

# **Dünne CFK-Schaum- Sandwichstrukturen - Bewertung unterschiedlicher Fertigungsmöglichkeiten**

## **Masterarbeit**

verfasst von

**Markus Weninger, BSc**

erstellt am

**Lehrstuhl für Verarbeitung von Verbundwerkstoffen**

**Department Kunststofftechnik**

**Montanuniversität Leoben**



---

**VERARBEITUNG VON  
VERBUNDWERKSTOFFEN**

Betreuung: Dipl.-Ing. Dr. mont. Steffen Stelzer  
Begutachtung: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ralf Schledjewski

Leoben im März 2018

## Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

---

Datum

---

Unterschrift

## Danksagung

Ich möchte an dieser Stelle Dipl. Ing. Reinhard Hafellner, Dipl. Ing. Michael Pichler und Dipl. Ing. Dr. mont. Steffen Stelzer für die Ermöglichung dieser Diplomarbeit danken. Insbesondere möchte ich Dipl. Ing. Dr. mont. Steffen Stelzer und Dipl. Ing. Gerald Possarnig für den wissenschaftlichen Input bei der Durchführung meiner Arbeit danken. Weiters möchte ich mich bei sämtlichen Mitarbeitern der 4a Unternehmensgruppe für die Unterstützung meiner experimentellen Arbeit danken, wobei ich hierbei speziell Dipl. Ing. Valerio Malvaioli, Dipl. Ing. Rene Rieser, Dipl. Ing. Christian Fellner, Matthias Pribil, Stefan Riemelmoser und Markus Weber nennen möchte. Fortführend möchte ich der 4a manufacturing GmbH für die Finanzierung dieser Arbeit danken.

Ich bedanke mich beim Lehrstuhl „Verarbeitung von Verbundwerkstoffen“ an der Montanuniversität Leoben mit seinem Leiter Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ralf Schledjewski für die Begutachtung dieser Arbeit. Dipl. Ing Patrick Hergan möchte ich für die Unterstützung bei den RTM Versuchen danken.

Fortführend möchte ich meinen Freunden danken ohne die ich das Studium an der Montanuniversität nicht geschafft hätte. Ich möchte hierbei Lasse Založnik, Sam Sadeghi, Lukas Moser, Manfred Stadler, Manuel Habernig, Harald Grössing und Frederic Niederl nennen da sie mir bei jeglichen Schwierigkeiten stets zur Seite standen. Außerdem danke ich meiner Familie, Claudia Weninger, Maximilian Bader Patrick Weninger und Margit Riedler. Sie glauben immer an mich und ohne diese seelische Unterstützung hätte ich diese Masterarbeit nicht durchführen können bzw. wäre in meinem Studium ohnehin nie bis dorthin gekommen.

## Kurzfassung

Seit dem zweiten Weltkrieg machen sich Ingenieure die Vorteile von Kernverbundstrukturen zu Nutze. Bereits damals wurde der britische Jagdbomber „Mosquito“ in Sandwichbauweise gefertigt. Durch gezieltes Zusammensetzen von Kern- und Deckschichten können Eigenschaften wie hohe Steifigkeit, geringes Gewicht sowie Wärme- und Schalldämmung kombiniert werden. Bei bisherigen Anwendungen von Sandwichverbunden ist die Kernschicht dick im Vergleich zu den Decklagen. Aufgrund neuer Marktsegmente sind vor allem Sandwichbauweisen, in denen der Kern nicht wesentlich dicker als die Decklagen ist, von Interesse.

Diese Werkstoffkombination wird von der 4a manufacturing GmbH als Mikrosandwich bezeichnet. Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, die Verarbeitbarkeit dieser Materialien zu untersuchen und zu bewerten. Die Decklagen der Mikrosandwichpanele bestehen aus 200 g/m<sup>2</sup> Kohlefasergewebe in Köperbindung und die Kernschicht ist ein geschlossenzelliger Polymethacrylimid (PMI)-Kunststoff. Die Mikrokernverbunde der vorliegenden Arbeit wurden durch die Verfahren Prepregheipressen, Vacuum Assisted Resin Infusion (VARI) und Resin Injektion Moulding (RTM) hergestellt. Die gemessenen Werkstoffeigenschaften wurden im paarweisen Vergleich gegenübergestellt. Daraus ergab sich ein Ranking der Verfahren bzw. der Verfahrenseinstellungen hinsichtlich Dichte, Biegeeigenschaften und Schälfestigkeit. Auf Basis von Informationen der Literatur und der Sandwicheigenschaften wurde eine SWOT-Analyse der Verfahren erstellt.

Es zeigt sich, dass jedes Verfahren Vor- und Nachteile birgt. Während die RTM-Kernverbunde die höchsten Biegefestigkeiten lieferten, erzielten die Prepreg-Sandwichplatten das beste Steifigkeitsranking. Aus dem VARI-Verfahren resultieren Mikrosandwichpanele mit hoher interlaminaire Festigkeit. Parallel zur Bewertung der Werkstoffeigenschaften wurde ein Verfahren entwickelt, wie ein Stoß im Schaumkern kaschiert werden kann.

## Abstract

Since World War II, engineers have taken advantage of core composite structures. Even then, the British fighter-bomber "Mosquito" was made in sandwich construction. The targeted combination of core and outer layers can combine properties such as high rigidity, low weight and thermal and acoustic insulation. In previous applications of sandwich composites, the core layer is thick compared to the top-sheets. Due to new market segments, especially sandwich construction is of interest, in which the core is not significantly thicker than the cover layers.

This material combination is referred to as microsandwich by 4a manufacturing GmbH. The aim of the present work is to investigate and evaluate the processability of these materials. The cover layers of the micro sandwich panels consist of 200 g/m<sup>2</sup> twill weave carbon fiber fabric and the core layer is a closed-cell Polymethacrylimide (PMI) plastic. The microsandwich panels of the present work were produced by the methods prepreg hot pressing, vacuum assisted resin infusion (VARI) and resin transfer molding (RTM). The measured material properties were compared in a pairwise comparison. This resulted in a ranking of the procedures and the process settings with respect to density, bending properties and peel strength. Based on information from the literature and the sandwich properties, a SWOT analysis of the procedures was prepared.

It turns out that every process has advantages and disadvantages. While the RTM core composites provided the highest bending strengths, the prepreg sandwich panels achieved the best stiffness rating. The VARI process results in micro-sandwich panels with high interlaminar strength. In parallel to the evaluation of the material properties, a method was developed, so that a shock in the foam core could be laminated.

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung und Zielsetzung</b>	<b>1</b>
1.1	Zielsetzung	3
<b>2</b>	<b>Stand der Technik</b>	<b>6</b>
2.1	Faserkunststoffverbundwerkstoffe	6
2.2	Sandwichbauweise	8
2.2.1	Dünne Schaumblattechnologie	12
2.3	Verarbeitung eines Sandwich	13
2.3.1	Harzinjektion	14
2.3.2	Prepregheipressen	17
2.3.3	Harzinfusion	18
2.4	Vergleich der Verfahren	20
2.5	Werkstoffprüfung	24
<b>3</b>	<b>Strategisches Controlling und Entscheidungskriterien</b>	<b>26</b>
3.1	Methoden der Entscheidungsfindung	28
3.1.1	Paarvergleichsmatrix	28
3.1.2	SWOT-Analyse	29
<b>4</b>	<b>Maschinen und verwendete Materialien</b>	<b>32</b>
4.1	Maschinen für das Verfahren Prepregpressen	33
4.1.1	Hydraulikpresse und Formwerkzeug	33
4.1.2	Doppelbandpresse	32
4.2	Maschinen für das Verfahren Vakuuminfusion	34
4.2.1	CNC-Cutter	35

4.3	Maschinen für das Verfahren RTM .....	36
4.3.1	Injektionsanlage und Hydraulikpresse .....	36
4.4	Maschinen für die Werkstoffprüfung.....	36
4.5	Materialien.....	37
4.5.1	Kernmaterial .....	37
4.5.2	Textile Halbzeuge und Matrixsysteme .....	38
<b>5</b>	<b>Ergebnisse und Diskussion .....</b>	<b>39</b>
5.1	Stoßkaschierung im Kernmaterial .....	39
5.2	Vergleich der Verfahren .....	42
5.2.1	Dichtevergleich .....	43
5.2.2	Spezifischer Steifigkeitsvergleich.....	46
5.2.3	Spezifische Biegefestigkeitsvergleich .....	50
5.2.4	Interlaminarer Festigkeitsvergleich .....	55
5.3	SWOT-Analyse .....	61
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>64</b>
<b>7</b>	<b>Verwendete Symbole und Abkürzungen.....</b>	<b>66</b>
7.1	Symbole .....	66
7.2	Abkürzungen .....	66
<b>8</b>	<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>68</b>
<b>9</b>	<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>71</b>
<b>10</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>72</b>
<b>11</b>	<b>Literatur.....</b>	<b>75</b>

## 1 Einleitung und Zielsetzung

Steigende Anforderungen der Automobilindustrie bezüglich Gewichtsreduktion durch Materialeinsparung und des damit verbundenen geringeren Kraftstoffverbrauchs treiben den Einsatz von Verbundwerkstoffen voran. Ein Verbundwerkstoff besteht zumindest aus zwei unterschiedlichen Werkstoffen und ist den Eigenschaften der verwendeten Komponenten überlegen. Eine besondere Stellung nehmen Faser-Kunststoff-Verbunde (FKV) ein, welche bestehende Strukturanwendungen aus Metall nach und nach ersetzen. Waren diese Werkstoffe bis zur Jahrtausendwende hauptsächlich für Bereiche der Luft- und Raumfahrt sowie diversen Sportartikeln (Golf- und Tennisschläger) von Interesse, so begegnet man ihnen nun auch vermehrt im Straßenverkehr. Ein Unterschied bisheriger Anwendungen von FKV und der möglichen Automobilanwendungen ist die Seriengröße. Bis heute gibt es keine vollautomatisierte Fertigung von FKV-Bauteilen. Dies ist, neben den teuren Textilmaterialien, ein Grund, weshalb Bauteile aus FKV so kostenintensiv sind. Damit diese Hochleistungswerkstoffe in der Automobilbranche Fuß fassen können, stehen Verfahrenstechniker vor der Herausforderung, den Personalaufwand bei der FKV-Verarbeitung durch neue Verarbeitungskonzepte zu minimieren [1, 2].

Ein Vorteil den FKV im Gegensatz zu Stahl mit sich bringen ist ihr hohes Leichtbaupotenzial. Dies macht man sich bereits seit 1957 zu Nutzen und baut seither Windkraftrotorblätter aus glasfaserverstärkten Kunststoffen (GFK). Weiters können Bauteile aus FKV anwendungsgerecht ausgelegt werden, indem die Fasern in Richtung der wirkenden Kraft orientiert werden. Wird ein Bauteil in erster Linie auf Biegung beansprucht kommen Sandwichbauformen zur Anwendung. Die Idee dahinter ist, dass nur die Decklagen (welche die biegesteife Komponente des Sandwiches darstellt, z.B. Carbon) vorherrschende Biegemomente aufnehmen. Auch wenn die geschaffenen Bauteile, die in Sandwichbauweise gefertigt werden, noch höheres Leichtbaupotenzial mit sich bringen, müssen vorweg einige Rahmenbedingungen im Sinne der Verarbeitbarkeit dieser Materialien geschaffen werden. Ob der Schaumkern beim Verwenden eines Harzes, welches exotherm

aushärtet, diesen Temperaturen standhält, ist nur eine bedeutsame Fragestellung, mit der sich Ingenieure bei der Verarbeitung von Sandwichmaterialien befassen müssen. Bevor eine neue Materialkombination nicht in einem stabilen Verarbeitungsprozess verarbeitet werden kann, wird für Serienbauteile weiterhin auf konventionelle Materialien zurückgegriffen. Somit ist es Teil der Materialentwicklung aufzuzeigen, wie sich die Materialien im Prozess verhalten und wo die Schwierigkeiten liegen [3].

Aus diesem Grund erfolgt vor Markteintritt ein Verarbeitungsscreening, wodurch das neue Material besser vermarktet und dem Abnehmer eine reibungslose Prozessführung angeboten werden kann.

Die Literatur liefert einige Vor- und Nachteile von Standardsandwichstrukturen [4, 5], bei welchen das Kernmaterial nur dazu dient einen Abstand der Decklagen zu generieren. Recherchearbeiten haben ergeben, dass über die Verarbeitung von Mikrosandwichmaterialien kaum Forschung betrieben worden ist. Aufgrund neuer Marktpotenziale dieser Mikrosandwichstrukturen ist es erforderlich die Wissenschaft in diesem Bereich voran zu treiben.

## 1.1 Zielsetzung

Bevor ein Bauteil aus einem neuen Material gefertigt wird, ist zu evaluieren welches Verfahren sich am besten eignet. Es ist sinnvoll ein Bewertungsschema aufzustellen, das die Verfahren gegenüberstellt. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Verarbeitbarkeit eines Mikrosandwiches analysiert. Es werden Sandwichplatten durch die Verfahren Vacuum Assisted Resin Infusion (VARI), Resin Transfer Molding (RTM) und Prepregheipressen hergestellt. Um eine Bewertung der Herstellungsmethoden anstellen zu können, bieten sich Prüfungen der Werkstoffeigenschaften an. Die Ergebnisse der Werkstoffprüfungen werden im direkten Vergleich gegenübergestellt und eine Rangfolge der Verfahren/ bzw. Verfahrenseinstellungen aufgestellt. Solch ein paarweiser Vergleich wird für die Bewertungskategorien: **Dichte, spez. Biegefestigkeit, spez. Steifigkeit und interlaminaire Festigkeit** gemacht. Der Kunde kann unter Berücksichtigung des Lastenheftes für ein Bauteil die Rangfolgen nutzen um sich für ein Verfahren zu entscheiden.

Parallel zur Verarbeitung der Kernverbunde, wird ein Verfahren entwickelt, wodurch eine Stoverbindung zwischen zwei Kernmaterialien hergestellt werden kann. Schaumwerkstoffe aus Polymeren werden in definierter Breite produziert. Je nach geforderter Sandwichbreite, müssen in manchen Fllen geometriebedingt Schaumblätter verbunden werden. Die Verbindungsstelle hat zwei Kriterien zu erfüllen:

- Die Verbindungsstelle darf im fertigen Sandwichverbund optisch nicht sichtbar sein.
- Die mechanische Performance in der Verbindungsstelle muss den Kundenanforderungen genügen.

Dieses Verarbeitungsscreening soll das Mikrosandwich für neue Marktbereiche interessant machen. Durch die Substitution von Voll-Laminaten durch ein Mikrosandwich wird nicht nur teures CF (Kohlenstofffasern) -Material gespart, sondern auch Gewicht. Welche Punkte untersucht wurden um das Ziel einer Bewertung der Verfahren zu erreichen, zeigt Abbildung 1.

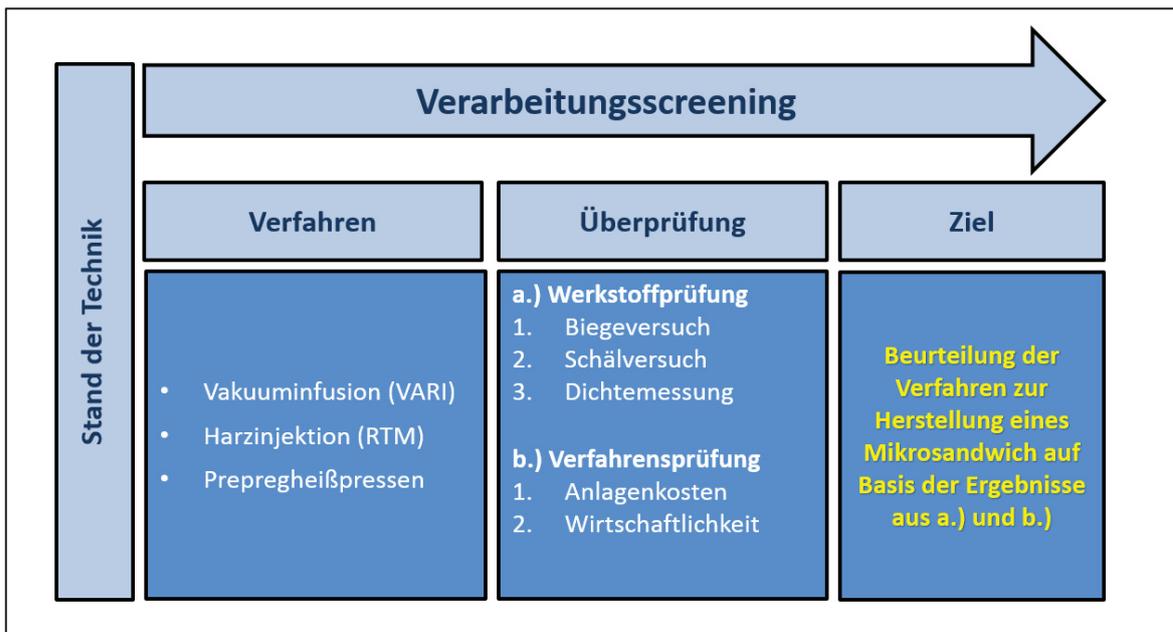


Abbildung 1: Flussdiagramm des behandelten Themas, welches die notwendigen Schritte zeigt um die Herstellungsverfahren beurteilen zu können.

Der Prozess des Verarbeitungsscreenings gliedert sich demnach in folgende Punkte:

- Stand der Technik

Der Stand der Technik dient dazu ein ausreichendes Verständnis aufzubauen um diese Arbeit zu verstehen. Neben den Herstellungsverfahren zur Sandwichverarbeitung, welche im anschließenden experimentellen Teil verwendet werden, wird auf die verwendeten textilen Halbzeuge eingegangen. Des Weiteren wird das Bewertungsmodell vorgestellt auf Basis dessen die Sandwichherstellungsverfahren in Bezug auf wirtschaftlicher und mechanischer Funktionalität beurteilt werden.

- Verfahren

Um dem Kunden eine gute Verarbeitbarkeit zu ermöglichen, wurden drei Verfahren untersucht. Hierbei wurde in erster Linie nach geeigneten Einstellungen der Prozessgrößen gesucht, um eine zufriedenstellende Qualität der Kernverbunde zu erreichen. Weiteres wurde nach einer Verbindungstechnik gesucht um zwei Schaumblätter miteinander zu verbinden. Die Verbindungsstelle sollte im gefertigten Sandwich optisch nicht sichtbar sein.

- Überprüfung

Um eine qualitative Beurteilung der Verfahren zu ermöglichen, wurden Werkstoffprüfungen durchgeführt. Die Beurteilung macht es für den Kunden einfacher, sich für ein bestimmtes Produkt zu entscheiden. Im Rahmen dieser Arbeit wurden hierfür Biegeprüfungen und Schälversuche durchgeführt. Außerdem wurde die Dichte der hergestellten Platten gemessen.

- Ziel

Anhand der experimentellen Untersuchungen wurde ein Verarbeitungsscreening für das Sandwichmaterial durchgeführt. Ein paarweiser Vergleich wird für die Bewertungskategorien Dichte, Steifigkeit, Biegefestigkeit und Schälfestigkeit durchgeführt. Hierfür werden die gemessenen Werkstoffeigenschaften der Sandwichpanele gegenübergestellt und diskutiert. Um die Funktionalität der Verfahren noch deutlicher zu erfassen wird für jedes Verfahren eine SWOT-Analyse (Stärken-Schwächen Analyse) gemacht. Die umfassende Analyse der Verfahren bzw. der Verfahrenseinstellungen durch die Dominanzmatrizen und die SWOT-Analyse ist das Ergebnis dieser Diplomarbeit.

## 2 Stand der Technik

Im folgenden Kapitel werden die Grundlagen der Kernverbundbauweise und der FKV-Werkstoffe aufgearbeitet. Des Weiteren wird die Prozessführung der Verfahren zur Herstellung von Sandwichkonstruktionen erörtert. Speziell wird auf die Verfahren VARI, RTM und Prepreg, da diese im experimentellen Teil verwendet werden, eingegangen.

### 2.1 Faserkunststoffverbundwerkstoffe

Der Anwendungsbereich von FKV erstreckt sich von einfachen Konstruktionen bis hin zu Hochleistungsanwendungen in der Luft und Raumfahrt. Verbundwerkstoffe im Allgemeinen sind keine Neuentdeckung. Bereits in der Steinzeit wurden im Bereich des Bauwesens Verbundwerkstoffe verwendet. Damalige Hütten wurden aus Lehm erbaut, was einer Kombination aus Ton und Sand entspricht. Oftmals wurde dem Baumaterial Stroh beigefügt um die Dämmeigenschaften zu verbessern. Ein Faserverbund der aus der Natur bekannt ist, ist beispielsweise der Knochenaufbau von Krebstieren. Dieser besteht aus Chitin, Proteinen, Lipiden und diversen Einlagerungen, wobei diese Kombination biomechanisch aus Faserverbundwerkstoff angesehen wird [6, 7].

Gängige FKV werden durch die Kombination von Fasern und Harz gebildet. Hierbei dienen Fasern der Kraftübertragung und mechanischen Beständigkeit des Bauteiles. Das Harz hat die Aufgabe den Werkstoff vor äußeren Einflüssen wie Chemikalien, Temperatur oder Korrosion zu schützen. Die größte Bedeutung haben heute auf dem Markt die Glas-, Aramid- und Kohlenstofffasern gewonnen, welche meist als Gewebe oder Gelege weiterverarbeitet werden. Gewebe sind Textilien, die aus rechtwinklig verkreuzenden Fäden zweier Fadensysteme gebildet werden. Die Fäden in Längsrichtung werden als Kett- und die Quersfäden als Schussfäden bezeichnet. Eigenschaften wie die Drapierbarkeit, das Imprägnierverhalten und die Festigkeit sind von der Webart abhängig. Gängige Gewebearten sind: Leinwand, Köper und Atlas. Liegt das Textil ohne Ondulationen vor werden die einzelnen Faserstränge durch Nähfäden zusammengehalten und es wird von einem Gelege gesprochen [1, 8].

Das trockene Textil wird, um es zu fixieren und vor äußeren Einflüssen zu schützen, in der Matrix eingebettet. Auftretende Kräfte werden über die Matrix auf die Faser übertragen. Es werden Duromere oder Thermoplaste als Matrix eingesetzt. Thermoplaste haben, unter anderem, den Vorteil, dass sie durch Thermoformen verarbeitet werden können. Das heißt, dass der Werkstoff durch Erhitzen wieder formbar gemacht werden kann. Als Nachteil ist jedoch auf die hohe Kriechneigung sowie die schwierige Faserimprägnierung hinzuweisen. Zu den Vertretern duromerer Matrixsysteme zählen Epoxidharze (EP). Unter Zuführen eines meist flüssigen Härters reagieren Epoxidharze durch Polyaddition und können je nach Aushärtebedingungen eine Dauergebrauchstemperatur von bis zu 200°C standhalten [9]. EP-Harze sind, aufgrund ihrer sehr guten Haftung auf den meisten Substraten und der mechanischen und insbesondere dynamischen Eigenschaften, prädestiniert für den Schutz der Fasern. Dennoch werden EP-Harze hauptsächlich für Hochleistungsanwendungen verwendet, da sie ca. drei- bis viermal so teuer sind wie z.B. ungesättigte Polyesterharze. Es sei darauf hingewiesen, dass bei Verwendung von Epoxidharzen auf eine geeignete Schutzausrüstung (Handschuhe, Labormantel) zu achten ist. Der hochreaktive Härter kann bei Hautkontakt allergische Reaktionen hervorrufen [9, 10].

Die Nutzung von vorimprägnierten Faserhalbzeugen, sogenannten Prepregs (preimpregnated), verspricht, aufgrund der Trennung zwischen Imprägnierung der Fasern und der Aushärtung in einem eigenen Prozessschritt, kurze Zykluszeiten. Die Prepregs werden auf speziellen Anlagen kontinuierlich als Rollenware hergestellt. Aufgrund des bereits imprägnierten Halbzeuges resultieren eine Reihe an Vorteilen. Neben der anwendungsgerechten Anpassung des Faservolumengehaltes und der einfacheren Handhabung im Gegensatz zu trockenem Gewebe, stellt die Imprägnierung während des Prozesses keine Herausforderung mehr dar. Um Vernetzungsreaktionen zu minimieren werden Prepregs kalt (ca. -18°C) aufbewahrt. Dennoch ist die Lagerung nur eine begrenzte Zeit lang möglich [11].

## 2.2 Sandwichbauweise

Ein Verbundwerkstoff, der aus hochsteifen und -festen Deckschichten zusammengesetzt ist, welche mit einem schubsteifen Kern verbunden sind, wird als Sandwich bezeichnet. Deckschichten und Kernschicht werden, wie in Abbildung 2, schubfest miteinander verbunden, um ein leistungsfähiges, lasttragendes Element zu bilden [12].

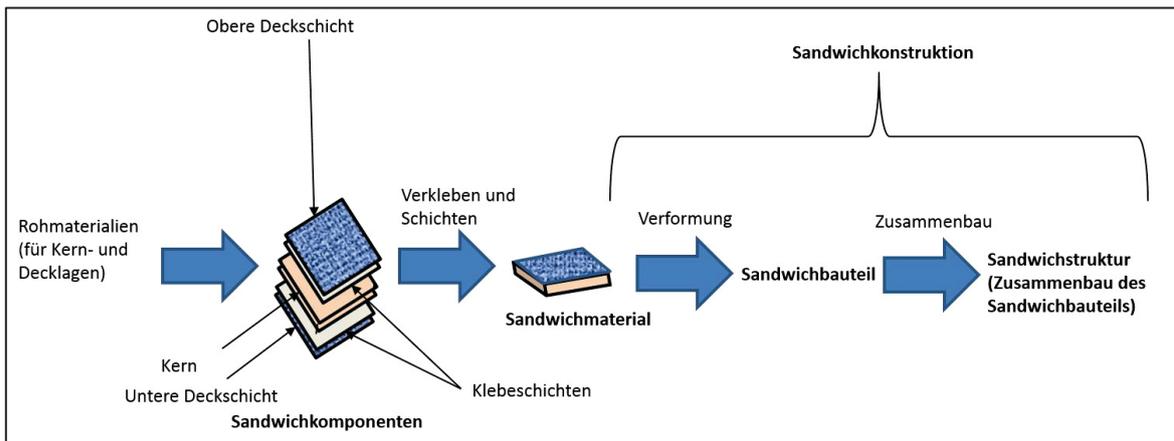


Abbildung 2: Bestandteile eines Sandwich und chronologischer Ablauf bis zu der fertigen Struktur nach [13].

