(t)$  und  $e_{14}^*(t)$  erfolgt. Diese ergeben sich aus der Differenz der rückgekoppelten Regelgröße  $y_1(t)$  zu den Regelgrößen der anderen drei Heizzonen  $y_2(t)$ ,  $y_3(t)$   $y_4(t)$ .

$$e_{12}^*(t) = y_1(t) - y_2(t) \quad \text{Gl. 5.3.1a}$$

$$e_{13}^*(t) = y_1(t) - y_3(t) \quad \text{Gl. 5.3.1b}$$

$$e_{14}^*(t) = y_1(t) - y_4(t) \quad \text{Gl. 5.3.1c}$$

Die drei zeitabhängigen Temperaturdifferenzen werden jeweils anschließend in einem Vergleichsoperator mit einem in der Steuerung hinterlegten maximalen Temperaturdifferenzwert  $\Delta T$  verglichen. Dieser stellt den maximalen Unterschied dar, der zwischen allen von den Pyrometern gemessenen Oberflächentemperaturen vorliegen darf, bevor die Synchronisation über den Ein/Aus-Kompensator eingeleitet wird. Der maximale Temperaturdifferenzwert  $\Delta T$  ist in der Steuerung mit 4K hinterlegt. Mit dem Vergleichsoperator erfolgt entsprechend der nachfolgenden Bedingungen

$$Q = \begin{cases} 0, & \text{if } e^* \leq \Delta T \\ 1, & \text{if } e^* > \Delta T \end{cases}$$

eine Weitergabe des Arguments „0“ oder „1“ an den nachfolgenden Oder-Funktionsblock. Ergibt sich aus einem der drei durchgeführten Vergleiche das Argument „ $Q = 0$ “ oder „ $Q = 1$ “, wird die eigentliche Stellgröße  $u_1(t)$  der Einstufenregelung über die Konstante  $K_1$  durch die vorgeschaltete Oder-Funktion wie folgt manipuliert:

$$u_1^*(t) = \begin{cases} u_1(t) - K_1, & \text{if } Q(OR) = 1 \\ u_1(t), & \text{if } Q(OR) = 0 \end{cases}$$

Die Konstante  $K_1$  ist so gewählt, dass wenn diese vom Stellglied  $y_1(t)$  abgezogen wird, die elektrische Leistung am entsprechenden Leit-IR-Strahler sowie den parallel dazu gesteuerten IR-Strahlern im nachfolgenden Zeitschritt unterbrochen wird. Dies wird so lange wiederholt, bis der entsprechende Temperaturvorsprung von  $y_1(t)$  zu allen anderen Regelgrößen aufgehoben ist, d.h. im Bereich der

maximalen Temperaturdifferenz  $\Delta T$  liegt. Analog dazu erfolgt die Synchronisation auch für die anderen drei Zonen. Die Abbildung 51 veranschaulicht die Temperaturverläufe beim einstufigen IR-Aufheizen eines größeren Sandwichzuschnitts mit der beschriebenen Vierzonenregelung. Hierbei wird der Einfluss des zonensynchronisierenden on/off-Kompensators in den leicht welligen Temperaturverläufen ersichtlich.

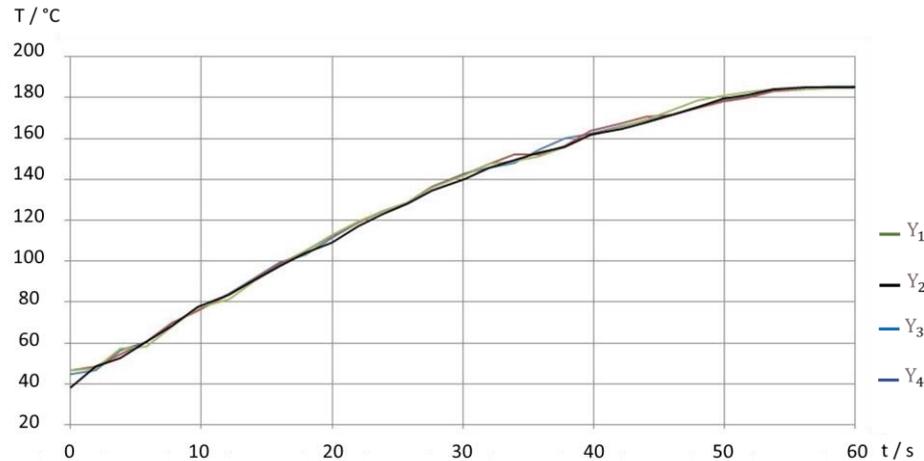


Abb. 51: Oberflächentemperaturen beim einstufigen IR-Aufheizen eines Sandwichzuschnitts mit synchronisierten Heizzonen

Bei der Zweizonenregelung werden nur die Regelgrößen  $y_2(t)$  und  $y_4(t)$  zueinander synchronisiert (vgl. Abb. 45), womit lediglich eine automatisierte Kompensation der im Strahlungsraum aufsteigenden Luft möglich ist. Diese eignet sich zum Aufheizen von Zuschnitten mit kleineren Breitenabmessungen. Eine Kompensation der Strahlungsüberlagerung in Richtung Zuschnittsmitte kann jedoch auch über eine voreingestellte Leistungsbegrenzung der mittleren IR-Strahler erfolgen.

## 5.4 Abluftsteuerung

Wie bereits erwähnt, führt die aufsteigende Luft im horizontal arbeitenden IR-Aufheizsystem mit doppelseitigem Strahlerfeld zu einem erhöhten Wärmeeintrag an der Organoblechunterseite. Dieser Einfluss verstärkt sich im Serienbetrieb, d.h. bei kurz nacheinander ablaufenden IR-Aufheizprozessen. Im Serienbetrieb ist der verstärkte Störeinfluss über die im IR-Aufheizsystem aufsteigende Luft nicht ausschließlich über die beschriebene Zonensynchronisation allein beherrschbar. Daher ist es notwendig, wie in [55] erläutert, die Heißluft im Serienbetrieb über ein Abluftsystem aus dem Strahlungsraum auszuleiten. Im beschriebenen IR-Aufheizsystem wird das Entlüften der Heißluft über einseitig an der Gehäuseober- sowie -unterseite im Strahlungsraum angeordneten Druckluftdüsen erzwungen. Das Ausblasen der Heißluft muss unmittelbar vor einem IR-Aufheizprozess erfolgen. Während des IR-Aufheizens ist die Heißluftabfuhr deutlich zu reduzieren, um Ungleichmäßigkeiten beim Wärmeeintrag durch unerwünschte Kaltluftströmungen zu vermeiden. Auch das Freiblasen der Pyrometeroptik darf grundsätzlich nur vor oder nach einem Aufheizprozess erfolgen, da ansonsten die vom Freiblasenaufsatz ausgehende Druckluft zum Abkühlen der Messstelle am aufzuheizenden Halbzeug führt.

## 6 Thermoformen von FKV-Sandwichverbunden

Dieser Teil der Arbeit beschäftigt sich mit dem Thermoformen von ebenen endlosfaserverstärkten Sandwichverbunden zu mehrfachgekrümmten Schalenstrukturen mit besonderem Bezug zur Formgebung. Bevor auf die Ergebnisse der Prozessentwicklung hinsichtlich der Formgebung sowie auf damit verbundene Erkenntnisse von jeweils dazu durchgeführten Thermoformuntersuchungen eingegangen wird, wird im ersten Unterabschnitt 6.1 der aktuelle Stand der Technik zum Thermoformen von endlosfaserverstärkten Sandwichstrukturen erläutert. Nachfolgend wird im Abschnitt 6.2 auf das thermische Verhalten endlosfaserverstärkter Sandwichverbunde während des Thermoformens, d.h. vom IR-Aufheizen über den Heißtransfer bis zum finalen Formgebungsschritt, eingegangen. Die Abschnitte 6.3 bis 6.5 beschäftigen sich mit dem Press- und Ziehformen der Sandwichverbunde sowie einem daraus kombinierten Formgebungsschritt, welcher sich, wie im Abschnitt 7 beschrieben, mit dem Spritzgießen zur Fertigung verwertungsfertiger Sandwichbauteile kombinieren lässt. In der nachfolgenden Tabelle 4 sind die Sandwichverbunde aufgeführt, die für die systematischen Prozessentwicklungen und dazu begleitenden experimentellen Untersuchungen verwendet wurden.

Tabelle 4: Thermoplastische FKV-Sandwichverbunde mit ThermHex-Wabenkern

Nr	Sandwich	Deckschicht			Kern	
		Höhe	Struktur	Material	Gewicht	Struktur
TS1	10,5 mm	CrossPly	GF/PP	820 g/m <sup>2</sup>	THPP120-12/5	PP/Talk
TS2	10,5 mm	CrossPly	GF/PP	660 g/m <sup>2</sup>	THPP120-12/5	PP/Talk
TS3	10 mm	CrossPly	GF/PP	820 g/m <sup>2</sup>	THPP80-10/8	PP/Talk
TS4	20 mm	CrossPly	GF/PP	820 g/m <sup>2</sup>	THPP120-20/9,6	PP/Talk

Die untersuchten Sandwichverbunde bestehen jeweils aus einem ThermHex- (TH) Wabenkern sowie endlosfaserverstärkten GF/PP-Deckschichten. Die Deckschichten sind in allen Konfigurationen als CrossPly ausgeführt. Der Matrixkunststoff in Kern und Deckschichten ist jeweils Polypropylen. Das Polypropylen des ThermHex-Wabenkerns beinhaltet geringe Anteile an Talkum (ca. 10 m%). Die Wabenkerne sind im Ausgangszustand mit einer Dichte von 120 kg/m<sup>3</sup> und 80 kg/m<sup>3</sup> ausgeführt. Die jeweilige Kernhöhe beträgt im Ausgangszustand ohne Deckschichten 10 mm, 12 mm bzw. 20mm. Die Kernhöhen weichen im gepressten Sandwichverbund von der Ausgangshöhe entsprechend der für die Thermoformuntersuchungen mittels Doppelbandpresse eingestellten Sandwichhöhe ab. Die Sandwichkonfigurationen TS1 und TS2 sind auf eine Sandwichhöhe von 10,5 mm gepresst und die Sandwichverbunde TS3 und TS4 auf 10 mm und 20mm Sandwichhöhe. Die Dicke einer Deckschicht beträgt jeweils ca. 0,5 mm. Bis auf den Sandwichverbund TS2 mit schwarz pigmentierten Deckschichten sind die restlichen drei Sandwichkonfigurationen „Natural“, d.h. ohne Farbzusätze.

## 6.1 Stand der Technik

Eines der ersten Verfahren zum Thermoformen von 3D-gekrümmten endlosfaserverstärkten Sandwichstrukturen ist in der Patentschrift [70] von U. Breuer beschrieben. Dort ist ein Stempelformverfahren mit vakuumunterstützter Formgebung erläutert, mit dem 3d-gekrümmte Sandwichschalen aus einem FKV-Sandwichverbund mit thermoplastischem Matrixkunststoff herstellbar sind. Neben diesem Verfahren sind mittlerweile weitere Thermoformverfahren mit ähnlicher Zielstellung entwickelt und zum Teil patentiert worden. Das Ergebnis einer ausführlichen Patentrecherche zum Thermoformen endlosfaserverstärkter Sandwichstrukturen kann über die im Anhang 4 hinterlegte Zusammenfassung nachvollzogen werden. Aus den bis heute entwickelten Prozessen lassen sich, wie in [14] zusammengefasst, folgende drei Verfahrenswege zum Thermoformen von FKV-Sandwichstrukturen ableiten:

1. Thermoformen des Sandwichverbunds mit vorgefertigtem FKV-Sandwichhalbzeug
2. Thermoformen der Deckschichten und des Kerns mit anschließender Verbundherstellung
3. Thermoformen und Verbinden der Sandwichkomponenten in einem Schritt

### **Thermoformen des Sandwichverbunds mit vorgefertigtem FKV-Sandwichhalbzeug**

Zum bereits eingangs erwähnten Verfahren der Patentschrift [70], das dem Thermoformen eines Sandwichverbundes mit vorgefertigtem Sandwichhalbzeug zugeordnet werden kann, wurden in [8] erste Ergebnisse wissenschaftlicher Studien zur Formgebung der damit untersuchten Sandwichverbunde veröffentlicht. Hierbei konnte mit dem patentierten Thermoformprozess eine generelle Herstellbarkeit von sphärischen Sandwichschalen aus gewebeverstärkten GF/PA12-Deckschichten und einem PMI-Rohacell®-Schaumkern nachgewiesen werden. Für ein erfolgreiches Thermoformergebnis ist nach der o.g. Veröffentlichung das Erwärmen des Sandwichverbundes vor der Formgebung als besonders essenziell eingestuft. Untersucht wurde das Erwärmen des Sandwichverbundes mit konduktiven, konvektiven sowie IR-strahlungsbestimmten Aufheiztechniken. Hierbei war das grundsätzliche Ziel, den Sandwichverbund so zu erwärmen, dass die Deckschichtmatrix einen schmelzeflüssigen und der Kern einen plastisch formbaren Zustand mit ausreichend Restdruckfestigkeit aufweist. Um dies zu erreichen, ist eine hohe Aufheizrate erforderlich, die in den Untersuchungen am effizientesten über konduktive Wärmeleitung zwischen zwei PTFE-beschichteten Heizplatten erreicht werden konnte. Die in [70] und [8] erläuterte Formgebung des aufgeheizten Sandwichhalbzeugs erfolgt vergleichbar dem in Abschnitt 4.1 erläuterten Ziehformprinzip mit zweiseitig festem Formgebungswerkzeug. Im Unterschied dazu wird die Formgebung des aufgeheizten Sandwichverbunds ohne Niederhalter und nicht ausschließlich über die einwirkenden Stempelkräfte, sondern zusätzlich mit einem in der Negativform wirkenden Unterdruck initiiert. Die Negativform enthält hierfür Entlüftungsbohrungen, welche während der Formgebung über eine Vakuumpumpe mit Unterdruck beaufschlagt werden. Das Formen mit Hilfe des Unterdrucks ist notwendig, um ein Kollabieren der weichen Kernstruktur während der Formgebung unter der einwirkenden Stempelpkraft zu vermeiden [8].

Tiefgreifendere wissenschaftliche Arbeiten, die sich mit dem Thermoformen von Sandwichstrukturen nach dem ersten Verfahrensweg aus vorgefertigten endlosfaserverstärkten Sandwichverbundhalbzeugen mit Wabenkern beschäftigen, sind bislang nicht bekannt. Auch in industriellen Anwendungen

begrenzt sich deren Einsatz auf ebene Bauteile mit z.B. heißgepressten Bauteilrändern, leichten Einprägungen bzw. linienförmigen Sicken [9].

### **Thermoformen der Deckschichten und des Kerns mit anschließender Verbundherstellung**

Ausführliche Beschreibungen zum zweiten Verfahrensweg, d.h. einem separaten Thermoformen beider Deckschichten und dem Kern mit anschließender Verbundherstellung sind in der Dissertation von O. Rozant [71] nachvollziehbar. Er verglich diesen Verfahrensweg mit dem bereits beschriebenen Thermoformen endlosfaserverstärkter Sandwichverbundhalbzeuge. Die verwendete Thermoformanlage enthielt, ähnlich wie bei den bereits erläuterten Untersuchungen aus [8], mehrere Heizplatten, zwischen denen der Sandwichverbund bzw. die einzelnen Sandwichkomponenten vor der Formgebung erwärmt wurden. Die Formgebung erfolgte ebenfalls nach dem Ziehformprinzip jedoch ohne Einwirkung eines Unterdrucks in der Negativform. In den Versuchen konnte die Thermoformbarkeit komplexerer Sandwichschalen aus einem Sandwichverbund bestehend aus einem PEI-Schaumkern mit gewebten sowie gestrickten CF-verstärkten Deckschichten mit PEI-Matrix nachgewiesen werden. Als stabilerer Verfahrensweg stellte sich das mehrstufige Thermoformen mit selektiver Formgebung und anschließender Verbundherstellung heraus. Dies begründet Rozant damit, dass mit dem mehrstufigen Ansatz die einzelnen Sandwichkomponenten mit jeweils an das Materialsystem angepassten Prozessbedingungen verarbeitet werden können. Als nachteilig ist der deutlich höhere Aufwand an Werkzeugformen aufgeführt. Wie in [72] erwähnt, konnte das selektive Thermoformen der Sandwichkomponenten mit anschließender Verbundherstellung auch bereits erfolgreich zur Fertigung eines seriennahen Schiebedachprototyps mit einem Wabenkern aus PA12 und gewebeverstärkten GF/PA12 Deckschichten erprobt werden.

### **Thermoformen und Verbinden der Sandwichkomponenten in einem Schritt**

Der dritte Verfahrensweg stellt das Thermoformen einer Sandwichstruktur dar, bei dem die Formgebung und das Verbinden der Sandwichkomponenten in einem Schritt erfolgen. Eine entsprechende Ausführungsform ist das in [72][73] und [74] beschriebene Thermopressen. Bei diesen Fertigungsverfahren werden Deckschichten und Kern gestapelt in einem IR-Aufheizsystem mit doppelseitigem IR-Strahlungsfeld auf einen verarbeitbaren Zustand erwärmt. Anschließend erfolgt der Transfer des aufgeheizten Sandwichstapels in eine Presse, wo mit dem Schließen des zweiseitigen Presswerkzeugs die Formgebung und Verbundherstellung zur fertigausgeformten Sandwichstruktur vonstattengeht. In prototypischen Versuchen konnte mittels Thermopressen bereits ein Sitzschalendemonstrator aus PP-Gewebedeckschichten und PEI-Schaumkern hergestellt werden. Zudem war mit diesem Fertigungsverfahren auch eine generelle Verarbeitbarkeit von gewebten GF/PP-Deckschichten mit PP-Wabenkern mit der für die vorliegende Arbeit relevanten Thermoformtechnologie nachweisbar. Als nachteilig ist beim Thermopressen der Sandwichverbunde mit Wabenkernen das Ausknicken der Zellwände in höhenreduzierten Sandwichbereichen benannt [74].

Ein genereller Vorteil des Thermoformens nach dem 2. und 3. Verfahrensweg ist die Möglichkeit des zielgerichteten Einbringens der Kernstruktur in hierfür notwendigen Bauteilbereichen. D.h. in Bereichen wie den Bauteilrändern, wo ggf. kein Kernmaterial gebraucht wird, kann auf dieses verzichtet und somit Material eingespart werden. Auch das Integrieren von Einlegeteilen oder Funktionalisierungselementen in den Kern zwischen beiden Deckschichten vor der Verbundherstellung ist ein Vorteil gegenüber dem 1. Verfahrensweg. Nachteile beider Verfahrenswege im Vergleich zur Verarbeitung vorgefertigter Sandwichhalbzeuge sind die höheren Aufwände beim Zuschneiden bzw. Bearbeiten der Halbzeuge vor der Bauteilfertigung sowie komplexere Transferbedingungen in der Thermoformanlage [72][75].

### **Hybride Verfahrensweisen**

Ein hybrider Verfahrensansatz des Thermoformspritzgießens von FKV-Sandwichbauteilen wurde im Forschungsprojekt „MAI-Sandwich“ entwickelt. Hier ist der umgesetzte Thermoformprozess eine Zwischenlösung des 2. und 3. Verfahrensweges. Beim entwickelten Prozess werden zunächst die Deckschichten thermogeformt. Anschließend erfolgt die Formgebung des Kerns zwischen beiden vorgeformten Deckschichten, wobei auch das Verbinden des Kerns mit den Deckschichten umgesetzt wird. Die zentrale Innovation des im Forschungsprojekt umgesetzten Fertigungsprozesses liegt in der Möglichkeit der direkten Spritzgussfunktionalisierung der Sandwichstruktur. Dies erfolgt mehrstufig im Verlauf der Prozessabfolge und ermöglicht das Hinterspritzen von mindestens einer Deckschicht sowie das Umspritzen eines designspezifischen Randabschlusses [27].

Weitere hybride Verfahrensansätze, auf welche hier nicht näher eingegangen wird, kombinieren das Thermoformen von Organoblechen mit dem Schaumspritzgießen. Hierbei sind Verfahrensansätze bekannt, die während der Formgebung ein Vorformen der Deckschichten mit nachträglichem Schäumen der Kernstruktur präferieren oder das Ausformen der Deckschichten unmittelbar mit dem Schäumen des Kerns verfolgen [73][12].

## **6.2 Thermisches Verhalten des Sandwichverbunds beim Thermoformen**

Für die Entwicklung und die Anwendung des in Abschnitt 5.5 erläuterten Thermoformprozesses ist ein hinreichendes Verständnis des thermischen Verhaltens der FKV-Sandwichverbunde mit Wabenkern während der Prozessführung von signifikanter Bedeutung. Relevant für die Formgebung sind zudem die thermomechanischen Eigenschaften des Wabenkerns, die sich aus dem thermischen Zustand des Sandwichverbunds nach IR-Aufheizen und Heißtransfer, d.h. während der Formgebung, ableiten lassen. Hierauf wird nachfolgend mit Hilfe von Untersuchungsergebnissen mit dem GF/PP-Sandwichverbund TS1 eingegangen. Dieser ist nachweislich optimal mittels Press- und Zieh-Pressformen zu 3D-gekrümmten Sandwichschalen mit definiert verpressten Bauteilrändern verarbeitbar.

Wie Eingangs im Abschnitt 6.1 aus [8] kurz zusammengefasst, ist für das Thermoformen von Sandwichverbunden eine hohe Aufheizrate beim Wärmeeintrag in die Deckschichten notwendig, um innerhalb der Verbundkomponenten einen geeigneten Temperaturgradienten über die Sandwichhöhe einzustellen. Für das in Abschnitt 6.4 und 6.5 erläuterte Ziehformen muss der Temperaturgradient beim Aufheizen so eingestellt werden, dass die Deckschichtmatrix einen schmelzeflüssigen und der Kern einen plastisch formbaren Zustand aufweisen. Zudem müssen auch die Grenzschichtbereiche von

beiden Deckschichten zum Kern aufgeschmolzen sein. Prozessseitig lässt sich dieser Temperaturgradient bzw. thermische Zustand des Sandwichverbunds, mit dem im Abschnitt 5 erläuterten Aufheizsystem einstellen. Materialeitig ist es notwendig, dass der Thermoplast des Kerns sowie die Thermoplastmatrix der FKV-Deckschichten ein ähnliches thermisches Verhalten bzw. Verarbeitungsspektrum aufweisen. D.h. die Schmelz- und Rekristallisationstemperatur müssen, wie beim Polypropylen des Sandwichverbunds TS1, hinsichtlich Kernmaterials und Deckschichtmatrix im gleichen Temperaturbereich liegen. Ergebnisse durchgeführter DSC-Messungen mit dem GF/PP der Deckschichten und dem talkumgefüllten Polypropylen vom Kern des Sandwichverbunds TS1 sind im Anhang 1 hinterlegt. Diese verdeutlichen die vergleichbaren Schmelz- und Rekristallisationstemperaturen der entsprechenden Sandwichkomponenten. Wie für Polypropylen üblich (vgl. Abs. 2.2.1) liegt die Schmelztemperatur deutlich über der Rekristallisationstemperatur, woraus sich nach dem IR-Aufheizprozessschritt eine vergleichsweise lange Zeit ( $t_T$ ) für den anschließenden robotergesteuerten Transfer des aufgeheizten Zuschnittes unter Umgebungsbedingungen ins Werkzeug ergibt (vgl. Abb. 52).

Im Abschnitt 5.3.2 wurde bereits aufgezeigt, dass durch das einstufige IR-Aufheizen mit zwischenzeitlicher Abschirmphase das Einstellen von zwei thermischen Zuständen verteilt auf zwei Flächenbereiche des aufgeheizten Zuschnitts möglich ist. Hierbei kann der Sandwichverbund im Sandwichbereich mit geringerem Temperaturniveau so mittels der IR-Strahlung aufgeheizt werden, dass dieser den oben erläuterten thermischen Zustand für das Ziehformen des Sandwichverbunds aufweist. Um diesen Zustand während der Transferphase bis zur Formgebung aufrecht erhalten zu können, müssen beim IR-Aufheizen die Deckschichten des Sandwichverbunds auf eine Temperatur, die deutlich über der Schmelztemperatur der Thermoplastmatrix liegt, erwärmt werden. Aufgrund der dünnen Deckschichten sind die Durchwärmzeiten mit ca. 5s eher kurz zu wählen, um ein zu starkes Erweichen des Kerns zu vermeiden. Abbildung 52 veranschaulicht die Temperaturverläufe innerhalb der Deckschichten und des Kerns beim einstufigen IR-Aufheizen des Sandwichverbundes TS1 auf einen für das Ziehformen geeigneten thermischen Zustand sowie das anschließende konvektive Abkühlen an der Umgebungsluft bei Raumtemperatur (RT). Des Weiteren ist die in Thermoformstudien ermittelte maximale Transferzeit ( $t_T$ ) von ca. 14s für den Sandwichverbund TS1 dargestellt.

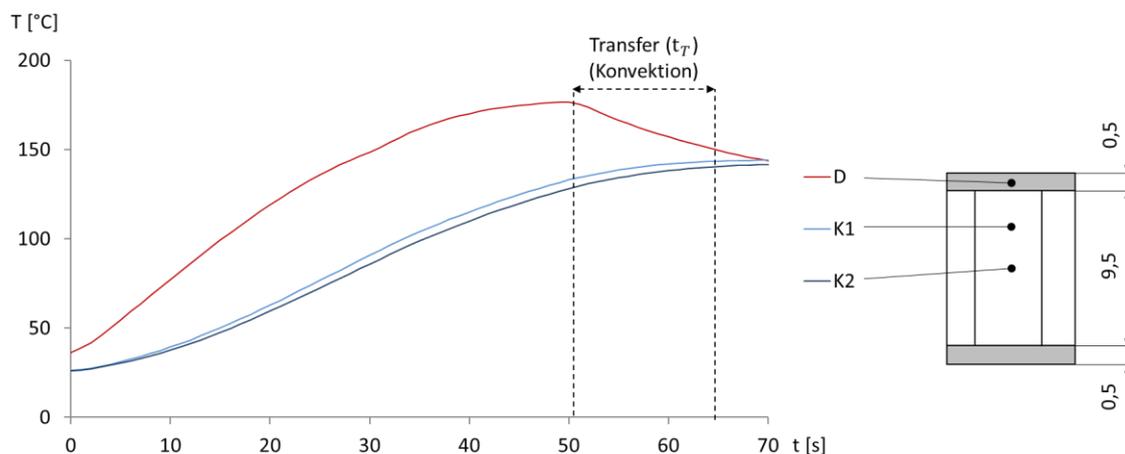


Abb. 52: Temperaturverläufe im Sandwichverbund während des IR-Aufheizens und beim nachfolgenden Abkühlen an der Umgebungsluft

Der im Aufheiz- und Abkühlversuch ermittelte Temperatur-Zeit-Verlauf zwischen beiden UD-Lagen einer Deckschicht (D) verdeutlicht, dass die auf ca. 180°C erwärmten Deckschichten nach dem IR-Aufheizen abrupt und vergleichsweise schnell abkühlen. Gegensätzlich dazu verhalten sich die Kerntemperaturen (K2, K3). Diese steigen nach dem IR-Aufheizen unter normalen Umgebungsbedingungen bei Raumtemperatur weiterhin an. Zum Ende der Transferzeit erreichen die Kernstege einen gemittelten Wert von ca. 140°C und die Deckschichten etwa 150°C. Somit weist der Kern ein plastisch formbares Verhalten und die Deckschichtmatrix den notwendigen Schmelzezustand auf. Bei der Formgebung ist zu berücksichtigen, dass der Kern jedoch auch deutlich an Druckfestigkeit verliert. Tabelle 5 veranschaulicht Ergebnisse von temperaturabhängigen Druckversuchen mit dem Sandwichverbund TS1 bei Raumtemperatur, 80°C sowie 140°C. Die ermittelten Werte verdeutlichen die signifikante Abnahme der Druckfestigkeit und des Druckmoduls im Verarbeitungszustand im Vergleich zur RT.

Tabelle 5: Druckmodul und Druckfestigkeit des Sandwichverbunds TS1 bei RT, 80°C sowie 140°C

Temperatur	Druckmodul [MPa]	Druckfestigkeit [MPa]
RT	63	2,3
80°C	24	0,8
140°C	12	0,4

Für die Formgebung ist das Abkühlverhalten des Sandwichverbunds beim Kontakt mit der metallischen Werkzeugwand ebenfalls relevant. Der Wärmetransfer zwischen kontaktiertem Sandwichverbund und Werkzeugwand basiert auf konduktiver Wärmeleitung. Diese führt bei Kontakt der Werkzeugwand mit der Deckschicht unter leichter Druckeinwirkung zu einer deutlich gesteigerten Abkühlrate im Deckschichtverbund im Vergleich zum konvektiven Abkühlen an der Umgebungsluft (vgl. Abb. 53). Durch den Werkzeugkontakt kann somit innerhalb von zwei Sekunden der Deckschichtverbund unter die Rekristallisationstemperatur des Matrixsystems abgekühlt und somit der FKV verfestigt werden. Die nachfolgende Abbildung 53 veranschaulicht entsprechende Temperaturverläufe der Deckschichten sowie der zentralen Kernstegbereiche beim Thermoformen des Sandwichverbundes TS1 im für das Ziehformen relevanten Zuschnittsabschnitt mit einem auf 60 °C temperierten Formgebungswerkzeug.

