

Entwicklung und Herstellung von Hybridbauteilen aus Metallen und Faserverbundkunststoffen für den Leichtbau im Automobil

zur Erlangung des akademischen Grades eines
DOKTORS DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.)
der Fakultät für Maschinenbau
der Universität Paderborn

genehmigte
DISSERTATION

von
Dipl.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. Christian Lauter
aus Bielefeld

Tag des Kolloquiums: 07. Juli 2014
Referent: Prof. Dr. rer. nat. Thomas Tröster
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Werner Homberg

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Leichtbau im Automobil (LiA) an der Fakultät für Maschinenbau der Universität Paderborn. Sie ist das Resultat meiner Forschungstätigkeit, die zu wesentlichen Anteilen vom Europäischen Fond für regionale Entwicklung (EFRE) der Europäischen Union sowie dem Land Nordrhein-Westfalen im Rahmen des Ziel2-Programms gefördert wurde.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. rer. nat. Thomas Tröster für seine fachliche und persönliche Unterstützung, für seine kritische Auseinandersetzung mit meiner wissenschaftlichen Arbeit sowie für viele wertvolle Anregungen.

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Werner Homberg, Inhaber des Lehrstuhls für umformende und spanende Fertigungstechnik (LUF) an der Fakultät für Maschinenbau der Universität Paderborn, möchte ich mich für die Übernahme des Korreferates sowie das Interesse an und die konstruktiven Ratschläge zu meiner Arbeit bedanken.

Allen aktuellen und ehemaligen Kolleginnen und Kollegen des Lehrstuhls für Leichtbau im Automobil danke ich für die hervorragende Zusammenarbeit, den Teamgeist und – neben belebenden Freizeitaktivitäten – auch für die unzähligen fachlichen Diskurse. Mein spezieller Dank gilt Frau Meike Frantz, Herrn Jörg Niewel, Herrn Bernd Siewers, Herrn Dieter Thomas sowie Herrn Markus Thöne, die mich durch ihre intensive Auseinandersetzung mit meiner Arbeit und meiner Dissertation sehr unterstützt haben. Herrn Valentin Ulfing möchte ich für die oft recht spontane Unterstützung meiner Arbeit danken. Ferner gilt mein Dank allen studentischen Mitarbeitern sowie Studierenden, die ich im Rahmen einer wissenschaftlichen Arbeit betreuen durfte. Insbesondere möchte ich hier Herrn Tim Krooß, Herrn Andreas Nitsche sowie Herrn Mario Sarrazin hervorheben.

Im Rahmen verschiedener Forschungsprojekte hatte ich die Möglichkeit mit zahlreichen Fachleuten aus Industrie und Forschung zusammenzuarbeiten. Herausstellen möchte ich an dieser Stelle Herrn Dr. rer. nat. Marko Maciej von der Firma Benteler-SGL sowie Herrn Ulf Damerow vom LUF.

Danken möchte ich auch meiner Familie, dass sie mir den beschrittenen Ausbildungsweg ermöglicht hat.

Mein ganz besonderer Dank gilt Jeannette, die mich immer uneingeschränkt unterstützt hat.

Kurzzusammenfassung

Im Automobilleichtbau ist ein deutlicher Trend hin zu Multi-Material-Bauweisen festzustellen. Das im Rahmen der vorliegenden Dissertation untersuchte Prepreg-Press-Verfahren stellt eine Möglichkeit dar, Metall-FVK-Hybridstrukturen in großen Serien herstellen zu können. Für die Untersuchungen wurden drei zentrale Handlungsfelder identifiziert: 1. die Werkstoff- und Bauteileigenschaften, 2. der Herstellungsprozess und 3. der Produktentwicklungsprozess. Zunächst wurde die Eignung des Verfahrens zur Herstellung qualitativ hochwertiger FVK-Lamine im Vergleich zu gängigen Verfahren, wie dem Autoklavverfahren, festgestellt. Auch wurden verschiedene Fügeverfahren untersucht, um die Einzelkomponenten zu einem leistungsfähigen Verbund zu vereinen. Anschließend wurden relevante Aspekte des Pressvorgangs wie Prozessparameter oder das Aushärtungsverhalten untersucht, der Herstellungsprozess im Hinblick auf spezifische Anforderungen aus der Automobilindustrie konkretisiert und die Grenzen des Prozesses erfasst. Ferner wurden Werkzeug- und Fertigungskonzepte für eine spätere Umsetzung des Verfahrens entwickelt. Die mittels des Prepregpressens hergestellten Bauteile wiesen unter quasistatischer und schlagartiger Belastung ein hohes Leichtbaupotential im Vergleich zu reinen Stahlstrukturen auf. Die Erkenntnisse flossen schließlich in eine Methodik zur Entwicklung von Hybridstrukturen ein. Diese liefert einen Ansatz für einen systematischen Entwicklungsprozess.

Abstract

In automotive lightweight design, a clear trend is evident towards multi-material constructions. The present thesis examines the prepreg-press process, which constitutes one means of producing metal-FRP-hybrid structures in large series. Three main fields of action were identified for the investigations: 1st the properties of materials and structures, 2nd the manufacturing process and 3rd the product development process. First, the suitability of the process for producing high-quality FRP laminates was determined by comparison to conventional methods such as the autoclave process. In addition, various bonding technologies were studied in order to combine the individual components into a high-performance composite. Following this, relevant aspects of the press technology were investigated, including the process parameters and curing behavior, the production process was substantiated in terms of the specific requirements of the automotive industry and the limits of the process were ascertained. In addition, tooling and production concepts were developed for the future implementation of the method. The components manufactured by prepreg-press technology showed a high potential for lightweight design under quasi-static and impact loads by comparison to pure steel components. The results were finally channeled into a methodology for the development of hybrid structures. This provides an approach for a systematic development process.

Teilergebnisse dieser Arbeit sind in folgenden Veröffentlichungen erschienen:

LAUTER, C.; TRÖSTER, T.; SKÖCK-HARTMANN, B.; GRIES, T. und LINKE, M.: *Höchstfeste Multimaterialsysteme aus Stahl und Faserverbundkunststoffen*. Konstruktion: Zeitschrift für Produktentwicklung und Ingenieur-Werkstoffe, Ausgabe: 11-12, S. IW 8-IW 9, Springer VDI Verlag, Düsseldorf, 2010.

LAUTER, C.; SARRAZIN, M. und TRÖSTER, T.: *Multimaterialsysteme höchstfest verbunden*. Adhäsion, Ausgabe: 3, 55. Jahrgang, S. 39-43, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2011.

MARTEN, T.; LAUTER, C. und TRÖSTER, T.: *Automobilleichtbau durch höchstfeste Multimaterialsysteme*, Ingenieurspiegel, Ausgabe: 2, S. 67-69, Public Verlagsgesellschaft und Anzeigenagentur, Bingen, 2011.

LAUTER, C.; THOMAS, D.; FRANTZ, M.; NIEWEL, J. und TRÖSTER, T.: *Belastungsangepasste Strukturbauteile für Automobile aus höchstfesten Werkstoffen und Hybridwerkstoffen*, Werkstoffe in der Fertigung, Ausgabe: 2/April, S. 6-7, HW Verlag, Mering, 2011.

LAUTER, C.; DAU, J.; TRÖSTER, T. und HOMBERG, W.: *Manufacturing processes for automotive structures in multi-material design consisting of sheet metal and CFRP prepregs*. 16th International Conference on Composite Structures, Porto, 2011.

LAUTER, C.; FRANTZ, M. und TRÖSTER, T.: *Großserientaugliche Herstellung höchstfester Hybridwerkstoffe durch Prepregpressen*. Lightweight Design, Ausgabe: 4, S. 48-54, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2011.

DAU, J.; LAUTER, C.; DAMEROW, U.; HOMBERG, W. und TRÖSTER, T.: *Multi-material systems for tailored automotive structural components*. 18th International Conference on Composite Materials, Jeju Island, 2011.

LAUTER, C.; SKÖCK-HARTMANN, B.; GRIES, T.; TRÖSTER, T. und LINKE, M.: *Multi-material systems. High strength steels and fiber-reinforced plastics*. 6th European Conference on Steel and Composite Structures, Budapest, 2011.

FRANTZ, M.; LAUTER, C. und TRÖSTER, T.: *Advanced manufacturing technologies for automotive structures in multi-material design consisting of high-strength steels and CFRP*. 56th International Scientific Colloquium, Ilmenau, 2011.

LAUTER, C.; FRANTZ, M.; MARTEN, T.; TRÖSTER, T.; BACH, G. und SELIGER, G.: *Höchstfeste Hybridwerkstoffe aus Stahl und Faserverbundkunststoffen*, Konstruktion: Zeitschrift für Produktentwicklung und Ingenieur-Werkstoffe, Ausgabe: 9, S. IW 16-IW 17, Springer VDI Verlag, Düsseldorf, 2011.

FRANTZ, M.; LAUTER, C. und TRÖSTER, T.: *Schadensdetektion in hybriden Metall-Faserverbundkunststoff-Konstruktionen*, Konstruktion: Zeitschrift für Produktentwicklung und Ingenieur-Werkstoffe, Ausgabe: 10, S. IW 8-IW 10, Springer VDI Verlag, Düsseldorf, 2011.

KOCHANEK, C.; SIEWERS, B.; FRANTZ, M.; GLOWANIA, M.; LINKE, M.; LAUTER, C.; GRIES, T. und TRÖSTER, T.: *Hybrid FRP-Steel components for automotive applications*. 5th Aachen-Dresden International Textile Conference, Aachen, 2011.

TRÖSTER, T.; MARTEN, T.; THOMAS, D.; BLOCK, H.; LAUTER, C. und THÖNE, M.: *Automobilleichtbau mit innovativen Werkstoffen und Prozessen*, Forschungsforum Paderborn, Nr. 15, Ausgabe: 15, S. 30-38, Universität Paderborn, 2012.

LAUTER, C.; FRANTZ, M.; SIEWERS, B. und TRÖSTER, T.: *Hybrid structures for tailored structural automotive components*. JEC Composites Magazine, Nr. 69, Ausgabe: November/Dezember, S. 35-37, JEC Composites, Paris, 2011.

LAUTER, C.; WERNEKE, S.; SIEWERS, B. und TRÖSTER, T.: *Endkonturennaher Fertigung von höchstfesten Hybridbauteilen*. Lightweight Design, Ausgabe: 1, S. 53-58, Springer Vieweg Verlag, Wiesbaden, 2012.

SCHMIDT, H. C.; DAMEROW, U.; LAUTER, C.; GORNY, B.; HANKELN, F.; HOMBERG, W.; TRÖSTER, T.; MAIER, H. J. und MAHNKEN, R.: *Manufacturing processes for combined forming of multi-material structures consisting of sheet metal and local CFRP reinforcements*. 15th Conference of the European Scientific Association on Material Forming, Erlangen, 2012. In: Key Engineering Materials, Volumes 504-506, S. 295-300, Trans Tech Publications, Zürich, 2012.

REUTER, C.; FRANTZ, M.; LAUTER, C.; BLOCK, H. und TRÖSTER, T.: *Simulation and testing of hybrid structures consisting of press-hardened steel and CFRP*. 1st International Conference on Mechanics of Nano, Micro and Macro Composite Structures, Turin, 2012.

GORNY, B.; HANKELN, F.; LAUTER, C.; SCHMIDT, H. C.; DAMEROW, U.; MAHNKEN, R.; Maier, H. J.; TRÖSTER, T. und HOMBERG, W.: *Simulation and manufacturing of deep drawn parts reinforced by carbon fibre prepregs*. 1st International Conference on Mechanics of Nano, Micro and Macro Composite Structures, Turin, 2012.

LAUTER, C.; FRANTZ, M.; KOHLER, J. P. und TRÖSTER, T.: *Crash tests of hybrid structures consisting of sheet metal and local CFRP reinforcements*. 15th European Conference on Composite Materials, Venedig, 2012.

LAUTER, C.; SARRAZIN, M. und TRÖSTER, T.: *Joining technologies for hybrid materials consisting of sheet metal and carbon fibre reinforced plastics*. 1st International Conference of the International Journal of Structural Integrity, Porto, 2012.

LAUTER, C.; NIEWEL, J.; SIEWERS, B.; ZANFT, B. und TRÖSTER, T.: *Crash worthiness of hybrid pillar structures consisting of sheet metal and local CFRP reinforcements*. 15th International Conference on Experimental Mechanics, Porto, 2012.

LAUTER, C.; TRÖSTER, T.; BRANDIS, R. und GAUSEMEIER, J.: *Methodik für die Produktentstehung hybrider Leichtbaustrukturen*. Lightweight Design, Ausgabe: 6, S. 50-56, Springer Vieweg Verlag, Wiesbaden, 2012.

LAUTER, C.; FRANTZ, M. und TRÖSTER, T.: *Großserientaugliche Herstellung von Hybridwerkstoffen durch Prepregpressen*. In: ZIPSNER, T. (Hrsg.): *Jahrbuch lightweightdesign – JOT – adhäsion. Top-Innovationen aus dem Leichtbau, der Oberflächen- und Klebtechnik*. S. 18-24, Springer Vieweg Verlag, Wiesbaden, 2013.

SCHMIDT, H. C. und LAUTER, C.: *Stahl-CFK-Strukturen wie Tiefziehteile fertigen*, MaschinenMarkt Compositesworld, Sonderausgabe, Ausgabe: 3, S. 22-25, Vogel Business Media, Würzburg, 2013.

LAUTER, C.; HOCHSCHULZ, T.; FRANTZ, M. und TRÖSTER, T.: *Influences of Automotive Process Characteristics on Hybrid Structures*. 17th International Conference on Composite Structures, Porto, 2013.

TRÖSTER, T.; LAUTER, C. und REUTER, C.: *Crashworthiness of Hybrid Structures*. 4th International Conference on Integrity, Reliability and Failure, Funchal, 2013.

LAUTER, C.; KROOß, T. und TRÖSTER, T.: *Manufacturing of Hybrid Structures by Prepreg Press Technology*. 19th International Conference on Composite Materials, Montreal, 2013.

SIEWERS, B.; LAUTER, C.; NIEWEL, J. und TRÖSTER, T.: *Recycling of Automotive Sheet Metal-Fibre Reinforced Plastic-Hybrid Structures*, 19th International Conference on Composite Materials, Montreal, 2013.

HÜLSBUSCH, D.; KLEIN, M.; WALTHER, F.; BARTSCH, M.; HAUSMANN, J.; FRANTZ, M.; LAUTER, C. und TRÖSTER, T.: *Bewertung des Einflusses korrosiver Schädigung auf das Ermüdungsverhalten von CFK/Stahl-Hybridverbindungen*, DGM/DVM-Arbeitskreis Materialermüdung, Dortmund, 2013.

Lauter, C.; Tröster, T. und Reuter, C.: *Hybrid Structures Consisting of Sheet Metal and Fibre Reinforced Plastics for Structural Automotive Applications*. In: Elmarakbi, Ahmed (Hrsg.): *Advanced Composite Materials for Automotive Applications. Structural Integrity and Crashworthiness*. S. 149-174, Wiley Verlag, Chichester, 2013.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Problemanalyse.....	2
1.2	Zielsetzung.....	3
1.3	Vorgehensweise.....	4
2	Stand der Erkenntnisse	5
2.1	Leichtbau.....	5
2.2	Stahlwerkstoffe.....	9
2.3	Faserverbundkunststoffe.....	11
2.3.1	Begriffskonventionen.....	13
2.3.2	Verstärkungsfasern.....	14
2.3.3	Matrixwerkstoffe.....	16
2.3.4	Verstärkungshalbzeuge.....	21
2.3.5	Herstellverfahren.....	25
2.4	Werkstoffkombinationen.....	31
2.4.1	Einteilung.....	31
2.4.2	Hybridsysteme.....	32
2.5	Klebtechnisches Fügen.....	33
2.5.1	Bindungskräfte.....	33
2.5.2	Kleben von Faserverbundkunststoffen.....	35
2.6	Methodisches Gestalten.....	35
3	Prepregpressen	39
3.1	Verfahrensablauf.....	39
3.1.1	Herstellung angepasster Prepregs.....	39
3.1.2	Prepregpressen von Faserverbundkunststoff-Bauteilen.....	40
3.1.3	Indirektes Prepregpressen von Hybridbauteilen.....	41
3.1.4	Direktes Prepregpressen von Hybridbauteilen.....	42
3.2	Bewertung des Verfahrens.....	42
3.3	Einflussgrößen und Parameter.....	43
4	Experimentelle Methoden	45
4.1	Werkstoffe.....	45
4.1.1	Prepregs.....	45
4.1.2	Stahlwerkstoffe.....	46
4.1.3	Klebstoffsysteme.....	46
4.2	Trennmittel.....	47

4.3	Krafteinleitungselemente	48
4.4	Werkzeugmaschinen	48
4.5	Prüfsysteme	48
4.6	Versuchsplanung	49
5	Qualifikation des Prepregpressens	51
5.1	Mechanische Eigenschaften	51
5.1.1	Zugversuche	51
5.1.2	Biegeversuche	54
5.2	Eigenschaften des Faserverbundkunststoffs	58
5.3	Verbindung von Metall und Faserverbundkunststoff	62
5.3.1	Scherzugversuche	62
5.3.2	Einfluss unterschiedlicher Belastungswinkel	72
6	Herstellprozess für Hybridbauteile	81
6.1	Einflussgrößen auf die Bauteilqualität und -eigenschaften	81
6.2	Aushärtungsverhalten	82
6.2.1	Herstellerangaben und RGT-Regel	82
6.2.2	Dynamische Differenzkalorimetrie	83
6.2.3	Temperaturausbreitung im Prepreg	93
6.3	Untersuchung der Prozessparameter	96
6.3.1	Konsolidierungszeit	97
6.3.2	Konsolidierungstemperatur	98
6.3.3	Konsolidierungsdruck	99
6.3.4	Kombinationen unterschiedlicher Prozessparameter	101
6.3.5	Ableitung optimaler Prozessparameter	102
6.3.6	Umformgeschwindigkeit	103
6.4	Einfluss von Geometriemerkmalen	104
6.4.1	Flankenwinkel	104
6.4.2	Radien	107
6.5	Einfluss der Geometrie	110
6.5.1	Flächige Geometrien	111
6.5.2	Doppelsymmetrische und abwickelbare Geometrien	112
6.5.3	Doppelsymmetrische Geometrien	113
6.5.4	Napf-Geometrie	114
6.5.5	Halbkugel-Geometrie	115
6.5.6	Realbauteilähnliche Geometrie	115
6.6	Materialverhalten	116
6.6.1	Zwischenlagengleiten	116
6.6.2	Scherrahmenversuch	125

6.6.3	Einfluss der Vorwärmung und der Umformgeschwindigkeit	129
6.7	Thermische Eigenspannungen in Hybridwerkstoffen	130
6.7.1	Analytische Berechnung der thermischen Eigenspannungen	131
6.7.2	Abschätzung der real wirkenden thermischen Eigenspannungen.....	134
6.8	Werkzeugkonzepte.....	138
6.8.1	Offene Werkzeuge.....	138
6.8.2	Geschlossene Werkzeuge	140
6.8.3	Einfluss des Werkzeugkonzepts auf die mechanischen Eigenschaften.....	144
6.8.4	Steuerung des Materialflusses während der Umformung.....	145
6.8.5	Werkzeugkonzept zur Herstellung komplexer Geometrien.....	146
6.9	Bauteileigenschaften	147
6.9.1	Versuchsaufbauten und -auswertung	147
6.9.2	Untersuchungen an Demonstratorbauteilen.....	150
6.9.3	Untersuchungen an einer realbauteilähnlichen Geometrie.....	159
6.9.4	Zusammenfassung	163
6.10	Einfluss einer kathodischen Tauchlackierung	164
6.11	Gestaltung des Herstellungsprozesses	166
7	Methodik zur Entwicklung von Hybridstrukturen.....	169
7.1	Grundlagen der Produktentwicklung.....	169
7.1.1	Entwicklungsprozess	169
7.1.2	Vorgehensmodelle in der Produktentwicklung	170
7.1.3	Handlungsbedarf	172
7.2	Überblick über die Methodik	173
7.3	Methodik-Modul 1: Marktsituation und Trendanalyse.....	174
7.4	Methodik-Modul 2: Entwicklung von Hybridstrukturen.....	176
7.4.1	Generisches Vorgehensmodell.....	176
7.4.2	Spezifische Vorgehensmodelle.....	178
7.5	Methodik-Modul 3: Methodisches Gestalten	179
7.6	Methodik-Modul 4: Optimierung von Produkten.....	181
7.7	Methodik-Modul 5: Planung der Herstellungsprozesse	183
7.8	Methodik-Modul 6: Wissensbasis	186
8	Zusammenfassung und Ausblick.....	191
9	Abkürzungen und Symbole	197
10	Literaturverzeichnis	202

1 Einleitung

Weltweit ist ein Trend zu einer steigenden Mobilität von Personen und Gütern sowie einem zunehmenden Individualverkehr zu beobachten. Prognosen zeigen, dass dies auch zukünftig so sein wird. ^{[1] [2]} Vor dem Hintergrund begrenzter natürlicher Ressourcen und neuer Herausforderungen beim globalen Klimaschutz erfordert dies verstärkte Anstrengungen, um die sparsame Verwendung von Rohstoffen und die Reduzierung der Emissionen von Treibhausgasen voranzutreiben. Einen Beitrag hierzu kann der Personen- und Güterverkehr leisten. Eine um 100 kg verringerte Fahrzeugmasse führt beispielsweise zu einer Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs um etwa 0,3 bis 0,5 l/100 km und des CO₂-Ausstoßes um ca. 8,5 bis 14 g/km. ^{[3] [4]} Bei vielen Fahrzeugen ist jedoch real über die letzten Jahre ein Gewichtsanstieg zu verzeichnen. Dieser ist u. a. auf steigende Sicherheits- und Komfortanforderungen im Automobilbau zurückzuführen und betrug im Schnitt 100 kg pro Dekade. ^[4] Um diesem Trend entgegenzuwirken, bedarf es innovativer und vor allem ganzheitlicher Leichtbauansätze.

Das primäre Ziel des Leichtbaus ist die Reduzierung der Masse einer Struktur, wobei die übrigen Eigenschaften wie Steifigkeit oder Festigkeit möglichst konstant gehalten oder verbessert werden. ^{[5] [6]} Im Automobilbau werden im Kontext des für diese Arbeit relevanten Werkstoffleichtbaus insbesondere drei Entwicklungsrichtungen zur Gewichtsreduzierung verfolgt: der Einsatz von hoch- und höchstfesten metallischen Werkstoffen wie z. B. presshärtbaren Stählen, die Substitution klassischer Automobilwerkstoffe wie Stahl oder Aluminium durch Materialien mit besseren spezifischen Eigenschaften wie z. B. Faserverbundkunststoffe (FVK) und die Realisierung von Multimaterial- oder Hybridsystemen als Kombination verschiedener Werkstoffe wie z. B. Metall-Metall- oder Metall-FVK-Verbunden. ^{[1] [2] [7]} In der Regel wird bei allen Entwicklungsrichtungen ein belastungsangepasster Bauteilentwurf angestrebt, um eine optimale Werkstoffausnutzung zu realisieren. Ziel ist hierbei, dass der richtige Werkstoff mit geeigneten Eigenschaften in passender Menge dort eingesetzt wird, wo er gebraucht wird.

Gegenwärtig ist ein deutlicher Trend hin zu Multimaterial- oder Hybridstrukturen zu erkennen, da diese Leichtbauansätze große Leichtbaupotentiale beinhalten. ^{[1] [8] [9] [10]} Durch den gezielten Einsatz teurer Hochleistungswerkstoffe wie kohlenstofffaserverstärkter Kunststoffe und eine gute Materialausnutzung kommen zu den technischen auch wirtschaftliche Vorteile, wodurch sich attraktive Leichtbaukosten ergeben. ^{[11] [12]} Unter Verwendung großserientauglicher Herstellungsverfahren wie des Prepregpressens ist ein optimierter Leichtbau für Automobilanwendungen realisierbar. ^{[13] [14]} Dieses Verfahren zur Herstellung von Hybridbauteilen aus mindestens einer metallischen und einer FVK-Komponente stellt einen neuen, bisher nur wenig erforschten Ansatz dar. Dies bezieht sich sowohl auf die Bauteileigenschaften und den Herstellungsprozess als auch auf den Produktentwicklungsprozess.

1.1 Problemanalyse

Um das Gewicht von Automobilen nachhaltig zu verringern, bedarf es ganzheitlicher Leichtbauansätze. Einen wesentlichen Beitrag kann hier der Werkstoffleichtbau erbringen. Dieser kann durch Werkstoffe mit besseren spezifischen mechanischen Kennwerten erreicht werden. Beispielsweise ist durch die Verwendung von höchstfesten Stahlwerkstoffen eine Reduzierung der Blechdicke eines Bauteils möglich, wodurch das Strukturgewicht reduziert werden kann. Diesem Ansatz sind jedoch Grenzen bezüglich der Steifigkeit bzw. Stabilität gesetzt. Zu geringe Wanddicken können den Anforderungen hinsichtlich dieser Aspekte nicht mehr gerecht werden. Um weitere Leichtbaupotentiale zu erschließen, muss daher gegebenenfalls eine zumindest lokale Werkstoffvariation oder -kombination angestrebt werden.

Von allen Konstruktionswerkstoffen weisen viele FVK die besten spezifischen mechanischen Eigenschaftswerte und damit das größte Leichtbaupotential auf. Nachteilig sind allerdings beispielsweise die hohen Material- und Verarbeitungskosten. Diese sind auch eine Folge von langen Zykluszeiten zur Aushärtung der vielfach eingesetzten duroplastischen Matrixsysteme. Insgesamt ergeben sich damit für reine endlosfaserverstärkte Strukturen Anwendungsgebiete vor allem in hochpreisigen Automobilen oder im Motorsport. Durch den Hybridgedanken werden die Einzelwerkstoffe in einem Verbund symbiotisch miteinander kombiniert, so dass die jeweiligen Vorteile in den Vordergrund rücken. Für den Stahlwerkstoff sind dies beispielsweise das gutmütige bzw. duktile Versagensverhalten oder die Möglichkeit zur Einbindung der Bauteile in bestehende Baugruppen und Fahrzeugkonzepte. Der FVK weist eine hohe spezifische Energieaufnahme auf und lässt sich leicht lokal integrieren. Dadurch kann der Einsatz an FVK optimiert, aber gleichzeitig auch minimiert werden, was zu einer guten Materialausnutzung und verhältnismäßig geringeren Werkstoffkosten pro Bauteil führt. ^{[15] [16]}

Zur Fertigung der FVK-Komponenten bedarf es für eine Anwendung dieser Werkstoffe in automobilen Großserien eines neuen Ansatzes. Die Prepreg-Press-Technologie eröffnet diesbezüglich vielfältige Potentiale. Die Prepregs können kontinuierlich in einer hohen und gleichbleibenden Qualität gefertigt werden. Die Imprägnierung des Fasermaterials ist dabei unabhängig von der Verbundherstellung bzw. Aushärtung, was zu einem Zeitvorteil führt, da keine Harzinjektion in das Bauteil erfolgen muss. Durch angepasste Umformverfahren und eine optimierte Prozessführung kann der Hybridverbund mit geringen Taktzeiten hergestellt werden. Die dazugehörigen Kennwerte und Parameter müssen ebenso ermittelt werden wie die charakteristischen Merkmale der auf diese Weise hergestellten Verbunde.

In technischen Anwendungen wird bei der Entwicklung und Gestaltung von Produkten i. d. R. von artgleichen Werkstoffen ausgegangen. Hierfür existieren für gängige Konstruktionswerkstoffe weitreichende Erkenntnisse bezüglich des Materialverhaltens, der Verarbeitungs- und Herstellungsverfahren oder der Gestaltung. Durch die Kombination verschiedener Eigenschaften und/oder Werkstoffe innerhalb einer Struktur wird die Komplexität des Entwicklungsprozesses, der Herstellung und der Bauteileigenschaften

signifikant erhöht. Um diese Komplexität in der Praxis handhaben zu können, bedarf es einer geeigneten Entwicklungsmethodik. Bisherige Lösungen sind recht allgemein gehalten oder auf spezifische Anwendungsfälle optimiert. Eine Methodik oder eine durchgängige Wissensbasis für hybride Strukturen beispielsweise aus Metallen und FVK sind aktuell jedoch nicht vorhanden.

1.2 Zielsetzung

Die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit unterteilt sich der Problemanalyse entsprechend in drei Schwerpunkte: Zunächst soll als Grundlage für weitere Untersuchungen die grundsätzliche Eignung des Prepregpressens zur großserientauglichen Herstellung von hybriden Metall-FVK-Strukturen aufgezeigt werden. Anschließend soll der Prozess im Hinblick auf spezifische Anforderungen aus der Automobilindustrie konkretisiert und optimiert werden. Zuletzt soll ein Ansatz für eine Methodik zur systematischen und durchgängigen Entwicklung von Hybridstrukturen entwickelt werden.

Der erste Schwerpunkt der Zielsetzung, die Untersuchung der grundsätzlichen Eignung des Prepregpressens, soll Erkenntnisse liefern, ob dieses Verfahren geeignet ist, FVK- bzw. Hybrid-Bauteile in ausreichend hoher Qualität und unter einer Reduzierung der Kosten herzustellen. Der Nachweis soll anhand relevanter werkstofflicher und mechanischer Untersuchungen erbracht werden. Hierbei ist insbesondere auch ein geeignetes Referenzverfahren zu definieren, um die mittels des Prepregpressens erreichten Eigenschaften und Kennwerte einschätzen zu können. Daneben sollen verschiedene Fügekonzepte für die Verbindung von Stahl und FVK betrachtet und hinsichtlich ihrer Eignung bewertet werden, da die Verbindung zum einen wesentlich für die Eigenschaften des Verbunds ist und zum anderen eine Füge-technologie wie z. B. das Kleben einen Kostentreiber darstellen kann.

Der zweite Schwerpunkt zielt auf den Herstellungsprozess für Metall-FVK-Hybridbauteile. Hierbei sind die möglichen Verbesserungspotentiale im Vergleich zu konventionellen Prozessen und Konstruktionen aufzuzeigen. Das zentrale Ziel ist eine signifikante Reduzierung der Taktzeiten, um automobiler Strukturbauteile in großen Serien zu vertretbaren Kosten herstellen zu können. Es soll geklärt werden, welche Taktzeiten mit welchen Maßnahmen, Prozessrouten und Prozessparameterfenstern mit dem Prepregpressen zu erreichen sind. Ein Augenmerk soll auf das Aushärtungsverhalten des Matrixharzes gelegt werden, um beispielsweise auch eine gestufte Aushärtung in mehreren Schritten in Erwägung ziehen zu können, um die Taktzeiten zu reduzieren. Daneben sollen die herstellbaren Geometrien erfasst werden, um die Anwendbarkeit des Verfahrens für spätere Serienanwendungen abschätzen zu können. Im Hinblick auf eine Serienfertigung sollen Werkzeugkonzepte entwickelt werden, die eine möglichst nachbearbeitungsfreie Bauteilherstellung ermöglichen. Hierdurch lassen sich Kosten sowie Taktzeiten positiv beeinflussen. Zusammenfassend sind die gesammelten Erkenntnisse wie optimierte Prozessparameter unter realen Belastungsverhältnissen zu untersuchen, um die Eigenschaften mittels Prepregpressen hergestellter

Bauteile zu untersuchen und das Verbesserungspotential gegenüber konventionellen Bauteil- und Prozesslösungen aufzuzeigen.

Der letzte Schwerpunkt der Zielsetzung umfasst den Entwicklungsprozess von Hybridstrukturen. In diesem Kontext soll ein Ansatz für eine Methodik für den Leichtbau mit Hybridsystemen erarbeitet werden, die den späteren Anwender im Produktentwicklungsprozess unterstützt und einen systematischen Entwicklungsprozess ermöglicht. Die Methodik soll verschiedene Aspekte, wie die Produktplanung, den Produktentwicklungsprozess, den Produktoptimierungsprozess, die Planung der Herstellungsprozesse sowie deren Interdependenzen, umfassen. Auch die Bereitstellung und Aufbereitung von verfügbarem Wissen soll beachtet werden.

1.3 Vorgehensweise

Die vorliegende Arbeit ist in acht Kapitel gegliedert. Nach der Einleitung und der Problemanalyse folgt ein Überblick über den gegenwärtigen Stand der Technik (Kapitel 2). Neben dem Leichtbau wird auf verschiedene Leichtbauwerkstoffe sowie deren Verarbeitung eingegangen. Des Weiteren wird auf das klebtechnische Fügen eingegangen, welches insbesondere für Metall-FVK-Hybride eine bedeutende Rolle spielt. Das nachfolgende Kapitel widmet sich Aspekten des methodischen Gestaltens.

In Kapitel 3 wird der Prozess des Prepregpressens inklusive möglicher Verfahrensvarianten beschrieben, bewertet und mögliche Untersuchungsgegenstände dargelegt. Die zugrundeliegenden experimentellen Methoden werden hiernach in Kapitel 4 beschrieben. Die grundsätzliche Eignung des Prepregpressens zur großserientauglichen Herstellung automobiler Hybridstrukturen wird anhand verschiedener Untersuchungen nachgewiesen (Kapitel 5). Neben der Durchführung quasistatischer Zug- und Biegeversuche wird auf die Eigenschaften des hergestellten FVKs im Vergleich zum Autoklavverfahren eingegangen. Ein weiterer Punkt ist in diesem Kontext die Verbindung der Einzelkomponenten mithilfe klebtechnischer Fügeverfahren, welche mittels Scher- und Kopfzugversuchen untersucht wird. Kapitel 6 behandelt anschließend den Herstellungsprozess. Neben grundlegenden Untersuchungen zum Aushärtungsverhalten erfolgen u. a. eine Analyse der Prozessparameter, eine Betrachtung des Einflusses unterschiedlicher Geometrien, die Untersuchung des Materialverhaltens unter wechselnden Randbedingungen, die Entwicklung geeigneter Werkzeugkonzepte und die Betrachtung der Bauteileigenschaften unter quasistatischer und schlagartiger Belastung.

Sämtliche Erkenntnisse fließen anschließend in die Erarbeitung einer Methodik zur Entwicklung von Hybridstrukturen ein (Kapitel 7). Diese unterteilt sich in sechs Teilaspekte: die Erfassung der Marktsituation und von Trends, die Entwicklung von Hybridstrukturen, das methodische Gestalten, die Optimierung von Produkten, die Planung der Herstellungsprozesse sowie eine Wissensbasis. Die Arbeit beschließt mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick auf zukünftige Forschungsaktivitäten (Kapitel 8).