Wie in Abbildung 3 ersichtlich ist, tragen die Deckschichten Biegemomente als Zug- und Druckbeanspruchungen in Längsrichtung, während die Kernschicht Querkräfte als Scherbeanspruchung aufnimmt.

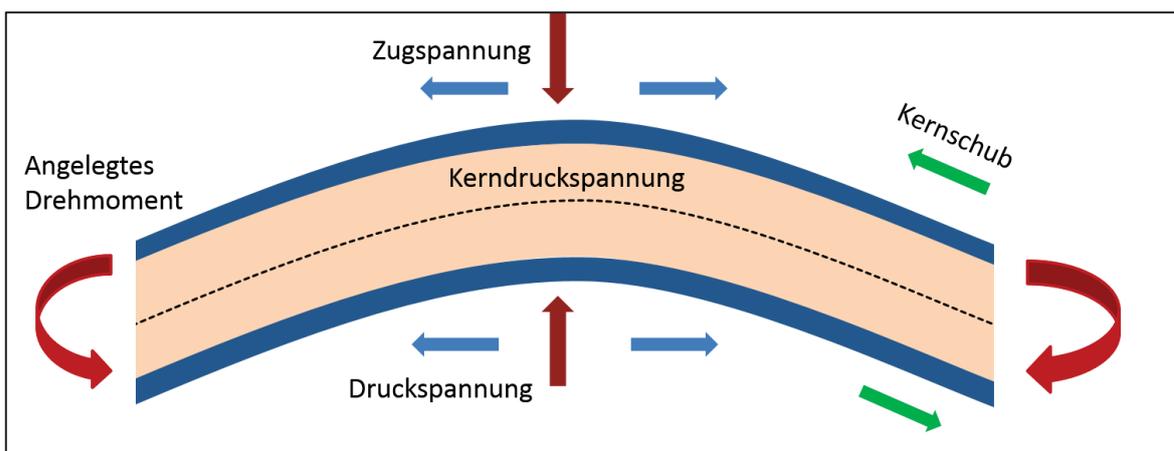


Abbildung 3: Auftretende Kräfte in einem Balken unter Biegebelastung nach [12].

Die Biegesteifigkeit von flächigen und biegebeanspruchten Bauteile verbessert sich, wie Abbildung 4 zeigt, mit steigender Querschnittshöhe kontinuierlich.

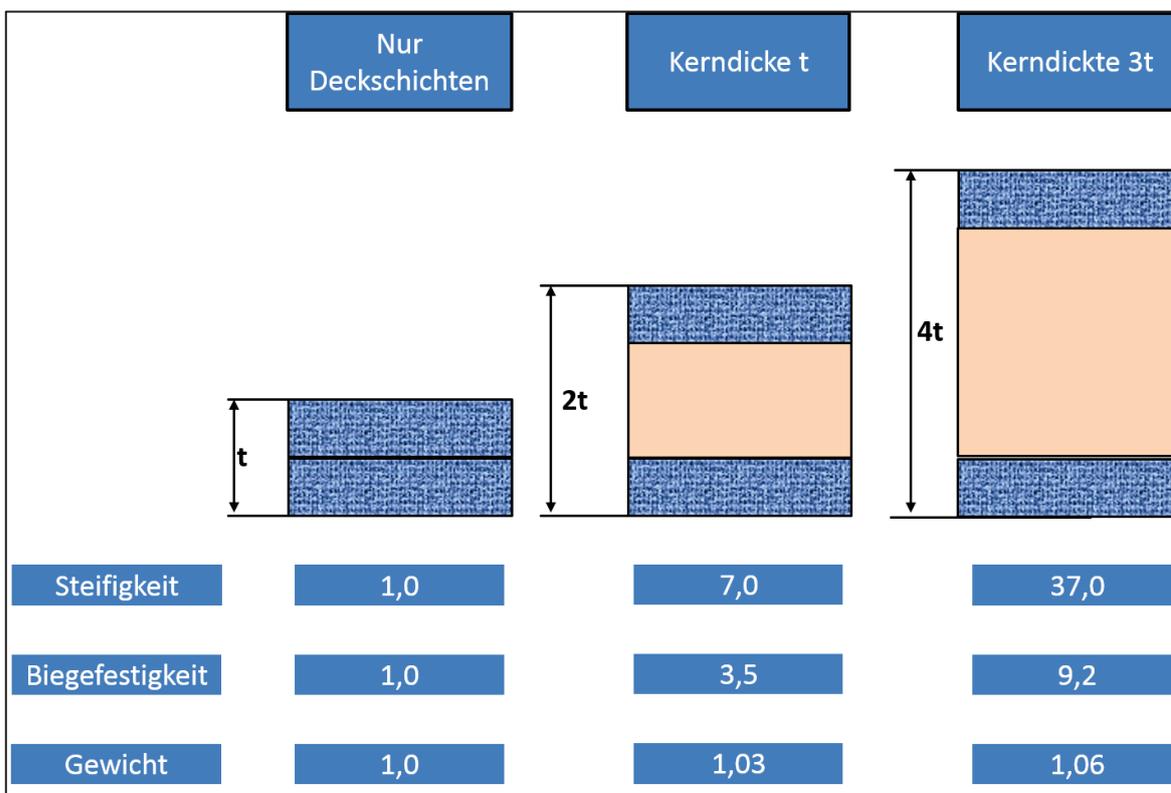


Abbildung 4: Die relative Steifigkeit und das Gewicht von Sandwichpaneelen im Vergleich zur massiven Bauweisen [14].

Eine Verdopplung der Dicke bedeutet eine siebenmal höhere Steifigkeit. Wird die zusätzliche Dicke durch einen Schaumkern erreicht erhöht sich das Gewicht um nur 3%.

Durch konstruktive Maßnahmen können mehrere Eigenschaften wie hohe Steifigkeit, geringes Gewicht, Wärme- und Schalldämmung, Schlag und Splitterschutz, Brand- und Feuerschutz kombiniert werden [11, 15].

Vorteile von Kernverbundstrukturen sind [4, 5]:

- Hohe Steifigkeiten im Verhältnis zum Gewicht
- Hohe Festigkeiten im Verhältnis zum Gewicht
- Kontinuierliche Verteilung der Steifigkeit
- Verstärkungen und Lasteinleitungsbereiche können integriert und individuell angepasst werden

- Hohe Energieabsorptionsfähigkeit
- Reduzierung der Oberflächenkomplexität und Vermeidung von hervorstehenden Versteifungselementen

Folgende Nachteile sind bei der Sandwichbauweise zu beachten [4, 5]:

- Unausgereifte Fertigungsmethoden
- Mangel an einfachen Reparaturmöglichkeiten
- Geringes Wissen im Bereich Schadensauswirkung und Mangel an validierten Simulationsmethoden

Eine bedeutsame Eigenschaft der Deckschichten im Verbund ist es, Zug- und Druckbelastungen standzuhalten, während die Kernschicht entsprechenden Scherbelastungen und Querkräften entgegenwirkt. Die Deckschichten werden in metallische (z.B. Stahl, Edelstahl und Aluminiumlegierungen) und in nichtmetallische Werkstoffe (z.B. Zement, Sperrholz, verstärkte Kunststoffe und Faserverbundwerkstoffe) eingeteilt.

Wichtige Eigenschaften der Deckschichten sind [5]:

- Hohe Steifigkeit (E-Modul)
- Hohe Beanspruchbarkeit auf Zug und Druck
- Schlagfestigkeit
- Hohe Oberflächengüte
- Widerstand gegen Umwelteinflüsse (Hitze, Chemikalien, usw.)
- Verschleißfestigkeit

Kernformen lassen sich in die drei Gruppen aus Abbildung 5 einteilen [4]:

- Formkerne (**gewellter** Trapezprofil-Formkern)
- Zellenkerne (**wabenartige** hexagonale Wabenzellen)
- **Kontinuierliche Kerne** (meist Schäume)

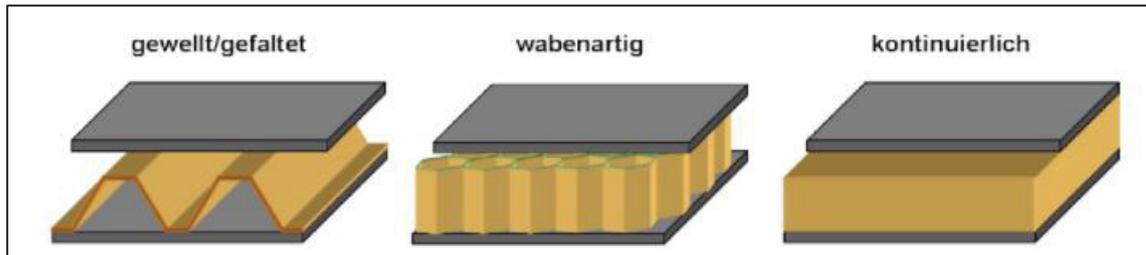


Abbildung 5: Darstellung der unterschiedlichen Kernformen eines Sandwiches [4].

Als Werkstoffe werden überwiegend verwendet [5]:

- Aluminium- und Stahllegierungen
- Papiersorten
- Hölzer (hauptsächlich Balsaholz)
- Kunststoffe

Am häufigsten werden Schaumstoffgefüge als Kernmaterial verwendet. Diese Schäume zeigen, zumindest makroskopisch betrachtet, isotropes Materialverhalten. Der Schaumwerkstoff kann offenporig, geschlossenporig oder in einer Mischform vorliegen. Häufig verwendete Materialien für Schaumkerne sind Polyurethan (PUR), Polystyrol (PS), Polyethylen (PE), Polyvinylchlorid (PVC) und Polymethacrylimid (PMI). Diese werden als Blockware z.B. durch thermisches Schäumen produziert [16, 17].

Neben einer ausreichenden Schubsteifigkeit der Kerne sind Eigenschaften von Interesse wie [5]:

- Niedrige Dichte
- Hoher Schubmodul
- Hohe Scherfestigkeit
- Steifigkeit senkrecht zu den Deckschichten
- Gute thermische Isolierung

Bei der Auslegung einer Sandwichkonstruktion muss außerdem die interlaminare Festigkeit beachtet werden. Im Verbindungsbereich (zwischen Kern- und Deckschicht), ist die bilaterale Verträglichkeit der Stoffe ein wichtiges Kriterium. Um dem Leichtbaugedanken der Sandwichbauweise nicht entgegenzuwirken, werden häufig Klebeverbindungen, wie jene aus Tabelle 1, eingesetzt. Auftretende Lasten

verteilen sich auf eine größere Fläche, als z.B. bei einer Nietverbindung. Kleben als Fügetechnik hat jedoch den Nachteil, dass sich Komponenten so einfach austauschen oder reparieren lassen. Neue Reibschweißelemente, die mit Hilfe hoher Reibung durch die Decklagen dringen und mit dem Kernmaterial verschmelzen, sind ein Beispiel für punktförmiges Fügen und Fokus aktueller Forschungsarbeiten [18].

Tabelle 1: In Sandwichbauweise eingesetzte Klebeverbindungen [5].

<b>Klebstoff</b>	<b>Eigenschaft</b>	<b>Anwendung</b>
Epoxidharze	Hohe Schubfestigkeit	Schaumstoff
Phenolharze	Hohe Festigkeit	Wabenkern
Polyurethanharze	Hohe Haftfähigkeit	Schaumstoff und Balsa
Urethanacrylate	Hohe Zähigkeit	Schaumstoff
Polyesterharze	Hohe Schubfestigkeit	Schaumstoff und Balsa

### **2.2.1 Dünne Schaumblatttechnologie**

In einem innovativen Verfahren stellt die Firma 4a manufacturing GmbH aus Schaumblöcken dünne Schaumblätter her. Diese Blätter, die unter dem Handelsnamen „MILLIFOAM“ bekannt sind, werden in einer Dicke zwischen 0,50 und 3,00 mm gefertigt und halten Temperaturen bis zu 220 °C stand. Die äußerst enge Dickentoleranz der Millifoam-Produkte ist in Abbildung 6 zu erkennen wodurch sich neue Anwendungen der Mikrosandwichbauweise ergeben [20].

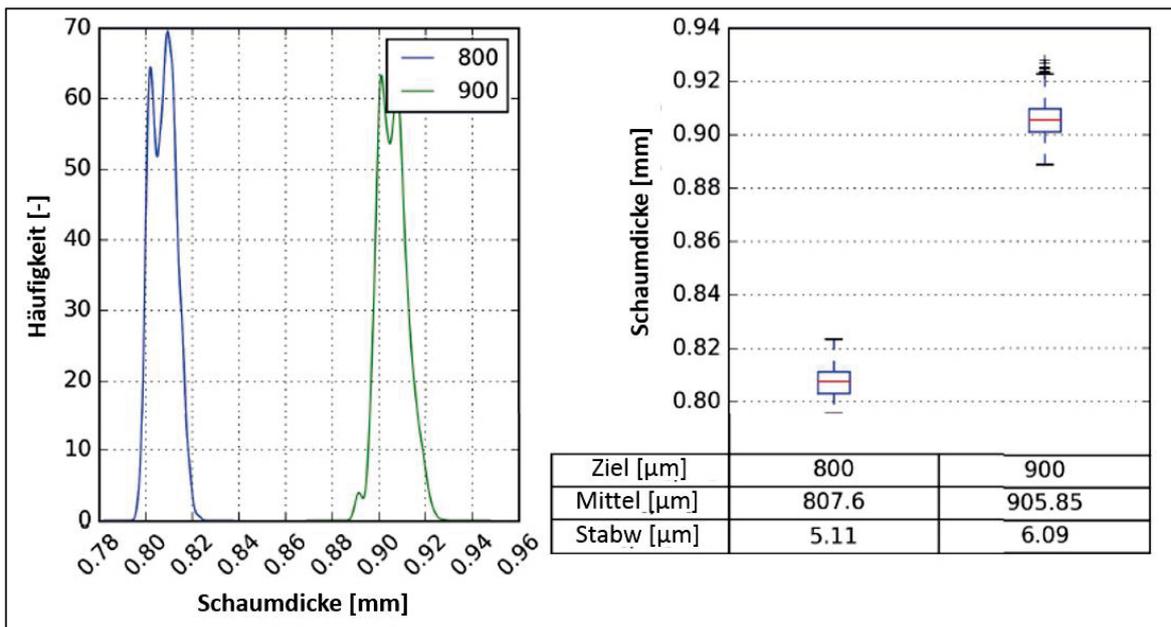


Abbildung 6: Erreichbare Toleranzen beim Konfektionieren der Schaumblöcke durch das Verfahren der 4a manufacturing GmbH [19]

### Die Vorteile der Millifoam-Technologie sind [19]:

- Staubfreie Oberfläche der Schaumblätter
- Geringer Ressourcenverbrauch im Gegensatz zu der Voll-CFK-Bauweise
- Enge Fertigungstoleranzen und dadurch:
  - Verbesserung der Oberfläche von dünnen Sandwichmaterialien gegenüber der Verwendung klassischer Wabenkerne und dadurch ergeben sich potentielle Anwendung des Sandwiches in Außenanwendungen
  - Möglichkeit einzelne CFK oder GFK Lagen durch Schaum zu ersetzen

## 2.3 Verarbeitung eines Sandwich

Bei der Herstellung von Sandwichbauteilen mit CFK-Deckschichten ist die Verbindung der einzelnen Lagen von zentraler Bedeutung. Neben der interlaminaren Verbindung sind das Tränken der Faserhalbzeuge, sofern kein Prepreg verarbeitet wird, die Formgebung unter Über- oder Unterdruck und die Aushärtung Teil der Prozessroutine. Es stehen eine Reihe an Verfahren zur Verfügung, wobei Entwicklungsingenieure zu entscheiden haben, welches das Anforderungsprofil bestmöglich erfüllt und auch aus wirtschaftlicher Sicht sinnvoll

ist. Im Folgenden werden die Verfahren die zur Fertigung der Mikrosandwichstrukturen verwendet werden erläutert.

### **2.3.1 Harzinjektion**

Um Sandwichwerkstoffe mit Schaumkern und Faserverbundkunststoffe als Decklagen einzusetzen, bedarf es geeigneter, großserientauglicher Prozesse. In erster Linie bedeutet dies Verarbeitungsprozesse mit hohem Automatisierungsgrad und niedrigen Zykluszeiten zu finden. Neben den Prozessparametern (Temperatur, Druck und Zeit) spielt die Anbindung der Decklagen an den Schaumkern eine Rolle. Die adhäsive Haftung des Epoxidharzes an den Schaumkern wird durch Schälversuche überprüft. Um eine möglichst gute Verbindung der Schichten zu erreichen ist es einerseits sinnvoll den Druck möglichst hoch einzustellen. Andererseits führen zu hohe Drücke zum Kollabieren der Schaumkernzellen. Das so frei werdende Gas erzeugt eine erhöhte Porosität. Der getränkte Schaumkern wird durch das Harz unnötig schwer und erhöht somit das Gesamtgewicht des Bauteils. Auch bei der Temperatúrauswahl ist der Entwickler aufgrund des Kernmaterials limitiert. Während PMI laut Herstellerinformationen bis 180°C verarbeitet werden kann, stößt PET bereits bei 150°C an seine Grenzen [17, 20, 21].

Harzinjektionsverfahren bieten für die Herstellung von flächigen Bauteilen aus faserverstärkten Kunststoffen mit duromerer Matrix, kraftflussorientierten Verstärkungsfasern und eines hohen FVG großes Potential zur wirtschaftlichen Bauteilfertigung [1].

Zu den Injektionsverfahren zählen im Wesentlichen das RTM und das Vacuum Assisted RTM (VARTM). Laut [22] werden, um Sandwichbauteile in kürzerer Zeit durch VARTM fertigen zu können drei Varianten, in Abbildung 7 dargestellt, angewandt. Entweder wird eine hochpermeable Schicht auf der Sandwich-Decklage befestigt, oder es werden Perforationen/Rillen in das Kernmaterial eingebracht. Die permeablen Schichten sind vor der vollständigen Aushärtung von den Oberflächen des Sandwich zu entfernen. Dies ist nur auf der oberen Werkzeughälfte möglich. Die Fließhilfe der Unterseite beeinträchtigt die

Oberflächenqualität, verringert die mechanischen Kennwerte und die Lebenszeit der Sandwichstrukturen [22, 23].

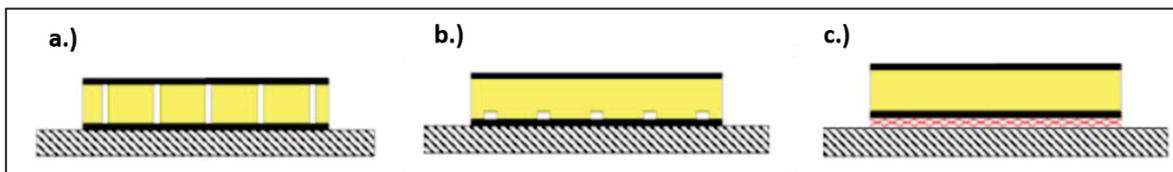


Abbildung 7: Harzzuführungskonzepte bei LCM-Verfahren; a.) Perforationen im Schaum, b.) Rillen im Schaum und c.) hochpermeable Schicht auf Werkzeugseite [4].

Truxel et al. [24] haben Rillen auf den Oberflächen des Kernmaterials eingebracht und berichteten über einen verbesserten adhäsiven Zusammenhalt zwischen Kern/Decklagen. Jedoch waren die produzierten Sandwichverbunde aufgrund des Harzes in den Rillen schwerer und die Herstellung aufgrund des zusätzlichen Prozessschrittes teurer. Jhan et al. [25] simulierten die Harzausbreitung in den gerillten Schaumkernen und überprüften die Ergebnisse experimentell auf deren Gültigkeit [24, 25].

May-Pat et al [26] verwendeten Perforationen im Schaumkern um den Harzfluss zu verbessern. Der Einfluss der Löcher auf das Gewicht, der Scherfestigkeit, sowie auf die interlaminaire Bruchzähigkeit wurde untersucht. Es wird von einem Gewichtszuwachs von 30% berichtet. Eine signifikante Verbesserung der Bruchzähigkeit wurde nicht festgestellt. Halimi et al. [23] untersuchten unterschiedliche Perforationsmuster an PVC-Schäumen. Die mechanischen Kennwerte der Sandwichpaneele mit Perforation wurden mit jenen (hergestellt durch das Aufbringen von Fließhilfen) ohne Perforation verglichen. Es wurde gezeigt, dass die interlaminaire Bruchzähigkeit durch die Perforationen zunimmt und die Füllzeit um 40% reduziert wird [23, 26].

Charakteristische Eigenschaften von Sandwichbauformen, hergestellt durch das RTM-Verfahren, sind [27]:

- Gute mechanische Eigenschaften
- Reproduzierbare Einstellung der Faserorientierung
- Gute Oberflächenqualität (Class-A möglich)

Unabhängig davon welches Injektionsverfahren verwendet wird, ist der prinzipielle Vorgang, schematisch in Abbildung 8, sehr ähnlich.

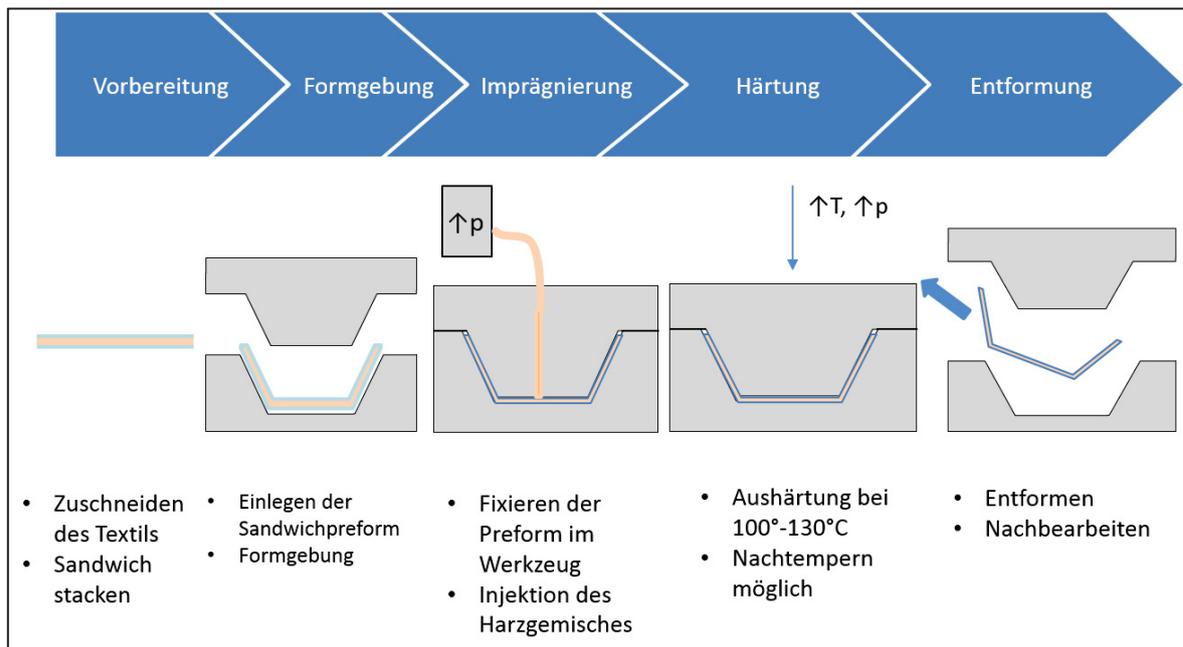


Abbildung 8: Schematischer Ablauf der Harzinjektion nach [27].

Zunächst wird das Halbzeug endkonturnah vorkonfektioniert und die Lagen in der bestimmten Reihenfolge gestapelt. Dieser Prozessschritt wird als Preforming bezeichnet und führt zu der sogenannten Preform. Um das Textil nicht zu beschädigen wird ein CNC-Cutter zur Hilfe genommen. Die Preform wird in die entsprechende Formhöhle eines verschließbaren, beheizten Werkzeuges eingelegt. Dieser Vorgang kann roboterunterstützt ausgeführt werden. Aufgrund des beheizten Werkzeuges reagiert das Matrixsystem aus und verfestigt. Anschließend wird die Werkzeugform geöffnet und das ausgehärtete Bauteil entformt. Die Entformung kann durch Auswerferstifte unterstützt werden oder vollautomatisch durch einen Roboter passieren. Je nach Prozessdesign kann eine Nachbearbeitung erforderlich sein [1, 20].

Die Imprägnierung der Preform beim RTM-Verfahren findet erst im Werkzeug statt. Die Matrix durchströmt das trockene Textil, was bei hohen FVG und langen Fließwegen zu hohen Fließwiderständen und langen Imprägnierungszeiten führt. Um festzustellen wie sich das Harz während der Injektion im Textil ausbreitet, wird großer Aufwand betrieben. Es werden Füllexperimente durchgeführt, um Erkenntnis

in Bezug auf die Durchlässigkeit des Textils gegenüber der Flüssigkeit zu gewinnen. [28].

Da es, um einen optimalen Kraftfluss im Bauteil zu erreichen üblich ist, Strukturbauteile nicht symmetrisch zu gestalten, weisen die verwendeten Halbzeuge häufig in Kett- und Schussrichtung unterschiedliche Durchlässigkeiten auf. Füllprobleme können aufgrund der Permeabilität in bestimmten Bereichen des Bauteils verursacht werden. Ist die Kompaktierung in einem Bereich gering resultiert daraus ein niedrigerer Faservolumengehalt. Daher ist die Durchlässigkeit an diesen Stellen hoch und es kommt zu einem Voreilen der Fließfront. Dieses Phänomen ist auch unter „Race-tracking“ bekannt und wird oft am Bauteilrandbereichen beobachtet. Bei ungünstigen Verhältnissen (Viskosität des Harz und Geometrie des Werkzeuges) kann das Voreilen der Fließfront zum Einschließen von Luft und so zu Trockenstellen führen [20].

Die Harzinjektion erlaubt die Fertigung von komplexen Geometrien mit engen Fertigungstoleranzen. Das Verfahren lässt sich zu einem hohen Grad Automatisieren und der Einsatz von schnell härtenden Harzsystemen lässt Zykluszeiten von 5 bis 10 Minuten zu [29].

### **2.3.2 Prepregheipressen**

Die Prozessroutine beim Prepregpressen ist, abgesehen vom bereits imprägnierten Halbzeug, ähnlich der beim RTM-Verfahren.