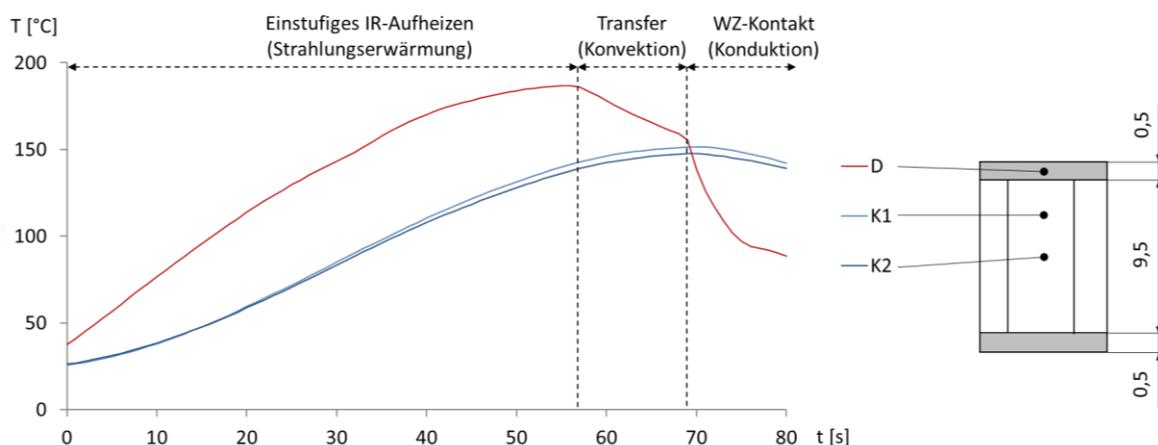


Abb. 53: Temperaturverläufe im Sandwichverbund während des Thermoformens im zum Ziehformen optimal aufgeheizten Zuschnittsbereich

### 6.3 Pressformen der Bauteilränder

Das Pressformen des Sandwichverbundes ist vor allem für das Schließen der Bauteilränder einer thermogeformten Sandwichstruktur von Bedeutung. Hierbei sollen zum einen die Deckschichten nach einer vom Bauteildesign abhängigen Randgeometrie zusammengeführt werden. Zum anderen gilt es, die Deckschichten und das dazwischen befindliche Kernmaterial im zusammengeführten Bereich so zu verpressen, dass nach der Formgebung ein möglichst dichter Randabschluss resultiert. Mit diesem Randabschluss kann der Wabenkern vor Umgebungseinflüssen bzw. Feuchteintritt geschützt werden.

Erste im Bearbeitungszeitraum der vorliegenden Arbeit durchgeführte Pressformuntersuchungen beschäftigten sich mit dem Herstellen eines Randabschlusses, wobei eine der beiden Deckschichten als 30°-Fase mit der zweiten Deckschicht zusammengebracht und weiterführend eben als druckstabiles Dreischichtlaminat ausläuft. Abbildung 54 veranschaulicht schematisch zwei untersuchte Formgebungsabläufe für das Pressformen des beschriebenen Randabschlusses. Es ist sowohl das Pressformen mit einer einteiligen Werkzeugform (vgl. Abb. 54a) als auch das daraus entwickelte Pressformen mit vorlaufendem Formsegment (vgl. Abb. 54b) dargestellt. Unterhalb dieser schematischen Darstellungen ist der Querschnitt einer im entsprechenden Formgebungsablauf hergestellten Versuchsstruktur abgebildet.

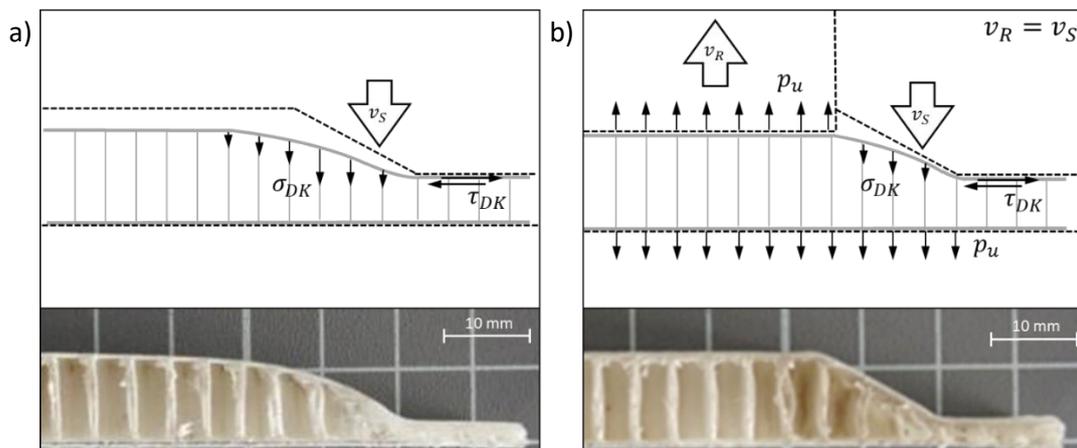


Abb. 54: Pressformen mit einteiliger Werkzeugform (a) sowie Pressformen mit vorlaufendem Formsegment (b)

Beim Pressformen mit einteiliger Werkzeugform führt der Erstkontakt des Werkzeugs zu einem Spannen der Endlosfasern über den Wabenkern in Richtung Bauteilmitte. Beim Spannen der Fasern kommt es zu einer Druckbelastung des Kerns, woraus die dargestellten Kerndruckspannungen  $\sigma_{DK}$  resultieren. Diese sind von der Abgleitbewegung der Deckschicht auf dem Kern und somit den interlaminae Scherspannungen  $\tau_{DK}$  im zum Dreischichtlaminat zu verpressenden Randbereich abhängig. Da der Kern im aufgeheizten Zustand nur eine geringe Druckfestigkeit aufweist, führen die resultierenden Druckspannungen  $\sigma_{DK}$  zu einem unkontrollierbaren Kollabieren des Wabenkerns in Richtung Bauteilmitte. Dies ist mit einer geometrisch nicht definierten Ausformung des herzustellenden Randabschlusses sowie einer Deformation der nicht zu verpressenden angrenzenden Bauteilbereiche verbunden, was am Querschnitt der analog zur schematischen Darstellung hergestellten Versuchsstruktur nachvollziehbar ist.

Die resultierenden Druckspannungen  $\sigma_{DK}$ , die durch das Spannen der Endlosfasern beim Pressformen mit einteiliger Werkzeugform zum unkontrollierbaren Kollabieren des Wabenkerns führen, werden im entwickelten Formgebungsablauf über ein vorlaufendes Formsegment aufgenommen. Dieses entlastet den Kern im nicht zu verformenden Sandwichbereich, was ein Verlagern der resultierenden Druckspannungen zwischen das vorlaufende Formsegment sowie den äußeren Pressformflächen bedingt. Durch die entlastende Wirkung ist ein Ausformen der 30°-Fase unter Vermeidung von unerwünschten Deformationen in Richtung Bauteilmitte möglich, wie der Querschnitt der in Abbildung 54b analog dazu hergestellten Versuchsstruktur veranschaulicht. Zur Entlastung des nicht zu verformenden Sandwichbereichs wird das vorlaufende Formsegment mit Erreichen des für den zugehörigen Kavitätsabschnitt finalen Formspalts mechanisch in eine zur Werkzeugschließbewegung  $v_S$  synchronisierte Rückstellbewegung  $v_R$  versetzt sowie der am vorlaufenden Formsegment kontaktierte Deckschichtbereich an diesem durch Unterdruck fixiert. Um zu vermeiden, dass die zweite nicht zu stabilisierende Deckschicht bei eventuellen Undichtheiten im mittels Unterdruck stabilisierten Deckschichtbereich mit in Richtung des vorlaufenden Formsegments angesaugt wird, muss diese zeitgleich mit demselben Unterdruck an die Gegenform angesaugt werden. Der zur Unterdruckfixierung notwendige Werkzeugaufbau und die umgesetzte Mechanik der Synchronisation beider translatorischen Bewegungen werden im Abschnitt 7.2 erläutert. Auf Messergebnisse zum wirkenden Unterdruck beim Fixieren der Deckschichten, der auch zum Konsolidieren notwendig ist, wird zum Ende des Abschnitts 6.5 eingegangen.

Der Sandwichzuschnitt beider in Abbildung 54 dargestellten Versuchsstrukturen wurde vor der Formgebung einheitlich auf einen für das Ziehformen des Sandwichverbunds geeigneten thermischen Zustand im IR-Ofen erwärmt. Der Querschnitt, der in Abbildung 54b dargestellten Probe verdeutlicht, dass ein einheitlich aufgeheizter Sandwichzuschnitt zwar ausreichend ist, um den als 30°-Fase ausgeführten Übergangsbereich beim Pressformen mit vorlaufendem Formsegment geometrisch korrekt auszuformen. Dies geht jedoch mit einem Ausknicken der Kernstege im Übergangsbereich einher. Zudem verschmelzen die Sandwichkomponenten, der Kern und die beiden Deckschichten im gepressten Dreischichtlaminat nur teilweise miteinander. Um beim Pressformen das Ausknicken der Zellwände im Übergangsbereich zu reduzieren sowie ein Verschmelzen des zu verpressenden Sandwichverbundes im Dreischichtlaminat sicherzustellen, ist es notwendig, den in Abschnitt 5.3 erläuterten einstufigen IR-Aufheizprozess mit zwischengeschalteter Abschirmphase im Thermoformablauf einzubinden. Mit diesem kann ein höheres Temperaturniveau im zu verpressenden Randbereich eingestellt werden. Abzuschirmen ist der Zuschnittsbereich, der vom vorlaufenden Formsegment beim Pressformen stabilisiert wird. Die nachfolgende Abbildung 55 veranschaulicht den Querschnitt einer entsprechenden thermogeformten Versuchsstruktur, wobei vor dem Pressformen der einstufige IR-Aufheizprozess mit einer zwischengeschalteten Abschirmphase von 10 Sekunden eingesetzt wurde.



Abb. 55: Querschnitt eines pressgeformten Randabschlusses unter Anwendung des einstufigen IR-Aufheizprozessschritts mit zwischengeschalteter Abschirmphase

Beim IR-Aufheizen mit zwischengeschalteter Abschirmphase kommt es durch das Überhitzen des Randbereichs bereits im IR-Ofen umlaufend am Sandwichzuschnitt zu einer leichten Kernhöhenverringern an der Zuschnittskante. Dies ist für das nachträgliche Pressformen als unkritisch zu bewerten. Des Weiteren resultiert aus den höheren Kerntemperaturen im Randbereich eine verbesserte Fließfähigkeit der Deckschichtmatrix sowie des Kernmaterials. Dies führt beim Verpressen der Sandwichkomponenten im Bereich des Dreischichtlaminats zur Matrixquerperkolation, was ein leichtes Auspressen von Kernmaterial aus dem zu kompaktierenden Verbund nach außen sowie ins Innere der Übergangsgeometrie zur Folge hat.

Sowohl beim Pressformen als auch beim im Abschnitt 6.5 beschriebenen Zieh-Pressformen wird der maximale Druck während der Formgebung im Pressspalt der Werkzeugform erreicht, in welchem das Dreischichtlaminat gepresst wird. Um Aussagen treffen zu können, welcher maximale Druck beim Pressen des Dreischichtlaminates im Pressspalt wirkt, wurde beim Pressformen der nachfolgend dargestellten Versuchsstruktur mit als 30°-Fase ausgeführtem Übergangsbereich die Stempelkraft gemessen. Aus dem Verlauf der Stempelkraft ist unter Berücksichtigung der projizierten Fläche des zu verpressenden Dreischichtlaminats der Druckverlauf im Pressspalt bzw. am Bauteilrand wie folgt nachvollziehbar.

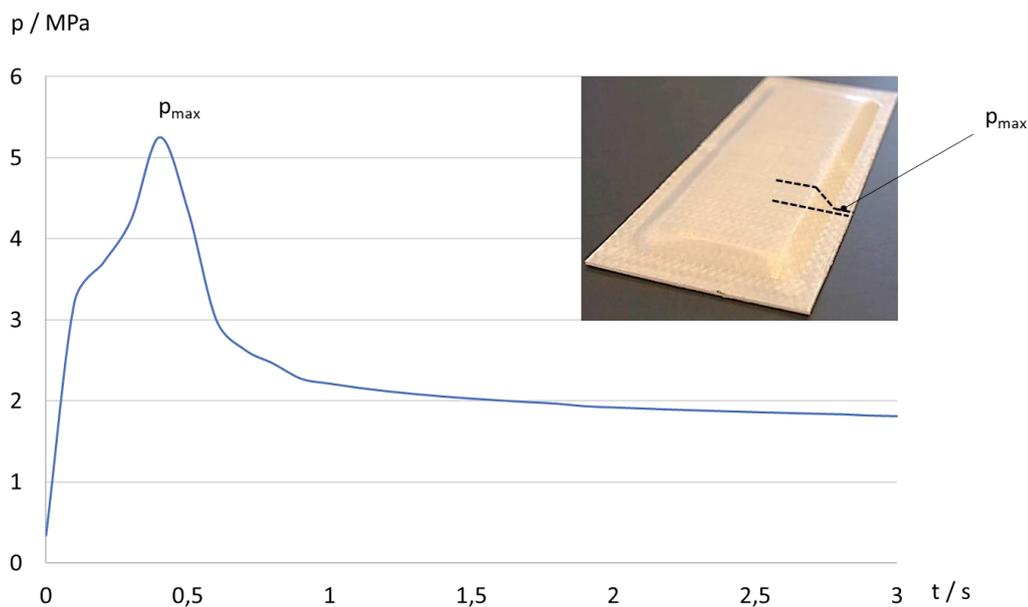


Abb. 56: Druckverlauf beim Pressen des ebenen Dreischichtlaminates sowie die hierbei pressgeformte Versuchsstruktur

Der maximale Druck, der in den Versuchen beim Pressformen des Sandwichverbunds TS1 ermittelt werden konnte, lag bei 5,4 MPa. Allgemein ist der maximale Pressdruck neben dem Sandwichaufbau vom beim IR-Aufheizen eingestellten Temperaturgradienten im Randbereich des Sandwichzuschnittes sowie der Spalthöhe abhängig. Für eine grobe Vordimensionierung bei der Werkzeugauslegung kann der hier angegebene maximale Druck jedoch als erster Richtwert herangezogen werden. Der Versuchsaufbau zum Pressformversuch kann im Anhang 3 nachvollzogen werden.

## 6.4 Einachsiges Ziehformen mit vorgespanntem Sandwichzuschnitt

Im Folgenden wird auf die anfänglichen Untersuchungen zum Thermoformen vorgefertigter Sandwichverbundhalbzeuge mit vorgespanntem Sandwichzuschnitt und einachsigem Ziehformen als Formgebungsschritt eingegangen. Ziel der Untersuchungen war es, im ersten Schritt der Forschungsaktivitäten eine generelle Verarbeitbarkeit von thermoplastischen endlosfaserverstärkten Sandwichverbundhalbzeugen mit Faltschichtkern mittels Ziehformen nachzuweisen. Darauf aufbauend konnten verschiedene während des Ziehformens im Sandwichverbund auftretende Phänomene analysiert und ausgewertet werden. Zudem wurden erste Studien zur Verformbarkeit der Sandwichverbunde mit besonderem Bezug auf die orthotropen Eigenschaften des Wabenkerns durchgeführt.

Eine Konzeptskizze des Versuchsaufbaus für die Ziehformuntersuchungen ist in Abbildung 57 dargestellt. Ziehgeformt wird im Versuch ein vorgespannter rechteckiger Sandwichzuschnitt ( $500 \times 80 \text{ mm}^2$ ). Der Einzug des Sandwichverbunds erfolgt über zwei drehbar gelagerte Einzugsrollen, mit welchen größere Reibwiderstände an der unteren Deckschicht des Einzugsbereichs vermeidbar sind. Die Sandwichprobe ist beidseitig an der oberen Deckschicht mit konstanten Vor- bzw. Einzugskräften beaufschlagt. Diese sollen das Aufrechterhalten einer ausreichenden Membranspannung innerhalb der oberen Deckschicht während des Ziehformens gewährleisten, um in der Deckschicht eventuelle Faltenbildungen am Innenradius ( $R_{100}$ ) der Sandwichprobe zu vermeiden. Die Einzugskräfte bleiben, wie bereits erwähnt, während der Einzugsbewegung konstant, was technologisch mit Hilfe von Rollfedern realisiert ist. Die lineare Bewegung des zylinderförmigen Stempels erfolgt durch beide Einzugsrollen hindurch, wobei die hierbei auftretenden Stempelkräfte mittels einer am Stempel befestigten Kraftmessdose erfassbar sind. Die Eindringtiefe des Stempels kann durch den variablen Abstand zwischen beiden Einzugsrollen sowie den freien Raum dahinter variiert werden. Konstruktiv ist die Aufnahme der Rollfedern so umgesetzt, dass mit unterschiedlichen Federn gearbeitet werden kann, um zunächst sinnvolle Einzugskräfte für den Ziehformversuch ermitteln sowie nachfolgend den Einfluss unterschiedlich hoher Einzugskräfte auf das Ziehformergebnis analysieren zu können.

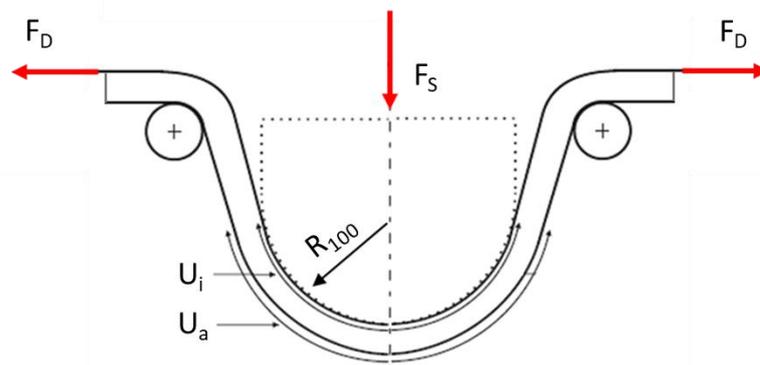


Abb. 57: Konzeptskizze zum einachsigen Ziehformversuch mit vorgespanntem Sandwichzuschnitt

Der technologisch umgesetzte Versuchsaufbau zum einachsigen Ziehformversuch mit vorgespanntem Sandwichzuschnitt ist in Abbildung 58 dargestellt. Zu sehen sind drei Darstellungen des Versuchsaufbaus während der Versuchsdurchführung mit der Pilotanlage KM200 (vgl. Abs. 7.3) in den für das Thermoformen relevanten Prozessschritten IR-Aufheizen, Transfer und Ziehformen. Neben den bereits bei der Konzeptvorstellung erwähnten technischen Details ist zu erkennen, dass das IR-Aufheizen des

Sandwichzuschnitts im vorgespannten Zustand innerhalb eines portablen Probenhalters erfolgt. Die beiden Verbindungstellen zu den Rollfedern an den äußeren Seiten des Probenhalters sind als Klippmechanismus ausgeführt. Hierbei stehen die fixierten Enden der oberen Deckschicht im direkten Kontakt mit metallischen Verbindungselementen des Klippmechanismus. Dies vermeidet das Aufschmelzen der Deckschichtmatrix im Bereich der beiden Verbindungstellen, was somit einen sicheren Sitz des vorgespannten Sandwichzuschnitts während der Prozessführung sicherstellt. Der Probenhalter wird samt vorgespanntem Zuschnitt nach dem IR-Aufheizen an der Einzugsseite fixiert und mit diesem über ein Linearführungssystem in den Arbeitsbereich der Spritzgussmaschine transferiert. Hier erfolgt der Ziehformprozess über den wassertemperierten metallischen Stempel. Die Einzugsrollen bestehen aus thermisch isolierendem Kunststoffrohr. Die thermische Isolationswirkung des Kunststoffrohrs soll nach dem IR-Aufheizen, d.h. beim Transfer und während der über den Stempel initiierten Einzugsbewegung konduktive Wärmeabfuhr an der Kontaktstelle aus der Deckschicht vermeiden bzw. wie im Vergleich zu einem metallischen Kontaktpartner den Wärmeübergang verringern.

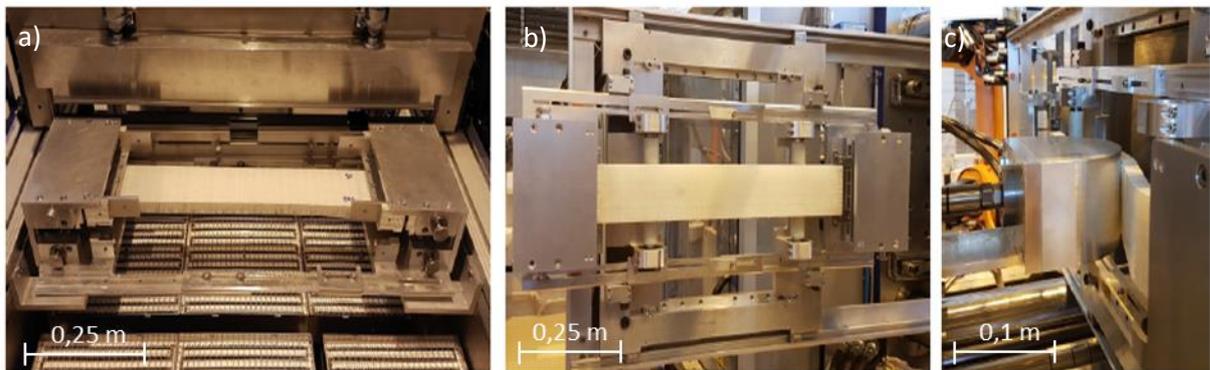


Abb. 58: Einachsiger Ziehformversuch mit Probenhalter im IR-Ofen (a), Probenhalter inklusive Einzugsseite vor dem Transfer in die Spritzgussmaschine (b) sowie Stempel- und Einzugsseite während des Ziehformens (c)

Der umgesetzte Versuch erfolgt halbautomatisch, wobei lediglich der Transfer des Probenhalters nach dem IR-Aufheizen in den Arbeitsbereich der Spritzgussmaschine manuell durchgeführt wird. Hierzu wird der Probenhalter aus dem IR-Ofen entnommen, an der Einzugsseite eingerastet und in den Arbeitsraum der Spritzgussmaschine eingeschoben. Das einstufige IR-Aufheizen und das Ziehformen erfolgen vollautomatisiert. Nachfolgend sind die während der Versuchsdurchführung umzusetzenden Prozessschritte stichpunktartig zusammengefasst:

- Fixieren bzw. Vorspannen eines Sandwichzuschnitts im Probenhalter
- Platzieren des Probenhalters mit vorgespanntem Sandwichzuschnitt im IR-Ofen
- Einstufiges IR-Aufheizen des Sandwichverbunds
- Manueller Transfer des Probenhalters aus dem IR-Ofen in die Spritzgussmaschine
- Ziehformen des Sandwichverbunds infolge der Werkzeugschließbewegung
- Abkühlen und manuelle Entnahme der ziehgeformten Versuchsstruktur samt Probenhalter

Untersuchungen mit dem beschriebenen Versuchsaufbau wurden mit den Sandwichverbunden TS3 und TS4 durchgeführt. Hierbei konnte in den Verarbeitungsstudien eine generelle Thermoformbarkeit der vorgefertigten Sandwichhalbzeuge mittels Ziehformen nachgewiesen werden. Für das Ziehformen ist grundsätzlich unter den beschriebenen Randbedingungen ein Vorspannen der oberen Deckschicht notwendig, um nicht bereits bei einer Stempelleindringtiefe von wenigen Millimetern Faltenbildungen im Deckschichtbereich des auszuformenden Innenradius am Stempel zu initiieren. Bei vom Sandwichverbund abhängigen Vorspannkraften sowie Aufheizparametern sind beide Sandwichverbunde mit gleicher Stempelvorschubgeschwindigkeit unter Erhalt der grundsätzlichen Kern- sowie Deckschichtmorphologie über 50 mm tief ziehformbar. Die nachfolgende Tabelle 6 veranschaulicht die Verarbeitungsparameter, mit welchen die Sandwichzuschnitte auf die jeweilige maximale Stempelleindringtiefe ziehgeformt werden konnten.

Tabelle 6: Prozessparameter zum einachsigen Ziehformen mit vorgespanntem Sandwichzuschnitt

Parameter	TS3	TS4
Maximale Oberflächentemperatur [°C]	170	170
Durchwärmzeit [s]	10	15
Gemittelte Transferzeit [s]	15	15
Stempeltemperatur [°C]	50	50
Umformgeschwindigkeit [mm/s]	35	35
Vor- bzw. Einzugskraft [N]	40	80

Die Versuchsergebnisse mit beiden Sandwichkonfigurationen weisen hinsichtlich der Mechanismen, die während des Ziehformens in der Verbundstruktur vonstattengehen, ein analoges Verformungsbild auf. In Bezug auf den Wabenkern ergeben sich bei optimaler Prozessführung im einachsigen Ziehformversuch drei Verformungsmechanismen, welche mit den in Abschnitt 2.1 beschriebenen Deformationen für das einachsige Biegen eines Sandwichbalkens korrelieren. D. h. aufgrund der für Biegung typischen Hauptbeanspruchungsarten kommt es im Bereich des umgeformten Radius am Stempel in Folge des Abbaus von auftretenden Zug-Druck-Bbeanspruchungen über die Sandwichhöhe von der neutralen Faser aus zu einem zunehmenden Stauchen der Wabenzellen in Richtung Innenradius bzw. einem vermehrten Strecken der Zellen in Richtung Außenradius. Die folgende Abbildung 59 veranschaulicht das beschriebene Verformungsbild der Wabenzellen im Bereich des Stempelradius.

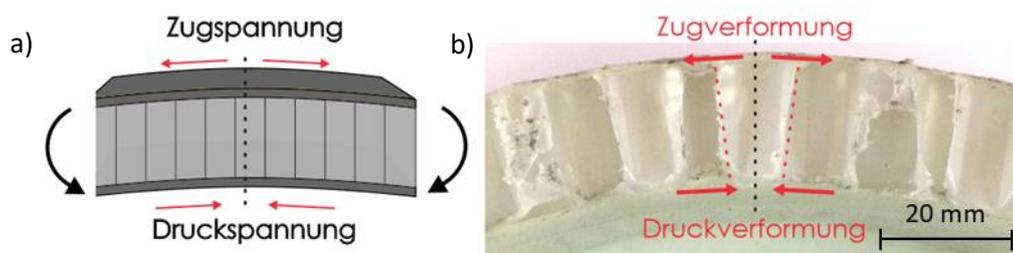


Abb. 59: Zug-Druck-Bbeanspruchungen am einachsigen ziehgeformten Sandwich (a) und resultierende plastische Zug-Druck-Verformung der Zellwände (b)

Der zweite Verformungsmechanismus ist auf die beim Ziehformen auftretenden Querkraftschubbeanspruchungen in der Sandwichstruktur zurückzuführen (vgl. Abb. 60a). Lokalisiert ist das Schubverformen des Wabenkerns im Besonderen im Bereich der freien Umformzone, d.h. in den Zuschnittsbereichen zwischen den ziehgeformten Stempelradien und den kleineren Radien der Einzugsrollen. Die Schubverformung zeichnet sich nach dem Ziehformen durch eine s-förmige, plastische Deformation der Zellwände des Wabenkerns nahe beider Deckschichten ab (vgl. Abb. 60b). Infolge der verstärkten Abgleitbewegung der vorgespannten Deckschicht ist die Schubverformung des Kerns im Kontaktbereich zu dieser auch stärker ausgeprägt. Die Abweichungen des deckschichtnahen Schubverformens im Vergleich zur aufgezeigten Schubdeformation aus Abschnitt 2.1 ergeben sich aufgrund der erhöhten Kerntemperaturen nahe der Fügezone im Vergleich zu dem zentraleren kälteren Kernbereich nach dem IR-Aufheizen.

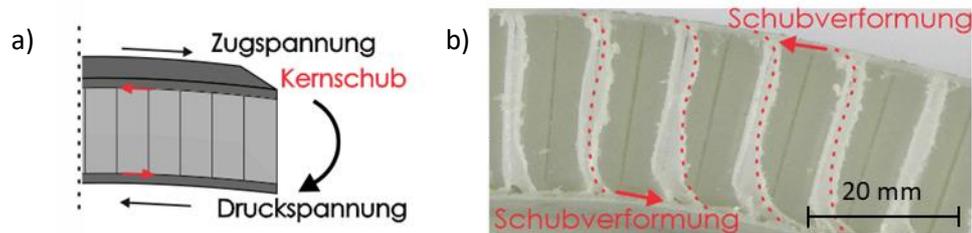


Abb. 60: Querkraftschubbeanspruchung des Sandwichs (a) und resultierende plastische Schubverformung der Zellwände (b)

Der dritte Verformungsmechanismus, der beim Ziehformen im Kern auftritt, ist eine leichte Kernhöhenverringering nahe der Fügezonen des Kerns zu beiden Deckschichten. Diese resultiert infolge von flächig in die Zellen eingeleiteten Druckbeanspruchungen sowie der erhöhten Zellwandtemperatur im Bereich der Fügezonen. Die in Abbildung 61a dargestellte Flächenpressung ergibt sich durch das Spannen der Deckschichten während der vom Stempelvorschub initiierten Einzugsbewegung des Sandwichzuschnitts. Verstärkt tritt die Flächenpressung in den Kontaktbereichen des Stempels und der beiden Einzugsrollen auf, wo nach der Formgebung auch die stärkste Kernhöhenreduzierung nachweisbar ist. Das Verformungsbild der im hier beschriebenen Versuch nachgewiesenen Kernhöhenverringering stellt sich als ein plastisches Stauchen der Zellwandansätze nahe den Decklagen dar (vgl. Abb. 61b).

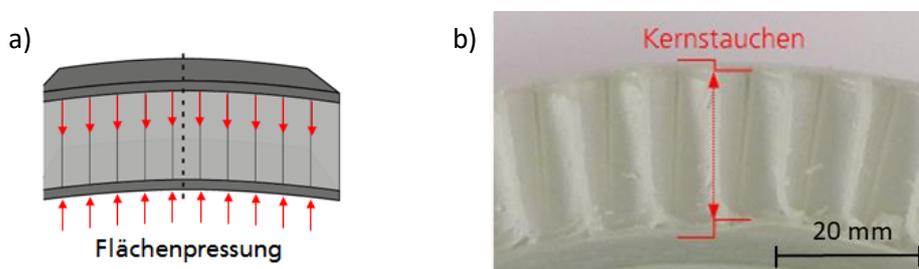


Abb. 61: Flächenpressung des Kerns und daraus resultierendes plastisches Stauchen der Zellwände nahe den Deckschichten

Die drei beschriebenen Verformungsmechanismen bzw. die daraus resultierenden Kerndeformationen können generell auch überlagert auftreten. Dies war bei den Versuchen im Bereich der Einzugsrollen der Fall, worauf im Folgenden nochmal eingegangen wird. Zudem wird im Abschnitt 6.5 aufgezeigt,

dass mit optimierter Prozessführung, mit unter anderem automatisiertem und somit schnellerem Transfer des aufgeheizten Zuschnitts ein deutlich reduziertes plastisches Verformen der Zellwände auch nahe den Fügezonen erzielbar ist.