2 Stand der Erkenntnisse

2.1 Leichtbau

Leichtbau bezeichnet ein Konstruktionsprinzip, bei dem ein minimales Bauteilgewicht bei maximaler Ausnutzung des Werkstoffes unter Beibehaltung der Funktionserfüllung einer Struktur, z. B. einer definierten Steifigkeit und Festigkeit, angestrebt wird. ^[3] ^[17] Leichtbau ist oftmals mit erhöhten Kosten verbunden, da die Entwicklung, die Fertigung, die Erprobung und der Betrieb von Leichtbaustrukturen in den meisten Fällen aufwändiger und die verwendeten Werkstoffe kostenintensiver sind. ^[18] In der Praxis wird daher ein extremer Leichtbau nur dort betrieben, wo der Zugewinn an Nutzen und Funktionalität die Mehrkosten rechtfertigt, wie z. B. in der Luft- und Raumfahrt, im Motorsport oder bei Prototypen. ^[6] Für die meisten anderen Anwendungen wird i. d. R. ein optimierter Leichtbau angestrebt. Dabei wird das optimale Verhältnis aus Gewicht, Nutzen und Kosten eingestellt. ^[3] Die Automobilhersteller sind aktuell bereit, Mehrkosten für den Leichtbau von etwa 1,50 € pro eingespartem Kilogramm Gewicht im Kleinwagensegment bis hin zu 10,00 €/kg im hochpreisigen Segment in Kauf zu nehmen. In der Luftfahrtindustrie liegen diese Werte bei rund 1000 €/kg. ^[19]

Im Rahmen des Leichtbaus werden verschiedene Leichtbauprinzipien unterschieden. Bei dem Werkstoffleichtbau oder Stoffleichtbau wird ein Werkstoff durch einen anderen Werkstoff mit besseren spezifischen Eigenschaften substituiert. ^[3] ^[18] Dabei ist insbesondere auf werkstoffspezifische Besonderheiten und eine werkstoffgerechte Konstruktion zu achten. ^[17] Die konsequente Anwendung konstruktiver Maßnahmen zur Verwirklichung der Ziele des Leichtbaus wird unter konstruktivem Leichtbau oder Formleichtbau zusammengefasst. Hierzu zählen u. a. eine belastungsoptimierte Form der Bauteile, die Wahl geeigneter Querschnitte zur Verbesserung der Werkstoffausnutzung, die gezielte Materialeinsparung an wenig belasteten bzw. unbelasteten Bereichen oder eine räumliche Bauteilgestaltung. ^[3] ^[17] ^[18] ^[20] Bei der Anwendung des Systemleichtbaus wird die Höhe der Funktionsintegration so gewählt, dass diese nicht mit dem Leichtbau in Konflikt gerät. Der Bedingungsleichtbau basiert auf der genauen Kenntnis der Einsatzbedingungen sowie des Werkstoff- und Bauteilverhaltens an der Belastungsgrenze. Hierdurch können z. B. Sicherheitsfaktoren reduziert werden und somit Konstruktionen gewichtsoptimiert ausgeführt werden. ^[17] Die Wahl geeigneter Füge- und Fertigungsverfahren ist ein weiteres Prinzip des Leichtbaus. ^[3]

Die verschiedenen Leichtbauweisen zählen zu dem Systemleichtbau. Es werden die Differential-, die Integral-, die integrierende sowie die Verbundbauweise unterschieden. ^[6] Bei der Differentialbauweise handelt es sich um punktuell verbundene Einzelteile. Die Verbindungsstellen erhöhen zwar das Eigengewicht, ermöglichen aber die Kombination verschiedener Werkstoffe. Dies erlaubt eine belastungsgerechte Konstruktion, eine partielle Reparatur und eine bessere Recyclingfähigkeit. ^[3] Die Integralbauweise

ist dadurch gekennzeichnet, dass Komponenten aus einem einzigen, entsprechend geformten und beschaffenen Bauteil bestehen. ^[6] Diese Bauweise ist vorteilhaft für den Leichtbau, jedoch kann nur ein Werkstoff verwendet werden. Zudem sind die Werkstoff- und Werkzeugkosten höher. Bei der integrierenden Bauweise werden Einzelelemente zu einer organischen Einheit verbunden. Diese Bauweise zeichnet sich durch einen reduzierten Integrationsgrad aus, um die Vorteile der Integral- und der Differentialbauweise zu vereinen. ^[3] Die Verbundbauweise zeichnet aus, dass verschiedene Materialien nach ihren spezifischen Eigenschaften sinnvoll und zweckmäßig miteinander kombiniert werden. Auf diese Weise kann ein Bauteil optimal an die vorliegende Belastungssituation angepasst und gleichzeitig Gewicht eingespart werden. ^{[6] [20]} Die Verbundbauweise lässt sich in die Hybrid- und die Multimaterial-Bauweise unterteilen (Kapitel 2.4). Bei der Hybridbauweise werden unterschiedliche Werkstoffe auf Bauteilebene kombiniert. Hierdurch werden die Eigenschaften der Einzelwerkstoffe optimal ausgenutzt, was zu einem hohen Leichtbaupotential führt. Bei der Multimaterial-Bauweise erfolgt der Materialmix auf Baugruppenebene, d. h., für jede Komponente wird ein anforderungsgerechter Werkstoff eingesetzt. Diese Materialkombination bedingt geeignete Fügeverfahren. ^{[21] [220] [23]}

Die Masse findet sich als wesentlicher Einflussfaktor in fast allen Fahrwiderständen eines Automobils wieder. Entsprechend hat die Masse einen entscheidenden Einfluss auf die Fahreigenschaften. Ein hohes Gewicht wirkt sich auch negativ auf den Ressourcenverbrauch sowie die Emissionen aus. Eine Gewichtsreduktion um 100 kg kann bei einem Automobil den Kraftstoffverbrauch um ca. 0,3 bis 0,5 l/100 km und den CO₂-Ausstoß um 8,5 bis 14 g/km senken (Bild 2.1). ^{[1] [4] [8] [240] [25]} Trotz der Bestrebungen, das Fahrzeuggewicht zu reduzieren, ist seit längerer Zeit ein beständiger Trend zu immer höheren Fahrzeugmassen zu verzeichnen. ^{[26] [27]} Dies ist z. B. auf stetig steigende Sicherheits- und Komfortanforderungen zurückzuführen. ^[1] Auch der Einsatz von Akkumulatoren im Rahmen der Elektromobilität führt zu einem Mehrgewicht von etwa 250 bis 350 kg. ^[26]

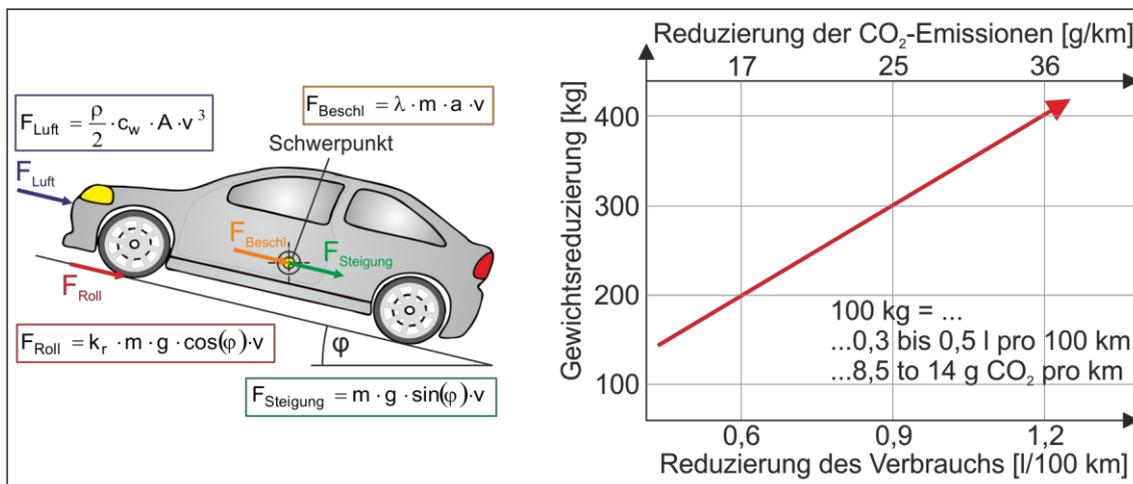


Bild 2.1 Fahrwiderstände und Einfluss des Gewichts auf den Kraftstoffverbrauch und die CO₂-Emissionen

In diesem Kontext hat die Europäische Union Regularien zum CO₂-Ausstoß für Neuwagen erlassen. Ab dem Jahr 2015 dürfen z. B. die durchschnittlichen CO₂-Emissionen von Neuwagen die Grenze von 125 g/km nicht mehr überschreiten. Für das Jahr 2020 ist ein Flottengrenzwert von 95 g/km vorgesehen worden. Bei Nicht-Einhaltung der festgeschriebenen Grenzen müssen entsprechende Bußgelder gezahlt werden. ^{[19] [27] [280]} Um den Energieverbrauch und die Emissionen von Automobilen zu senken, werden verschiedene Maßnahmen ergriffen. Hier sind z. B. effizientere Antriebssysteme und Motoren oder die Reduzierung des Leistungsbedarfs durch eine Senkung der Fahrwiderstände zu nennen. ^[29] Daneben setzen die Automobilhersteller vermehrt auf ganzheitliche Leichtbaukonzepte zur Gewichtsreduzierung, um der Forderung nach leichteren, verbrauchsminimierten Fahrzeugen bei gleichzeitig steigenden Komfort- und Sicherheitsanforderungen gerecht zu werden. ^[1]

Im Automobilbau spielen noch immer metallische Werkstoffe eine dominierende Rolle. In dieser Gruppe sind insbesondere Stahlwerkstoffe von besonderer Bedeutung, da diese vergleichsweise günstig und gut zu verarbeiten sind. Ein wichtiger Ansatz im Karosserieleichtbau ist der Werkstoffleichtbau. In diesem Kontext sind aktuell drei wesentliche Trends offensichtlich. Zum Ersten die Verwendung höchst- und ultrahöchstfester metallischer Werkstoffe ^{[30] [31]}, zum Zweiten die Substitution z. B. von Stahlwerkstoffen durch Aluminium, Magnesium oder FVK ^{[5] [32] [33]} und zum Dritten die Verbindung unterschiedlicher Werkstoffe zu Multimaterialsystemen oder Hybridwerkstoffen ^{[33] [34]}.

Durch die Verwendung von höchst- und ultrahöchstfesten metallischen Werkstoffen lässt sich Leichtbau realisieren, da Strukturen aufgrund der höheren Festigkeiten und somit besserer spezifischer Eigenschaften mit geringeren Wandstärken ausgeführt werden können. ^{[2] [5] [35] [36]} Sobald eine kritische minimale Wandstärke erreicht ist, kann es jedoch zu Stabilitäts- bzw. Steifigkeitsproblemen kommen. ^[34] In diesem Kontext steht im Fahrzeugbau eine große Auswahl von Stahlwerkstoffen mit unterschiedlichen Festigkeitsniveaus für verschiedene Anforderungen zur Verfügung. So werden z. B. in crashrelevanten Bauteilen höchst- und ultrahöchstfeste Stähle verwendet, die eine Aufnahme der Crashenergie auf kürzeren Wegen ermöglichen als weniger feste Stahlgüten. Auch bei Aluminiumwerkstoffen führt eine Erhöhung der Festigkeiten zur Eröffnung neuer Leichtbaupotentiale. Verbesserte Verarbeitungseigenschaften können diese zusätzlich steigern.

Eine weitere Möglichkeit, das Fahrzeuggewicht zu reduzieren, stellt die Verwendung neuer Werkstoffe dar. So zeichnen sich FVK u. a. durch sehr hohe spezifische Steifigkeits- und Festigkeitswerte in Faserrichtung aus, die denen der konventionellen Automobilwerkstoffe Stahl und Aluminium deutlich überlegen sind (Bild 2.2). Auch sind Funktionsintegrationen einfacher realisierbar. ^{[18] [25] [37] [38] [39] [40] [41]} Durch einen konsequenten Einsatz von FVK im Automobilbau erschließen sich enorme Gewichteinsparungspotentiale von teilweise bis zu 70 %. ^{[18] [42] [43]} Demgegenüber stehen z. B. sehr hohe Werkstoff- und Produktionskosten sowie lange Zykluszeiten. ^{[13] [44] [45]} Aus diesen

Gründen beschränkt sich die Anwendung von FVK im tragenden Karosseriebereich im Automobil aktuell auf Nischenanwendungen wie Technologieträger, Sportwagen, Sonderserien oder Rennsportfahrzeuge. ^{[1] [39] [44] [46]} Von zentraler Bedeutung für den Durchbruch der Faserverbundtechnologie im Automobilbau ist die Verfügbarkeit von großserientauglichen und wirtschaftlichen Produktionsverfahren für FVK-Bauteile. ^{[9] [44] [47]}

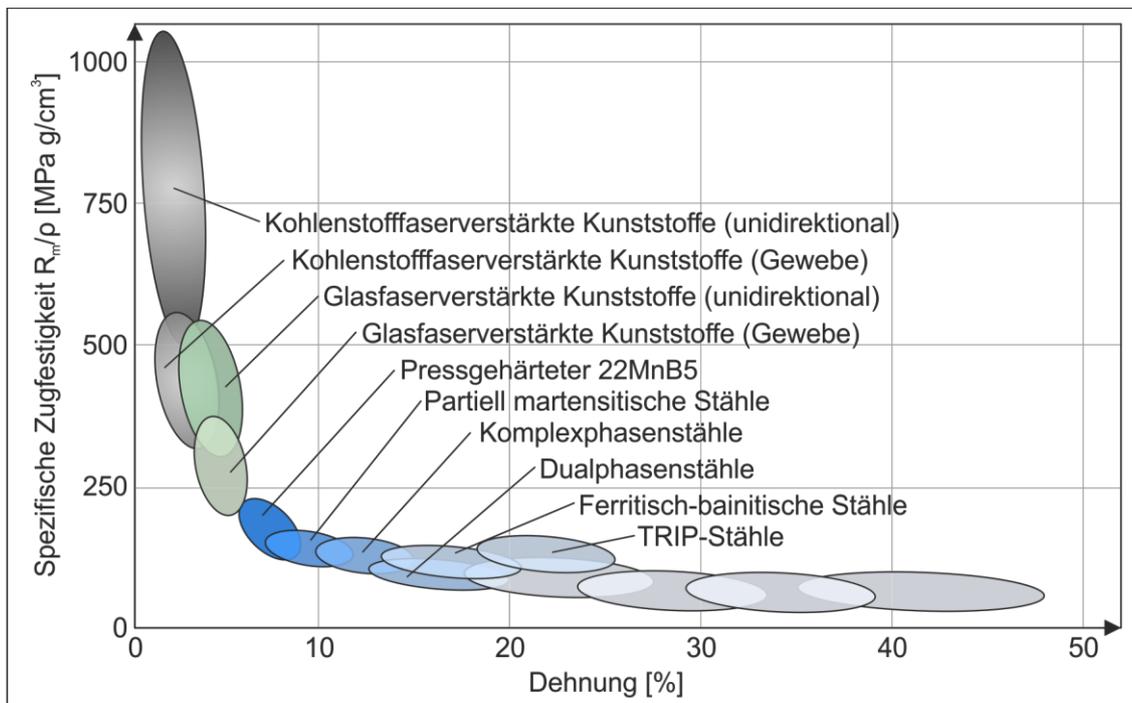


Bild 2.2 Mechanische Eigenschaften verschiedener Werkstoffe

Einen Mittelweg zwischen der kostengünstigen Metallbauweise und der tendenziell leichteren, aber kostenintensiven FVK-Bauweise bieten Multimaterialsysteme und Hybride. Hierbei werden unterschiedliche Werkstoffe, wie Aluminium, Magnesium, Stähle und FVK, sowie verschiedene Fertigungsverfahren, wie Blechumformen, Druckgießen oder Strangpressen, und angepasste bzw. optimierte Bauweisen miteinander kombiniert. ^{[1] [48]} Durch derartige Mischbauteile z. B. aus kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen und Stahl oder Aluminium kann das Kosten-Nutzen-Verhältnis beim Einsatz von FVK im Automobilbau verbessert werden. Diese Strukturen haben den Vorteil, dass die kostenintensiven FVK nur lokal in metallische Grundstrukturen eingebracht werden (Bild 2.3). ^{[49] [50]} Auf diese Weise lassen sich die Bauteileigenschaften optimal an die Belastungen anpassen und hochbelastete Bauteilbereiche gezielt verstärken. ^[51] Durch eine entsprechende Auslegung der Verstärkungskomponente wird eine optimale Werkstoffausnutzung des FVKs realisiert. ^[52]

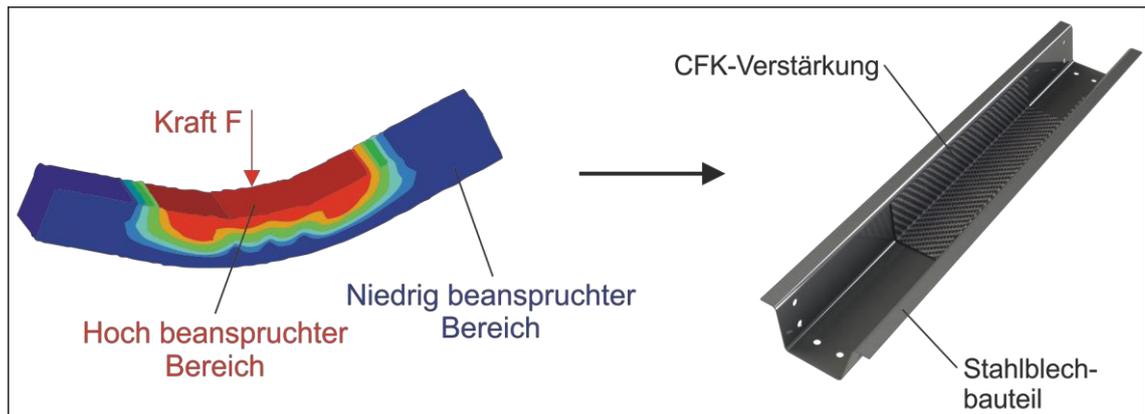


Bild 2.3 *Inhomogene Beanspruchung einer Balkenstruktur und daraus abgeleitete belastungsangepasste Hybridstruktur*

2.2 Stahlwerkstoffe

Im Automobilbau wird eine Vielzahl verschiedener metallischer Werkstoffe eingesetzt. Neben Aluminium spielen Stahlwerkstoffe für strukturelle Anwendungen aufgrund ihres ausgewogenen Eigenschaftsprofils und ihrer vergleichsweise geringeren Kosten immer noch eine zentrale Rolle. ^[220] ^[53] ^[54] Moderne Blechwerkstoffe eröffnen hierbei neue Leichtbaupotentiale. ^[55] Sowohl der Werkstofftyp als auch die Werkstoffgüte richtet sich nach dem jeweiligen Anwendungsfall. In automobilen Seitenstrukturen werden überwiegend höchstfeste Güten mit einer Festigkeit von bis zu 1900 N/mm^2 verwendet. Hierdurch können beispielsweise Intrusionen im Crashfall minimiert werden. Dagegen werden im Vorderwagen hochfeste Güten verbaut, die eine Energieaufnahme auf einem größeren Weg und damit einen für die Insassen verträglichen Energieabbau ermöglichen (Bild 2.4). ^[31] ^[56] ^[57]

Die Eigenschaften von Stählen können durch die Zugabe von Legierungselementen, durch eine gezielte Wärmebehandlung oder durch die Ausnutzung von Verfestigungsmechanismen variiert werden. Legierungselemente können neben Kohlenstoff z. B. Stickstoff, Phosphor, Mangan, Silizium, Nickel oder Bor sein. Die Legierungselemente werden hinzugefügt, um bestimmte Eigenschaften zu erzeugen oder zu verbessern und unerwünschte zu unterbinden oder zu vermindern. Legierungselemente beeinflussen u. a. die Festigkeit, die Härte, die Sprödigkeit, die Korrosionsbeständigkeit oder die Schweißseignung. Durch Wärmebehandlungsverfahren wie Glühen oder Härten werden Veränderungen im Gefüge initiiert. Hierdurch werden ebenfalls die mechanischen Eigenschaften beeinflusst. Zu den Verfestigungsmechanismen zählen z. B. die Kaltverfestigung, die Versetzungsverfestigung oder die Mischkristallverfestigung. ^[3] ^[58]

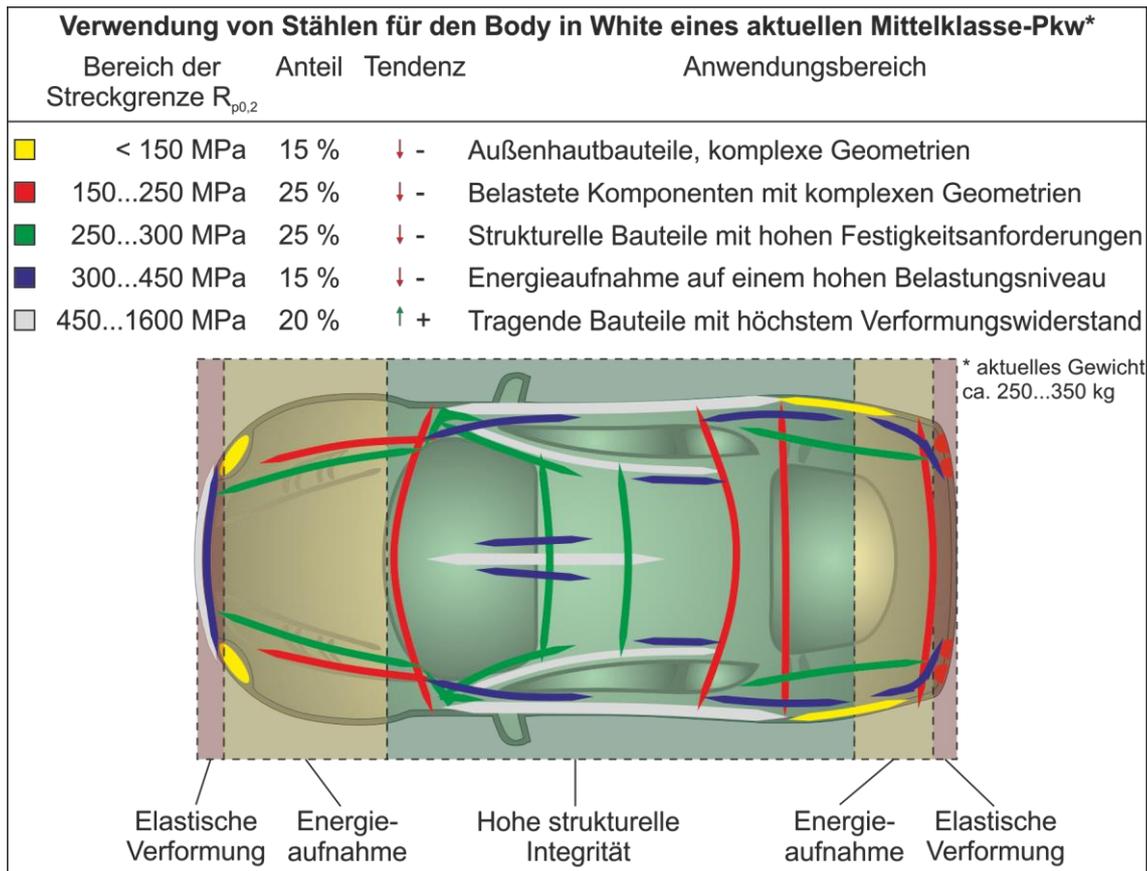


Bild 2.4 Verwendung von Stählen im Body in White eines aktuellen Mittelklasse-Pkw

Stahlwerkstoffe werden üblicherweise in verschiedene Festigkeitsklassen eingruppiert, wobei die Einteilung variieren kann. Weiche Stähle besitzen eine Zugfestigkeit unter 300 N/mm^2 , höherfeste Stähle eine Zugfestigkeit zwischen 300 und 500 N/mm^2 , hochfeste Stähle eine Zugfestigkeit zwischen 500 und 950 N/mm^2 und höchstfeste Stähle eine Zugfestigkeit von über 950 N/mm^2 .^[55]

Bei den Stahlwerkstoffen werden je nach Einsatzgebiet verschiedene Sorten unterschieden, wie z. B. allgemeine Bau- und Feinkornbaustähle, Vergütungs-, Einsatz- und Nitrierstähle oder warmfeste und hochwarmfeste Stähle. Neben solchen Typen werden im Fahrzeugbau verschiedene höher-, hoch- und höchstfeste Leichtbaustähle eingesetzt. Hierzu zählen beispielsweise mikrolegierte Tiefziehgüten, Bake-Hardening-Stähle, Dualphasen-Stähle, Restaustenit-Stähle, Complexphasen-Stähle, Martensitphasen-Stähle und Warmformstähle.^[3] Ein prominenter Vertreter der Warmformstähle ist der presshärzbare Mangan-Bor-Stahl 22MnB5, der sich durch eine sehr hohe Festigkeit von bis zu 1.650 N/mm^2 auszeichnet. Dieser findet heute in vielen Strukturbereichen im Fahrzeug Anwendung, wie z. B. bei B-Säulen oder Türverstärkungen im Bereich des Seitenaufprallschutzes.^[56]

Für Bauteile aus metallischen Werkstoffen steht eine Vielzahl von Fertigungsverfahren zur Verfügung. Das Umformen spielt dabei für den Automobilleichtbau eine besondere Rolle, da dünnwandige Hohlstrukturen in großen Stückzahlen wirtschaftlich hergestellt

werden können. Derartige Strukturen werden z. B. in Schwellern, B-Säulen oder Trägerstrukturen eingesetzt. Aber auch die lokale Variation der Eigenschaften spielt eine zunehmend größere Rolle. ^{[59N] [60] [61] [62N]} Durch eine lokale Anpassung der Beanspruchbarkeit an die Belastungen kann z. B. dem Leichtbauprinzip einer effizienten Materialausnutzung entsprochen werden. Im Bereich der metallischen Werkstoffe wurden verschiedene Verfahren und Technologien entwickelt, um das Ziel lokal angepasster Bauteil- und Werkstoffeigenschaften zu erreichen. ^[52]

Ein Fertigungsverfahren für die Umformung von Mangan-Bor-Stählen ist das Presshärten. Hierbei wird das Umwandlungsverhalten von Stahl genutzt. Die gezielte Wärmebehandlung der Ausgangshalbzeuge und ein anschließender definierter Härte- und Umformprozess sorgen für ein sehr gutes Umformverhalten, höchste Bauteilfestigkeiten und eine hervorragende Maßgenauigkeit der produzierten Bauteile. Je nachdem, ob eine Vorumformung der Bauteile vor der Endformgebung stattfindet oder nicht, unterscheidet man zwischen indirektem und direktem Presshärten. Mit diesem Verfahren ist es heute möglich, belastungsangepasste Leichtbaustrukturen mit unterschiedlichen Festigkeiten entlang der Bauteilgeometrie herzustellen. Ein wichtiger Forschungsschwerpunkt zur Erhöhung der Effizienz dieses Prozesses sind u. a. neue Erwärmungsverfahren für die Platinen. ^{[56] [63] [64] [65N]}

Für den Automobilbau kommen für große Stückzahlen fast ausschließlich Blechschaalenbauweisen zum Einsatz. In diesem Kontext hat die Tailored-Blank-Technologie einen hohen Stellenwert erlangt. ^[66] Unter Tailored Blanks werden Bleche verstanden, bei denen sowohl die Blechdicke als auch die Werkstoffgüte metallischer Halbzeuge innerhalb einer Platine variiert werden kann. Auf diese Weise können Bauteile an die Belastungen angepasst werden. Bauteile aus Tailored Blanks erreichen ein um 15 bis 20 % geringeres Gewicht als Bauteile in konventionellen Bauweisen. ^[67]

Lokal unterschiedliche Werkstoffeigenschaften lassen sich auch durch eine nachträgliche lokale Wärmebehandlung erreichen. Hierzu kann beispielsweise die partielle induktive Härtung eingesetzt werden. Dabei wird ein angepasster Induktor entlang der Bauteilgeometrie geführt und diese lokal erwärmt. Direkt im Anschluss erfolgt ein Abschrecken dieser Bereiche, was zu enormen Festigkeitssteigerungen von teilweise über 150 % bezogen auf den Ausgangszustand führt. ^[67]

2.3 Faserverbundkunststoffe

Faserverbundwerkstoffe sind Werkstoffkonstruktionen, die aus mindestens zwei Komponenten bestehen. ^[68] Die Matrix ist die formgebende Komponente von Faserverbundbauteilen. Bei FVK besteht diese aus einem Polymer wie z. B. Epoxidharz (EP). Die Verstärkungsfasern sind in der Matrix eingebettet (Bild 2.5). Typische Faserwerkstoffe sind Glas, Kohlenstoff oder Aramid. ^[69]

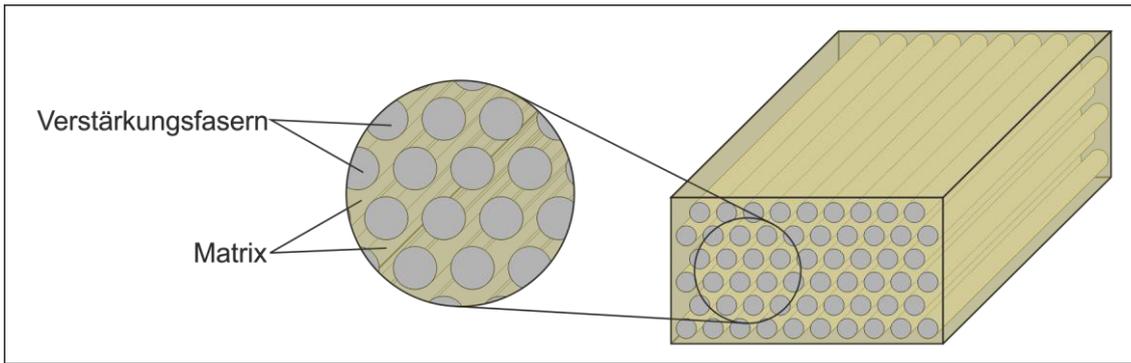


Bild 2.5 Aufbau eines FVKs

Es gibt eine Vielzahl möglicher Kombinationen aus Fasern und Matrix für die unterschiedlichsten Anwendungen (Bild 2.6).^[43] Die Verstärkungsfasern, welche durch hohe spezifische Festigkeits- und Steifigkeitswerte gekennzeichnet sind, übertragen die auf den Verbund einwirkenden Lasten. Das Matrixsystem schützt die innen liegenden Fasern vor äußeren Einflüssen, dient der Fixierung der Fasern in ihrer jeweiligen Position im Verbundwerkstoff und übt eine Stützwirkung auf die Fasern aus. Von außen auf einen FVK einwirkende Lasten werden über die Grenzflächen von der Matrix in die Verstärkungsfasern geleitet. Die mechanischen Eigenschaften sind somit nicht nur von den Eigenschaften der Fasern und der Matrix abhängig. Die Grenzflächen zwischen diesen beiden Komponenten beeinflussen in hohem Maße die mechanischen Eigenschaften eines Bauteils.^{[42] [44] [70]} Daneben sind die Anordnung und Ausrichtung der Fasern, der Fasertyp sowie der Faservolumengehalt bestimmend für die mechanischen Eigenschaften. Derzeit industriell erreichbare und für die Praxis relevante Faservolumengehalte liegen je nach verwendetem Halbzeug zwischen 50 und 65 %. Die höchsten mechanischen Eigenschaftswerte können durch orientierte Endlosfasern realisiert werden.^{[17] [71] [72] [73]}

Matrixsystem	Verstärkungsfaser	Architektur der Verstärkungsfasern
Duroplastischer Kunststoff	Glasfaser	Nicht orientierte Kurzfasern
Thermoplastischer Kunststoff	Kohlenstofffaser	Orientierte Kurzfasern
Metall	Synthesefaser	Nicht orientierte Endlosfasern
Keramik	Naturfaser	Orientierte Endlosfasern
...	Borfaser	...
	Keramikfaser	Faserverbundkunststoffe (FVK)
	...	

Bild 2.6 Ausgangswerkstoffe und Faserarchitektur von Faserverbundwerkstoffen

Für den Automobilleichtbau sind u. a. die hohe spezifische Energieabsorption, die vielfältigen Formgebungsmöglichkeiten sowie das positive Image von FVK von Bedeutung. Dies trifft insbesondere auf Kohlenstofffaserverbundkunststoffe (CFK) zu, die derzeit bei kleinen Serien bis etwa 2000 Stück pro Jahr eingesetzt werden. CFK werden in

Fahrzeugdächern (z. B. BMW M3 und M6), in Stoßfängerquerträgern (z. B. BMW M3 und M6), in Crashboxen (z. B. McLaren-Mercedes SLR oder Lexus LF-A) oder in Heckdeckeln (z. B. Audi R8 und Lamborghini Gallardo) eingesetzt. Bei Kleinserien finden sich auch Beispiele, bei denen die gesamte Rohkarosserie aus CFK realisiert wurde. Beispiele hierfür sind der Porsche Carrera GT, der McLaren MP4-12c oder der Lamborghini Aventador. Stehen eher technische und wirtschaftliche Aspekte im Vordergrund, wird vor allem auf Glasfaserverbundkunststoffe (GFK) zurückgegriffen. Hier sind verschiedene Beispiele wie Stabilisatoren oder Federn aus dem Fahrzeugbau bekannt. ^{[16] [74] [75] [76]}

Ein möglicher Einsatz der Faserverbundtechnologie in großen Serien wird aktuell im Wesentlichen durch hohe Werkstoff- und Fertigungskosten behindert. Zentrale Anforderungen für die Etablierung dieser Werkstoffklasse im Automobilbau sind vor allem signifikant geringere Taktzeiten, eine durchgängige Automatisierung, eine Integration in bestehende Fertigungsprozesse und großserientaugliche Fertigungstechnologien. Darüber hinaus gilt es eine breitere Wissensbasis bezüglich des Werkstoffverhaltens, der Werkstoffeigenschaften und der Auslegung von Faserverbundbauteilen zu schaffen. So ist oftmals nur ein unzureichendes Verständnis für den Aufbau und die Wirkungsweise sowie die spezifischen Konstruktionsmethoden der anisotropen FVK vorhanden. Es stehen nur vereinzelt Werkstoffkennwerte zur Verfügung. Da diese z. B. von den verwendeten Fasern, dem Matrixharz, der Schichte, der Art des Faserhalbzeugs oder dem Herstellungsverfahren abhängen, müssen i. d. R. für den jeweils vorhandenen Werkstoff Untersuchungen durchgeführt werden. Weitere Aspekte beim Einsatz von FVK sind das Langzeit- und Ermüdungsverhalten, die Detektion von Schädigungen ^{[77] [78]}, die Auswirkungen von Witterungseinflüssen oder das Recycling.

Insgesamt bieten FVK dem Konstrukteur eine Vielzahl an Freiheitsgraden. Auf der anderen Seite ergibt sich jedoch auch eine Reihe von Herausforderungen bezüglich der Werkstoffe, der Prozesse, der Qualitätssicherung und der Anwendung. ^{[72] [79]} Einen vielbeachteten Schritt ist in diesem Kontext BMW gegangen. Die neue i-Baureihe basiert auf Fahrgastzellen, die komplett aus CFK bestehen. Der kompakte und rein elektrisch betriebene BMW i3 ist 2013 auf den Markt gekommen. Für dieses Fahrzeug entstehen Bauteile im einstelligen Minutentakt. ^[80]

2.3.1 Begriffskonventionen

Für die vorliegende Arbeit erfolgt eine Begriffskonvention in Anlehnung an SCHÜR-MANN. ^[46] FVK-Bauteile werden i. d. R. aus mehreren aufeinandergeschichteten einzelnen Faserlagen realisiert. Die entstehenden Mehrschichtverbunde bzw. Lamine werden zweckmäßig über die Faserorientierungen der Einzellagen sowie die genaue Schichtreihenfolge definiert. Diese werden auf die x-Achse des Bauteils bezogen. Bei Gelegen hat der Faserwinkel einen positiven Wert, wenn mit positiver Drehrichtung von der x-Achse zur 1-Richtung (parallele Richtung) gedreht wird. ^[81N] Die Schichtreihenfolge beginnt bei FVK mit der ersten in die Werkzeugform eingelegten Schicht. Für Hyb-

ridwerkstoffe aus einer metallischen und einer FVK-Komponente soll dies analog gelten. Bei einem Verbund mit der Bezeichnung „DC04, CFK 0° (5) 90° (4) (P)“ handelt es sich beispielsweise um ein Hybridsystem, bei dem die metallische Struktur unterhalb der prepreggepressten FVK-Komponente angeordnet ist. In der Nomenklatur werden die Winkelangaben der einzelnen aufeinanderfolgenden Schichten durch Schrägstriche getrennt. Eine gegebenenfalls vorhandene Mittensymmetrie wird durch den Index s am Ende der Laminat-Kodierung gekennzeichnet. Liegt für ein mittensymmetrisches Laminat eine ungerade Schichtanzahl vor, so wird die durch Unterstreichung gekennzeichnete Schicht nicht wiederholt, z. B. (90/0/0/90/0°)_s.

2.3.2 Verstärkungsfasern

Die Verstärkungsfasern übernehmen in einem FVK die Aufgaben, auftretende Lasten aufzunehmen und zu übertragen. Sie bestimmen maßgeblich die mechanischen Eigenschaften des Werkstoffverbundes. Für die Anwendung in FVK steht eine Reihe von verschiedenen Verstärkungsfasern zur Verfügung (Bild 2.7). Die Verstärkungsfasern werden neben dem Werkstoff auch nach ihrer Länge in Kurz-, Lang- und Endlosfasern eingeteilt. ^{[42] [44] [46] [74] [82]}

Faserart	Zug			Druck	Dichte [g/cm ³]	T _{max} [°C]	α [10 ⁻⁶ /K]
	E-Modul [GPa]	Festigkeit [GPa]	Dehnung [%]	Festigkeit [GPa]			
Glas (S-Typ) ¹	90	4,5	5,7	1,1	2,46	250...300	5,58
Glas (E-Typ) ¹	80	3,5	4,0		2,54	300...350	5,1
Kohlenstoff (PAN-HM) ²	400	2,45	0,7	1,6	1,85	600	-1,08
Kohlenstoff (Pech-HM) ²	800	3,5	0,4	1,1	2,15	600	
Aramid (Kevlar 49) ²	135	3,5	2,8	0,48	1,45	250...300	-2,0
Aramid (Kevlar 149) ²	185	3,4	2,0	0,46	1,47	250...300	-2,0
Weicher Stahl ¹	210	0,4	4,8		7,85	1000	12,0
22MnB5 (pressgehärt.) ¹	210	< 1,65			7,85		10,4

¹ Isotrope Werkstoffeigenschaften; ² Anisotrope Werkstoffeigenschaften

Bild 2.7 Kennwerte häufig verwendeter Verstärkungsfasern nach NEITZEL/MITSCHANG ^[44]

Im Automobilbau werden aufgrund ihres Eigenschaftsprofils vor allem Glas- und Kohlenstofffasern verwendet. Kohlenstofffasern eröffnen aufgrund ihrer herausragenden spezifischen mechanischen Eigenschaften das größere Leichtbaupotential, wobei beide FVK mit unidirektionaler Faserausrichtung die Kennwerte metallischer Werkstoffe

deutlich übersteigen. Aramidfasern kommen allenfalls in Kombination z. B. mit Kohlenstofffasern in Hybrid-Textilhalbzeugen zum Einsatz.

Für die Anwendung als Verstärkungskomponente in FVK werden einzelne Textilfasern (Filamente) zu Faserbündeln (Rovings) zusammengefasst. Die k-Zahl gibt hierbei an, wie viele Filamente in einem Roving vorhanden sind. 1 k entspricht dabei 1000 Filamenten. Je weniger Filamente zu einem Roving zusammengefasst werden, desto besser sind die Ausrichtung der Filamente in Belastungsrichtung und die resultierenden mechanischen Eigenschaften. Allerdings werden Rovings mit steigender Filamentanzahl günstiger. Im Automobilbau werden üblicherweise 50 k-Rovings für Strukturbauteile und 3 k-Rovings für Sichtbauteile eingesetzt. Die Rovings werden vor der Fertigung von Bauteilen i. d. R. zu Halbzeugen weiterverarbeitet.