Laut [30] erfolgt die Aushärtung der Prepregs in zwei Stufen. Die Voraushärtung erfolgt im geschlossenen Werkzeug. Dadurch lassen sich Zykluszeiten von 120 Sekunden erreichen. Die vollständige Aushärtung erfolgt anschließend in einem für Strukturbauteile nachgeschalteten Lackierprozess. Pressverfahren sind neben der einfachen Prozessführung vor allem aufgrund des hohen Automatisierungsgrades beliebt. Durch eine hydraulische Oberkolben-Kurzhubpresse können hohe Stückzahlen realisiert und eine gute Reproduzierbarkeit erreicht werden. Der Ablauf eines Prepreg-Presszyklus ist in Abbildung 9 dargestellt [27, 29, 30].

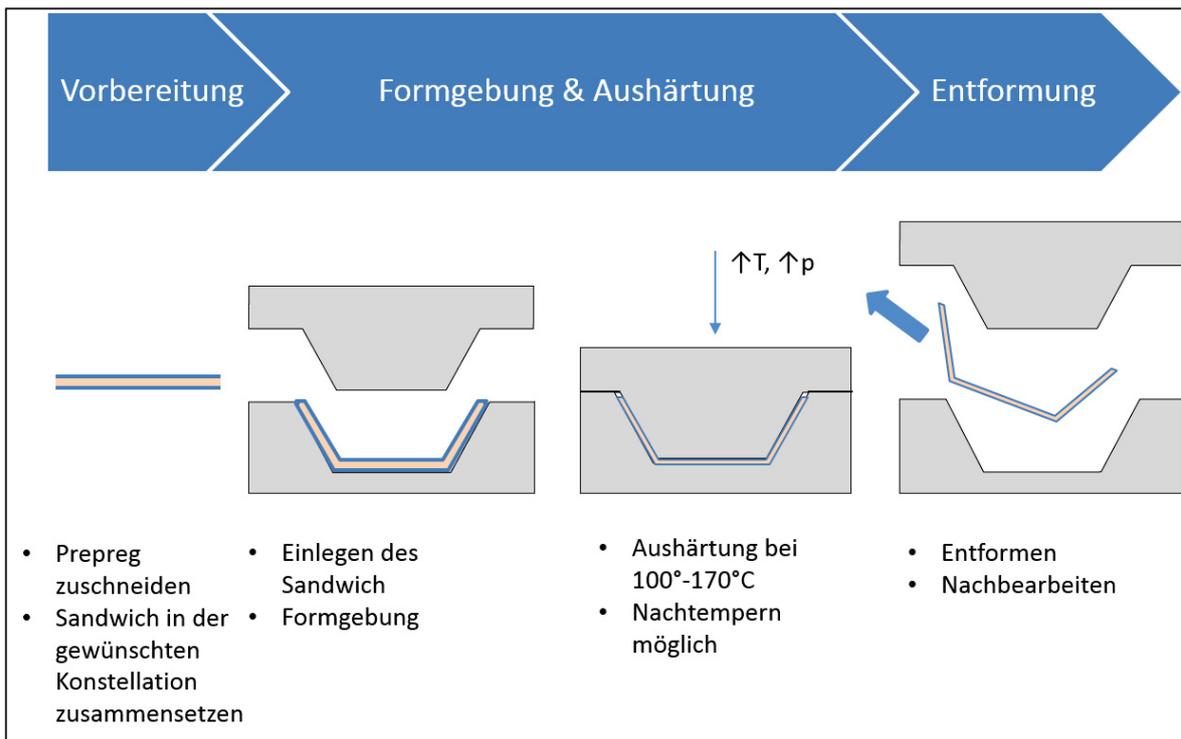


Abbildung 9: Schematischer Ablauf des Prepregpressens nach [27].

### 2.3.3 Harzinfusion

Dieses LCM-Verfahren mit offenem Formwerkzeug arbeitet mit Unterdruck, weshalb ein hermetischer Aufbau notwendig ist. Bei der Herstellung von Kernverbundstrukturen werden die Lagen gestapelt und in trockener Form in die Werkzeugkavität eingebracht. Um eine Harzausbreitung in axiale Richtung sicherzustellen, wird eine Fließhilfe verwendet. Ein Nachteil des Vakuuminfusionsverfahrens ist die Tatsache, dass nur die Bauteiloberfläche in Werkzeugrichtung als Sichtteil zu gebrauchen ist. Die minderwertige Oberfläche kann durch Schleifen aufgeraut werden. Nachdem diese Nachbearbeitung, neben dem zeitlichen Mehraufwand, aufgrund der Staubbelastung auch gesundheitliche Risiken mit sich bringt, kann alternativ ein Abreißgewebe verwendet werden. Dieses befindet sich zwischen dem Sandwich und der Fließhilfe. Das Abreißgewebe (z.B. aus Polyamid) geht mit dem eigentlichen Laminat nur eine schwache Verbindung ein und hinterlässt beim Entformen eine raue Oberfläche, die nicht mehr nachbehandelt werden muss. Die Komponenten werden mit einer Vakuumfolie abgedichtet. Damit die Kavität evakuiert werden kann wird eine Vakuumpumpe angebracht, mit deren Hilfe auch das Matrixsystem infiltriert wird. Die Utensilien zur

Durchführung einer Vakuuminfusion sind in Abbildung 10 zu sehen. Das Tacky-Tape hat die Aufgabe eine dichte Verbindung zwischen Vakuumfolie und Werkzeugkavität zu schaffen [1, 23, 31].

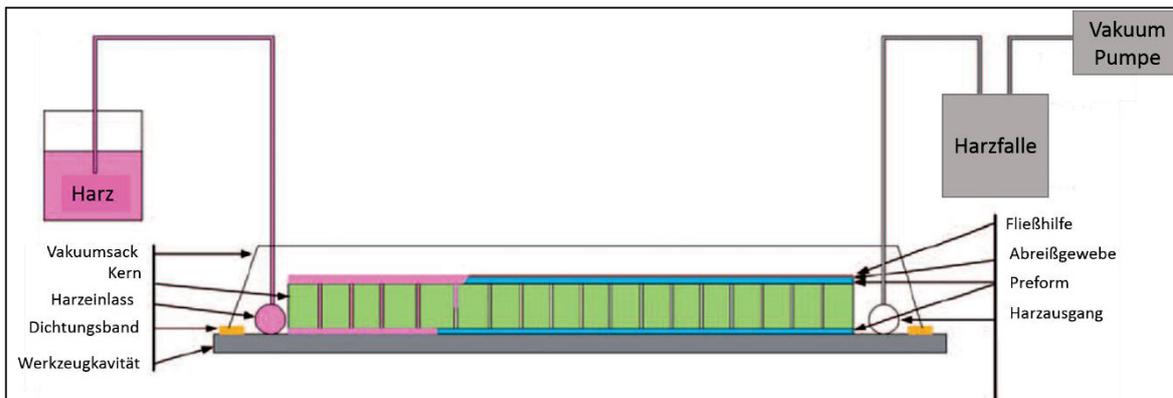


Abbildung 10: schematischer VARI-Aufbau zur Herstellung eines Sandwich und Benennung der Komponenten nach [23].

Das Einbringen von Perforationen [23, 26] oder Rillen [24, 25] sorgt für eine Imprägnierung in transversale Richtung und verringert die Zykluszeit.

Ein luftdichter Aufbau ist zeitaufwändig und verlangt einen erfahrenen Verarbeitungstechniker. Außerdem arbeitet das Verfahren mit geringen Druckunterschieden, wodurch auch die Infiltration langsam ist. Aus diesem Grund ist die vorgestellte Verarbeitungsmethode auf eine Seriengröße von ungefähr 2000 Stück pro Jahr begrenzt. Nichtsdestotrotz wird sie, aufgrund der geringen Investitionskosten, für kleine Serien sowie Prototypen verwendet [32].

## 2.4 Vergleich der Verfahren

Bevor ein neues Bauteil in die Fertigung geht muss geklärt werden, durch welches Verfahren die geforderten Produkteigenschaften erfüllen werden. Erfüllen mehrere Verfahren die Eigenschaften wird aufgrund wirtschaftlicher Punkte entschieden.

Pierre Zahlen [4] vergleicht, wie in Tabelle 2, bedeutsame Kriterien der Verfahren Harzinfusion und Harzinjektion relativ zur Prepreg/Autoklav-Technologie. Er beschreibt, warum ein Verfahren bei einem bestimmten Kriterium im Vergleich zur Prepregtechnik besser oder schlechter abschneidet.

Tabelle 2: Vergleich von LCM-Technologien relativ zu Prepreg/Autoklav-Technologie von [4].

Kriterium	Harzinfusion (offenes Formwerkzeug)	Delta zu Prepreg		Harzinjektion (geschlossenes Formwerkzeug)
Flexibilität bei Technologie- Einführung oder Änderung	Neutral – die Formwerk- zeugoberfläche als aerodynamische relevante Fläche bleibt unverändert. Bauteiländerungen werden über eine Anpassung der kostengünstigen, flexiblen Abdeckung realisiert (wie bei Prepreg-Technologie)	0	-	Geringe bis keine Flexibilität -Bauteiländerungen resultieren Direkt in einer Anpassung der Formwerkzeuge -Integration von Versteifungs- elementen kann enorme Erhöhung der Formwerkzeugkomplexität nach sich ziehen
Formwerk- zeugkosten	Neutral, da prinzipiell gleiches Formwerkzeug wie bei Prepregtechnologie	0	-	Höher, da geschlossenes Formwerkzeug mit mind. zwei Teilen
Vorbereitung Formwerk- zeug	Neutral, da prinzipiell gleiches Vorgehen wie bei Prepregtechnologie	0	-	Mehraufwand, da z.B. mehr Oberflächen mit Trennmittel versehen werden müssen
Handhabung/ Logistik Formwerk- zeug	Neutral, da prinzipiell gleiches Formwerkzeug wie bei Prepregtechnologie	0	-	-Komplexer, da schwereres Formwerkzeug mit mind. Zwei Teilen -Evtl. höhere Investitionskosten für Handhabung und Logistik, falls zusätzliche/stärkere Hebeapparaturen notwendig sind

Kriterium	Harzinfusion (offenes Formwerkzeug)	Delta zu Prepreg		Harzinjektion (geschlossenes Formwerkzeug)
Kosten für Faserhalb- zeug & Harz	Derzeit sind qualifizierte Materialien für Harzinfusion in Luftfahrtanwendungen nur begrenzt verfügbar. Qualifizierungskosten und dadurch entstehende „Exklusivität“ wird den Materialpreis anheben bzw. Konkurrenzsituation wird Prepregpreis senken. Daher Annahme: neutral gegenüber Prepreg	0	0	Derzeit sind qualifizierte Materialien für Harzinfusion in Luftfahrtanwendungen nur begrenzt verfügbar. Qualifizierungskosten und dadurch entstehende „Exklusivität“ wird den Materialpreis anheben bzw. Konkurrenzsituation wird Prepregpreis senken. Daher Annahme: neutral gegenüber Prepreg
Logistikkosten & Verarbeitungs- Bedingungen Faserhalb- Zeuge & Harz	-Geringere Logistikkosten, da Kühlkette nur für Harz einzuhalten (kompakte Gebinde, kleineres Kühlvolumen als beim Prepreg) -keine zeitliche Begrenzung beim Ablegen der trockenen Faserhalbzeuge -weniger strenge Klimaanforderungen möglich, da bei der Vorbereitung der Imprägnierung automatisch unter Vakuum getrocknet wird -weniger Berührungspunkte mit dem gesundheitsschädlichen Harz während der Verarbeitung	+	+	-Geringere Logistikkosten, da Kühlkette nur für Harz einzuhalten (kompakte Gebinde, kleineres Kühlvolumen als beim Prepreg) -keine zeitliche Begrenzung beim Ablegen der trockenen Faserhalbzeuge -weniger strenge Klimaanforderungen möglich, da bei der Vorbereitung der Imprägnierung automatisch unter Vakuum getrocknet wird -weniger Berührungspunkte mit dem gesundheitsschädlichen Harz während der Verarbeitung

Kriterium	Harzinfusion (offenes Formwerkzeug)	Delta zu Prepreg		Harzinjektion (geschlossenes Formwerkzeug)
Belegen/ Faserhalb- Zeuge einlegen	-Bessere Drapierbarkeit der Halbzeuge -Einlegen dicker Lagenpakete möglich, da bei geeignete Material keine Gefahr von Lufteinschachtelungen im trockenen Faserhalbzeug	+	+	-Bessere Drapierbarkeit der Halbzeuge -Einlegen dicker Lagenpakete möglich, da bei geeignete Material keine Gefahr von Lufteinschachtelungen im trockenen Faserhalbzeug
Formwerk- Zeug „schließen“ = Kavität herstellen	Neutral, da Einpackvorgang vergleichbar mit Prepregtechnologie	0	+	Einfacher/schneller bei geeigneten Handhabungsapparaturen (höhere Komplexität für Handhabungsapparaturen wurde bei Handhabung bereits berücksichtigt)
Harzbereit- stellung	Neutral, da nur geringe Kosten für Töpfe und Waagen	0	0/-	Tendenziell höhere Kosten, da Injektionsausrüstung notwendig. Inwieweit hier die Anschaffungs- und Instandhaltungskosten der Injektionsausrüstung durch die laufenden Hilfsstoffkosten bei Prepreg bzw. Infusionsverfahren aufgehoben werden, muss im konkreten Fall untersucht werden.
Aufheizen/ Aushärten	Energiebedarf bei gleicher Aufheizrate neutral, da thermische Masse des Formwerkzeuges ähnlich	0	-	Tendenziell mehr Energie bei gleicher Aufheizrate notwendig, da zu erwärmende/abkühlende thermische Gesamtmasse größer
Reinigen des Formwerk- zeugs	Neutral, da prinzipiell gleiches Vorgehen wie bei Prepreg- Technologie	0	-	Mehraufwand, da z.B. mehr Oberflächen gereinigt werden müssen.

Kriterium	Harzinfusion (offenes Formwerkzeug)	Delta zu Prepreg		Harzinjektion (geschlossenes Formwerkzeug)
Kosten für Infrastruktur Aufheizen/ Aushärten	Kein Autoklav notwendig – es kann bei Normalatmosphären im Kammerofen gearbeitet werden			Differenzen zu Prepreg/Autoklav- Technologien hängen von der verwendeten Pressentechnologie bzw. der Toolkomplexität ab. Ein in sich verschließbares Tool, bei dem Heiz- und Kühltechnik integriert sind, kann komplex und teuer werden. Unter Annahme einer Heizpressentechnologie mit austauschbarem nicht beheiztem Formwerkzeug wird eine positive Tendenz erwartet.
Entformen & Auspacken Des Bauteils	Neutral, da prinzipiell gleiches Vorgehen wie bei Prepregtechnologie			-Unter Annahme eines automatischen Öffnens entfällt das manuelle Entfernen der flexiblen Abdeckung -Tendenziell geringerer Hilfsstoffaufwand und daher weniger Auspackarbeit
Oberflächen- qualität	Neutral, prinzipiell wie bei Prepregtechnologie			Zusätzlich ist neben der aerodynamischen Außenfläche auch die Bauteilinnenseite von hoher Qualität
Dicken- und Positions- toleranzen	Neutral, prinzipiell wie bei Prepregtechnologie	0	+	Dicken- und Positionstoleranzen werden durch Werkzeugtoleranzen vorgegeben. -Geringere Dickentoleranzen -Geringe Positionstoleranzen Hinweis: Schrumpf muss berücksichtigt werden.
Innere Bauteilqualität - Luftein- schlüsse	Geringeres Risiko von Lufteinschlüssen, da poröses Faserhalbzeug vor der Infusion vollständig evakuiert werden kann.	+	+	Geringeres Risiko von Lufteinschlüssen, da poröses Faserhalbzeug vor der Infusion vollständig evakuiert werden kann. Mit Überdruck können Lufteinschlüsse verkleinert

Die Prepreg- und Autoklavtechnologie arbeiten mit einer Negativformhälfte. Der Prepregstapel wird in das Formnest drapiert und durch Vakuum wird die exakte Kontur des Werkzeuges erreicht. Anders als bei der Prepregheißpress-Technologie wo das Formnest, ähnlich dem RTM-Verfahren aus zwei Teilen besteht.

## 2.5 Werkstoffprüfung

Um Werkstoffe sinnvoll miteinander vergleichen zu können, müssen Materialkennwerte unter klar definierten Rahmenbedingungen ermittelt werden. Organisation wie die ISO (internationale Organisation für Normung) oder die ASTM (American Society for Testing Materials) haben es sich zur Aufgabe gemacht, klare Regeln zu formulieren unter denen ein bestimmter Werkstofftest stattzufinden hat. Wurde ein Material unter den vorausgesetzten Prüfbedingungen getestet, können Datenblätter erstellt werden. Dem Konstrukteur muss bei der Beurteilung der Werkstoffgrößen immer bewusst sein, dass es sich um keine universellen Materialkonstanten handelt. Bei den durchgeführten Prüfungen werden, trotz standardisierter Vorgehensweise, die Eigenschaften eines aus einem Werkstoff hergestellten Prüfkörpers in einem durch die Verarbeitung bedingten Zustand unter den im Prüfverfahren vorherrschenden Belastungsbedingungen gemessen. Die Übertragbarkeit auf Bauteile anderer Geometrien ist daher nicht zwangsläufig gewährleistet. Nichtsdestotrotz ist es durch universelle Materialdatenbanken wie z.B. die CAMPUS (**C**omputer **A**ided **M**aterial **P**reselection by **U**niform **S**tandards) erheblich einfacher eine Werkstoffauswahl vorzunehmen. Werkstoffprüfungen sind nicht nur für die Markteinführung neuer Materialien von Interesse, sondern auch für Qualitätssicherung bzw. Qualitätskontrolle indem während, vor und nach der Produktion geprüft wird [33].

Der Begriff „Werkstoff nach Maß“ prägt die Kunststoffbranche. Ständig werden neue Materialien kombiniert und dadurch bessere Eigenschaften erzielt. Für einige Verbundwerkstoffkombinationen wurden bereits eigene Prüfmethode formuliert. Einige Tests für Sandwichbauformen sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

Tabelle 3: Übersicht der standardisierten Prüfverfahren für Sandwichkonstruktionen.

<b>Prüfverfahren</b>	<b>Erkenntnis</b>	<b>Prüfnorm</b>
<b>Dreipunktbiegung</b>	Biegefestigkeit, Biegemodul	<b>ASTM C393-00 [34]</b>
<b>Dreipunktbiegung</b>	Interlaminare Scherfestigkeit	<b>ASTM C 273 [35]</b>
<b>Schälversuch</b>	Energiefreisetzungsrate	<b>ASTM D5528 [36]</b>
<b>Dichtemessung</b>	Kerndichte	<b>ASTM C271 [37]</b>
<b>Druckversuch</b>	Druckfestigkeit, Druckmodul	<b>ASTM D 5467 [38]</b>
<b>Zugversuch</b>	Zugfestigkeit, Zugmodul	<b>ASTM C 297 [39]</b>

### 3 Strategisches Controlling und Entscheidungskriterien

Das übergeordnete Ziel eines Unternehmens ist es, im ständigen Wettbewerb mit anderen Unternehmen, die Bedürfnisse der Kunden zu erfüllen und diese nicht zu verlieren. Nur so ist es dem Unternehmen möglich auch in Zukunft bestehen zu können und weiterhin Erfolge zu erzielen. Um Gefahren für dieses Ziel vorzeitig erkennen und somit Gegenmaßnahmen einleiten zu können, wendet das strategische Controlling unterschiedliche Methoden an, welchen allen dasselbe übergeordnete Ziel der langfristigen Wertsteigerung des Unternehmens zugrunde liegt. Das Aufgabenfeld des Controllings umfasst die Analyse von Stärken/Schwächen sowie von Möglichkeiten/Gefahren für ein Unternehmen. Auf Basis der Analyse und der definierten Unternehmensziele können strategische Soll-/Ist-Vergleiche aufgestellt werden. Bei Abweichungen wird definiert, warum diese entstehen und Maßnahmenpläne erstellt um die Soll-/Ist-Spanne zu minimieren bzw. den Fehlereinfluss vollständig zu umgehen [40].

Um einzelne Mitarbeiter nicht mit sämtlichen Aufgaben, von der Produktentwicklung bis hin zum Marketing und Verkauf, zu belasten, werden Organisationseinheiten, wie in Abbildung 11, gebildet. Dadurch werden Aufgaben und Kompetenzen in den Abteilungen verteilt und Arbeitsabläufe bestimmten Personen zugeteilt.

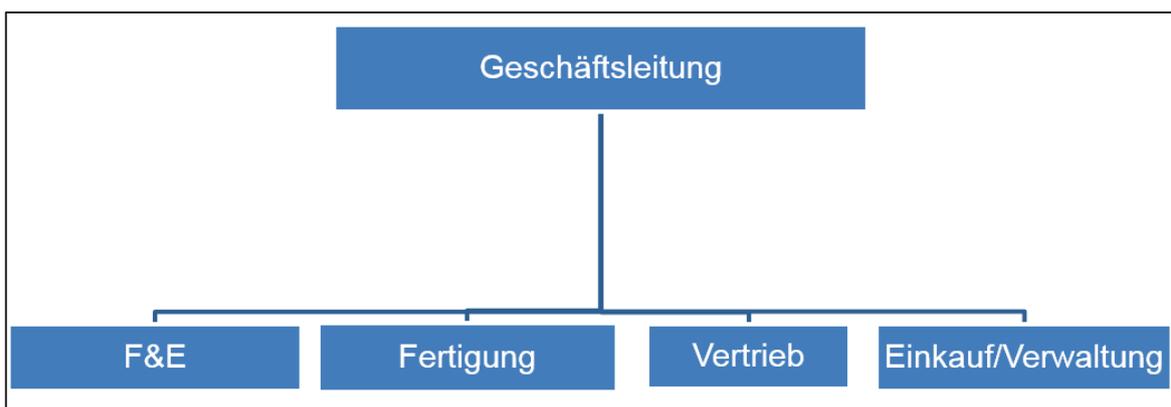


Abbildung 11: Einteilung der Aufgaben eines Unternehmens in Funktionsbereiche nach [40].

Die Funktionsbereiche arbeiten zusammen um das übergeordnete Unternehmensziel zu erreichen. Diese Arbeit beschäftigt sich mit der F&E (Forschung und Entwicklung) eines Mikrosandwichverbundes. Für das

Unternehmen geht es vorerst nicht darum einen automatisierten Prozess, sondern vielmehr darum ein Prozessfenster zu finden.

Es soll gezeigt werden wie sich dünner Schaum verarbeiten lässt, sodass neue Kunden gewonnen und das strategische Ziel, aus Abbildung 12, erreicht wird.

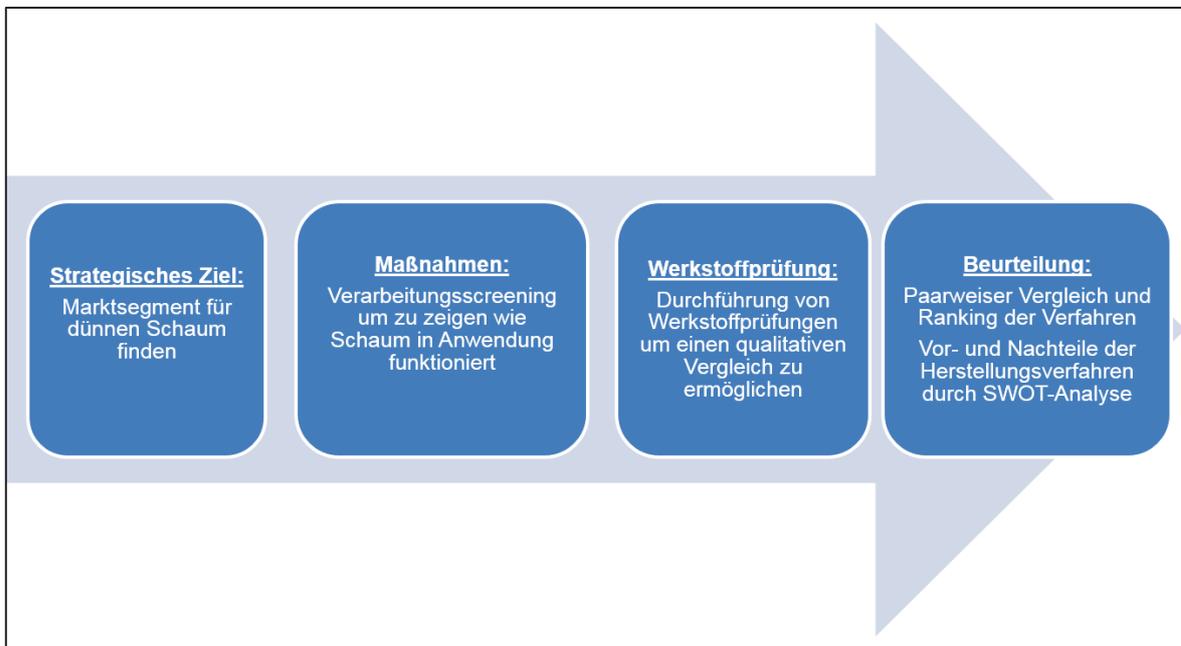


Abbildung 12: Konkretisierung der strategischen Planung aus F&E.

- **Strategisches Ziel**

Es trägt dem nachhaltigen Bestehen des gesamten Unternehmens bei, indem neue Kunden aus der CFK- Industrie gewonnen werden. Durch zusätzliche Aufträge werden Perspektiven geschaffen und die Auslastung der Produktion sichergestellt.

- **Maßnahmen**

Um die strategischen Ziele zu erfüllen wird das Mikrosandwich in verschiedenen Verarbeitungsverfahren hergestellt. Es sollen Verarbeitungsfenster zur bestmöglichen Bauteilperformance bei gleichzeitig hoher Wirtschaftlichkeit gefunden werden. Um eine vollständige Beurteilung der Bauteilqualität durchführen zu können, werden aus den produzierten Sandwichplatten Prüfkörper gefräst.

- **Werkstoffprüfungen**

Um eine möglichst objektive Beurteilung zu erreichen werden die Sandwichplatten geprüft. Das Ergebnis der Werkstoffprüfungen sind absolute Größen, welche anschließend in einer Paarvergleichsmatrix verglichen werden.