Hinsichtlich der als Cross-Ply ausgeführten Deckschichten kommt es innerhalb der Endlosfasern zu zwei für einen einachsigen Ziehformprozess relevanten Verformungsmechanismen: einachsiges Faserbiegen und interlaminares Scheren (vgl. Abs. 4.2.2. Ebenfalls bleiben, wie in Abschnitt 4.2.2 erläutert, die 90° zur Biegelinie ausgerichteten Endlosfasern während und nach der Formgebung nahezu unverformt. Aufgrund der vergleichsweise hohen Distanz der Deckschichten zur neutralen Faser kommt es in den Bereichen der umgeformten Radien, d.h. im während der Formgebung Zug-Druck-beanspruchten Zuschnittsbereich (vgl. Abb. 62b), zu einem Verdichten bzw. Lichten der 90° zur Biegelinie ausgerichteten Fasern. Nach der Formgebung verdeutlicht sich dieser Effekt in sehr dicht gepackten Faseranordnungen in der 90°-Lage am ziehgeformten Innenradius (vgl. Abb. 62b) bzw. leichter Gassenbildung am Außenradius (vgl. Abb. 62c).

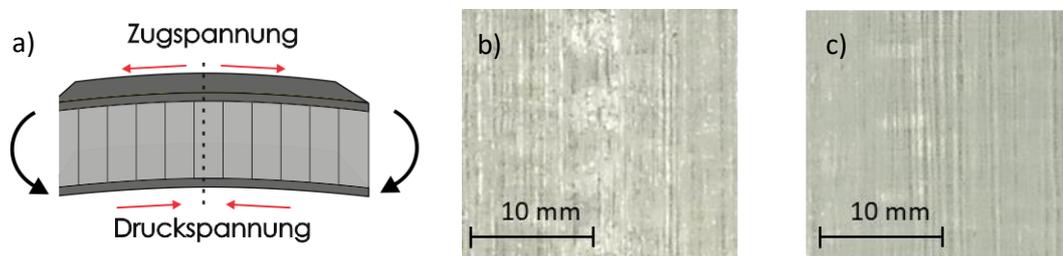


Abb. 62: Zug-Druck-Beanspruchungen am einachsig ziehgeformten Sandwich (a) sowie resultierendes Verdichten (b) bzw. Lichten der Endlosfasern innerhalb der Deckschicht (c)

Für eine erste Bewertung der Verformbarkeit der Sandwichverbunde mit endlosfaserverstärkten Deckschichten und Wabenkern in den zwei Kernhauptrichtungen wurden vergleichende Studien durchgeführt, wobei aufeinanderfolgende Ziehformversuche mit jeweils erhöhter Stempelleindringtiefe durchgeführt wurden. Die gewählte Schrittweite bezüglich der erhöhten Stempelleindringtiefe betrug pro Versuch 5 mm. Die Versuche wurden so lange durchgeführt, bis es an den Proben zu den ersten sichtbaren Fehlstellen kam. Ein für diese Untersuchungen repräsentatives Ergebnis mit dem Sandwichverbund TS3 ist in der folgenden Abbildung 63 veranschaulicht.

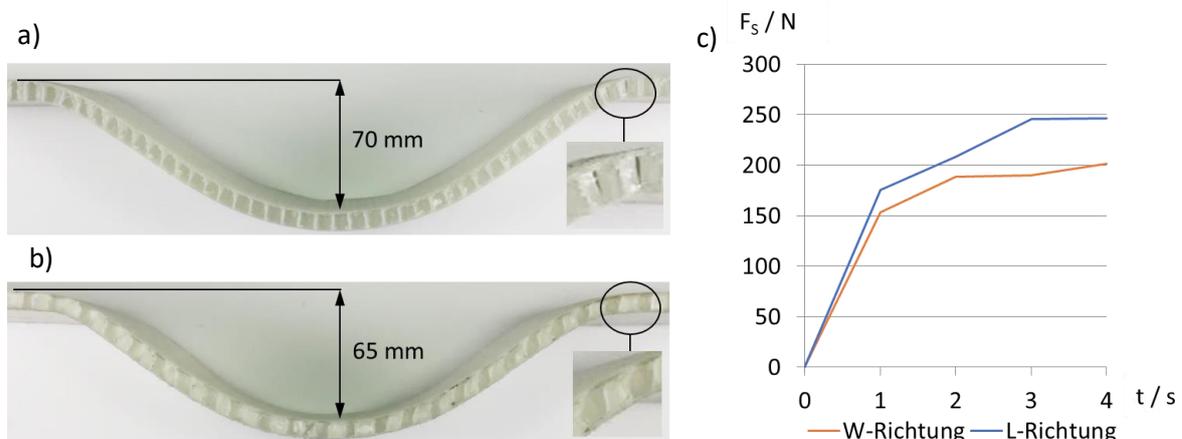


Abb. 63: Vergleich der Verformbarkeit des Sandwichverbunds in W-Richtung (a) und L-Richtung (b) des Wabenkerns sowie die im jeweiligen Versuch wirkende Stempelkraft (c)

Die dargestellten Ergebnisse der ziehgeformten Sandwichzuschnitte mit zur Probenlängsrichtung um  $90^\circ$  gedrehtem Sandwichaufbau verdeutlichen einen unwesentlichen Unterschied hinsichtlich deren Verformbarkeit in den zwei Hauptrichtungen des Kerns. Eine weitere Erhöhung der in den Abbildungen veranschaulichten Stempeltiefe führt zu ersten sichtbaren strukturellen Defekten an den Deckschichten im Bereich der Einzugsrollen. Wie die Detailaufnahmen verdeutlichen, kommt es in diesem Bereich zu einer Überlagerung der drei beschriebenen Kernverformungsmechanismen. Die Detailaufnahme des in W-Richtung ziehgeformten Zuschnitts verdeutlicht, dass es hier im Bereich mit kleinerem Krümmungsradius beim Ziehformen neben dem plastischen Verformen der Zellwände zu einem Umorientieren der Einzelzellen kommen kann. In L-Richtung wird der Kern aufgrund der durchgängigen Zellwände ausschließlich plastisch verformt. Die neben den ziehgeformten Proben dargestellten Messergebnisse, die durch die am Stempel integrierte Kraftmessdose erfasst wurden, zeigen, dass beim Ziehformen des Sandwichverbundes in L-Richtung höhere Kräfte auftreten als in W-Richtung. Dies ist mit der höheren Schubsteifigkeit des Wabenkerns in L-Richtung zu begründen. Die Messergebnisse verdeutlichen zudem, dass für das Ziehformen der Sandwichverbunde nur sehr geringe Stempelkräfte notwendig sind.

Die ersten sichtbaren Defekte, die beim Überschreiten des maximalen Stempelwegs am Sandwichverbund auftreten, sind Fehlstellen in Form von Faltenbildungen bzw. Welligkeiten in den Deckschichten. Hierbei unterscheidet sich das Fehlerbild in Abhängigkeit zur jeweiligen Kernhaupttrichtung. Der Sandwichverbund neigt bei Überschreiten der maximalen Verformbarkeit in W-Richtung des Kerns zu Faltenbildung am geformten Innenradius. Hier ist davon auszugehen, dass bei nicht ausreichender Membranspannung die Abgleitbewegung zwischen Kern und Deckschicht unterbrochen wird und die entsprechende Deckschicht im Innenradius zu einem Wölben zwischen die Doppelzellwände neigt (vgl. Abb. 64a). Die Falten bzw. Welligkeiten verlaufen hierbei quer zur Biegelinie in Richtung der doppelten Zellwände.

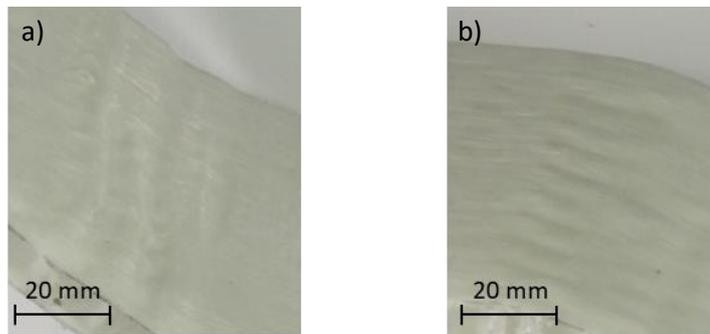


Abb. 64: Faltenbildung (a) und Welligkeiten (b) im Deckschichtverbund nach dem einachsigen Ziehformen

In L-Richtung des Kerns kommt es beim Überschreiten des maximalen Stempelwegs am Außenradius zu Welligkeiten in der Deckschicht längs zur Biegelinie. Dieser Effekt kann ebenfalls mit der Anordnung der doppelten Zellwände im Sandwichverbund in Verbindung gebracht werden. Hier führen die resultierenden Druckbeanspruchungen, die sich aus dem Spannen der Deckschicht über den Kern ergeben, zu einem Versagen der in diesem Fall höher belasteten Einzelzellwände. Die mittig verlaufenden Doppelzellwände behalten hingegen annähernd ihre Ausgangshöhe bei, woraus die entsprechenden Welligkeiten resultieren (vgl. Abb. 64b).

Weitere Fehler, die neben den geometrischen Randbedingung auch durch ungünstig gewählte Prozessparameter auftreten können, sind ein Druckversagen bzw. vollständiges Kollabieren des Kerns. Ein Kollabieren des Kerns kann die Folge einer überhitzten Sandwichstruktur nach dem IR-Aufheizen darstellen (vgl. Abb. 65a). Auch stark schubverzerrte Wabenzellen ist ein Fehlerbild, was im Wabekern auftreten kann. Starke Schubverzerrungen im Kern können aufgrund einer unzureichend aufgeschmolzenen Grenzschicht zwischen Kern und Deckschicht resultieren (vgl. Abb. 65b). Derartige Defekte können mit zu gering gewählter maximaler Oberflächentemperatur oder Durchwärmzeit beim einstufigen IR-Aufheizen sowie mit zu langen Transferzeiten in Verbindung gebracht werden.

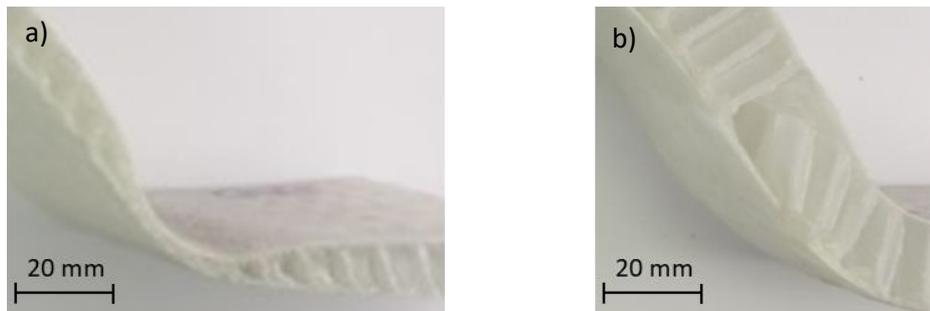


Abb. 65: Mögliche Fehlstellen beim einachsigen Ziehformen im Wabekern infolge Kerndruck- (a) oder Kernschubversagens (b)

## 6.5 Zieh-Pressformen mit niedergehaltenem Sandwichzuschnitt

In diesem Abschnitt wird auf das Zieh-Pressformen des Sandwichverbunds eingegangen, d. h. einem kombinierten Formgebungsablauf des im Abschnitt 6.3 erläuterten Pressformens mit vorlaufendem Formsegment sowie dem Ziehformen mit einem geeigneten Niederhalter. Der Prozessablauf sowie die dazu notwendige Werkzeug- und Anlagentechnik kann so umgesetzt werden, dass die bis hierhin und in diesem Abschnitt erläuterten Methoden des Thermoformens der Sandwichverbunde auch in hybrider Verfahrensweise mit dem Thermoplastspritzgießen kompatibel sind (vgl. Abs. 7). Die nachfolgende Abbildung 66 veranschaulicht die hergeleitete Versuchsstruktur, an welcher die systematisch durchgeführten Entwicklungsarbeiten und Untersuchungen zum Thermoformen mit kombinierten Formgebungsschritt aus Zieh- und Pressformen umgesetzt wurden.

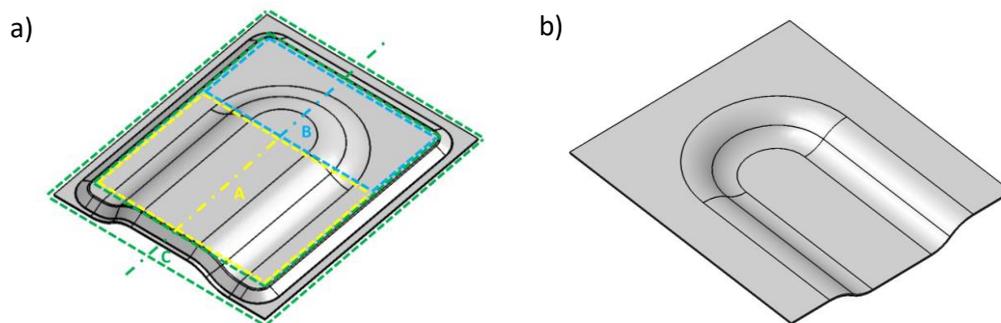


Abb. 66: Bauteildesign der Versuchsstruktur für die Untersuchungen zum Zieh-Pressformen dargestellt von der Ober- (a) sowie Unterseite (b)

Die Geometrie der Versuchsstruktur ist einfach symmetrisch ausgeführt und besteht für gemeinsame, aber auch selektive Untersuchungen zum einachsigen sowie dreidimensionalen Ziehformen und dem kombinierten Zieh-Pressformen aus drei Teilbereichen. Die Bereiche A und B sind für das Analysieren des Ziehformens von Bedeutung, wobei die Form des Bereichs A ein einachsiges und des Bereichs B ein dreidimensionales Ziehformen des Sandwichverbundes bedingt. Der Bereich C stellt den im Pressformschritt herzustellenden Randabschluss dar. Die geometrischen Details der Versuchsstruktur, d.h. die Radien der ziehgeformten Doppelkrümmung sowie die Eindringtiefe der Positivform und die 30°-Fase vom Randabschluss wurden bei der Bauteilgestaltung nach den aus Abschnitt 6.3 und 6.4 gewonnenen Erkenntnissen gewählt.

Der Prozessablauf des Thermoformens mit formgebendem Zieh-Pressformschritt ist vereinfacht in Abbildung 67 veranschaulicht. Die Hauptprozessschritte sind wie dargestellt das einstufige IR-Aufheizen mit zwischengeschalteter Abschirmphase sowie das Zieh-Pressformen des aufgeheizten Sandwichverbundes im temperierten Formgebungswerkzeug. Zwischen beiden Hauptprozessschritten erfolgt der robotergeführte Heißtransfer des Sandwichzuschnitts ins Formgebungswerkzeug. Unterhalb der schematischen Abbildungen zu den Prozessschritten sind die zugehörigen Prozessparameter aufgeführt, mit denen das Verformungsverhalten beim Zieh-Pressformen des Sandwichverbunds maßgeblich beeinflusst werden kann.

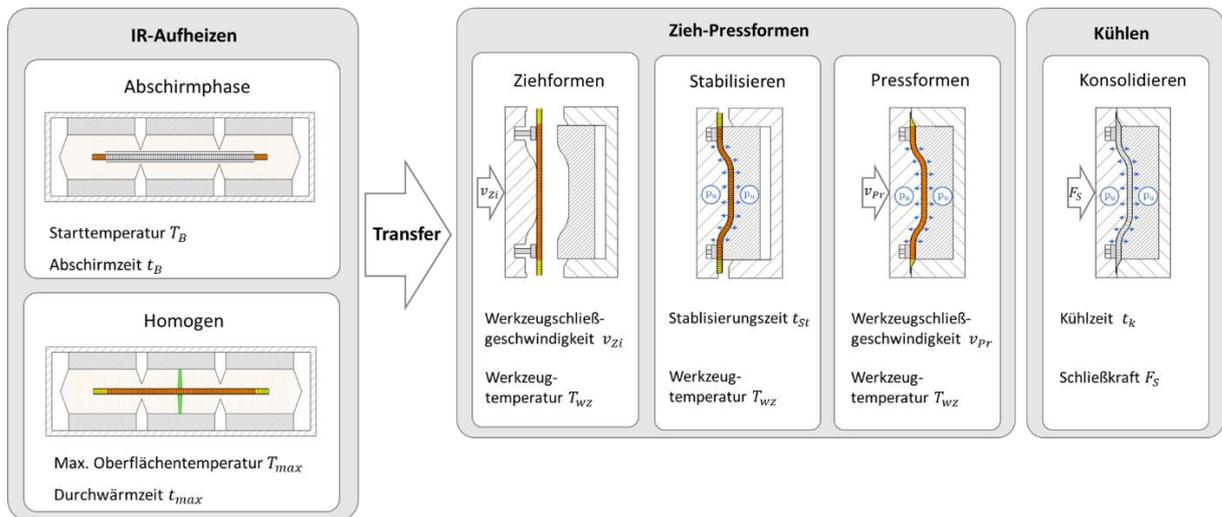


Abb. 67: Thermoformablauf des Zieh-Pressformens sowie relevante Prozessparameter

Im Nachgang wird auf die einzelnen Prozessschritte eingegangen. Der Fokus liegt bei den bis hierhin noch nicht erörterten Themen, wie dem Heißtransfer des Sandwichzuschnitts, dem Ziehformen mit Niederhalterunterstützung sowie dem unterdruckunterstützten Stabilisieren und Konsolidieren des Sandwichverbunds. In der nachfolgenden Tabelle 7 sind die Prozessparameter angegeben, mit welchen sich die Sandwichverbunde TS1 und TS2 optimal zur 3D-gekrümmten Sandwichschale mit definiert geschlossenem Bauteilrand verarbeiten lassen.

Tabelle 7: Prozessparameter zum Zieh-Pressformen mit den Sandwichverbunden TS1 und TS2

Parameter	TS1	TS2
Maximale Oberflächentemperatur [°C]	178	178
Durchwärmzeit [s]	5	10
Transferzeit [s]	11	11
Werkzeugtemperatur [°C]	60	60
Werkzeugschließgeschwindigkeit (Ziehformen) [mm/s]	80	80
Werkzeugschließgeschwindigkeit (Pressformen) [mm/s]	30	30
Stabilisierungszeit [s]	1	1
Kühlzeit [s]	30	30
Schließkraft [kN]	1000	1000

#### IR-Aufheizen:

Auf das einstufige IR-Aufheizen mit zwischengeschalteter Abschirmphase sowie das thermische Verhalten des Sandwichverbunds während der Prozessfolge ist bereits ausführlich in den Abschnitten 5.3.2 und 6.2 eingegangen. Wichtig für das anfängliche IR-Aufheizen ist, dass während der kombinierten Formgebung der Sandwichverbund beim Ziehformschritt die deutlich empfindlicheren Verarbeitungseigenschaften aufweist. Aus diesem Grund ist es notwendig den Wärmeeintrag beim IR-

Aufheizen mit zwischengeschalteter Abschirmphase im großflächigen Zuschnittsbereich, der für das Ziehformen relevant ist, optimal über die in Abschnitt 5.3.3 erläuterte Heizonenregelung zu regeln. Das leichte Überhitzen des presszuformenden Randbereichs ist ausreichend genau über die zeitgesteuerte Abschirmphase einstellbar. Nach dem IR-Aufheizen erfolgt der Heißtransfer des aufgeheizten Sandwichzuschnitts ins Formgebungswerkzeug.

#### Heißtransfer:

Wie in Abschnitt 6.2 erläutert, muss der Transfer des aufgeheizten Zuschnitts aus dem IR-Ofen ins Werkzeug innerhalb von Sekunden erfolgen, um den durch das IR-Aufheizen eingestellten formbaren Zustand während der Formgebung nutzen zu können. Hier gilt wie bei der Organoblechverarbeitung, dass mit kürzeren Transferzeiten auch bessere Ergebnisse bei der Formgebung erzielbar sind. Zum Greifen des Sandwichzuschnitts beim robotergeführten Transfer nach dem IR-Aufheizen eignen sich Saug- sowie Nadelgreifer, welche industriell für die Organoblechverarbeitung verfügbar sind (vgl. Abs. 4.4.2). Mit beiden Greifertypen ist ein prozesssicherer Transfer des Sandwichzuschnitts möglich. Jedoch kommt es in beiden Fällen zu Abzeichnungen des Greifers an der zu greifenden Deckschicht (vgl. Abb. 68). Aus diesem Grund ist es vorteilhaft, wenn der aufgeheizte Sandwichzuschnitt für den Transfer vom IR-Ofen ins Formgebungswerkzeug nicht an der späteren Sichtseite des Bauteils gegriffen wird. Von den erprobten Greifertypen hinterließen Nadelgreifer die geringsten Spuren im zu greifenden Deckschichtbereich. Stärkere Abdrücke haben die beiden getesteten Sauggreifer aus Teflon und Silikon hinterlassen.

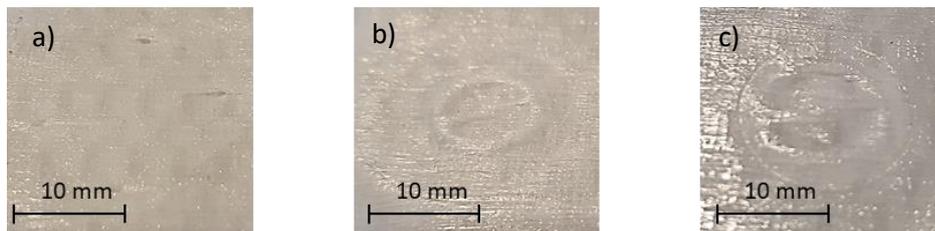


Abb. 68: Abzeichnungen der Nadel- (a) Teflonsaug- (b) und Silikonsauggreifer (c) im gegriffenen Deckschichtbereich der thermogeformten Sandwichschale

Die angestrebte hybride Fertigung eines funktionalisierten Sandwichbauteils innerhalb einer Standardspritzgussmaschine mit horizontaler Arbeitsrichtung erfordert bei der Übergabe des aufgeheizten Zuschnitts ins Werkzeug einen höheren Aufwand. Dieser muss hierbei gegen Herunterfallen gesichert werden. Das Fixieren des Zuschnitts am Werkzeug kann mit Hilfe von Unterdruck an kleinen zu den Kavitätsflächen konturgefrästen Vakuumsaugelementen aus porösem Metall (vgl. Abs. 7.2.1) erfolgen. Der Unterdruck wird beim Anlegen des Zuschnitts bei in Kontakt treten der Deckschicht mit dem porösen Metall aufgebaut, wodurch der Zuschnitt fixiert wird. Die Vakuumsaugelemente hinterlassen bei optimal gefrästem Werkzeug wenig bis keine Oberflächendefekte an der anzusaugenden Deckschicht. Der Zuschnittsbereich, wo das Fixieren und somit der Erstkontakt des aufgeheizten Sandwichverbunds nach dem robotergeführten Transfer mit dem Werkzeug stattfindet, muss so gewählt werden, dass die damit verbundene vorzeitige Erstarrung des fixierten Deckschichtbereichs keinen negativen Einfluss auf das Zieh- und Pressformen ausübt. Das vorzeitige Erstarren beim Fixieren des Halbzeugs resultiert aus der bereits beschriebenen deutlich höheren Abkühlrate des aufgeheizten Sandwichzuschnitts bei druck- bzw. unterdruckunterstütztem Werkzeugkontakt verglichen mit der Abkühlrate bei konvektivem Wärmeübergang an die Umgebungsluft (vgl. Abs. 6.2). Vorteilhaft beim Ziehformen mit

horizontaler Arbeitsrichtung ist, dass ein schwerkraftinduziertes Verformen im Vergleich zu einem vertikal abgelegten Zuschnitt nach der Werkzeugübergabe vor der Formgebung aufgrund des hohen Widerstandsmoments der Zuschnittsoberfläche vermieden werden kann.

#### **Zieh-Pressformen:**

Während des kombinierten Formgebungsschritts gehen mit der Werkzeugschließbewegung Zieh- und Pressformen gänzlich entkoppelt voneinander vonstatten. Zur Entkopplung besteht das notwendige Formgebungswerkzeug, wie in Abbildung 67 vereinfacht veranschaulicht an mindestens einer Werkzeughälfte aus einer segmentierten Werkzeugform. In der segmentierten Werkzeugform ist das Formsegment, womit das selektive Ziehformen sowie das anschließende Stabilisieren der ziehgeformten Sandwichbereiche umgesetzt wird, mit ausreichend Vorlauf zur darum befindlichen Pressform ausgerichtet. Das Ziehformen des Sandwichverbunds erfolgt, wie in Abbildung 67 dargestellt, im ersten Teil der Werkzeugschließbewegung. Auf Einzelheiten zum 3D-Ziehformen mit Niederhalterunterstützung wird im Nachgang gesondert eingegangen. Genaueres zum notwendigen Werkzeugaufbau kann im Abschnitt 7.2 nachvollzogen werden.

Nach dem Ziehformen erfolgt, analog zu den Beschreibungen aus Abschnitt 6.3 das unterdruckunterstützte Stabilisieren des fertig ziehgeformten Sandwichverbunds sowie das Pressformen des Randabschlusses. Für eine ausreichende Stabilisierungsphase ist insbesondere bei kurz ausgeführtem Vorlauf des vorlaufenden Ziehformsegmentes, welches im umgesetzten Fall die Negativform enthält, eine kurze Unterbrechung der Schließbewegung nach dem Ziehformschritt notwendig. Innerhalb einer kurzen Stabilisierungsdauer ( $t_s$ ) erfolgt der Aufbau des Unterdrucks, um den ziehgeformten Sandwichbereich ausreichend fest an die kontaktierten Formflächen des Ziehformsegmentes anzusaugen und für das nachfolgende Pressformen optimal zu stabilisieren. Anschließend erfolgt das Pressformen des Sandwichverbundes, wobei die Werkzeugschließgeschwindigkeit  $v_p$  mit reduziertem Vorschub im Vergleich zur Schließgeschwindigkeit beim Ziehformen  $v_z$  zusteuern ist.

Nach dem Pressformen des Randabschlusses wird die fertigausgeformte Sandwichschale weiterführend unter Unterdruckeinwirkung im Werkzeug abgekühlt. Hierbei wird der FKV beider Deckschichten unter konduktiver Wärmeabfuhr und unterdruckinduziertem Werkzeugzwang konsolidiert und die thermogeformte Sandwichschale auf einen formstabilen Zustand gebracht. Nach Ablauf einer vom Sandwichverbund abhängigen Kühlzeit ist der Thermoformprozess abgeschlossen und die Sandwichstruktur kann, wie im Abschnitt 7 erläutert, weiterführend mittels Spritzguss funktionalisiert und/ oder nach dem Öffnen des Formgebungswerkzeugs ausgeworfen bzw. robotergesteuert entnommen werden.

#### **Ziehformen mit Niederhalterunterstützung:**

Das Ziehformen des Sandwichverbunds erfolgt zwischen dem vorrauslaufenden Formsegment mit darin enthaltener Negativform und der Positivform infolge der über die Spritzgussmaschine gesteuerten translatorischen Werkzeugschließbewegung. Für den Einzug des Sandwichverbunds weist das Werkzeug zur Herstellung der Versuchsstruktur negativformseitig einen ebenen Einzugsbereich auf, der über einen umlaufenden Einzugsradius direkt in die Negativform übergeht. Der Einzug des Sandwichverbundes in die Negativform wird über den geschwindigkeitsgesteuerten Niederhalter unterstützt. Geschwindigkeitsgesteuert bedeutet hierbei, dass der Niederhalter während des Ziehformens

synchron zur translatorischen Werkzeugschließbewegung mit bewegt wird, was über eine im Werkzeug integrierte Mechanik erfolgt (vgl. Abs. 7.2.4). Somit bleibt der Spalt beim Einziehen des Sandwichverbunds zwischen Niederhalter und Einzugsbereich so eingestellt, dass der Sandwichverbund geführt ohne direkte Druckbeaufschlagung in Richtung Negativform frei gleiten kann. Das Führen des Sandwichverbunds zwischen Niederhalter und Einzugsbereich bewirkt während der Formgebung ein simultanes Ausformen beider Radien der umlaufenden Doppelkrümmung in den ziehzuformenden Bereich A und B (vgl. Abb. 66a). Ohne die Anwendung des Niederhalters führt die Reststeifigkeit des Sandwichzuschnitts während der Formgebung zu einem zeitlich versetzten Ausformen beider Radien der umzusetzenden Doppelkrümmung (vgl. Abb. 69b). Dies führt, wie im Nachgang erläutert, zu Falten bzw. Welligkeiten innerhalb der mit der Positivform erstgebogenen Krümmung.

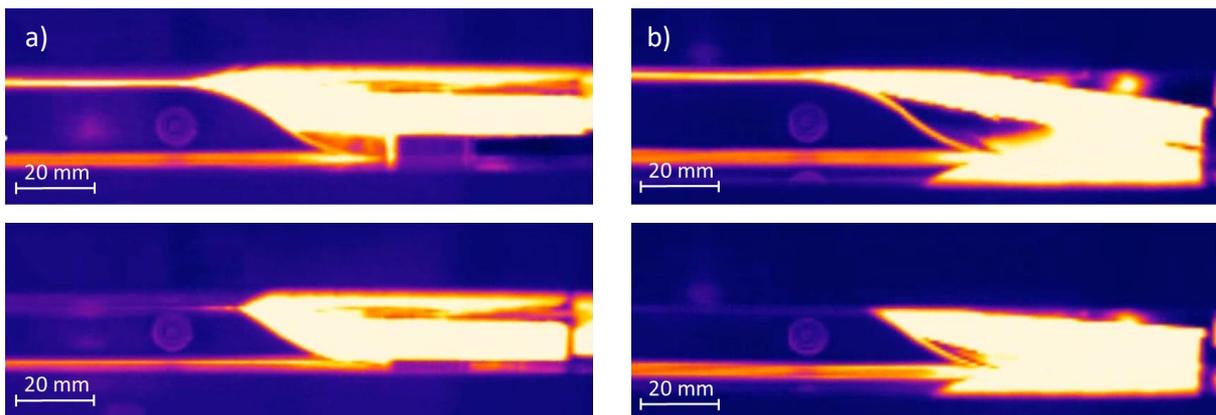


Abb. 69: Von der Werkzeugoberseite aus aufgenommene Wärmebildaufnahmen während der Formgebung mit (a) und ohne (b) Niederhalterunterstützung

Beim Ziehformen der Sandwichschale werden zwei Methoden zum faltenfreien Ausformen der Deckschichten eingesetzt. Diese sind

- das simultane Ausformen einer Doppelkrümmung mit Hilfe des Niederhalters sowie
- eine lokale Kernhöhenverringern zum Ausgleichen interlaminarer Druckspannungen.