Kohlenstofffasern zeichnen sich durch einen sehr hohen Kohlenstoffgehalt von 90,0 bis 99,9 Gew.-% aus. Sie werden je nach Fasertyp in einem Temperaturfenster von 1000 bis 2000 °C hergestellt. ^{[83] [84] [85]} Kohlenstofffasern besitzen eine gute elektrische Leitfähigkeit und eine gute Wärmeleitfähigkeit, sind jedoch vergleichsweise kostenintensiv und besitzen ein sehr sprödes Versagensverhalten. ^{[44] [82] [84]} Der thermische Ausdehnungskoeffizient von Kohlenstofffasern ist sehr gering. ^{[86] [87]}

Ihre guten Eigenschaften basieren auf den starken kovalenten Bindungen innerhalb der Einzelschichten, die durch schwächere VAN-DER-WAALS-Bindungen verbunden werden (Bild 2.8). ^{[86] [88S]} Die mechanischen Eigenschaften der Fasern sind anisotrop. Die Festigkeit in Längsrichtung ist um ein Vielfaches höher als die in Querrichtung. ^{[83] [86]} Neben hohen Festigkeiten unter statischer Belastung weisen Kohlenstofffasern auch gute dynamische Festigkeitseigenschaften auf. ^{[83] [85] [86]} Kohlenstofffasern werden nach ihrem E-Modul und ihrer Dehnbarkeit eingeteilt. Neben dehnbaren Fasern mit geringem E-Modul gibt es Hoch(HM)- und Ultrahochmodulfasern (UHM) mit höherem E-Modul und geringerer Dehnbarkeit. ^{[3] [83]}

Als Ausgangsmaterial zur Herstellung von Kohlenstofffasern werden i. d. R. strukturell vorgeformte hochmolekulare Materialien verwendet. Diese werden als Precursor bezeichnet und bestehen z. B. aus Polymerfasern. Seit den 1960er Jahren haben sich Polyacrylnitril(PAN)-Varianten etabliert. ^{[44] [74] [84] [89] [90] [91] [92]} PAN-Fasern sind als ein textiles Standardprodukt preisgünstig verfügbar und erhalten beim Spinnen eine Vororientierung der Graphitebenen, welche durch mehrere Wärmebehandlungsschritte in unterschiedlichen Atmosphären in Kohlenstofffasern umgewandelt werden (Bild 2.8). Ein geringer Orientierungswinkel α führt zu höchsten mechanischen Eigenschaftswerten. ^{[44] [74] [86] [88S] [91]} Im Automobilbau werden vielfach hochfeste HT-Fasertypen eingesetzt. Diese basieren auf PAN-Fasern und decken über 80 % des Marktes ab.

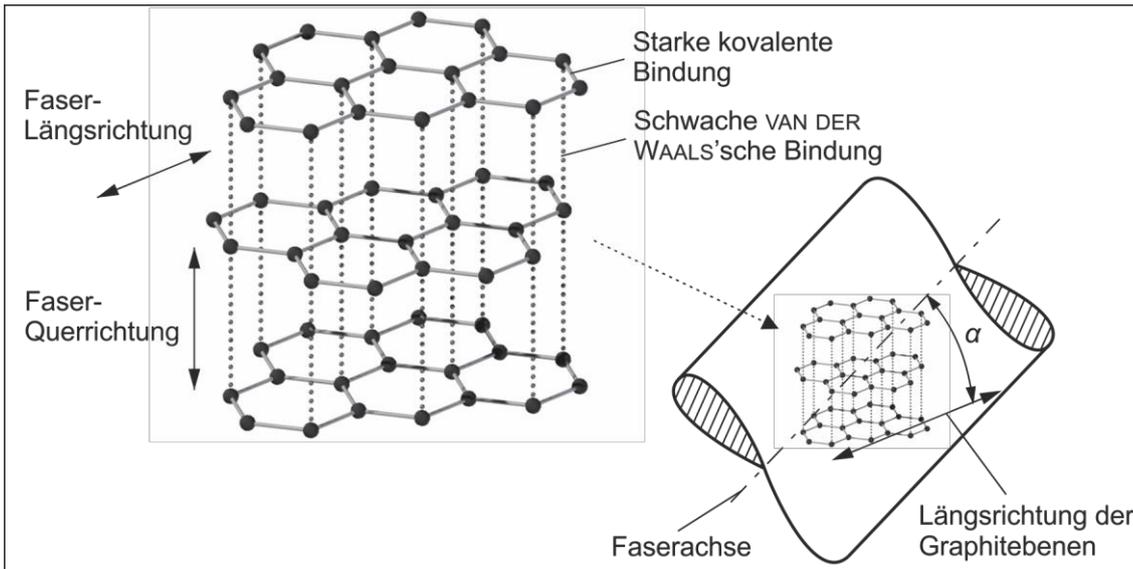


Bild 2.8 Hexagonale Kristallstruktur von Graphit und Ausrichtung der Graphitstruktur zur Faserachse nach SCHÜRMAN ^[86]

2.3.3 Matrixwerkstoffe

Als Matrixwerkstoffe für FVK werden i. d. R. duroplastische oder thermoplastische Polymere eingesetzt (Bild 2.9). Beide Werkstoffe zeichnen sich durch spezifische Vor- und Nachteile hinsichtlich der Verarbeitung, der Eigenschaften und der Anwendungen aus. ^{[44] [83] [93] [94] [95]} Die Wahl eines geeigneten Matrixsystems hängt u. a. von den gewünschten mechanischen, thermischen, elektrischen und brandtechnischen Eigenschaften sowie vom vorgesehenen Fertigungsverfahren ab. ^{[46] [96]}

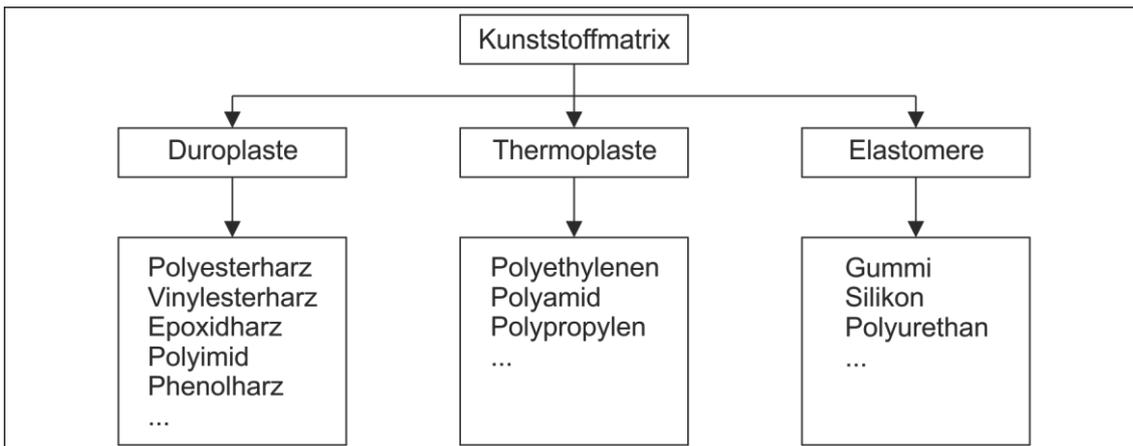


Bild 2.9 Einteilung und Arten von Matrixharzen

Kunststoffe sind künstlich hergestellte Werkstoffe. Zu ihren positiven Eigenschaften zählen z. B. die geringe Dichte, die geringe elektrische Leitfähigkeit, die geringe Wärmeleitfähigkeit und die niedrigen Verarbeitungstemperaturen. Der makromolekulare Aufbau unterschiedlicher Kunststoffe ist in Bild 2.10 abgebildet. Amorphe Thermoplaste sind durch regellos vorliegende lange Makromoleküle charakterisiert, deren Atome

über starke kovalente Bindungen miteinander verbunden sind. Bei teilkristallinen Thermoplasten liegen Makromoleküle zwischen amorphen Bereichen gebündelt oder gefaltet vor. Elastomere weisen weitmaschig verknüpfte Makromoleküle auf, wohingegen Duroplaste durch räumlich eng vernetzte Makromoleküle gekennzeichnet sind. ^[69]
^[74] ^[88S] ^[97] ^[98]

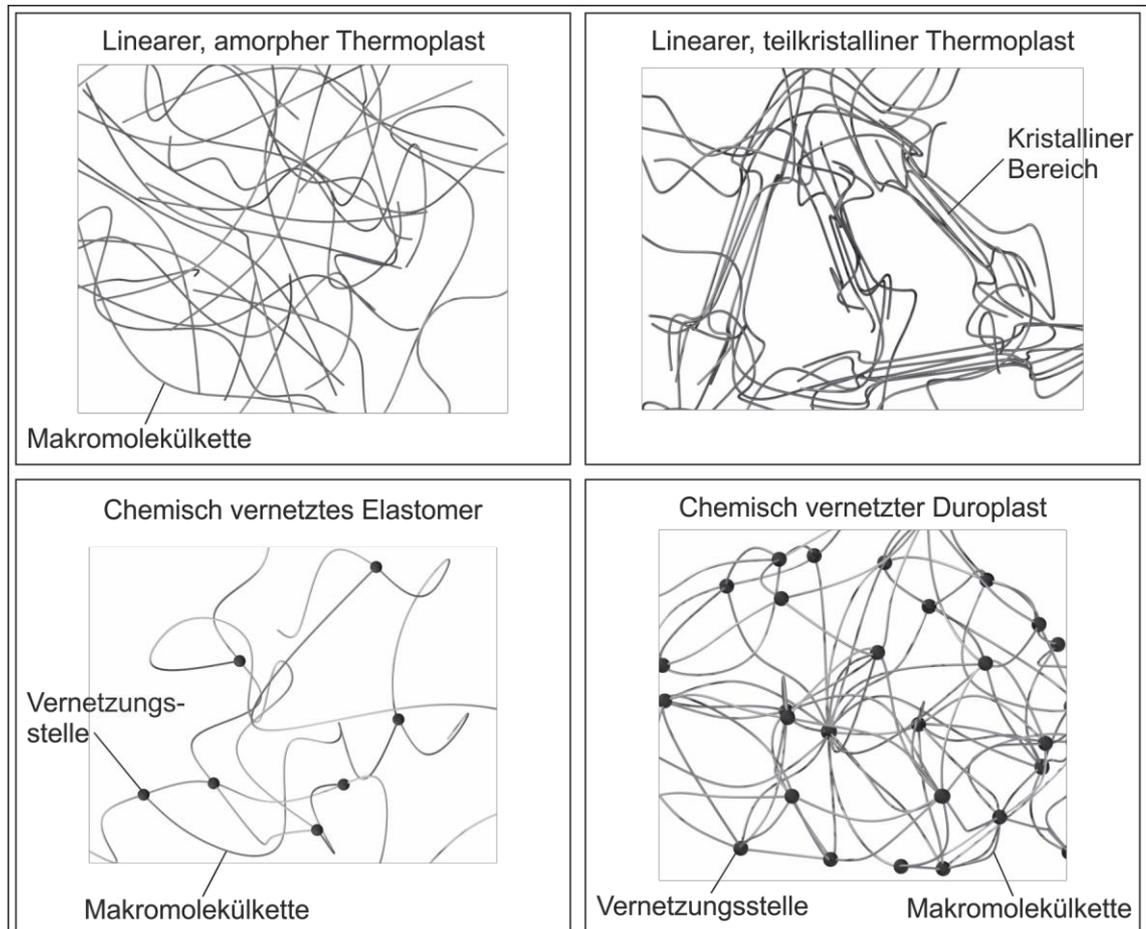


Bild 2.10 Makromolekularer Aufbau der Polymere nach SCHÜRMAN ^[46]

Die Herstellung von duroplastischen Polymeren basiert auf einer chemischen Reaktion von Reaktionsharzen. Dieser Vernetzungs- oder Härtingsprozess erfolgt i. d. R. unter Einwirkung von Druck und Wärme und führt zu einem engmaschigen Netzwerk, d. h., die durchschnittliche Länge der Molekülsegmente zwischen den Vernetzungspunkten ist sehr gering. Diese Engmaschigkeit führt zu einer hohen Glasübergangstemperatur der duroplastischen Polymere sowie einer hohen Wärmeformbeständigkeit, einer guten chemischen Beständigkeit und einer geringen Kriechneigung. ^[44] ^[58] ^[99] Die Glasübergangstemperatur bezeichnet diejenige Temperatur, bei der bei Kunststoffen in einem sehr kleinen Temperaturintervall der sprunghafte Übergang vom energieelastischen in den entropieelastischen Bereich (Zustand größtmöglicher Entropie) erfolgt. Infolgedessen ändert der Kunststoff seine thermodynamischen und mechanischen Eigenschaften. ^[86]

Bei Duroplasten kommt es während der Vernetzung zu einer Schwindung, welche bis zu 10 % betragen kann, da bei der Reaktion eine dichtere Molekülstruktur entsteht. Durch Zugabe von Füll- und Verstärkungsstoffen wird dieses Phänomen reduziert. Duroplaste zeichnen sich durch hohe Festigkeits- und Steifigkeitswerte aus, jedoch sind sie spröde. ^{[44] [87]}

Einige ausgewählte Kennwerte duroplastischer Matrixwerkstoffe für die Anwendung in FVK sind in Bild 2.11 aufgeführt. In der Regel kommen in FVK ungesättigte Polyesterharze (UP), Vinylesterharze (VE) oder Epoxidharze (EP) zum Einsatz. ^{[93] [100]} Die einzelnen Duroplaste unterscheiden sich hinsichtlich ihrer jeweiligen Vernetzungsreaktion. ^[44]

Duroplast	Zug			Biegung		Dichte [g/cm ³]
	E-Modul [GPa]	Festigkeit [GPa]	Dehnung [%]	E-Modul [Gpa]	Festigkeit [GPa]	
Ungesättigtes Polyesterharz (UP)	2,8...3,5	40...75	1,3...3,3	3,4...3,8	80...130	1,25...1,30
Vinylesterharz (VE)	2,9...3,1	ca. 80	3,5...5,5	3,0...3,7	120...140	ca. 1,1
Epoxidharz (EP)	2,8...3,4	45...85	1,3...5,0	2,6...3,6	100...130	> 1,16

Bild 2.11 Kennwerte duroplastischer Matrixwerkstoffe nach NEITZEL/MITSCHANG ^[44]

Als Matrixsystem für Prepregs (Englisch: Preimpregnated – vorimprägniert) werden oftmals Epoxidharze angewendet. Diese stellen aktuell den Stand der Technik für duroplastische Matrixharze dar. ^{[73] [94] [101]} Sie werden für eine große Bandbreite von Anwendungen, z. B. vom Fahrzeug- und Flugzeugbau bis hin zu Klebstoffen und Beschichtungen, eingesetzt. ^{[102] [103]} Epoxidharze zählen zu der Gruppe der Polyadditions-Duroplaste und bestehen aus Oligomeren mit Oxirangruppen. Die irreversible Härtingsreaktion von Epoxidharzen kann warm oder kalt initiiert werden. Dabei erfolgt eine räumliche Vernetzung. Für die Vollständigkeit der Vernetzung ist das Harz-Härter-Verhältnis von Bedeutung. Der sehr spröde Werkstoff besitzt eine hohe Rissempfindlichkeit, welche sich jedoch durch die Zugabe von Füllstoffen oder die Senkung der Netzwerkichte deutlich verbessern lässt. Als Füllstoffe kommen Kautschuke und Thermoplast-Partikel in Frage. Die Eigenschaften einer duroplastischen Matrix werden jedoch auch durch ihren Vernetzungsgrad beeinflusst. Steigt der Grad der Vernetzung, so nehmen die Glasübergangstemperatur und damit die Beanspruchbarkeit bei steigender Temperatur, die Steifigkeit und der Schubmodul zu. Des Weiteren entsteht eine zunehmende Sprödigkeit und entsprechend eine Abnahme der Zähigkeit. Es werden üblicherweise drei Vernetzungszustände A, B und C eines Harzes unterschieden. Bei der A-Stage handelt es sich um eine frühe Phase der Reaktion von Harzen, in der der Werkstoff noch nicht vernetzt und schmelzflüssig ist sowie eine mittlere Viskosität aufweist. Eine Zwischenstufe ist die B-Stage, in der das Harz leicht vernetzt ist und eine hohe Viskosität aufweist sowie die Glasübergangstemperatur angehoben ist. Harze in

einem ungehärteten warmhärtbaren System, z. B. einem Prepreg, befinden sich für gewöhnlich in dieser Phase. Die letzte Phase der Reaktion wird als C-Stage bezeichnet. Erreicht ein Harz diese Phase, liegt eine vollständige Vernetzung des Duroplastes vor.^{[74] [86] [87] [97] [98] [104] [105] [106]} Während der Härtungsreaktion vom Zustand B in den Zustand C erfolgt eine Temperaturerhöhung. Infolgedessen sinkt die Viskosität des Harzes ab. Die Härtungsreaktion wirkt sich entgegengesetzt aus und lässt die Viskosität schnell ansteigen.^[86]

Die Verarbeitungstemperatur erstreckt sich je nach Harzsystem von Raumtemperatur bis hin zu 200 °C. Oberhalb der Zersetzungstemperatur tritt eine thermische Zersetzung ein. Für die Anwendung in FVK sind aufgrund der spezifischen Anforderungen nur wenige der verfügbaren Epoxidharze und -härtter geeignet. Die wichtigsten Voraussetzungen für eine Anwendung in FVK sind eine hohe thermische Stabilität sowie eine ausreichende Festigkeit der Matrix.^{[8] [44] [58] [70] [74] [83] [86] [93] [97] [107]}

Die zu der Gruppe der duroplastischen Polyaddukte gehörenden Epoxidharze werden durch die endständigen, reaktionsfreudigen Epoxidgruppen charakterisiert (Bild 2.12). Sie sind im Wesentlichen an den Polyadditionsprozessen bei der Bildung von Polymeren aus Molekülgruppierungen beteiligt.^{[91] [97] [103] [107] [108] [109] [110] [111] [112]}

Die verschiedenen Epoxidharze können durch die Molekülstruktur, welcher die Epoxidgruppen anhängen, unterschieden werden. Die gebräuchlichsten Epoxidharze sind ausschließlich Umsetzungsprodukte von Bisphenol A und Epichlorhydrin. Die beiden Stoffe reagieren unter Anwesenheit fester Natronlauge als Katalysator in einem stöchiometrischen Verhältnis von 2 : 1 durch die Epoxid-Gruppe unter Verschiebung eines Wasserstoffatoms und Bildung einer neuen Hydroxylgruppe (OH) zu Diglycidylether. Bei diesem Vorgang wird Salzsäure als Kondensat abgegeben. Durch eine Verringerung der Konzentration des Epichlorhydrins kann die gewünschte Kettenlänge der Epoxidharzmoleküle eingestellt werden, da Bisphenol A und Epichlorhydrin mit den äußeren Epoxidgruppen des Diglycidylethers reagieren und lange Kettenmoleküle bilden.^{[91] [92] [97] [108] [109] [110] [111] [113] [114]}

Für die Aushärtung der Epoxidharze sind Härter und gegebenenfalls Katalysatoren erforderlich. Der Härter ist ein chemischer Stoff, der die Vernetzungsreaktion initiiert und Teil des Polymers wird. Bei der Vernetzungsreaktion sind neben den reaktiven Epoxidgruppen auch die Hydroxylgruppen von Bedeutung, da diese ebenfalls für Bindungen zur Verfügung stehen. Die Vernetzungsreaktion an der Epoxidgruppe setzt durch Öffnen des Rings mithilfe eines vom Härter abgegebenen Wasserstoffatoms ein. Dies führt zur Bildung einer neuen Hydroxylgruppe und zur Bindung mit dem Härter über freie Valenzen.^{[92] [107] [109] [110] [113] [115]}

Als Härter kommen somit nur Stoffe in Frage, die zur Vernetzung über ein Wasserstoffatom verfügen, z. B. Amine oder Säureanhydride. Die Beweglichkeit des Wasserstoffatoms ist ausschlaggebend für die Reaktionsgeschwindigkeit. Durch die Auswahl von entsprechenden Bindungsverhältnissen zwischen dem umzulagernden Wasser-

stoff und dem Restmolekül der Härterkomponente lässt sich eine Einstellung der Reaktionsgeschwindigkeit erreichen. Neben der Verarbeitungs- und Vernetzungszeit lässt sich mit dem Härter auch auf die physikalischen und mechanischen Eigenschaften der Harze einwirken. Auch die Menge des Härters spielt eine Rolle. ^{[87] [107] [109] [113] [115]}

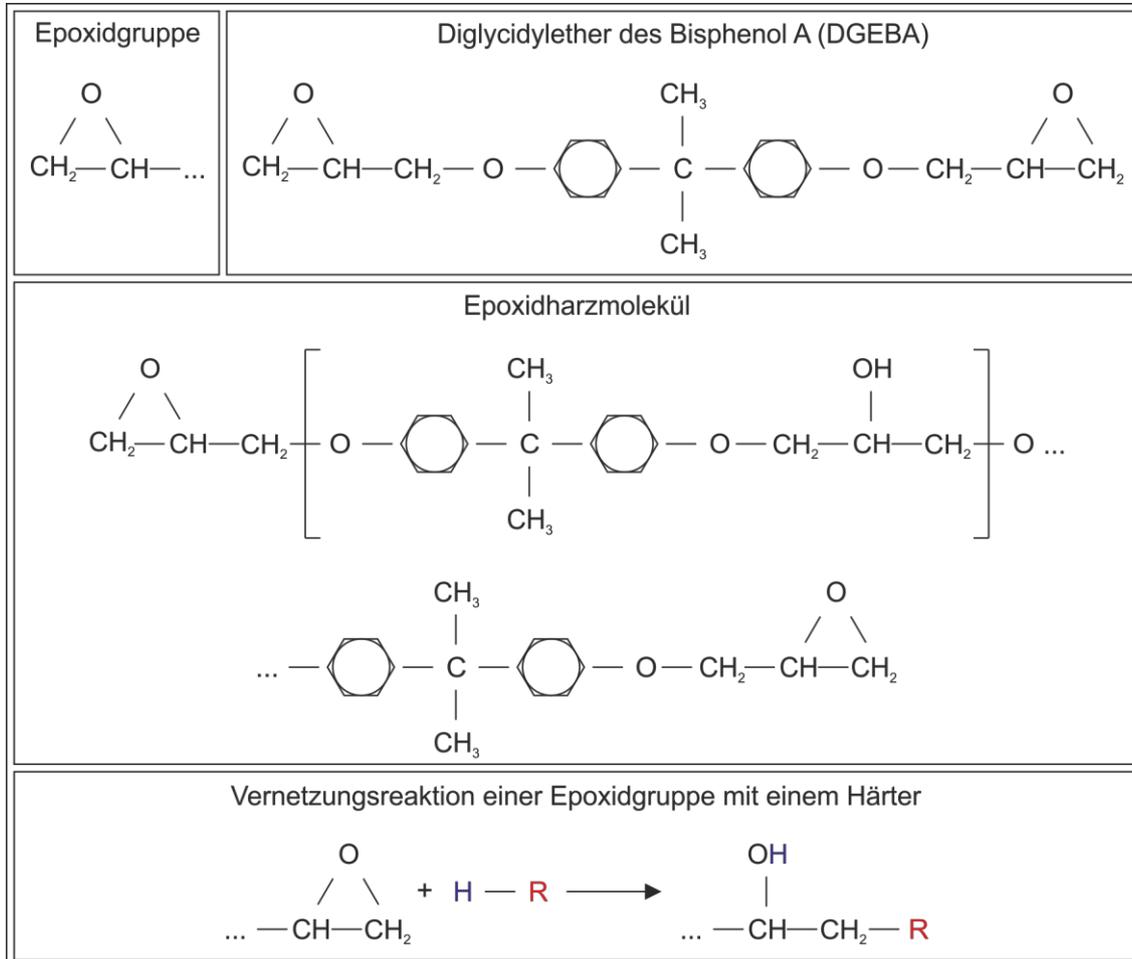


Bild 2.12 Chemischer Aufbau und Vernetzungsreaktion von Epoxidharz nach HABENICHT ^[109]

Im Automobilbau werden verschiedenste Anforderungen an Epoxidharze gestellt. Zu den allgemeinen Anforderungen zählen z. B. eine ausreichende Lagerfähigkeit, gute mechanische und thermische Eigenschaften sowie eine gute chemische Beständigkeit. Spezifischere Anforderungen können die Verarbeitbarkeit der Harze zu Prepregs, eine erhöhte Flammwidrigkeit, eine hohe Schlagzähigkeit oder die Ausbildung einer Grenzflächenhaftung sein. ^{[116P] [117P] [118P] [119P]}

2.3.4 Verstärkungshalbzeuge

2.3.4.1 Trockene Verstärkungshalbzeuge

Als trockene Verstärkungshalbzeuge werden nicht-impregnierte Fasern bezeichnet, die z. B. als Gewebe oder Geflecht vorliegen. Neben den Preforms, also dreidimensionalen Faserstrukturen, kommen insbesondere zweidimensionale textile Halbzeuge zum Einsatz. Eine Einteilung gängiger textiler Flächengebilde ist in Bild 2.13 dargestellt.

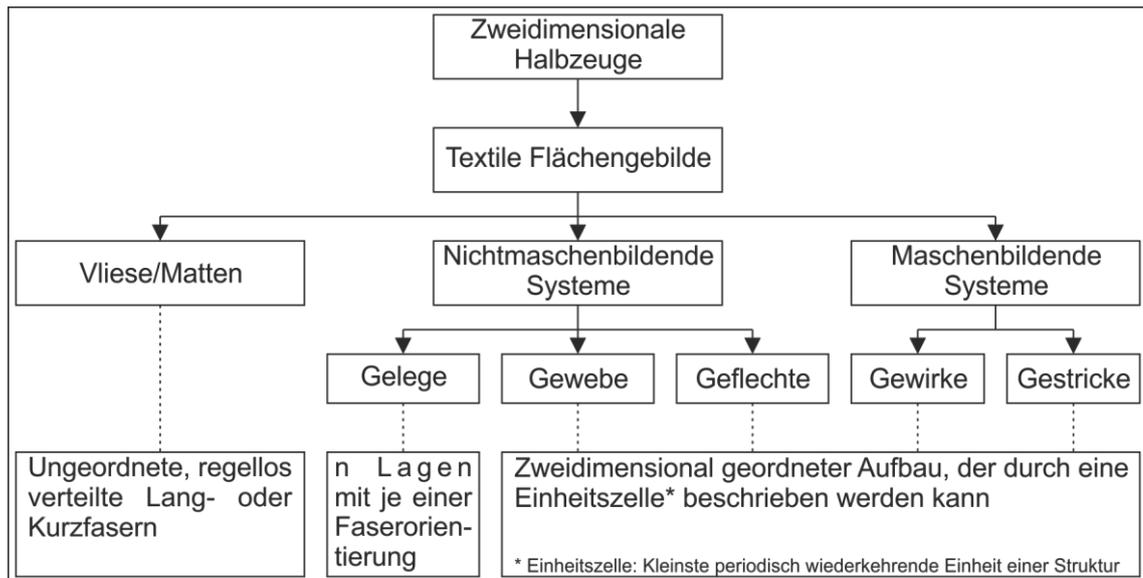


Bild 2.13 Einteilung textiler Flächengebilde

Die einfachste Form von Verstärkungshalbzeugen sind die Gelege (Bild 2.14). Dabei werden Fasern lediglich parallel ausgerichtet. Zusätzlich können die Fasern vernäht werden, um eine bessere Handhabbarkeit zu gewährleisten. Gelege weisen im Vergleich zu Geweben bessere mechanische Eigenschaften auf, da die Fasern nicht ordnet werden. Geflechte sind dadurch charakterisiert, dass sich die Garne eines zickzackförmig verlaufenden Längsfadensystems diagonal zu den Warenkanten verkreuzen. Geflechte sind dehnfähig, schmiegsam und formbar, jedoch neigen die Schnittkanten zu Fransenbildung. Gewebe bestehen aus einem Längsfadensystem (Kette) und einem Quersfadensystem (Schuss), welche rechtwinklig verkreuzt sind. Gewebe sind haltbar, formstabil und gut drapierbar. Nachteile liegen in der geringen Dehnfähigkeit und der geringen Elastizität oder der Neigung zur Fransenbildung an Schnittkanten. Gewebe können zwei- oder dreidimensional ausgeführt werden. [44] [70] [82] [88S] [90]

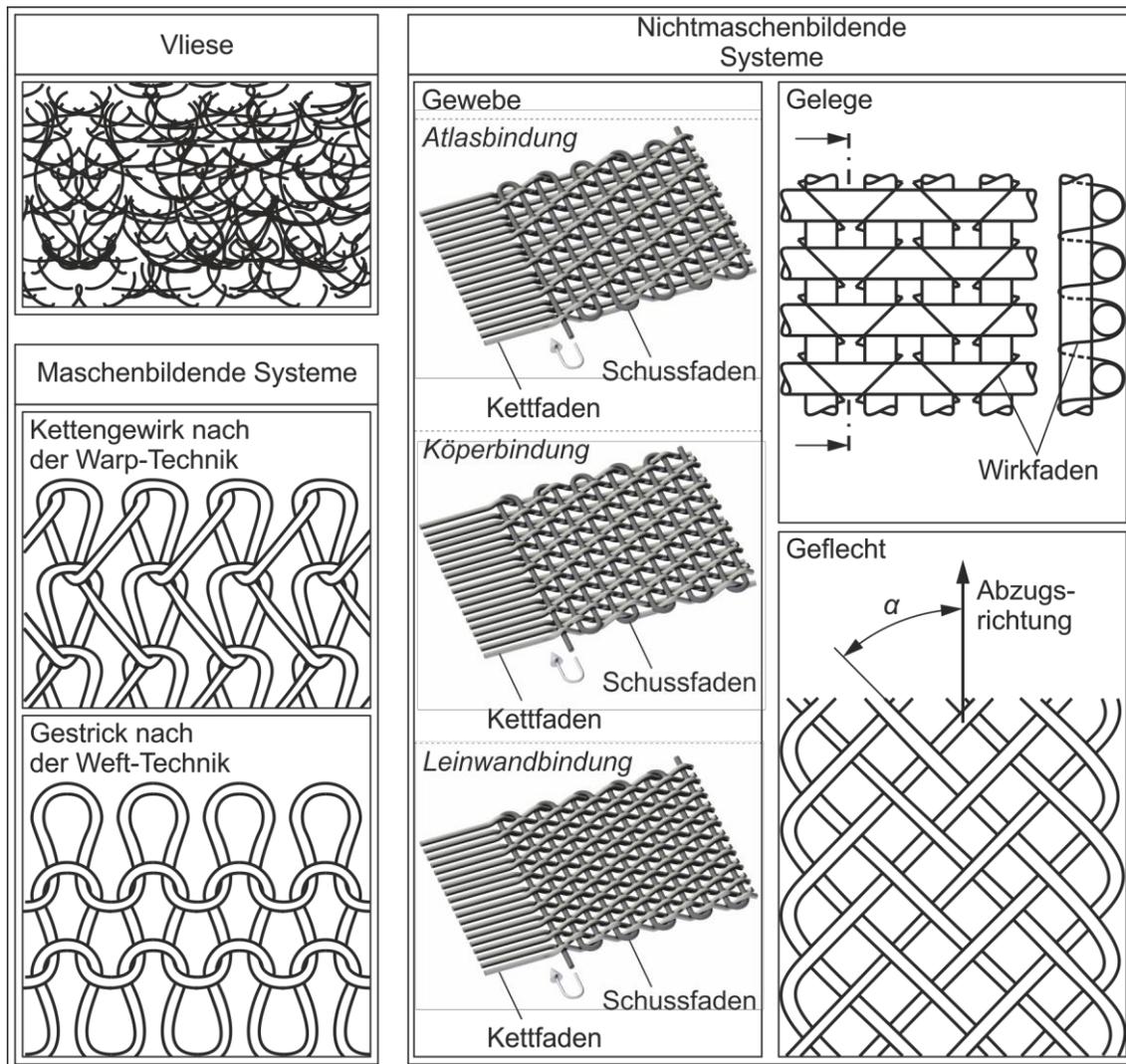


Bild 2.14 Schematische Darstellungen verschiedener textiler Flächengebilde nach SCHÜR-
MANN^[86] und MICHAELI et al.^[120]

2.3.4.2 Vorimprägnierte Verstärkungshalbzeuge

Bild 2.15 zeigt eine Gliederung vorimprägnierter FVK-Halbzeuge. Solche vorimprägnierten, ebenen, flächigen Halbzeuge werden als Prepregs bezeichnet. Deren Anwendung hat sich aufgrund vielfältiger Vorteile in vielen Bereichen etabliert.^[44] Durch vorimprägnierte Halbzeuge lassen sich u. a. die Fertigungskosten und -zeiten signifikant reduzieren. Daneben steigt die Bauteilqualität merklich an.^[46] Die vorimprägnierten Halbzeuge werden in nicht-fließfähige und fließfähige Sorten gegliedert. Nicht-fließfähige Prepregs besitzen eine Verstärkungsstruktur aus gerichteten, endlosen Fasern. Dadurch bedingt sind während des Pressvorgangs keine nennenswerten Fließvorgänge möglich. Bei den fließfähigen Prepregs liegt eine Verstärkungsstruktur aus Kurz- oder Langfasern vor. Dadurch wird während des Pressvorgangs ein Abgleiten der Fasern aneinander und damit eine Fließbewegung des Faser-Matrix-Gemisches

ermöglicht. Fließfähige Duroplastprepregs werden zur Herstellung einfacher flächiger, aber auch komplexer Geometrien verwendet. ^{[42] [44] [83]}

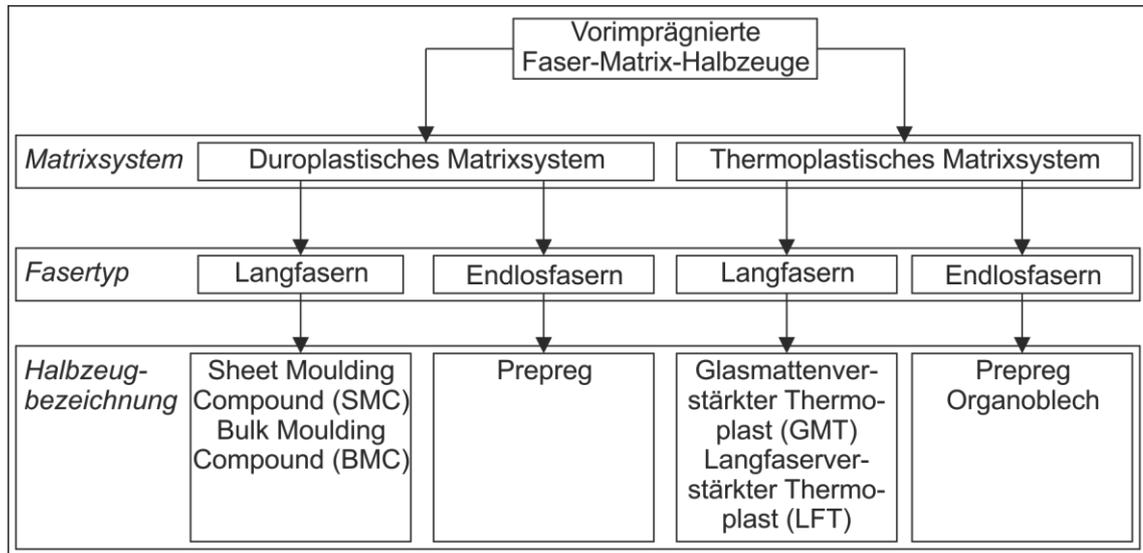


Bild 2.15 Einteilung vorimprägnierter FVK-Halbzeuge

Kurz- und langfaserverstärkte duroplastische Prepregs

Von wirtschaftlicher Bedeutung sind im Wesentlichen zwei verschiedene kurz- und langfaserverstärkte duroplastische Prepregs: zum einen Sheet Moulding Compounds (SMC) und zum anderen Bulk Moulding Compounds (BMC). Bei Sheet Moulding Compounds handelt es sich um Fasermatten, die mit einem duroplastischen Matrixharz vorimprägniert wurden. In der Regel werden ungesättigte Polyesterharze als Matrix sowie Glasfasern mit einer Länge von 20 bis 50 mm als Verstärkungskomponente genutzt. SMC-Formmassen werden in beheizten Stahlwerkzeugen durch einen Pressvorgang zu Formteilen weiterverarbeitet. ^{[42] [46] [83]} Die Herstellung von SMC erfolgt vollständig automatisiert. ^{[121] [122]} Bulk Moulding Compounds unterscheiden sich von SMC durch die verwendete Faserlänge und den Fasergehalt. Es werden kürzere Fasern mit Längen zwischen 6 und 25 mm verwendet. ^[46] Ähnlich wie SMC sind BMC leicht fließend und können durch Fließpressen oder aufgrund der kurzen Faserlänge im Spritzgussprozess verarbeitet werden. ^[121]

Endlosfaserverstärkte duroplastische Prepregs

Endlosfaserverstärkte, nicht-fließfähige Duroplastprepregs werden mittels Imprägnierung textiler Halbzeuge hergestellt. Als Textilhalbzeug können unidirektionale Bänder, multiaxiale Gelege und Gewebe zum Einsatz kommen. Als Herstellungsverfahren werden die Lösungsmittel- oder die Schmelzharz imprägnierung eingesetzt. Bei der Lösungsmittel imprägnierung wird ein textiles Gebilde im Tauchtränkverfahren mit einem Gemisch aus Harz, Härter, Zuschlagstoffen und Lösungsmitteln imprägniert. Anschließend wird das Lösungsmittel in einer Trocknungsstation abgedampft. Während der Trocknung erfolgt ein Fortschreiten der Vernetzungsreaktion in den B-Zustand. Bei der Schmelzharz imprägnierung wird ein Gemisch aus Harz, Härter und Zuschlagstoffen,

d. h. das Matrixsystem, zur Imprägnierung des Fasermaterials auf Schmelztemperatur gebracht. In diesem Zustand niedriger Viskosität werden die Verstärkungsfasern kontinuierlich imprägniert. Dies kann auf zwei Wegen geschehen. Bei der ersten Variante werden die Fasern in einem beheizten Harzbad getränkt. Anschließend wird überschüssiges Harz durch Walzen abgestreift und das Prepreg durch Druckwalzen so verdichtet, dass keine Lunker vorliegen. Die zweite Variante basiert auf dünnen Harzfilmen, die auf ein Trägermaterial aufgerakelt werden. Die Imprägnierung der Fasern erfolgt hiervon unabhängig in einem gesonderten Prozess. Der auf dem Trägermaterial liegende Harzfilm wird mithilfe beheizter Walzen auf Schmelztemperatur gebracht. Über einen Walzendruck erfolgt eine Imprägnierung der Fasern. Anschließend wird das System gekühlt. Die Verarbeitung der Halbzeuge sollte zeitnah erfolgen und es sollte eine gekühlte Lagerung vorgesehen werden, da es andernfalls zu einer unkontrollierten (Vor-)Aushärtung des Matrixmaterials kommen kann. ^{[42] [44] [58] [73] [83] [86] [101] [109]}

Nach der Imprägnierung werden im Rahmen der Bauteilherstellung noch die Phasen der Konsolidierung und Solidifikation durchlaufen. Bei der Konsolidierung erfolgen die Formgebung, das Verdichten des Laminats, das Verdrängen von Lufteinschlüssen und die Einstellung des Faservolumengehalts. Bei der Solidifikation wird die Vernetzung, die Erstarrung und die Aushärtung des FVKs realisiert. ^{[44] [123]} Im Folgenden werden diese beiden Phasen, sofern nicht anders gekennzeichnet, unter dem Begriff Konsolidierung zusammengefasst.