- **Beurteilung**

Um den Abnehmern der dünnen Schaumblätter die Auswahl des optimalen Herstellungsverfahrens zu erleichtern, werden die Verfahren in einem paarweisen Vergleich gegenübergestellt und deren Vor- und Nachteile in einer SWOT-Analyse diskutiert.

### 3.1 Methoden der Entscheidungsfindung

Die Betriebswirtschaftslehre stellt eine Reihe an Bewertungs- und Entscheidungstechniken zur Verfügung [41–44]. Eine Entscheidung treffen heißt, eine Alternative unter mehreren auszuwählen. Eine Bewertung ist eine Hilfestellung bei der Entscheidungsfindung und wird in erster Linie verwendet um Fehler und Unsicherheiten zu vermeiden. Sämtliche Techniken zielen darauf ab, möglichst objektiv zu bewerten, weshalb eine ausreichende Informationsbasis notwendig ist [45].

Im konkreten Fall der Sandwichherstellungsmethoden besteht kein klar definiertes Mindestanforderungsprofil. Die Ergebnisse der Werkstoffprüfungen werden in einer Dominanzmatrix gegenübergestellt und paarweise verglichen. Eine objektive Gewichtung der Vergleichskriterien ist zu diesem Zeitpunkt nicht möglich.

#### 3.1.1 Paarvergleichsmatrix

Bei dieser Methode geht es darum, mehrere Wahlmöglichkeiten miteinander zu vergleichen. Der Vergleich der zwei Optionen basiert auf dem Kriterium „besser als...“ oder „schlechter als...“ und als Beurteilung wird eine 0 (für schlechter) oder eine 1 (für besser) vergeben. Durch die Addition der Vergleichsergebnisse ergibt sich eine Rangfolge. Um die Methode besser zu verstehen ist nachfolgend Abbildung 13 angeführt.

		Variante					
		1	2	3	4	5	6
Im Vergleich zu Variante	1	-	1	0	0	1	0
	2	0	-	0	0	0	0
	3	1	1	-	0	1	0
	4	1	1	1	-	1	0
	5	0	1	0	0	-	0
	6	1	1	1	1	1	-
Summe		3	5	2	1	4	0
Rang		3	1	4	5	2	6

1=besser  
0=schlechter

Abbildung 13: Vorgehensweise der Beurteilung durch einen paarweisen Vergleich [41, 44, 45].

Dabei wird in einer Spalte eine Variante mit jeder anderen Variante verglichen und beurteilt ob diese „besser“ oder „schlechter“ ist. Beispielsweise sind in der ersten Zeile die Verfahren 1-6 angeführt. Die Variante 1 wird in der ersten Spalte mit den übrigen verglichen. Variante 1 ist schlechter als Variante 2 aber besser als Variante 3. In Summe erzielt Variante 1 drei Punkte und belegt Rang 3 im direkten Vergleich. Das Ergebnis dieser Dominanzmatrix ist die Rangliste der Varianten [45].

### 3.1.2 SWOT-Analyse

Eine SWOT-Analyse (**S**trengths, **W**eaknesses, **O**pportunities, **T**hreats), oder auch Stärken-Schwächen-Analyse zielt auf die strukturierte Behandlung eines Prozesses oder eines Herstellungsverfahrens, ab. Durch das systematische behandeln des Themas sollen Chancen und Risiken, Stärken und Schwächen erkannt und aus den Erkenntnissen Maßnahmen abgeleitet werden. Ein Thema wird erst analysiert wodurch die Spalten- und Zeilenköpfe der SWOT-Matrix gefüllt werden. Anschließend werden, wie in Abbildung 14, in der Synthese-Phase die entstehenden Felder der Matrix mit Maßnahmen belegt, indem jeweils die

Wechselwirkungen der Kopffelder interpretiert werden. Ein Beispiel dieser Synthese ist es interne Stärken einzusetzen und externe Chancen zu nutzen [45].

- Musterbeispiel:

Eine Firma verfügt über einen signifikanten technischen Vorsprung bei der Herstellung eines Karosserieteils in Verbundbauweise. Durch ein neuartiges Verfahren sind die Toleranzen optimal einzuhalten und zusätzlich ist das Verfahren kostengünstiger als das bisher verwendete. Die Firma erkennt, dass auch andere Automobilhersteller Interesse haben das Karosserieteil durch das neuartige Verfahren herzustellen. Die Firma nutzt die **interne Stärke** des technischen Vorsprunges aus und ergreift **externe Chancen** indem sie neue Aufträge zugesprochen bekommt.

		Interne Unternehmensanalyse	
		Strengths (S)	Weaknesses (W)
Externe Umweltanalyse	Opportunities (O)	<ul style="list-style-type: none"> <li>interne Stärken                             <ul style="list-style-type: none"> <li>Kapitalausstattung</li> <li>Kundenstamm</li> <li>technischen Know-How</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>interne Schwächen                             <ul style="list-style-type: none"> <li>veraltete Maschinen</li> <li>überaltete Produkte</li> <li>schlechtes Vertriebsnetz</li> </ul> </li> </ul>
	SO-Strategien	<ul style="list-style-type: none"> <li>interne Stärken einsetzen und externe Chancen nutzen (Idealfall)                             <ul style="list-style-type: none"> <li>Sicherung der erreichten Position und Nutzen der Wachstumschancen</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>WO-Strategien                             <ul style="list-style-type: none"> <li>interne Schwächen abbauen und externe Chancen nutzen                                     <ul style="list-style-type: none"> <li>kundengerechtere Produktion mit kürzerer Lieferzeit</li> </ul> </li> </ul> </li> </ul>
	Threats (T)	<ul style="list-style-type: none"> <li>ST-Strategien                             <ul style="list-style-type: none"> <li>interne Stärken einsetzen, um externe Bedrohungen zu verringern                                     <ul style="list-style-type: none"> <li>gezielte Investitionen und Weiterentwicklungen im Technologiebereich</li> </ul> </li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>WT-Strategien                             <ul style="list-style-type: none"> <li>interne Schwächen abbauen und externen Bedrohungen ausweichen                                     <ul style="list-style-type: none"> <li>Verträge über langfristige Zusammenarbeit mit anderen Unternehmen</li> </ul> </li> </ul> </li> </ul>

Abbildung 14: Allgemeines Beispiel einer SWOT-Analyse [46].

Als Vorteil der SWOT-Analyse ist die einfache Handhabung zu nennen. Es werden Expertenrunden gebildet und die Handlungsfelder systematisch durchdiskutiert. Nachteilig ist, dass die Abhängigkeiten der Stärken und Schwächen und der Chancen und Bedrohungen nicht dargestellt werden. Außerdem ist nicht sichergestellt, dass alle Kriterien vollständig und in der notwendigen Tiefe erfasst

sind. Das Verfahren wird in der Literatur mit einem systematischen Brainstorming verglichen und gilt als Werkzeug des strategischen Controllings [45].

## 4 Maschinen und verwendete Materialien

In diesem Kapitel werden die Geräte, sowie die Materialien die zur Durchführung der Versuche verwendet wurden vorgestellt. Die Maschinen sind zusätzlich in die Kategorien Verfahren (RTM, VARI und Prepreg) und Werkstoffprüfung aufgeteilt um zu verdeutlichen, welche Maschine zu welcher Herstellungsmethode/Werkstoffprüfung zugehörig ist.

### 4.1 Doppelbandpresse

Die Doppelbandpresse (Maschinenfabrik Herbert Meyer GmbH), in Abbildung 15 ersichtlich, wird für die Vorbereitung der Schaumkerne aller drei untersuchten Verfahren verwendet. Die Presse wird für das Lösen des Stoßproblems verwendet, welches im Ergebnisteil noch genauer diskutiert wird. Für die Verpressung wird ein Lagenaufbau zunächst auf Rollbänder gelegt. So kann der Stack anschließend schonend in die Doppelbandpresse transportiert werden. Darin wird unter Temperatureinwirkung gepresst, wobei die Möglichkeit besteht, im Laufe des Pressweges unterschiedliche Temperaturen einzustellen.

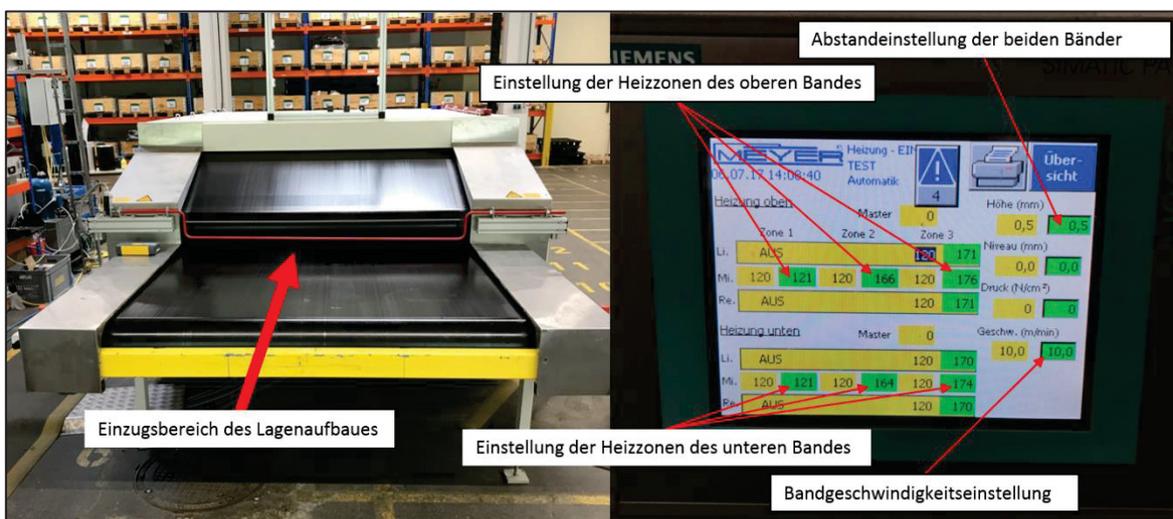


Abbildung 15: Der Einzugsbereich der Doppelbandpresse(links) und die Steuereinheit (rechts).

## 4.2 Maschinen für das Verfahren Prepregpressen

### 4.2.1 Hydraulikpresse und Formwerkzeug

Zur Fertigung der Sandwichplatten durch das Verpressen der Prepregdeckschichten und dem Schaumkern wurde eine Presse mit vier Hydraulikzylindern verwendet (Abbildung 16). Es handelt sich hierbei um eine Eigenkonstruktion der Firma 4a manufacturing GmbH. Die Presse verfügt über zwei Heizplatten, wobei die obere und untere Heizplatte variabel beheizt werden. Durch das Erhöhen der Werkzeugtemperatur kann die Aushärtereaktion beschleunigt und die Zykluszeit verkürzt werden.

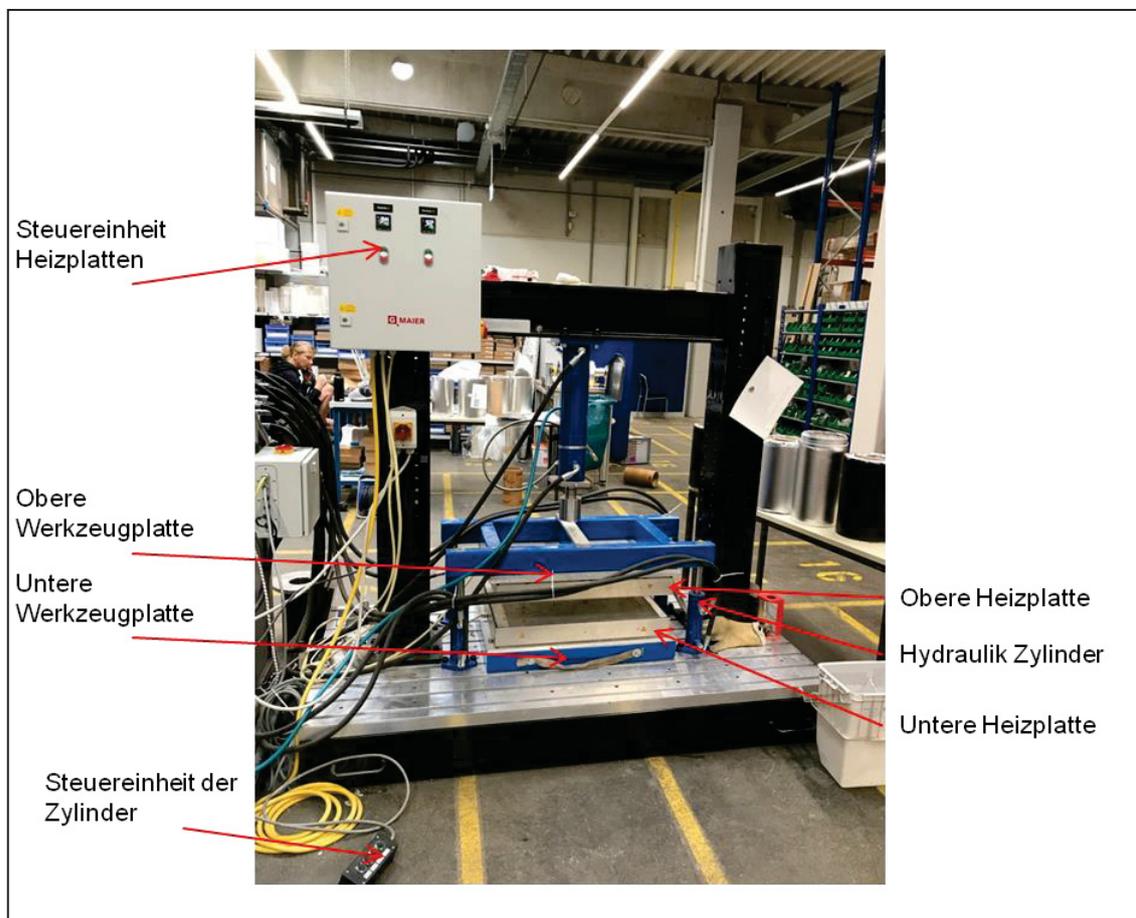


Abbildung 16: Beheizbare Hydraulikpresse zur Fertigung der Prepreg-Sandwichpanele.

Für die Sandwichuntersuchungen wurde weggesteuert gepresst. Um eine ebene Oberfläche des Bauteiles nach der Formgebung zu garantieren ist es notwendig, dass der aufbrachte Druck konstant auf das Formteil wirkt. Das verwendete

Plattenwerkzeug (Firma 4a manufacturing GmbH) verfügt aufgrund der massiven Bauweise über eine ausreichende Steifigkeit, sodass es während der Formgebung kaum Nachgiebigkeit zeigt. Dies macht die Produktion von planen Platten mit konstanter Dicke möglich. In der Unter- und Oberplatte befinden sich Bohrungen zur Temperaturmessung während des Prozesses. Dies ist in der Verarbeitungsindustrie von Verbundmaterialien Stand der Technik und wird zur Prozessüberwachung standardmäßig angewendet. Nur so können Fehler frühzeitig erkannt und Gegenmaßnahmen eingeleitet werden.

### 4.3 Maschinen für das Verfahren Vakuuminfusion

Beim VARI-Verfahren ist eine Vakuumpumpe notwendig um eine Infiltration der Matrix durch das Textil zu erreichen. Der prinzipielle Aufbau der Harzinfusion ist in Abbildung 17 ersichtlich.

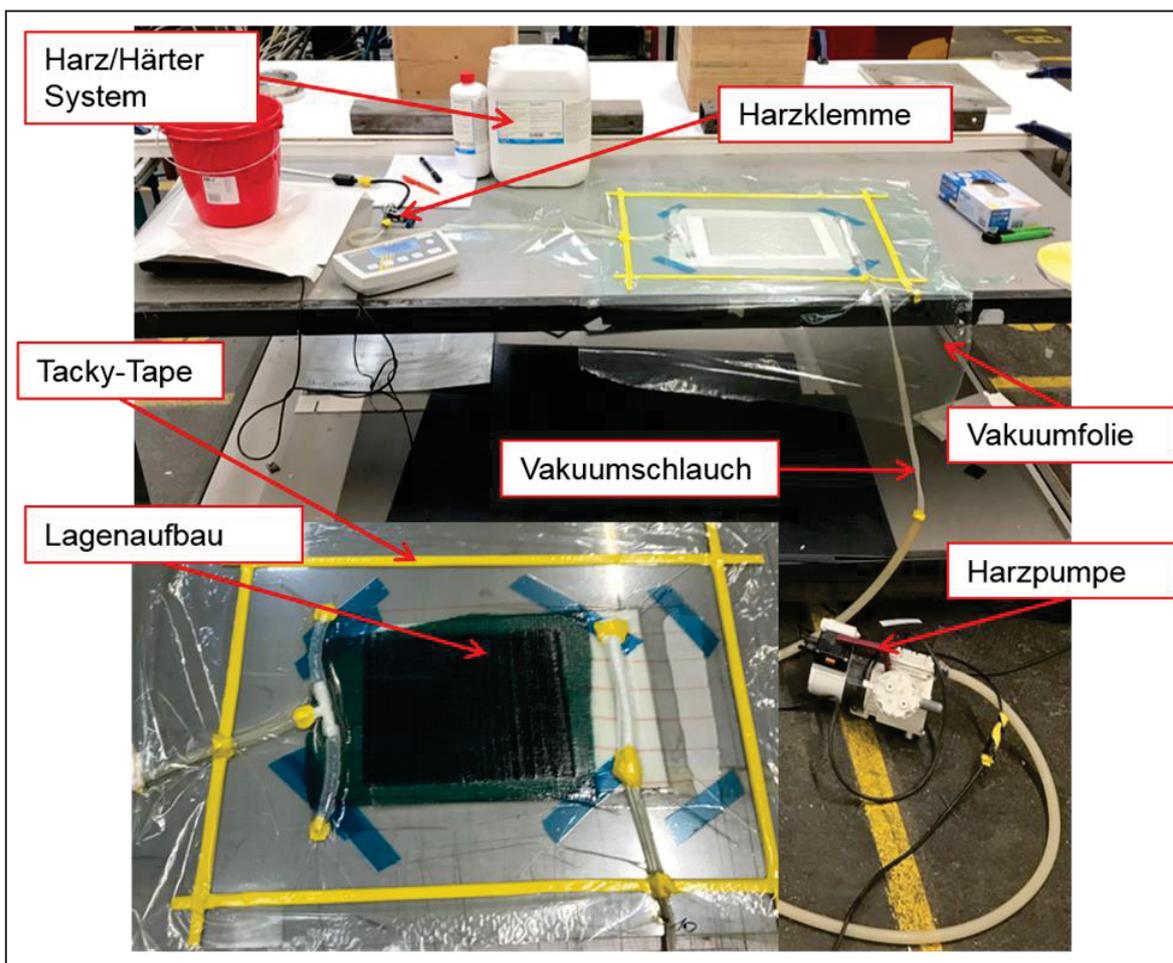


Abbildung 17: Aufbau der Vakuuminfusion und Benennung von wichtigen Verfahrensutensilien.

Der Schaumkern des Sandwichs ist geschlossenzellig, weshalb eine Perforation des Kernes notwendig ist. Um eine gleichmäßige Perforation zu erreichen wurde ein CNC-Cutter zur Hilfe genommen.

#### 4.3.1 CNC-Cutter

Der verwendete PMI-Schaum ist für das Harz nicht durchlässig. Daher müssen, um ein Durchtränken über die Dicke zu ermöglichen, Perforationen in den Schaum eingebracht werden. Diese ermöglichen dem Harz das textile Halbzeug auf beiden Seiten des Sandwiches zu tränken. Die Erhöhung der Dichte muss bei der Verwendung von geschlossen porigen Schäumen in Kauf genommen werden. Es hat sich als sinnvoll erwiesen eine Perforation durch Zuhilfenahme eines CNC-Cutters, Abbildung 18, zu generieren.

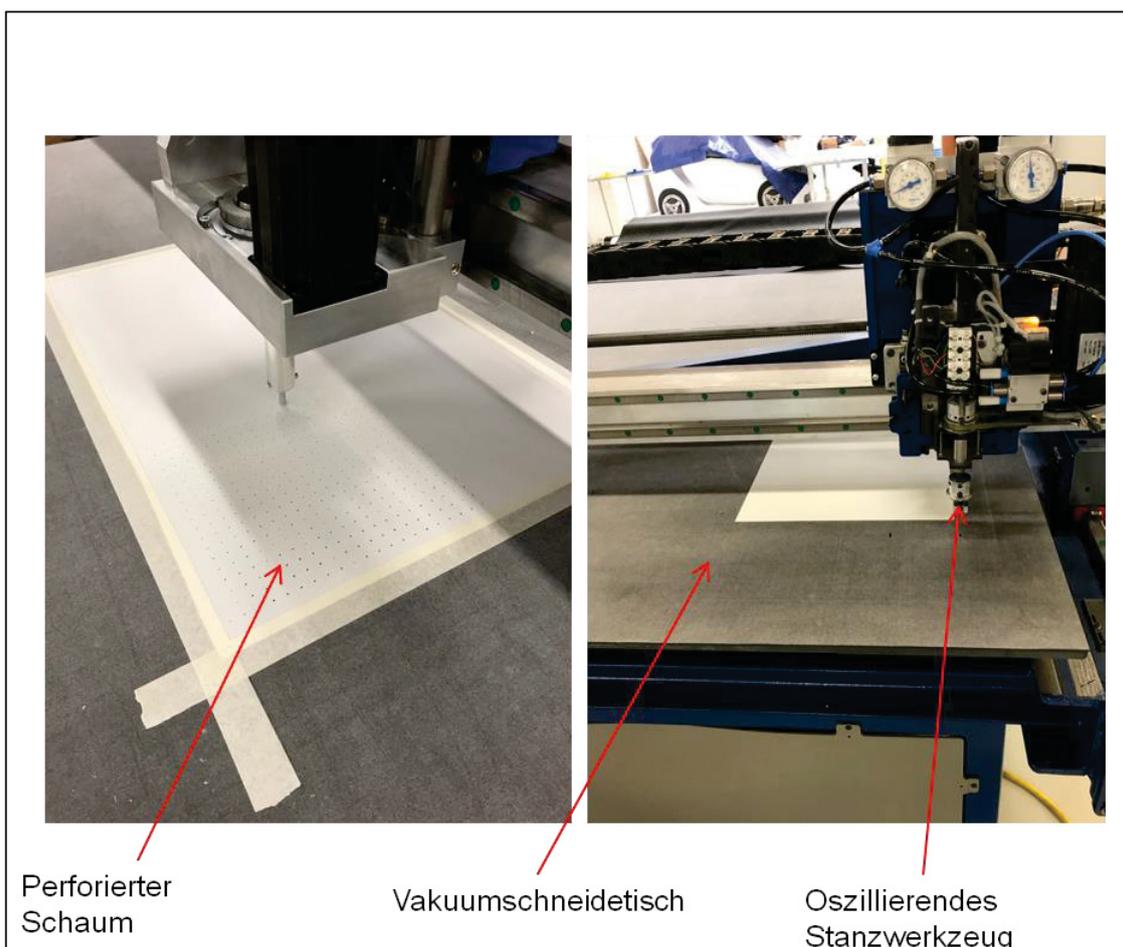


Abbildung 18: CNC-Cutter zur Generierung der Perforation im PMI-Schaumblatt.

Der Cutter verfügt über einen Schneidetisch welcher, um das Material beim Konfektionieren nicht zu verschieben, Vakuum aufbringen kann. Durch das oszillierende Werkzeug wird die Lochperforation am Schaumblatt eingebracht.

#### 4.4 Maschinen für das Verfahren RTM

##### 4.4.1 Injektionsanlage und Hydraulikpresse

Die Injektionsanlage vom Typ Nodopur VS-2K (Ing. Büro Tartler GmbH) ist eine zweikomponentige Kunstharzdosier- und -mischanlage. Sie besteht aus zwei Vorratsbehältern mit je einer Zahnradpumpenpumpe und einem Rohrleitungssystem mit der Möglichkeit der Kreisförderung. Der Mischkopf wird vom Rohrleitungssystem gespeist. Neben der Injektionsanlage wurde für die Durchführung der RTM-Versuche eine Hydraulikpresse der Firma Langzauner GmbH verwendet. Es besteht die Möglichkeit das Werkzeug in der Presse auf 100°C mittels Wasserheizung zu erwärmen.

#### 4.5 Maschinen für die Werkstoffprüfung

Die Schäl- und Biegeprüfungen wurden auf einer Universalprüfmaschine der Firma Shimadzu China Corporation vom Typ EZ-LX durchgeführt. Die verwendete Biege-Kraftmessdose hatte eine Kapazität von 200 N. Die Traversengeschwindigkeit der Biegeprüfungen wurde mit 1 mm/min und die der Schälversuche mit 20 mm/min gewählt. Um die Dichte der Sandwichplatten zu bestimmen wurden die Utensilien aus Abbildung 19 c.) verwendet.

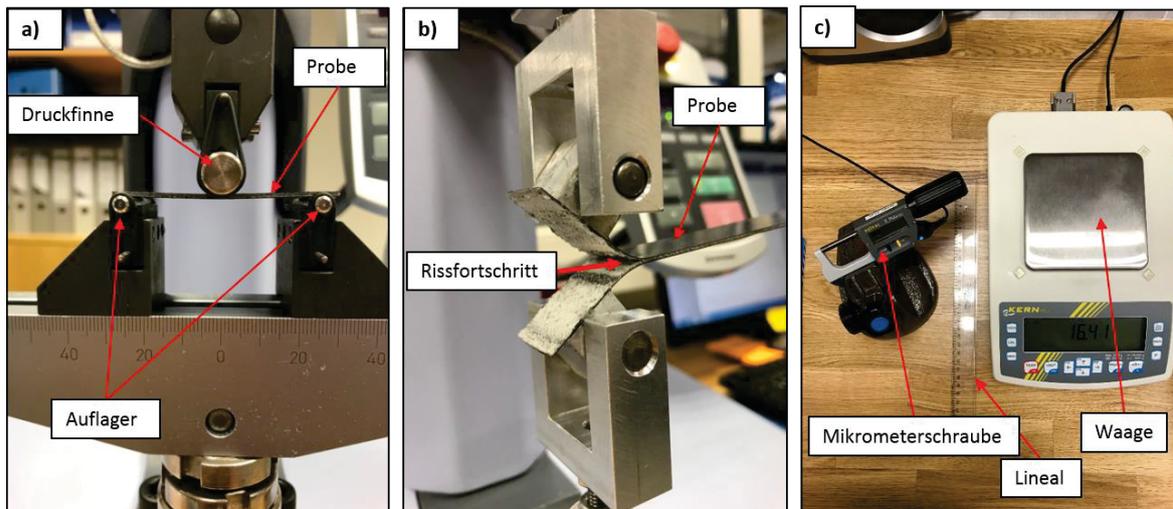


Abbildung 19: a.) Dreipunktbiegeaufbau nach ASTM C393-00; b.) Schälversuch nach ASTM D5528; c.) Messgegenstände für die Auswertung der Dichte einer Mikrosandwichplatte.