Das simultane Ausformen einer Doppelkrümmung ist eine Methode, die zum faltenfreien Ausformen eines ziehgeformten Bauteils beitragen kann. Diese Methode ist ausreichend, um beim einachsigen Ziehformen Falten in konkav verlaufenden Deckschichtbereichen zu vermeiden. Hierzu müssen beide Krümmungen so gestaltet sein, dass interlaminare Druckspannungen  $\sigma_-$  die beim Ziehformen in den konkavverformten Deckschichtbereichen induziert werden, durch interlaminare Zugspannungen  $\sigma_+$  im entgegengesetzt konvex gekrümmten Deckschichtbereich ausgeglichen werden (vgl. Abb. 71). Somit gleiten beide Deckschichten innerhalb der Doppelkrümmung relativ zueinander auf dem Kern vom intralaminar druck- zum intralaminar zugbeanspruchten Bereich ab, wodurch Faltenbildung bzw. Welligkeiten im jeweils konkavverformten Deckschichtbereich vermieden werden.

Im Fall der hier untersuchten Versuchsgeometrie sind die Krümmungen jeweils als einfache Radien ausgeführt, wobei die konkavverformten Deckschichtbereiche im jeweiligen Innenradius lokalisiert sind. Abbildung 70 macht deutlich, dass der beschriebene Ausgleich der interlaminaren Spannungen und das damit verbundene faltenfreie Ausformen der Doppelkrümmung lediglich beim simultanen Ausformen beider Radien mit Hilfe des Niederhalters erfolgreich umgesetzt werden kann (vgl. Abb. 70a). Das versetzte Ausformen der Radien beim Ziehformen ohne Niederhalterunterstützung führt in

der Regel zu Welligkeiten im erstausgeformten Innenradius. Hier ist anzunehmen, dass mit dem Ausformen des ersten Radius unter direktem Werkzeugkontakt ein Erstarren des kontaktierten Deckschichtbereichs initiiert wird. Dies blockiert ein nachfolgendes Abgleiten der Deckschicht über den Kern in Richtung des intralaminar zugbeanspruchten Deckschichtbereichs, sodass die interlaminar druckinduzierte Welligkeit im Deckschichtverlauf des erstgeformten Innenradius nach vollständiger Ausformung erhalten bleibt (vgl. Abb. 70b).

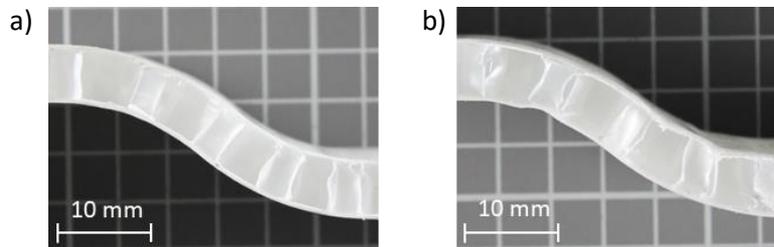


Abb. 70: Querschnitte einachsig ziehgeformter Sandwichproben, mit (a) und ohne (b) Niederhalterunterstützung beim Ziehformen

Wie beim 3D-Ziehformen von Organoblechen bzw. Tiefziehen von Metallblechen (vgl. Abs. 4.3.3) kommt es auch beim Ziehformen von Sandwichverbunden in 3D-auszuformenden Bereichen zu überlagerten Spannungszuständen aus Radial-  $\sigma_r$  und Tangentialspannungen  $\sigma_t$ . Dies muss insbesondere mit Bezug auf die Deckschichten bei der Bauteilgestaltung berücksichtigt werden, um hier Falten bzw. Welligkeiten nach der Bauteilherstellung zu vermeiden. Die nachfolgende Abbildung 71 veranschaulicht die Spannungssituation, die während des Ziehformens der Versuchsstruktur innerhalb der freien Umformzone vorliegt.

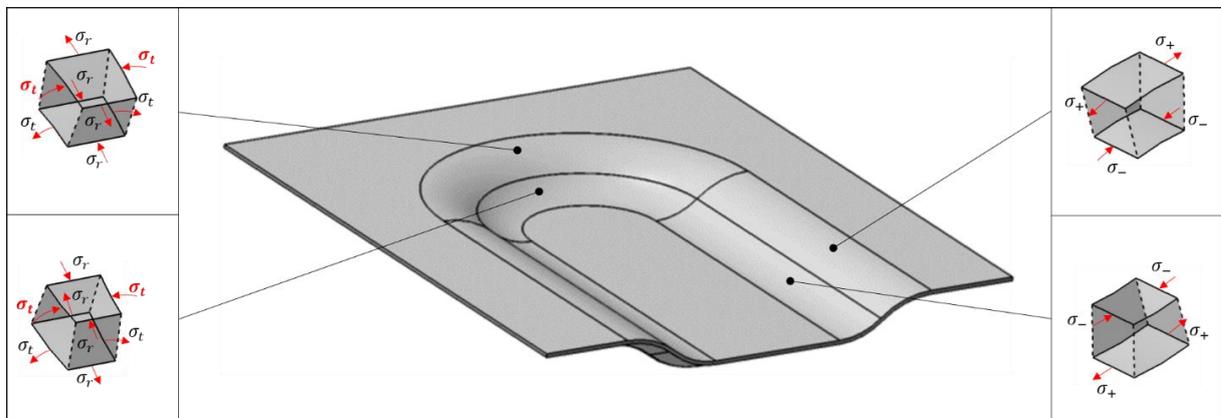


Abb. 71: Spannungssituation beim Ziehformen einachsig und sphärisch gekrümmter Bauteilbereiche innerhalb der freien Umformzone

Kritisch bei der in Abbildung 71 dargestellten Spannungssituation sind die rot hervorgehobenen intralaminaren Tangentialdruckspannungen die beim Ziehformen der Versuchsstruktur im sphärisch gekrümmten Bauteilbereich in der freien Umformzone zu erwarten sind. Die Tangentialdruckspannungen können bei der Ausformung, zur Bildung von Falten bzw. leichten Welligkeiten an der Deckschicht der Bauteilunterseite entlang der kreisförmig verlaufenden Doppelkrümmung führen. Dies ist in Abbildung 72 anhand eines Ergebnisses, was mit einem in [76] beschriebenen Umformsimulationsmodell erstellt wurde, veranschaulicht. Im untersuchten Fall ist die ziehzuformende Versuchsstruktur mit einer konstanten Sandwichhöhe im sphärisch gekrümmten Bauteilbereich ausgeführt (vgl. Abb. 72a). Hier kommt es beim Ziehformen zu erhöhten Tangentialdruckspannungen innerhalb der UD-Schicht der

unteren Deckschicht, in welcher die Endlosfasern  $90^\circ$  zur Bauteillängsachse ausgerichtet sind. Die Folge der zu hohen Tangentialdruckspannungen ist die Bildung von Falten im sphärisch gekrümmten Bauteilbereich, wie es am Ergebnis der Umformsimulation erkennbar ist.

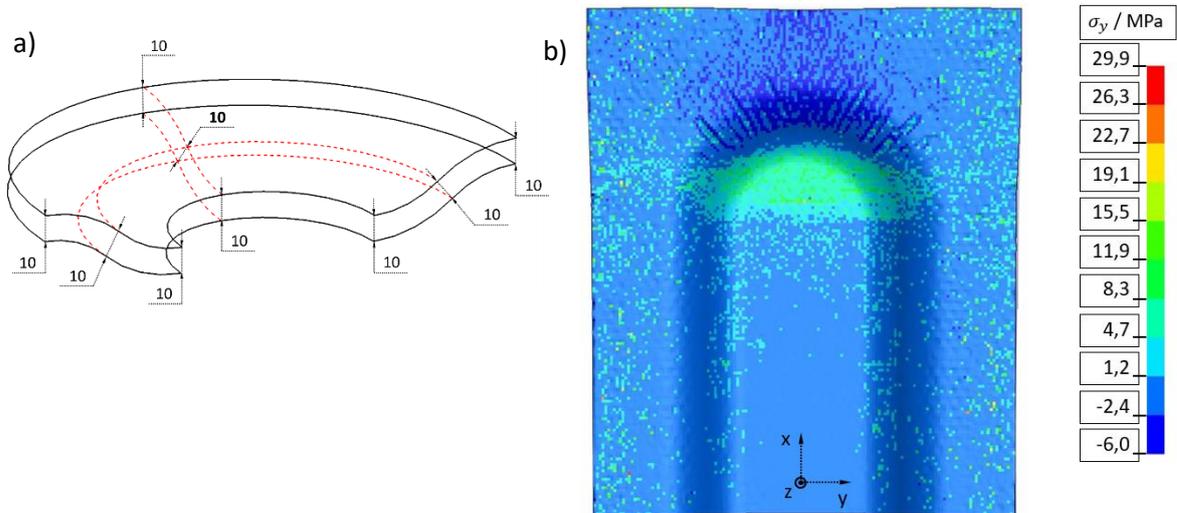


Abb. 72: Sphärischer Bereich mit konstant ausgeführter Kernhöhe der Versuchsstruktur (a) und passend dazu simulierte Spannungssituation sowie resultierende Faltenbildung in der unteren Deckschicht zum Ende des Ziehformens (b)

Eine Methode, die an der Versuchsstruktur erfolgreich erprobt werden konnte, ist eine von der Positivform induzierte lokale Kernhöhenreduzierung. Damit konnte Faltenbildung infolge von resultierenden intralaminaren Tangentialdruckspannungen in den Deckschichten beim Ziehformen des 3D bzw. sphärisch zu verformenden Bereichs ausgeglichen werden. Hierbei werden durch ein lokales Eindringen des Sandwichverbunds intralaminare Zugspannungen in der entsprechenden Deckschicht induziert, um beim fortschreitenden Ausformen der Bauteilkrümmung gezielt resultierende intralaminare Druckspannungen im Deckschichtverbund auszugleichen.

Die Anwendbarkeit dieser Methode ist gleichermaßen, wie der bereits beschriebene Einfluss der Tangentialdruckspannungen hinsichtlich Faltenbildung beim 3D-Ziehformen an der Versuchsstruktur nachgewiesen. Hierfür wurde die Versuchsgeometrie, wie in Abbildung 73a ersichtlich, im sphärisch gekrümmten Bereich mit einer leichten Sandwichdickenreduzierung von 10mm auf zentral 8,7 mm ausgeführt. Die Verringerung der Sandwichdicke, was beim Verformen mit einer Reduzierung der Kernhöhe einhergeht, ist als flach bzw. sanft einlaufender Übergang umgesetzt. Abbildung 73b veranschaulicht, dass diese bauteil- und werkzeugseitige Veränderung erhöhte Membranspannungen innerhalb der unteren Deckschicht beim Ziehformen der Versuchsstruktur bedingt und somit ein Bilden von Falten im 3D-ziehgeformten Bereich verhindert.

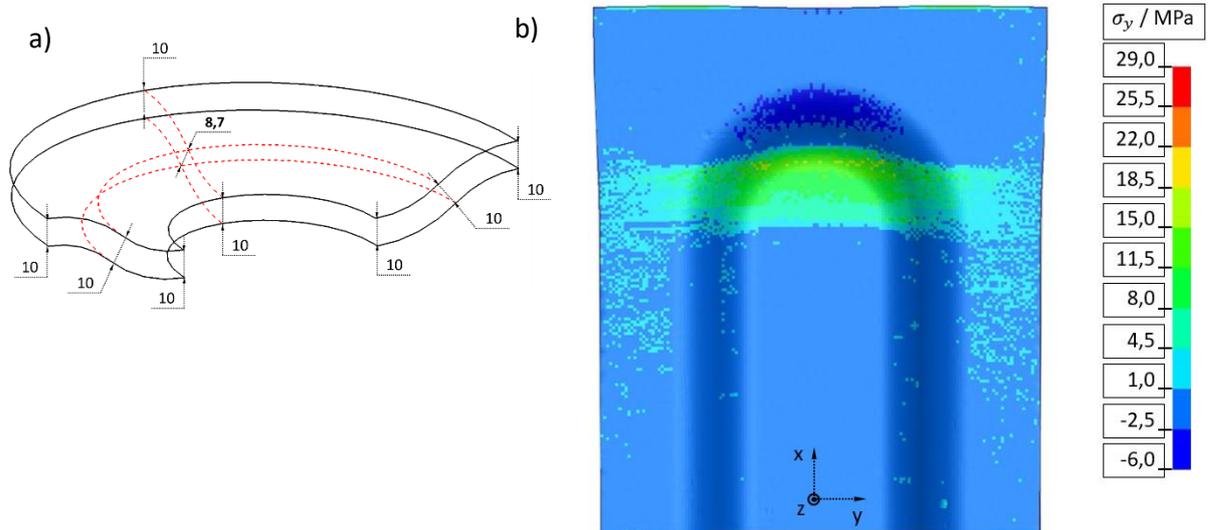


Abb. 73: Sphärischer Bereich ausgeführt mit lokaler Kernhöhenreduzierung der Versuchsstruktur (a) und passend dazu simulierte Spannungssituation sowie faltenfrei ziehgeformte untere Deckschicht zum Ende des Ziehformens (b)

Beim beschriebenen lokalen Reduzieren der Kernhöhe, was zum Ausgleichen intralaminarer Druckspannungen innerhalb eines Deckschichtbereichs eingesetzt werden kann, muss sichergestellt werden, dass der Wabenkern beim Verformen nicht übermäßig geschädigt wird. D.h. ein plastisches Ausknicken der Zellwände, was unter anderem zu Lasten der Kerndruckfestigkeit geht, gilt es während der Formgebung zu vermeiden. Dies kann bei einem optimal aufgeheizten Sandwichzuschnitt durch ein vermehrtes Einschmelzen der Zellwände nahe der Fügezone umgesetzt werden. Hier zeigen die in Abbildung 74 dargestellten Versuchsergebnisse mit dem Sandwichverbund TS1, dass beim Ziehformen der Versuchsstruktur eine Kernhöhenreduzierung von 1.3mm umsetzbar ist, ohne dass es zum Ausknicken der Zellwände im kernhöhenreduzierten Bereich kommt (vgl. Abb. 74a).

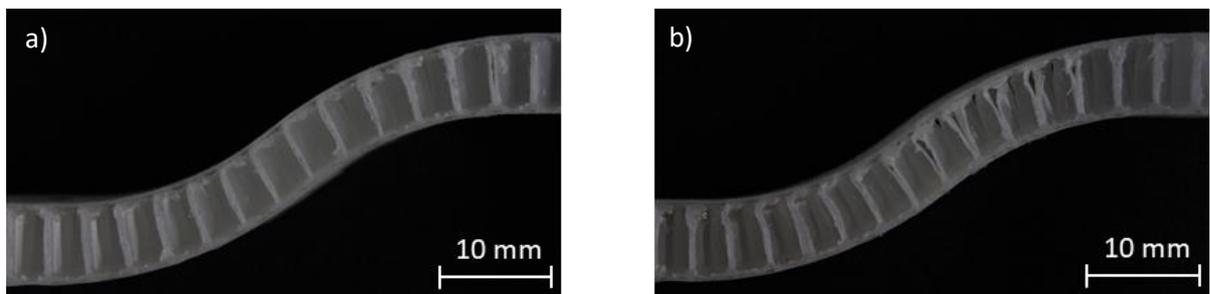


Abb. 74: Querschnitte von Versuchsstrukturen im 3D-geformten Bereich mit lokaler Kernhöhenreduzierung, hergestellt unter optimalen (a) sowie ungünstig gewählten (b) Prozessparametern

Bei ungünstig gewählten Prozessparametern führen die induzierte Flächenpressung sowie der Querkraftschub vermehrt zu plastischen Schub-Druck-Verformungen in den Zellwänden (vgl. Abb. 74b). Die dargestellten Ergebnisse sind mit den im vorigen Abschnitt 6.4 erläuterten Kernverformungen beim Ziehformen mit vorgespanntem Sandwichzuschnitt vergleichbar. Dies lässt sich im vollautomatisierten Ziehformprozess mit Niederhalterunterstützung einerseits durch eine verkürzte Transferzeit von 11 Sekunden sowie andererseits durch erhöhten Wärmeeintrag beim IR-Aufheizen vermeiden. Beides führt beim umgesetzten Zieh-Pressformen dazu, dass beide Spannungseinflüsse auf den Kern verstärkt im aufgeschmolzenen Grenzschichtbereich nahe den Deckschichten abgebaut werden. Resultat sind

stärker ausgebildete, teilweise schubverzerzte Schweißwulstanhäufungen an den Zellwandansätzen im Bereich der Fügezone. Diese können mit Bezug auf die Verbundmechanik als unkritischer bewertet werden als stark ausgeknickte bzw. schubverzerzte Zellwände.

Auch im Einzugsbereich zu 3D-gekrümmten Bauteilabschnitten kommt es beim Ziehformen von Sandwichverbunden zu einer Überlagerung von Radialzug- und Tangentialdruckspannungen. Dies kann in beiden Deckschichten zu leichten Falten im Einzugsbereich des Sandwichzuschnitts führen (vgl. Abb. 75a). Diese werden in der Tiefziehtechnik den Falten 1. Art zugeordnet und lassen sich beim Verarbeiten von Metall- oder Organoblechen über erhöhte Niederhalterkräfte vermeiden (vgl. Abs. 4.3.3). Ein Entgegenwirken von Faltenbildung 1. Art durch Erhöhung der Niederhalterkraft ist beim Ziehformen von Sandwichverbunden aufgrund deren geringen Druckfestigkeit im aufgeheizten Zustand nicht möglich. Jedoch wirken die Zellwände des Wabenkerns der Bildung derartiger Falten entgegen. Leichte Falten, die im Einzugsbereich dennoch entstehen, können während der Stabilisierungs- und Konsolidierungsphase über den von den porösen Werkzeugwänden ausgehenden Unterdruck geglättet werden (vgl. Abb. 75b).

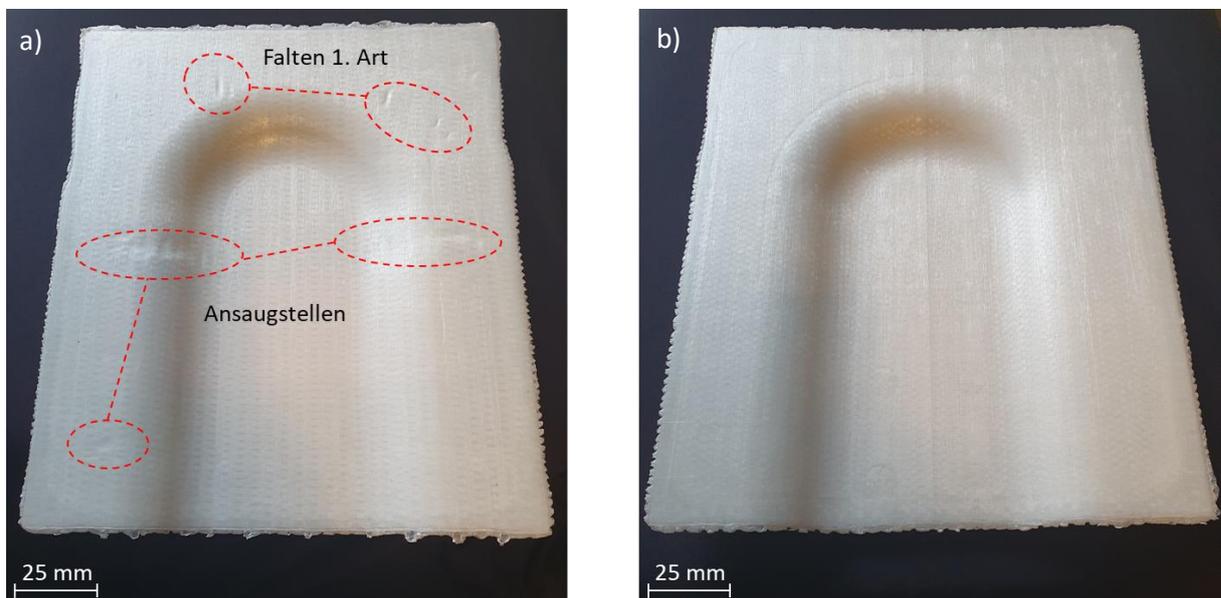


Abb. 75: Unterseite einer ziehgeformten Sandwichstruktur mit (a) und ohne (b) unterdruckunterstütztem Stabilisieren und Konsolidieren der unteren Deckschicht

Über die Wirkung des Unterdrucks beim Stabilisieren und Konsolidieren wird im Nachgang eingegangen. Wichtig ist, dass der Unterdruck erst nach dem Ziehformen angelegt wird, um ein vorzeitiges Erstarren der Deckschichtmatrix und somit ein Blockieren von Abgleitbewegungen in den Faseranordnungen sowie zwischen Deckschichten und Kern beim Ziehformen zu vermeiden. Zudem müssen mit Einleiten der Stabilisierungsphase beide Deckschichten zeitgleich mit Unterdruck von den porösen Werkzeugwänden beider Werkzeughälften beaufschlagt werden. Somit werden die Deckschichten gleichzeitig an die jeweilige Werkzeugwand angesaugt, wodurch sich Ansaugstellen in Richtung der gegenüberliegenden Werkzeughälfte nach dem Ziehformen vermeiden lassen. Das Signal zum Zuschalten des Unterdrucks lässt sich nach dem Ziehformen über einen am Werkzeug integrierten Näherungsschalter induzieren.

**Stabilisieren und Konsolidieren:**

Das Stabilisieren des ziehgeformten Bereichs während des Pressformschritts sowie das Konsolidieren der Deckschichten beim Abkühlen müssen generell unter der Einwirkung eines über die Werkzeugwände wirkenden Unterdrucks erfolgen. Hierfür ist das Werkzeug über feinporöse Formeinsätze auszustatten, die den Hauptanteil der Kavitätsflächen im Formbereich bilden, in welchen das Ziehformen stattfindet. Die nachfolgende Abbildung 76 veranschaulicht beide Werkzeughälften des geöffneten Prototypenwerkzeugs zum Zieh-Pressformen der Versuchsstruktur. An beiden Werkzeughälften sowie dem Niederhalter sind die feinporösen metallischen Formeinsätze erkennbar, über welche die Deckschichten im ziehgeformten Bereich an die Kavitätsflächen angesaugt werden. Die feinporösen Formeinsätze sind in den Kavitätsflächen eingelassen und über einen Unterdruckverteiler mit einer externen Vakuumpumpe verbunden.

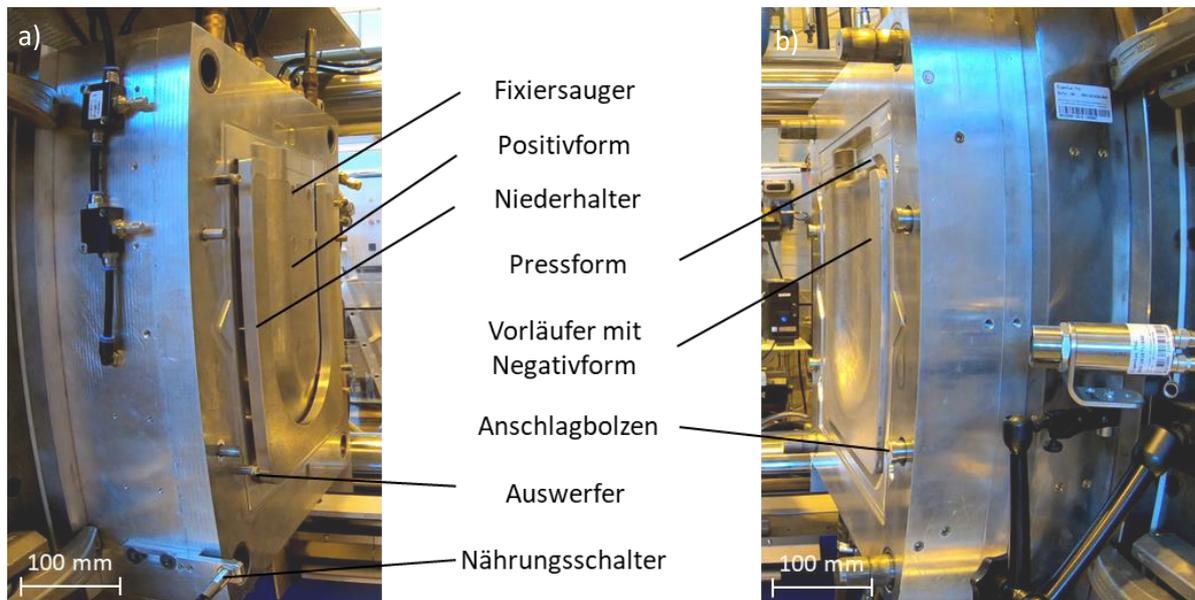


Abb. 76: Werkzeuginnenseite der Positiv- (a) und Negativformhälfte (b) des umgesetzten Versuchswerkzeugs vor dem Zieh-Pressformen

Nach dem Ziehformen, d.h. mit voll ausgeformtem ziehgeformten Sandwichbereich erfolgt das Ansaugen der Deckschichten an die porösen Kavitätsflächen der Positiv- sowie Negativform. Hierbei setzt bereits die Konsolidierung der bis dahin kontaktierten Deckschichten unter dem nun wirkenden Unterdruck ein. Zum Aufbau des Unterdrucks muss genug Zeit vorgehalten werden. Aufgrund des im Versuchswerkzeug gering umgesetzten Vorlaufs wird bei der Verarbeitung des Sandwichverbunds TS1 die Vorschubbewegung für eine Sekunde unterbrochen. Nachfolgend erfolgt, wie bereits erläutert, unter reduzierter Vorschubgeschwindigkeit das Pressformen des Randabschlusses. Der Unterdruck wird über den Pressformschritt sowie die abschließende Abkühlphase aufrechterhalten. Die Vakuumpumpe muss so gewählt sein, dass einerseits ein schnelles Vakuumieren des Unterdruckverteilers für eine ausreichende Unterdruckwirkung beim Stabilisieren und Pressformen sowie andererseits nach der Formgebung ausreichend Unterdruck zum Konsolidieren der Deckschichten aufgebaut wird. Die nachfolgende Abbildung 77 veranschaulicht den Unterdruckverlauf mit Einsetzen der Stabilisierungsphase über den Pressformschritt bis zum Ende des Abkühlens beim Herstellen einer optimal ausgeformten Versuchsstruktur mit dem Sandwichverbund TS1.

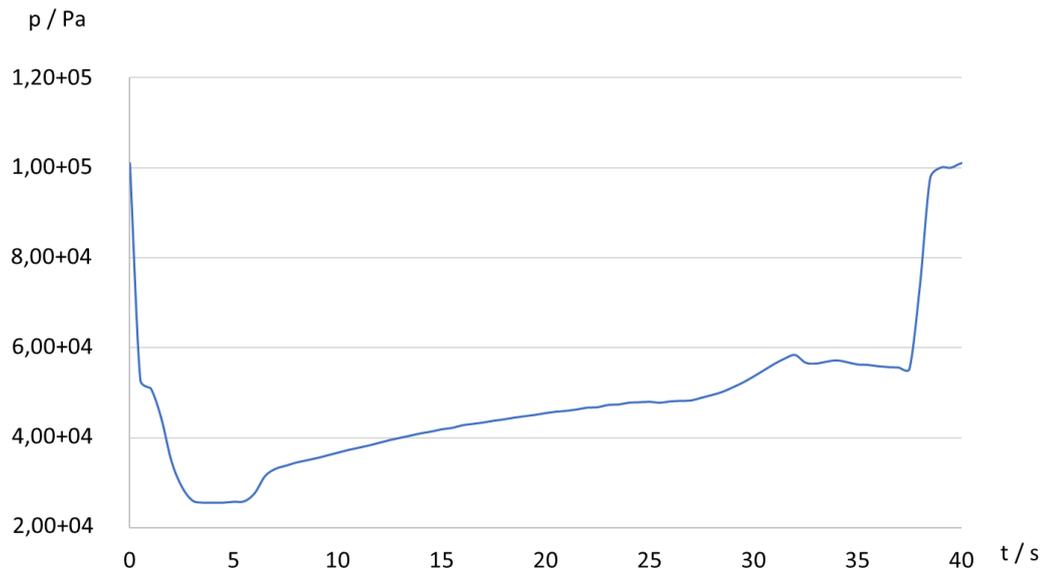


Abb. 77: Unterdruckverlauf nach Einsetzen der Stabilisierungsphase beim Zieh-Pressformen der Sandwichschale

Im dargestellten Verlauf ist die ca. eine Sekunde zum Aufbau des Unterdrucks zum Stabilisieren des ziehgeformten Bereichs ersichtlich. Des Weiteren wird nach dem Pressen bei vollständig geschlossenem Werkzeug der von der Vakuumpumpe maximal realisierbare Unterdruck erreicht. Hierbei kommt es beim Abkühlen zum Konsolidieren der Deckschichten, wobei nach kurzer Zeit aufgrund der verfestigten Thermoplastmatrix die Dichtwirkung der Deckschichten an den porösen Werkzeugwänden nachlässt und somit der maximale Unterdruck nicht mehr aufrechterhalten werden kann. Mit dem Verfestigen des FKV im ziehgeformten Bereich kann davon ausgegangen werden, dass der Unterdruck vermehrt im Bereich der gepressten Übergangsgeometrie vom Randabschluss wirkt und hier ebenfalls ein Ansaugen der Deckschichten an die Werkzeugwand erzwingt. Hierbei werden kleinere Einfallstellen ausgeglichen, die im Übergangsbereich beim Pressformen entstehen. In beiden Bereichen unterstützt die Unterdruckwirkung das Reduzieren von Lufteinschlüssen im zu konsolidierenden Deckschichtverbund bzw. vermeidet mögliche Blasen bzw. Delaminationen zwischen den UD-Einzelschichten der Deckschichten (vgl. Abb. 78).