Nicht-fließfähige UD-Prepregs besitzen eine eng begrenzte Fließfähigkeit, die kaum eine Faserbewegung erlaubt. Aus diesem Grund sind sie vornehmlich zur Herstellung von schalenförmigen Bauteilen geeignet. Mit Kohlenstofffasern verstärkte Duroplastprepregs weisen mit die höchsten spezifischen Festigkeits- und Steifigkeitswerte in der Gruppe der FVK auf. ^{[44] [124]} Im Gegensatz zur handwerklichen Verarbeitung von Fasermatten mit anschließender Fasertränkung bietet die Nutzung von Prepregs einen gleichbleibenden und hohen Faservolumenanteil von etwa 60 %. Dies gilt speziell für den Einsatz hochviskoser Harze. Diese Faktoren sind besonders für den Einsatz in Großserien zu gewährleisten, um mit gleichbleibender Qualität in engen Toleranzen fertigen zu können. Die Nutzung von vorimprägnierten Halbzeugen senkt durch ihre präzisere, maschinelle Herstellung die Fehler durch Lufteinschlüsse. Weitere Vorteile, die für den Einsatz von Prepregs sprechen, sind die Reduzierung der Fertigungstiefe und die damit verbundenen Kosteneinsparungen sowie das zur Verfügung stehende Know-how der Hersteller. Im Gegenzug ist jedoch zu beachten, dass die Werkstoffkosten mit dem Grad der Vorbearbeitung steigen. ^{[86] [92] [101]}

2.3.4.3 Mehrschichtenverbunde

FVK weisen ein anisotropes, also richtungsabhängiges Werkstoffverhalten auf. Dies äußert sich in einer unterschiedlichen mechanischen Belastbarkeit in den verschiedenen Belastungsrichtungen: In Faserrichtung ist die Belastbarkeit wesentlich höher als quer zur Faserrichtung. ^{[6] [46]} Durch die bei vielen Bauteilen komplexen Beanspru-

chungszustände werden im Allgemeinen nur FVK, welche aus mehreren Schichten aufgebaut sind, den Anforderungen gerecht. Solche Mehrschichtenverbunde (MSV) entstehen durch das Stapeln mehrerer Einzelschichten mit unterschiedlichen Faserorientierungen. MSV werden häufig auch als Lamine bezeichnet. Neben trockenen können auch vorimprägnierte Verstärkungshalbzeuge zu MSV kombiniert werden. [42] [46] [125]

In FVK werden aufgrund der mit ihnen verbundenen vergleichsweise geringen Kosten sowie ihres möglichen breiten Einsatzspektrums unidirektionale Schichten häufig eingesetzt. Unidirektionale (UD) Schichten stellen das Grundelement eines MSVs dar (Bild 2.16). [46] [125] Bei UD-Schichten liegen die Fasern möglichst parallel. Daneben gibt es bidirektionale (BD) Schichten. Diese kommen in Geweben vor, deren Fasern unter einem Winkel von 90° zueinander liegen. Multidirektionale (MD) Schichten treten z. B. bei Fasermatten aus Wirrfasern auf. [69]

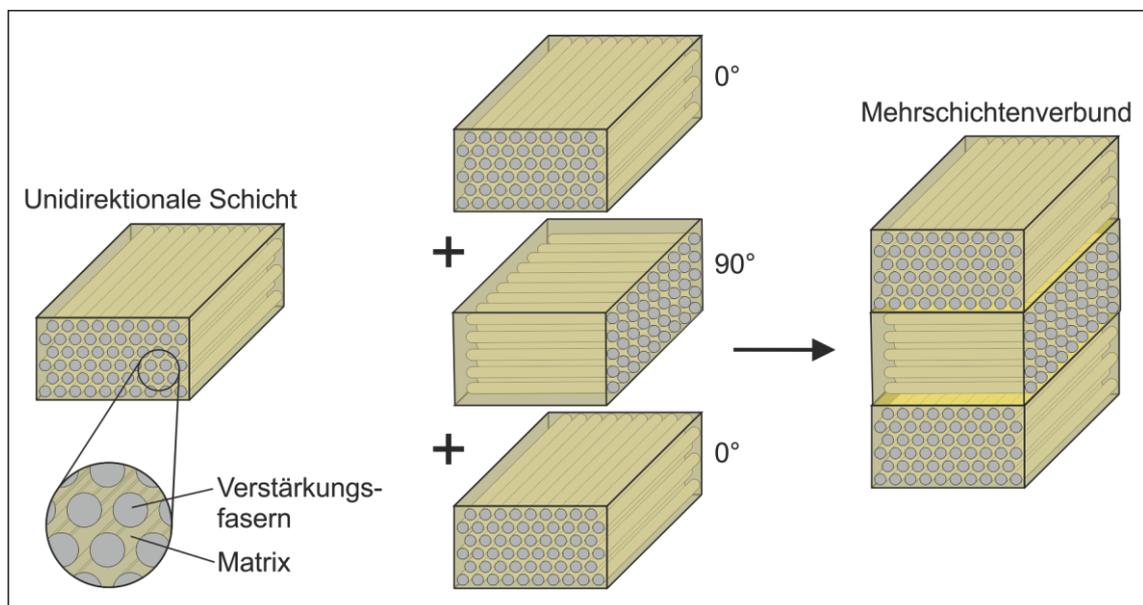


Bild 2.16 Unidirektionale Schicht und Mehrschichtenverbund nach SCHÜRMAN [86]

2.3.5 Herstellverfahren

Zur Herstellung von FVK-Bauteilen können eine Reihe von verschiedenen Verfahren eingesetzt werden (Bild 2.17). [43] [70] Die Einteilung der Verfahren erfolgt i. d. R. nach der Form des verwendeten Verstärkungshalbzeugs. Großserientaugliche Verarbeitungsverfahren liegen heutzutage nur für Kurzfaserverstärkungen vor. Für die Verarbeitung von lang- oder endlosfaserverstärkten Kunststoffen wird im Allgemeinen auf handarbeitsintensive Verfahren zurückgegriffen. Zu den gebräuchlichsten Verarbeitungsverfahren zählen aktuell u. a. das Handlaminieren, die Harzinjektionsverfahren und die Pressverfahren. [99] [126] Das Herstellverfahren hat dabei einen signifikanten Einfluss auf die Werkstoffkennwerte und die Bauteileigenschaften. Ebenso wird durch

das Herstellverfahren die Qualität und Wirtschaftlichkeit von FVK-Bauteilen beeinflusst. [17]

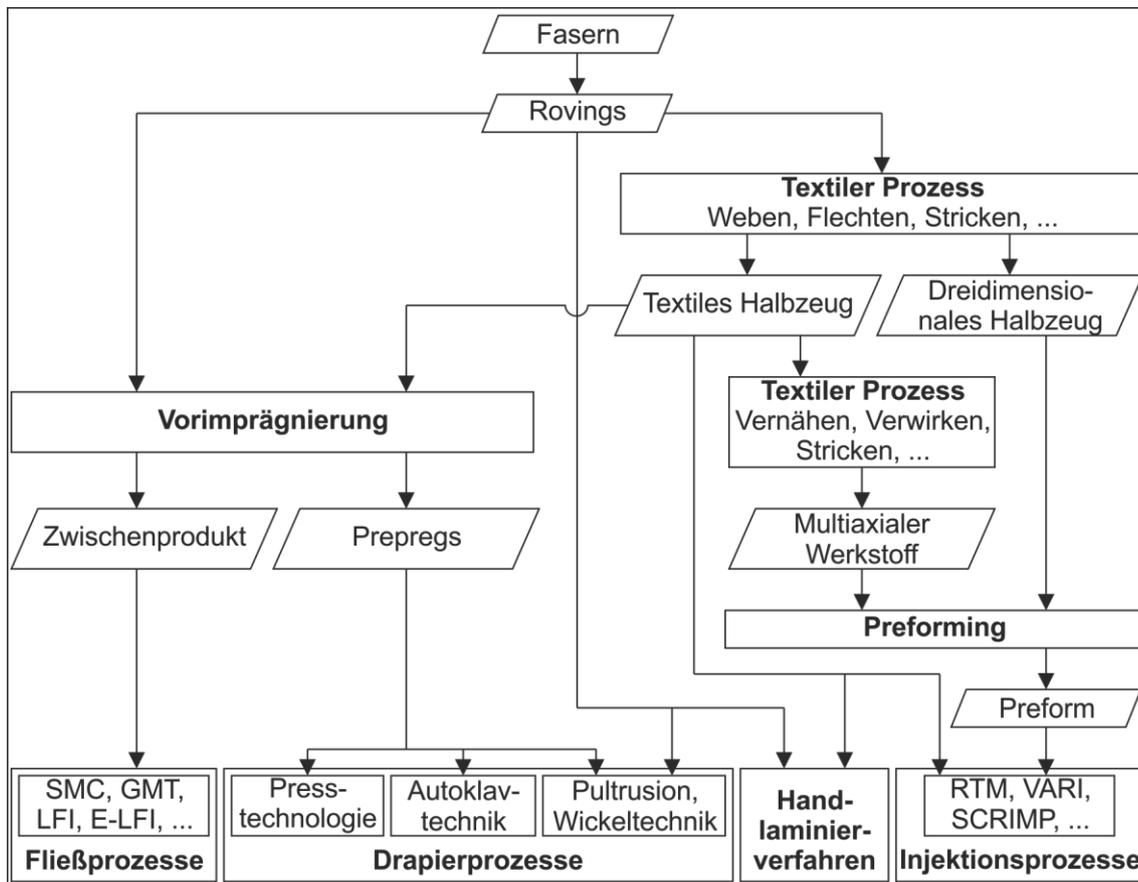


Bild 2.17 Verarbeitungsrouten für FVK

2.3.5.1 Handlaminierverfahren

Das Handlaminierverfahren ist eines der ältesten und einfachsten Verfahren zur Herstellung von FVK-Bauteilen. Es zeichnet sich durch seine hohe Flexibilität und die Notwendigkeit von minimalen technischen Voraussetzungen aus. Beim Handlaminieren werden mehrere Laminat- oder Gewebeschichten manuell abwechselnd übereinander geschichtet und mit dem Harz- bzw. Härtermaterial bestrichen (Bild 2.18). Das Auftragen und Ausrollen von Luftblasen sowie das Tränken des Fasermaterials mit dem Harz erfolgt manuell. Die Aushärtung der Matrix findet anschließend bei Raumtemperatur statt oder kann durch Aufheizen des Werkzeugs beschleunigt werden. [70] [88S] [106] [127] [128]

Das Handlaminieren ist noch stark verbreitet und wird insbesondere im Prototypenbau und bei großen Bauteilen, die nur in geringer Stückzahl gefertigt werden, angewendet. [128] [92] Nachteilig beim Handlaminierverfahren sind die hohen Lohnkosten. Die Bauteilqualität ist zudem stark vom Verarbeiter und dessen Qualifikation abhängig. Dies resultiert in einer schlechten Reproduzierbarkeit und einer aufwändig sicherzustellenden Qualität. Da die Verarbeitung bei Umgebungsdruck erfolgt, sind Fehlstellen im Verbund

nie vollständig zu vermeiden. Dies und ein vergleichsweise geringer Faseranteil resultieren in einer verminderten Qualität und eingeschränkten mechanischen Eigenschaften. ^[121] Weiterentwicklungen des Handlaminierverfahrens stellen das Faserspritzen, das Vakuum- und das Drucksackverfahren dar. ^{[83] [106] [121] [127] [128]}

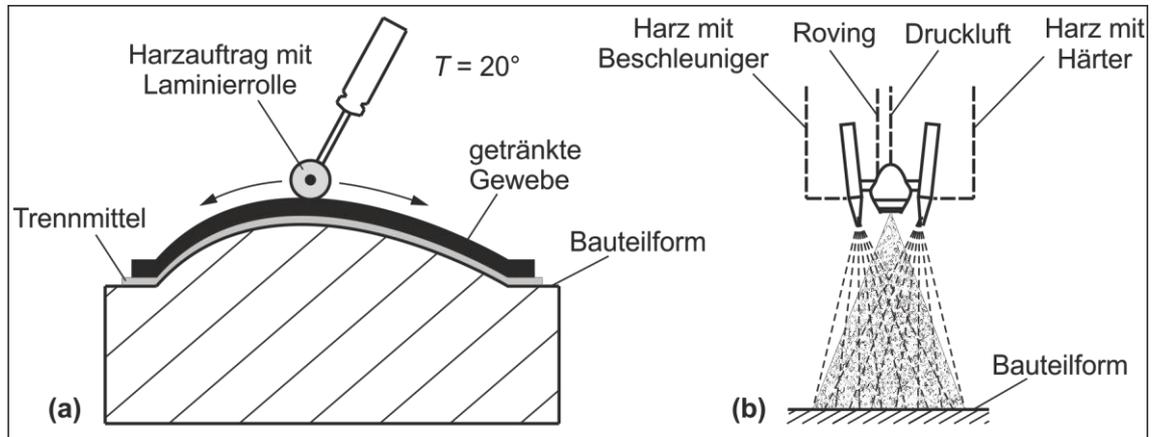


Bild 2.18 Handlaminierverfahren (a) und Faserspritzverfahren (b) nach MICHAELI et al. ^[120] und R&G Faserverbundwerkstoffe GmbH ^[129]

2.3.5.2 Harzinjektions- und -infusionsverfahren

Harzinjektions- und -infusionsverfahren zählen zu den Flüssigimprägnier- bzw. Liquid-Composite-Moulding-Verfahren. Sie gehören mit zu den wichtigsten und am häufigsten in der Serienfertigung eingesetzten Verfahren zur Herstellung von FVK-Bauteilen. Das Grundprinzip der Liquid-Composite-Moulding-Verfahren besteht darin, dass ein textiles Halbzeug ohne vorhergehende Imprägnierung in eine Werkzeugkavität eingelegt wird. Nach dem Schließen der beiden Werkzeughälften wird über ein Düsensystem das Harz injiziert. Der angelegte Druck erzeugt eine sehr gute Konsolidierung des Verbundes. Die Aushärtung des Matrixharzes erfolgt durch eine entsprechende Temperierung des Werkzeugs. Das fertige FVK-Bauteil wird abschließend aus dem Werkzeug entnommen. Durch den Einsatz z. B. von Handlingrobotern ist das Harzinjektionsverfahren vollständig automatisierbar. ^[128]

Aufgrund von kostengünstigen Faserhalbzeugen, einem geringen Investitionsaufwand und vergleichsweise kurzen Zykluszeiten sind diese Verfahren sehr wirtschaftlich. Weitere ausschlaggebende Vorteile liegen in der nahezu unbegrenzten Prozess- und Verfahrensvielfalt sowie in der hohen Qualität und Präzision. Es können beidseitig sehr gute Oberflächenqualitäten und hohe Faservolumenanteile erreicht werden. Der größte Nachteil der Harzinjektionsverfahren liegt in dem hohen Aufwand, der für die Entwicklung und Realisierung von geschlossenen Werkzeugformen aufgebracht werden muss, sowie in dem erhöhten Harzbedarf für poren- und fehlerfreie Bauteile. Als Matrixmaterial kommen lediglich duroplastische Polymere in Frage, da sich Thermoplaste aufgrund ihrer zu hohen Viskosität nicht für Injektions- bzw. Infusionsprozesse eignen.

Die unterschiedlichen Verfahrensvarianten der Injektions- und Infusionsverfahren können in erster Linie hinsichtlich der verschiedenen Arten der Druckbeaufschlagung voneinander differenziert werden. Beim Vakuuminjektionsverfahren (VI) wird an der Kavität ein Vakuum angelegt. Die Harzinjektion erfolgt durch den resultierenden Unterdruck. Beim Resin Transfer Moulding (RTM) wird ein Überdruck erzeugt, der das Harz in die Kavität presst. Durch die höheren Druckdifferenzen im Vergleich zu dem Vakuuminjektionsverfahren ist auch die Herstellung großflächiger Bauteile mit komplexen Geometrien möglich. ^[44] Neben diesen beiden häufig eingesetzten Harzinjektionsverfahren gibt es eine Reihe von Verfahrensvarianten. Der wesentliche Unterschied besteht meist in der Art der Harzinjektion. ^{[42] [130] [131] [132] [133]} Jede Verfahrensvariante hat spezifische Vor- und Nachteile, die es im jeweiligen Anwendungsfall abzuwägen gilt. So eignen sich einige Verfahren eher für eine automatisierte Großserienfertigung, andere eher für eine qualitätsoptimierte Prototypenfertigung.

2.3.5.3 Autoklavverfahren

Das Autoklavverfahren gehört, wie das Vakuumsack- und das Drucksackverfahren, zu den Niederdruckverfahren. Als Ausgangsmaterial für das Verfahren dienen i. d. R. zugeschnittene Prepregs, die manuell oder durch rechnergesteuerte Legemaschinen in das Formwerkzeug eingelegt werden. Es können allerdings auch textile Verstärkungsgeometrien verwendet werden. In diesem Fall muss das Matrixharz noch infundiert werden. In beiden Fällen sind eine exakte Positionierung sowie eine symmetrische Anordnung über die Laminatdicke erforderlich. ^[73] Auf den Prepregaufbau werden anschließend weitere Schichten aufgelegt. Das Sauggewebe dient zur Aufnahme von überschüssigem Matrixharz. Die einfachste Art, das Sauggewebe vom Laminat zu trennen, ist die Einlage eines Abreißgewebes und einer Lochfolie. Durch die Art der Lochung der Lochfolie und durch eine genaue Einstellung des Überdrucks kann der Faservolumengehalt beeinflusst werden. Das Abreißgewebe bewirkt eine Veränderung der Gewebestruktur der Oberfläche und damit eine Haftungsverbesserung bei Verbindungen verschiedener Lamine. Absaugkanäle unterstützen die optimierte Luftabsaugung vor allem bei großflächigen Bauteilen. ^{[93] [128]}

Zentraler Bestandteil des Verfahrens ist ein beheizbarer Druckbehälter, der sogenannte Autoklav. ^[128] Das bestückte Formwerkzeug wird in diesen Druckkessel eingefahren. Nach dem Anlegen eines Vakuums erfolgt die Aushärtung im Autoklav nach einem dem Harzsystem entsprechenden Temperatur-Druck-Zeit-Verlauf. Im Druckkessel wird zusätzlich zum Vakuum ein Überdruck erzeugt. Somit kann ein Vielfaches der Presskraft des Vakuumpressens erzeugt werden. Die Temperaturerhöhung im Autoklav bewirkt eine beschleunigte Vernetzung der duroplastischen Matrix. Die durch den Überdruck im Druckkessel und das Vakuum erzeugte Presskraft führt zu einer optimalen Imprägnierung und anschließenden Konsolidierung der Prepregs.

Mit diesem Verfahren hergestellte FVK-Bauteile zeichnen sich durch ihre sehr gute Qualität, hohe Faservolumengehalte, geringe Porenanteile und die gezielt einstellbare

Faserorientierung aus. Entsprechend gut sind die erreichbaren mechanischen Kennwerte. Durch den gleichmäßigen Konsolidierungsdruck lassen sich sehr komplexe Strukturen fertigen. ^[44] ^[83] Nachteilig beim Autoklavverfahren sind die hohen Kosten und die sehr langen Zykluszeiten, die je nach Bauteilgröße bis zu 7 Stunden betragen können. Das Verfahren ist somit nur in der Einzelfertigung, in kleinen Serien oder bei großen Bauteilen wirtschaftlich einsetzbar. ^[73]

2.3.5.4 Pressverfahren

Pressverfahren werden zur Verarbeitung von FVK in großen Stückzahlen eingesetzt. Die Vorteile liegen in den guten Oberflächenqualitäten, den geringen Taktzeiten sowie der Möglichkeit der Automatisierung der Prozesse und einer guten Reproduzierbarkeit begründet. Ein wesentlicher Nachteil sind die hohen erforderlichen Grundinvestitionen für Werkzeuge, Pressen und Peripherie. ^[83] ^[129] ^[134]

Pressverfahren sind für faserverstärkte Kunststoffe mit duroplastischer oder thermoplastischer Matrix geeignet. Thermoplaste sind im erwärmten Zustand gut umformbar. Dies gilt sowohl für reine Werkstoffe als auch für faserverstärkte Thermoplaste. Duroplaste sind nur als vorgetränktes und nicht vollständig konsolidiertes Halbzeug umformbar. Nach der Formgebung unter Druck- und Wärmeeinwirkung sind sie ausgehärtet und nicht weiter verformbar. ^[44]

Bei dem Nasspressverfahren werden Halbzeuge basierend auf Matten, Geweben oder Gelegen in eine mehrteilige Form eingelegt. Das Matrixharz wird anschließend hinzugegeben und der Pressvorgang eingeleitet (Bild 2.19). Die Werkzeugtemperatur liegt hierbei bei rund 90 bis 140 °C je nach Matrixharztyp. Der Pressdruck auf das Bauteil beträgt zwischen 5 und 25 bar. Eine weitere Möglichkeit bildet das Pressen von Prepregs, d. h., die Halbzeuge sind bereits mit einer Polymermatrix getränkt. ^[17] ^[69] ^[96] ^[106] ^[129]

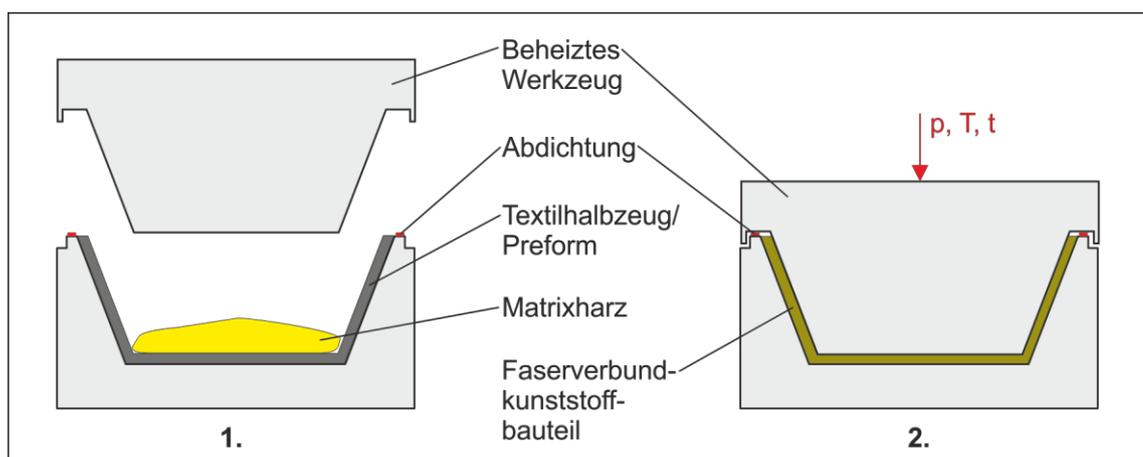


Bild 2.19 Schematische Darstellung des Nasspressens

Pressverfahren werden als Warmpressverfahren bezeichnet, wenn die Verarbeitungstemperatur über 80 °C liegt. Der Fertigungsvorgang findet in hydraulischen Pressen mit beheizten Werkzeugformen aus Stahl oder bei geringeren Stückzahlen aus Aluminium statt. Die verwendete Presse ist abhängig von dem jeweiligen Anwendungsfall. Essentiell ist das planparallele Schließen der Presse, um eine gleichmäßige Verteilung des Matrixharzes und eine genaue Einhaltung der Bauteiltoleranzen zu gewährleisten. Die Verwendung von beheizten, fein polierten und hartverchromten Stahlwerkzeugen führt zu einer besseren Entformbarkeit und einer höheren Oberflächengüte. ^[83] Bei der Formgebung von Prepregs kann durch weitere Maßnahmen wie Deckschichten aus kurzglasfaserverstärkten Kunststoffen das Fließverhalten während der Umformung positiv beeinflusst werden. ^[135P]

Fließpressen kurz- und langfaserverstärkter duroplastische Prepregs

Aktuell besitzen insbesondere Pressverfahren für kurz- und langfaserverstärkte duroplastische Prepregs eine wirtschaftliche Bedeutung. Die vorimprägnierten Halbzeuge, wie z. B. Sheet Moulding Compounds (SMC), liegen in einem knetförmigen Zustand vor und werden zurechtgeschnitten, endkonturennah gestapelt, aufgeheizt und in das Werkzeug eingelegt. Die Werkzeugtemperatur beträgt je nach Anwendung und Harzsystem ca. 90 bis 160 °C. Nach dem Schließen des Werkzeugs wird durch eine Presse ein definierter Druck erzeugt, der beispielsweise bei SMC zwischen etwa 20 und 250 bar liegt. Die Formfüllung erfolgt dabei durch Fließen des Materials, d. h., der Kunststoff verbleibt im Gegensatz zum Thermoformen und zu anderen Umformverfahren nicht in seiner ursprünglichen Form. Stattdessen ändert das Matrixmaterial während der Aufbereitung zunächst seinen Zustand von klebrig/weich nach flüssig, um anschließend durch zusätzliche Einwirkung von Temperatur in der endgültigen Form auszuhärten. ^{[44] [83] [129]}

Eine vollständig automatisierte Fertigung ist bei der Verwendung von vollautomatisierten Pressen und verarbeitungsfähigen SMC-Coils möglich. Die Zykluszeit liegt dann bei ca. 30 s im Vergleich zu sonst üblichen 1 bis 4 min. Für die Aushärtung des Matrixharzes sind lediglich 15 s notwendig. ^{[73] [83] [121] [134]} Vorteile des Einsatzes von SMC liegen in der hohen Gewichtsersparnis, der freien Gestaltung der Bauteilgeometrie, den vielfältigen Designmöglichkeiten, der Durchlässigkeit für elektromagnetische Strahlung oder der Dämpfungscharakteristik. Zudem bietet das Verfahren die Möglichkeit, komplexe, endkonturennah Bauteile herzustellen. Die Halbzeug- und Herstellkosten sind gering. Die niedrigen Zykluszeiten ermöglichen einen hohen Materialdurchsatz. Die vergleichsweise einfache Prozessführung ermöglicht den Einsatz von kostengünstigen Werkzeugen und macht das Verfahren wirtschaftlich attraktiv. ^{[44] [73] [136] [137] [138] [139]}

Aktuelle Entwicklungen im Bereich der Herstellung und Verarbeitung von kurz- und langfaserverstärkten duroplastischen Prepregs sind u. a. Low Density Sheet Moulding Compounds (LD-SMC) oder Advanced Sheet Moulding Compounds (Advanced SMC). ^{[136] [138] [139]}

Formpressen endlosfaserverstärkter duroplastischer Prepregs

Um die Vorteile der automatisiert auf kontinuierlich produzierenden Anlagen hergestellten Prepregs z. B. für den Automobilleichtbau zu nutzen, werden Pressverfahren eingesetzt. Dabei wird das Prepreg wie bei einer Blechumformung durch den Stempel in die Matrize eingeformt. Vor der Verarbeitung ist zunächst eine Aufwärmung mindestens auf Raumtemperatur vorzusehen, um eine Verformbarkeit der Halbzeuge zu gewährleisten. Bei dem Umformen und dem anschließenden Aushärten von Prepregs sind der Temperatur-Zeit- sowie der Druck-Zeit-Verlauf von entscheidender Bedeutung. Diese sollten entsprechend den Rahmenbedingungen optimiert werden. ^{[17] [46]} ^[140] Bei dem Prepregpressen kann auf Konzepte und Ergebnisse aus der Verarbeitung von thermoplastischen Prepregs bzw. Organoblechen zurückgegriffen werden. So kann ein Niederhaltersystem z. B. den Materialfluss des Prepregs während der Umformung positiv beeinflussen. ^[96] Bei der Umformung von endlosfaserverstärkten Halbzeugen ist zu beachten, dass die Verstärkungskomponente sich nicht plastisch verformen lässt. Die durch Faserverschiebung ermöglichten geringen Verformungen haben zur Folge, dass die Fasern womöglich nicht mehr optimal orientiert sind. Die Umformung in abwickelbare Flächen ist günstig, da hierbei keine Verformung des Verstärkungstextils notwendig ist. ^[46]

Die Umformung selbst kann auf verschiedene Arten realisiert werden. Einsatz finden u. a. Diaphragmen, Metall- oder Silikonstempel und Elastomerblöcke, die je nach Anforderung unterschiedliche Vor- und Nachteile bieten. ^{[44] [141]} Die Werkzeuge für das Formen von Duroplasten werden im Allgemeinen in Stahl ausgeführt. Dies führt zu einer hohen Oberflächengüte und ermöglicht hohe Abformgenauigkeiten. Ein weiterer Vorteil sind die hohen Standzeiten. ^[46]

2.4 Werkstoffkombinationen

Die Beanspruchungen in Bauteilen und Baugruppen sind i. d. R. nicht homogen verteilt. Diesem Umstand kann durch eine belastungsangepasste Gestaltung begegnet werden, welche z. B. über eine Verbundbauweise realisiert werden kann. ^[21]

2.4.1 Einteilung

Erfolgt eine Mischung unterschiedlicher Werkstoffe auf Baugruppenebene, so wird von Multimaterial-Bauweisen gesprochen. Hierbei werden zunächst Bauteile i. d. R. aus artgleichen Werkstoffen, d. h. Stahl, Aluminium oder FVK, hergestellt. Anschließend werden die einzelnen Bauteile durch einen geeigneten Fügeprozess zu einer Multimaterial-Struktur kombiniert. Dies kann z. B. eine durch eine strukturelle Klebung realisierte Kombination aus Stahl und FVK sein. Ein Beispiel für ein solches Multimaterialsystem ist der sogenannte Erlanger Träger. Bei dieser Profilstruktur wird eine dünnwandige metallische Struktur mit einer formschlüssigen Kunststoff-Verrippung kombiniert. Bei einem automobilen Dachrahmen kann auf diese Weise eine Gewichtsersparnis von bis

zu 40 % ohne Einbußen bezüglich der Strukturfestigkeit und -steifigkeit erreicht werden. ^{[21] [67] [142]} Die Kombination von Kunststoffen mit FVK ist eine Möglichkeit, das Gewicht noch weiter zu senken. ^[9]

Auf Bauteilebene lassen sich wiederum verschiedene Einteilungen treffen. Zweckmäßig erscheint eine Einteilung nach der Homogenität der Werkstoffe auf unterschiedlichen Größenskalen in Verbundwerkstoffe, Werkstoffverbunde und hybride Werkstoffverbunde. Ein Verbundwerkstoff weist makroskopisch ein homogenes Erscheinungsbild auf. Mikroskopisch lassen sich jedoch Verstärkungskomponente und Matrix voneinander unterscheiden. Ein Beispiel hierfür ist ein FVK. Ein Werkstoffverbund weist bereits auf makroskopischer Ebene ein heterogenes Profil auf, d. h., die einzelnen Komponenten lassen sich direkt unterscheiden. Verklebte metallische Bleche würden nach dieser Einteilung folglich als Werkstoffverbunde bezeichnet. Hybride Werkstoffverbunde weisen zunächst einen Verbundcharakter auf. Hinzu kommen jedoch noch weitere Aspekte, wie z. B. eine erweiterte Funktionalität. Die Kombination von metallischen Blechen mit FVK-Lagen oder Fibre Metal Laminates (FML) wie Glare zählen zu den Hybridwerkstoffen. ^{[21] [143]} Teilweise wird zusätzlich zwischen einem hybriden Werkstoffsystem und einer hybriden Struktur unterschieden. Bei dieser würde in einem Bauteil ein Übergang zwischen zwei Werkstoffen, wie z. B. Titan und einem FVK-Laminat, erfolgen. ^[144]

2.4.2 Hybridsysteme

Hybridsysteme bestehen aus metallischen Grundstrukturen, die in hochbeanspruchten Bereichen lokal mit einer Verstärkung aus einem FVK versehen werden. ^{[34] [140] [145]} Hierdurch lassen sich Strukturen wie B-Säulen oder Schweller belastungsangepasst und damit besonders leicht ausführen. Hinzu kommt, dass die hochwertigen und teuren FVK nur dort eingesetzt werden, wo sie den größten Nutzen erbringen. Dies führt sowohl zu einer guten Materialausnutzung als auch zu vergleichsweise moderaten Kosten. Als Fügeverfahren kommen aufgrund der ohnehin vorhandenen großen Überlappungsfläche i. d. R. Verfahrensvarianten des Klebens zum Einsatz. Durch die metallische Grundstruktur ist zudem eine Einbindung der Hybridstruktur in bestehende Karosseriekonzepte mittels Standardverfahren wie des Punktschweißens realisierbar. ^[146]

Als mögliche Werkstoffkombinationen für den Automobilleichtbau sind in der Literatur Stahl und Aluminium in Verbindung mit GFK und CFK zu finden. Durch die lokale Verstärkung kann die Blechdicke der Grundstruktur verringert werden. Insgesamt lassen sich durch die Hybridbauweise im Vergleich zu konventionellen Bauweisen je nach Referenzbauteil etwa 35 % an Gewicht einsparen. ^{[76] [147]} Eine reine FVK-Konstruktion würde eine Gewichtseinsparung von bis zu 50 % mit sich bringen. ^{[15] [45]} Allerdings würden die mit dieser Konstruktion verbundenen Kosten deutlich höher ausfallen. ^[12]

2.5 Klebtechnisches Fügen

Hybridsysteme bestehen aus mindestens zwei verschiedenen miteinander verbundenen Werkstoffen. Die Eigenschaften eines Hybrids werden daher maßgeblich auch durch eine geeignete Fügetechnik beeinflusst. Für die vorliegende Arbeit ist hierfür das klebtechnische Fügen von besonderer Bedeutung. Nach DIN 8593-8 ist das klebtechnische Fügen definiert als Fügen unter Verwendung eines nicht metallischen Stoffs, des Klebstoffs, der die Füge Teile durch Flächenhaftung (Adhäsion) und innere Festigkeit (Kohäsion) verbindet. Es werden physikalisch abbindende und chemisch reagierende Klebstoffe unterschieden. Klebungen aus physikalisch abbindenden Klebstoffen entstehen durch Verdampfen von Dispersions- und Lösungsmitteln oder Abkühlen. Chemisch reagierende Klebstoffsysteme zeichnen sich durch ihre Vernetzungsreaktion aus. ^{[148N] [149] [150]} Sie härten durch Polymerisation, Polyaddition und Polykondensation aus. Epoxidharzklebstoffe zählen zu den Polyadditionsklebstoffen, bei denen die Verknüpfung der Monomermoleküle auf der Anlagerung von verschiedenen reaktiven Monomermolekülen bei gleichzeitigem Übergang eines Wasserstoffatoms beruht. ^{[109] [151]}

Vorteile des klebtechnischen Fügens sind u. a. eine gleichmäßige Spannungsverteilung senkrecht zur Belastungsrichtung, die Isolation der Füge Teile gegeneinander und die Abdichtung von Spalten gegen das Eindringen von Elektrolyten. Das Verbinden artfremder und dünner Werkstoffe ist möglich. Klebungen bieten außerdem durch ihre hohe Elastizität gute Festigkeiten bei hochdynamischer und crashartiger Beanspruchung und sind in der Lage, unterschiedliche Füge Teildeformationen auszugleichen. Das Kleben ist gut automatisierbar. ^{[33] [86] [109] [152] [153]}

Nachteile des Klebens sind beispielsweise die teilweise aufwändige Oberflächenvorbehandlung, die vergleichsweise langen Zykluszeiten sowie die für eine effektive Vernetzung bei Reaktionsklebstoffen notwendige exakte Einhaltung der Prozessparameter. Klebungen unterliegen zudem Alterungseffekten, d. h., ihre Eigenschaften verändern sich mit der Zeit. Klebstoffe sind aufgrund ihres organischen, polymeren Ursprungs nur für begrenzte Temperaturbereiche geeignet. Die Festigkeiten von Klebungen werden nur über die Größe der Verbindungsflächen erreicht. Die Demontage der Verbindungen und Reparaturen sind nur in begrenztem Maße möglich und hängen von der Art des Klebstoffs ab. ^[109]