## 4.6 Materialien

Es wurden Sandwich und auch Voll-CFK Platten hergestellt. In Abbildung 20 ist der Lagenaufbau schematisch dargestellt und verdeutlicht, dass bei der Voll-CFK Variante zweimal mehr textiles Halbzeug benötigt wird.

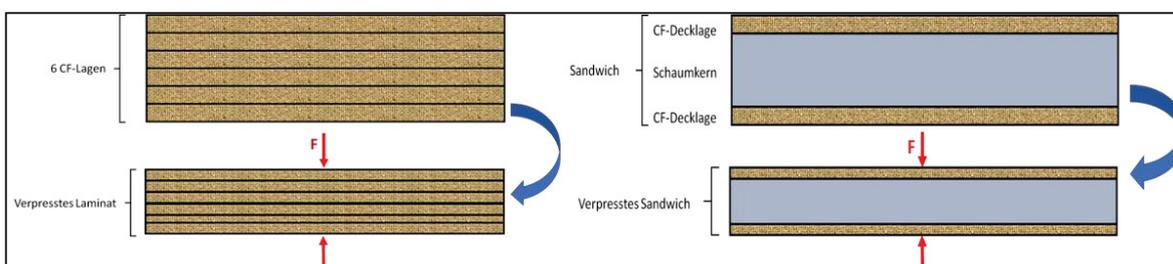


Abbildung 20: Lagenaufbau der Voll-CFK Platte (links) und der Sandwichplatte (rechts).

### 4.6.1 Kernmaterial

Als Kernschichtmaterial wurde ein PMI-Schaum mit der Materialbezeichnung Millifoam RHC 110SL mit einer Dichte von  $110 \text{ kg/m}^3$  verwendet. Die Schaumblätter wurden in einer Dicke von  $0,16 \text{ mm}$  gefertigt. Da das Verfahren Vakuuminfusion perforierte Schaumblätter benötigt, wurde alle  $10 \text{ mm}$  ein Loch mit einem Durchmesser von  $2 \text{ mm}$  in das Schaumblatt gestanzt.

Um das Stoßproblem der Schaumblätter zu lösen wurde Glasvlies verwendet sowie eine Folie mit Epoxidkleber.

#### 4.6.2 Textile Halbzeuge und Matrixsysteme

Um die Vergleichbarkeit möglichst wenig zu verfälschen wurde darauf geachtet, dass die textilen Materialien, sowie die Matrixsysteme zwischen den Verfahren ähnlich sind. Die nachfolgende Tabelle teilt die untersuchten Materialien in die Verfahren ein in welchen sie verwendet wurden.

Tabelle 4: Übersicht der textilen Halbzeuge und der verwendeten Harzsysteme.

Verfahren		Bezeichnung	Hersteller	Bindung	Flächen- gewicht [g/m <sup>2</sup> ]
RTM	Textil	TORAYCA	R&G	Köper	200
	Harz/Härter	Epinal IR 77.25/ IH77.14	bto epoxy	-	-
VARI	Textil	TORAYCA	R&G	Köper	200
	Harz/Härter	Epoxy L/GL1	R&G	-	-
Prepreg- pressen	Prepreg	HEXPLY M49	HEXCEL	Köper	200 (imprägniertes Prepreg)

## 5 Ergebnisse und Diskussion

Die Ergebnisse dieser Arbeit sind in die folgenden drei Kapitel eingeteilt:

a) Stoßkaschierung im Kernmaterial

Die Ergebnisse der entwickelten Schaum-Verbindungstechnik werden dargestellt und diskutiert. Die Lösung des Problems wird vorgestellt.

b) Vergleich der Verfahren

Der Verfahrensvergleich zeigt dem Kunden durch welche Verfahrenseinstellung, welche Eigenschaften im Mikrosandwich zu erwarten sind. Auch die Voll-CFK Bauweise wird den Kernverbunden gegenübergestellt, wodurch ersichtlich wird welcher Mehrwert durch die Mikrosandwichbauweise zu erwarten ist. Im paarweisen Vergleich der gemessenen Materialkennwerte wird ein Ranking der Versuchseinstellungen erstellt. Weiters werden die Einflussfaktoren der Parameter auf den bewerteten Werkstoffkennwert diskutiert.

c) SWOT-Analyse

In der Stärken-Schwächen-Analyse werden die Potenziale der Verfahren dargestellt. Neben den absoluten Größen aus den Werkstoffprüfungen, wird die Wirtschaftlichkeit der Verfahren berücksichtigt. Die SWOT-Analyse unterstützt den Kunden, indem es die Möglichkeiten der unterschiedlichen Verfahren darstellt.

### 5.1 Stoßkaschierung im Kernmaterial

Im ersten Schritt wurde die Verbindungsstelle der Schaumblätter durch einen möglichst geraden Schnitt vorbereitet und mit Hilfe einer Klebefolie (Collano) verbunden. Die Verklebung erfolgte unter Temperatureinwirkung von 120°C in einer Doppelbandpresse. Die Verbindung der Schaumblätter konnte dadurch realisiert werden und als positiver Nebeneffekt war das Handling des Schaumes durch die Verklebung einfacher: Bei der Klebefolie handelt es sich um einen thermoplastischen Kunststoff. Durch die Verarbeitungstemperaturen erreicht die Klebefläche bei der Weiterverarbeitung die Schmelztemperatur. Das Sandwich hält, wie es Abbildung 21 zeigt, den Entformungskräften nicht stand.

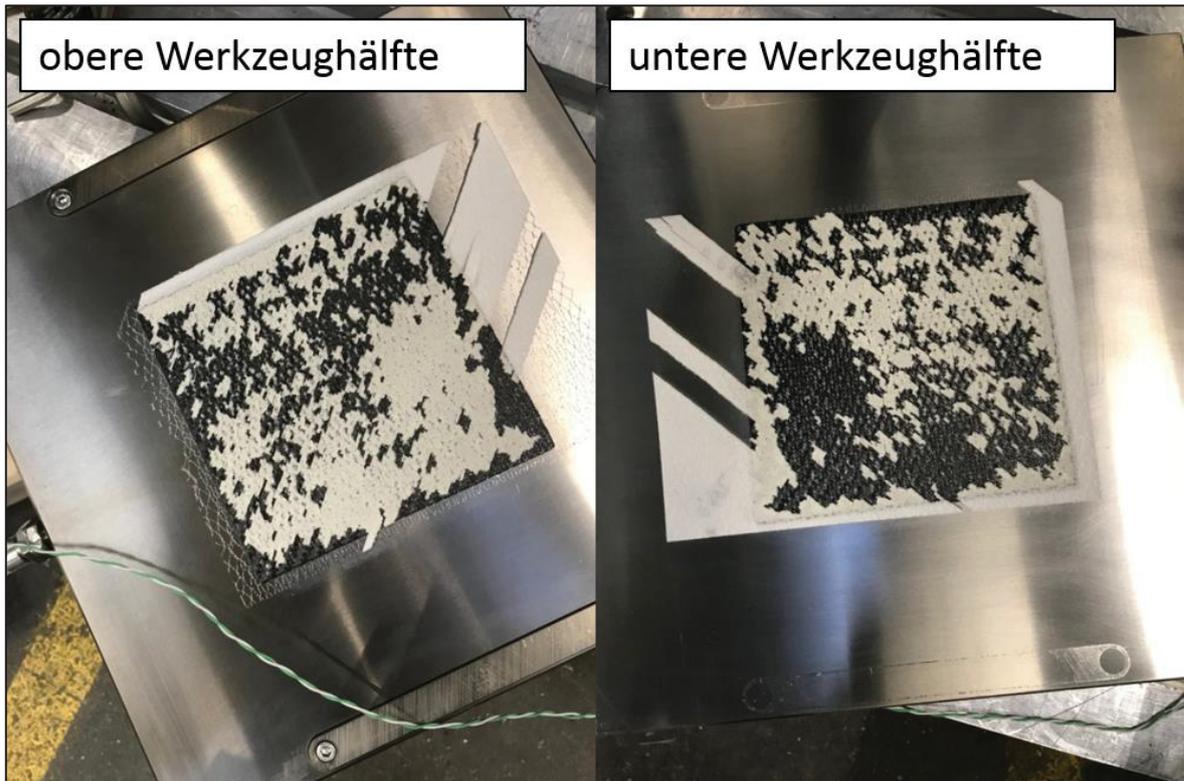


Abbildung 21: Endformung des Prepregsandwiches, dessen Schaumkern durch thermoplastischen Kleber modifiziert wurde.

Grundvoraussetzung ist es, dass der Schaum weiterverarbeitet werden kann. Daher wurden in weiterer Folge vernetzende Kleber verwendet. Abbildung 22 stellt die Prozessroutine, welche das Problem des Stoßes löst, dar.

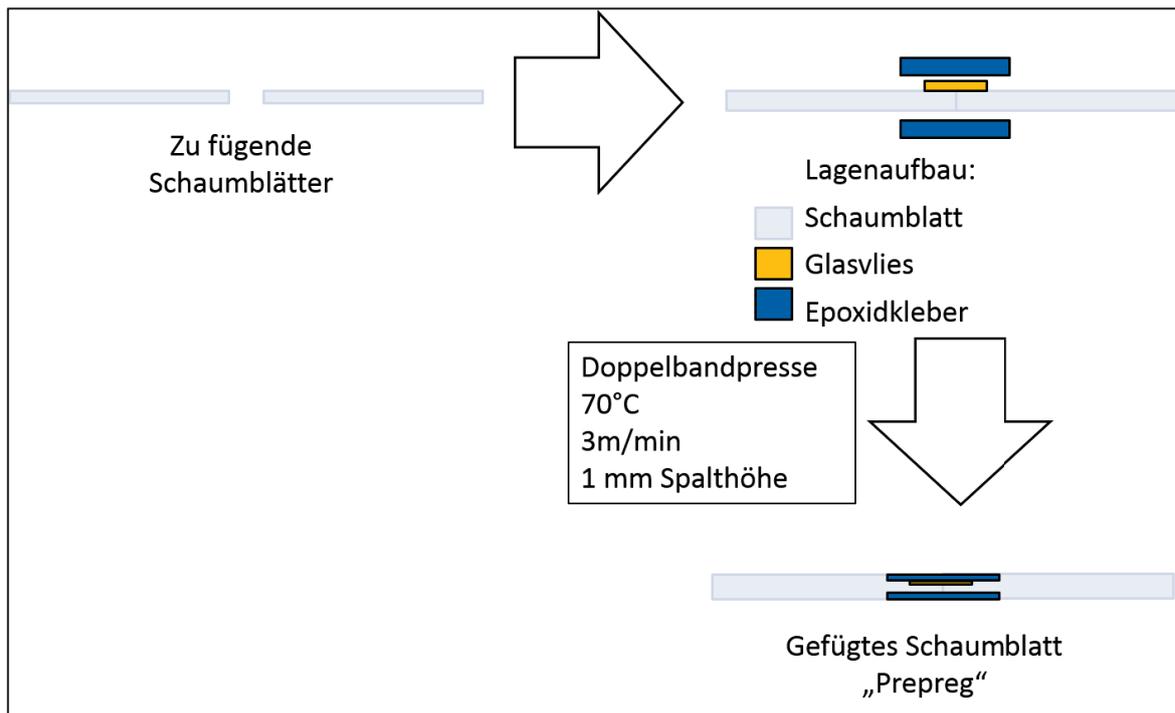


Abbildung 22: Prozessschritte die zur Kaschierung des Schaumstoßes notwendig sind.

Die zwei Schaumblätter werden im dargestellten Lagenaufbau durch die Doppelbandpresse gefahren. Der Epoxidkleber wird bei 70°C thermisch aktiviert und beginnt zu reagieren. Dadurch verkleben die Schaumblätter miteinander. Aufgrund des Epoxidklebers wird ein „Schaumblatt-Prepreg“ geschaffen, welches nur begrenzt lagerfähig ist. Das Ergebnis dieses Stoßlösungsverfahrens zeigt Abbildung 23 rechts. Die linke Grafik zeigt im Vergleich dazu die ersten Versuche bei der Stoßkaschierung. Die Stoßrichtung ist jeweils durch zwei Pfeile an den Seiten des Mikrosandwich angedeutet.

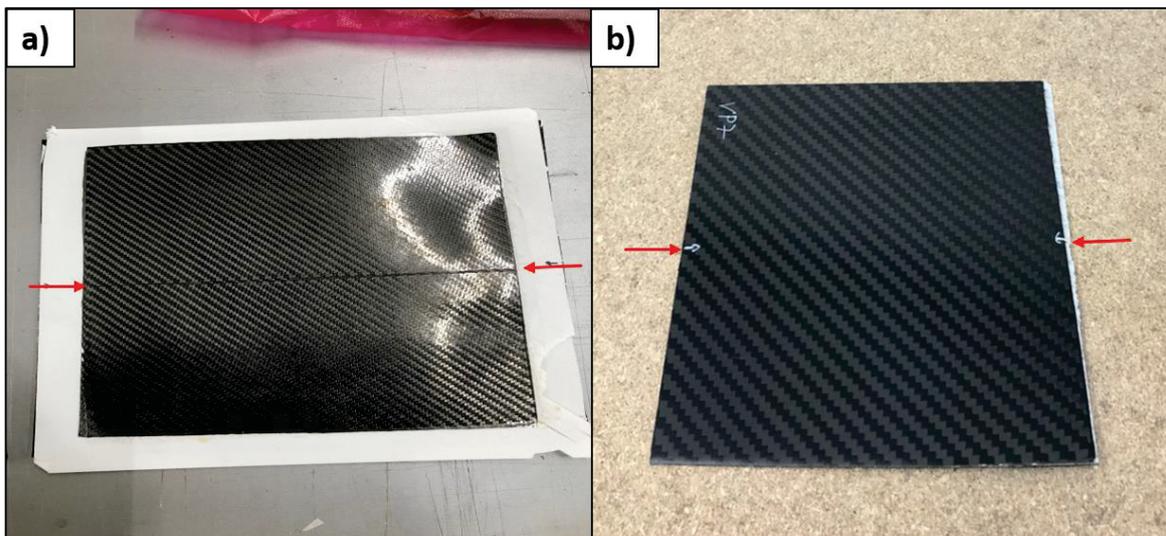


Abbildung 23: Mikrosandwich-Prepregplatte mit Andeutung der Stoßrichtung durch Pfeile.

Links im Bild (a)) ist der Stoß im Schaumblatt deutlich im Fertigteil zu erkennen. Unter Anwendung des entwickelten Prozesses konnte der Stoß kaschiert werden (b)).

## 5.2 Vergleich der Verfahren

Um die drei Verfahren im Detail zu analysieren werden die Verfahrensparameter unter Anwendung eines Versuchsplanes variiert. Im paarweisen Vergleich werden die Ergebnisse (aus Werkstoffprüfungen) der unterschiedlichen Parametereinstellungen der Herstellungsverfahren verglichen. Dadurch wird eine Vielzahl an Varianten verglichen, weshalb die Bezeichnung „Versuch“ in den Versuchsplänen in Tabelle 5 bis Tabelle 7 in den Vergleichsmatrizen als Variantenbezeichnung verwendet wird. Der Einfluss der Parameter auf die mechanischen Eigenschaften der Kernverbunde wird unter Anwendung eines zweistufigen vollfaktoriellen Versuchsplan erforscht. Es wird davon ausgegangen, dass 80% des Einflusses auf die Zielgröße aus 20% der Einflussfaktoren resultiert (Pareto-Methode) [47]. Die Einflussfaktoren, welche die Zielgröße um 80% beeinflussen werden aufgezeigt und diskutiert. Verglichen wird immer eine mechanische Eigenschaft. Verfügt ein Bauteil über ein Lastenheft können die Vergleichskategorien gewichtet werden. Anschließend ist es dem Kunden möglich sich für ein Verfahren bzw. eine Parametereinstellung zu entscheiden.

Tabelle 5 Versuchsplan für das Prepregpressen-Verfahren.

Prepreg	Parametereinstellung				
Versuch	Kavitätenhöhe	Versuchszeit	Temperatur	Stoß	Aufbau
[-]	[mm]	[min]	[°C]	[-]	[-]
P1	1,2	30	140	Ja	Sandwich
P2	1,2	15	170	Ja	Sandwich
P3	1,4	30	140	Ja	Sandwich
P4	1,4	15	170	Ja	Sandwich
P5	1,2	30	140	Nein	Sandwich
P6	1,2	15	170	Nein	Sandwich
P7	1,4	30	140	Nein	Sandwich
P8	1,4	15	170	Nein	Sandwich
P9	1,2	30	140	-	Voll-CFK

Tabelle 6: Versuchsplan für das Vakuuminfusions-Verfahren.

Vakuuminfusion	Parametereinstellung		
Versuch	Perforation	Stoß	Aufbau
V1	Ja	Ja	Sandwich
V2	Ja	Nein	Sandwich
V3	-	-	Voll-CFK

Tabelle 7: Versuchsplan für das RTM-Verfahren.

RTM	Parametereinstellung			
Versuch	Kavitätenhöhe	Nachdruck	Stoß	Aufbau
[-]	[mm]	[bar]	[-]	[-]
R1	1,4	20	Ja	Sandwich
R2	1,4	10	Ja	Sandwich
R3	1,2	20	Ja	Sandwich
R4	1,2	10	Ja	Sandwich
R5	1,4	20	Nein	Sandwich
R6	1,4	10	Nein	Sandwich
R7	1,2	20	Nein	Sandwich
R8	1,2	10	Nein	Sandwich
R9	1,2	20	-	Voll-CFK

### 5.2.1 Dichtevergleich

Die Dichte der Sandwichplatten ist von der Kerndicke abhängig. Dennoch werden in der Dominanzmatrix sämtliche Einstellungen, auch jene mit unterschiedlichen Dicken und Aufbauweisen, miteinander verglichen. Die Vermutung, dass kein signifikanter Dichteunterschied zwischen jenen Versuchen mit bzw. ohne Stoß besteht, hat sich bestätigt. Aus diesem Grund wird zwischen diesen Einstellungen nicht unterschieden. In Tabelle 8 sind die Ergebnisse der Dichteauswertungen zusammengefasst, wobei auch die tatsächliche Dicke angeführt ist.

Verfahrenstechnisch wurde die geforderte Dicke eingestellt, trotzdem besteht ein Toleranzbereich. Vor allem bei den Platten aus dem VARI-Verfahren war es nicht möglich, durch den geringen Unterdruck, den Sandwichtaufbau auf die gleiche Dicke wie bei den übrigen Verfahren zu pressen. Als letzte Spalte in der Ergebnistabelle ist der Rang aus dem paarweisen Vergleich aufgelistet. Die paarweisen Vergleiche der Vergleichskategorien sind im Anhang ausgeführt.

Tabelle 8: Ergebnisse der Dichtemessungen und tatsächliche Plattendicken.

<b>Versuch</b> [-]	<b>Tatsächliche Dicke</b> [mm]	<b>Dichte</b> [g/cm <sup>3</sup> ]	<b>Rang</b> [-]
P1/P5	1,20	0,67	<b>5</b>
P2/P6	1,25	0,63	<b>3</b>
P3/P7	1,38	0,59	<b>2</b>
P4/P8	1,36	0,59	<b>1</b>
P9	1,19	1,43	<b>11</b>
R1/R5	1,44	0,73	<b>8</b>
R2/R6	1,45	0,70	<b>6</b>
R3/R7	1,30	0,72	<b>7</b>
R4/R8	1,27	0,63	<b>4</b>
R9	1,27	1,44	<b>12</b>
V1/V2	1,73	0,76	<b>9</b>
V3	1,67	1,29	<b>10</b>

Die Ergebnisse der Dominanzmatrix sind nicht gewichtet. Wenn zwei Versuche den gleichen Dichtewert ergaben, wurde auf die Plattendicke geachtet. Bei gleichen Dichtewerten geht der Vergleichspunkt an die Platte mit der geringeren Dicke. Dies ist z.B. beim Versuchsvergleich P3/P7 mit P4/P8, sowie P2/P6 und R4/R8 der Fall. Abbildung 24 stellt die besten Ergebnisse der Dichtemessungen jedes Verfahrens gegenüber.

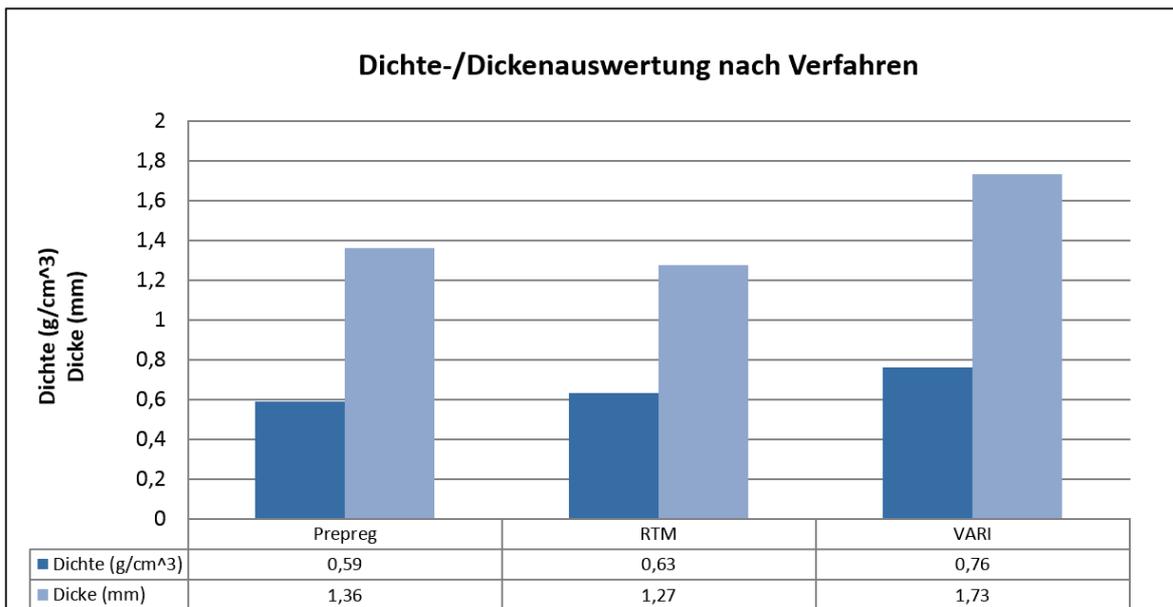


Abbildung 24: Vergleich der Dichteausswertungen der Verfahren Prepreg, RTM und VARI.

Obwohl es sich um ein Mikrosandwich handelt, in dem die Kernschicht nicht sehr dick ist, weisen dennoch sämtliche Sandwichbauformen geringere Dichtewerte auf als die Voll-CFK Bauweise.

Die höhere Dicke der VARI-Sandwichplatten ist den geringen Druckunterschieden bedingt. Die Platte „V1“ ist um 0,3 mm dicker als die übrigen Platten und weist trotzdem eine höhere Dichte auf. Das Perforieren des Schaumes ist nicht nur ein kostenintensiver Mehraufwand, es mindert zusätzlich das Leichtbaupotential. Bei genauerer Betrachtung der Ergebnisse aus den Dichteuntersuchungen stellt sich heraus, dass die Sandwichdicke wie erwartet einen Einfluss auf die Dichte hat. Laut Abbildung 25 a) nimmt die Dichte beim Prepregverfahren, bei einer höheren Kavitätenhöhe ab. Das RTM-Verfahren liefert bei der höheren Kavitätenhöhe geringfügig größere Dichtewerte. Die Sandwichverbunde werden bei der höheren Kavitätenhöhe nicht so stark kompaktiert wodurch beim RTM-Verfahren mehr Harz im Sandwich landet. Beim Prepreg ist die Harzmenge vorgegeben und die größere Kavitätenhöhe erhöht die Dichte nicht.

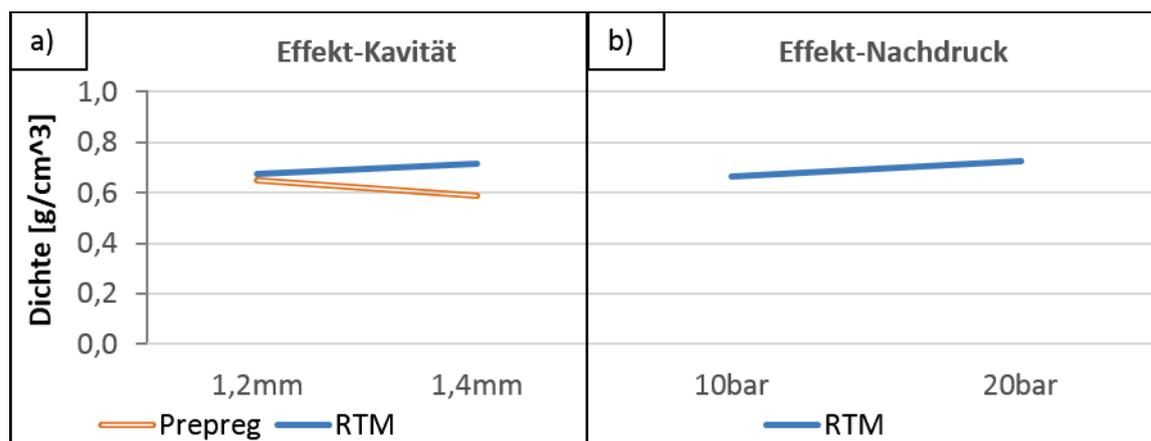


Abbildung 25: Darstellung der Einflussgrößen auf die Dichte der Kernverbunde.

Die RTM-Versuche (R4/R8) ergeben bei der 10 bar Nachdruckeinstellung einen Dichtewert von  $0,63 \text{ g/cm}^3$ . Aus der geringeren Nachdruckeinstellung resultiert ein geringerer Dichtewert. Diese Tendenz wurde in der statistischen Versuchsauswertung, siehe Abbildung 25 b), bestätigt. Die Kavitätenhöhe von 1,4 mm ergibt bei den Prepregversuchen (P4/P8) einen Dichtewert von  $0,59 \text{ g/cm}^3$  und belegt im paarweisen Vergleich Platz 1. Im Vergleich der Ergebnisse aus dem Prepreg- und RTM-Verfahren in Abbildung 24 ist ersichtlich, dass die Sandwichdicke der RTM-Versuche geringer ist als bei den Prepreg-Kernverbunden. Ob das Prepreg-Verfahren eine signifikant geringere Dichte verursacht ist anhand dieser Betrachtung nicht bestätigt.