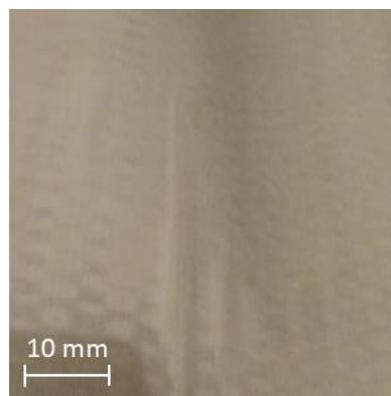


Abb. 78: Blasenbildung zwischen den UD-Einzelschichten der oberen Deckschicht einer Sandwichschale nach dem Zieh-Pressformen ohne vakuumunterstütztes Stabilisieren und Konsolidieren

Abbildung 79 zeigt vergleichende Microtomographyaufnahmen des Sandwichverbunds TS1 eines nicht verarbeiteten Sandwichzuschnitts, einer aus dem gleichen Sandwichverbund thermogeformten Sandwichschale sowie einer Sandwichschale, die lediglich als haftgeschweißter Stapel der gleichen Verbundkomponenten hergestellt wurde. Dargestellt ist jeweils ein Ausschnitt, wobei die Deckschicht zwischen zwei Doppelzellwänden fokussiert ist und die Grautöne so eingestellt sind, dass die Faserverteilung in der Deckschicht sowie das Talkum in den Zellwänden sichtbar werden. Ein Vergleich der Aufnahmen des unverarbeiteten Sandwichzuschnitts mit denen der thermogeformten Sandwichschalen verdeutlicht, dass das Ansaugen der Deckschichten an die metallischen Kavitätsflächen des Werkzeugs zu einer Glättung der Deckschicht beiträgt (vgl. Abb. 79). Zudem wird beim Sandwichzuschnitt sowie der daraus hergestellten Sandwichschale ein Verschieben der Fasern in der an den Kern angrenzenden UD-Einzelschicht in Richtung Zellmitte deutlich. Dies ist auf transversalen Faserfluss infolge lokaler Druckbelastungen, die beim Verpressen über die Zellwände in die Deckschicht mit schmelzeflüssiger Matrix eingeleitet werden, zurückzuführen. Zu erwähnen ist, dass der Sandwichverbund TS1 grundsätzlich zur Herstellung von 12mm starken Sandwichbauteilen geeignet ist und für die Versuchsversuche deutlich stärker als gewöhnlich auf final 10 mm Sandwichhöhe verpresst werden musste. Dies führt zu den in Abbildung 79a und 79b deutlich stärker erkennbaren Verdrängungseffekten in den Faseranordnungen und einer überdurchschnittlich starken Schweißwulstanhäufung in allen drei hergestellten Proben unterhalb der Deckschicht.

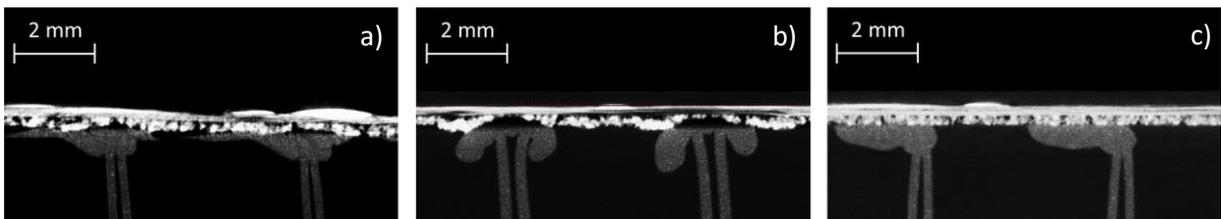


Abb. 79: Faserverteilung innerhalb der Deckschicht im nichtverarbeiteten Sandwichzuschnitt (a), einer aus dem Sandwichzuschnitt thermogeformten Versuchsstruktur (b) sowie einer thermogeformten Versuchsstruktur aus gleichen jedoch ausschließlich gestapelten Sandwichkomponenten (c)

Auch wenn das Ausformen der Sandwichschale aus einem gestapelten Sandwichverbund im Bearbeitungszeitraum zur vorliegenden Arbeit nicht tiefgreifender untersucht wurde, ist festzustellen, dass die Faserverteilung innerhalb der Deckschicht im entsprechend verarbeiteten Sandwichverbund am besten erhalten bleibt.

## 7 Thermoformspritzgießen von FKV-Sandwichbauteilen

Wie es von der Verarbeitung von Organoblechen bekannt ist (vgl. Abs. 4.5) und es auch Teil der Zielsetzung der vorliegenden Arbeit war, ist es möglich, dass im Abschnitt 5 erläuterte Pressformen sowie Zieh-Pressformen der Sandwichverbunde in hybrider Verfahrensweise mit Spritzgießen zu kombinieren. Auf erste Untersuchungsergebnisse zum abschließenden Spritzgussprozessschritt sowie auf die zur Prozessentwicklung eingesetzte Werkzeug- und Anlagentechnik wird in den nachfolgenden Unterabschnitten eingegangen. Zudem wird aufgezeigt bzw. ein Verfahrensweg beschrieben, der es ermöglicht, die hybrid gefertigten Sandwichbauteile sortenrein aus einem FKV herzustellen.

### 7.1 Fertigungszyklus und Funktionalisierungsmöglichkeiten

Der Fertigungszyklus des Thermoformspritzgießens von FKV-Sandwichbauteilen beinhaltet drei Hauptprozessschritte, das IR-Aufheizen des Sandwichzuschnitts mit zwischengeschalteter Abschirmphase, die mehrstufige Formgebung des Sandwichverbunds beim Schließen des segmentierten Formgebungswerkzeugs sowie das abschließende Spritzgießen von Funktions- und/ oder Lasteinleitungselementen an bzw. in die zuvor thermogeformte Sandwichschale. Wie in Abbildung 80 schematisch veranschaulicht, schließt der Fertigungszyklus neben den drei Hauptprozessschritten zwei automatisierte Transferschritte des Sandwichzuschnitts sowie zwei Kühlphasen im temperierten Formgebungswerkzeug ein. Aufgrund der aufwendigen Werkzeug- und Anlagentechnik zur Prozesskontrolle sowie der Komplexität des Material- und Strukturverhaltens der Sandwichverbunde während der Verarbeitung im dargestellten Fertigungszyklus können die nachfolgenden Erläuterungen nur einen kurzen Abriss dazu darstellen. Genauere Beschreibungen zu den einzelnen Prozessschritten sind in den jeweilig gleichnamigen Abschnitten der vorliegenden Arbeit nachvollziehbar.

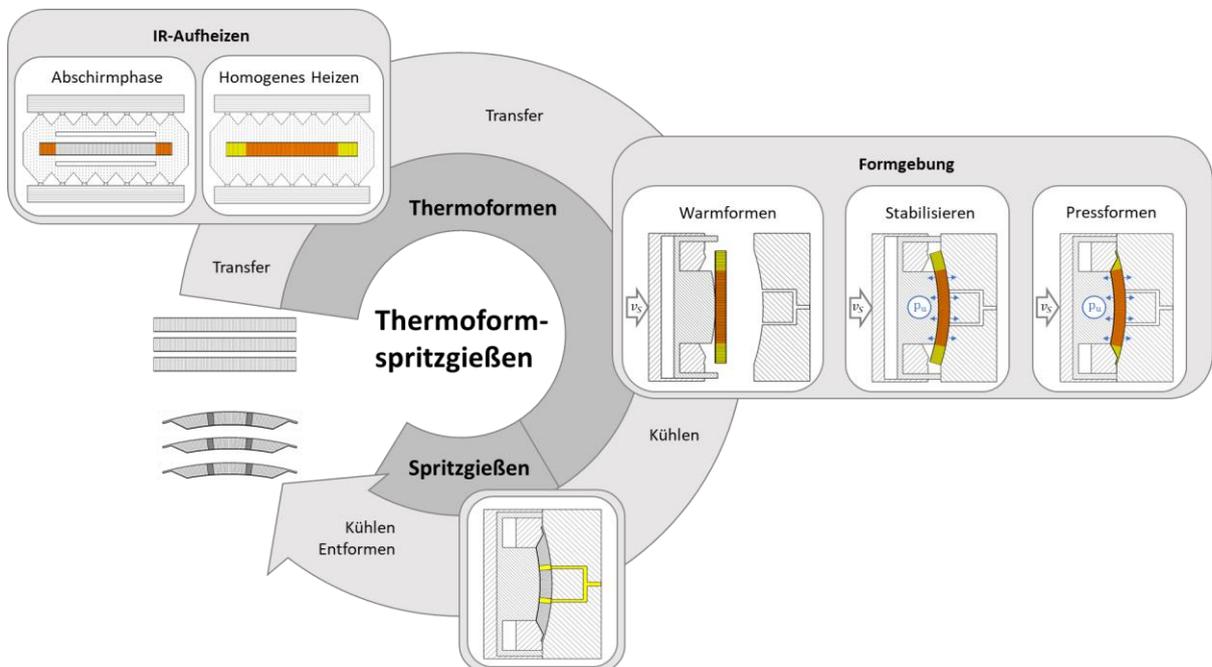


Abb. 80: Fertigungszyklus des Thermoformspritzgießens von FKV-Sandwichbauteilen

### 7.1.1 Prozessschritte im Überblick

#### Kalttransfer, IR-Aufheizen, Heißtransfer:

Wie in Abbildung 80 dargestellt, wird zu Beginn des hybriden Fertigungszyklusses ein kalter Sandwichzuschnitt mittels Robotertechnik von einem Halbzeugstapel aus dem Halbzeugmagazin der Verarbeitungsanlage in den IR-Ofen transferiert. Dieser technologisch als Kalttransfer bezeichnete Transfer-schritt kann generell mit einfachen Vakuumsaugern am Robotergreifer durchgeführt werden. Der 1. Hauptprozessschritt, das IR-Aufheizen des Sandwichzuschnitts, erfolgt in einem IR-Ofen mit doppelseitigem Strahlungsfeld. Hierbei werden im Rahmen einer zwischengeschalteten Abschirmphase die später ziehgeformten Sandwichbereiche des Sandwichzuschnitts zwischenzeitlich von der IR-Strahlung abgeschirmt. Wie in Abschnitt 5.3.2 erläutert, weisen die zwischenzeitlich abgeschirmten im Vergleich zu den ganzzeitig bestrahlten Zuschnittbereichen nach dem IR-Aufheizen ein niedrigeres Temperaturniveau auf. Abschirmblenden und Prozessparameter müssen für das IR-Aufheizen so gewählt werden, dass während der Prozessführung im IR-Ofen in den Zuschnittbereichen für das Zieh- bzw. Pressformen ein zum entsprechenden Formgebungsschritt passender Temperaturgradient über die Sandwichhöhe eingestellt wird. Bei Erreichen des für die Formgebung passenden thermischen Zustands des Sandwichhalbzeugs wird der IR-Ofen geöffnet und es erfolgt der Heißtransfer des erwärmten Halbzeugzuschnitts ins segmentierte Formgebungswerkzeug. Der Heißtransfer muss innerhalb weniger Sekunden vorstattgehen, um insbesondere in den später ziehgeformten Bauteilbereichen Fehlstellen wie Welligkeiten in den Deckschichten oder schubverformte Zellwände im Wabenkern zu vermeiden. Die für den „Heißtransfer“ des Sandwichzuschnitts bislang als am vorteilhaftesten getestete Greiftechnik sind pneumatisch mechanisch gesteuerte Nadelgreifer. Diese hinterlassen an der gegriffenen Deckschicht nur sehr geringe Greifspuren und ermöglichen einen stabilen Heißtransfer (vgl. Abs. 6.5).

#### Formgebung:

Nach dem „Heißtransfer“ des Sandwichzuschnitts erfolgt im 2. Hauptprozessschritt die mehrstufige Formgebung im segmentierten Formgebungswerkzeug. Hier eignet sich zur Herstellung von 2D- und 3D-gekrümmten Sandwichbauteilen mit geschlossenem Bauteilrand, wie in Abbildung 80 vereinfacht dargestellt, das in Abschnitt 6.5 erläuterte Zieh-Pressformen. Das Warmformen des Sandwichverbunds während der dreistufigen Formgebung ist aber auch als Biegeformschritt zur Fertigung leicht bzw. einachsiger gekrümmter Sandwichstrukturen vorstellbar. Zur Herstellung von ebenen Sandwichbauteilen mit ausschließlich geschlossenem Rand ist das im Abschnitt 6.3 erläuterte Pressformen ohne Warmformschritt ausreichend. In beiden Fällen ist vor dem Pressformen der Bauteilränder eine Stabilisierung der nicht zu verpressenden Sandwichbereiche mittels Unterdruck notwendig, um hier weiterführend unerwünschte Deformationen zu vermeiden sowie ein geometrisch definiertes Ausformen der im Pressformschritt herzuleitenden Sandwichhöhenreduzierung zu unterstützen (vgl. Abs. 6.3). Bei der Anlagenauswahl ist zu berücksichtigen, dass die Schließgeschwindigkeit  $v_s$  beim Warmformen generell mindestens doppelt so schnell wie beim Pressformen gesteuert werden muss. In der ersten Kühlphase unterstützt der zwischenzeitlich einsetzende und über die feinporösen Werkzeugwände wirkende Unterdruck ( $p_u$ ) zudem ein optimales Konsolidieren des Deckschichtverbunds nach der Formgebung. Zudem kann über das Ansaugen der Deckschichten eine Glättung der Oberflächen herbeigeführt und so der über die Wabenstruktur induzierte Telegrapheneffekt reduziert werden (vgl. Abs. 6.5).

### Spritzgießen:

Nach der ersten Abkühlphase ist das Thermoformen des Sandwichverbunds abgeschlossen und es wird unter ausreichender Formstabilität der thermogeformten Sandwichschale der 3. Hauptprozessschritt, das Spritzgießen, eingeleitet. Hierbei sind mit geeigneter Heißkanaltechnik Lasteinleitungselemente wie lokale Kernfüllungen aus fließfähigem Thermoplast sowie Funktionalisierungen wie Randversteifungen oder Gehäuseapplikationen an und in der Sandwichschale umsetzbar. Nach dem Spritzgießen wird das hergestellte Sandwichbauteil auf Entformungstemperatur abgekühlt und werkzeugfallend ausgeworfen oder per Roboter entnommen. Im Serienbetrieb ist durch ein paralleles Aufheizen eines Sandwichzuschnitts zur hybriden Formgebung im Thermoformspritzgusswerkzeug eine Produktion von verwertungsfertigen Sandwichbauteilen in Zykluszeiten von ca. einer Minute erzielbar. Hinsichtlich der Recyclbarkeit bietet das Thermoformspritzgießen der Sandwichbauteile im Unterschied zur Verarbeitung von Organoblechen die Möglichkeit, die herstellbaren FKV-Hybridbauteile bei einer Produktion ohne zusätzliches Einbringen weiterer Materialien sortenrein aus einem Faserverbundsystem herzustellen. Hierzu werden, wie in Abschnitt 7.1.3 erläutert, die beim Konfektionieren der Sandwichplatten anfallenden Verschnittreste stofflich aufbereitet und direkt zum Spritzgießen der Funktionalisierungen eingesetzt. Somit lassen sich nicht verwertbare Verschnittreste vermeiden, weiteres Spritzgussmaterial einsparen sowie aus einem einzigen Sandwichverbund nachhaltig FKV-Sandwichbauteile herstellen.

#### 7.1.2 Spritzgießen von Randfunktionalisierungen

Sowohl Organoblech-Strukturen als auch die im Randbereich verpressten Sandwichschalen weisen nach dem Thermoformen einen undefiniert zerklüfteten Randabschluss auf. Dieser kann, wie es aus dem Stand der Technik zur Organoblech-Verarbeitung bekannt ist (vgl. Abs. 4.5), ebenfalls im umgesetzten hybriden Fertigungszyklus mittels Spritzgießen definiert abgeschlossen werden. Zudem ist es möglich im Randbereich weitere Funktionalisierungen wie Schraubdome zur späteren Systemintegration des Sandwichbauteils sowie Gehäuseapplikationen mittels Spritzgießens herzustellen. Abbildung 81 veranschaulicht die umgesetzte Versuchsstruktur mit zieh-pressgeformter Sandwichschale (vgl. Abs. 6.5), die für die Untersuchungen des Thermoformspritzgießens um die genannten Spritzgussfunktionalisierungen erweitert ist.

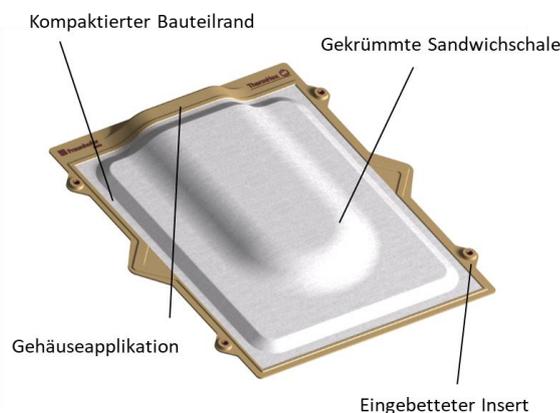


Abb. 81: Versuchsbauteil mit thermogeformter Sandwichschale und spritzgegossenem Bauteilrand

Umgesetzt ist die umlaufende Anbindung des Spritzgussmaterials an das gepresste Mehrschichtlaminat des dargestellten Versuchsbauteils als eine Art Stumpfstoßverbindung, wie sie aus der Schweißtechnik bekannt ist. Diese ist mit Bezug auf die Werkzeugtechnik einfacher umsetzbar als eine umlaufende Überlappung des Spritzgussmaterials über oder um das gepresste Mehrschichtlaminat. Für die Herstellung des dargestellten umlaufenden Stumpfstoßes zwischen Spritzgussmaterial und Dreischichtlaminat muss das verpresste Kernmaterial im Laminat ausreichend kompaktiert sein. Dies ist notwendig, um ein Penetrieren der Schmelze durch das Laminat in das Sandwichinnere zu vermeiden (vgl. Abb. 82 a). Des Weiteren müssen die Klemmwirkung des gepressten Mehrschichtlaminats im Pressspalt der Werkzeugkavität sowie die Stabilität der thermogeformten Sandwichschale nach dem Zieh-Pressformen ausreichen, um dem Druck beim Spritzgießen, der von der fließenden Schmelze auch in Richtung Sandwichverbund wirkt, standzuhalten. Ein zu hoher Werkzeuginnendruck kann beim Spritzgießen zu unerwünschtem plastischem Verformen der Sandwichschale in Richtung Bauteilmitte führen. Dies ist dann mit einem lokalen Füllen der Kavitätsbereiche für das Thermoformen verbunden sowie mit einem Überspritzen der zuvor thermogeformten Sandwichstruktur (vgl. Abb. 82b).

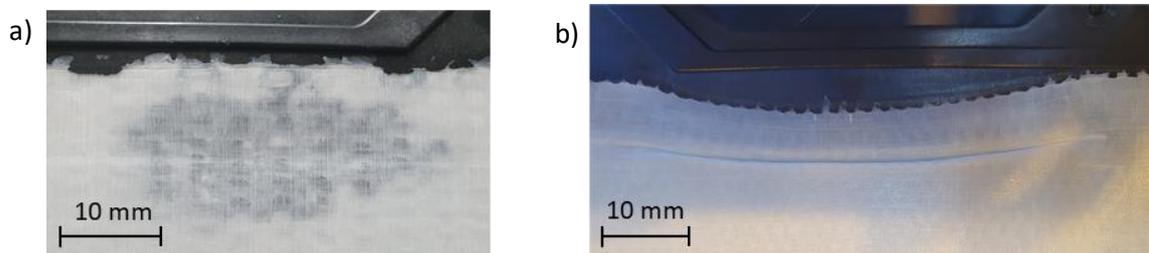


Abb. 82: Fehler beim Spritzgussfunktionalisieren: Penetrieren der Schmelze ins Sandwichinnere (a) und plastisches Zerdrücken und somit Überspritzen der thermogeformten Sandwichstruktur (b)

Das Vermeiden von zu hohem Druck während und zum Ende der Einspritzphase stellt eine besondere Herausforderung beim Umspritzen einer thermogeformten Sandwichschale dar. Hierzu können, wie im Standardspritzguss üblich, Fließhilfen eingesetzt werden, um den Werkzeuginnendruck während der Füllphase des Spritzgießens zu minimieren. Zudem können durch den Einsatz eines Heißkanalverteilers mit mehreren Einspritzdüsen die generell langen Fließwege beim Umspritzen eines Sandwichbauteils verkürzt und somit ebenfalls der Werkzeuginnendruck beim Spritzgießen des Randabschlusses reduziert werden. Beim Positionieren der Einspritzpunkte sowie bei der Auslegung der Fließhilfen ist im Werkzeug darauf zu achten, dass die resultierenden Fließfronten zum Ende der Einspritzphase annähernd zeitgleich zusammentreffen. Dies ist nachfolgend anhand eines Simulationsergebnisses zur Fließfont beim Spritzgießen des Randabschlusses des umgesetzten Versuchsbauteils am Ende der Einspritzphase veranschaulicht (vgl. Abb. 83).

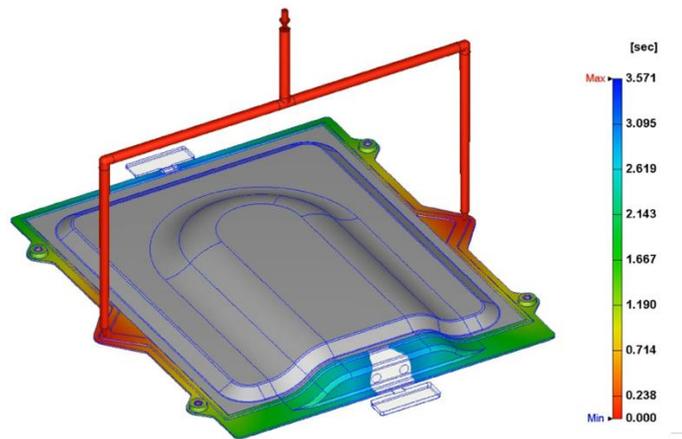


Abb. 83: Ergebnis der Fließfrontsimulation am Ende des Einspritzvorgangs beim Spritzgießen des Randabschlusses

Abweichend vom Standardspritzgießen sowie vom Thermoformspritzgießen von Organoblechen stellt der maximale Werkzeuginnendruck, der zum Ende der Einspritzphase beim Zusammentreffen der Fließfronten in den jeweiligen Kavitätsbereichen wirkt, ein besonderes Risiko dar. Die zuvor thermogeformte Sandwichschale könnte lokal von der Schmelze zerdrückt werden. Um dies zu vermeiden, sollten Nebenkavitäten im Werkzeug integriert werden. Diese sind optimalerweise dort an die Haupt- bzw. Bauteilkavität anzubinden, wo Bindenähte beim Spritzgießen des Randabschlusses zu erwarten sind. Über die Nebenkavitäten kann zum Ende des Füllvorgangs durch das Abströmen überschüssiger Schmelze die Druckverteilung innerhalb der Bauteilkavität vereinheitlicht (vgl. Abb. 84) sowie der maximale Werkzeuginnenspritzdruck am Umschaltzeitpunkt zur Nachdruckphase reduziert werden.

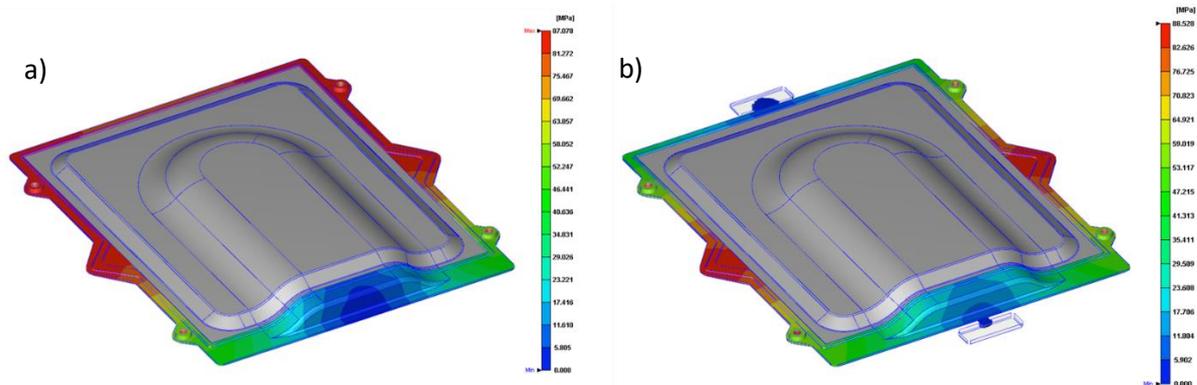


Abb. 84: Simulierte Werkzeuginnendruckverteilung beim Spritzgießen des Randabschlusses zum Ende des Einspritzvorgangs mit (a) und ohne Nebenkavitäten (b)

Der Übergangskanal zwischen den Nebenkavitäten und der Bauteilkavität sollte mit sehr kleinem Strömungsquerschnitt ausgelegt werden. Dies ermöglicht zum Ende der Einspritzphase ein schnelles Versiegeln der Schmelze im Übergangskanal, wodurch in der anschließenden Nachdruckphase der spritzgegossene Thermoplast innerhalb der Bauteilkavität kompaktiert werden kann, ohne ein weiterführendes Füllen der Nebenkavitäten zu induzieren. Bei der Maschinensteuerung ist zu berücksichtigen, dass die Füllphase bei Erreichen des zur Formfüllung der Bauteilkavität notwendigen Einspritzvolumens unterbrochen wird. Zudem ist es vorteilhaft eine kurze Verweilzeit von ca. einer Sekunde

zwischen Einspritz- und Nachdruckphase im Prozessablauf zu integrieren, um das Versiegeln des thermoplastischen Kunststoffes im Übergangskanal sicherzustellen.

Hinsichtlich der umlaufenden Fließhilfen ist es hilfreich, diese innerhalb der Bauteilkavität nahe des Stumpfstoßes des gepressten Mehrschichtlaminats der Sandwichschale anzuordnen. Somit werden leicht höhere Strömungsgeschwindigkeiten beim Füllen im Rahmen der Einspritzphase nahe des gepressten Mehrschichtlaminats erreicht. Dies bewirkt, dass die über die Schmelze aus der Spritzgusskavität zu verdrängende Luft speziell beim Bilden der Bindenähte besser in Richtung der Werkzeuggrenzebene entweichen kann. Somit können etwaige Lufteinschlüsse beim Bilden der Fließnähte angrenzend zum Mehrschichtlaminat vermieden werden. Um die Funktion der Fließhilfen im hybriden Prozessablauf sicherzustellen, muss der Sandwichzuschnitt so konfektioniert werden, dass der äußere Rand des gepressten Mehrschichtlaminats nicht in diesen hineinragt. Hierfür ist bei der Gestaltung der Zuschnittgeometrie die Veränderung der Ränder infolge des Ziehformschritts zu berücksichtigen.

### **7.1.3 Verfahrensweg zum sortenreinen Thermoformspritzgießen**

In diesem Abschnitt ist ein möglicher Verfahrensweg zur sortenreinen Produktion der im beschriebenen Thermoformspritzgussprozess herstellbaren Sandwichbauteile dargestellt. Dieser ist aus aktuellen Forschungsthemen der Organoblech-Verarbeitung abgeleitet, wobei sich bei der Großserienproduktion von thermoplastischen FKV-Bauteilen zwei Schwerpunkte bzw. Problemstellungen für deren nachhaltigen Einsatz ableiten lassen. Zum einen ist als aktueller Forschungsschwerpunkt die Weiterverarbeitung der während der Wertschöpfungskette anfallenden faserversetzten Verschnittreste zu nennen. Diese ergeben sich bei der Konfektionierung der plattenförmigen Halbzeuge und lassen sich aufgrund des hohen Fasermasseanteils generell nur durch Einbringen von zusätzlichem Kunststoff weiterverwerten. Zum zweiten ergeben sich aus dem Multimaterialdesignansatz, woraus die Hybridverarbeitung ihre Vorteile zieht, Nachteile hinsichtlich der Wiederverwertbarkeit der Bauteile nach ihrer Produktlebenszeit. Hierbei fallen nach dem stofflichen Recyceln der Hybridbauteile große Mengen an faserversetztem Recyclat an, was pro hergestelltem Bauteiltyp eine jeweils spezifische Zusammensetzung mindestens hinsichtlich der Mengenanteile der enthaltenen Verbundkomponenten aufweist.

Ein Vorteil bei der Verarbeitung der FKV-Sandwichhalbzeuge ist deren Verbundzusammensetzung mit Bezug auf den enthaltenen Faser- sowie Kunststoffanteil. Dieser ist aufgrund des matrixreichen bzw. auch ausschließlich aus Thermoplast bestehenden Kerns deutlich geringer als der von Organoblechen. Somit lassen sich nachgewiesener Weise im Thermoformspritzgussprozess hergestellte Sandwichbauteile ausschließlich aus dem FKV des plattenförmigen Halbzeugs ohne zusätzlichen Materialeintrag nach dem in Abbildung 85 dargestellten Verfahrensweg herstellen.

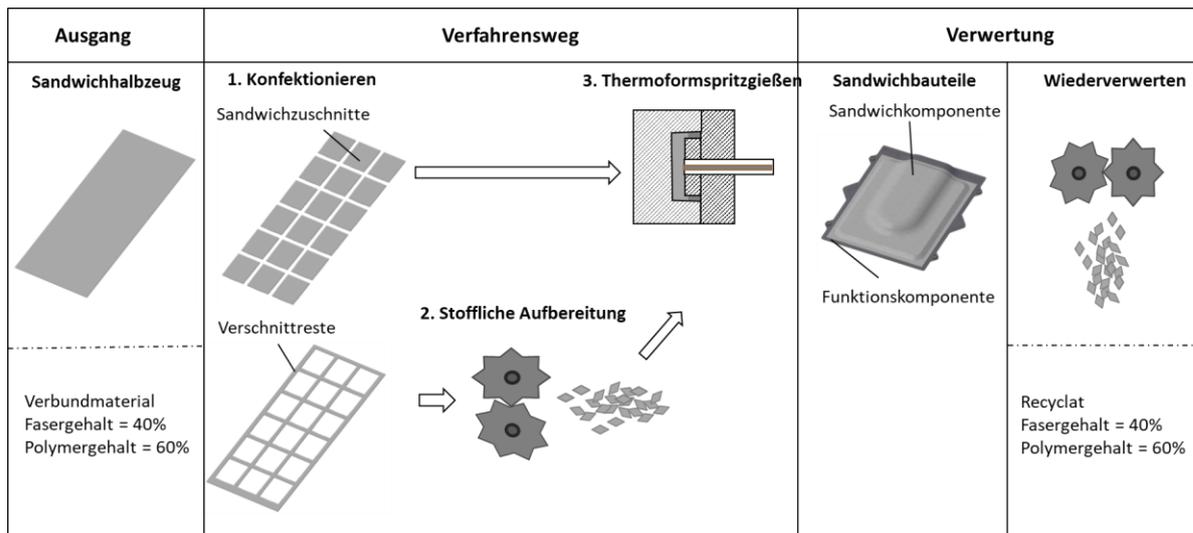


Abb. 85: Verfahrensweg der sortenreinen Produktion von FKV-Sandwichbauteilen aus einem FKV

In der Abbildung 85 ist der Verfahrensweg am Beispiel der Produktion eines Sandwichbauteils aus einem Sandwichverbund mit insgesamt 40 m% Faser- und 60 m% Kunststoffanteil zu einem Sandwichbauteil schematisch dargestellt. Dies entspricht annähernd der Faser-Kunststoff-Verteilung des für die Machbarkeitsstudie zum Verfahrensweg verwendeten Sandwichverbunds TS1. Dieser weist einen Fasermasseanteil von 39,8% auf. Der Sandwichverbund TS1 enthält neben den Fasern auch geringe Anteile an Talkum im Kern, was in der Bestimmung der Fasermasseanteile unberücksichtigt geblieben ist und in den weiterführenden Beschreibungen der Machbarkeitsstudie unerwähnt bleibt.