2.5.1 Bindungskräfte

Die mechanischen Eigenschaften von klebtechnischen Verbindungen werden maßgeblich durch drei verschiedene Faktoren beeinflusst. Diese sind die innere Festigkeit des Klebstoffsystems, die Festigkeit der Grenzschichten und die Festigkeit der Füge Teilwerkstoffe. Für die Kraftübertragung zwischen den Füge Teilen maßgeblich sind die Festigkeiten der Klebschicht und der Grenzschichten. Eine dieser beiden Schichten stellt i. d. R. das schwächste Glied der Verbindung dar. Die Festigkeit einer klebtechnischen Fügung basiert auf der Wirkung von Bindungskräften. Die in der Grenzschicht

einer Fügung wirkenden Kräfte werden als Adhäsionskräfte bezeichnet, während die in der Klebschicht wirkenden Kräfte als Kohäsionskräfte bezeichnet werden. ^{[109] [149] [154]}

Bindungskräfte realisieren den Zusammenhalt von mindestens zwei Atomen oder Atomgruppen innerhalb von Molekülen oder Phasengrenzen. Die wirksame Bindungsenergie resultiert aus der Differenz zwischen der Summe der Einzelenergien der beteiligten Partner, wenn sie sich in unendlicher Entfernung voneinander befinden, und der Energie der beteiligten Partner nach erfolgter Bindung. Die Bindungskräfte beruhen auf chemischen Bindungen (Hauptvalenzbindungen), also z. B. metallischen oder heteropolaren Bindungen, und zwischenmolekularen Bindungen (Nebervalenzbindungen), d. h. VAN DER WAALS- oder Wasserstoffbrücken-Bindungen, infolge der Wechselwirkungen zwischen Atomen oder Molekülen. ^[109]

2.5.1.1 Adhäsion

Adhäsion bezeichnet die Gesamtheit der Bindungskräfte an der Grenzschicht zwischen Klebstoff und Füge­teil. Die Adhäsion kann in drei für ihre Entstehung maßgebliche Bereiche eingeteilt werden. Die spezifische Adhäsion beschreibt die auf chemischen, physikalischen und thermodynamischen Gesetzmäßigkeiten basierenden Adhäsionserscheinungen. Unter mechanischer Adhäsion wird eine formschlüssige Verbindung zwischen dem Klebstoff und der Oberfläche der Füge­teile verstanden. Der Klebstoff dringt in Poren, Kapillaren, Hinterschneidungen oder zwischen Fasern ein. Der dritte Bindungsmechanismus ist die Autohäsion. Diese tritt jedoch nur unter gleichen Kautschuken auf, die über eine große Beweglichkeit der Makromoleküle verfügen. ^{[109] [155]}

Auf die Ausbildung von Adhäsionskräften haben die Beschaffenheit und die Benetzbarkeit der Oberfläche sowie die Viskosität des Klebstoffs einen wesentlichen Einfluss. Um angemessene Eigenschaften der Oberflächen für das Kleben zu erreichen, ist eine Vorbehandlung in vielen Fällen erforderlich. Durch die Vorbehandlung wird vermieden, dass die Ausbildung von Adhäsionskräften durch unerwünschte Zwischenstoffe oder -schichten behindert wird. Neben der Oberflächenvorbehandlung spielt die Benetzbarkeit des Klebstoffs eine wichtige Rolle. Der Klebstoff muss in der Lage sein, die Oberfläche in geeigneter Weise zu benetzen, damit sich Adhäsionskräfte ausbilden können. ^{[149] [155] [156]}

2.5.1.2 Kohäsion

Unter Kohäsion wird der Zusammenhalt durch Anziehungskräfte von Atomen bzw. Molekülen in einem Stoff verstanden. Auf welchen Mechanismen die innere Festigkeit beruht, ist von der jeweiligen Art des Stoffs und seinen Primär- und Sekundärbindungen abhängig. Neben den Bindungen wird die Kohäsion durch mechanische Verklammerungen und Verknäuelungen innerhalb des Stoffs wesentlich beeinflusst. ^[109]

Die innere Festigkeit der Klebschicht entsteht durch das Übergehen des flüssigen Klebstoffs zu einem festen Polymer. Sie hängt vom Ordnungsgrad der inneren Struktur ab, welche durch die einzelnen Monomere entsteht. Dabei verursachen Fehlstellen die Bildung von Eigenspannungen und tragen zum frühzeitigen Versagen der Klebung bei. Gründe für Fehlstellen sind zu hohe oder zu geringe Aushärtungstemperaturen, welche die Vernetzung beeinflussen. Auch Lösungsmittelreste in der Klebschicht können Fehlstellen hervorrufen. ^[109]

2.5.2 Kleben von Faserverbundkunststoffen

FVK-Bauteile bestehen i. d. R. aus einer Vielzahl fest miteinander verbundener Einzel-lagen. Für diese Verbindungen sowie für das Anbringen von Krafeinleitungen bietet das Kleben aufgrund der großen wirkenden Fläche und der gleichmäßigen Spannungsverteilung in vielen Fällen eine optimale Lösung. Als Klebstoffsysteme für FVK werden vor allem warm- und kalthärtende Epoxidharz- sowie Polyurethanklebstoffe eingesetzt. Wichtig ist, dass die Festigkeit der Klebung die des Verbundwerkstoffs erreicht. Wie beim Kleben von Metallen spielt auch in diesem Fall die Oberflächenvorbehandlung eine entscheidende Rolle. ^{[109] [151]}

Abreißgewebe ermöglichen nach deren Entfernung eine saubere und vergrößerte Oberfläche. Bei dem Abreißen der Lage werden keine Fasern beschädigt. Diese Art der Oberflächenvorbehandlung eignet sich jedoch nicht für jede Art von FVK. ^{[86] [109]} Bei anderen Arten der Vorbehandlung ist darauf zu achten, die Fasern nicht zu beschädigen, da ansonsten eine gleichmäßige Kraftübertragung in der Grenzschicht nicht sichergestellt werden kann. Das Entfetten ist eine sehr behutsame Methode. Sie bewirkt allerdings lediglich eine Reinigung der Oberfläche und keine Aktivierung. Mechanische Verfahren wie das Schleifen führen mit großer Wahrscheinlichkeit zu einer Beschädigung der Fasern. ^[109]

Im Bereich der Fügeverfahren für Metall-FVK-Kombinationen gibt es eine Reihe von neuen Entwicklungen, wie beispielsweise mittels sogenannter Pins modifizierte Metalloberflächen. Diese Pins ermöglichen einen losen Formschluss mit trockenem Fasermaterial und erhöhen die Tragfähigkeit der fertigen Verbindung. ^[27]

2.6 Methodisches Gestalten

Um aus den zuvor beschriebenen Werkstoffen, Prinzipien und Verfahren marktfähige Produkte zu generieren, bedarf es einer systematischen Gestaltung von Produkten. Die Grundlagen hierfür, also das methodische Gestalten, gliedert sich in drei wesentliche Teile: die Grundregeln der Gestaltung, die Gestaltungsprinzipien und die Gestaltungsrichtlinien.

Zu den Grundregeln der Gestaltung zählen die Einfachheit einer Konstruktion, die Sicherheit sowie die Eindeutigkeit. ^{[157] [158] [159] [160]} Die Gestaltungsprinzipien helfen dem

Konstrukteur bei der Entwicklung von Produkten, die ihre jeweilige Aufgabe bzw. Funktion in geeigneter Weise erfüllen. Von besonderer Bedeutung für die vorliegende Arbeit sind das Prinzip der Kraftleitung sowie das der Aufgabenteilung. Das Prinzip der Kraftleitung kann wiederum in die Prinzipien der gleichen Gestaltfestigkeit, der direkten und kurzen Kraftleitung, der abgestimmten Verformung und des Kraftausgleichs unterteilt werden. ^{[18] [158] [159]}

Bei den Gestaltungsrichtlinien kann zwischen den allgemeinen sowie den verfahrens- und materialabhängigen Richtlinien unterschieden werden. Die allgemeinen Gestaltungsrichtlinien beinhalten allgemeingültige Hinweise für Konstruktionen unabhängig von verfahrens- oder materialspezifischen Besonderheiten. Zu den allgemeinen Gestaltungsrichtlinien zählen beispielsweise:

- *Ausdehnungsgerechtes Gestalten*: umfasst die Berücksichtigung der thermischen und mechanischen Ausdehnungen von Strukturen, z. B. $\Delta\alpha$ -Problematik. ^{[153] [158] [160]}
- *Korrosionsgerechtes Gestalten*: beinhaltet das Verhalten einer Konstruktion gegenüber Korrosion. ^[158]
- *Fertigungsgerechtes Gestalten*: zielt auf die Minimierung von Fertigungskosten und -zeit bei einer gleichzeitigen Maximierung der Fertigungsqualität. ^[158]

Daneben gibt es je nach Verfahren und Material spezifische Richtlinien. Diese berücksichtigen z. B. Besonderheiten der Prozesse oder der Werkstoffe. Hierzu gehören u. a.:

Fügeverfahren

Für das Fügen von FVK-Bauteilen kommen häufig Bolzenverbindungen, d. h. Niet- und Schraubenverbindungen, sowie das Kleben zum Einsatz. Für Bolzenverbindungen sind z. B. möglichst zweischnittige Anschlüsse zu verwenden, um Biegebelastungen zu vermeiden, oder es sollten an der Verbindungsstelle quasiisotrope Lamine (0° -, $\pm 45^\circ$ - und 90° -Lagen) eingesetzt werden. ^{[18] [82] [86]} Für Klebverbindungen sollten u. a. möglichst eine Scherbeanspruchung und eine ausreichend große Überlappungsfläche vorliegen. Klebfugenübergänge sollten frei von scharfen Kanten und Ecken sein, um die mechanischen Eigenschaften der Verbindung nicht negativ zu beeinflussen. ^{[82] [86] [109]}

Kostenreduzierte Konstruktionen

Insbesondere bei der Verwendung von hochpreisigen Werkstoffen wie FVK ist auf einen gezielten Materialeinsatz zu achten. Hierdurch lassen sich Konstruktionen realisieren, die aus wirtschaftlicher und technischer Sicht konkurrenzfähig sind. Um dieses Ziel zu erreichen, sollte der Fertigungsaufwand reduziert werden. Durch die Wahl eines geeigneten Füge- und Fertigungsverfahrens können die Kosten stark beeinflusst werden. ^[82]

Faserverbundkunststoffe

Bei der Gestaltung von FVK-Bauteilen ist u. a. ein besonderes Augenmerk auf die Auswahl eines geeigneten Faserdurchmessers und Fasertyps zu legen. Neben unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften beeinflusst die jeweilige Steifigkeit einer Faser auch das Umformvermögen und die Drapierbarkeit. Enge Radien lassen sich somit gut mit wenig

er steifen, dünnen Fasern abbilden. Ecken und Kanten sollten jedoch mindestens mit einem Radius von 2 mm ausgerundet sein. Es sollte darauf geachtet werden, dass die Fasern mit einem definierten Druck in die Ecken gepresst werden. Bei Nichtbeachtung kann dies dazu führen, dass die Fasern die Kontur nicht korrekt abbilden können und Lunker oder Harzanreicherungen entstehen. Die Tendenz zum Aufstellen an Kanten kann dadurch minimiert werden, dass die Fasern in einem Winkel von $\pm 45^\circ$ darüber drapiert werden. ^{[3] [86] [129] [161]}

Für FVK-Bauteile ist auf eine gute Entformbarkeit zu achten. Die Formen bzw. Werkzeuge können hierfür z. B. mehrteilig ausgeführt oder mit Entformungsschrägen versehen werden. Massenanhäufungen und Hinterschnitte sind zu vermeiden. Je nach Möglichkeit sollten geringe Wandstärken verwendet werden. Diese bieten zudem den Vorteil, dass sie schneller aushärten. Wandstärkenvariationen sind gestuft zu gestalten, um Spannungsspitzen zu vermeiden. Ein Gestalten mit räumlicher Tragwirkung bietet an dieser Stelle Vorteile. ^{[3] [86] [129] [161]}

Laminatschichten sollten symmetrisch aufgebaut sein. Dies gilt umso mehr für heißhärtende Matrixsysteme, um thermische Verformungen und Eigenspannungen zu vermeiden. Durch eine angepasste Faseranordnung oder Matrixfüllstoffe kann der Wärmeausdehnungskoeffizient des FVKs beeinflusst werden. Um die interlaminaren Schubspannungen zwischen den Einzellagen eines Laminats gering zu halten, sollten die Winkelunterschiede in der Faserorientierung zwischen aufeinanderfolgenden Laminatschichten klein sein. ^{[3] [86] [129]}

Bauteile aus kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen sind aufgrund der hohen Werkstoffkosten möglichst endkonturennahe zu fertigen. Auf eine Nachbearbeitung sollte verzichtet werden können. Um Kosten zu reduzieren, ist je nach Anforderung eine teilweise oder vollständige Substitution von hochpreisigen Kohlenstofffasern z. B. durch Glasfasern anzustreben. Durch die Kombination unterschiedlicher Faserarten können zudem bestimmte Eigenschaften des Verbundes gezielt verbessert werden. Die Faserorientierung sollte dabei stets dem Kraftflussverlauf angepasst sein, um die herausragenden Werkstoffeigenschaften nutzbar zu machen. ^{[86] [162]}

3 Prepregpressen

Die technologischen Vorteile der Faserverbundtechnik werden bei vielen aktuell genutzten Herstellungsverfahren durch ökonomische Defizite infolge fehlender Großserientauglichkeit kompensiert. Um FVK in Automobilen einsetzen zu können, bedarf es jedoch geeigneter, großserientauglicher Prozesse. In erster Linie bedeutet dies Verarbeitungsprozesse für die FVK-Komponente mit einem hohen Automationsgrad und mit niedrigen Zykluszeiten. ^[51]

Beim Prepregpressen sollen die Kenntnisse und Erfahrungen aus zwei Bereichen zusammengeführt werden. Auf der einen Seite sollen die Vorteile der Verwendung von Prepregs und des Heißpressens genutzt werden. Hierzu zählen z. B. der Entfall der Imprägnierung des Faser-Halbzeugs im Fertigungsprozess, eine geringere Fertigungstiefe sowie für FVK-Bauteile enge Toleranzen und hohe Qualitäten. Auf der anderen Seite sollen Vorteile wie der hohe Automatisierungsgrad und die geringen Taktzeiten der Blechbearbeitung nutzbar gemacht werden. Hierdurch lassen sich die Fertigungskosten senken.

Daneben wird dem Umstand Genüge getan, dass die Belastung von Strukturen im Allgemeinen nicht homogen ist. Die Konsequenz hieraus ist, dass der Einsatz von FVK auf hochbelastete Bauteilbereiche beschränkt wird. Am Beispiel der B-Säule eines Automobils könnte dies in Form einer Verstärkungskomponente in crashrelevanten Bereichen der Struktur realisiert werden. Hierdurch würde der teure FVK nur partiell eingesetzt und bestmöglich ausgenutzt werden. Durch diese Maßnahmen lassen sich die Bauteilkosten gegenüber einer reinen FVK-Lösung deutlich senken.

3.1 Verfahrensablauf

Mittels des Prepregpressens können sowohl solitäre FVK-Bauteile als auch Hybridbauteile hergestellt werden. Bei der Herstellung von Hybriden können das indirekte und das direkte Prepregpressen unterschieden werden. Darüber hinaus können auch Hybridbauteile auf Basis einer gemeinsamen Umformung von Blechplatte und Prepreg oder auf Basis plattierter Doppelbleche mit lokal eingelegtem Prepreg hergestellt werden.

3.1.1 Herstellung angepasster Prepregs

Wesentliches Merkmal des Prepregpressens ist die Verwendung vorimprägnierter FVK-Halbzeuge. In einem ersten Schritt werden die Verstärkungsfasern in einer Prepreg-Anlage kontinuierlich mit dem Matrixharz imprägniert und aufgerollt. Anschließend werden die einzelnen Prepreg-Lagen entsprechend den Beanspruchungen des späteren Bauteils zu einem Mehrschichtenverbund aufeinandergeschichtet und verpresst (Bild 3.1). Je nach anzuwendender Fügetechnik wird auf der Oberseite des Prepregs

ein Klebfilm appliziert. Im nächsten Schritt werden die Prepregs zugeschnitten. Der Zuschnitt erfolgt bei reinen FVK-Bauteilen entsprechend der Bauteilgeometrie. Bei Hybridbauteilen wird das Prepreg entsprechend der Verstärkungsgeometrie konfektioniert. Zum Abschluss werden die Prepregs auf der Oberseite mit einer Trennfolie versehen und magaziniert. Je nach Trennmittel wird beim Prepregpressen von FVK-Bauteilen und beim indirekten Prepregpressen zusätzlich eine Trennfolie auf der Unterseite appliziert.

3.1.2 Prepregpressen von Faserverbundkunststoff-Bauteilen

Auf der Grundlage der konfektionierten Prepregs (Bild 3.1; 1. Schritt) lassen sich mittels des Prepregpressens FVK-Bauteile herstellen. Dafür wird das Prepreg automatisiert aus einem Magazin entnommen (2. Schritt a)) und in das geöffnete Prepregpress-Werkzeug (3. Schritt) eingelegt. Die Handhabungseinrichtung greift das Prepreg dabei auf der Trennfolie auf der Oberseite. Beim Schließen des isotherm beheizten Werkzeugs ermöglichen z. B. Niederhalter oder Ziehleisten die Herstellung auch komplexer Geometrien. Das Werkzeug ist idealerweise so gestaltet, dass eine endkonturennahere Fertigung der Bauteile ermöglicht wird. Hierdurch entfällt eine Nachbearbeitung wie ein Beschnitt des Randes. Im geschlossenen Werkzeug muss bei diesem Verfahren eine möglichst vollständige Aushärtung des Matrixharzes erfolgen, um z. B. Formänderungen nach dem Öffnen des Werkzeugs auszuschließen. Eine nachträgliche Wärmebehandlung bzw. ein Tempern der Bauteile ist in einem nachgeschalteten Lackierprozess realisierbar (i) Direktes Verfahren 4. Schritt a)). Die Nachhärtung sollte zeitnah im Anschluss an die Voraushärtung erfolgen. Bis zur vollständigen Aushärtung ist das Bauteil vorsichtig zu handhaben. ^[86] Ein vergleichbarer Verfahrensablauf erfolgt beispielsweise bei der lokalen induktiven Schnellhärtung von Klebeverbindungen aus EP-basierten Klebstoffen. Dort wird ebenfalls eine stufenweise Aushärtung bis zu einem vollständigen Umsatz sowie eine Nutzung einer kathodischen Tauchlackierung (KTL) für einen Teil der Aushärtung realisiert. ^[7] ^[163] Zum Abschluss des Prepregpressens sind die Trennfolien zu entfernen und die Bauteile abzulegen.

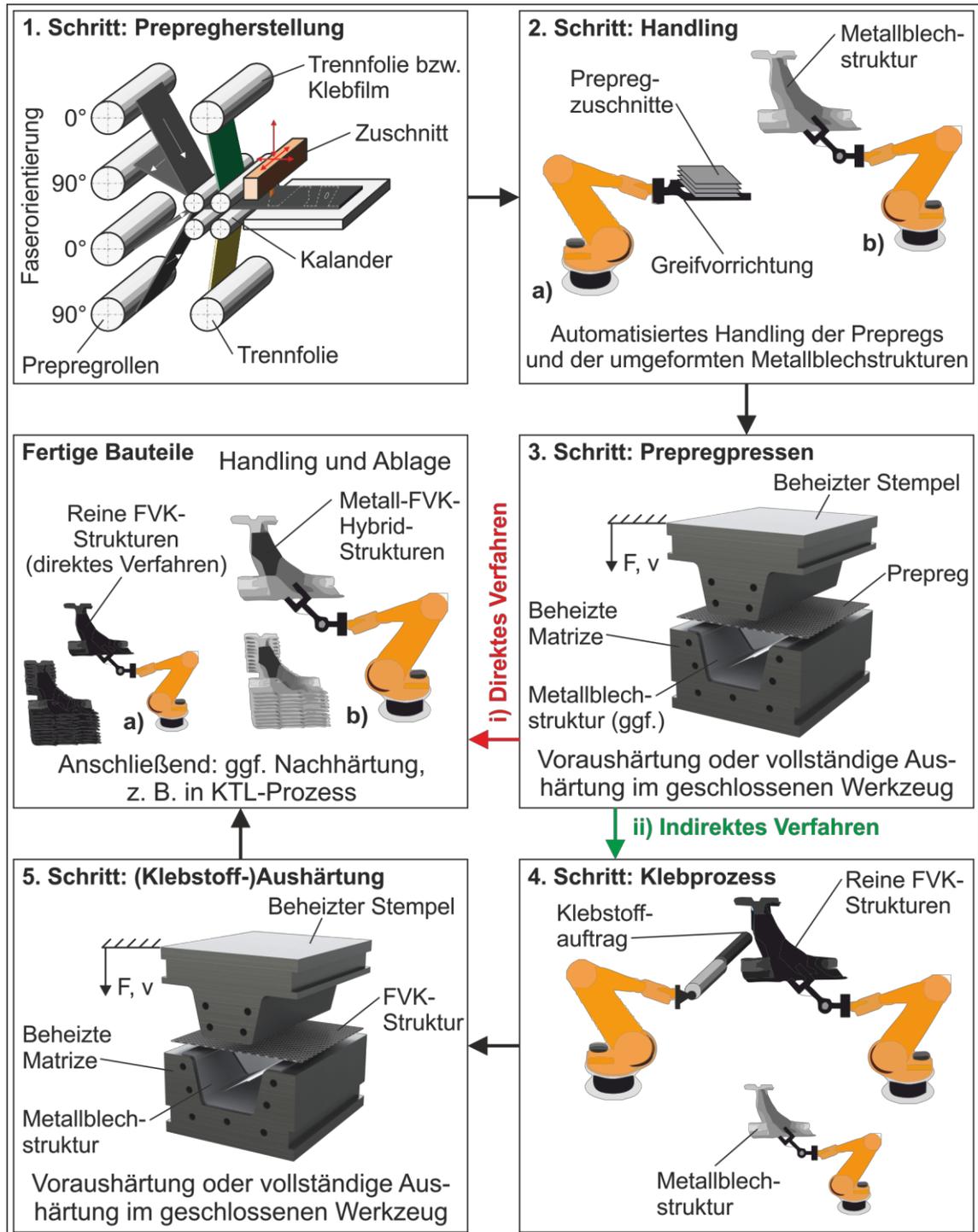


Bild 3.1 Prozessablauf zum Prepregpressen von FVK-Bauteilen sowie zum indirekten und direkten Prepregpressen von Hybridbauteilen

3.1.3 Indirektes Prepregpressen von Hybridbauteilen

Das indirekte Prepregpressen von Hybridbauteilen fußt auf dem zuvor beschriebenen Prepregpressen von FVK-Bauteilen. Die gepressten Strukturen entsprechen jedoch nicht einem vollständigen Bauteil, sondern sind lediglich als lokale Verstärkungsge-

metrie ausgeführt (Bild 3.1; 3. Schritt). Daneben werden durch einen parallelen Produktionsschritt metallische Grundstrukturen z. B. durch Umformverfahren wie das Presshärten hergestellt (2. Schritt b)). Nach dem Auftrag eines geeigneten Klebstoffsystems auf die Verstärkungsstruktur (ii) Indirektes Verfahren 4. Schritt) wird diese in die metallische Grundstruktur eingeklebt und ausgehärtet (5. Schritt). Dabei kann gegebenenfalls eine Voraushärtung des Klebstoffs erfolgen, so dass eine ausreichende Handlingfestigkeit erreicht wird. Die vollständige Aushärtung des Matrixharzes erfolgt anschließend in einem für automobiler Bauteile ohnehin nachgeschalteten KTL-Prozess.

3.1.4 Direktes Prepregpressen von Hybridbauteilen

Bei dem direkten Prepregpressen von Hybridbauteilen werden zunächst parallel zu der Herstellung der angepassten Prepregs (Bild 3.1; 2. Schritt a)) metallische Grundstrukturen (2. Schritt b)) hergestellt. Dabei kann, wie bei dem indirekten Prepregpressen, je nach Bauteilanforderungen z. B. auf pressgehärtete Strukturen zurückgegriffen werden. Ein Roboter legt zunächst das bereits umgeformte metallische Bauteil in das isotherm beheizte Presswerkzeug ein (3. Schritt). Danach wird das Prepreg durch eine Handlingapparatur aufgelegt und durch einen Umformprozess in das Blechbauteil eingepresset. Das Werkzeug wird je nach Komplexität der Bauteilgeometrie z. B. um Niederhalter oder Ziehleisten erweitert, um ein optimales Umformergebnis zu erzielen. Die Aushärtung des Prepregs erfolgt in zwei Stufen: Die Voraushärtung erfolgt im geschlossenen Werkzeug. Durch optimierte Prozessparameter u. a. für den Druck- und den Temperaturverlauf lässt sich eine Voraushärtung mit einer Zykluszeit von deutlich unter 5 min je nach Prepregdicke bewerkstelligen. Die metallische Grundstruktur stützt die Faserverbundkomponente und verhindert etwaige Verformungen. Die vollständige Aushärtung der Epoxidharzmatrix erfolgt wiederum in einem nachgeschalteten KTL-Prozess. Durch die Nutzung des Epoxid-Matrixharzes als Klebstoffsystem zur Anbindung des FVKs an die metallische Grundstruktur kann auf einen zusätzlichen, aufwändigen Fügeprozess verzichtet werden. ^{[23] [51] [93] [164]}

3.2 Bewertung des Verfahrens

Mittels des Prepregpressens ist es möglich, sowohl solitäre FVK-Bauteile als auch Hybridbauteile aus einer metallischen und einer FVK-Komponente herzustellen. Im Bereich der Herstellung von FVK-Bauteilen auf Basis einer duroplastischen Matrix konkurriert das Prepregpressen z. B. mit Vakuum-, Resin-Transfer-Moulding- oder Autoklavverfahren. Weitere konkurrierende Prozesse zum Prepregpressen sind zudem Thermoformverfahren für Organobleche mit thermoplastischer Matrix. Für eine ökonomisch und technologisch sinnvolle Anwendung muss das Prepregpressen gegenüber diesen Verfahren ein Verbesserungspotential aufweisen. Dabei kann eine Bewertung z. B. hinsichtlich der Bauteilqualität, der Taktzeit, der erreichbaren mechanischen Eigenschaften oder einer Kombination dieser erfolgen. Je nach Anwendung bzw. Bauteil sind Gewichtungsfaktoren entsprechend in die Bewertung mit einzubeziehen.

Beim indirekten Prepregpressen wird zunächst eine möglichst vollständig ausgehärtete FVK-Struktur hergestellt. Hier steht das Prepregpressen wiederum in Konkurrenz zu den oben genannten Fertigungsverfahren. Zur direkten Herstellung von Hybridbauteilen existieren aktuell kaum geeignete Verfahren. Die im Flugzeugbau verwendeten Fibre Metal Laminates wie Glare werden üblicherweise durch Autoklavverfahren hergestellt. Deren Taktzeiten sind jedoch für eine Großserienproduktion nicht geeignet. Insofern ist zur direkten Herstellung von Hybridbauteilen in großen Serien kein adäquates Pendant zum Prepregpressen bekannt.

3.3 Einflussgrößen und Parameter

Im Rahmen dieser Arbeit soll das Prepregpressen zur Herstellung solitärer FVK-Strukturen und insbesondere von Hybridbauteilen untersucht werden. Bei der Entwicklung von Hybridbauteilen ist auf die gegenseitigen Wechselwirkungen zwischen Bauteil- und Fertigungs-/Prozesseite zu achten (Bild 3.2). Beispielsweise können sehr kleine Flankenwinkel dazu führen, dass in den Flanken der notwendige Konsolidierungsdruck auf das Prepreg nicht mehr aufgebracht werden kann. Dies führt wiederum zu schlechteren Laminatqualitäten und damit zu schlechteren Bauteileigenschaften. Ein zu hoher Druck wiederum resultiert in einer Verzerrung des Prepregs oder der Umorientierung von Verstärkungsfasern. Auch dies hat einen negativen Einfluss auf die Bauteileigenschaften. Das Hauptaugenmerk liegt in dieser Arbeit auf der Fertigungs- bzw. Prozesseite, d. h. auf einer automatisierten Prozesskette sowie geringen Taktzeiten, um der Anforderung an eine Großserientauglichkeit gerecht zu werden. ^[165] ^[57]
[166]

Die Parameter der mittels des Prepregpressens hergestellten Bauteile lassen sich in verschiedene Bereiche einteilen. Neben den mechanischen Eigenschaften des Verbundes und den Prozessparametern sind dies z. B. die Verbindungseigenschaften, die Bauteilgeometrie, das Materialverhalten während der Verarbeitung, die Gestaltung der Werkzeuge sowie die Bauteileigenschaften.

Zu den mechanischen Eigenschaften zählen beispielsweise die Zugfestigkeit oder die Bruchdehnung. Diese hängen von den gewählten Prozessparametern, d. h. Druck, Temperatur und Zeit, ab. Diese haben wiederum Auswirkungen auf die Zykluszeit, die Laminatqualität oder die Konturgenauigkeit. Das Materialverhalten wird maßgeblich durch das Verstärkungshalbzeug und die Viskosität der Matrix beeinflusst. Durch eine entsprechende Prozessführung, wie z. B. eine Vorwärmung der Prepregs, kann der Pressprozess optimiert werden. Die einzelnen Parameter werden im Folgenden näher erläutert und untersucht.

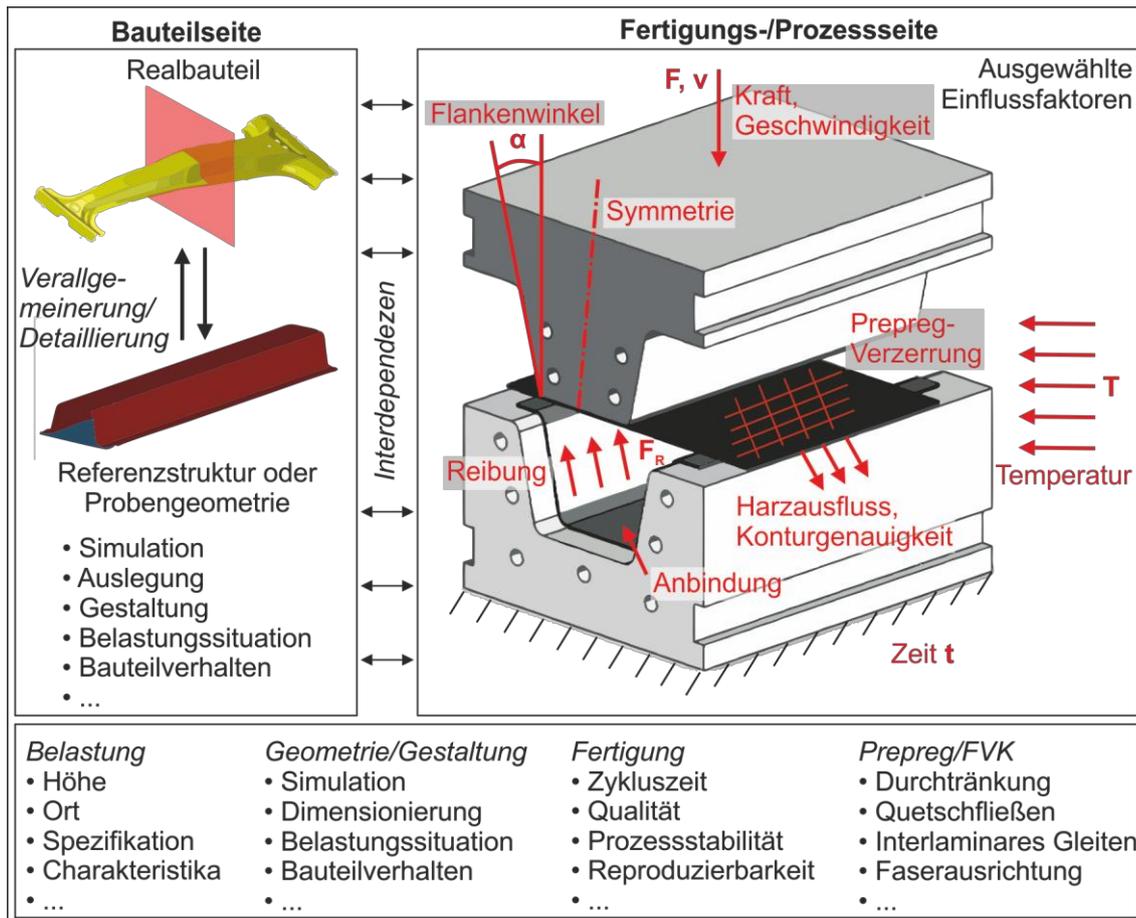


Bild 3.2 Untersuchungsgegenstände und Einflussgrößen beim Prepregpressen

4 Experimentelle Methoden

4.1 Werkstoffe

4.1.1 Prepregs

Für die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit wurden unidirektionale Gelege-Prepregs vom Typ Sigrafil CE 1250-230-39 der Firma SGL verwendet. Als Verstärkungsfasern liegen in diesem Prepreg 50 k-Multifilament-Kohlenstofffasern vor. Die Epoxidharzmatrix mit der Herstellerbezeichnung E201 ist für das Formpressen optimiert. Das Harz ist ein lösungsmittelfreies Hotmelt-System mit einer guten Schlagzähigkeit und einer typischen Aushärtungstemperatur zwischen 130 und 170 °C. Eine Vernetzungsreaktion setzt bereits bei 80 bis 90 °C ein. Die maximale Aushärtetemperatur liegt bei etwa 180 bis 200 °C. Der typische Aushärtungsdruck liegt bei angelegtem Vakuum zu Beginn bei 0,3 N/mm² und sollte zum Verdichten des Prepregs nach einer definierten Zeit auf ca. 0,8 N/mm² erhöht werden. Das Prepreg-Flächengewicht liegt bei 377 g/m². In 0°-Richtung weist das Prepreg laut Herstellerangaben eine Zugfestigkeit von 1800 bis 2000 N/mm², einen Zug-E-Modul von 130 GPa, einen Biege-E-Modul von 120 GPa sowie eine interlaminaire Scherfestigkeit von 75 bis 80 N/mm² auf. Die Kennwerte beziehen sich auf einen Faservolumengehalt von 55 %. Die Glasübergangstemperatur liegt bei 120 °C. Die Schichtdicke einer Gelege-Schicht beträgt im Ausgangszustand 0,23 mm und die Dichte 1,55 g/cm³. ^{[167N] [168N] [169N]}

Die Laminataufbauten in der vorliegenden Arbeit wurden aus Fertigungsgesichtspunkten heraus gewählt. So übertragen die 0° orientierten Lagen die Beanspruchung eines Bauteils und die 90° orientierten Lagen leiten die Prozesskräfte während der Umformung. Eine spätere Bauteilauslegung muss auch eine Anpassung und Optimierung der Lagenanzahl und Orientierung beinhalten. Für die grundlegenden Untersuchungen (u. a. Kapitel 5.1) wurde zunächst auf einen symmetrischen bidirektionalen Laminataufbau zurückgegriffen, d. h. (0/90/0/90/0)_s. Die Lagenanzahl von 9 Lagen entspricht dabei einer typischen technischen Anwendung. Es wurden 5 Lagen in Belastungsrichtung festgelegt. Auf der Grundlage der Ergebnisse verschiedener Untersuchungen zur Verbindung von Metall und FVK (Kapitel 5.3.1) sowie einer Erhöhung der fertigungstechnischen Herausforderungen (Kapitel 6) wurde der Laminataufbau modifiziert: (90/0/0/90/0)_s. Die äußere 90°-Lage dient einer Verbesserung der Anbindungseigenschaften, während die zwei gleich orientierten 0°-Lagen eine Herausforderung an den Pressprozess darstellen. So kann es hier beispielsweise bei einer ungünstigen Prozessparameterkombination schnell zu Fehlern wie einem verstärkten Harzausfluss, ungleichmäßigen Schichtdicken oder Welligkeiten kommen.

4.1.2 Stahlwerkstoffe

Im Rahmen dieser Arbeit wurden verschiedene Stahlwerkstoffe zur Herstellung von Hybridstrukturen verwendet. Diese wurden so ausgewählt, dass eine möglichst große Bandbreite an Festigkeits- und Dehnungsniveaus abgedeckt wurde.