### 5.2.2 Spezifischer Steifigkeitsvergleich

Die Steifigkeit ist durch die Steigung im Spannungs-Dehnungsdiagramm eines Materials bestimmt und wurde zwischen einer Dehnung von 0,05% und 0,25% ausgewertet. Für die Gegenüberstellung in der Dominanzmatrix wurde die spezifische Steifigkeit laut Gleichung (1) verwendet.

$$\phi = \frac{E}{\rho} \quad (1)$$

Dabei steht  $\phi$  für die spezifische Steifigkeit und  $E$  für den E-Modul der FKV-Platte. Die Ergebnisse der Steifigkeiten und der Dominanzmatrix sind in Tabelle 9 zusammengefasst.

Tabelle 9: Ergebnisse der Steifigkeiten aus 3-Punktbiegeversuchen.

<b>Versuch</b>	<b>E-Modul</b>	<b>spez. E-Modul</b>	<b>Rang</b>
<b>[-]</b>	<b>[GPa]</b>	<b>[GPa/(g/cm<sup>3</sup>)]</b>	<b>[-]</b>
P1	33,0	50,0	<b>1</b>
P2	30,0	48,0	<b>3</b>
P3	28,0	47,0	<b>4</b>
P4	24,4	41,0	<b>7</b>
P5	31,7	47,0	<b>4</b>
P6	31,6	50,0	<b>1</b>
P7	23,7	40,0	<b>8</b>
P8	28,0	47,0	<b>4</b>
P9	40,0	28,0	<b>17</b>
R1	27,6	38,0	<b>9</b>
R2	23,7	34,0	<b>12</b>
R3	27,0	37,0	<b>11</b>
R4	24,0	38,0	<b>9</b>
R5	24,2	33,0	<b>14</b>
R6	22,6	32,0	<b>16</b>
R7	24,1	33,0	<b>14</b>
R8	22,4	33,0	<b>13</b>
R9	33,2	23,0	<b>19</b>
V1	17,4	23,0	<b>19</b>
V2	15,6	20,0	<b>21</b>
V3	33,6	26,0	<b>18</b>

Die Prepreg-Platten erzielen in dieser Bewertungskategorie das beste Ranking. Es folgen die Platten aus RTM und VARI. Die Prepreg-, und RTM- Sandwichplatten zeigen höhere spez. Steifigkeitswerte als die Voll-CFK Bauweisen dieser Verfahren. Diese Tendenz ist beim VARI Verfahren nicht zu erkennen. Ein Grund ist die geringere Gewichtseinsparung durch die harzgefüllten Stege im Schaum. Zusätzlich wurde beim VARI-Verfahren das CF-Deckschichtmaterial manuell konfektioniert. Dieser Prozessschritt kann Auswirkung auf die Orientierung des Gewebes und auf die mechanischen Eigenschaften haben. Die Perforation des Schaumkernmaterials bedeutet nicht nur zusätzliches Gewicht des Kernverbundes, sondern schadet auch der mechanischen Performance. Abbildung 26 zeigt die Ergebnisse der E-Moduli der unterschiedlichen Versuchseinstellungen unter Berücksichtigung der Standardabweichung.

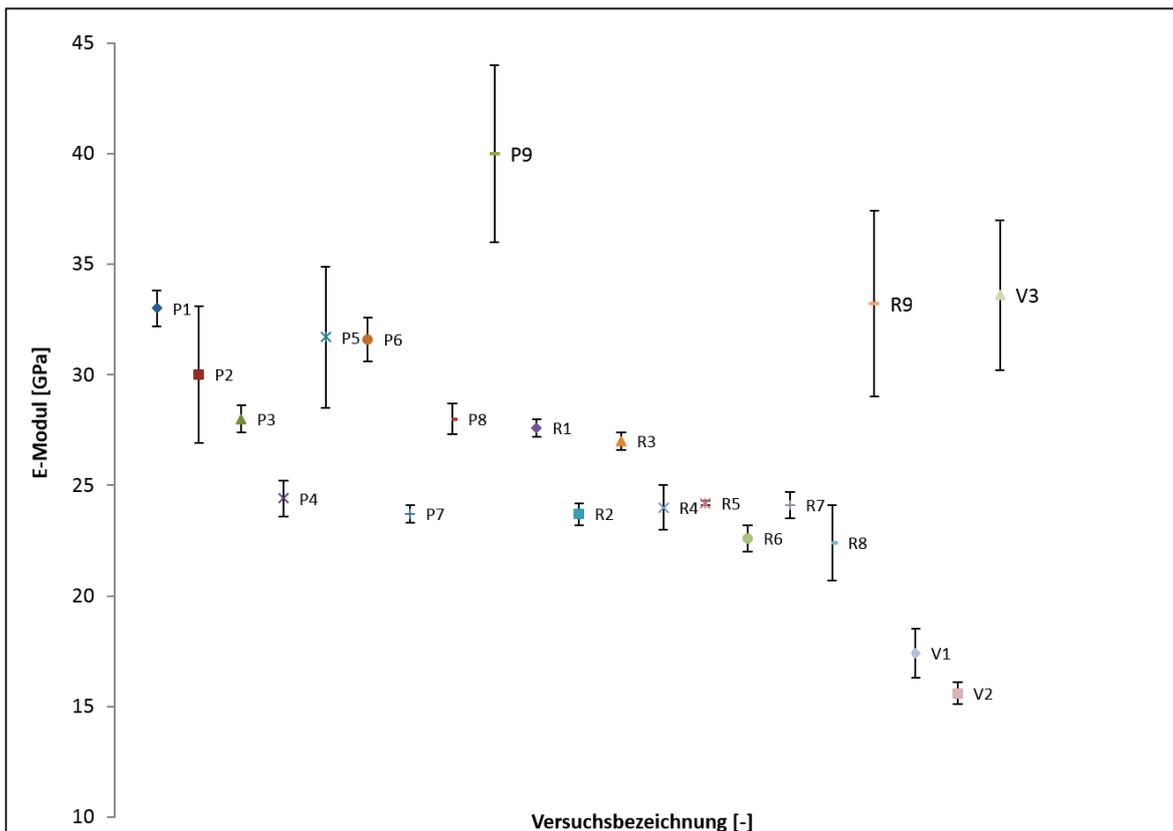


Abbildung 26: Mittelwert und Standardabweichung der Steifigkeiten der Biegeversuche.

Es ist ersichtlich, dass die RTM-Versuche die geringste Standardabweichung lieferten. Die RTM-Platten, die mit hohem Nachdruck hergestellt wurden (R1, R3, R5, R7) ergaben eine höhere Steifigkeit als jene mit geringem Nachdruck (R2, R4, R6, R8). Auf diese Tendenz wurde bereits bei der Biegefestigkeit hingewiesen. Welche Parameter nach der Pareto-Methode einen bedeutsamen Einfluss auf die Steifigkeit der Kernverbunde haben, zeigt Abbildung 27.

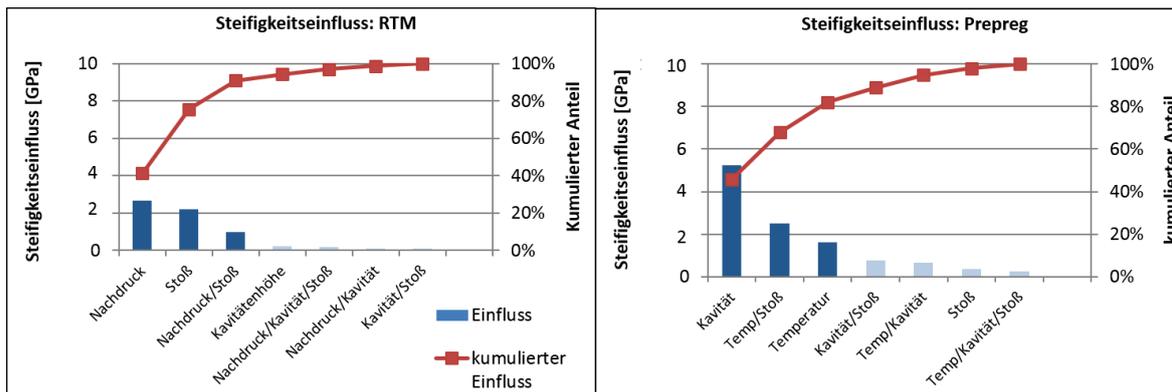


Abbildung 27: Einflussfaktoren auf die Steifigkeit der Mikrosandwichverbunde; links (RTM-Verfahren) und rechts (Prepreg-Verfahren).

Wie sich die Einflussfaktoren auf den E-Modul der RTM und Prepreg-Kernverbunde auswirken ist in Abbildung 28 und Abbildung 29 dargestellt.

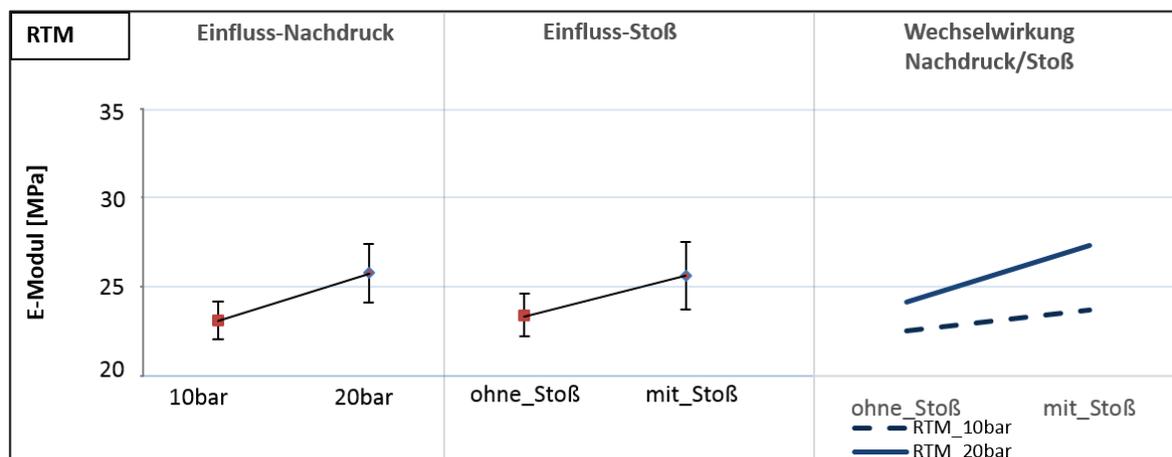


Abbildung 28: Auswirkung der Einflussfaktoren auf die Steifigkeit der RTM- Sandwichplatten.

Es konnte festgestellt werden, dass die 20 bar Nachdruckeinstellung zu einer Steifigkeitserhöhung führt. Der Stoß hat einen positiven Einfluss auf die Steifigkeit der RTM-Sandwichplatten. Bei der großen Nachdruckeinstellung ist dieser Einfluss stärker als bei geringem Nachdruck.

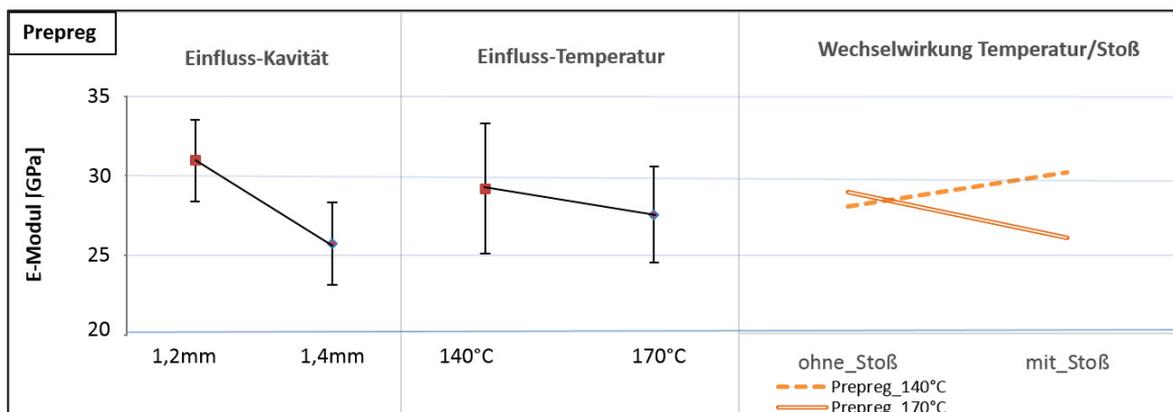


Abbildung 29: Auswirkung der Einflussfaktoren auf die Steifigkeit der Prepreg- Sandwichplatten.

Beim Prepreg-Verfahren beeinflusst die Kavitätenhöhe die Steifigkeit der Platten. Bei der geringen Kavitäteneinstellung wurden signifikant höhere Steifigkeiten erreicht. Die Erklärung liegt bei der besseren Verklebung der Lagen. Auch bei der Steifigkeit konnte ein Einfluss der Temperatur festgestellt werden. Aufgrund des geringen Einflusses und da die 170 °C-Versuche innerhalb der Standardabweichung der 140 °C Versuche sind, kann nicht von einem signifikanten Einfluss gesprochen werden. Die Wechselwirkung Temperatur/Stoß zeigt, dass die Temperatur ohne Stoß kaum Einfluss auf die Steifigkeit hat. Erst bei der Einstellung mit Stoß nimmt die Steifigkeit bei hoher Temperatur ab und bei der Niedriger zu. Die 170 °C lösen die Stoßkaschierung und die Kraftübertragung durch den Schaumkern ist gestört.

### 5.2.3 Spezifische Biegefestigkeitsvergleich

Die Biegefestigkeit ist der maximale Wert im Spannungs-Dehnungsdiagramm. Dieser Materialkennwert ist für die Auslegung einer Konstruktion essentiell und vorweg zu bestimmen. Da ein Voll-CFK Bauteil mit einem Sandwich bezüglich mechanischer Performance verglichen wird, werden die spezifischen Biegefestigkeiten (Glg.( 2) gegenübergestellt.

$$\sigma_{B;spez} = \frac{\sigma_B}{\rho} \quad (2)$$

Dabei entspricht  $\sigma_{B;spez}$  der spezifischen Biegefestigkeit,  $\rho$  der Dichte und  $\sigma_B$  der Biegefestigkeit. Die nachfolgende Tabelle 10 fasst die Ergebnisse der 3-Punktbiegeuntersuchungen zusammen. Das Ranking der spez. Biegefestigkeiten

aus der Dominanzmatrix ist ebenfalls darin ersichtlich. Ergaben zwei Versuche den gleichen spez. Biegefestigkeitswert belegen diese in der Dominanzmatrix den gleichen Platz.

Tabelle 10: Ergebnisse der Biegefestigkeiten aus 3-Punktbiegeversuche.

<b>Versuch</b>	<b>Biegefestigkeit</b>	<b>spez. Biegefestigkeit</b>	<b>Rang</b>
<b>[-]</b>	<b>[MPa]</b>	<b>[MPa/(g/cm<sup>3</sup>)]</b>	<b>[-]</b>
P1	210	313	<b>10</b>
P2	174	276	<b>13</b>
P3	163	276	<b>13</b>
P4	141	239	<b>20</b>
P5	175	261	<b>16</b>
P6	162	257	<b>18</b>
P7	132	224	<b>21</b>
P8	144	244	<b>19</b>
P9	736	515	<b>2</b>
R1	260	356	<b>5</b>
R2	204	297	<b>11</b>
R3	237	329	<b>6</b>
R4	168	267	<b>15</b>
R5	270	371	<b>4</b>
R6	223	319	<b>9</b>
R7	231	321	<b>8</b>
R8	179	284	<b>12</b>
R9	727	505	<b>3</b>
V1	196	258	<b>17</b>
V2	248	326	<b>7</b>
V3	751	582	<b>1</b>

Die Ergebnisse der Biegefestigkeiten zeigen, dass auch unter der Anwendung von spezifischen Größen die Voll-CFK Bauweisen höhere Festigkeiten ergeben. Die Biegefestigkeiten der Sandwichbauweisen unter Berücksichtigung der Standardabweichungen sind in Abbildung 30 ersichtlich. Es ist festzuhalten, dass der Versuch „R2“ die geringste Standardabweichung aufwies und „P5“ die größte. Die höchsten Biegefestigkeiten konnten unter der Versuchseinstellung „R5“ erzielt werden, während die Einstellung „P7“ die geringsten lieferte. Die RTM-Versuche ergaben durchschnittlich die höchsten Biegefestigkeiten.

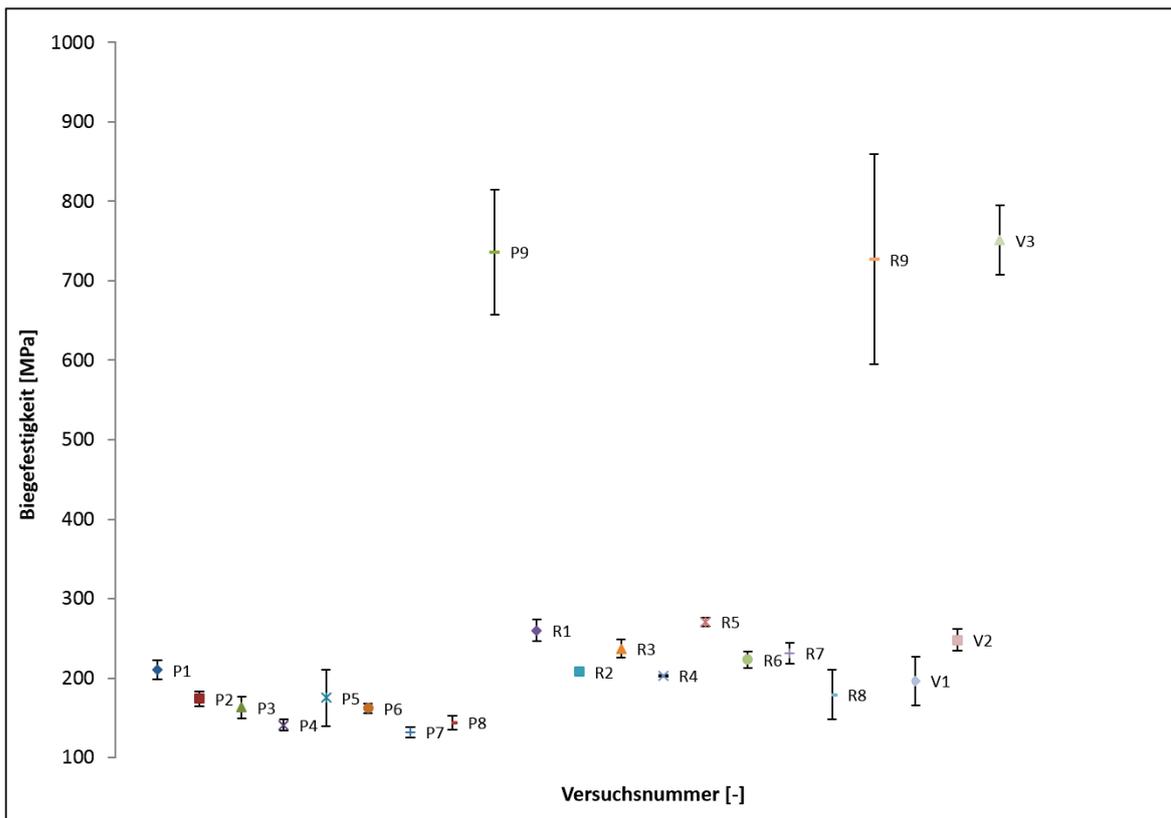


Abbildung 30: Mittelwert und Standardabweichung der Biegefestigkeiten der unterschiedlichen Versuchseinstellungen.

Durch die hohe Nachdruckeinstellung der RTM-Versuche sind signifikant höhere Biegefestigkeiten erreicht worden. Diese Tendenz ist bei sämtlichen Versuchen zu beobachten ( $R1 > R2$ ;  $R3 > R4$ ;  $R5 > R6$ ;  $R7 > R8$ ).

Die Spannungs-Dehnungsverläufe von ausgewählten Versuchen sind in Abbildung 31 zu sehen. Dabei ist ersichtlich, dass die spez. Biegefestigkeit der Voll-CFK Platte höher ist, als die von Mikrosandwichverbunden. Die VARI-Sandwichplatte weist zwar eine ähnliche Biegefestigkeit wie die RTM-Platte auf, jedoch ist die VARI-Platte dicker.

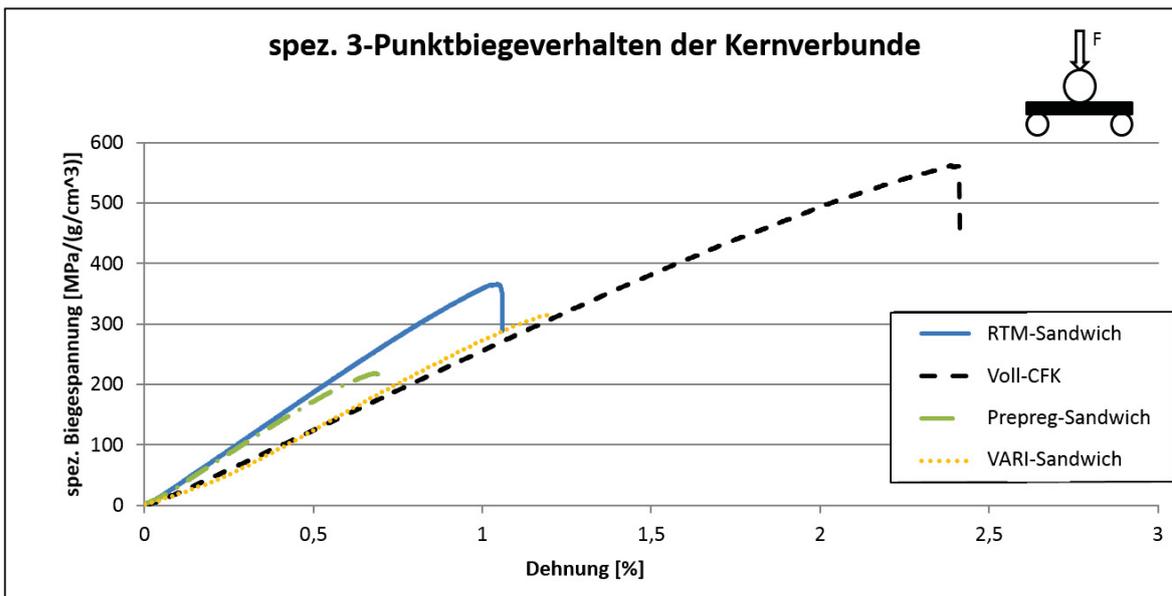


Abbildung 31: Vergleich der spez. Spannungs-Dehnungsverläufe ausgewählter Versuche.

Welche Parameter signifikante Auswirkungen auf die Biegeeigenschaften haben wurde anhand der Pareto-Methode [47] festgestellt. Es wird angenommen, dass 80% des Einflusses auf die Biegefestigkeit aus 20% der Einflussfaktoren resultiert. Abbildung 32 zeigt die Parameter, welche die Biegeeigenschaften der Prepreg- und der RTM-Verarbeitung beeinflussen.

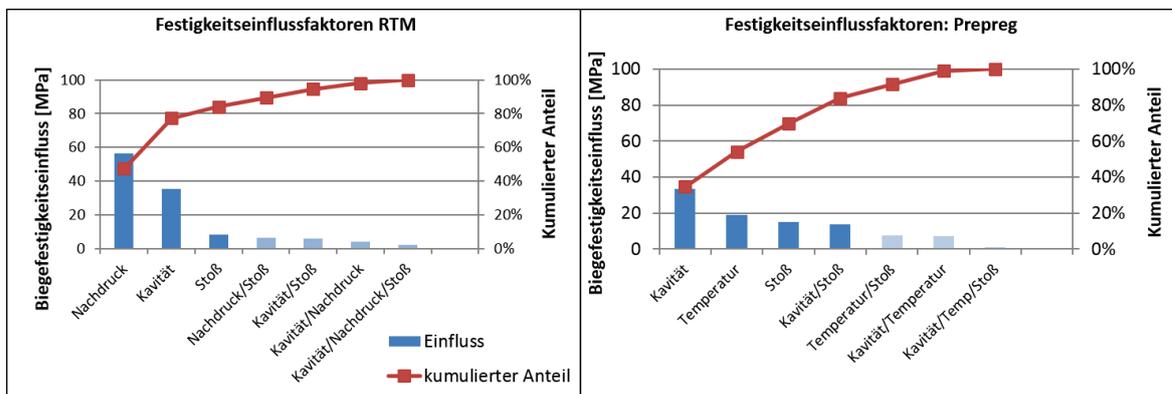


Abbildung 32: Einflussfaktoren auf die Biegefestigkeit der Mikrosandwichverbunde; links (RTM-Verfahren) und rechts (Prepreg-Verfahren).

Das Verfahren Vakuuminfusion ist nicht angeführt, da nur ein Parameter (mit und ohne Stoß) verändert wurde. Dass der Stoß im VARI-Verfahren eine signifikante Auswirkung hat kann bereits Abbildung 30 entnommen werden. Wie die Parameter

die Biegefestigkeiten der Sandwichplatten verändern ist in Abbildung 33 bis Abbildung 35 ersichtlich.

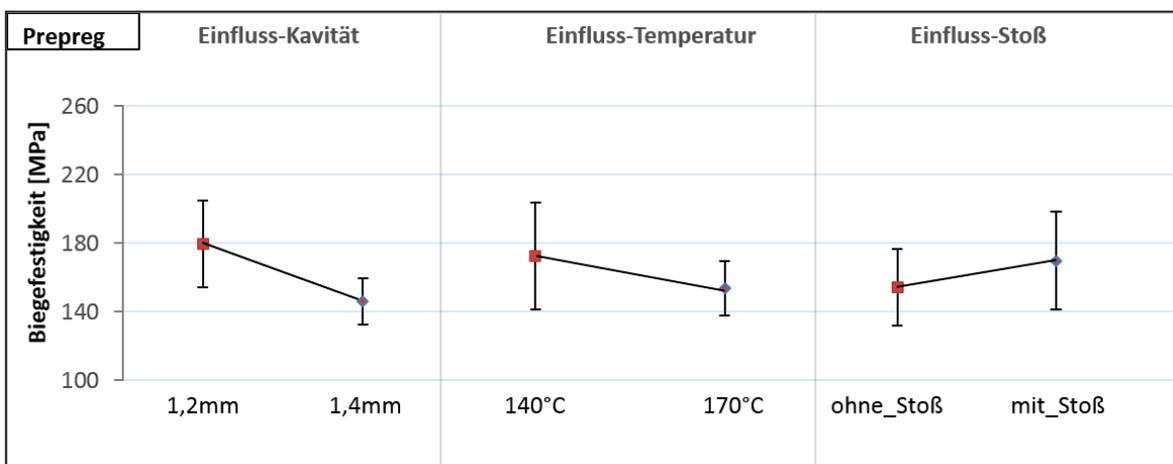


Abbildung 33: Auswirkung der Einflussfaktoren auf die Biegefestigkeit der Prepreg-Sandwichplatten.