Im ersten Verfahrensschritt werden vor der Bauteilherstellung die plattenförmigen Sandwichhalbzeuge entsprechend der späteren Bauteilgeometrie vorkonfektioniert. Das kann z.B. mittels Trenn-, Schneid- oder Stanztechnologien erfolgen. Wie dargestellt, fallen beim Konfektionieren neben den resultierenden Zuschnitten für die Herstellung der Sandwichschale für das spätere Thermoformen zusätzliche Verschnittreste an. Diese Verschnittreste werden im zweiten Prozessschritt stofflich aufbereitet, was im einfachsten Fall durch eine mechanische Zerkleinerung mittels Schneid- oder Hammermühlen erfolgt. Die stoffliche Aufbereitung kann je nach Bedarf an die Dosier- und Fließfähigkeit beim Spritzgießen auch nachträglich durch Compoundieren verbessert werden. Abbildung 86 veranschaulicht die in der Machbarkeitsstudie stofflich aufbereiteten Verschnittreste des Sandwichverbunds TS1 sowie ein daraus mittels Schneidmühle hergestelltes Mahlgut. Ebenfalls dargestellt ist ein ausschließlich aus dem Mahlgut mittels Doppelschneckenextruder hergestelltes walzenförmiges Granulat.

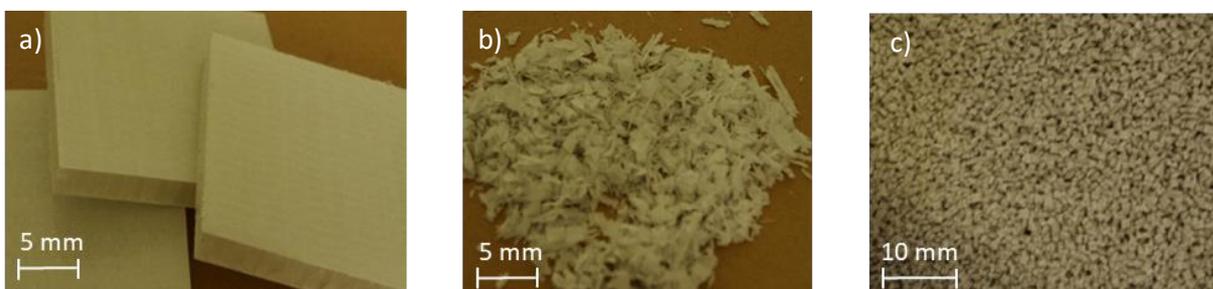


Abb. 86: Bei der Sandwichverarbeitung angefallene Verschnittreste (a), daraus hergestelltes Mahlgut (b) sowie aus dem Mahlgut compoundiertes Granulat (c)

Der dritte Verfahrensschritt umfasst die hybride Verarbeitung der Sandwichzuschnitte einschließlich der stofflich aufbereiteten Verschnittreste durch den im vorigen Abschnitt erläuterten Thermoformspritzgussprozess. Hierbei ist mit Bezug auf die mechanischen Eigenschaften sowie die Energiebilanz bei der Produktion der Bauteile der bessere Weg, das Mahlgut ohne nachträgliches Compoundieren direkt zum Spritzgießen der Funktionalisierungen zu verwenden. So können die thermische Schädigung der Thermoplastmatrix sowie die zusätzliche Faserlängenverkürzung im Compoundierprozess vermieden werden. Zudem kann weiterer Aufwand sowie die zum Compoundieren notwendige Energie zur weiterführenden Aufbereitung des Mahlgutes eingespart werden. Vergleichende, in der durchgeführten Machbarkeitsstudie erhobene Ergebnisse zur maximalen Faserlänge sowie den mechanischen Eigenschaften von den aus dem Mahlgut und dem Compound hergestellten Prüfkörpern sind in Tabelle 8 aufgeführt. Ebenfalls enthalten ist der jeweilige MFR-Wert zum Vergleich der Fließfähigkeit von Mahlgut und Granulat.

Tabelle 8: Materialeigenschaften des wiederverwerteten Sandwichverbunds TS1 als Mahlgut sowie als compoundiertes Granulat

	<b>Mahlgut</b>	<b>Granulat</b>
Maximale Faserlänge [ $\mu\text{m}$ ]	2.445	1.508
E-Modul [MPa]	7649,57 $\pm$ 399,23	7302,50 $\pm$ 87,57
Zugfestigkeit [MPa]	77,93 $\pm$ 2,31	59,33 $\pm$ 0,47
Bruchdehnung [%]	3,00 $\pm$ 0,05	1,93 $\pm$ 0,04
MFR/230/5 [g/10 min]	2,1 $\pm$ 0,4	10,7 $\pm$ 0,1

Gegensätzlich zu den mechanischen Eigenschaften verhalten sich die Verarbeitungseigenschaften von Mahlgut und Granulat. Hier weist das Granulat zum einen eine bessere Rieselfähigkeit im Vergleich zu den Verschnittresten auf. Dies ermöglicht ein Dosieren des Granulats in die Spritzgussmaschine mit einfachen Fülltrichtern und vereinfacht das Plastifizieren des Verbunds vor dem Einspritzvorgang. Zum zweiten verdeutlichen die in Tabelle 8 aufgeführten MFR-Werte die besseren Fließigenschaften des Granulats im Vergleich zum Mahlgut. Dies macht sich auch beim Spritzgießen des Randabschlusses bei der Herstellung des Versuchsbauteils bemerkbar, was aufgrund eines zu hohen Werkzeuginnendrucks beim Spritzgießen mit dem Mahlgut nur unter Verarbeitung des Granulats im Rahmen der Machbarkeitsstudie sortenrein herstellbar war. Die nachfolgende Abbildung 87 zeigt unterschiedliche Demonstratoren aus den in Tabelle 4 aufgeführten Sandwichverbunden, wobei die Demonstratoren mit weißen Deckschichten, die aus dem Sandwichverbund TS1 sortenrein hergestellten Versuchsbauteile sind.

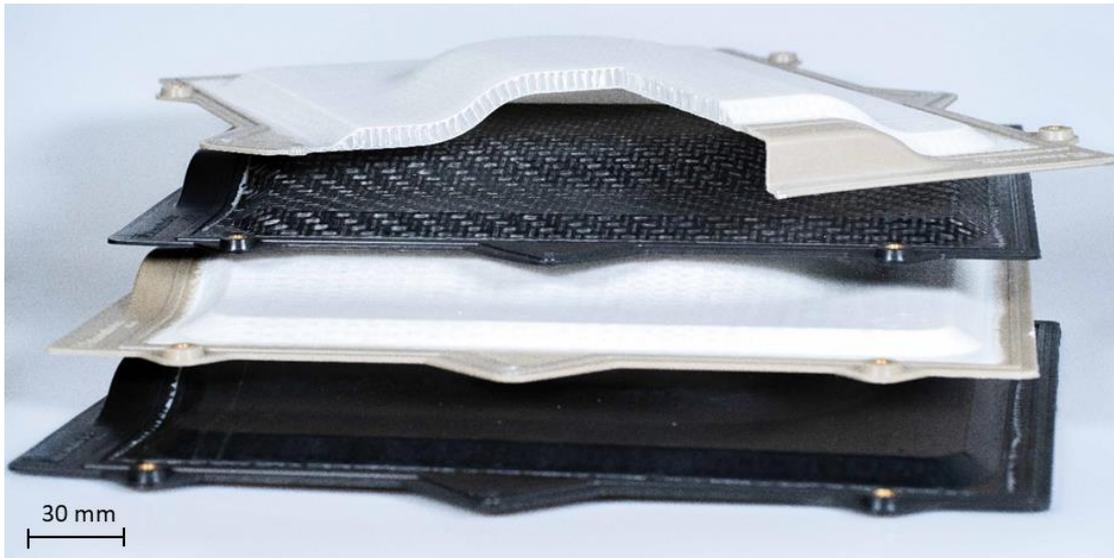


Abb. 87: Umgesetzte Demonstratoren aus unterschiedlichen Sandwichverbunden

## 7.2 Werkzeugtechnik

Die nachfolgenden Erläuterungen beschreiben die Werkzeugtechnik des Thermoformspritzgießens von Sandwichbauteilen. Der Fokus ist auf den mechanischen Aufbau sowie die wichtigsten Funktionsbaugruppen von notwendigen Formgebungswerkzeugen mit besonderem Bezug auf das Thermoformen gerichtet. Dies wird am Beispiel des einseitig einfachsegmentierten Versuchswerkzeugs erläutert, was zur Entwicklung und Untersuchung des im Abschnitt 6.5 erläuterten Zieh-Pressformens von Sandwichverbunden sowie zum Thermoformspritzgießen des finalen Versuchsbauteils entwickelt und umgesetzt wurde.

### 7.2.1 Allgemeiner Werkzeugaufbau

Der Grundaufbau, nach dem Werkzeuge für das beschriebene Thermoformspritzgießen von FKV-Sandwichbauteilen umgesetzt werden können, entspricht dem konventioneller Zweiplattenwerkzeuge, wie sie industriell auch zum konventionellen Spritzgießen eingesetzt werden. Ein großer Vorteil bei diesen Werkzeugen besteht darin, dass bei der Werkzeugentwicklung und Umsetzung auf einen Fundus an Werkzeugnormalien unterschiedlicher Hersteller zurückgegriffen werden kann. Somit reduziert sich der Konstruktions- und Fertigungsaufwand auf designspezifische Elemente, wie beispielsweise die Kavitäts- bzw. Formplatten sowie die notwendigen Komponenten der Individualbaugruppen. In der folgenden Abbildung 88 sind die beiden Werkzeughälften des Versuchswerkzeugs dargestellt sowie die wichtigsten Baugruppen für das Thermoformen und Spritzgießen farblich hervorgehoben.

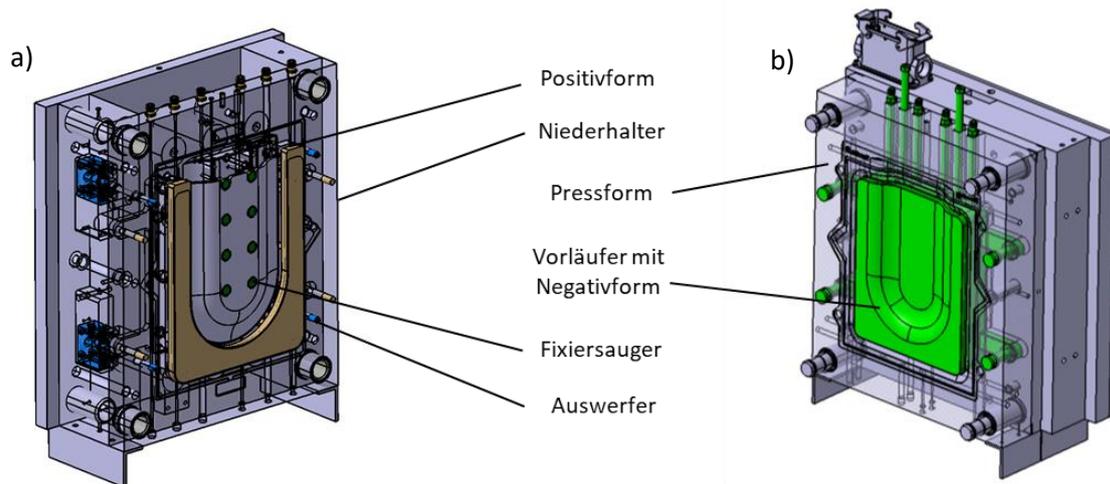


Abb. 88: Umgesetztes Versuchswerkzeug und farblich hervorgehobene Funktionsbaugruppen mit Positiv- (a) und Negativformseite (b)

Sämtliche Verbindungsteile, Führungen, Temperier- und Hydraulikarmaturen sowie der passend konfigurierte Heißkanalverteiler des Werkzeugs sind standardisierte Werkzeugelemente oder bestehen aus solchen. Abweichend von den konventionell erhältlichen Aufbauten aus Stahl sind die einzelnen Platten aus einer geeigneten Aluminiumknetlegierung hergestellt. Vorteile der Aluminiumkonstruktion, die typischerweise bei der Entwicklung von Prototypenwerkzeugen eingesetzt werden, liegen neben dem Preis beim Handling der Komponenten sowie deren Nachbearbeitung während einer Optimierungsphase. Die generell gute Wärmeleitfähigkeit metallischer Werkstoffe, die im Werkzeugbau eingesetzt werden, begünstigen das Durchwärmen des Plattenaufbaus durch die im Werkzeug enthaltene Wassertemperatur sowie eine effiziente Wärmeabfuhr aus der Bauteilkavität während der Kühlphasen.

### 7.2.2 Formsegmentierung und Rückstellmechanik

Für das Zieh-Pressformen oder auch nur das Pressformen eines Sandwichzuschnitts muss mindestens eine der beiden Werkzeughälften eine segmentierte Werkzeugform aufweisen. Die Segmentierung ist an der Werkzeughälfte vorzusehen, die, wie in Abschnitt 6.3 beschrieben, die geometrisch definierte Sandwichhöhenreduzierung beim Pressformen des Randabschlusses direkt beeinflusst. Im umgesetzten Fall ist das die Negativformhälfte, mit der die 30°-Fase zwischen dem ziehgeformten Sandwichverbund und dem im Pressspalt kompaktierten Dreischichtlaminat ausgeformt wird. Die Trennung beider Formbereiche ist so auszuführen, dass die jeweiligen Formflächen beim Ziehformen sowie beim Pressformen auf zwei Formsegmente verteilt sind. Die Pressform stellt somit eine Art Rahmen dar, in welchem das Ziehformsegment translatorisch zur Schließbewegung gelagert ist. Zur Entkopplung von Zieh- und Pressformen muss vor der Formgebung ein ausreichender Vorlauf zwischen den Kavitätsbereichen des Ziehformsegments und denen der Pressform einstellbar sein. Abbildung 89 veranschaulicht die Negativformhälfte in der Ausgangssituation vor der Formgebung, wobei sich das umgesetzte Ziehformsegment in der vorderen Endlage innerhalb der Pressform befindet. Die Gegenseite, wo im umgesetzten Fall keine Sandwichhöhenreduzierung direkt induziert wird, ist ohne Segmentierung zum Entkoppeln von Zieh- und Pressformschritt ausgeführt.

Neben der Segmentierung ist im Werkzeug eine Mechanik notwendig, die den Vorlauf des Ziehformsegments ab dem Stabilisieren und beim Pressen synchron zur Werkzeugschließbewegung ins Werkzeug zurückführt. Für die Synchronisation der Rückstellgeschwindigkeit  $v_R$  des Ziehformsegments zur Werkzeugschließgeschwindigkeit  $v_S$  eignet sich ein Anschlagssystem im Werkzeug mit außerhalb der Kavitätsbereiche zur Trennebene durchgeführten Anschlagbolzen. Das Anschlagssystem muss so ausgeführt sein, dass die Anschlagbolzen nach dem Ziehformen in Kontakt mit der gegenüberliegenden Werkzeughälfte kommen (vgl. Abb. 89a). Über das Anschlagssystem wird mit Einsetzen der Stabilisierung und während des Pressformens die Rückstellbewegung des Ziehformsegments synchron zur Werkzeugschließbewegung in dessen hintere Endlage mitverschoben (vg. Abb. 89b).

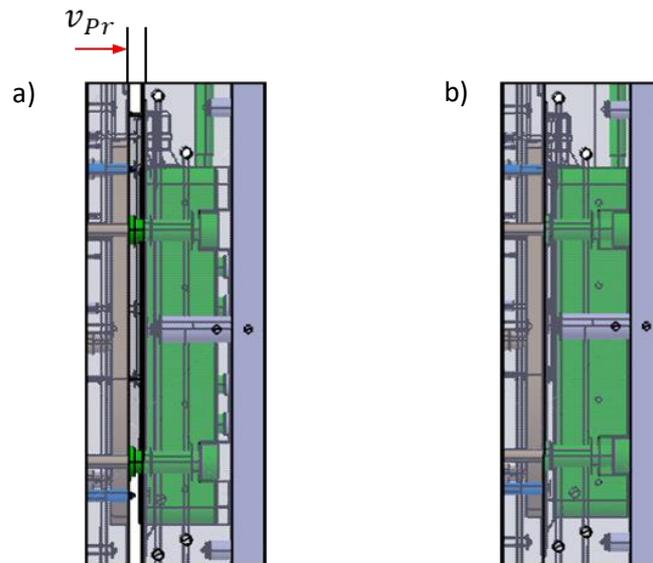


Abb. 89: Mechanik zur Umsetzung der synchronen Rückstellbewegung des Ziehformsegments zur Werkzeugschließbewegung zu Beginn (a) und zum Ende (b) des Pressformschritts

Das Ende des Schließvorgangs ist mit Erreichen der hinteren Endlage des Ziehformsegments in der Pressform und damit dem Fluchten beider Kavitätsbereiche der Negativformhälfte verbunden. Somit ist der finale formgebende Kavitätsbereich zwischen Negativ- und Positivformhälfte inmitten der Trennebene des Werkzeugs eingestellt und der dreistufige Thermoformprozess abgeschlossen. Die beschriebene Kavitätssegmentierung einschließlich der Geschwindigkeitssynchronisation ( $v_R = v_S$ ) stellen, wie im Abschnitt 6.3 erläutert, die Voraussetzungen zur unterdruckunterstützten Stabilisierung des bis dahin fertig ziehgeformten Sandwichbereichs während des Pressformschritts dar. Über die Werkzeugmechanik ist nach der Formgebung ein automatisiertes Einstellen des Vorlaufs des Ziehformsegments zurück in dessen vordere Endlage notwendig. Hierfür eignen sich Druckfedern oder Pneumatikzylinder. Diese müssen so dimensioniert sein, dass eine vorzeitige Rückstellbewegung infolge des wirkenden Verformungswiderstands der Sandwichstruktur beim Ziehformen vermieden wird.

### 7.2.3 Poröse Formeinsätze und Vakuumverteiler

Beim unterdruckunterstützten Stabilisieren beinhaltet das vorlaufende Ziehformsegment einen feinsporösen Formeinsatz, über den ein flächiger Unterdruck  $p_u$  am kontaktierten Deckschichtbereich nach dem Ziehformen erzeugt werden kann. Auch die Formflächen der Gegenseite mit integriertem Niederhalter enthalten derartige Formeinsätze, um mit dem Einsetzen der Stabilisierungsphase gleichzeitig

das unterdruckunterstützte Konsolidieren beider Deckschichten einzuleiten. Die weichen Deckschichten wirken an den porösen Formeinsätzen wie ein Dichtmedium. Wie in Abschnitt 6.5 erläutert, ermöglicht dies nach dem Ziehformen den Aufbau des Unterdrucks über eine mit dem Werkzeug verbundene Vakuumpumpe. Für eine gleichmäßige Unterdruckwirkung an den Deckschichten ist das Werkzeug mit einem Unterdruckverteiler ausgestattet.

Als Material für die luftdurchlässigen Werkzeugformeinsätze eignet sich feinporöses Aluminium bzw. feinporöser Stahl. Die Größe der Poren sollte nach den durchgeführten Untersuchungsergebnissen nicht mehr als 0,5 mm Porendurchmesser betragen, um ein Penetrieren der schmelzflüssigen Matrix in die porösen Formeinsätze zu vermeiden. Die umgesetzten feinporösen Formeinsätze sind mit einer Dicke von ca. 7mm ausgeführt und in der jeweiligen Werkzeugform eingefasst. Hinter dem Formeinsatz befindet sich der Unterdruckverteiler. Alle Formeinsätze sind mit der seitlichen Einfassung und den inneren Kontaktflächen mit dem Unterdruckverteiler formschlüssig verbunden und gegen Herausfallen von der Innenseite mittels Verschraubung gesichert. Am innenseitigen Kontaktbereich zum jeweiligen Formeinsatz sind die Unterdruckverteiler mit Nutensystemen ausgestattet, die so gestaltet sind, dass der Unterdruck möglichst gleichmäßig auf die anzusaugenden Deckschichtbereiche wirkt. Das Nutensystem ist über eine Vielzahl an Bohrungen mit den entsprechenden Anschlüssen bzw. Anschlussrohren verbunden, die zur Verbindung mit der Vakuumpumpe notwendig sind. Die nachfolgende Abbildung 90 veranschaulicht die Ausführung des feinporösen Formeinsatzes des vorlaufenden Ziehformsegments sowie das Nutensystem des umgesetzten Unterdruckverteilers.

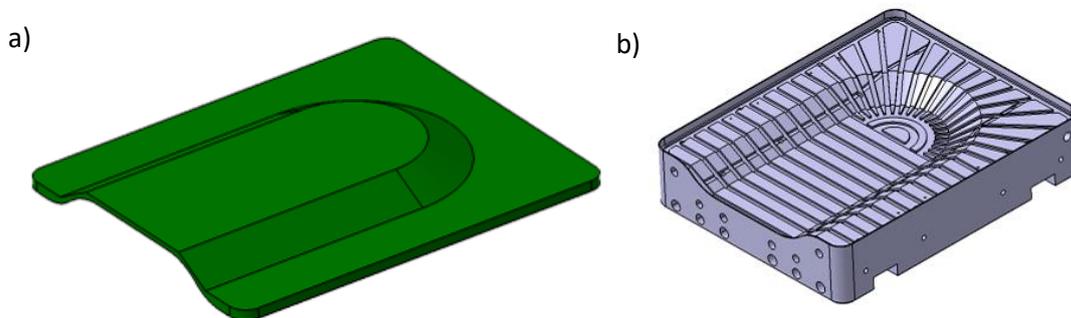


Abb. 90: Feinporöser Formeinsatz (a) und Innenseite des Ziehformsegments mit integriertem Unterdruckverteiler (b) des umgesetzten Versuchswerkzeugs

Die umlaufend 1mm dicke Einfassung des dargestellten Ziehformsegments zu den angrenzenden Gleitflächen vermeidet das Ansaugen von Sekundärluft aus der Führung der umlaufenden Werkzeugform. D.h., mit dem Einsetzen des Unterdruckes kann lediglich ein Ansaugen von Luft ins Vakuumsystem über die Vorderseite des Ziehformsegments erfolgen. Die Vorderseite wird mit Einsetzen der Stabilisierung ganzflächig von der angrenzenden Deckschicht abgedichtet, weshalb ein Einsatz von Dichtungen zwischen dem Einsatz und der Einfassung nicht erforderlich ist.

#### 7.2.4 Niederhalter

Im Folgenden wird auf den Aufbau und die Mechanik des zum Ziehformen des Sandwichverbunds notwendigen Niederhalters eingegangen. Dessen Vorderseite stellt im umgesetzten Fall neben den Formflächen der Positivform auch einen größeren Anteil der Formflächen an der Positivformseite dar. D.h., bei geschlossenem Werkzeug ist der Niederhalter in der Formplatte, welche auch die Positivform

enthält, passgenau versenkt und dessen Vorderseite verläuft konturnah zu den restlichen formgebenden Kavitätsflächen der Positivformseite. Sowohl der Niederhalter als auch die Positivform sind für das unterdruckunterstützte Konsolidieren der Deckschichten jeweils mit einem feinporösen Formeinsatz ausgestattet, der in einem passenden Vakuumverteiler eingelassen ist. Die Ausführung der beiden Formeinsätze und Vakuumverteiler ist analog zu dem im vorherigen Abschnitt beschriebenen Ziehformsegment ausgeführt.

Die Rückstellbewegung des Niederhalters muss für das im Abschnitt 6.5 erläuterte Führen des Sandwichverbunds zwischen Niederhalter und Einzugsbereich beim Ziehformen synchron zur Werkzeugschließbewegung erfolgen. Dies ist mit der gleichen Anschlagmechanik umsetzbar, die im vorherigen Abschnitt bereits am Beispiel des Ziehformsegments beschrieben wurde. Im Gegensatz zum Ziehformsegment ist die translatorische Lagerung des Niederhalters über Linearführungen ausgeführt, wobei die dafür notwendigen Führungsbolzen mit dem Niederhalter und einer im Werkzeuginneren angeordneten Koppelplatte fest verbunden und die zugehörigen Führungsbuchsen in der Formplatte verpresst sind. Um den passenden Einzugsspalt zwischen Niederhalter und dem Einzugsbereich der Negativform beim Ziehformen zu gewährleisten, sind die Anschlagbolzen des Niederhalters konzentrisch zu denen des Ziehformsegments angeordnet. Der Niederhalter wird während der Werkzeugschließbewegung beim in Kontakt treten der Bolzenpaare in die entsprechende Rückstellbewegung gezwungen. Um sicherzustellen, dass das Ziehformsegment nicht vorzeitig durch den Niederhalter in seine Rückstellbewegung versetzt wird, sind die Vorspannkräfte der Druckfedern, die das Ziehformsegment in dessen vorderer Endlage halten, stärker dimensioniert als die vom Niederhalter ausgehende Rückstellkraft. Die Rückstellkraft des Niederhalters wird über einen Pneumatikzylinder aufgebracht, der im Werkzeuginneren mit der Koppelplatte und der Rückseite der Positivformplatte verbunden ist. Diese Rückstellkraft lässt sich über ein zugehöriges Drosselrückschlagventil passend einstellen. Der Vorhub des Niederhalters in Richtung vorderer Endlage erfolgt pneumatisch. Die pneumatische Schaltung zur Einstellung der Rückstellkraft des Niederhalters sowie die Vorlaufdrosselung von dessen Vorhub ist in der nachfolgenden Abbildung 91 mit dargestellt.

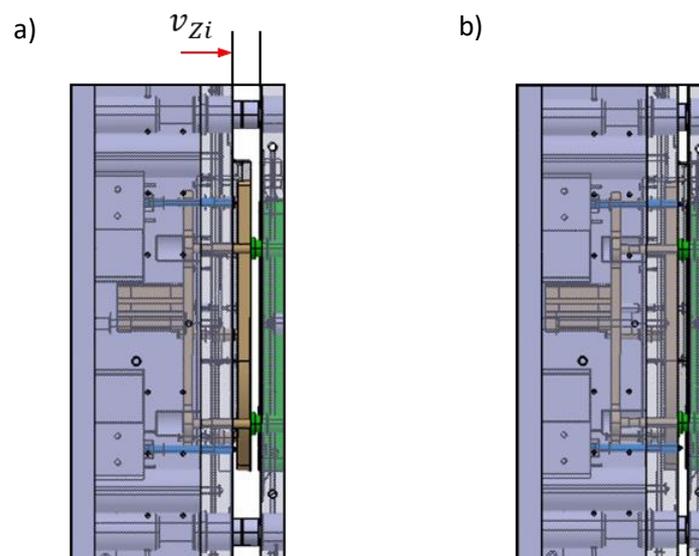


Abb. 91: Mechanik zur Umsetzung der synchronen Rückstellbewegung des Niederhalters zur Werkzeugschließbewegung zu Beginn (a) und zum Ende (b) des Ziehformschritts

Da die Rückstellbewegung des Ziehformsegments unabhängig von der Mechanik des Niederhalters erfolgt, sind die Anschlagbolzen des Niederhalters mit kleinerem Durchmesser als die des Ziehformsegments ausgeführt. Somit ist gewährleistet, dass nach dem Erreichen der hinteren Endlage des Niederhalters die Bolzen des Ziehformsegments an die Vorderseite der Pressform anschlagen und die Mechanik des Niederhalters somit nicht weiterführend beim Pressformen belasten.

### 7.2.5 Heißkanalverteiler und Auswerfer

Für das Spritzgießen von Funktionalisierungen an der thermogeformten Sandwichschale empfiehlt es sich den Angussverteiler als Heißkanal auszuführen und hinsichtlich der Einspritzdüsen auf pneumatisch oder hydraulisch angesteuerte Nadelverschlussdüsen zurückzugreifen. In dieser Ausführungsform kann vermieden werden, dass im hybriden Fertigungszyklus Spritzgussmaterial bzw. Schmelze aus dem Heißkanalverteiler und/oder dem Plastifiziererraum der Spritzgussmaschine entweichen kann. Dies ist erforderlich, um die in Abschnitt 7.1.1 erläuterte Einspritzphase beim Spritzgießen des Randabschlusses bei gleichbleibendem Einspritzvolumen unterbrechen zu können. Abbildung 92 veranschaulicht den im Werkzeug umgesetzten Heißkanalverteiler mit offenen Einspritzdüsen. Dieser bedingt, dass für den Spritzgussprozess an der Maschinendüse der Spritzgussmaschine mit einem Nadelverschluss gearbeitet wird. So kann das beschriebene Entweichen der flüssigen Schmelze reduziert und somit ebenfalls reproduzierbar das Füllen der für das Spritzgießen relevanten Kavitätsbereiche bei gleichbleibendem Einspritzvolumen umgesetzt werden.