DC04 ist ein konventioneller Tiefziehstahl. Er besitzt eine Streckgrenze von bis zu 210 N/mm^2 sowie eine Zugfestigkeit zwischen 270 und 350 N/mm^2 . Die Mindest-Bruchdehnung A_{80} wird mit 38% angegeben. ^[170N] ^[150]

Stahlbleche der Güte DC01 weisen eine Streckgrenze von bis zu 280 N/mm^2 und eine Zugfestigkeit zwischen 270 und 410 N/mm^2 auf. Die Bruchdehnung A_{80} beträgt mindestens 28% . ^[171N]

Bleche der Stahlgüte DD11 standen in verschiedenen Blechdicken zur Verfügung. Dieser unlegierte Stahl besitzt eine Streckgrenze zwischen 170 und 360 N/mm^2 , eine Zugfestigkeit von bis zu 440 N/mm^2 . Die Mindest-Bruchdehnung A_{80} liegt bei 23% . Dieser Stahl eignet sich sehr gut für Kaltumformprozesse wie das Tiefziehen oder das Biegeumformen. ^[172N]

Weiterhin wurden Bleche aus dem Stahlwerkstoff S235JR verwendet. Die Zugfestigkeit dieses Werkstoffs liegt zwischen 360 und 510 N/mm^2 und die Streckgrenze bei mindestens 235 N/mm^2 . Die Bruchdehnung A_{80} in Walzrichtung für eine Dicke von rund 2 mm liegt bei mindestens 19% . ^[173N]

22MnB5-Stähle wurden speziell für die Warmumformung entwickelt und werden unter verschiedenen Handelsnamen vertrieben, wie z. B. BTR 165 von der Firma Benteler. Diese Stahlgüte bietet sehr hohe Festigkeitswerte bei gleichzeitig sehr guten Umform-eigenschaften. Im Ausgangs- bzw. unvergüteten Zustand besitzt dieser Werkstoff eine Streckgrenze von mindestens 320 N/mm^2 , eine Zugfestigkeit von mindestens 500 N/mm^2 und eine Bruchdehnung A_{80} von mindestens 10% . Nach dem Warmumformprozess beträgt die Streckgrenze mindestens 1100 N/mm^2 , die Zugfestigkeit bis zu 1650 N/mm^2 und die Bruchdehnung A_{80} 5% . 22MnB5-Stähle werden auch mit verschiedenen Beschichtungen angeboten. Ein Beispiel ist der USIBOR 1500 P, der eine Schmelztauchbeschichtung aus Aluminium und Silizium aufweist. Nach der Wärmebehandlung bildet sich eine Aluminium-Silizium-Eisen-Beschichtung aus, die u. a. eine sehr gute Anhaftung von Lacken auf dem Substrat garantiert. ^[64] ^[65N] ^[174N]

4.1.3 Klebstoffsysteme

Bei dem Betamate 1620 MB der Firma Dow Automotive handelt es sich um einen crashstabilen, heißhärtenden Einkomponenten-Strukturklebstoff auf Epoxidharzbasis. Dieser Klebstoff wird z. B. eingesetzt, um die Crashstabilität, die Steifigkeit und die Betriebsfestigkeit von Fahrzeugen zu erhöhen. Der Klebstoff verfügt über eine sehr gute Haftung an typischerweise im Automobilbau verwendeten Stählen und vorbehandeltem Aluminium. Zudem verfügt er über eine gute Verträglichkeit zu Ölen und Tro-

ckenschmierstoffen. Eine Kompatibilität mit thermischen und mechanischen Fügeverfahren sowie mit dem KTL-Prozess ist ebenso wie eine Auswaschbeständigkeit gegeben. Das Klebstoffsystem ist zudem vorhärtbar. Die Standardaushärtung erfolgt für 30 min bei 180 °C. Der E-Modul nach DIN EN ISO 527-1 beträgt 1500 N/mm², die Zugfestigkeit 35 N/mm², die Bruchdehnung ca. 10 % und die Zugscherfestigkeit nach DIN EN 1465 29 N/mm². ^[175N]

Zudem wurde ein Strukturklebstofffilm vom Typ SAF 6068 der Firma 3M für die Untersuchungen eingesetzt. Dabei handelt es sich um einen modifizierten 1-Komponenten-Epoxidharz-Klebstoff, der an die spezifischen Anforderungen der Automobilindustrie angepasst wurde und z. B. eine KTL-Verträglichkeit aufweist. Der Klebstoff ist insbesondere für Konstruktionsverklebungen von Metallen entwickelt worden. Vor der Verarbeitung kann der Klebfilm auf die Abmaße der Klebung zugeschnitten oder gestanzt werden. Dies bietet beim Prepregpressen den Vorteil, dass der Klebfilm vor dem Pressen direkt auf dem Prepregstapel appliziert werden kann. Bei konventionellen Klebungen kann der Klebstoffauftrag auf vorbehandelten oder nicht vorbehandelten Oberflächen erfolgen. Eine geringe Anfangsklebkraft ermöglicht ein einfaches Repositionieren der Füge Teile auch nach dem Klebstoffauftrag. Die Aushärtung des Klebstoffs erfolgt bei 165 °C für 15 min. Die maximale Scherfestigkeit liegt nach Herstellerangaben bei 43,5 N/mm², gemessen auf einem 0,8 mm dicken Metall-Substrat. ^[176N]

4.2 Trennmittel

Zum Schutz der Werkzeugoberflächen vor Verschmutzungen mit Matrixharz wurde auf ein beidseitig silikonbeschichtetes Trennpapier zurückgegriffen. Das Trennpapier ist bis 220 °C hitzebeständig und mehrfach verwendbar. Es zeigte eine sehr gute Trennwirkung und konnte leicht von den ausgehärteten Prepregs entfernt werden. Aufgrund der hohen Sprödigkeit und Steifigkeit des Trennpapiers war die Ausformung nicht abwickelbarer, unsymmetrischer Geometrien nur eingeschränkt möglich.

Neben dem Trennpapier wurde Trennfolie der Firma Nowofol vom Typ Nowoflon ET 6235 Z in einer Dicke von 25 µm eingesetzt. Die Folie besteht aus Ethylen und Tetrafluorethylen und wird als unverstreckte Flachfolie hergestellt. Diese Fluorpolymerfolie besitzt eine strukturbedingte Antiadhäsivität, die ohne Additive auskommt. Die Folie weist eine thermische Stabilität bis 230 °C auf. ^[177N] Die Folie konnte leicht entfernt werden und zeigte eine sehr gute Trennwirkung sowie eine gute Ausformung selbst komplexerer Geometrien.

Bei einigen Untersuchungen musste auf Trennpapier und -folien verzichtet werden. Insbesondere in diesen Fällen wurden auf die Formen bzw. Werkzeuge ein lösungsmittelbasierter Formversiegler vom Typ Frekote B-15 sowie ein Trennmittel vom Typ Frekote 770-NC der Firma Loctite aufgebracht. Der Formversiegler diente dem Verschließen mikroporöser Öffnungen sowie kleiner Kratzer auf den Formoberflächen und wurde als Grundierung auf die Formflächen aufgetragen. Das bis 400 °C beständige

Trennmittel wurde im Anschluss aufgetragen und bildet eine wirksame Trennschicht aus. ^[178N]

4.3 Kraffteinleitungselemente

Kraffteinleitungselemente z. B. bei Zugproben schützten die druckempfindlichen Kohlenstofffasern im Einspannbereich. Neben ausgehärteten und zugeschnittenen Prepregs wurden hierfür Aluminium-Plättchen aus der Legierung Al 99,5 verwendet. Die Dicke betrug jeweils 1 mm. Die Kraffteinleitungselemente wurden nach dem Zuschnitt mit einem Zweikomponenten-Epoxidharzklebstoff auf die Probenkörper aufgeklebt.

4.4 Werkzeugmaschinen

Um Proben und Strukturen mittels des Prepregpressens herzustellen, standen verschiedene Werkzeugmaschinen zur Verfügung. Für das Pressen von Prüfplatten, flächigen und ausgeformten Strukturen bis zu einer projizierten Größe der FVK-Komponente vom 260 x 300 mm wurde auf eine hydraulische Laborpresse der Firma Paul-Otto Weber vom Typ PW 100 zurückgegriffen. Zur Herstellung größerer Strukturen wurden hydraulische Pressen verwendet. Zum Einsatz kamen eine 100 t-Presse der Firma Müller, eine 200 t-Presse der Firma Oevermann sowie eine 800 t-Presse der Firma SPS Simpelkamp Pressen-Systeme. Die beiden Pressen der Firmen Müller und Simpelkamp standen am Lehrstuhl für Umformende und Spanende Fertigungstechnik (LUF) zur Verfügung.

4.5 Prüfsysteme

Für die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit wurden verschiedene elektromechanische und servohydraulische Prüfmaschinen verwendet. Von der Firma UTS Testsysteme stand eine elektrisch spindelgetriebene Universalprüfmaschine vom Typ UTS 50-1 zur Verfügung. Daneben wurden zwei servohydraulische Prüfmaschinen genutzt. Kleinere Probenabmessungen wurden an einer Prüfmaschine vom Typ 810 der Firma MTS untersucht, welche vom Lehrstuhl für Werkstoffkunde (LWK) zur Verfügung gestellt wurde. Des Weiteren wurde eine Maschine vom Typ Amsler HB 250 der Firma Zwick/Roell verwendet.

Für Dynamische Differenzkalorimetrie(DDK)-Untersuchungen konnten Anlagen am Institut für Kunststofftechnik (KTP) sowie am Laboratorium für Werkstoff- und Füge-technik (LWF) genutzt werden. Dabei handelte es sich zum einen um ein thermogravimetrisches Analysegerät TGA/DSC 1 der Firma Mettler Toledo, das sowohl manuell als auch automatisch betrieben werden konnte. Zum anderen wurde ein Analysegerät vom Typ DSC30 S des gleichen Herstellers genutzt.

4.6 Versuchsplanung

Die unterschiedlichen Prozessparameter (u. a. Kapitel 5.3.1 oder 6.3) wurden ceteris paribus untersucht, d. h., es wurde eine Eingangsgröße gezielt variiert und die Ausgangsgröße beobachtet (Englisch: One Factor at a Time (OFAT)). Bei mehreren Einflussgrößen wurde bei dieser Ein-Faktor-Methode zunächst das Optimum der ersten Einflussgröße bestimmt. Bei den weiteren Versuchen zur Ermittlung des optimalen Werts des zweiten Faktors wurde dieser Wert nicht mehr variiert. ^[179] Zum Teil wurden mehrere Optimierungsdurchläufe vollzogen.

Als Steuergrößen wurden beim Prepregpressen u. a. die Konsolidierungstemperatur, die Konsolidierungszeit, der Konsolidierungsdruck, der Klebstofftyp, die Klebschichtdicke, die Umformgeschwindigkeit, die Oberflächenvorbehandlung oder die Versuchsgeschwindigkeit definiert. Beispiele für nicht beeinflussbare Störgrößen bei den Prepregs waren i. d. R. auf den Lieferzustand zurückzuführen, also u. a. der Faservolumengehalt, die Faserausrichtung, ein variierender Grad der Voraushärtung des Matrixharzes oder Unterschiede in der Zusammensetzung des Matrixharzes.

5 Qualifikation des Prepregpressens

In dem vorliegenden Kapitel werden die Ergebnisse grundlegender Untersuchungen zum Prepregpressen dargestellt. Dabei soll zunächst aufgezeigt werden, welche Werkstoffeigenschaften mittels des Prepregpressens im Vergleich zum Autoklavverfahren erreicht werden können. Das Autoklavverfahren wurde dabei als Referenz gewählt, da dieses Verfahren zu den besten FVK-Eigenschaften führt. Anschließend wird auf verschiedene Verbindungstechniken eingegangen, um die metallische und die FVK-Komponente zu fügen.

Für alle Untersuchungen im Rahmen der Qualifikation des Prepregpressens wurde zunächst von den für die Prepregs standardmäßig vorgesehenen Prozessparametern ausgegangen. Der Konsolidierungsdruck wurde zu $0,3 \text{ N/mm}^2$ und der Solidifikationsdruck zu $0,5$ bis $0,8 \text{ N/mm}^2$ gewählt. ^[168N] Als Basis für die Temperatur wurden 160 °C festgelegt. Die Härtingszeit betrug 15 min . ^[169N] Diese Parameter wurden anschließend an den Prozess des Prepregpressens angepasst. Eine fundierte Untersuchung verschiedener Prozessparameter und möglicher Prozessfenster wird in Kapitel 6.2.3 dargelegt.

5.1 Mechanische Eigenschaften

Die Eigenschaften von FVK-Bauteilen sind in besonderem Maße auf die Verarbeitungs- und Herstellungsverfahren zurückzuführen. Im Folgenden werden die Ergebnisse verschiedener Untersuchungen der mechanischen Eigenschaften von FVK- und Hybridwerkstoffen dargestellt.

5.1.1 Zugversuche

Der Zugversuch ist ein genormtes Standardverfahren der Werkstoffprüfung zur Bestimmung verschiedener Werkstoffkennwerte. Er wurde als Basis für die Untersuchungen ausgewählt. Die Probenformen und die Versuchsdurchführung orientieren sich dabei an gängigen Normen für metallische Werkstoffe bzw. FVK. ^{[180N] [181N] [182N] [183N] [184N] [185S] [186S] [187S]} Da für die Prüfung von Hybridstrukturen aktuell keine Norm vorliegt, wurden die Probenform sowie die Versuchsdurchführung an die Norm für FVK angelehnt. Die FVK-Komponente der Hybridproben kann als die komplexere und schwieriger zu handhabende Komponente angesehen werden. Die genutzten Probenformen zeigt Bild 5.1. Diese wurden mittels Wasserstrahlschneiden aus zuvor hergestellten Prüfplatten herausgetrennt. ^[188N]

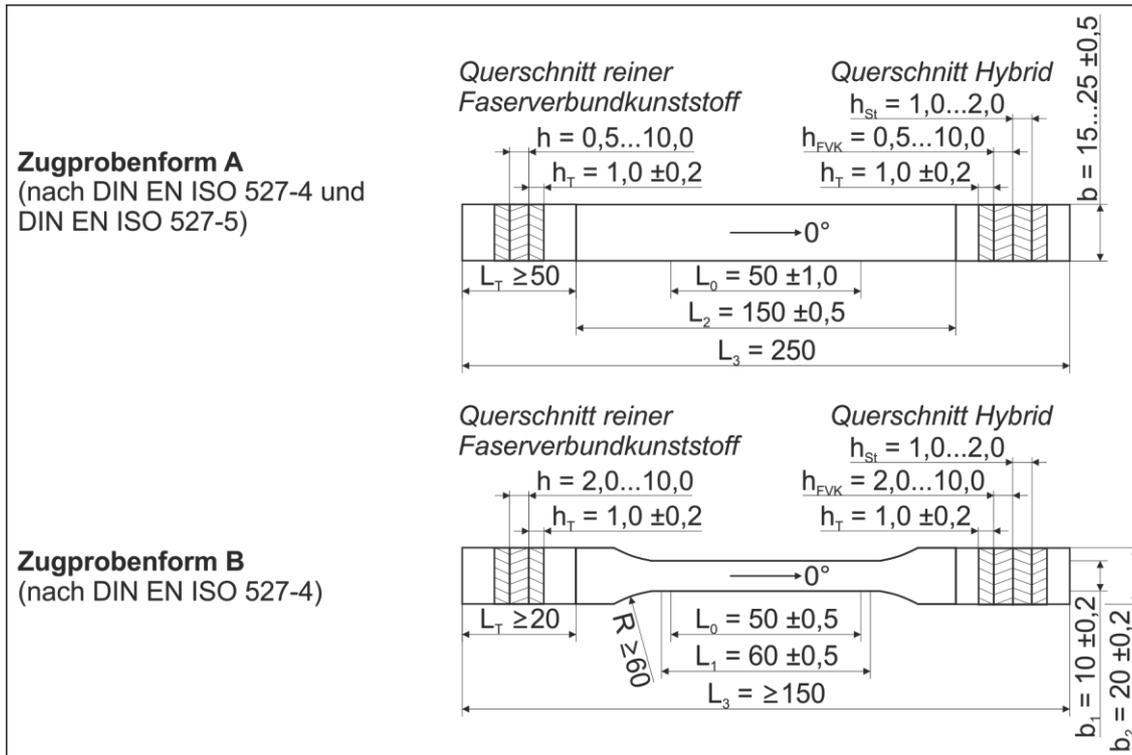


Bild 5.1 Probenformen für die Zugversuche

Es wurden verschiedene reine Stahl- und FVK- sowie Stahl-FVK-Hybridproben untersucht. Die Proben wurden mittels des Prepregpressens und des Autoklavverfahrens hergestellt. Für die Ermittlung der Dehnung stand ein optisches Messsystem vom Typ Aramis der Firma GOM zur Verfügung. Die Spannungs-Dehnungs-Verläufe der einzelnen Proben sind in Bild 5.2 dargestellt. Die untersuchten Stahlwerkstoffe zeigen im Vergleich zu den FVK ein sehr duktileres Verhalten mit einem großen Dehnungsvermögen. Die Spannungsniveaus liegen allerdings deutlich unter denen der FVK. Diese sind jedoch neben einer hohen Maximalspannung auch durch eine deutlich geringere Bruchdehnung gekennzeichnet. Das Versagen tritt schlagartig ein. Die untersuchten Hybridverbunde vereinen zum Teil die Eigenschaften der Einzelkomponenten. Die Maximalspannungen liegen zwischen denen der Grundwerkstoffe und charakterisieren jeweils den Zeitpunkt des Versagens der FVK-Komponente. In der Folge überträgt die metallische Struktur weiterhin die einwirkenden Belastungen. Die Spannungsniveaus liegen hier im Bereich der Werte für die reinen Stahl-Proben. Die Bruchdehnung liegt etwas unter dem Wert der reinen Stahl-Proben. Dies könnte an erhöhten lokalen Dehnungen im Stahl liegen, da das FVK nach dem Bruch nur partiell delaminiert ist und somit weiterhin eine Verstärkungswirkung auf die Hybridproben ausübt.

Die Zugfestigkeiten sowie die Gleichmaßdehnungen sind in Bild 5.3 zu sehen. Die Zugfestigkeiten der Autoklav-Proben erreichen marginal höhere Werte als die prepreggepressten Prüfkörper. Die Gleichmaßdehnungen weisen so gut wie keine Differenz auf. Es kann kein negativer Einfluss des Prepregpressens auf die mechanischen Eigenschaften festgestellt werden.

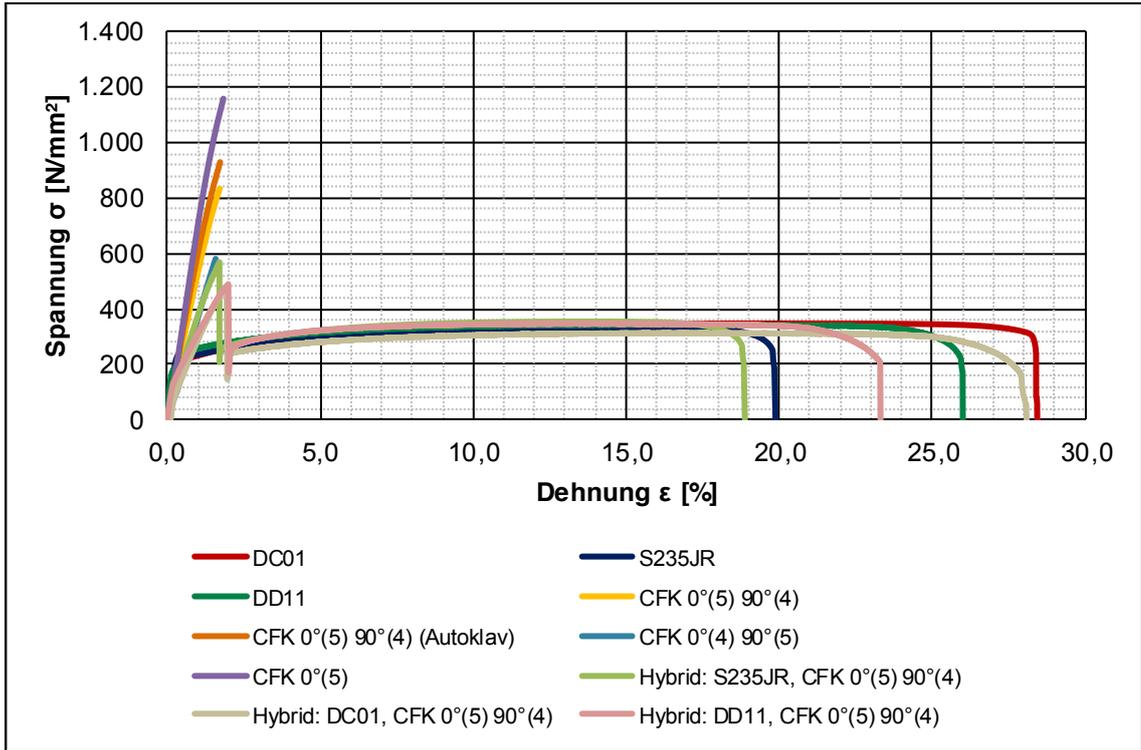


Bild 5.2 Aus Zugversuchen ermittelte Spannungs-Dehnungs-Verläufe

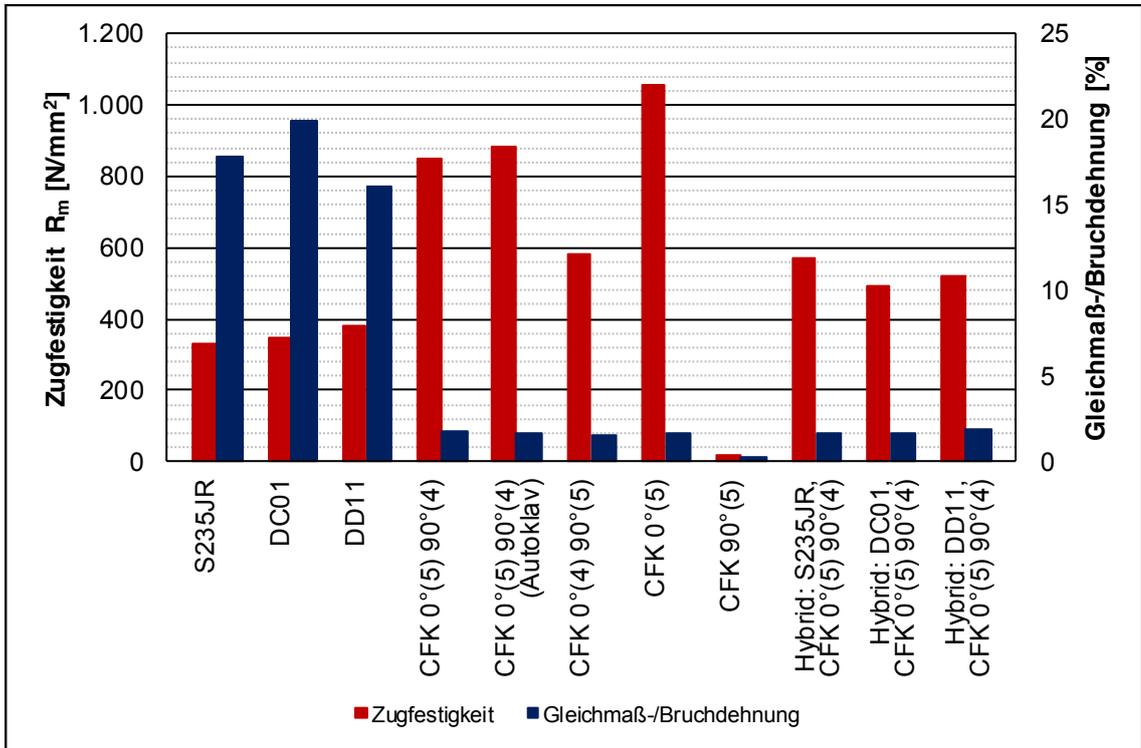


Bild 5.3 Ergebnisse der Zugversuche

5.1.2 Biegeversuche

Wie auch aus dem Zugversuch lassen sich aus genormten, standardisierten Biegeversuchen verschiedene Werkstoffkennwerte ermitteln. Sehr häufig werden Dreipunkt-Biegeversuche angewendet, da diese unkompliziert durchzuführen sind. Zu beachten ist, dass die Beanspruchung einen Schubanteil beinhaltet. Daneben kommt der Biegeversuch der Beanspruchungssituation in vielen realen Strukturen näher als z. B. ein Zugversuch. Die Probenform sowie die Versuchsdurchführung orientieren sich wiederum an gängigen Normen für metallische Werkstoffe und FVK. Die Untersuchungen an den Hybriden wurden an die Normen für FVK angelehnt. ^{[185S] [186S] [189N] [190N]} Die verwendeten Probenformen und den Versuchsaufbau zeigt Bild 5.4.

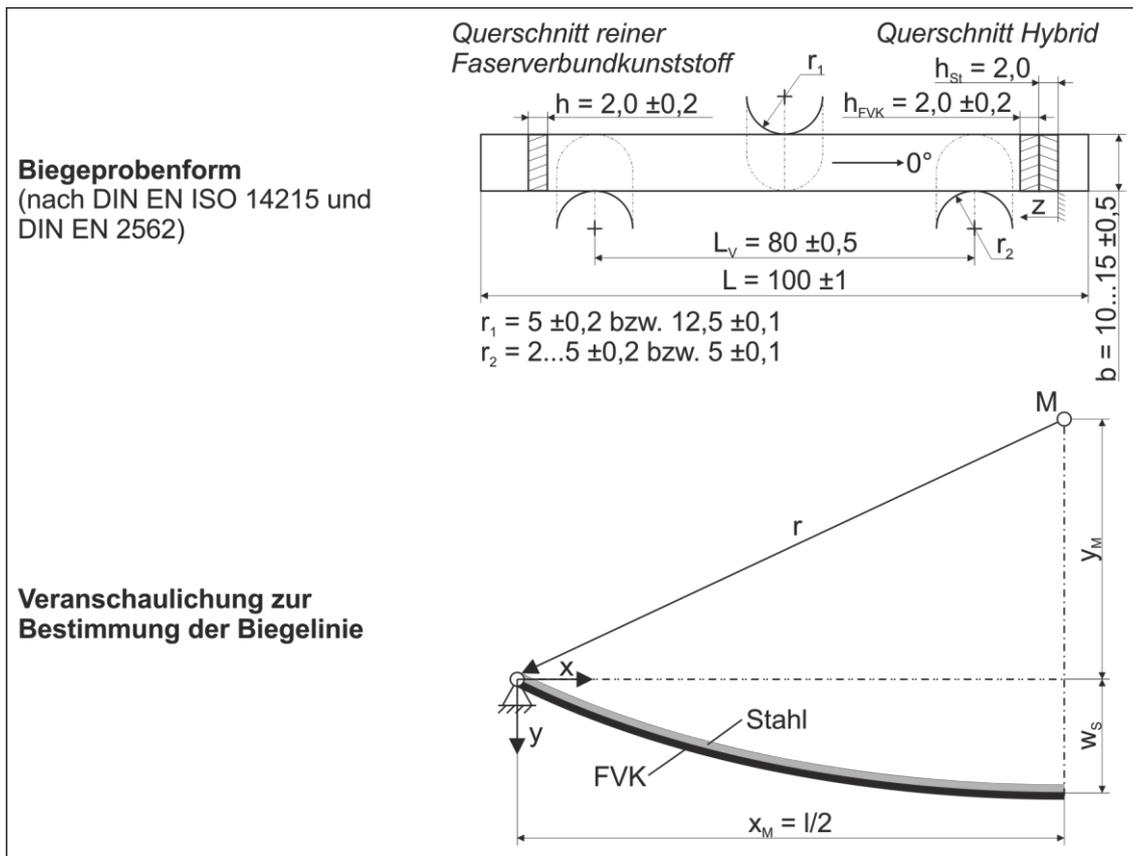


Bild 5.4 Probenformen und Versuchsaufbau für die Biegeversuche sowie Veranschaulichung der Biegelinie

Zur Berechnung der Spannungen und Dehnungen wurden zunächst die jeweiligen Teil- und Gesamtflächenschwerpunkte, die Lage der neutralen Fasern und die Flächenträgheitsmomente bestimmt: ^[191]

$$z_{si}^* = \frac{\sum E_i \cdot z_i \cdot A_i}{\sum E_i \cdot A_i} \quad (5.1)$$

$$I_y = \frac{b \cdot h^3}{12} + z_{si}^2 \cdot A_i \quad (5.2)$$

Für artenreine, symmetrisch aufgebaute Proben konnten die Biegespannungen infolge einer Querkraft mit folgender Formel berechnet werden: ^[191]

$$\sigma(z) = E \cdot \varepsilon = E \cdot (\kappa \cdot z) = E \cdot \left(\frac{z}{\rho}\right) = \frac{E}{\rho} \cdot z = \frac{M_{(\max)}}{I_y} \cdot z = \frac{F \cdot l \cdot z}{2 \cdot I_y} \quad (5.3)$$

$$\sigma_{\max} = \sigma(z_{\max}) = \frac{F \cdot l \cdot z_{\max}}{2 \cdot I_y} \quad (5.4)$$

Um aus dem Maschinenweg die Dehnungen bestimmen zu können, wurde zunächst die Biegelinie in der neutralen Faser der Probe in Abhängigkeit von dem Verfahrensweg ermittelt (Bild 5.4). Die Biegelinie bei der vorliegenden Dreipunktbiegung ließ sich näherungsweise über die Kreisfunktion beschreiben: ^[192]

$$r^2 = (x - x_M)^2 + (y - y_M)^2 \quad (5.5)$$

Mit den Koordinaten für den Mittelpunkt

$$x_M = \frac{l}{2} \quad (5.6)$$

und

$$y_M = -\sqrt{r^2 - \frac{l^2}{4}} - w_s \quad (5.7)$$

sowie den bekannten geometrischen Randbedingungen folgte:

$$y = \pm \sqrt{r^2 - \left(x - \frac{l}{2}\right)^2} - \sqrt{r^2 - \frac{l^2}{4}} - w_s \quad (5.8)$$

Des Weiteren war die folgende Randbedingung bekannt:

$$y\left(x = \frac{l}{2}\right) = w_s = \pm r - \sqrt{r^2 - \frac{l^2}{4}} - w_s \quad (5.9)$$

Damit ergab sich der Radius zu:

$$r = \pm \frac{l^2}{16 \cdot w_s} \pm w_s = \pm \frac{l^2 + 16 \cdot w_s^2}{16 \cdot w_s} \quad (5.10)$$

Die Biegelinie wurde damit beschrieben durch:

$$y = \pm \sqrt{\left(\pm \frac{l^2 + 16 \cdot w_s^2}{16 \cdot w_s}\right)^2 - \left(x - \frac{l}{2}\right)^2} - \sqrt{\left(\pm \frac{l^2 + 16 \cdot w_s^2}{16 \cdot w_s}\right)^2 - \frac{l^2}{4}} - w_s \quad (5.11)$$

Die maximalen Randfaserdehnungen konnten über den folgenden Zusammenhang bestimmt werden: ^[191]

$$\varepsilon_{max} = \frac{z_{max}}{\rho} = \frac{z_{max}}{r} = \frac{16 \cdot w_s \cdot z_{max}}{l^2 + 16 \cdot w_s^2} \quad (5.12)$$

Für die untersuchten Hybridproben musste der Zusammenhang für die maximalen Spannungen angepasst werden. Über die Krümmung des Balkens sowie die Dehnung eines Balkenelements konnten unter Zuhilfenahme des HOOKE'schen Gesetzes die Spannungen der Randfasern berechnet werden. ^{[191] [193]}

$$\sigma = E \cdot \varepsilon = E \cdot (\kappa \cdot z) = E \cdot \left(\frac{z}{\rho}\right) = E \cdot \left(\frac{M}{E \cdot I_y} \cdot z\right) \quad (5.13)$$

Daraus konnte die maximale Randfaserspannung abgeleitet werden:

$$\sigma_{max} = \frac{F \cdot \frac{l}{2} \cdot E_{1,2} \cdot z_{max}}{E_1 \cdot I_{y1} + E_2 \cdot I_{y2}} \quad (5.14)$$

Es wurden Biegeversuche an verschiedenen Werkstoffen und Werkstoffkombinationen durchgeführt (Bild 5.5). Die mittels des Prepregpressens hergestellten reinen FVK-Proben erreichen ähnlich gute Eigenschaften wie die mittels des Autoklavverfahrens hergestellten Proben. Der Biegespannungs-Dehnungs-Verlauf steigt fast linear bis zum Bruch an, welcher schlagartig erfolgte. Da aufgrund der Beanspruchungsverhältnisse in der Probe zunächst die äußeren Lagen versagten, kam es sukzessive zu weiteren Brüchen einzelner Lagen. ^{[194] [23]} Dieses Verhalten ist hier nicht mehr dargestellt, da der erste Bruch als Versagen des Bauteils bzw. der Probe festgelegt wurde.

Die hybriden Werkstoffkombinationen zeigten ein deutlich komplexeres Werkstoff- und Versagensverhalten. Dies war abhängig davon, ob die Stahlkomponente auf der Seite der Kraftereinleitung oder auf der Seite der Auflager angeordnet war. Lag sie auf der Seite der Kraftereinleitung, ähnelte das Verhalten der Proben dem der reinen FVK-Strukturen. Das Versagen trat schlagartig ein und setzte sich sukzessive fort. Zuvor kam es zu einem charakteristischen Knie, das auf das Versagen einzelner Bereiche im FVK hindeutet, z. B. 90°-Lagen. ^[83] Wurde die Stahlkomponente auf der Unterseite der Probe angeordnet, erfolgte das Versagen des FVKs nicht durch Zugbelastung, sondern durch eine kritische Druckbelastung. Die brechenden Fasern und Schichten stützten sich jedoch auf der äußeren Stahl-Schicht ab, so dass sehr viel Energie auf einem langen Weg aufgenommen werden konnte. Die maximal erreichbare Dehnung konnte aufgrund des Erreichens des maximal möglichen Weges des Versuchsaufbaus nicht ermittelt werden. In Bild 5.6 sind zusammenfassend die maximalen Biegespannungen und Bruchdehnungen der einzelnen Proben aufgetragen.

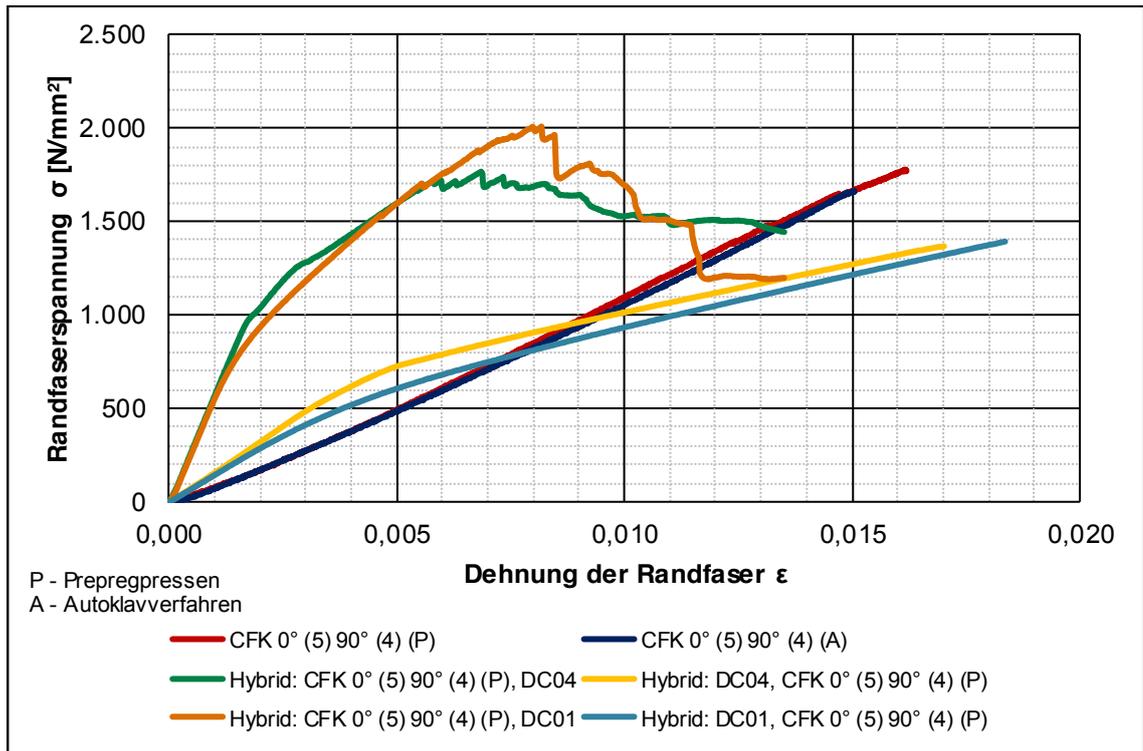


Bild 5.5 Biegespannungs-Dehnungs-Verläufe verschiedener Biegeproben

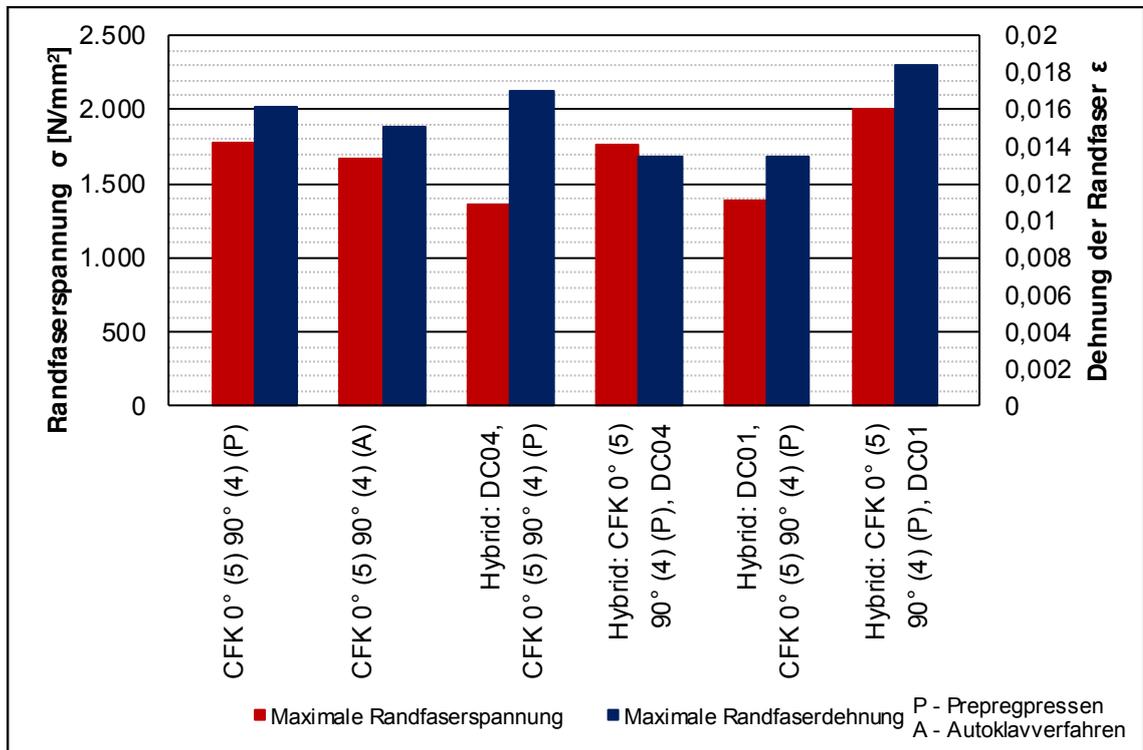
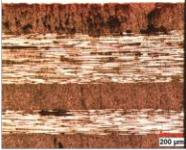
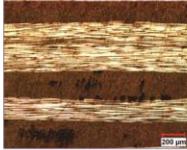
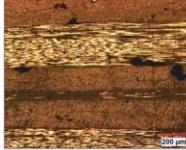
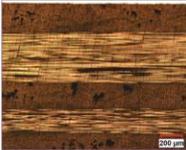
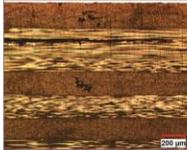
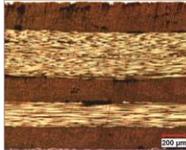
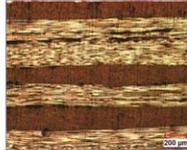
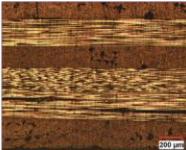
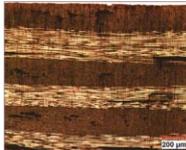
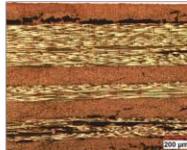
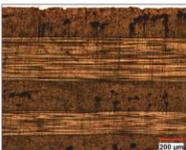
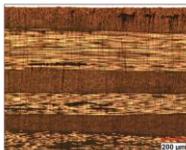
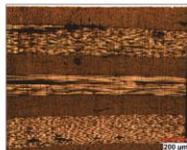
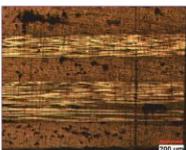
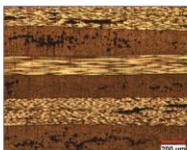
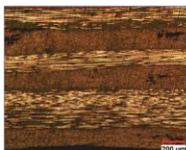
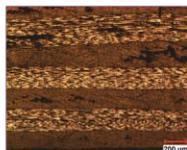
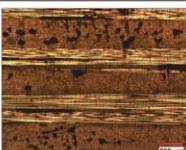
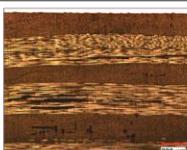


Bild 5.6 Maximale Biegespannungen und Bruchdehnungen verschiedener Biegeproben

5.2 Eigenschaften des Faserverbundkunststoffs

Ein wesentlicher Punkt zur Qualifizierung eines Herstellungsverfahrens für FVK-Bauteile sind die erreichbaren Laminatqualitäten. Unter diesen Aspekt fallen z. B. der Faservolumengehalt, Poren und Fehlstellen sowie die Welligkeit und die Verläufe der Schichtdicken einzelner Laminatschichten. Um diese Punkte für das Prepregpressen zu untersuchen, wurden Prüfplatten mit unterschiedlichen Prozessparametern mittels des Prepregpressens hergestellt. ^[188N] Anschließend wurden hieraus Proben entnommen und Schliffe angefertigt. Da auf offene Plattenwerkzeuge zurückgegriffen wurde, erfolgte die Entnahme der Proben aus dem mittleren Bereich der Platten mit einem Mindest-Randabstand von 20 mm.