Bei geringerer Dicke zeigen die Prepreg-Sandwichverbunde höhere Biegefestigkeiten. Eine Erklärung hierfür ist, dass die Verklebung zwischen den Lagen bei einer höheren Kompression besser funktioniert. Ein höherer Harzanteil im Prepreg würde, aufgrund der besseren Verklebung der Lagen, zu einem Anstieg der Biegefestigkeit bei der 1,4 mm Kavität führen.

Bei geringerer Temperatur zeigen die Sandwichplatten höhere Biegefestigkeiten. Dies ist ein Zeichen dafür, dass die Verarbeitungstemperatur von 170 °C zu hoch für das Harzsystem im Prepreg ist.

Die Biegefestigkeit nimmt im Mittel durch den Stoß geringfügig zu. Laut Abbildung 34 ist diese Tendenz bei der geringen Kavitätenhöhe zu beobachten. Ein Grund dafür ist das eingesetzte Glasvlies beim Stoßkaschierungsprozess. Bei der 1,4 mm Kavität bleibt die Biegefestigkeit nahezu konstant.

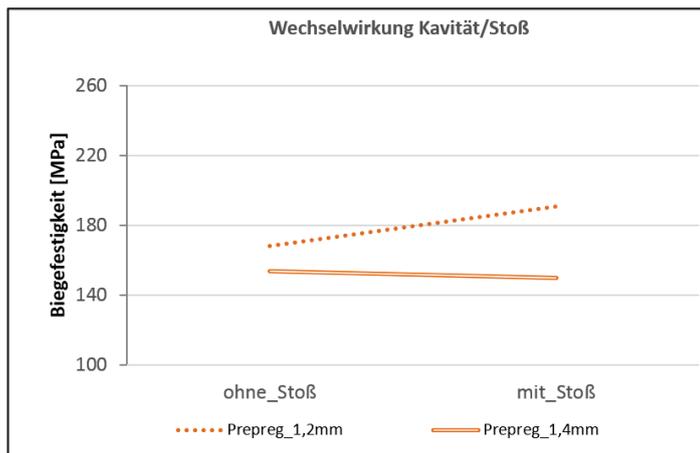


Abbildung 34: Wechseleinfluss zwischen Kavitätenhöhe und Stoß auf die Biegefestigkeit.

Bei den RTM-Sandwichplatten erhöht sich laut Abbildung 35 die Biegefestigkeit bei der 20 bar Nachdruckeinstellung um ca. 50 MPa. Durch den hohen Nachdruck kommt mehr Harz in den Verbundwerkstoff und die Biegekräfte werden effizienter von Decklage zu Decklage übertragen. Dass die Kavität von 1,4 mm höhere Biegefestigkeiten liefert, als die geringe Kavitätenhöhe ist ein Zeichen dafür, dass die Verklebung der einzelnen Lagen funktioniert.

Der Stoß beeinflusst die Biegeeigenschaften nicht signifikant, denn die Abweichung der Varianten ist innerhalb der Standardabweichung.

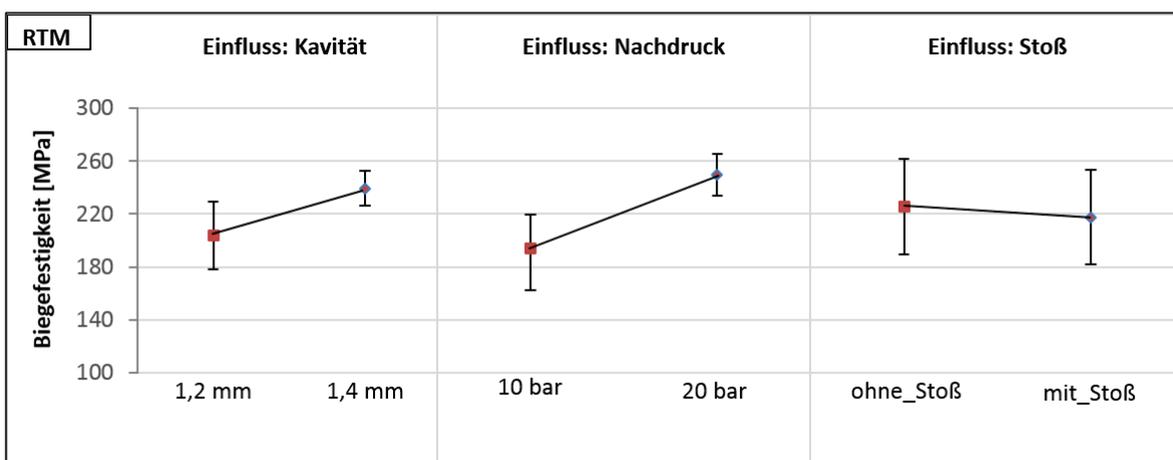


Abbildung 35: Wechseleinflüsse auf die Biegefestigkeit der RTM-Sandwichplatten.

### 5.2.4 Interlaminarer Festigkeitsvergleich

Um zu überprüfen, ob es bei Mode I Beanspruchungen zu einem Bruch im Schaum oder zu einem Versagen des Epoxidharzes in der Klebeebene kommt, wurden

Schälversuche durchgeführt. Aus der eingebrachten Energie im Schälversuch und des Rissfortschrittes kann unter Anwendung von Gleichung (3) auf die Energiefreisetzungsrate geschlossen werden. Im vorherrschenden Fall wird von der scheinbaren Energiefreisetzungsrate gesprochen. Dies resultiert aufgrund der Annahme, dass nicht die gesamte Energie in den Riss geht, sondern auch als elastischer Energieanteil die CF-Lagen aufbiegt, wie es Abbildung 36 zeigt.

$$G_{C,scheinbar} = \frac{\Delta U}{B\Delta a} \quad (3)$$

Die scheinbare Energiefreisetzungsrate ( $G_{C,scheinbar}$ ) ist als Energie ( $\Delta U$ ) definiert, die je Einheit entstehender Bruchfläche frei wird. „ $B$ “ beschreibt die Breite des Probekörpers und  $\Delta a$  den Rissfortschritt.



Abbildung 36: Aufbiegeverhalten der Sandwichlagen während eines Schälversuches.

Da diese Studie dazu dient die Verfahren zu vergleichen ist die Übereinstimmung mit Energiefreisetzungsraten der Literatur nicht zwingend notwendig. Auf die experimentelle Bestimmung der Nachgiebigkeit, um dadurch Korrekturmaßnahmen vorzunehmen, wurde verzichtet.

Es wurde angenommen, dass sich die scheinbare Energiefreisetzungsrate bei den Varianten mit und jenen ohne Stoß nicht unterscheidet. Die Ergebnisse der

Schälversuche inklusive des Dominanzmatrix-Rankings sind in Tabelle 11 zusammengefasst. Die hohe Standardabweichung der Schälversuche, mit der Ausnahme von Versuch „P4/P8“ und „R2/R6“, ist in Abbildung 37 ersichtlich.

Tabelle 11: Ergebnisse der scheinbaren Energiefreisetzungsraten aus den Schälversuchen.

Versuch	scheinbare Energiefreisetzungsrate	Rang
[-]	[N/m]	[-]
P1/P5	264	5
P2/P6	170	9
P3/P7	214	7
P4/P8	185	8
R1/R5	356	2
R2/R6	280	4
R3/R7	299	3
R4/R8	247	6
V1/V2	454	1

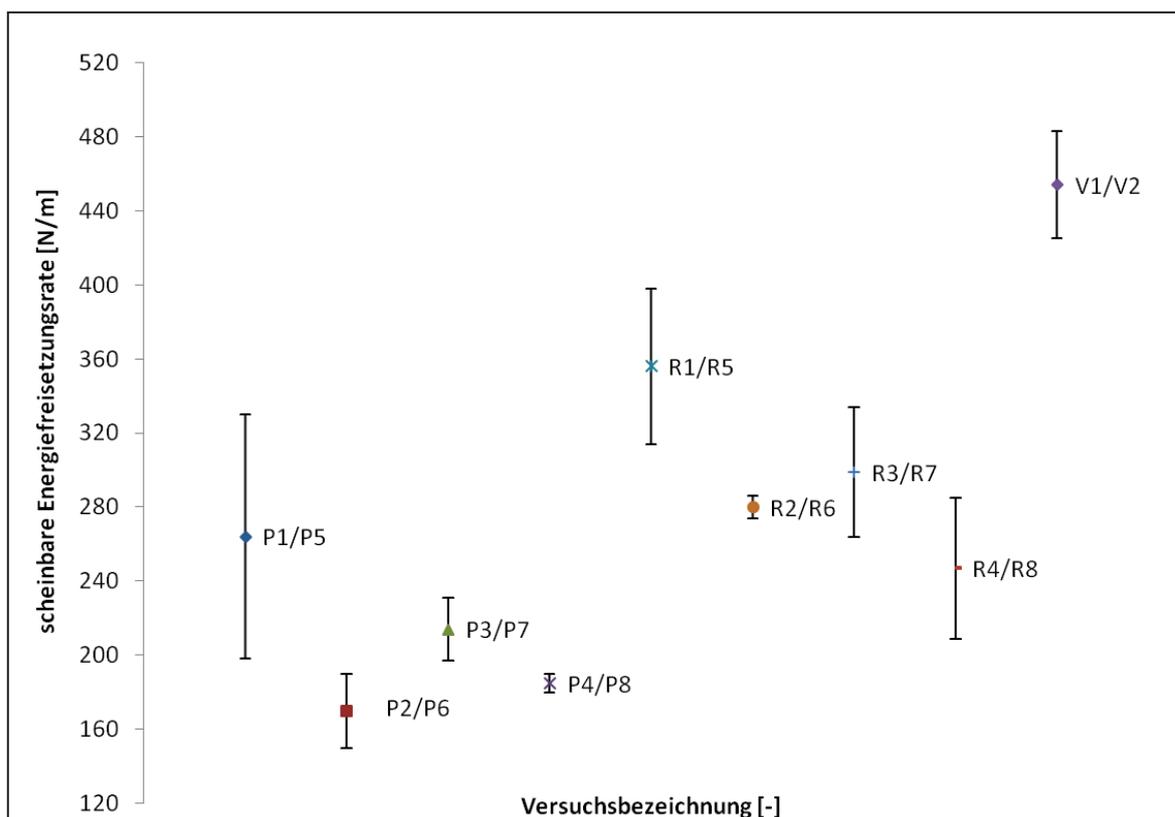


Abbildung 37: Mittelwert und Standardabweichung der scheinbaren Energiefreisetzungsraten aus den Schälversuchen.

Die Energiefreisetzungsrate der VARI-Sandwichplatten weist einen signifikant höheren Wert als jene der Platten aus den übrigen Verfahren auf. Ein Grund sind

die Harzstege im Schaumblatt. Die Spannung baut sich auf und der Riss wächst, wie in Abbildung 38 zu sehen ist, sprunghaft von einem „Harzsteg“ zum Nächsten. Dass der Riss nicht weiter durch das Epoxidharz wächst, ist ein Hinweis dafür, dass die Klebung der Schichten funktioniert. Ziel ist es eine Klebevariante zu finden, die eine starke adhäsive Verbindung zwischen Kleber/Kern und Kleber/Deckschicht schafft, sodass nicht die Klebverbindung versagt, sondern das Kernmaterial. Zwar baut sich die Spannung auch bei den übrigen zwei Verfahren auf damit der Riss fortschreitet, jedoch werden nicht so hohe Spannungen benötigt.

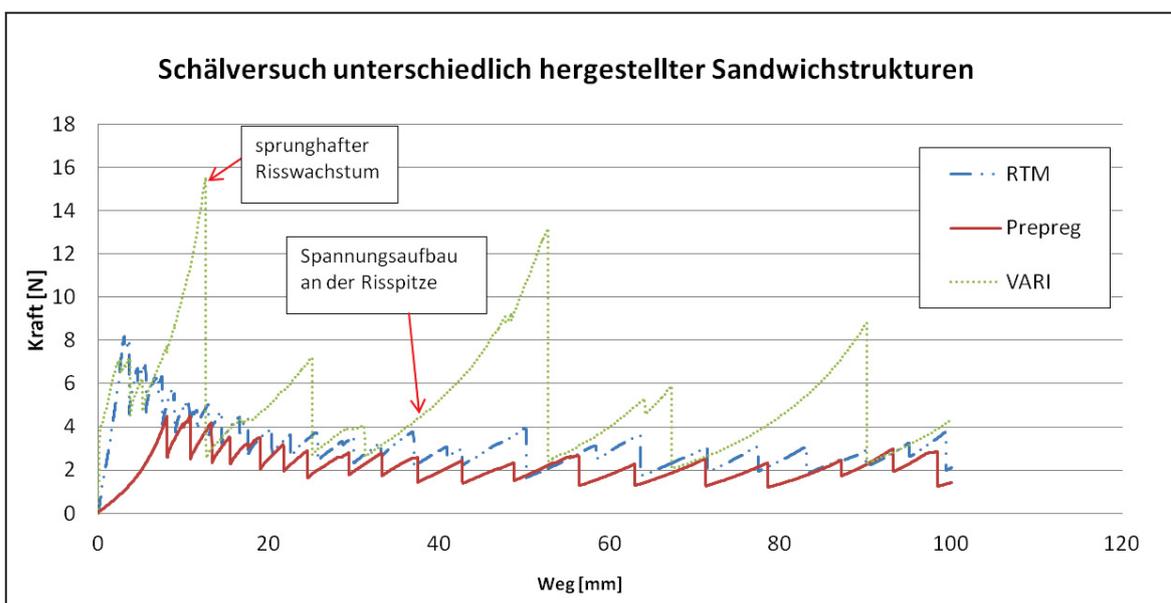


Abbildung 38: Vergleich der Kraft-Wegkurven der unterschiedlich hergestellten Sandwichplatten.

Die berechneten scheinbaren Energiefreisetzungsraten weisen Werte von 170–450 [N/m] auf. Laut [48] liegt die Energiefreisetzungsrate von Epoxidharzen, je nach Molekulargewicht bei Mode I Beanspruchung zwischen 100 und 300 [N/m]. Da die Energiefreisetzungsrate bei VARI höher liegt wird angenommen, dass bei den Schälversuchen auch ein elastischer Energieanteil vorhanden war. Vergleicht man die Verfahren Prepreg und RTM zeigt sich ein ähnlicher Verlauf nach etwa 10 mm Traversenweg. Ob das Verfahren Prepreg oder RTM bessere oder schlechtere Ergebnisse liefert lässt sich anhand dieser Ergebnisse nicht eindeutig sagen. Durch den Nachdruck im RTM-Verfahren kann das Harz besser in die offenen Poren der Schaumoberfläche eindringen und somit eine bessere Verbindung der Lagen erzielt werden. Dies ist eine Erklärung dafür, warum das RTM-Verfahren besser

funktioniert. Die Einflussfaktoren nach der Pareto-Methode sind Abbildung 39 zu entnehmen.

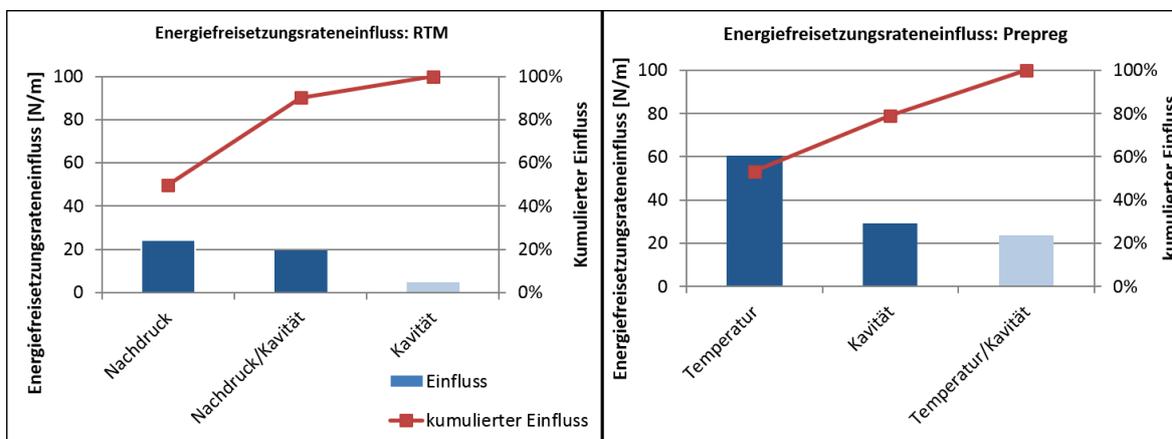


Abbildung 39: Einflussfaktoren auf die scheinbare Energiefreisetzungsraten der Mikrosandwichverbunde; links (RTM-Verfahren) und rechts (Prepreg-Verfahren).

Wie sich die Einflussfaktoren auf die scheinbare Energiefreisetzungsraten der Prepreg und RTM-Kernverbunde auswirken ist in Abbildung 40 und Abbildung 41 dargestellt.

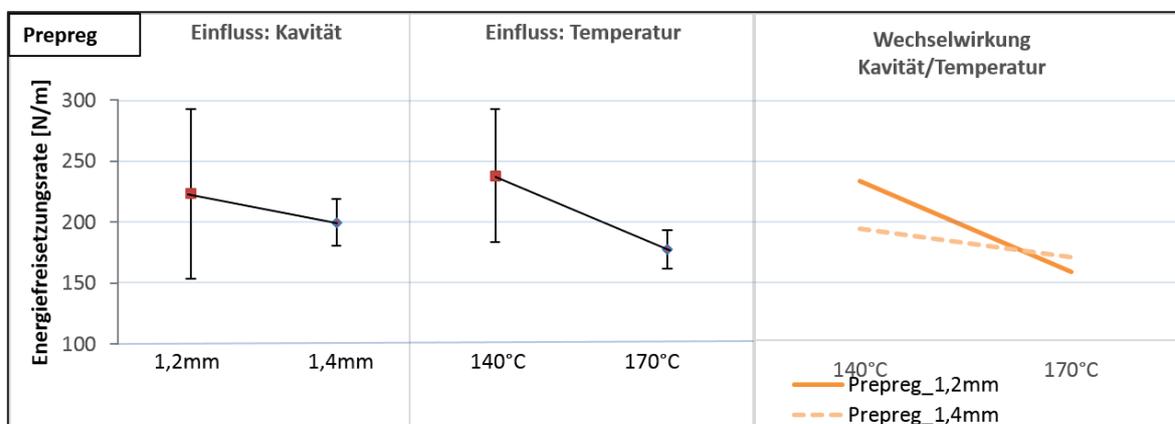


Abbildung 40: Auswirkung der Einflussfaktoren auf die scheinbare Energiefreisetzungsraten der Prepreg-Sandwichplatten.

Die Signifikanz der Kavität als Einflussfaktor auf die Energiefreisetzungsraten kann beim Prepregverfahren nicht klar bestätigt werden. Der Wechseleinfluss Temperatur/Kavität zeigt, dass bei der geringen Temperatureinstellung von 140°C der Einfluss der Kavität größer ist. Auch das RTM-Verfahren hat die Tendenz, dass bei geringerer Kavitätenhöhe die Energiefreisetzungsraten höher ist. Zusätzlich ist

bekannt, dass die Energiefreisetzungsrates zunimmt, wenn die Lagen stärker gepresst werden.

Die Sandwichpanele der 170°C Temperatureinstellung haben eine signifikant geringere Energiefreisetzungsrates als die mit der niedrigen T-Einstellung. Das Prepregmaterial hat eine Glasübergangstemperatur von 135°C. Ein Grund der geringen Energiefreisetzungsrates könnte die hohe Verarbeitungstemperatur sein.

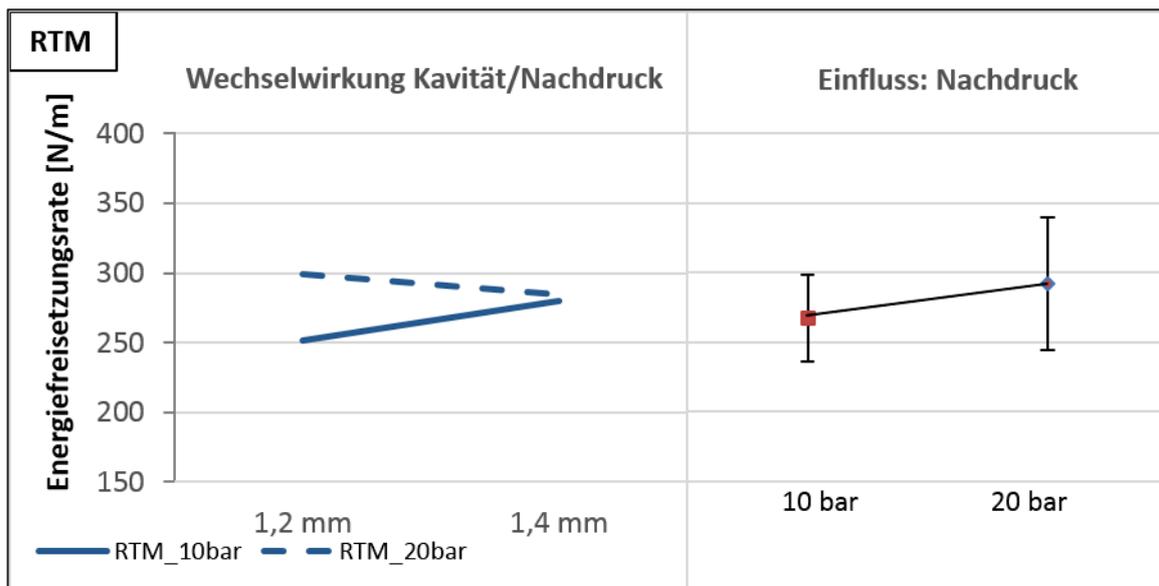


Abbildung 41: Auswirkung der Einflussfaktoren auf die scheinbare Energiefreisetzungsrates der RTM-Sandwichplatten.

Die Energiefreisetzungsrates ist beim RTM-Verfahren bei geringer Kavitätenhöhe stärker vom Nachdruck abhängig als bei der hohen Kavitätenhöhe. Die Energiefreisetzungsrates steigt mit größerer Kavitätenhöhe bei geringem Nachdruck. Bei 20 bar Nachdruck sinkt die Energiefreisetzungsrates mit steigender Kavitätenhöhe.

Ein positiver Einfluss der hohen Nachdruckeinstellung konnte beim RTM-Verfahren auch auf die Energiefreisetzungsrates nachgewiesen werden.

### 5.3 SWOT-Analyse

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit den Stärken und Schwächen der Verfahren zur Herstellung eines Mikrosandwichverbundes. Hierzu werden die Erkenntnisse aus der Literatur, zusammengefasst in Tabelle 2, die Ergebnisse der Werkstoffprüfungen, sowie die Erfahrungen hinsichtlich der Versuchsdurchführungen verwendet. Abbildung 42 bis Abbildung 44 zeigt die SWOT-Analysen der untersuchten Verfahren.

Prepreg-Verfahren	
<p style="text-align: center;"><b>Stärken</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>+ Fix einstellbarer Faservolumengehalt</li> <li>+ Hohe spez. Steifigkeit</li> <li>+ Geringe Dichte</li> <li>+ Stoßkaschierung am einfachsten, da die gefügten Schaumblätter am Prepregmaterial aufgeklebt werden und somit der Stoß zusätzlich fixiert ist</li> <li>+ Keine Perforation</li> <li>+ Geringe Investition</li> </ul>	<p style="text-align: center;"><b>Schwächen</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Geringe Schälfestigkeit</li> <li>- Geringe Biegefestigkeit</li> <li>- Begrenzte Lagerfähigkeit des Prepregs</li> <li>- Größte Logistikkosten wegen Lagerung</li> <li>- Geringe Drapierbarkeit da bereits eine gewisse Steifigkeit des getränkten Textils</li> <li>- Teures Prepregmaterial</li> </ul>
<p style="text-align: center;"><b>Möglichkeiten</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>+ Senken der Prepreg-Preise wenn große Mengen abgenommen werden</li> <li>+ Mittlere Seriengröße</li> <li>+ Mittlerer Automatisierungsgrad wenn Absatz größer wird</li> </ul>	<p style="text-align: center;"><b>Gefahren</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Einfach zu kopieren da geringe Investitionskosten wenig Know-how erforderlich</li> <li>- Wenn Aufträge ausbleiben, dann ist das Material nach einer bestimmten Zeit nicht mehr zu gebrauchen</li> </ul>

Abbildung 42: Stärken-Schwächen-Analyse des Prepregverfahrens zur Herstellung eines Mikrosandwich.

RTM-Verfahren	
<p><b>Stärken</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>+ Geringste Zykluszeiten möglich (snap-curing Systeme)</li> <li>+ Höchsten spez. Biegefestigkeiten</li> <li>+ Gute interlaminare Festigkeit</li> <li>+ Entformung des Bauteils durch Auswerfer unterstützbar</li> <li>+ Hoher Automatisierungsgrad</li> <li>+ Enge Dicken- &amp; Positionstoleranzen</li> <li>+ Hohe Reproduzierbarkeit (geringe Standardabweichung)</li> </ul>	<p><b>Schwächen</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Hohe Anschaffungskosten</li> <li>- Hoher Reinigungsaufwand</li> <li>- Geringe Flexibilität des Verfahrens</li> <li>- Race-Tracking im Randbereich des Bauteiles</li> </ul>
<p><b>Möglichkeiten</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>+ Große Seriengröße möglich</li> <li>+ Marktvorsprung da Kopieren teuer wenn Equipment nicht vorhanden</li> <li>+ Automatisierung sobald Nachfrage vorhanden ist</li> <li>+ Nutzen als Werkstoffverbund für Strukturbauteile</li> </ul>	<p><b>Gefahren</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Hohe Injektionsdrücke können Schaumstruktur zerstören und somit das Leichtbaupotential verringern</li> <li>- Bei komplexeren Strukturen wo Linienanguss nicht ausreicht muss der Schaumkern Perforiert werden um eine Tränkung zu erreichen</li> </ul>

Abbildung 43: Stärken-Schwächen-Analyse des RTM-Verfahrens zur Herstellung eines Mikrosandwich.