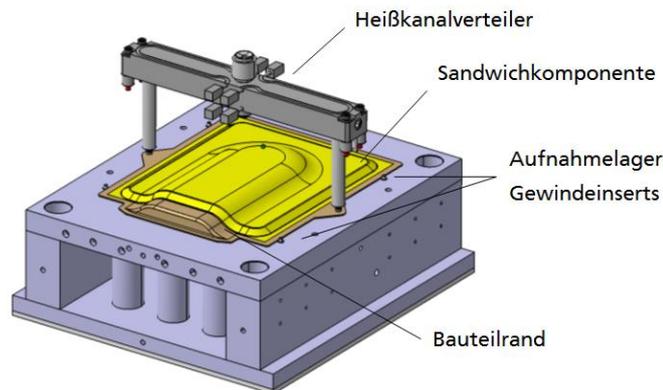


Abb. 92: Heißkanalverteiler des umgesetzten Versuchswerkzeugs

Die thermogeformte Sandwichstruktur ist, wie im Abschnitt 2 erwähnt, generell eher ungeeignet, um punktuell druckbelastet zu werden. Dies muss beim Auslegen des Auswerfersystems eines Thermoformspritzgusswerkzeugs zur Herstellung der funktionalisierten Sandwichbauteile berücksichtigt werden. Geeignete Punkte, um das Bauteil aus der Kavität zum Ende der Prozessführung über geeignete Auswerferbolzen zu entformen, stellen daher die spritzgegossenen Bereiche dar. Insbesondere sind für das Entformen mittels Auswerfer Bereiche am Sandwichbauteil vorteilhaft, die für den Bauteileinsatz bereits dafür vorgesehen sind, punktuelle Lasten aufnehmen zu können. An der umgesetzten Bauteilgeometrie sind dies die vier am Bauteil spritzzugießenden Schraubdome mit jeweils zu integrierender metallischer Gewindehülse. Über diese kann die Krafteinleitung beim Entformen über die Auswerfer direkt in die Gewindehülsen eingeleitet werden, wodurch Druckstellen am Bauteil vermieden werden. Am Auswerferbolzen sind zudem Zapfen angebracht, die ein Abknicken des vergleichsweise dünn

ausgeführten Randabschlusses beim Entformen vermeiden sowie das Fixieren der Gewindehülsen vor der Prozessführung im Werkzeug ermöglichen.

### 7.3 Anlagentechnik

Da die in den Abschnitten 5, 6 und 7 vorgestellten fertigungsspezifischen Entwicklungen zum Thermoformen sowie zum Thermoformspritzgießen von FKV-Sandwichbauteilen auf dem aktuellen Stand der Technik zum Thermoformspritzgießen von Organoblechen aufbauen, unterscheidet sich die hierfür notwendige Anlagentechnik nur in Teilen von den in Abschnitt 4.5 vorgestellten Fertigungsanlagen. Die grundlegenden Anlagenkomponenten, d. h. das Halbzeugmagazin für die zu verarbeitenden Zuschnitte, das IR-Aufheizsystem, der Transferroboter mit Transfergreifer sowie die Spritzgussmaschine sind wie bei der Organoblechverarbeitung ebenfalls zur Verarbeitung der thermoplastischen FKV-Sandwichverbunde geeignet. Die nachfolgende Abbildung 93 veranschaulicht die im Bearbeitungszeitraum der vorliegenden Arbeit für das Thermoformspritzgießen von FKV-Sandwichbauteilen erweiterte Pilotanlage des Fraunhofer IMWS.



Abb. 93: Erweiterte Pilotanlage für das Thermoformspritzgießen von FKV-Sandwichbauteilen

Ergänzungen hinsichtlich der in Abschnitt 4.5 erläuterten Anlagentechnik betreffen den IR-Ofen, der um das Blendensystem sowie eine geeignete Steuerung der Prozessführung des einstufigen IR-Aufheizprozessschritts mit zwischengeschalteter Abschirmphase erweitert wurde (vgl. Abs. 5). Des Weiteren beinhaltet die Pilotanlage zur FKV-Sandwichverarbeitung eine Vakuumpumpe mit zwei davon ausgehenden Vakuuszweigen. Beide Vakuuszweige können während der Prozessführung zu unterschiedlichen Zeitpunkten automatisiert über elektropneumatisch gesteuerte Ventile von der Vakuumpumpe mit Unterdruck beaufschlagt oder davon getrennt werden. Dies ist notwendig, um die unterdruckunterstützte Fixierung des aufgeheizten Sandwichzuschnitts während der Halbzeugübergabe beim Heißtransfer ins Werkzeug sowie das großflächige Ansaugen der Deckschichten zum Stabilisieren und Konsolidieren während der Formgebung zum passenden Zeitpunkt zu- bzw. abschalten zu können (vgl. Abs. 6.5). Pro Vakuuszweig befinden sich an der Vakuumpumpe Vakuummessgeräte, mit denen der jeweilig vorliegende Unterdruck während der Prozessführung überwacht wird. Des Weiteren verfügt die Pilotanlage zur Prozessüberwachung über zwei Wärmebildkameras. Mit diesen kann die Temperaturverteilung beider Deckschichten des Sandwichzuschnitts während des Heißtransfers erfasst und auf Kriterien, wie die Durchschnittstemperatur von ausgewählten Flächenbereichen oder dort vorliegende maximale Temperaturunterschiede, untersucht werden. Mit diesen Informationen lassen sich

während einer Serienfertigung Veränderungen des beim IR-Aufheizen eingestellten thermischen Zustands eines Sandwichzuschnitts ermitteln, auf die insbesondere die Formgebung des Sandwichverbunds beim Thermoformen sensibel reagiert.

## 8 Zusammenfassung und Ausblick

Entsprechend der Zielsetzung konnte im Bearbeitungszeitraum der vorliegenden Arbeit eine großserientaugliche Fertigungstechnologie zur Herstellung von thermoplastischen endlosfaserverstärkten Sandwichbauteilen mit integriertem Wabenkern entwickelt werden. Ausgang der durchgeführten Untersuchungen sowie Entwicklungsarbeiten sind einerseits industriell verfügbare endlosfaserverstärkte Sandwichhalbzeuge mit thermoplastischem Matrixsystem sowie mittlerweile sehr hochentwickelte Thermoformspritzgusstechnologien zur Organoblechverarbeitung.

Zur Entwicklung vergleichbarer Fertigungsmöglichkeiten für die Fertigung von FKV-Sandwichbauteilen mit Wabenkern sind zunächst Untersuchungen zum IR-Aufheizen von ebenen Sandwichzuschnitten durchgeführt worden. Weiterführend wurde in Voruntersuchungen zur Formgebung das Verhalten der Sandwichverbunde beim einachsigen Ziehformen sowie beim Pressformen der Bauteilränder untersucht. Mit Hilfe, der dazu in der vorliegenden Arbeit erläuterten Untersuchungsergebnisse konnte eine generelle Verarbeitbarkeit der Sandwichverbunde mit einem im Thermoformprozess enthaltenen IR-Aufheizprozessschritt nachgewiesen werden. Daraus wurde ein Werkzeugkonzept abgeleitet, das es ermöglicht, einen ebenen Sandwichzuschnitt reproduzierbar mittels Zieh-Pressformen mit vorgelagertem IR-Aufheizprozessschritt zu einer geometrisch definierten 3d-gekrümmten Sandwichschale zu verarbeiten. Passend zur Formgebung wurde ein IR-Aufheizprozess bzw. Prozessschritt entwickelt, mit dem ein Sandwichzuschnitt im doppelseitigen IR-Strahlungsfeld in zwei Flächenbereichen auf ein jeweils unterschiedlich hohes Temperaturniveau erwärmt werden kann. Dies erfolgt beim IR-Aufheizen im doppelseitigen Strahlungsfeld durch eine Abschirmphase mittels metallischer Abschirmbleche, die zeitgesteuert während der einstufigen Temperaturregelung zwischengeschaltet wird. Die entwickelte Werkzeugtechnik sowie die weiterentwickelte IR-Aufheiztechnologie ermöglichen es den endlosfaserverstärkten Sandwichverbund dreidimensional unter Erhalt der Kernmorphologie zu verformen sowie geometrisch definiert umlaufend luftdicht zu schließen.

Der Thermoformprozess sowie die Werkzeug- und Anlagentechnik sind so entwickelt worden, dass diese kompatibel zum Thermoformspritzgießen als hybrider Thermoformspritzgussprozess eingesetzt werden können. Hier konnten in aktuellen Entwicklungsarbeiten erste Methoden zum Funktionalisieren des Bauteilrandes ohne ein Zerdrücken der zuvor im Werkzeug thermogeformten Sandwichschale hergeleitet werden. Zudem war es möglich, im Rahmen einer Machbarkeitsstudie einen Verfahrensweg zur sortenreinen Herstellung von hybrid gefertigten FKV-Sandwichbauteilen aus nur einem FKV herzuleiten und nachzuweisen. Somit kann das entwickelte Thermoformspritzgießen von FKV-Sandwichbauteilen in Anlehnung an geschlossene Kreislaufwirtschaftsmodelle erfolgen, was eine direkte Verwertung von Verschnittresten während der Produktion sowie ein optimales Recycling der sortenrein hergestellten Bauteile nach der Produktlebenszeit gewährleistet.

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit können lediglich die ersten Entwicklungen der angestrebten großserientauglichen Fertigungstechnologie zur Herstellung von FKV-Sandwichbauteilen mit

Wabenkern darstellen. Die Entwicklung erfolgte an selbst bzw. für systematische Untersuchungen sinnvoll gewählten generischen Bauteildesigns. An diesen konnte auch der Nachweis der Reproduzierbarkeit des entwickelten Thermoform- und Thermoformspritzgussprozesses sowie die Funktionalität der zugehörigen Werkzeug- und Anlagentechnik nachgewiesen werden. Mit den bisherigen Ergebnissen können jedoch nicht die Grenzen der geometrischen Möglichkeiten der Fertigungstechnologie und auch nicht deren Bandbreite an Material- und Strukturvariationen hinsichtlich verarbeitbarer Sandwichverbunde abgeschätzt werden. Dies muss und wird aktuell in Folgeaktivitäten zur vorliegenden Arbeit untersucht bzw. weitergeführt. Das in der Arbeit beschriebene Strukturverhalten lässt sich für einfache Bauteilgeometrien durch ingenieurtechnisches Verständnis abschätzen. D.h., einfache Bauteile lassen sich über systematisches Iterieren mit Prototypenwerkzeugen herleiten. Zur Gestaltung komplexerer Bauteile müssen weiterführend numerische Simulationsmethoden bzw. Modelle zur Prozesssimulation entwickelt werden, um diese zukünftig bei der Produktentwicklung einsetzen zu können.

## Literaturverzeichnis

1. BMWi (2019) Schlüsseltechnologie Leichtbau. Monatsbericht
2. BMWi (2020) „Leichtbau-Perspektiven für Deutschland“ - Ergebnisse aus dem Strategieprozess der Initiative Leichtbau des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie
3. H. Altenbach, J. Altenbach, R. Rikards (1996) Einführung in die Mechanik der Laminat- und Sandwichtragwerke: Modellierung und Berechnung von Balken und Platten aus Verbundwerkstoffen. Fachbuch, Dt. Verl. für Grundstoffindustrie, Stuttgart
4. D. Zenkert (ed) (1997) The handbook of sandwich construction. Fachbuch, Engineering Materials Advisory Services Ltd. (EMAS), Cradley Heath, West Midlands
5. H. Junkers (2015) Abdeckung für Flugzeugtragflächen und dergleichen. Patentschrift (DE310040)
6. H. Funke (2001) Systematische Entwicklung von Ultra-Leichtbaukonstruktionen in Faserverbund-Wabensandwichbauweise am Beispiel eines Kleinflugzeuges. Dissertation, Universität-Gesamthochschule Paderborn
7. C. Schmidt-Eisenlohr (2020) Charakterisierung des Umformverhaltens von Hilfsstoffen des Vakuumaufbaus auf doppelt gekrümmten Oberflächen und Ableitung einer anwendungsorientierten Vorhersagemethodik für die CFK-Herstellung. Dissertation, Universität Stuttgart
8. U. Breuer, M. Ostgathe, M. Neitzel (1998) Manufacturing of allthermoplastic sandwich systems by a one-step forming technique. Zeitungsartikel, Polymer Composites 1998: 275–279
9. W. Appel Wolfgang, H. Brähler, S. Breuer et al. (2013) Nutzfahrzeugtechnik: Grundlagen, Systeme, Komponenten. überarbeitete und erweiterte Aufl. 2013. ATZ / MTZ-Fachbuch, Imprint Vieweg +Teubner Verlag, Wiesbaden
10. T. Bitzer (1997) Honeycomb technology: materials, design, manufacturing, applications and testing. Fachbuch, Chapman & Hall, London
11. D. Zenkert (ed) (1995) An Introduction to Sandwich Structure. Fachbuch, Engineering Materials Advisory Services
12. H. E. Friedrich (ed) (2017) Leichtbau in der Fahrzeugtechnik. 2. Auflage, ATZ / MTZ-Fachbuch, Springer Vieweg, Wiesbaden
13. H. Schürmann (2007) Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden. 2. bearbeitete und erweiterte Auflage, VDI-Buch, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg
14. M. Neitzel, P. Mitschang, U. Breuer (2014) Handbuch Verbundwerkstoffe: Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung, 2. aktualisierte und erweiterte Auflage, Fachbuch, Hanser, München
15. A. Y. Lou, T. P. Murtha, J. E. O'Connor et al. (1991) Continuous-Fibre Thermoplastic Composites: Thermoplastic Composite Materials. Zeitungsartikel, Elsevier Science Publishers: 167–204
16. M. Flemming, S. Roth (2003) Faserverbundbauweisen: Eigenschaften; mechanische, konstruktive, thermische, elektrische, ökologische, wirtschaftliche Aspekte, Fachbuch, Springer, Berlin
17. W. Weißbach, M. Dahms, C. Jaroschek (2015) Werkstoffkunde: Strukturen, Eigenschaften, Prüfung. 19. vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage, Lehrbuch, Springer Vieweg, Wiesbaden
18. E. Baur, S. Brinkmann, T. Osswald et al. (2013) Saechtling Kunststoff Taschenbuch, 31. komplett überarbeitete und aktualisierte Auflage, Fachbuch, Hanser, München

19. P. Schwarzmann, A. Illig (ed) (2008) Thermoformen in der Praxis. 2. überarbeitete und erweiterte Auflage, Fachbuch, Hanser, München
20. H. Dominghaus, P. Elsner, P. Eyerer et al. (eds) (2012) Kunststoffe: Eigenschaften und Anwendungen. 8. neu bearbeitete und erweiterte Auflage, VDI-Buch, Springer, Berlin, Heidelberg
21. J. F. Pühringer, G. Zitzenbacher (-) Bestimmung der für die Strahlungserwärmung von Kunststoffhalbzeugen beim Thermoformen relevanten Materialeigenschaften, Fachaufsatz, Wels
22. U. Berthold (2001) Beitrag zur Thermoformung gewebeverstärkter Thermoplaste mittels elastischer Stempel. Dissertation, Technischen Universität Chemnitz
23. B. Tomas Aström (1997) Thermoplastic Composite Sheet Forming: Materials and Manufacturing Techniques. Fachaufsatz, Elsevier Science B.V, Composite Sheet Forming 1997: 27-73
24. E. Witten (ed) (2014) Handbuch Faserverbundkunststoffe/Composites: Grundlagen, Verarbeitung, Anwendungen. 4. Auflage, Fachbuch, Springer Vieweg, Wiesbaden
25. J. Pflug (2018) Continuously Produced Honeycomb Core Materials. Dissertation, Katholieke Universiteit Leuven
26. X. Fan (2006) Investigation on processing and mechanical properties of the continuously produced thermoplastic honeycomb. Dissertation, Katholieke Universiteit Leuven
27. J. Grünewald, P. Parlevliet, F. Hennenberger et al. (2017) MAI Sandwich – Entwicklung von thermoplastisch fügbareren Sandwichstrukturen unter Berücksichtigung eines sortenreinen und wiederverwertbaren Werkstoffeinsatzes. Abschlussbericht, BMBF, München
28. L. J. Gibson, M.F. Ashby (2001) Cellular solids: Structure and properties. 2. ed., 1. paperback ed. (with corr.), transferred to digital printing, Cambridge solid state science series, Cambridge Univ. Press, Cambridge
29. M. John, M. Petersilge, A. Geyer et al. (2018) Modeling and assesment of folded thermoplastic honeycomb core. Konferenzartikel, Lausanne
30. S. Heimbs (2008) Sandwichstrukturen mit Wabenkern: Experimentelle und numerische Analyse des Schädigungsverhaltens unter statischer und kurzzeitdynamischer Belastung. Dissertation, Technischen Universität Kaiserslautern
31. J. Pflug, I. Verpoest (2006) Sandwich Materials Selection Charts. Fachaufsatz, Journal of sandwich structures an materials 2006: 407–421
32. A. Horn (2021) Analyse und Modellierung von thermoplastischen Wabenkernstrukturen für die mechanische Simulation mit repräsentativen Volumenelementen. Masterarbeit, Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig
33. K. Langeheinecke, P. Jany, G. Thieleke et al. (2013) Thermodynamik für Ingenieure: Ein Lehr- und Arbeitsbuch für das Studium. 9. überarbeitete und erweiterte Auflage, Lehrbuch, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden
34. W. Geller (2006) Thermodynamik für Maschinenbauer: Grundlagen für die Praxis. 4. erweiterte Auflage, Lehrbuch, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg
35. E. Doering HS, M. Dehli (2008) Grundlagen der technischen Thermodynamik: Lehrbuch für Studierende der Ingenieurwissenschaften. 6. überarbeitete und erweiterte Auflage, Lehrbuch, Vieweg + Teubner, Wiesbaden

36. T. Bergman, A. Lavine, F. Incropera, D. Dewitt (2011) Fundamentals of heat and mass transfer. 7th ed. Auflage, John Wiley & Sons, Hoboken
37. P. Böckh, T. Wetzel (2015) Wärmeübertragung: Grundlagen und Praxis. 6. aktualisierte und ergänzte Auflage, Fachbuch Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg
38. O. Schwarz, F.W. Ebeling, B. Furth (2005) Kunststoffverarbeitung, 10., überarb. Aufl. Vogel-Fachbuch. Vogel, Würzburg
39. K. Friedrich, M. Hou, J. Krebs (1997) Thermoforming of Continuous Fibre Thermoplastic Composite Sheets. Fachaufsatz, Elsevier Science B.V, Composite Sheet Forming 1997: 91-162
40. A. C. Long (ed) (2007) Composites forming technologies. Fachbuch, Woodhead Publishing Limited, Cambridge
41. F.N. Cogswell (1987) The Processing Science of Thermoplastic Structural Composites. Fachaufsatz, Hanser Publishers, Inter. Polymer Processing 1987:157–165
42. A.M. Murtagh, P.J.Mallon (1997) Characterisation of Shearing and Frictional Behaviour during Sheet Forming. Fachaufsatz, Elsevier Science B.V, Composite Sheet Forming 1997: 163–216
43. C. M. O. Bradaigh, G. G. Mcguinness, S. P. Mcentee (1997) Implicit Finite Element Modelling of Composites Sheet Forming Processes. Fachaufsatz, Elsevier Science B.V, Composite Sheet Forming 1997: 247–322
44. M. Hou, K. Friedrich (1994) 3-D Stamp Forming of Thermoplastic Matrix Composites. Fachaufsatz, Kluwer Academic Publishers, Applied Composite Materials 1994: 135–153
45. F. N. Cogswell (1992) Thermoplastic aromatic polymer composites: A study of the structure, processing, and properties of carbon fibre reinforced polyetheretherketone and related materials. Fachbuch, Butterworth-Heinemann, Oxford, Boston
46. F. H. Henning (2005) Beitrag zur Entwicklung neuartiger Fertigungsverfahren zur Herstellung von Bauteilen aus kontinuierlich faserverstärkten Thermoplasten. Dissertation, Technische Universität Kaiserslautern
47. S. Haanappel. (2013) Forming of UD fibre reinforced thermoplastics. Dissertation, University of Twente, Enschede
48. U.P. Breuer (1997) Beitrag zur Umformtechnik gewebeverstärkter Thermoplaste. Dissertation, Universität Kaiserslautern
49. A. Cheruet, D. Soulat, P. Boisse et al. (2002) Analysis of the interply porosities in thermoplastic composites forming processes, International Journal of Forming Processes:247–258
50. J. Džalto (2017) Entwicklung eines großserientauglichen Aufheizprozesses für naturfaserverstärkte Kunststoffe. Dissertation, Technischen Universität Kaiserslautern
51. M. Cetin, C. Herrmann, S. Fenske (2017) Automatisierungskonzepte zur Herstellung faserverstärkter Thermoplastbauteile. Zeitungsartikel, Springer, Lightweight Design 2017: 38–43
52. A. Stock, P. Egger (2011) Organobleche verlassen das Hochpreissegment. Zeitungsartikel, Verlag moderne industrie GmbH, Produktion 2011: 12–15
53. T. Pfefferkorn, R. Jakobi, A. Nixdorf (2013) Vom Laminat zum Bauteil. Zeitungsartikel, Carl Hanser Verlag, Kunststoffe 2013: 94–100
54. T. D. Joppich (2019) Beitrag zum Umformverhalten von PA6/CF Gelegetlaminaten im nicht-isothermen Stempelumformprozess. Dissertation, Karlsruher Instituts für Technologie

55. M. Cetin, C. Herrmann (2017) Hochdynamisches und homogenes Aufheizen von Organoblechen. Zeitungsartikel, Springer, *Lightweight Design* 2017: 54–60
56. M. Cetin, C. Herrmann, S. Schiel (2017) Automatisierungskonzepte zur Herstellung faserverstärkter Thermoplastbauteile. Zeitungsartikel, Springer, *Lightweight Design* 2017: 38–42
57. P. Harrison, R. Gomes, N. Curado-Correia (2013) Press forming a 0/90 cross-ply advanced thermoplastic composite using the double-dome benchmark geometry. Fachaufsatz, Elsevier Science, *Composites: Part A* 54 2013: 56–69
58. ASS-Maschinenbau (2015) Automatisierte Fertigung von Leichtbaukomponenten. <https://www.ass-automation.com/index.php/de/aktuelles/108-effiziente-herstellung-von-leichtbaukomponenten-fuer-die-serienfertigung>
59. Gimatic Vertrieb GmbH (2019) Teflongreifer für heiß und kalt. <https://automationspraxis.industrie.de/allgemein/teflongreifer-fuer-heiss-und-kalt/>
60. ASS-Maschinenbau (2019) Sicheres Greifen von klebrigen und oberflächensensiblen Bauteilen. Artikel, K-Aktuell 2019
61. E. Doege, B. A. Behrens (2010) Handbuch Umformtechnik: Grundlagen, Technologien, Maschinen, 2. bearbeitete Auflage VDI-Buch. Springer-Verlag, Heidelberg s.l.
62. G. Bäck, K. Feller, F Gruber et al. (2021) 100 Prozent Materialnutzung: Regranulat aus Organoblech-Beschnitten beim Spritzgießen einsetzen. *Kunststoffe*
63. L. Gaab (2014) Optimierung der Heizprozesse von CFK- und GFK-Strukturen mit Infrarot-Strahlung. Zeitungsartikel, Springer Fachmedien Wiesbaden, *Leichtbau-Technologien im Automobilbau* 2017: 23–28
64. M. Rattke, J. Natrop (2007) Infraroterwärmung in der Kunststoffschweißtechnik. Zeitungsartikel, DVS, *Joining Plastics* 2007: 58-63
65. Heraeus Noblelight GmbH (-) Infrarot-Module für die industrielle Prozesstechnik, Produktbeschreibung, [www.heraeus-noblelight.de/infrarot](http://www.heraeus-noblelight.de/infrarot)
66. J. Luo, N. Müller (2021) Softwarebasierte Regelung von IR-Öfen: Thermoplastische Composites effizient und präzise aufheizen, Zeitungsartikel, Carl Hanser Verlag, *Kunststoffe* 2021: 28–32
67. M. Cetin, C. Herrmann, T. Czech Berührungslos und präzise: Infrarot-Thermometer ermöglichen neues Fertigungsverfahren für Kunststoffteile. Zeitungsartikel, Vereinigte Fachverlage GmbH, *Industrielle Automatisierung* 2018: 16-17
68. Optris GmbH (-) Grundlagen der berührungslosen Temperaturmesstechnik. Produktbeschreibung, [www.optris.de/messtechnik-workshops](http://www.optris.de/messtechnik-workshops)
69. H. Budzier, G. Gerald, M. Dörte (2011) Thermal infrared sensors: Theory, optimisation and practice. Fachbuch, John Wiley & Sons, Chichester U.K, Hoboken N.J
70. U. Breuer (1996) Verfahren zur Herstellung thermoplastischer Faserverbund-Sandwich-Formteile. Patentschrift (DE 196 18 592 A1)
71. O. Rozant (2020) Novel thermoplastic sandwich preforms for three-dimensional forming. Dissertation, University Lausanne
72. J. Nowacki (2002) Prozessanalyse des Umformens und Fügens in einem Schritt von gewebeverstärkten Thermoplasten. Dissertation, Technische Universität Kaiserslautern

73. S. Spitzer, E. Bürkle, W. Hufenbach (2013) FKV-Sandwichstrukturen beflügeln den Leichtbau. Zeitungsartikel, Carl Hanser Verlag, Kunststoffe 2013: 162–165
74. J. Nowacki, P. Mitschang, M. Neitzel, E. A. Lehner, F. Hoecker (2001) Thermoplastische Sandwich-Strukturbauteile in einem Schritt geformt: Potenzial für Serienfertigung. Zeitungsartikel, Carl Hanser Verlag, Kunststoffe 2001: 92–95
75. J. Kaufmann, L. Kroll, M. Meyer et al. (2011) Dreidimensional konturierte Sandwichstruktur Patentschrift (DE102011006819A1)
76. V. K. Minupala, T. Gläßer, M. Zscheyge (2020) Simulation of thermoforming process of thermoplastic based sandwich laminates made of cross-ply and honeycomb core. Konferenzartikel, ITHEC 2020: 123–127

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Gestaltungsmöglichkeiten zur Sandwichbauweise und Spannungszustand im biegebeanspruchten Sandwichverbund.....	4
Abb. 2: Einachsig biegebeanspruchter Sandwichbalken (a) mit symmetrischem Querschnitt (b).....	5
Abb. 3: Normal- und Schubspannungen des biegebeanspruchten Sandwichbalkens unter unterschiedlichen Abstraktionsstufen .....	6
Abb. 4: Deformationen am biegebeanspruchten Sandwichbalken infolge Querkraftschub, Biegung und überlagerter Biege- Querkraftschubbeanspruchung.....	6
Abb. 5: Aufteilung von thermoplastischen Kunststoffen nach [17].....	9
Abb. 6: Bruchspannung $\sigma_B$ und Bruchdehnung $\varepsilon_B$ von teilkristallinen Thermoplasten in Abhängigkeit zur Temperatur [17].....	10
Abb. 7: DSC-Verlauf von Polypropylen.....	11
Abb. 8: Veränderung des spezifischen Volumens von teilkristallinen Thermoplasten in Abhängigkeit zur Temperatur und zum Verarbeitungsdruck [17] .....	11
Abb. 9: Schmelzeviskosität von Polyamid 6 und Polycarbonat in Abhängigkeit zur Schergeschwindigkeit für unterschiedliche Schmelztemperaturen [18] .....	12
Abb. 10: Thermoplastische FKV-Systeme sowie der Zusammenhang von den mechanischen Eigenschaften zur Faserlänge in Anlehnung an [24].....	15
Abb. 11: Aufgewickeltes UD-Tape (a) und unterschiedliche Organobleche (b) .....	16
Abb. 12: Modellstellung der transversalen Isotropie am Beispiel einer UD-Schicht [13] .....	17
Abb. 13: Modellstellung der Orthotropie [13].....	17
Abb. 14: Sandwichkerne unterteilt nach Struktur und Stützwirkung in Anlehnung an [25] .....	18
Abb. 15: Die drei Hauptrichtungen von Wabenkernen in Anlehnung an [6] .....	20
Abb. 16: Deformationsverhalten eines in W-Richtung schubbeanspruchten Wabenkerns [29] .....	211
Abb. 17: Herstellung von Nomex®-Wabenkernen [30].....	21
Abb. 18: Wabenkernherstellung im ThermHex®-Verfahren [25] .....	22
Abb. 19: Zustands- und Prozessgrößen eines rigid geschlossenen Systems [33].....	25
Abb. 20: Eindimensionale Wärmeleitung [36].....	27
Abb. 21: Zweidimensionale Wärmeleitung [36] .....	28
Abb. 22: Richtungsabhängigkeit emittierter Wärmestrahlung am diffusen Strahler [36] .....	30
Abb. 23: Oberflächenemissionsleistung am schwarzen Körper in Abhängigkeit zur Wellenlänge [36].....	31
Abb. 24: Verhalten von Wärmestrahlung an strahlungsreflektierenden Oberflächen [36].....	32
Abb. 25: Verhalten von Wärmestrahlung an strahlungsundurchlässigen Stoffen [36] .....	33
Abb. 26: Absorptions-, Reflexions- und Transmissionsprozesse an halbtransparenten Stoffen.....	33
Abb. 27: Ziehformen mit kraftgesteuertem Niederhalter vor (a) und nach der Formgebung (b) in Anlehnung an [18] .....	37
Abb. 28: Matrixperkolation durch und entlang einer UD-Einzelschicht (a) und daraus resultierender Separierungseffekt beim Biegeformen (b) [41].....	38