Die Ergebnisse der Schliffuntersuchungen sowie die zugehörigen Faservolumenanteile sind in Bild 5.7 dargestellt. ^[195S] Auffällig sind die zum Teil sehr unterschiedlichen Laminatqualitäten. Sowohl zu geringe als auch zu hohe Drücke resultieren in einer schlechteren Qualität. Der Faservolumengehalt steigt mit zunehmendem Druck an und beträgt zwischen 55 und 67 %. Diese Schwankungen stellen sich durch ein Auspressen von Prepregmaterial entsprechend dem vorherrschenden Druck- und Temperaturniveau ein. Insbesondere durch die Temperatur wird auch die Aushärtungsreaktion beeinflusst, wodurch das Viskositätsminimum bei höheren Temperaturen schneller durchschritten wird und Fließvorgänge eher unterbunden werden. Allerdings ist bei höheren Temperaturen auch ein größerer Druck notwendig, um ein porenfreies Laminat zu erhalten. Die ermittelten Werte für die Faservolumenanteile korrelieren mit den Herstellerangaben. Bei einem Matrixanteil von 39 ± 3 Gew.-% wird mittels Autoklavverfahren ein Faservolumengehalt von rund 50 bis 60 Vol.-% erreicht. ^[167N] ^[196N]

			0,1 MPa	0,2 MPa	0,4 MPa	0,6 MPa
160 °C	60 s	Schliff				
		FVG*	$\varphi = 55,96 \%$	$\varphi = 57,30 \%$	$\varphi = 58,87 \%$	$\varphi = 67,27 \%$
	90 s	Schliff				
		FVG*	$\varphi = 56,77 \%$	$\varphi = 60,40 \%$	$\varphi = 60,62 \%$	$\varphi = 64,74 \%$
180 °C	60 s	Schliff				
		FVG*	$\varphi = 55,09 \%$	$\varphi = 62,95 \%$	$\varphi = 64,83 \%$	$\varphi = 65,73 \%$
	90 s	Schliff				
		FVG*	$\varphi = 55,62 \%$	$\varphi = 56,77 \%$	$\varphi = 63,26 \%$	$\varphi = 67,85 \%$
200 °C	60 s	Schliff				
		FVG*	$\varphi = 56,56 \%$	$\varphi = 55,61 \%$	$\varphi = 62,64 \%$	$\varphi = 65,62 \%$
	90 s	Schliff				
		FVG*	$\varphi = 55,70 \%$	$\varphi = 55,56 \%$	$\varphi = 61,80 \%$	$\varphi = 66,40 \%$

*FVG - Faservolumengehalt (Wert entspricht dem Mittel aus fünf Messpunkten)

Bild 5.7 Schliffbilder und Faservolumengehalte für mit unterschiedlichen Prozessparametern prepreggepresste FVK-Laminat

Poren haben insbesondere auf die mechanischen Bauteileigenschaften einen negativen Einfluss. Beispielsweise resultiert ein um 1 % erhöhter Porengehalt in einer Reduzierung der scheinbaren interlaminaren Scherfestigkeit oder der Biegefestigkeit von bis zu 10 %. [197] [198] [199] [200] Für die Bildung von Poren sind unterschiedliche Ursachen verantwortlich. So kann im trockenen Verstärkungsmaterial befindliche Luft bei der Faserimprägnierung eingeschlossen werden oder es können sich im flüssigen Matrix-

material gelöste Stoffe während der Verarbeitung verflüchtigen. Insbesondere (Rest-)Feuchtigkeit im Matrixmaterial verdampft unter hohen Temperaturen. Der Wasserdampf und andere austretende Gase können unter den richtigen Voraussetzungen wieder in Lösung gehen. Erfolgt dies jedoch nicht vor der Solidifikation, verbleiben Poren und somit Materialfehler im FVK.^{[201] [202] [203]} Daneben können auch während der Durchmischung Luftblasen in das flüssige Harz eingebracht werden. Ist die Viskosität zu hoch oder werden die Luftblasen aus anderen Gründen am Austreten gehindert, können diese bis zur Aushärtung in dem Werkstoff verbleiben. Diese Form der Porenbildung tritt vor allem bei der manuellen Verarbeitung auf, z. B. beim Handlaminieren.^[204]

Um eine Porenbildung im Werkstoff zu vermeiden, können die Harze getrocknet und entgast werden.^{[104] [204]} Ein Vermeiden von Lufteinschlüssen während der Imprägnierung kann durch eine Evakuierung abgedichteter Formwerkzeuge erreicht werden.^[86] Die Verarbeitung von Faserhalbzeugen und Reaktionsharzen mit guten Tränkungseigenschaften kann sich ebenfalls positiv auswirken.^{[201] [205] [206]} Während der Konsolidierung sind unter anderem der Druck und die Temperatur ausschlaggebend für das spätere Porenbild. Ein hoher Druck komprimiert Gasblasen und steigert die Sättigungsgrenze der Matrix. Den Druck gilt es bis zur Solidifikation im gesamten Materialvolumen aufrechtzuerhalten.^{[207] [208]} Eine Temperaturerhöhung zeigt zwei gegenläufige Effekte. Einerseits werden Diffusionsprozesse angeregt, sodass die Auflösung von Gasen im noch fließfähigen Matrixwerkstoff beschleunigt werden kann. Andererseits sinkt das Lösungsvermögen des Matrixsystems mit steigender Temperatur. Die Folge kann der unerwünschte Austritt von Wasserdampf und gelösten Gasen sein. Je nach Prozessablauf und Druckverhältnissen in der Flüssigphase kann die Regulierung der Temperatur daher in einem besseren oder auch schlechteren Porenbild im Bauteil resultieren.^{[202] [205]}

Die einzelnen Proben wurden hinsichtlich der Poren, der Fehlstellen, der Welligkeit einzelner Schichten sowie der Schichtdickenverläufe bewertet (Bild 5.8). Die Wahl geeigneter Prozessparameter in Verbindung mit angepassten Werkzeugkonzepten führt für das Prepregpressen zu qualitativ sehr guten Laminaten (siehe auch Kapitel 6.3 und 6.8). Teilweise können lokal Laminatqualitäten erreicht werden, die denen des Autoklavverfahrens (vgl. EHRENSTEIN^[83]) entsprechen. Konzeptionell bedingt werden jedoch im Allgemeinen schlechtere Qualitäten erreicht, was sich jedoch nicht zwingend und vor allem signifikant in den mechanischen Kennwerten widerspiegelt (siehe auch Kapitel 5.1 und 5.3). Auf der anderen Seite sind durch die metallischen Werkzeuge die Bauteiloberflächen sehr eben und glatt. Die Entscheidung für eines der beiden Verfahren wird maßgeblich durch die zu erreichenden Stückzahlen und die mit dem Verfahren verbundenen Kosten beeinflusst. Hiernach hat das Prepregpressen gegenüber anderen Verfahren wie dem Autoklavverfahren Vorteile.

			0,1 MPa	0,2 MPa	0,4 MPa	0,6 MPa
160 °C	60 s	Kleine Poren	o	o	o	o
		Große Poren	+	+	+	o
		Sonstige Fehlstellen	o	o	+	+
		Geringe Welligkeit	+	+	o	o
		Gleichmäßige Schichtdickenverlauf	+	+	o	o
	90 s	Kleine Poren	-	-	o	o
		Große Poren	+	+	+	o
		Sonstige Fehlstellen	o	o	o	o
		Geringe Welligkeit	+	+	o	o
		Gleichmäßige Schichtdickenverlauf	+	+	+	+
180 °C	60 s	Kleine Poren	-	o	o	o
		Große Poren	+	+	o	o
		Sonstige Fehlstellen	o	o	+	+
		Geringe Welligkeit	+	o	o	o
		Gleichmäßige Schichtdickenverlauf	+	o	o	o
	90 s	Kleine Poren	-	o	+	+
		Große Poren	+	+	+	+
		Sonstige Fehlstellen	o	o	+	+
		Geringe Welligkeit	+	o	o	o
		Gleichmäßige Schichtdickenverlauf	+	+	o	o
200 °C	60 s	Kleine Poren	-	-	o	o
		Große Poren	+	+	+	+
		Sonstige Fehlstellen	o	o	+	+
		Geringe Welligkeit	+	+	o	o
		Gleichmäßige Schichtdickenverlauf	+	o	o	o
	90 s	Kleine Poren	-	-	+	+
		Große Poren	+	+	+	+
		Sonstige Fehlstellen	o	o	+	+
		Geringe Welligkeit	o	o	o	o
		Gleichmäßige Schichtdickenverlauf	+	o	o	o

(+) Gut/Wenig (o) Mittel und (-) Schlecht/Viel

Bild 5.8 Bewertung der Poren, der Fehlstellen, der Welligkeit einzelner Schichten sowie der Schichtdickenverläufe für mit unterschiedlichen Prozessparametern prepreg-gepresste FVK-Lamine

5.3 Verbindung von Metall und Faserverbundkunststoff

Die Verbindungstechnik spielt bei Multi-Material-Systemen wie einem Hybridwerkstoff eine besondere Rolle. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit sollen die Untersuchungen zur Verbindung von Metall und FVK potenzielle Fügeverfahren für eine spätere Großserienherstellung von Hybridstrukturen herausstellen.

Die Eigenschaften und die Anforderungen der Hybridbauweise sind sehr vielschichtig. Berücksichtigung finden müssen insbesondere die unterschiedlichen Eigenschaften der verwendeten Werkstoffe. Für den wirtschaftlichen Einsatz in der Großserienfertigung ist es wichtig, dass die Fügeverfahren über kurze Prozesszeiten verfügen. Zudem sollte die Fertigung automatisiert ablaufen und der Einsatz von Personal sowie an Vor- und Nachbearbeitung gering und leicht in den weiteren Fertigungsprozess integrierbar sein, um die Gesamtkosten zu minimieren.

Konstruktionsbedingt ist bei den hier relevanten Hybridstrukturen eine große Überlappungsfläche vorhanden, was einen Klebprozess begünstigt. Spannungskonzentrationen, wie sie bei punktförmigen Verbindungen der Fall sind ^[209] ^[210], können durch die große Krafteinleitungsfläche verhindert werden.

5.3.1 Scherzugversuche

Für die Scherzugversuche wurden insgesamt fünf Verbindungstechniken ausgewählt, untersucht und miteinander verglichen. ^[211S] Neben der Nutzung des Matrixharzes als Klebstoff sind dies die Verwendung eines Klebfilms, eines Strukturklebstoffs sowie die Nutzung von Blindnieten und von Gewindeschneidschrauben. Daneben wurden für das direkte Kleben auch verschiedene Prozessparameter und der Einfluss der Orientierung der grenzschichtnächsten Faserlage untersucht.

Die Prüfung zur Bestimmung der Zugscherfestigkeit von Überlappungsklebung erfolgte nach der DIN EN 1465. ^[212N] Die Belastung erfolgt hierbei durch Zugscherung in der Überlappungs- bzw. Fügefläche. Durch die Verwendung von Aufleimern konnte eine mittige Krafteinleitung gewährleistet werden. Vergleichbare Probenabmessungen finden sich auch in der DIN 65148 zur Bestimmung der interlaminaren Scherfestigkeit im Zugversuch. Für die direkt verpressten Proben wurden ebenfalls Prüfkörper aus Plattenhalbzeugen herausgetrennt sowie vor und hinter dem Überlappungsbereich wechselseitig Nuten senkrecht zur Belastungsrichtung eingebracht. Hierdurch konnte eine definierte Überlappungszone eingestellt werden. ^[213N] Die Probengeometrien für die weiteren untersuchten Fügeverfahren leiten sich aus der für das Prepregpressen gewählten Geometrie ab. Die Proben verfügen über eine mittig angeordnete Überlappung mit gleicher Überlappungslänge, Breite und Länge sowie zusätzliche Aufleimer. Die Maße der Prüfkörper wurden im Wesentlichen übernommen, jedoch unter Beachtung spezifischer Anforderungen von Hybriden sowie unter Beachtung der Vergleichbarkeit der verschiedenen Proben angepasst (Bild 5.9). ^[214]

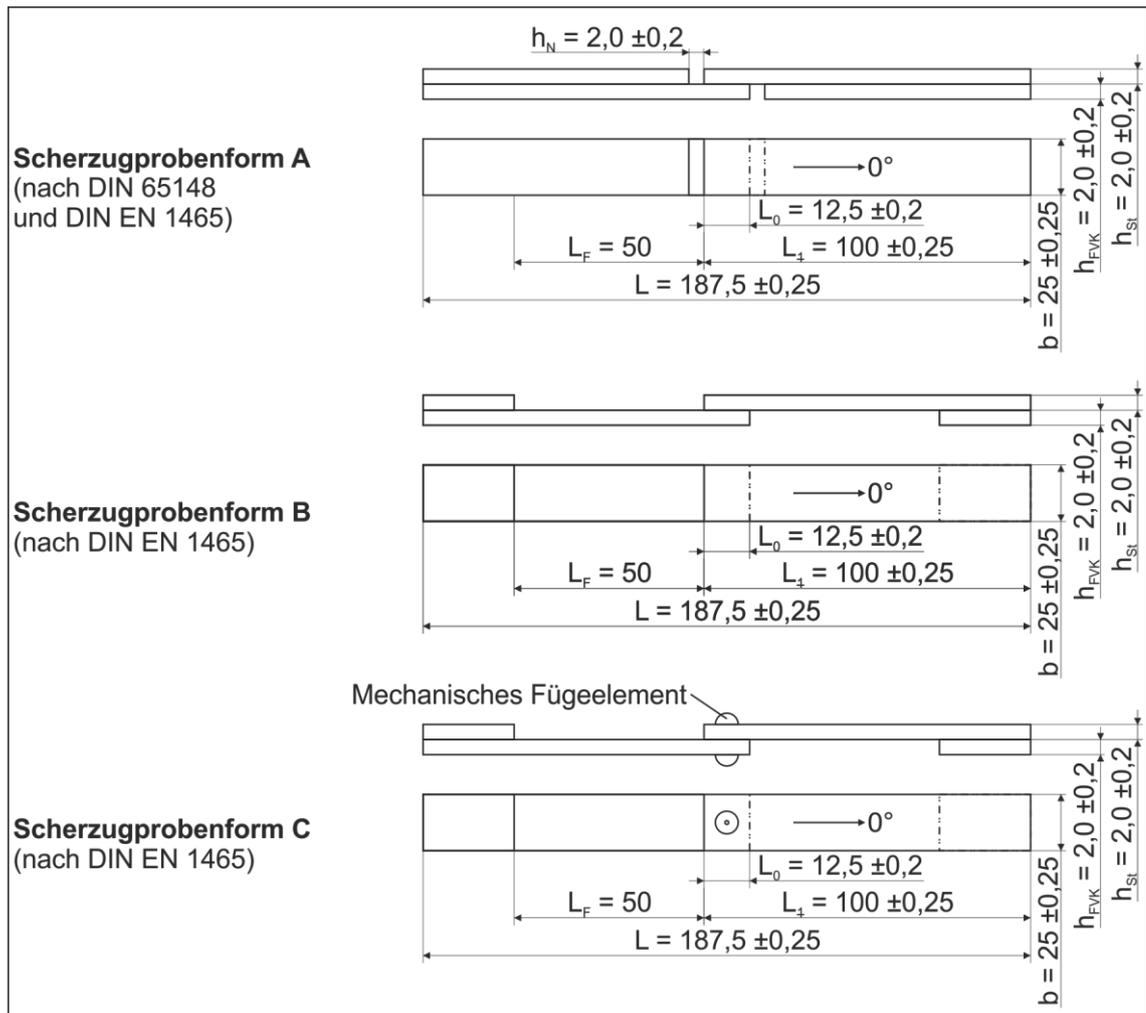


Bild 5.9 Probenformen für die Scherzugversuche

Die ermittelten Kennwerte sind vornehmlich zum Vergleich von Klebstoffen, Oberflächenvorbereitungen, Prozessparametern oder der Wirkung von physikalischen und chemischen Einflüssen auf die Verbindung sowie zur Qualitätssicherung zu nutzen. ^[108]
^[109] ^[212N]

Zur Untersuchung der verschiedenen Fügeverfahren, Prozessparameter und Oberflächenvorbereitungen wurden für das Kleben sowie die mechanischen Fügeverfahren zunächst FVK-Platten mit definierten Prozessparametern hergestellt. Für die Klebproben wurden die Platten besäumt und mit einer definierten Überlappungslänge auf ein zugeschnittenes Blech aufgeklebt. Aus diesen Platten wurden schließlich die Probenkörper herausgetrennt. Für die Proben für die mechanischen Fügeverfahren wurden aus den FVK-Platten und aus den Blechen Streifen herausgetrennt, vorgelocht und gefügt. Bei den Proben für das Prepregpressen wurden zunächst Prepreg und Blech zugeschnitten, aufeinandergepresst und die Probenkontur herausgetrennt. Anschließend wurden die Nuten zur Einstellung der Klebschicht eingebracht. ^[215N]

Als Klebstoff kam ein Betamate 1620 MB mit einer Klebschichtdicke von 0,3 mm zum Einsatz. Der Klebstoff wurde bei 180 °C für 30 min in einem Umluftofen ausgehärtet.

Für die Untersuchungen verschiedener Fügekonzepte wurden Blindnieten der Firma Gesipa verwendet. Es kamen hülsenfaltende Mehrbereichs-Blindnieten vom Typ Poly-Grip Alu/Stahl 6,4 x 15 Standard F K 13 zum Einsatz. Dieser Typ besitzt einen Nietdorn aus Stahl und eine Niethülse aus Aluminium. Die Länge der Niethülse beträgt 15,0 mm bei einem Durchmesser von 6,4 mm. Der große Klemmbereich reicht von 1,5 bis 9,0 mm. Laut Herstellerangaben verfügt diese Blindniete über eine Belastbarkeit auf Scherung von 2800 N und auf Zug von 4000 N. ^[216N] Daneben wurden handelsübliche Gewindeschneidschrauben nach DIN 7513 der Spezifikation M4 x 10 mm mit einem Sechskantkopf (Form A) mit einer elektrolytischen Verzinkung verwendet. ^[217N]

Um die Ergebnisse der Untersuchungen vergleichen und bewerten zu können, wurden verschiedene weitere Parameter definiert. Für geklebte Proben ergibt sich die Klebfestigkeit aus dem Quotienten der Maximalkraft und der Klebfläche:

$$\tau_K = \frac{F_{max}}{A_K} \quad (5.15)$$

Die Brucharbeit ist definiert als das Integral der Kraft über den Weg. Neben diesen Kennwerten wurde eine Bewertung der Bruchflächen der geklebten Proben in Anlehnung an die DIN EN ISO 10365 durchgeführt. ^{[109] [218N]}

5.3.1.1 Versuchsergebnisse

Im Rahmen der Untersuchungen wurden zunächst unterschiedliche Fügekonzepte untersucht. Bild 5.10 zeigt repräsentative Kraft-Weg-Verläufe für direkt verklebte, indirekt verklebte, geschraubte und blindgenietete Proben.

Die Verläufe unterscheiden sich signifikant voneinander. Die über das Matrixharz gefügten Proben weisen anfänglich einen nahezu linearen Verlauf auf, der zum Ende hin leicht abflacht. Die Proben verhalten sich sehr steif, was auf die geringe Klebschichtdicke zurückzuführen ist. Die mittels Betamate geklebten Proben zeigen einen ähnlichen Verlauf, der jedoch durch einen deutlich größeren Verformungsweg gekennzeichnet ist. Im Vergleich zu dem Matrixharz ist hier eine definierte Klebschicht von 0,3 mm vorhanden. Zusätzlich ist der Klebstoff hinsichtlich der Klebeigenschaften optimiert, d. h., er ermöglicht eine größere Verformung bei einer insgesamt höheren Maximalkraft. Die mechanischen Fügeelemente weisen einen deutlich flacheren Verlauf auf. Für die Gewindeschneidschrauben verläuft die Kurve zunächst sehr flach und sie geht anschließend in eine leichte Steigung über. Der flache Verlauf zu Beginn ist auf ein Setzen der Verbindung zurückzuführen. Das setzkopfseitige Blech rutscht bis zum Erreichen einer Lochleibung, da der Vorlochdurchmesser oberhalb des Schraubendurchmessers lag. Zum Ende flacht die Kurve wiederum ab, was auf eine plastische Verformung der Prüfkörper bzw. ein beginnendes, schrittweises Versagen des FVKs hindeutet. Die Maximalkraft ist deutlich geringer als bei den verklebten Proben, jedoch ist der Verformungsweg um ein Vielfaches größer. Dies ist neben den beschriebenen Effekten auf ein Verkippen des Fügeelementes zurückzuführen. Zudem kommt es ab einer be-

stimmten Kraft zu einem Ausreißen des Fügeelementes aus dem FVK. Ein ähnliches Verhalten zeigen die mittels Blindnieten gefügten Proben. Hier ist zu Beginn der Kraftanstieg infolge der Vorspannung durch den Setzprozess und daraus resultierende Reibungskräfte deutlich größer. Nach dem Erreichen einer Kraft von etwa 3 kN bleibt die Kraft zunächst konstant. Hier kann von einem Rutschen bis zum Erreichen einer Lochleibung, einem Verkippen sowie Verziehen des Fügeelements ausgegangen werden. Das Bruchverhalten durch Ausreißen des Blindnietes entspricht dem der Gewindegewindeschrauben.

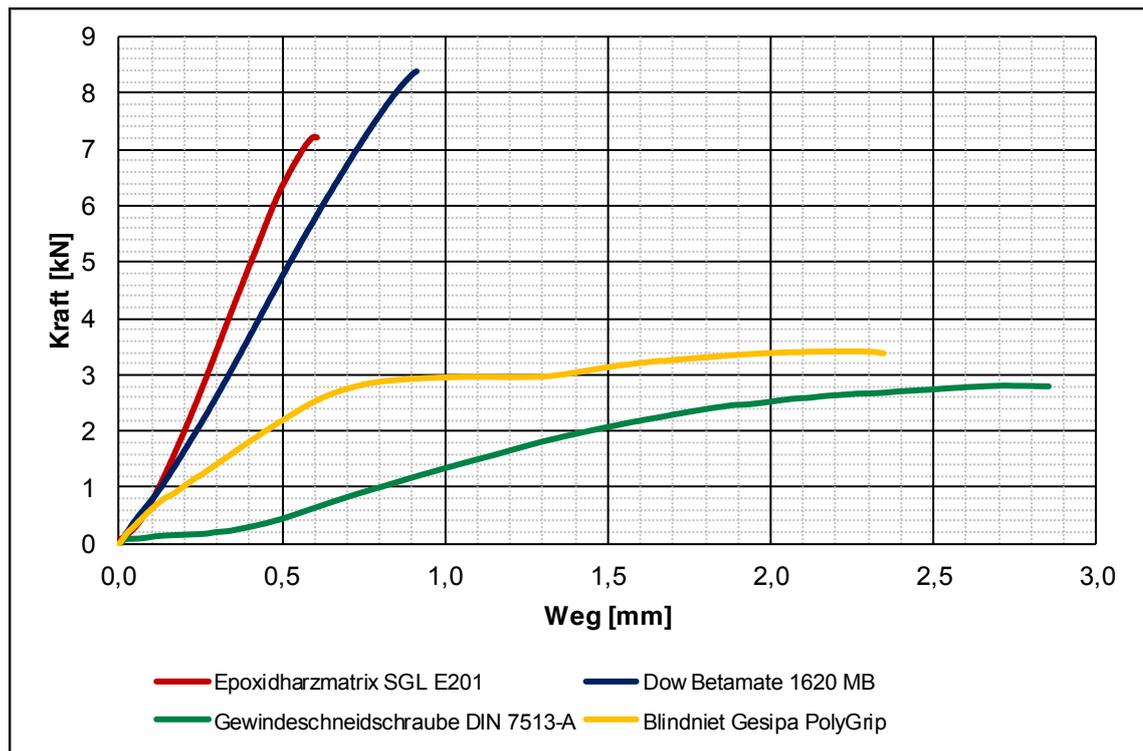


Bild 5.10 Kraft-Weg-Verläufe unterschiedlich gefügter Scherzugproben

Für die einzelnen Fügeverfahren wurden die Maximalkräfte sowie die Brucharbeit bis zum Erreichen der Maximalkraft bestimmt (Bild 5.11). Wie aus den Kraft-Weg-Verläufen ersichtlich, sind die Maximalkräfte sowie die Brucharbeiten der klebtechnischen und der mechanischen Fügeverfahren unterschiedlich ausgeprägt.

Die klebtechnisch gefügten Prüfkörper sind in der Lage, deutlich größere Maximalkräfte zu übertragen als die mechanisch gefügten Proben. Da bei diesen jedoch das Versagen des FVKs durch eine zu hohe Lochleibung bereits vor Erreichen der Maximalkraft einsetzt, liegen die ermittelten Brucharbeiten höher. Ein Vergleich zwischen den direkt und indirekt verklebten Proben verdeutlicht, dass die Maximalkräfte bei dem Betamate um knapp 10 % höher liegen. Durch das sprödere Verhalten der direkt verklebten Proben ist die aufgenommene Energie bis zum Bruch beim Betamate um ca. 30 % größer. Die bessere Performance der indirekt geklebten Proben liegt zum einen in der Anpassung des Epoxidharzes an die Anforderungen eines Klebstoffs begründet. Daneben ist aber die Ausbildung der Klebschicht der direkten Verbindung unterschiedlich. Der we-

sentliche Unterschied zu den gebräuchlichen Klebfugen ist darin zu sehen, dass keine definierte Klebschichtdicke zwischen den Fügeteilen vorhanden ist. Somit wird lediglich eine Grenzschicht statt zweier bei einer konventionellen Klebung ausgebildet. Diese Grenzschicht gestaltet somit den direkten Übergang zwischen den beiden Werkstoffen und ist damit im Wesentlichen für die Verbindungseigenschaften verantwortlich. Größere Verschiebungen durch Scherungen bis weit in den plastischen Bereich, wie sie in elastischen Klebschichten über ihre Dicke der Fall sind, werden nicht begünstigt.

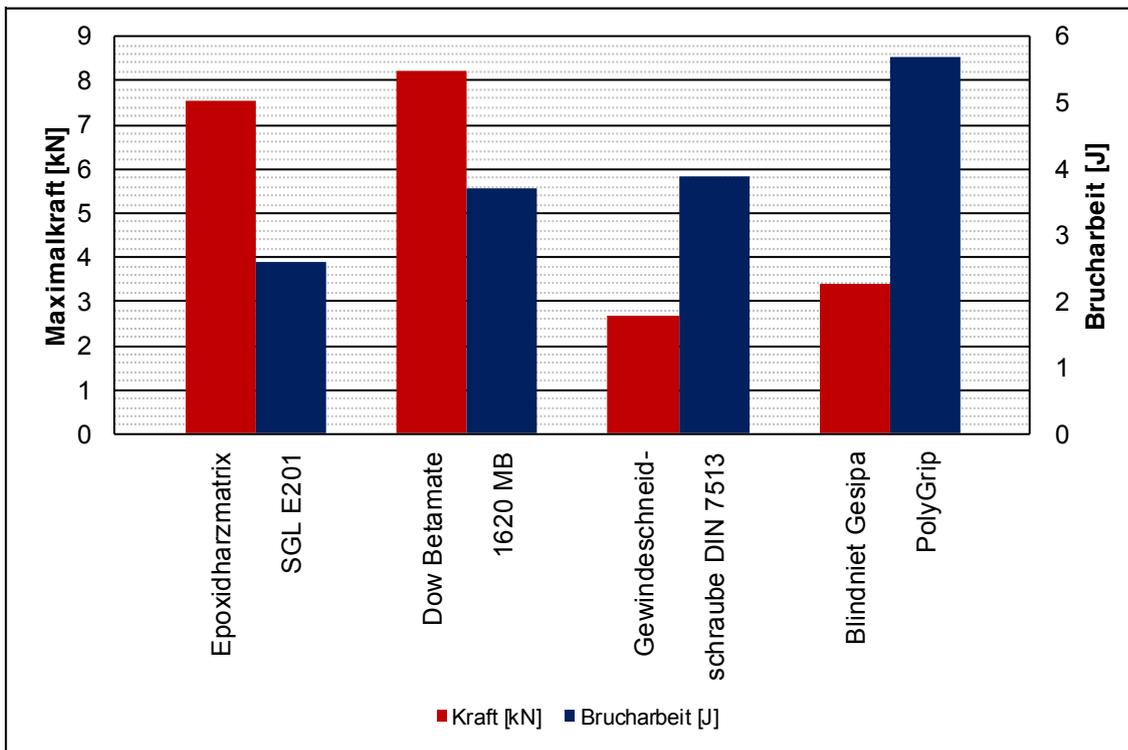


Bild 5.11 Maximalkräfte und Brucharbeiten für unterschiedlich gefügte Scherzugproben

Das Versagen der Fügestelle bzw. des FVKs kann anhand der Bruchbilder verdeutlicht werden (Bild 5.12). Bei den indirekt verklebten Proben erfolgt der Bruch genau in der Matrixschicht zwischen der ersten und der zweiten Lage des Laminats. Bei den direkt verklebten Proben erfolgt i. d. R. ein Mischversagen. In jedem Fall ist das Matrixharz die wesentliche Komponente, welche die Verbindungseigenschaften auf Schub belasteter Prepregs mit belastungsparallelen Faserlagen beeinflusst. Die mittels mechanischer Fügeverfahren gefügten Proben weisen ein Ausreißen des Fügeelementes aus dem FVK auf. ^[219]

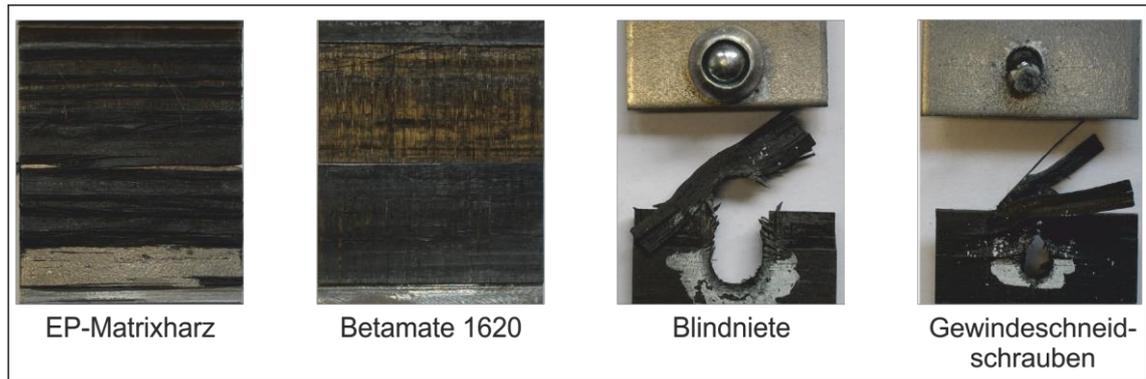


Bild 5.12 Bruchbilder unterschiedlich gefügter Scherzugproben

Der zweite Untersuchungsschwerpunkt lag auf der Variation der Prozessparameter Zeit und Temperatur. Dabei wurde insbesondere der Einfluss dieser Parameter auf die Verbindungsfestigkeit direkt verpresster Stahl-FVK-Hybridproben untersucht. Das Harzsystem ist inhärenter Bestandteil des Prepregs und wirkt somit in diesem Fall zugleich als Klebstoff und als Matrixharz. Während der Konsolidierung wird unter Einwirkung von Druck und Temperatur durch das Matrixharz eine Adhäsion zum Stahlblech ausgebildet und eine Aushärtung des Epoxidharzes initiiert, was zu einer inneren Festigkeit des FVKs führt.

Der Einfluss unterschiedlicher Prozessparameter und Oberflächenvorbehandlungen auf die Klebfestigkeit sowie die Brucharbeit ist in Bild 5.13 dargestellt. Sowohl für die Klebfestigkeit als auch für die Brucharbeit kann jeweils ein Maximum bei einer Temperatur von 180 °C festgestellt werden. Für 180 °C liegt zudem die geringste Streuung der ermittelten Werte vor. Insgesamt ist eine deutliche Abhängigkeit der Verbindungseigenschaften von den Aushärteparametern zu erkennen. Eine Oberflächenvorbehandlung der Fügeteile hat ebenfalls einen Einfluss auf die Verbindungseigenschaften. Für die bei 180 °C für 3,5 min ausgehärtete Referenzprobe wurden Entfetten und Schleifen als Vorbehandlungen untersucht. Dabei zeigte sich ein geringer Einfluss auf die Klebfestigkeit, die leicht erhöht wurde. Hingegen wurde die Brucharbeit durch Entfetten um 5 % und durch Schleifen der Oberflächen um 15 % erhöht. Die Klebfestigkeit der Referenzprobe liegt um ca. 8 % und die Brucharbeit um 30 % unter der einer entfetteten und mittels Betamate geklebten Probe.