VARI-Verfahren	
<p><b>Stärken</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>+ Geringste Investitionskosten</li> <li>+ Höchste Schälfestigkeit</li> <li>+ Geringster Energiebedarf bei der Bauteilfertigung</li> <li>+ Nicht einfach zu kopieren da das Einbringen der Perforation Routine und Erfahrung erfordert</li> </ul>	<p><b>Schwächen</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Perforation notwendig</li> <li>- Geringste spez. Biegeeigenschaften</li> <li>- Höchste Dichte</li> <li>- Hoher Personalaufwand</li> <li>- Lange Zykluszeiten</li> <li>- Geringe Reproduzierbarkeit</li> </ul>
<p><b>Möglichkeiten</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>+ Prototypen</li> <li>+ Patentieren des Perforationsmusters macht die Kopie des Verfahrens noch schwieriger</li> <li>+ Rascher Start und ausbilden eines technischen Vorsprunges da die Investitionskosten sehr gering sind</li> <li>+ Füllen einer Marktnische mit geringem Risiko</li> </ul>	<p><b>Gefahren</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Krankenstand der Mitarbeiter bei der Ausbildung einer Harzallergie (aufgrund des Hautkontaktes)</li> <li>- Geringe Reproduzierbarkeit der Bauteilqualität kann zu Kundenreklamationen führen</li> </ul>

Abbildung 44: Stärken-Schwächen-Analyse des VARI-Verfahrens zur Herstellung eines Mikrosandwich.

Bei den SWOT-Analysen handelt es sich um ein systematisches Brainstorming, das die Möglichkeiten der Verfahren zum Vorschein bringt. Es ermöglicht dem Kunden die Potentiale der Verfahren zu sehen. Gibt es ein Lastenheft für ein geplantes Bauteil können die Strategien der SWOT-Analyse angewendet und weiter ausformuliert werden (z.B. SO-Strategie).

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurden Mikrosandwichpanele durch die Verfahren Prepregheißpressen, RTM und VARI hergestellt. Im Gegensatz zu traditionellen Sandwichstrukturen ist bei der Mikrobauweise die Kernschicht nicht erheblich dicker als die Decklagen. Unter Anwendung eines vollfaktoriellen Versuchsplan wurde der Einfluss der Verfahrensparameter auf die mechanische Performance der Sandwichverbunde analysiert. Anschließend wurden die Verfahrenseinstellungen in einer Dominanzmatrix verglichen und eine Rangfolge erstellt. Parallel zur Verarbeitung der Sandwichpanele wurde ein Verfahren entwickelt, um zwei Sandwichkerne zu verbinden. Auf Basis der Recherche und der Werkstoffkennwerte der gefertigten Mikroverbunde wurden SWOT-Analysen der Herstellungsverfahren erstellt.

Es konnte festgestellt werden, dass das Prepregverfahren die Kernverbunde mit der geringsten Dichte liefert. Beim RTM-Verfahren resultieren bei der geringen Kavitäteneinstellung ähnliche Dichtewerte wie beim Prepregverfahren. Bei höherer Kavitätentiefe wird mehr Harz in das Bauteil injiziert und die Dichte steigt. Weiters wurden größere Dichtewerte der RTM-Verbunde bei der hohen Nachdruckeinstellung gemessen. Das geringste Leichtbaupotential lieferte das VARI-Verfahren, weil, um eine Tränkung beider Decklagen zu erreichen, der PMI-Kern perforiert werden musste. Die höchsten spez. Biegefestigkeiten wurden beim RTM-Verfahren erzielt. Der Nachdruck hat beim RTM-Verfahren auch auf die spez. Biegefestigkeit Einfluss. Aus der 20-bar-Nachdruckeinstellung resultierten bei sämtlichen Versuchen größere Biegefestigkeiten als bei 10 bar Nachdruck. Beim Prepregverfahren wurden die geringsten Biegefestigkeiten gemessen. Dass die 1,4 mm Sandwichpanele geringere Biegefestigkeiten als die 1,2 mm Panele ergaben, ist ein Zeichen dafür, dass zu wenig Harz für die interlaminare Verbindung der Lagen vorhanden war. Zusätzlich waren die Biegefestigkeiten bei hoher Presstemperatur geringer. Die spez. Biegefestigkeit der VARI-Verbunde war aufgrund der höheren Dichte geringer als beim RTM-Verfahren. Aus dem Prepregverfahren resultieren die höchsten spez. Steifigkeiten. Diese ist vor allem von der Kavitätentiefe und der Wechselwirkung zwischen Temperatur und Stoß

abhängig. Die Steifigkeit von RTM-Panelen ist vom Nachdruck und vom Stoßparameter abhängig. Die höchste Schälfestigkeit wurde, aufgrund der Harzstege im VARI-Verfahren erreicht. Beim Prepregverfahren wurden die geringsten Schälfestigigkeiten erreicht. Es wird vermutet, dass die Harzmenge im Prepreg zu gering war, um eine ausreichende Verbindung zwischen Kern- und Deckschicht zu erreichen. Diese Hypothese kann durch Schliffbilder überprüft werden. Die Schälfestigkeit der RTM-Verbunde wurde hauptsächlich durch die Nachdruckeinstellung und die Wechselwirkung Nachdruck/Kavitätenhöhe beeinflusst.

#### Ausblick:

Mit den durchgeführten Experimenten konnte eine Rangfolge der Verfahrenseinstellungen erstellt werden. Ist ein Bauteillastenheft vorhanden, kann der Kunde das Ranking dazu nutzen, das für sein Produkt beste Verfahren auszuwählen. Die Stärken-Schwächen-Analyse ist dabei eine zusätzliche Hilfestellung. Die F&E hat die Aufgabe die Verfahren tiefer zu erforschen. In wieweit komplexe Strukturen durch ein Verfahren hergestellt werden können soll zukünftig geklärt werden. Durch Schliffbilder ist zu evaluieren, ob die Schaumstruktur beim Pressvorgang erhalten bleibt und die Verbindung zwischen Kern- und Deckschicht funktioniert. Hinsichtlich neuer Erkenntnisse gilt es die SWOT-Analysen zu adaptieren.

## 7 Verwendete Symbole und Abkürzungen

### 7.1 Symbole

<b>Symbol</b>	<b>Einheit</b>	<b>Bezeichnung</b>
$\rho$	[g/cm <sup>3</sup> ]	Dichte des Mikrosandwich
$\sigma_b$	[MPa]	Biegefestigkeit
$\sigma_{b;spez}$	[MPa/(g/cm <sup>3</sup> )]	Spezifische Biegefestigkeit
$G_{C,scheinbar}$	[N/m]	Scheinbare Energiefreisetzungsrate
$\phi$	[MPa/(g/cm <sup>3</sup> )]	Spezifischer E-Modul
$E$	[MPa]	E-Modul
$\Delta U$	[J]	Energie je Bruchfläche
$\Delta a$	[mm]	Rissfortschritt
$B$	[mm]	Breite des Probekörpers

### 7.2 Abkürzungen

<b>Abkürzung</b>	<b>Bezeichnung</b>
FKV	Faser Kunststoff Verbund
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
CFK	Carbonfaserverstärkter Kunststoff
LCM	Liquid Composite Molding
RTM	Resin Transfer Moulding
VARTM	Vacuum Assisted Resin Transfer Molding
VARI	Vacuum Assisted Resin Infusion
CF	Carbon Faser
SWOT-Analyse	Stärken-Schwächen-Möglichkeiten-Gefahren-Analyse

Prepreg	Preimpregnated
EP-Harz	Epoxid-Harz
FVG	Faservolumengehalt
PMI	Polymethacrylimid
PUR	Polyurethane
PS	Polystyrol
PE	Polyethylen
PVC	Polyvinylchlorid
PET	Polyethylenterephthalat
CNC	Computerized Numerical Control
ISO	internationale Organisation für Normung
ASTM	American Society for Testing Materials
CAMPUS	Computer Aided Material Preselection by Uniform Standards
F&E	Forschung und Entwicklung

## 8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Flussdiagramm des behandelten Themas, welches die notwendigen Schritte zeigt um die Herstellungsverfahren beurteilen zu können.....	4
Abbildung 2: Bestandteile eines Sandwich und chronologischer Ablauf bis zu der fertigen Struktur nach [13]. .....	8
Abbildung 3: Auftretende Kräfte in einem Balken unter Biegebelastung nach [12]. 8	
Abbildung 4: Die relative Steifigkeit und das Gewicht von Sandwichpaneelen im Vergleich zur massiven Bauweisen [14]. .....	9
Abbildung 5: Darstellung der unterschiedlichen Kernformen eines Sandwiches [4]. 11	
Abbildung 6: Harzzuführungskonzepte bei LCM-Verfahren; a.) Perforationen im Schaum, b.) Rillen im Schaum und c.) hochpermeable Schicht auf Werkzeugseite [4]. 15	
Abbildung 7: Schematischer Ablauf der Harzinjektion nach [27]. .....	16
Abbildung 8: Schematischer Ablauf des Prepregpressens nach [27]. .....	18
Abbildung 9: schematischer VARI-Aufbau zur Herstellung eines Sandwich und Benennung der Komponenten nach [23]. .....	19
Abbildung 10: Einteilung der Aufgaben eines Unternehmens in Funktionsbereiche nach [38]. 26	
Abbildung 11: Konkretisierung der strategischen Planung aus F&E. ....	27
Abbildung 12: Vorgehensweise der Beurteilung durch einen paarweisen Vergleich [39, 42]. .....	29
Abbildung 13: Allgemeines Beispiel einer SWOT-Analyse [44]. .....	30
Abbildung 14: Beheizbare Hydraulikpresse zur Fertigung der Sandwichplatten. 33	
Abbildung 15: Der Einzugsbereich der Doppelbandpresse(links) und die Steuereinheit (rechts). .....	32
Abbildung 16: Aufbau der Vakuuminfusion und Benennung von wichtigen Verfahrensentensilien.....	34

Abbildung 17: CNC-Cutter zur Generierung der Perforation im PMI-Schaumblatt.  
35

Abbildung 18: a.) Dreipunktbiegeaufbau nach ASTM C393-00; b.) Schälversuch nach ASTM D5528; c.) Messgegenstände für die Auswertung der Dichte einer Mikrosandwichplatte..... 37

Abbildung 19: Lagenaufbau der Voll-CFK Platte (links) und der Sandwichplatte (rechts). 37

Abbildung 20: Endformung des Prepregsandwich, dessen Schaumkern durch thermoplastischen Kleber modifiziert wurde..... 40

Abbildung 21: Prozessschritte die zur Kaschierung des Schaumstoßes notwendig sind. 41

Abbildung 22: Mikrosandwich-Prepregplatte mit Andeutung der Stoßrichtung durch Pfeile. 42

Abbildung 23: Vergleich der Dichteauswertungen der Verfahren Prepreg, RTM und VARI. 45

Abbildung 24: Darstellung der Einflussgrößen auf die Dichte der Kernverbunde. 46

Abbildung 25: Mittelwert und Standardabweichung der Biegefestigkeiten der unterschiedlichen Versuchseinstellungen. .... 52

Abbildung 26: Vergleich der spez. Spannungs-Dehnungsverläufe ausgewählter Versuche. 53

Abbildung 27: Einflussfaktoren auf die Biegefestigkeit der Mikrosandwichverbunde; links (RTM-Verfahren) und rechts (Prepreg-Verfahren). 53

Abbildung 28: Auswirkung der Einflussfaktoren auf die Biegefestigkeit der Prepreg- Sandwichplatten. .... 54

Abbildung 29: Wechseleinfluss zwischen Kavitätenhöhe und Stoß auf die Biegeeigenschaften..... 55

Abbildung 30: Wechseleinflüsse auf die Biegefestigkeit der RTM-Sandwichplatten. .... 55

Abbildung 31: Mittelwert und Standardabweichung der Steifigkeiten der Biegeversuche. 48

---

Abbildung 32: Einflussfaktoren auf die Steifigkeit der Mikrosandwichverbunde; links (RTM-Verfahren) und rechts (Prepreg-Verfahren). .....	49
Abbildung 33: Auswirkung der Einflussfaktoren auf die Steifigkeit der RTM-Sandwichplatten. ....	49
Abbildung 34: Auswirkung der Einflussfaktoren auf die Steifigkeit der Prepreg-Sandwichplatten. ....	50
Abbildung 35: Aufbiegeverhalten der Sandwichlagen während eines Schälversuches. ....	56
Abbildung 36: Mittelwert und Standardabweichung der scheinbaren Energiefreisetzungsraten aus den Schälversuchen. ....	57
Abbildung 37: Vergleich der Kraft-Wegkurven der unterschiedlich hergestellten Sandwichplatten. ....	58
Abbildung 38: Einflussfaktoren auf die scheinbare Energiefreisetzungsrate der Mikrosandwichverbunde; links (RTM-Verfahren) und rechts (Prepreg-Verfahren). 59	
Abbildung 39: Auswirkung der Einflussfaktoren auf die scheinbare Energiefreisetzungsrate der Prepreg- Sandwichplatten. ....	59
Abbildung 40: Auswirkung der Einflussfaktoren auf die scheinbare Energiefreisetzungsrate der RTM- Sandwichplatten. ....	60
Abbildung 41: Stärken-Schwächen-Analyse des Prepregverfahrens zur Herstellung eines Mikrosandwich. ....	61
Abbildung 42: Stärken-Schwächen-Analyse des RTM-Verfahrens zur Herstellung eines Mikrosandwich. ....	62
Abbildung 43: Stärken-Schwächen-Analyse des VARI-Verfahrens zur Herstellung eines Mikrosandwich. ....	62

## 9 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: In Sandwichbauweise eingesetzte Klebeverbindungen [5].	12
Tabelle 2: Vergleich von LCM-Technologien relativ zu Prepreg/Autoklav-Technologie von [4].	20
Tabelle 3: Übersicht der standardisierten Prüfverfahren für Sandwichkonstruktionen.	25
Tabelle 4: Übersicht der textilen Halbzeuge und der verwendeten Harzsysteme.	38
Tabelle 5: Versuchsplan für das Prepregpressen-Verfahren.	43
Tabelle 6: Versuchsplan für das Vakuuminfusions-Verfahren.	43
Tabelle 7: Versuchsplan für das RTM-Verfahren.	43
Tabelle 8: Ergebnisse der Dichtemessungen und tatsächliche Plattendicken.	44
Tabelle 9: Ergebnisse der Biegefestigkeiten aus 3-Punktbiegeversuche.	51
Tabelle 10: Ergebnisse der Steifigkeiten aus 3-Punktbiegeversuchen.	47
Tabelle 11: Ergebnisse der scheinbaren Energiefreisetzungsraten aus den Schälversuchen.	57
Tabelle 12: Paarweiser Dichtevergleich mit Ranking der Parametereinstellungen.	72
Tabelle 13: Paarweiser Vergleich der scheinbaren Energiefreisetzungsraten und Ranking der Parametereinstellungen.	72
Tabelle 14: Paarweiser Vergleich der spezifischen Biegefestigkeiten und Ranking der Parametereinstellungen.	73
Tabelle 15: Paarweiser Vergleich der spezifischen E-Moduli und Ranking der Parametereinstellungen.	1

## 10 Anhang

Tabelle 12: Paarweiser Dichtevergleich mit Ranking der Parametereinstellungen.

	P1/P5	P2/P6	P3/P7	P4/P8	P9	R1/R5	R2/R6	R3/R7	R4/R8	R9	V1/V2	V3
P1/P5	-	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0
P2/P6	0	-	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
P3/P7	0	0	-	1	0	0	0	0	0	0	0	0
P4/P8	0	0	0	-	0	0	0	0	0	0	0	0
P9	1	1	1	1	-	1	1	1	1	0	1	1
R1/R5	1	1	1	1	0	-	1	1	1	0	0	0
R2/R6	1	1	1	1	0	0	-	0	1	0	0	0
R3/R7	1	1	1	1	0	0	1	-	1	0	0	0
R4/R8	0	1	1	1	0	0	0	0	-	0	0	0
R9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-	1	1
V1/V2	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	-	0
V3	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	-
<b>Summe</b>	<b>7</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>1</b>	<b>4</b>	<b>6</b>	<b>5</b>	<b>8</b>	<b>0</b>	<b>3</b>	<b>2</b>
<b>Rang</b>	<b>5</b>	<b>3</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>11</b>	<b>8</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>4</b>	<b>12</b>	<b>9</b>	<b>10</b>

Tabelle 13: Paarweiser Vergleich der scheinbaren Energiefreisetzungsraten und Ranking der Parametereinstellungen.

	P1/P5	P2/P6	P3/P7	P4/P8	R1/R5	R2/R6	R3/R7	R4/R8	V1/V2
P1/P5	-	0	0	0	1	1	1	0	1
P2/P6	1	-	1	1	1	1	1	1	1
P3/P7	1	0	-	0	1	1	1	1	1
P4/P8	1	0	1	-	1	1	1	1	1
R1/R5	0	0	0	0	-	0	0	0	1
R2/R6	0	0	0	0	1	-	1	0	1
R3/R7	0	0	0	0	1	0	-	0	1
R4/R8	1	0	0	0	1	1	1	-	1
V1/V2	0	0	0	0	0	0	0	0	-
<b>Summe</b>	<b>4</b>	<b>0</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>7</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>3</b>	<b>8</b>
<b>Rang</b>	<b>5</b>	<b>9</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>3</b>	<b>6</b>	<b>1</b>





## 11 Literatur

- [1] Neitzel, M., Mitschang, P., Breuer, U.: Handbuch Verbundwerkstoffe: Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung; Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2014.
- [2] Fachmedien, S.: Handbuch Faserverbundkunststoffe; Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2010.
- [3] Windkraftanlagen | Carbon Composites e.V. - Das Netzwerk, URL: <https://www.carbon-composites.eu/de/branchen/carbon-in-den-industrie-branchen/windkraftanlagen/> (abgerufen am 16. März 2018).
- [4] Zahlen, P.: Beitrag zur kostengünstigen industriellen Fertigung von haupttragenden CFK-Großkomponenten der kommerziellen Luftfahrt mittels Kernverbundbauweise in Harzinfusionstechnologie; Logos-Verl., Dissertation, Berlin, 2013.
- [5] Zenkert, D.: An introduction to sandwich construction, Reprint; Engineering Materials Advisory Services Ltd, Warley, West Midlands, 1997.
- [6] Verbundwerkstoffe | Fiberline Composites, URL: <https://fiberline.de/verbundwerkstoffe> (abgerufen am 28. Februar 2018).
- [7] Meerkamm, H. (Hrsg.): Design for X, Beiträge zum 12. Symposium, Neukirchen, 11. und 12. Oktober 2001, Erlangen, 2001.
- [8] Henning, F.; Moeller, E. (Hrsg.): Handbuch Leichtbau, Methoden, Werkstoffe, Fertigung, München, 2011.
- [9] Hellerich, W., Baur, E., Harsch, G.: Werkstoff-Führer Kunststoffe, 10. Auflage; Hanser Verlag, München, 2010.
- [10] Ehrenstein, G. W.: Faserverbund-Kunststoffe, 2., völlig überarbeitete Auflage; Hanser, München, Wien, 2006.
- [11] Flemming, M., Ziegmann, G., Roth, S.: Faserverbundbauweisen; Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 1996.
- [12] Sirichai Torsakul: Modellierung und Simulation eines Verbunds von Sandwichplatten zur Entwicklung einer mechanischen Verbindungstechnik, Dissertation an der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule, 26. März/2007.

- [13] Pflug, J., Vangrimde, B., Verpoest, I.: Material efficiency and cost effectiveness of sandwich materials, INTERNATIONAL SAMPE SYMPOSIUM AND EXHIBITION, Longbeach, USA, 2003.
- [14] Starlinger, A.: Development of efficient finite shell elements for the analysis of sandwich structures under large deformations and global as well as local instabilities; Dissertation, VDI Verlag, 1991.
- [15] Bauteile mit einem Schaumkern und Faserverbunddeckschichten,  
URL: <https://www.kunststoffe.de/specials/faserverbundwerkstoffe/bauteile-mit-einem-schaumkern-und-faserverbunddeckschichten> (abgerufen am 9. Januar 2018).
- [16] Rohacell - Suter Kunststoffe AG, URL: <https://www.swiss-composite.ch/download/rohacell/> (abgerufen am 18. März 2018).
- [17] Lee, S.-T., Ramesh, N. S.: Polymeric foams: mechanisms and materials; CRC press, 2004.
- [18] About ROHACELL® — PMI FOAM MAKES LIGHTWEIGHT CONSTRUCTION EASY - ROHACELL® - High-performance structural foam cores, URL: <http://www.rohacell.com/product/rohacell/en/about/> (abgerufen am 18. März 2018).
- [19] DLR: Was hält das Auto der Zukunft zusammen? – DLR erforscht Füge-techniken für Sandwichstrukturen,  
URL: [http://www.dlr.de/dlr/desktopdefault.aspx/tabid-10081/151\\_read-17903/#/gallery/23049](http://www.dlr.de/dlr/desktopdefault.aspx/tabid-10081/151_read-17903/#/gallery/23049) (abgerufen am 9. Januar 2018).
- [20] Dr. Domenico Foglia, DI Michael Pichler, Markus Weber, Dr. DI Steffen Stelzer: Thin hard foam sheets for future lightweight applications, Traboch, Austria, 2017.
- [21] Davé, R. S., Loos, A. C.: Processing of composites; Hanser Publishers Munich, 2000.
- [22] PET Foam: Core Composites,  
URL: <http://www.corecomposites.com/products/core-materials/pet-foam.html> (abgerufen am 18. März 2018).

- [23] Dai, J., Pellaton, D., Hahn, H. T.: A comparative study of vacuum-assisted resin transfer molding (VARTM) for sandwich panels, *Polymer composites*, 6, 2003, S. 672–685.
- [24] Halimi, F., Golzar, M., Asadi, P., Beheshty, M. H.: Core modifications of sandwich panels fabricated by vacuum-assisted resin transfer molding, *Journal of Composite Materials*, 15, 2012, S. 1853–1863.
- [25] Truxel, A., Aviles, F., La Carlsson, Grenestedt, J. L., Millay, K.: Influence of face/core interface on debond toughness of foam and balsa cored sandwich, *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 3, 2006, S. 237–258.
- [26] Jhan, Y.-T., Lee, Y.-J., Chung, C.-H.: Resin flowing analysis in sandwich laminates under VARTM process, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 6, 2011, S. 533–545.
- [27] May-Pat, A., Avilés, F., Aguilar, J. O.: Mechanical properties of sandwich panels with perforated foam cores, *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 4, 2011, S. 427–444.
- [28] Kicki F. Karlsson, B. TomasÅström: Manufacturing and applications of structural sandwich components, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2, 1997, S. 97–111.
- [29] Stöven, T.: Beitrag zur Ermittlung der Permeabilität von flächigen Faserhalbzeugen, Dissertation; Inst. für Verbundwerkstoffe, Kaiserslautern, 2004.
- [30] Bareis, D., Heberer, D., Connolly, M.: Advances in urethane composites: Resins with tunable reaction times, *Composites*, 2011, S. 1.
- [31] Lauter, C., Frantz, M., Tröster, T.: Großserientaugliche Herstellung von Hybridwerkstoffen durch Prepregpressen, *Lightweight Design*, 4, 2011, S. 48–54.
- [32] M.A. Dweib, B. Hu, A. O'Donnell, H.W. Shenton, R.P. Wool: All natural composite sandwich beams for structural applications, *Composite Structures*, 2, 2004, S. 147–157.
- [33] Kissinger, C. J.: Ganzheitliche Betrachtung der Harzinjektionstechnik, Als Ms. gedr; IVW, Kaiserslautern, 2001.

- [34] Grellmann, W.; Seidler, S.; Altstädt, V. (Hrsg.): Kunststoffprüfung, München, 2005.
- [35] D30 Committee: Test Method for Flexural Properties of Sandwich Constructions , (2000), West Conshohocken, PA.
- [36] D30 Committee: Test Method for Shear Properties of Sandwich Core Materials , (2016), West Conshohocken, PA.
- [37] D30 Committee: Test Method for Mode I Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites , (2013), West Conshohocken, PA.
- [38] D30 Committee: Test Method for Density of Sandwich Core Materials , (2016), West Conshohocken, PA.
- [39] D30 Committee: Test Method for Compressive Properties of Unidirectional Polymer Matrix Composite Materials Using a Sandwich Beam , (2017), West Conshohocken, PA.
- [40] D30 Committee: Test Method for Flatwise Tensile Strength of Sandwich Constructions , (2016), West Conshohocken, PA.
- [41] Gälweiler, A., Malik, F.: Strategische Unternehmensführung, 3. Auflage; Campus Verlag, Frankfurt, New York, 2005.
- [42] Ehrlenspiel, K.: Integrierte Produktentwicklung, 3., aktualisierte Aufl.; Hanser, München, 2007.
- [43] Lindemann, U.: Methodische Entwicklung technischer Produkte; Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2005.
- [44] Wöhe, G., Döring, U.: Einführung in die allgemeine Betriebswirtschaftslehre, 24., überarb. und aktualisierte Aufl.; Vahlen, München, 2010.
- [45] Gusig, L.-O., Kruse, A.: Fahrzeugentwicklung im Automobilbau; Hanser, München, 2010.
- [46] Reuter, M.: Technischer und wirtschaftlicher Vergleich von Herstellungsverfahren bei der Entwicklung von Kunststoffhohlkörpern in Automobilanwendungen, Dissertation, 2013.
- [47] Günther, H.-O., Tempelmeier, H.: Produktion und Logistik, 12., verbesserte Auflage; BoD - Books on Demand, Norderstedt, 2016.

- [48] Koch, R., Mader, F., Schöbitz, B.: Das 80/20 Prinzip, 3., aktualisierte Aufl.; Campus-Verl., Frankfurt am Main, 2008.
- [49] Pearson, R. A., Yee, A. F.: Toughening mechanisms in elastomer-modified epoxies, *Journal of Materials Science*, 7, 1989, S. 2571–2580.