Abb. 29: Transversaler Faserfluss [41] .....	38
Abb. 30: Transversaler Matrixfluss und Matrixlängsperkolation beim Pressen von Organoblechen [42] .....	39
Abb. 31: Verformungsmechanismen im Feststoffanteil von Organoblechen in Anlehnung an [45] ...	40
Abb. 32: Faserverlaufsänderungen beim dreidimensionalen Ziehformen von UD-Gelege-Organoblechen .....	41
Abb. 33: Interlaminares Lagengleiten (a) und Faltenbildung (b) [41] .....	41
Abb. 34: Schematische Darstellung zum nicht-isothermen Stempelformen in Anlehnung an [54] ....	43
Abb. 35: Vakuumsauggreifer aus Silikon für den Kalttransfer (a) sowie Vakuumsauggreifer aus Teflon (b) und Nadelgreifer (c) für den Heißtransfer .....	44
Abb. 36: Spannungsverhältnisse beim Tiefziehen [61] .....	45
Abb. 37: Mittels Thermoformspritzgießen hergestellte Versuchsstrukturen .....	47
Abb. 38: Industrielle Thermoformspritzgussanlage mit vertikalschließender Spritzgussmaschine ....	48
Abb. 39: Mittelwelliger IR-Strahler für das IR-Aufheizen von Organoblechen.....	51
Abb. 40: Weiterentwickelter IR-Ofen (a) sowie CAD-Darstellung des Strahlerfelds einschließlich Pyrometer Gitterrost und Blendensystem (b).....	52
Abb. 41: Abschirmblenden im IR-Ofen in der Position zur flächigen Strahlungsbeaufschlagung (a) sowie für das zwischengeschaltete Abschirmen (b) .....	53
Abb. 42: Verlauf der Oberflächentemperatur beim einstufigen IR-Aufheizen von Organoblechen sowie schematisch veranschaulichter Temperaturgradient über die Blechdicke vor und nach der Durchwärmphase [66].....	55
Abb. 43: Einstufiges IR-Aufheizen von thermoplastischen FKV-Sandwichverbunden sowie schematisch veranschaulichter Temperaturgradient über die Sandwichhöhe zum Ende der Durchwärmphase ....	56
Abb. 44: Schematische Darstellung des einstufigen IR-Aufheizens mit zwischengeschalteter Abschirmphase .....	57
Abb. 45: Oberflächentemperatur der Deckschichten beim einstufigen IR-Aufheizen eines FKV-Sandwichverbundes mit zwischengeschalteter Abschirmphase im abgeschirmten Zuschnittsbereich	58
Abb. 46: Vergleich der Oberflächentemperatur eines Sandwichzuschnitts nach dem einstufigen IR-Aufheizen ohne (a) und mit (b) zwischengeschalteter Abschirmphase.....	59
Abb. 47: Mögliche Heizzonenaufteilung im IR-Ofen.....	59
Abb. 48: Schematisch veranschaulichte Störeinflüsse beim IR-Aufheizen eines Sandwichzuschnitts im IR-Ofen mit horizontal ausgerichteten doppelseitigen Strahlerfeldern .....	60
Abb. 49: Einfacher Regelkreis zur Prozessführung beim einstufigen IR-Aufheizen.....	60
Abb. 50: Erweiterter Regelkreis zur Prozessführung beim einstufigen IR-Aufheizen mit zusätzlicher Heizzonensynchronisation .....	61
Abb. 51: Oberflächentemperaturen beim einstufigen IR-Aufheizen eines Sandwichzuschnitts mit synchronisierten Heizzonen .....	62
Abb. 52: Temperaturverläufe im Sandwichverbund während des IR-Aufheizens und beim nachfolgenden Abkühlen an der Umgebungsluft.....	67
Abb. 53: Temperaturverläufe im Sandwichverbund während des Thermoformens im zum Ziehformen optimal aufgeheizten Zuschnittsbereich.....	68

Abb. 54: Pressformen mit einteiliger Werkzeugform (a) sowie Pressformen mit vorlaufendem Formsegment (b) .....	69
Abb. 55: Querschnitt eines pressgeformten Randabschlusses unter Anwendung des einstufigen IR-Aufheizprozessschritts mit zwischengeschalteter Abschirmphase .....	70
Abb. 56: Druckverlauf beim Pressen des ebenen Dreischichtlaminates sowie die hierbei pressgeformte Versuchsstruktur .....	71
Abb. 57: Konzeptskizze zum einachsigen Ziehformversuch mit vorgespanntem Sandwichzuschnitt .	72
Abb. 58: Einachsiger Ziehformversuch mit Probenhalter im IR-Ofen (a), Probenhalter inklusive Einzugsseite vor dem Transfer in die Spritzgussmaschine (b) sowie Stempel- und Einzugsseite während des Ziehformens (c) .....	73
Abb. 59: Zug-Druck-Beanspruchungen am einachsigen ziehgeformten Sandwich (a) und resultierende plastische Zug-Druck-Verformung der Zellwände (b) .....	74
Abb. 60: Querkraftschubbeanspruchung des Sandwichs (a) und resultierende plastische Schubverformung der Zellwände (b) .....	75
Abb. 61: Flächenpressung des Kerns und daraus resultierendes plastisches Stauchen der Zellwände nahe den Deckschichten .....	75
Abb. 62: Zug-Druck-Beanspruchungen am einachsigen ziehgeformten Sandwich (a) sowie resultierendes Verdichten (b) bzw. Lichten der Endlosfasern innerhalb der Deckschicht (c).....	76
Abb. 63: Vergleich der Verformbarkeit des Sandwichverbunds in W-Richtung (a) und L-Richtung (b) des Wabenkerns sowie die im jeweiligen Versuch wirkende Stempelkraft (c).....	76
Abb. 64: Faltenbildung (a) und Welligkeiten (b) im Deckschichtverbund nach dem einachsigen Ziehformen .....	77
Abb. 65: Mögliche Fehlstellen beim einachsigen Ziehformen im Wabenkern infolge Kerndruck- (a) oder Kernschubversagens (b) .....	78
Abb. 66: Bauteildesign der Versuchsstruktur für die Untersuchungen zum Zieh-Pressformen dargestellt von der Ober- (a) sowie Unterseite (b).....	79
Abb. 67: Thermoformablauf des Zieh-Pressformens sowie relevante Prozessparameter .....	80
Abb. 68: Abzeichnungen der Nadel- (a) Teflonsaug- (b) und Silikonsauggreifer (c) im gegriffenen Deckschichtbereich der thermogeformten Sandwichschale.....	81
Abb. 69: Von der Werkzeugoberseite aus aufgenommene Wärmebildaufnahmen während der Formgebung mit (a) und ohne (b) Niederhalterunterstützung .....	83
Abb. 70: Querschnitte einachsigen ziehgeformter Sandwichproben, mit (a) und ohne (b) Niederhalterunterstützung beim Ziehformen.....	84
Abb. 71: Spannungssituation beim Ziehformen einachsigen und sphärisch gekrümmter Bauteilbereiche innerhalb der freien Umformzone.....	84
Abb. 72: Sphärischer Bereich mit konstant ausgeführter Kernhöhe der Versuchsstruktur (a) und passend dazu simulierte Spannungssituation sowie resultierende Faltenbildung in der unteren Deckschicht zum Ende des Ziehformens (b).....	85
Abb. 73: Sphärischer Bereich ausgeführt mit lokaler Kernhöhenreduzierung der Versuchsstruktur (a) und passend dazu simulierte Spannungssituation sowie faltenfrei ziehgeformte untere Deckschicht zum Ende des Ziehformens (b) .....	86

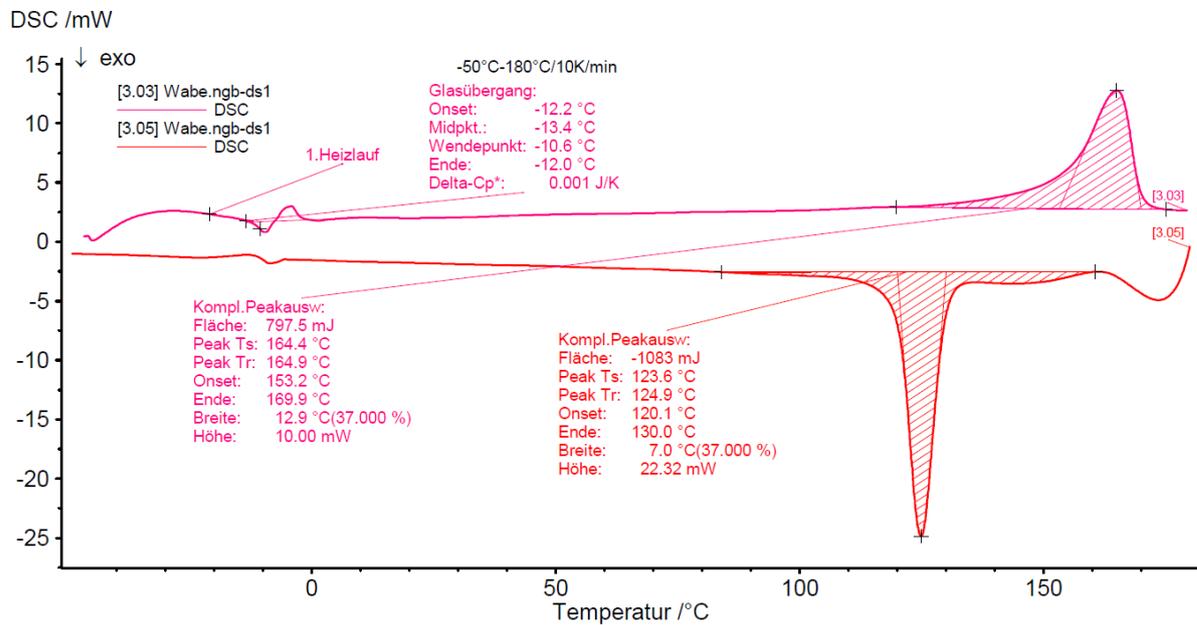
Abb. 74: Querschnitte von Versuchsstrukturen im 3D-geformten Bereich mit lokaler Kernhöhenreduzierung, hergestellt unter optimalen (a) sowie ungünstig gewählten (b) Prozessparametern.....	86
Abb. 75: Unterseite einer ziehgeformten Sandwichstruktur mit (a) und ohne (b) unterdruckunterstütztem Stabilisieren und Konsolidieren der unteren Deckschicht.....	87
Abb. 76: Werkzeuginnenseite der Positiv- (a) und Negativformhälfte (b) des umgesetzten Versuchswerkzeugs vor dem Zieh-Pressformen.....	88
Abb. 77: Unterdruckverlauf nach Einsetzen der Stabilisierungsphase beim Zieh-Pressformen der Sandwichschale.....	89
Abb. 78: Blasenbildung zwischen den UD-Einzelschichten der oberen Deckschicht einer Sandwichschale nach dem Zieh-Pressformen ohne vakuumunterstütztes Stabilisieren und Konsolidieren .....	89
Abb. 79: Faserverteilung innerhalb der Deckschicht im nichtverarbeiteten Sandwichzuschnitt (a), einer aus dem Sandwichzuschnitt thermogeformten Versuchsstruktur (b) sowie einer thermogeformten Versuchsstruktur aus gleichen jedoch ausschließlich gestapelten Sandwichkomponenten (c).....	90
Abb. 80: Fertigungszyklus des Thermoformspritzgießens von FKV-Sandwichbauteilen .....	91
Abb. 81: Versuchsbauteil mit thermogeformter Sandwichschale und spritzgegossenem Bauteilrand.....	93
Abb. 82: Fehler beim Spritzgussfunktionalisieren: Penetrieren der Schmelze ins Sandwichinnere (a) und plastisches Zerdrücken und somit Überspritzen der thermogeformten Sandwichstruktur (b) .....	94
Abb. 83: Ergebnis der Fließfrontsimulation am Ende des Einspritzvorgangs beim Spritzgießen des Randabschlusses.....	95
Abb. 84: Simulierte Werkzeuginnendruckverteilung beim Spritzgießen des Randabschlusses zum Ende des Einspritzvorgangs mit (a) und ohne Nebenkavitäten (b) .....	95
Abb. 85: Verfahrensweg der sortenreinen Produktion von FKV-Sandwichbauteilen aus einem FKV. ....	97
Abb. 86: Bei der Sandwichverarbeitung angefallene Verschnittreste (a), daraus hergestelltes Mahlgut (b) sowie aus dem Mahlgut compoundingiertes Granulat (c) .....	97
Abb. 87: Umgesetzte Demonstratoren aus unterschiedlichen Sandwichverbunden.....	99
Abb. 88: Umgesetztes Versuchswerkzeug und farblich hervorgehobene Funktionsbaugruppen mit Positiv- (a) und Negativformseite (b).....	100
Abb. 89: Mechanik zur Umsetzung der synchronen Rückstellbewegung des Ziehformsegments zur Werkzeugschließbewegung zu Beginn (a) und zum Ende (b) des Pressformschritts .....	101
Abb. 90: Feinporöser Formeinsatz (a) und Innenseite des Ziehformsegments mit integriertem Unterdruckverteiler (b) des umgesetzten Versuchswerkzeugs.....	102
Abb. 91: Mechanik zur Umsetzung der synchronen Rückstellbewegung des Niederhalters zur Werkzeugschließbewegung zu Beginn (a) und zum Ende (b) des Ziehformschritts.....	103
Abb. 92: Heißkanalverteiler des umgesetzten Versuchswerkzeugs .....	104
Abb. 93: Erweiterte Pilotanlage für das Thermoformspritzgießen von FKV-Sandwichbauteilen.....	105

## Tabellenverzeichnis

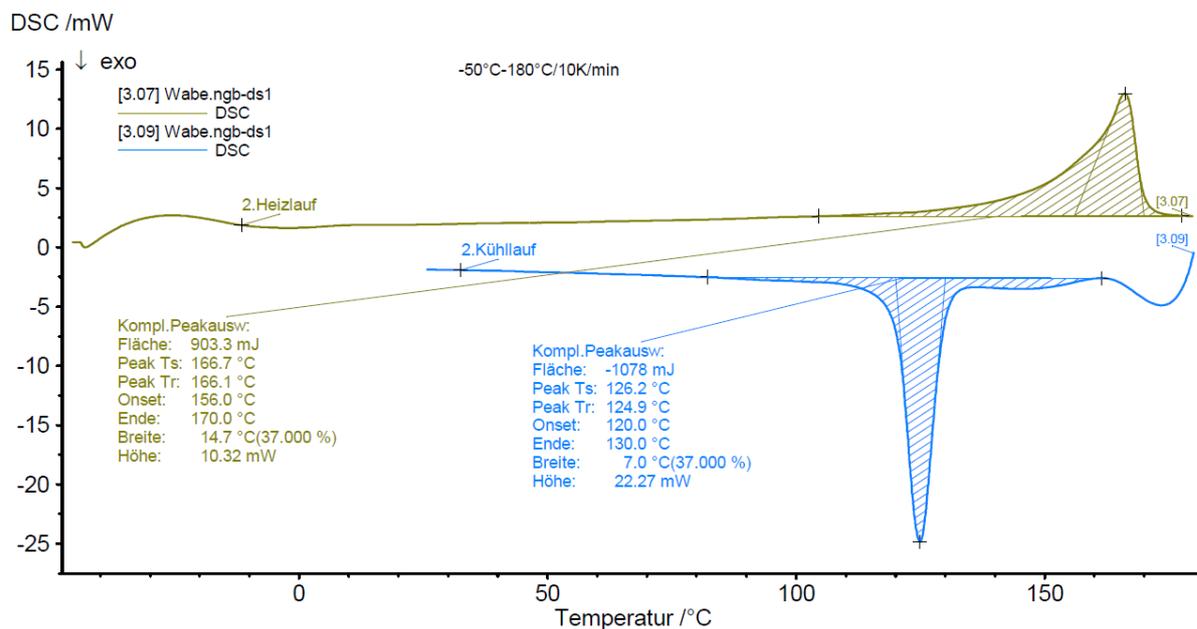
Tabelle 1: Materialeigenschaften unterschiedlicher metallischer und thermoplastischer Werkstoffe	13
Tabelle 2: Ausgewählte Fasermaterialien und deren Materialeigenschaften [14] .....	14
Tabelle 3: Formgebungsmethoden für das Thermoformen von thermoplastischen Kunststoffen [38]	36
Tabelle 4: Thermoplastische FKV-Sandwichverbunde mit ThermHex-Wabenkern.....	63
Tabelle 5: Druckmodul und Druckfestigkeit des Sandwichverbunds TS1 bei RT, 80°C sowie 140°C....	68
Tabelle 6: Prozessparameter zum einachsigen Ziehformen mit vorgespanntem Sandwichzuschnitt .	74
Tabelle 7: Prozessparameter zum Zieh-Pressformen mit den Sandwichverbunden TS1 und TS2 .....	80
Tabelle 8: Materialeigenschaften des wiederverwerteten Sandwichverbunds TS1 als Mahlgut sowie als compoundiertes Granulat .....	98

# Anhang 1

## DSC-Kernmaterial\_1

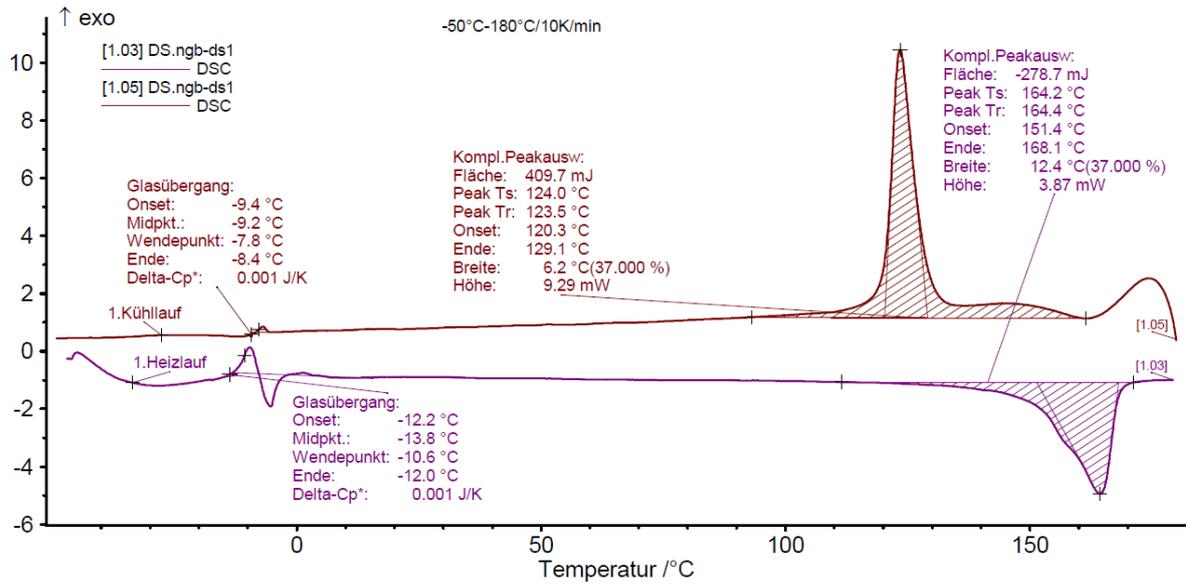


## DSC-Kernmaterial\_2



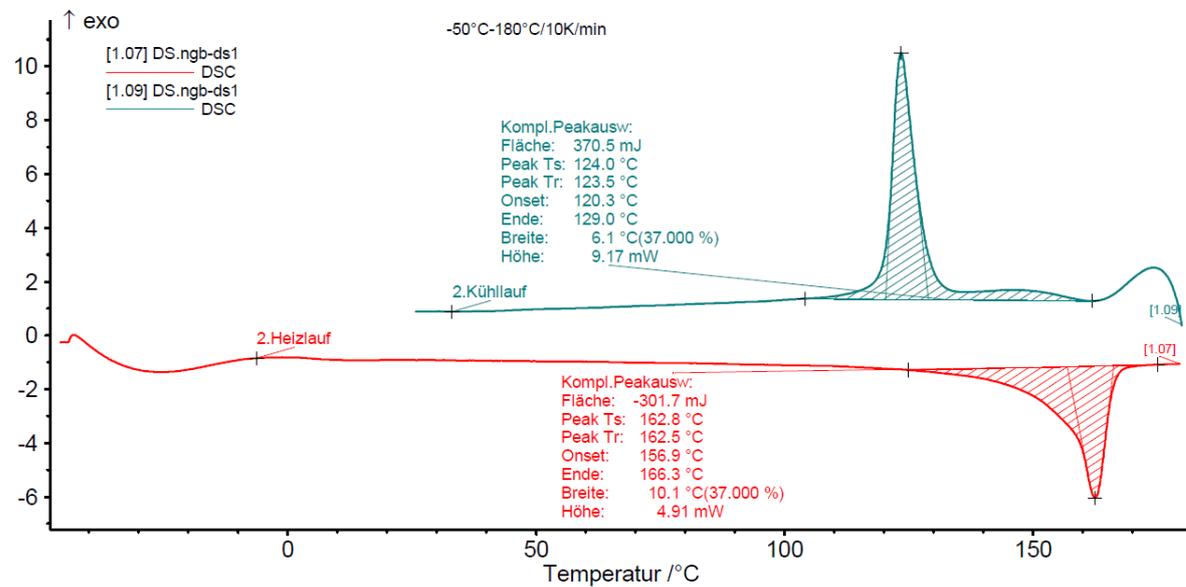
### DSC-Deckschicht\_1

DSC /mW



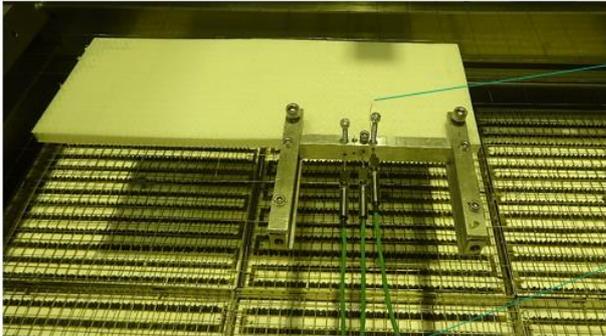
### DSC-Deckschicht\_2

DSC /mW



## Anhang 2

### Versuchsaufbau Aufheizversuch:



#### Sensor Deckschicht:

(D)

- Positionierung zwischen den beiden Einzelschichten
- Drahtthermoelement (Typ K,  $d=0,25$ )

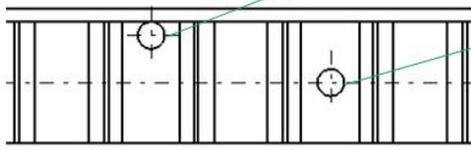
#### Sensoren Kern:

(K1)

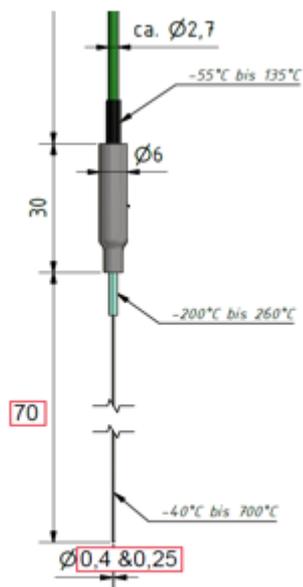
- Positionierung ca. 1mm unter der Deckschicht mit Kontakt zum Wabenkern
- Mantelthermoelement (Typ K,  $d=0,4$ )

(K2)

- Positionierung ca. 5mm unter der Deckschicht (Sandwichmitte) mit Kontakt zum Wabenkern
- Mantelthermoelement (Typ K,  $d=0,4$ )



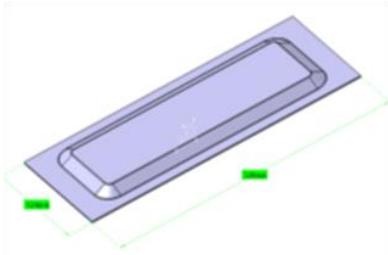
### Mantelthermoelement (Typ K):



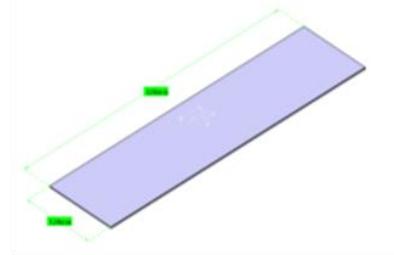
## Anhang 3

### Versuchsaufbau Pressformversuch:

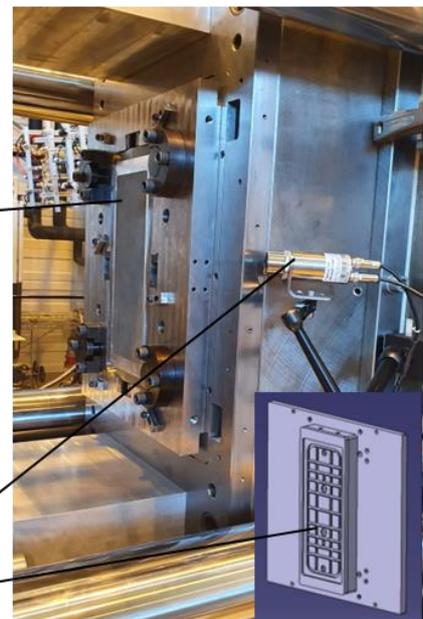
Versuchsbauteil (pressgeformte Seite)



Versuchsbauteil (flache Seite)



- Pressform
- Vorläufer
- Poröse  
Formeinsätze
- Fixiersauger
- Anschlagbolzen
- Kraftmessdose
- IR-Kamera
- Unterdruck-  
verteiler



## Anhang 4

### Patentrecherche:

<u>DE2650581A1</u>	Priority date 1975-11-07 Pub. date 1977-05-18	Sumitomo Chemical Co	Warmformverfahren zur Herstellung von Formteilen aus Kunststoff-welltafelmaterial
<u>DE4323590A1</u>	Priority date 1992-07-17 Pub. date 1994-03-17	Thomas Cantz	Verfahren zur Herstellung eines dreidimensional geformten Schichtverbund-Bauteils
<u>DE102014215365A1</u>	Priority date 2014-08-05 Pub. date 2016-02-11	Bayerische Motoren Werke Aktiengesellschaft	Verfahren zur Herstellung von warmumgeformten Bauteilen
<u>DE19618592A1</u>	Priority date 1996-05-09 Pub. date 1997-01-23	Institut für Verbundwerkstoffe 67663 Kaiserslautern De GmbH, INST VERBUNDWERKSTOFFE GmbH	Verfahren zur Herstellung thermoplastischer Faserverbund-Sandwich-Formteile
<u>DE202005005475U1</u>	Priority date 2005-04-06 Pub. date 2005-08-04	Dohmeyer, Jan, Dipl.-Ing.	Werkstück und Vorrichtung zur Schaffung
<u>EP3263321A1</u>	Priority date 2016-06-29 Pub. date 2018-01-03	Airbus Defence and Space GmbH	Verfahren zur Herstellung eines Sandwich-paneels mit einem verstärkten Schaumstoffkern

<u>US5328744A</u>	Priority date 1990-10-09 Pub. date 1994-07-12	E. I. Du Pont De Nemours And Company	Panel having a core with thermoplastic resin facings
<u>DE19604613A1</u>	Priority date 1996-02-08 Pub. date 1997-08-28	Bayerische Motoren Werke Aktiengesellschaft	Sandwichstruktur
<u>DE102011006819A1</u>	Priority date 2011-04-06 Pub. date 2012-10-11	TU Chemnitz	Dreidimensional konturierte Sandwichstruktur
<u>WO2013143569A1</u>	Priority date 2012-03-30 Pub. date 2013-10-03	Daimler AG	Sandwichverbundbauteil und Herstellungsverfahren dafür
<u>DE102011111743A1</u>	Priority date 24.08.2011 Pub. date 28.02.2013	Daimler AG	FVK-Bauteil und Herstellungsverfahren
<u>DE102011111743B4</u>	Priority date 24.08.2011 Pub. date 18.12.2014		FVK-Bauteil
<u>DE102008009438A1</u>	Priority date 14.02.2008 Pub. date 20.08.2009	MX. Composys Ltd.	Verfahren und Anlage zur Herstellung von Formteilen mit veredelter Sichtfläche aus Faserverbundkunststoffen

<u>DE000069937193T2</u>	Priority date 22.03.1999 Pub. date 26.06.2008	Minnesota Mining & Manufacturing Company	Nachformbare optische Mehrschichtfilme und Verfahren zu deren Herstellung
<u>DE000069427408T2</u>	Priority date 30.11.1994 Pub. date 02.05.2002	MCHENRY, ROBERT J.	Tiefgezogener und abgesteckter Behälter von Metallkunststoff und ihren Herstellungsverfahren
<u>DE000010346219A1</u> →Merkmal Lackfolie	Priority date 23.09.2003 Pub. date 28.04.2005	Decoma (Germany) GmbH	Strukturbauteil und Verfahren und Werkzeugvorrichtung zu dessen Herstellung
<u>EP000001223032A2</u>  <u>DE000010100914A1</u>	Priority date 28.12.2001 Pub. date 17.07.2002 Priority date 11.01.2001 Pub. date 18.07.2002	Bayer AG	Plattenförmiges Leichtbauteil
<u>WO002013026511A1</u>  <u>EP000002748453B1</u>	Priority date 17.07.2012 Pub. date 28.02.2013 Priority date 17.07.2012 Pub. date 20.05.2015	DAIMLER AG	Steuergehäusemodul und Herstellungsverfahren

## Weitere Veröffentlichungen

### Fachaufsatz (peer reviewed):

T. Gläßer; P. Stache; M. Zschoyge (2022) TS-Moulding – Fertigungstechnologie zur großserientauglichen Herstellung endlosfaserverstärkter Thermoplastsandwichstrukturen, VDI-Fachmedien, Konstruktion

### Patente:

T. Gläßer, P. Stache, M. Zschoyge, K. Kölzig (2020) Verfahren zur Herstellung eines Sandwichverbund-Bauteils mit eingepresster zwei oder dreidimensionaler Form sowie ein derartiges Sandwichverbund-Bauteil, PCT/EP2020/057508

T. Gläßer; P. Stache (2020) Verfahren zur Herstellung einer formbaren thermoplastischen, endlosfaserverstärkten Verbundstruktur, formbare Verbundstruktur sowie Vorrichtung zur deren Herstellung, PCT/EP2020/083514

T. Gläßer, P. Michel, P. Stache; (2022) Verfahren zur Herstellung von Sandwichbauteilen aus einem plattenförmigen Sandwichhalbzeug, PCT/EP2022/078642

### Konferenzbeiträge:

T. Gläßer, A. Geyer, J. Pflug, R. Schlimper, M. Zschoyge (2018) Continuous production of thermoplastic sandwich structures and their functionalization via hybrid injection molding technology, Conference Proceedings ITHEC 2018

A. Geyer, T. Gläßer, J. Pflug, R. Schlimper, M. Zschoyge (2016) Mechanical Behavior of novel Organosandwich Components for Lightweight Structures in automotive Applications, Conference Proceedings ITHEC 2016

V.K. Minupala, T. Gläßer, M. Zschoyge (2020) Simulation of thermoforming process of thermoplastic based sandwich laminates made of cross-ply and honeycomb core, Conference Proceedings ITHEC 2020

R. Schlimper, J. Pflug, T. Gläßer, M. Zschoyge, P. Michel (2017) Kosteneffizienter Leichtbau im Automobilbau durch Warmumformung und Spritzgussfunktionalisierung von innovativen Organosandwich-Halbzeugen, Internationaler VDI-Kongress Kunststoffe im Automobilbau