Die unterschiedlichen ermittelten Werte für die mechanischen Eigenschaften deuten auf einen variierenden Aushärtungsgrad der einzelnen Proben bei den gewählten Prozessparametern hin. ^[109] ^[154] Die vorliegenden Ergebnisse für die verschiedenen Prozessparameter konnten jedoch durch zusätzlich bei 180 °C für 30 min nachgehärtete Proben bestätigt werden, bei denen für alle Proben eine vollständige Aushärtung vorliegt. HABENICHT weist jedoch auch auf mit zunehmender Temperatur ansteigende Klebfestigkeiten hin, die eine Folge einer besseren Vernetzung bei höheren Temperaturen sind. Allerdings wird nur ein Temperaturbereich zwischen 20 und 100 °C beschrieben. Optimale Klebschichteigenschaften werden demnach nur erreicht, wenn Temperatur und Zeit so aufeinander abgestimmt sind, dass ein gleichmäßiger Umsatz-

grad und somit Vernetzungszustand der Klebschicht erreicht wird. ^[109] Auch für andere Epoxidharz-Systeme ist ein Anstieg der Festigkeit mit zunehmender Herstellungstemperatur zu beobachten. ^[220N]

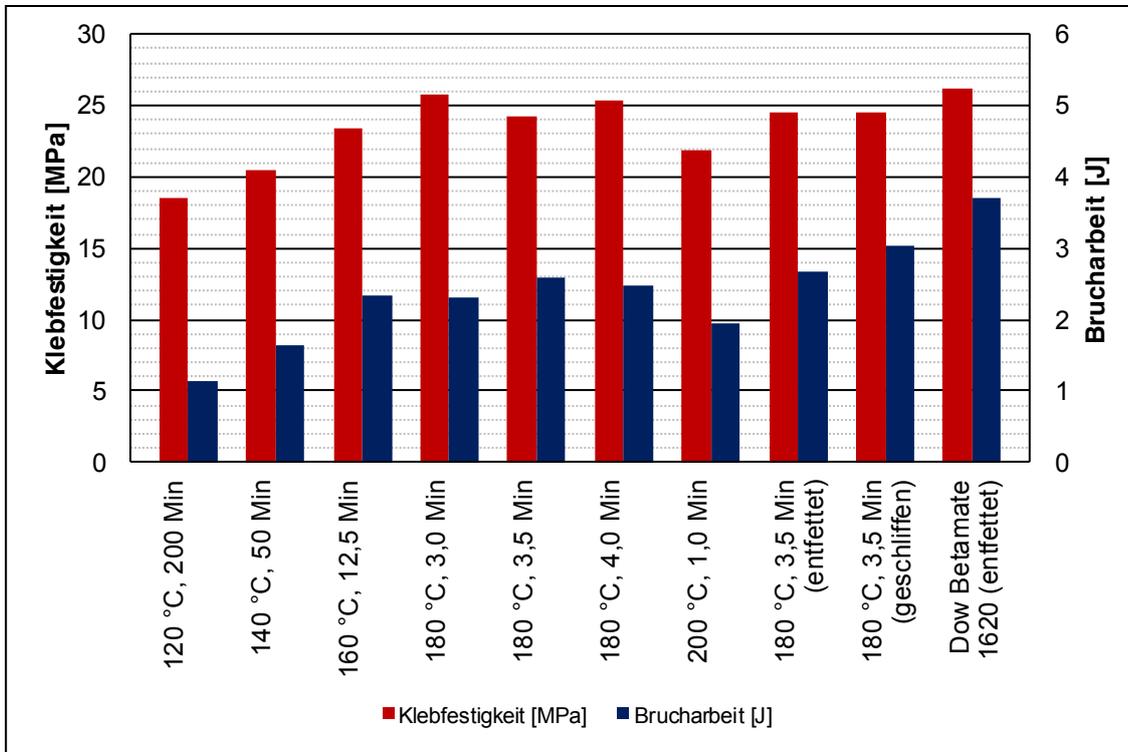


Bild 5.13 Einfluss unterschiedlicher Prozessparameter und Oberflächenvorbehandlungen auf die Klebfestigkeit und die Brucharbeiten

Entsprechend den mechanischen Kennwerten zeigen auch die Bruchbilder einige charakteristische Merkmale (Bild 5.14). Das Bruchverhalten der bei 120 °C ausgehärteten Proben ist mit einem Anteil von ca. 60 % vornehmlich durch adhäsives Versagen geprägt. Daneben sind zu etwa gleichen Anteilen auch ein grenzschichtnahe Versagen sowie Delaminationen zwischen der ersten und zweiten Prepreglage festzustellen. Der grenzschichtnahe Bruch ist durch ein kohäsives Versagen der Matrix bestimmt. Bei einer Erhöhung der Aushärtetemperatur auf 130 °C zeigt sich ein ähnliches Versagensverhalten, wobei der Anteil adhäsiven Versagens sinkt. Ein kleinerer Anteil ist wiederum durch ein grenzschichtnahe Versagen geprägt. Die übrige Bruchfläche weist eine Delamination zwischen der ersten und zweiten Prepreglage auf. Mit steigender Temperatur sinkt der Anteil adhäsiven Versagens weiter ab. Für 180 °C und 3,5 min liegt der Anteil des Versagens durch Delamination und Zwischenfaserbrüche bei ca. 45 %, weitere 35 % entfallen auf grenzschichtnahe Versagen und nochmals 20 % auf Adhäsionsversagen. Insgesamt treten deutlich mehr Zwischenfaserbrüche auf als zuvor. Die mit einer Temperatur von 200 °C ausgehärteten Proben weisen ein ausgeprägtes Versagen durch Delamination (ca. 70 %) und zudem grenzschichtnahe Brüche (ca. 30 %) auf.

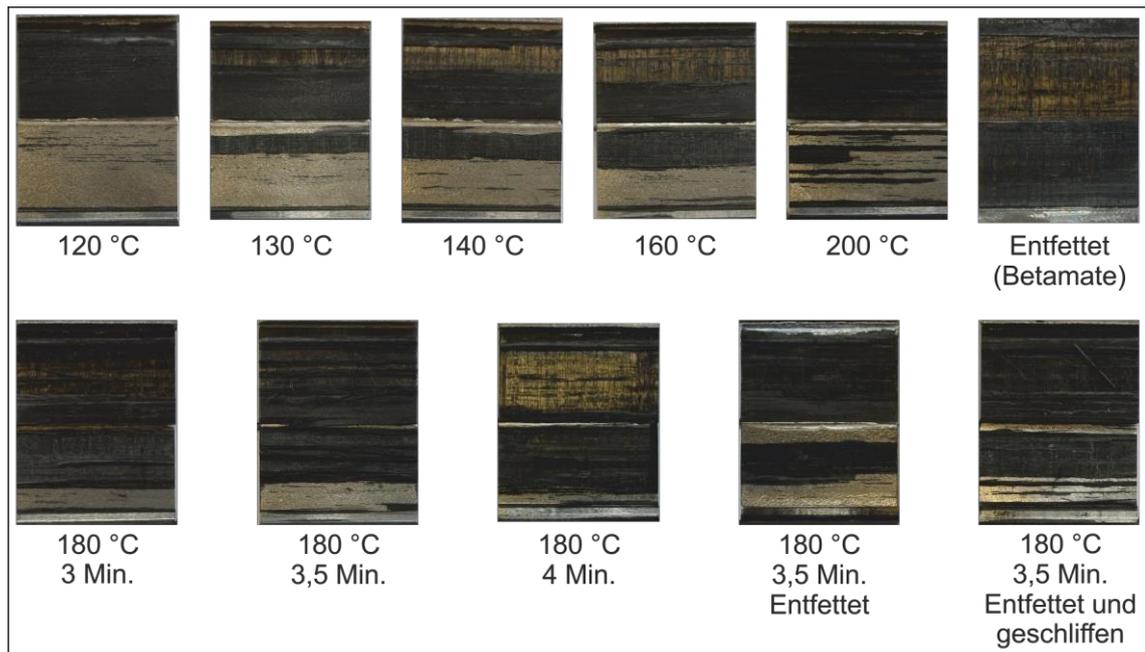


Bild 5.14 Einfluss unterschiedlicher Prozessparameter und Oberflächenvorbehandlungen auf die Bruchbilder

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass vorrangig die Festigkeit zwischen den Laminatschichten einschließlich des Stahlblechs für das Versagen der Prüfkörper verantwortlich ist. Das Bruchverhalten hat sich kontinuierlich über die Prüfreihen hinweg verändert. Adhäsionsbrüche konnten vorwiegend im Bereich niedriger Temperaturen (120 bis 140 °C) und langer Prozesszeiten beobachtet werden. Eine verbesserte Ausbildung adhäsiver Bindungen hingegen wurde bei höheren Temperaturen festgestellt, wobei das Optimum bei 180 °C erreicht wurde.

Zur weiteren Optimierung der Verbindungseigenschaften wurde die Prozesszeit im Bereich des vorläufigen Optimums von 180 °C um plus und minus 30 s variiert. Wie in Bild 5.13 zu erkennen, steigt die Maximalkraft bei einer Zeit von 3 min um ca. 7 % an. Jedoch sinkt die Brucharbeit um 10 % ab. Eine Aushärtezeit von 4 min führt ebenfalls zu leicht höheren Maximalkräften bei einer leicht sinkenden Brucharbeit. Die Bruchfläche der 3 min ausgehärteten Proben ist durch einen grenzschichtnahen, kohäsiven Bruch in Verbindung mit Zwischenfaserbrüchen gekennzeichnet (Bild 5.14). Der Anteil dieser Mischbruchart beträgt etwa 60 %. Die Delamination der ersten Prepreglage erstreckt sich über den verbleibenden Flächenanteil von ca. 40 %. Vergleicht man diese Bruchfläche mit denen der über 3,5 min ausgehärteten Referenzproben, so fällt auf, dass ein Versagen durch Adhäsionsbruch fast vollständig entfällt. Dies ist als Ursache für die Steigerung der Maximalkraft zu sehen, da ein Ablösen des Matrixharzes vom Stahlblech eine geringere Beanspruchbarkeit der Grenzschicht bedeutet, als das Harz durch seine Festigkeit ertragen könnte. Das Bruchbild der 4-min-Probe ist zu etwa 60 % durch ein grenzschichtnahes Versagen und Zwischenfaserbrüche geprägt. Der restliche Anteil entfällt auf Delaminationen.

Als mögliche Oberflächenvorbehandlungen wurden das Entfetten mit Aceton sowie das Schleifen mit einer 80er Körnung entsprechend der DIN EN 13887 in Betracht gezogen. Im Vergleich zu den nicht vorbehandelten Proben ist eine leichte Erhöhung der Maximalkraft zu verzeichnen (Bild 5.13). Die Brucharbeit steigt durch Entfetten ebenfalls leicht an. Durch das Schleifen und die dadurch erzeugte vergrößerte Oberfläche steigt die Brucharbeit um fast 15 % im Vergleich zu der unbehandelten Probe an. Das Bruchverhalten der entfetteten Fügeteile weist Ähnlichkeiten zu dem der nicht vorbehandelten Probe auf (Bild 5.14). Das adhäsive Versagen macht etwa 25 %, das grenzschichtnahe Versagen, zum Teil mit Zwischenfaserbrüchen, 35 % und Delaminationen ca. 40 % der Bruchfläche aus. Das Bruchverhalten der geschliffenen Proben weist mit ca. 60 % vorwiegend ein grenzschichtnahe Versagen auf. Delaminationen machen 20 % und grenzschichtnahe Brüche und Zwischenfaserbrüche ebenfalls 20 % aus.

Als letzter Untersuchungsgegenstand wurde die Ausrichtung der grenzschichtnächsten Faserlage des Prepregs gewählt. Liegen die Verstärkungsfasern in dieser Schicht in Belastungsrichtung vor, wird das Werkstoffverhalten durch die Fasern dominiert, was z. B. eine höhere Steifigkeit zur Folge hat. Liegen die Fasern senkrecht zur Belastungsrichtung, so wird das Werkstoffverhalten vornehmlich von der Matrix bestimmt. Diese ist elastischer und besitzt eine größere Bruchdehnung. Die Klebfestigkeiten und Brucharbeiten der untersuchten Faserorientierung sind gemeinsam mit verschiedenen Oberflächenvorbehandlungen und einer indirekt verklebten Prüfreihe in Bild 5.15 dargestellt. ^[214]

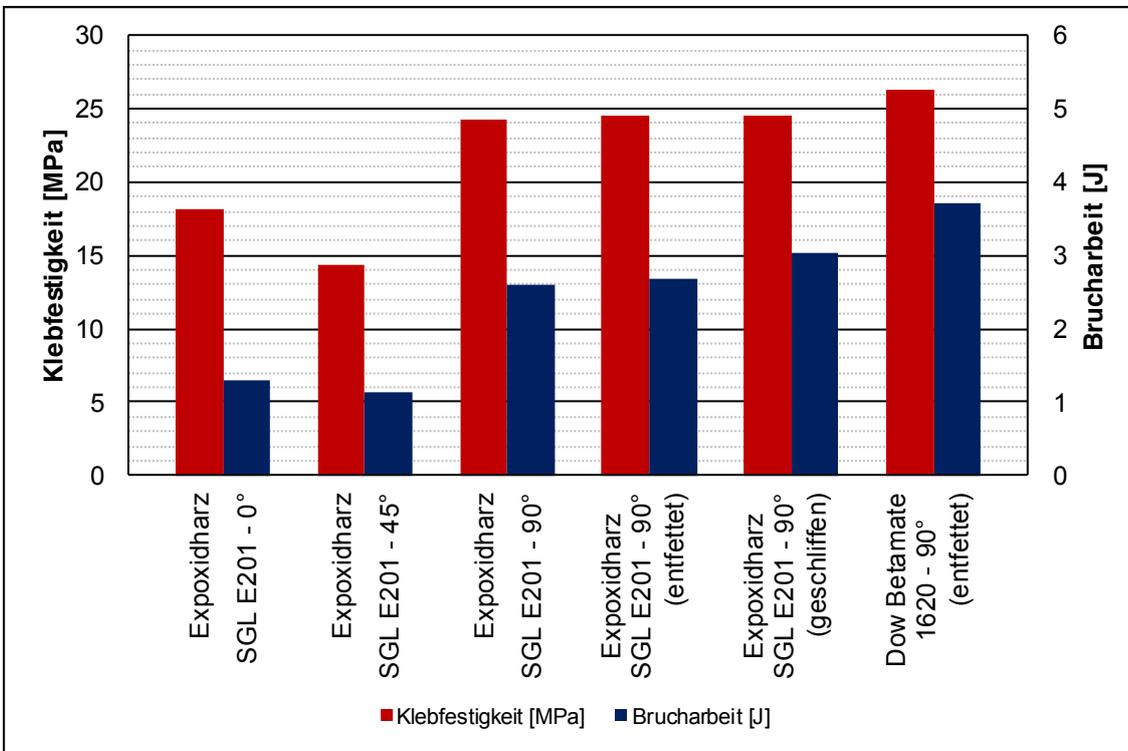


Bild 5.15 Einfluss der Faserorientierung der grenzschichtnächsten Faserlage auf die Maximalkräfte und die Brucharbeit

Die geringsten Werte erreichen Proben mit einer Faserorientierung von 45° , gefolgt von den 0° -Proben. Die maximalen Klebfestigkeiten sinken im Vergleich zu einer 90° -Faserorientierung um 40 % bzw. 25 %. Die Brucharbeit sinkt um 57 % bzw. 50 %.

Das Bruchbild der 0° -Proben weist zu etwa 55 % ein grenzschichtnahes und zu 45 % ein adhäsives Versagen auf (Bild 5.16). Dies ist mit der hohen Steifigkeit der äußersten Faserlage zu begründen. Zudem wird durch die Faserorientierung in dieser Schicht die Ausbildung einer elastischen Grenzschicht verhindert, welche die Aufgaben einer Klebschicht in geeignetem Maße erfüllen könnte. Das Risswachstum erfolgt unmittelbar in der Klebung zwischen Stahl und FVK. Ein ähnliches Versagensverhalten zeigt sich bei den 45° -Proben. Die Bruchfläche zeigt zu ca. 55 % ein grenzschichtnahes, zu etwa 35 % ein adhäsives und zu 10 % ein Delaminationsversagen. ^[221]

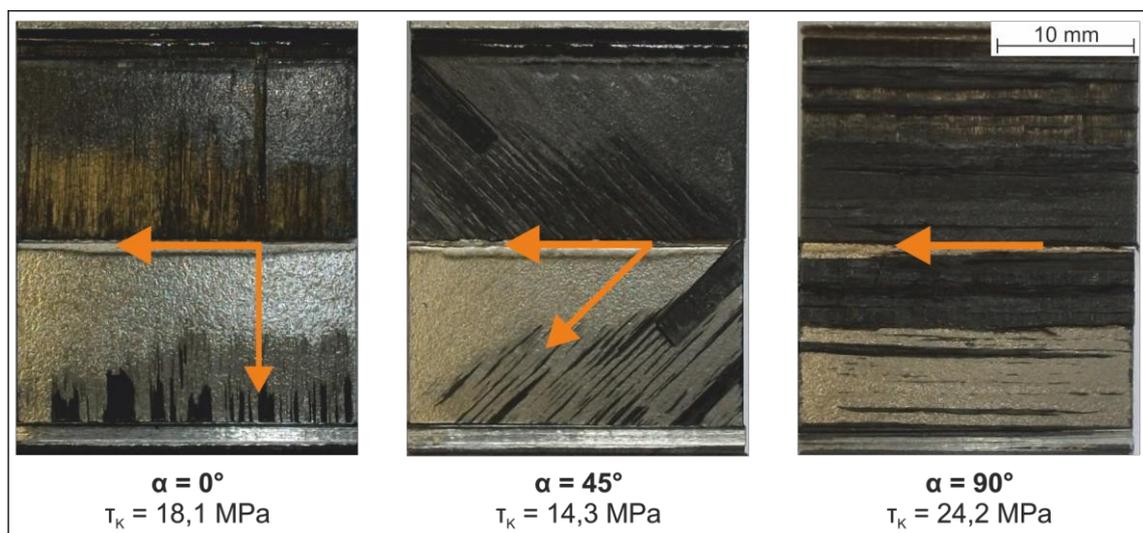


Bild 5.16 Einfluss der Faserorientierung der grenzschichtnächsten Faserlage auf die Bruchbilder

Bei einfach überlappten Scherzugproben entsteht durch die Exzentrizität der Lasteinleitung neben den Schubspannungen auch ein Biegemoment, das Normalspannungen in der Klebschicht zur Folge hat. In der Mitte der Überlappungsfläche hat das Spannungsniveau sein Minimum. Zum Rand der Überlappungsfläche nehmen die wirkenden Spannungen parabelförmig zu. Bei modernen Klebstoffen mit gezielt zugesetzten, plastifizierenden Komponenten erfolgt mit zunehmender Verformung eine Verringerung des Schubmoduls. Hierdurch kommt es an den Überlappungsenden von Klebungen nur zu kleineren Spannungsspitzen ohne Rissbildung. Eine Erhöhung der Klebschichtdicke führt zunächst zu einem linearen Anstieg des Biegemoments. Daneben existieren jedoch noch weitere dickenabhängige Klebschichteigenschaften, die den Eigenspannungszustand sowie die Verformbarkeit der Klebschicht beeinflussen. So führt eine Erhöhung der Klebschichtdicke zu einer Reduzierung der Spannungsspitzen am Überlappungsende. Dies führt jedoch nicht zwangsläufig zu höheren Klebfestigkeiten. Vielmehr ist bei vielen Strukturklebstoffen zu beobachten, dass eine verringerte Klebschichtdicke zu höheren Festigkeiten führt. Hierfür ist jedoch eine ausreichende Benet-

zung der Fügeiteiloberfläche durch eine entsprechend geringe Viskosität des Klebstoffsystems während der Verarbeitung wichtig. ^{[109] [159] [222] [223] [224]}

Bei den untersuchten Proben, deren grenzschichtnächste Faserlage vollständig oder anteilig in Belastungsrichtung ausgerichtet war, ist die Klebschichtdicke vernachlässigbar dick ausgeprägt. Dagegen liegt bei den Proben, deren grenzschichtnächste Faserlage senkrecht zur Belastungsrichtung ausgerichtet war, eine Klebschichtdicke in Höhe der Dicke dieser Prepreglage vor, d. h. etwa 0,23 mm. Diese Dicke kommt der in der Literatur angegebenen optimalen Klebschichtdicke von 0,2 bis 0,5 mm ^{[175N] [223]} für viele Anwendungen sehr nahe.

5.3.1.2 Zusammenfassung

Es wurden verschiedene Fügekonzepte auf ihre Eignung für die Anwendung in Hybridstrukturen untersucht. Insbesondere aufgrund der ohnehin vorhandenen großen wirksamen Überlappungsfläche bei lokalen FVK-Verstärkungen sollte dem klebtechnischen Fügen der Vorzug gegeben werden. Mechanische Fügeelemente können gegebenenfalls für eine Fixierung der Fügeiteile beim indirekten Kleben nützlich sein. Als optimale Prozessparameter für das direkte Verpressen wurde eine Temperatur von 180 °C bei einer Zeit von ca. 3 min ermittelt. Diese Proben weisen jedoch insgesamt schlechtere Klebeigenschaften als mittels Betamate verklebte Proben auf. Durch den Verzicht auf einen zusätzlichen, aufwändigen Klebprozess und im Hinblick auf eine mögliche Anpassung der Matrix hin zu besseren Klebeigenschaften oder die Verwendung eines direkt auf dem Prepreg-Halbzeug applizierten Klebfilms ergeben sich insbesondere für größere Serien Vorteile. Eine Oberflächenvorbehandlung führt zu einer leicht besseren Performance, ist jedoch nicht zwingend vorzusehen. Die Faserorientierung der grenzschichtnächsten Faserlage sollte beim direkten Verpressen senkrecht zur Belastungsrichtung gewählt werden. Die darauffolgende Lage sollte hingegen möglichst in Belastungsrichtung ausgelegt werden, um die wirkenden Kräfte leiten zu können. Weitere Verbesserungen der Klebeigenschaften sind z. B. über eine Anpassung der Ränder der Klebung durch Anfasen der metallischen Komponente oder eine Anpassung der Klebfugengeometrie bzw. des Fugenfüllungswinkels möglich. ^[225]

5.3.2 Einfluss unterschiedlicher Belastungswinkel

Neben den Scherzugversuchen wurde der Einfluss unterschiedlicher Prüfwinkel auf die Verbindungseigenschaften untersucht. Hierbei konnten vergleichbar mit dem KSII-Prüfkonzept verschiedene Beanspruchungszustände eingestellt werden, bei denen reiner Scherzug, reiner Kopfzug oder Kombinationen der Beanspruchungen vorherrschen. ^{[10] [226] [227N] [228P] [229P] [230P] [231P]} Das Hauptaugenmerk lag hierbei im Vergleich verschiedener Fügekonzepte. Untersucht wurden das direkte Verpressen, das Verkleben über einen Strukturklebstoff und einen Klebfilm sowie der Einfluss verschiedener Fertigungsverfahren der FVK-Komponente. ^[232S]

Für die Untersuchungen wurden eine Probenform und ein entsprechender Versuchsaufbau entwickelt, die den spezifischen Anforderungen des Prepregpressens gerecht werden (Bild 5.17). Diese Konfiguration ermöglicht sowohl die Untersuchungen einfacher Klebungen als auch die Untersuchung einer Klebung mit einer FVK-Schicht. Die Aufnahmen können für quasistatische, dynamische und schlagartige Belastungen unter verschiedenen Belastungswinkeln, d. h. 0° , 30° , 60° und 90° , genutzt werden. ^[233N]

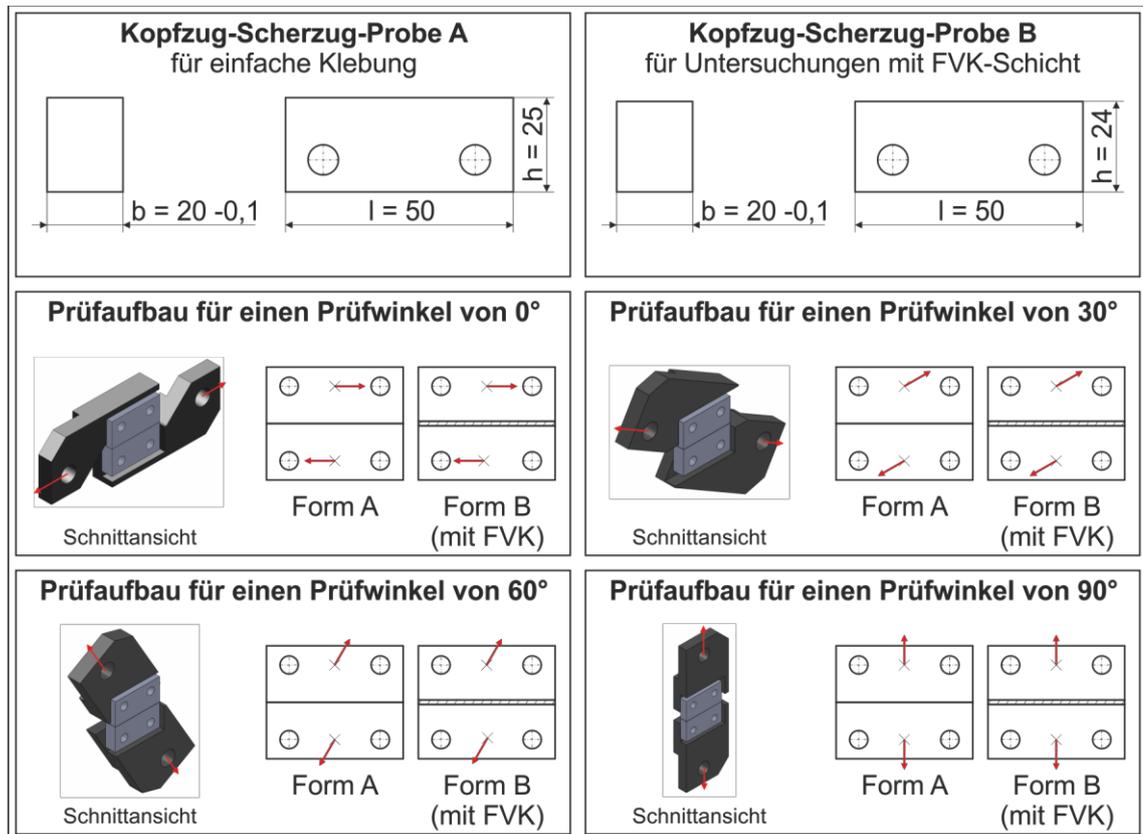


Bild 5.17 Probenformen und Versuchsaufbau

Zur Herstellung der Prüfkörper wurden die Probenhälften zunächst definiert geschliffen, gereinigt und anschließend entfettet. Für die Form A erfolgte hiernach der Klebstoffauftrag. Die kopfseitig aufeinandergelegten Probenhälften wurden in einer speziellen Halterung fixiert und mit einem definierten Druck beaufschlagt, bevor sie zur Aushärtung in einen Umluftofen gelegt wurden. ^{[233N] [234N] [215N]} Bei der Form B erfolgte anstatt des Klebstoffauftrags das Auflegen eines unausgehärteten Prepregs bzw. eines entsprechend zugeschnittenen ausgehärteten FVK-Plättchens mit einer Dicke von 2 mm.

5.3.2.1 Versuchsergebnisse

Es wurden insgesamt sechs verschiedene Fügepartnerkombinationen untersucht. Als Referenz dienten Stahl-Stahl-Klebung, die mittels eines Betamate 1620 MB sowie eines Klebfilms SAF 6068 realisiert wurden. Die Stahl-FVK-Klebung wurden dann mit den beiden Klebstoffsystemen sowie über das Matrixharz ausgeführt. Als weitere

Variation wurden neben prepreggepressten FVK-Komponenten zusätzlich in einem Autoklav hergestellte Strukturen verwendet.

Die Klebfestigkeiten und Brucharbeiten der unterschiedlichen Prüfkörper sowie der Einfluss der Belastungswinkel sind in den folgenden Abbildungen dargestellt. Ein Belastungswinkel von 0° entspricht einer Scherzugbeanspruchung (Bild 5.18). Die Stahl-Klebung weisen die höchsten Werte sowohl für die Klebfestigkeit als auch für die Brucharbeit auf. Dies ist insofern naheliegend, als sie vornehmlich für diese Werkstoffpaarung entwickelt wurden. Die Stahl-FVK-Klebung weisen geringere Werte auf, wobei kein Einfluss der unterschiedlichen Herstellungsverfahren erkennbar ist. Die mittels des Klebfilms gefügten Hybridproben erreichen zwar eine annähernd hohe Festigkeit wie der Betamate, jedoch versagen sie insgesamt deutlich spröder. Dies führt zu einer geringeren Brucharbeit. Eine nochmals geringere Brucharbeit weist die direkt über das Matrixharz verpresste Probe auf.

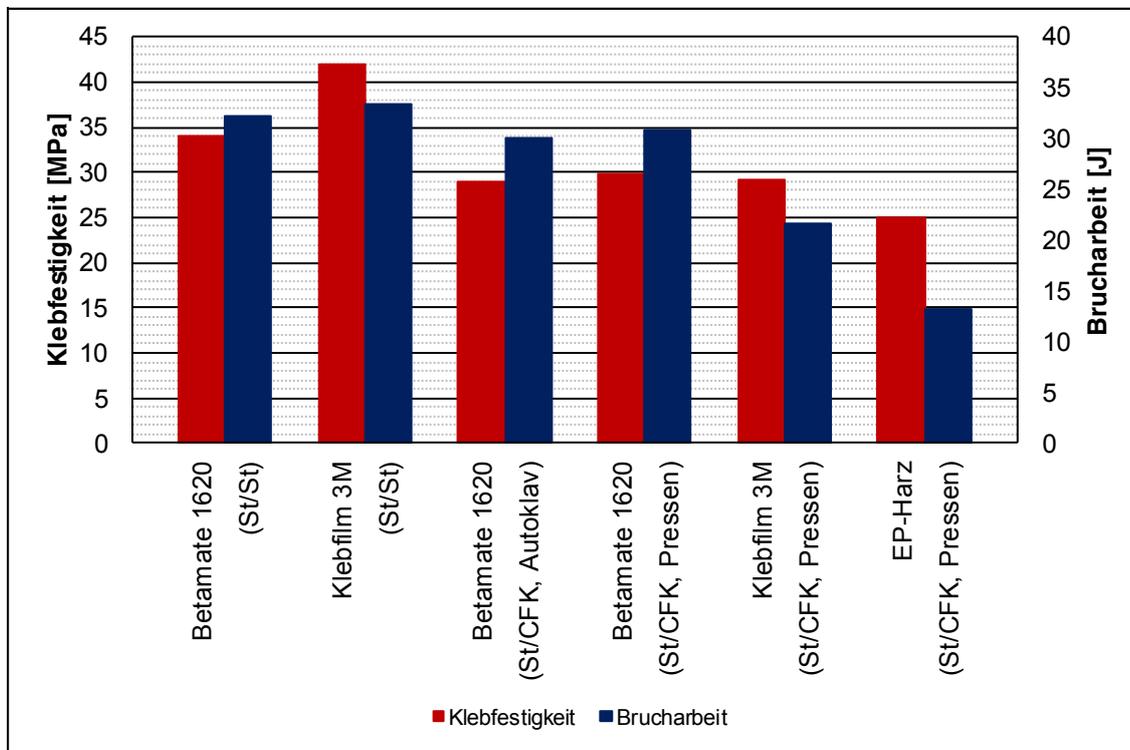


Bild 5.18 Klebfestigkeit und Brucharbeit für verschiedene Kopf-/Scherzug-Proben unter einem Belastungswinkel von 0°

Auch für einen Belastungswinkel von 30° bestätigen sich die Ergebnisse (Bild 5.19). Insgesamt sinkt das Niveau der Kennwerte ab, was eine Folge der überlagerten Scherzug-/Kopffzug- bzw. Scher-/Schälbeanspruchung ist. Die Schälbeanspruchung ist für Klebungen aufgrund von im Randbereich lokal deutlich höheren (Aufzieh-)Spannungen kritisch. So liegt die Scherzugfestigkeit für einen Betamate 1496, welcher dem hier verwendeten Betamate 1620 ähnlich ist, bei etwa 35 N/mm^2 , während die Schälzugfestigkeit zwischen $3,3$ und $15,1 \text{ N/mm}^2$ liegt. Die Kopffzugfestigkeit

liegt mit ca. $16,5 \text{ N/mm}^2$ zwischen diesen Werten. ^[235] Insbesondere für die direkt verpressten Proben sinken die Klebfestigkeit und die Brucharbeit sehr deutlich ab.

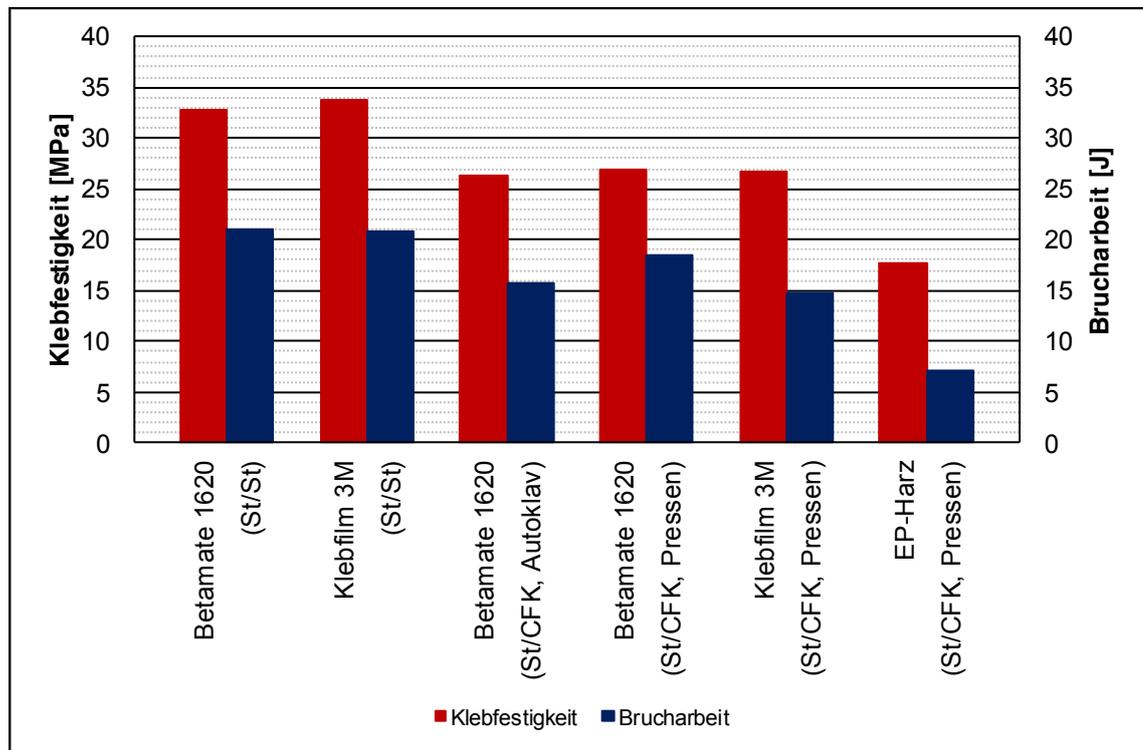


Bild 5.19 Klebfestigkeit und Brucharbeit für verschiedene Kopf-/Scherzug-Proben unter einem Belastungswinkel von 30°

Die Ergebnisse der Untersuchungen unter einem Belastungswinkel von 60° zeigt Bild 5.20. Durch die überlagerte Kopf-/Scherzug-Beanspruchung mit einem höheren Kopfzuganteil sinken die Kennwerte im Vergleich zu einem Belastungswinkel von 30° nochmals ab. Dieser Effekt ist bei den reinen Stahlklebungen jedoch sehr gering ausgeprägt. ^[235] Dies ist für die verwendeten Klebstoffe gewollt, da in der Praxis oftmals komplexe und z. T. undefinierte Beanspruchungszustände auf die Fügestellen wirken. Viele auf Epoxidharz basierende Klebstoffe werden aufgrund ihres spröden Werkstoffverhaltens zur Erfüllung dieser Anforderung durch den Einbau von Zähelastifizierungskomponenten in die chemische Struktur modifiziert. Hierdurch werden die Bruchenergie für die Trennung der Fügepartner und auch der Schälwiderstand deutlich erhöht. ^[109] Die Epoxidharz-Matrix der Prepregs ist nicht hinsichtlich der Klebeigenschaften modifiziert, was ein Erklärungsansatz für den Abfall der Kennwerte unter Mischbeanspruchung ist.

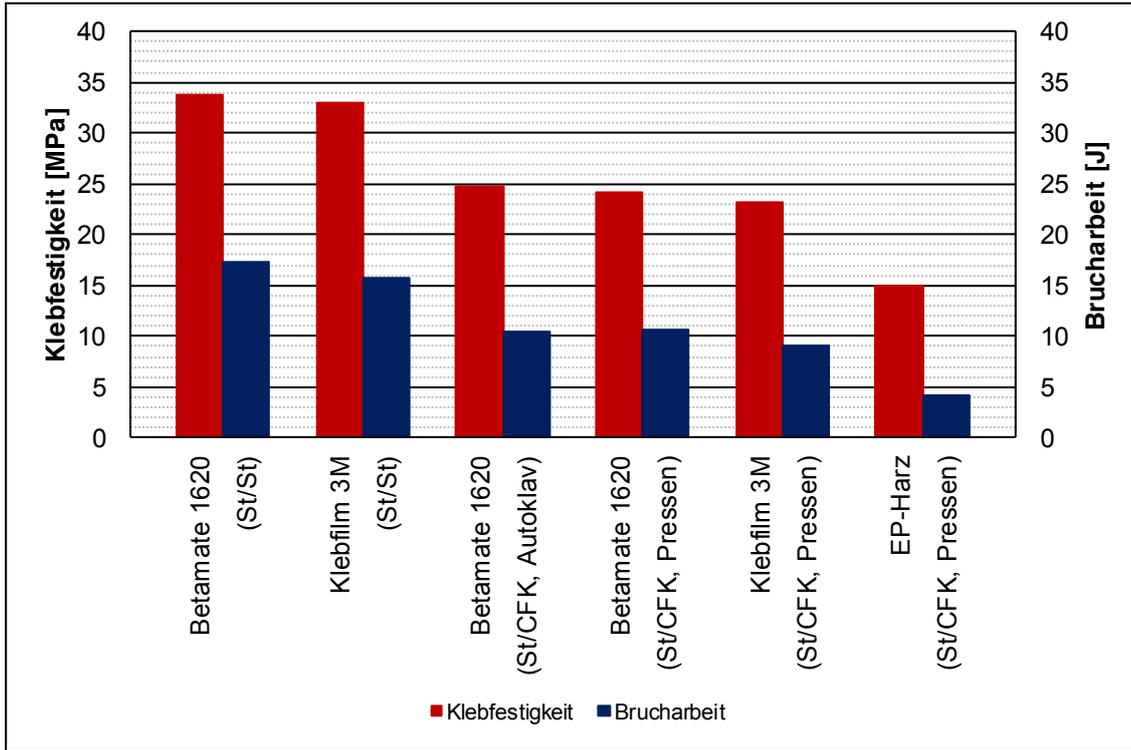


Bild 5.20 Klebfestigkeit und Brucharbeit für verschiedene Kopf-/Scherzug-Proben unter einem Belastungswinkel von 60°

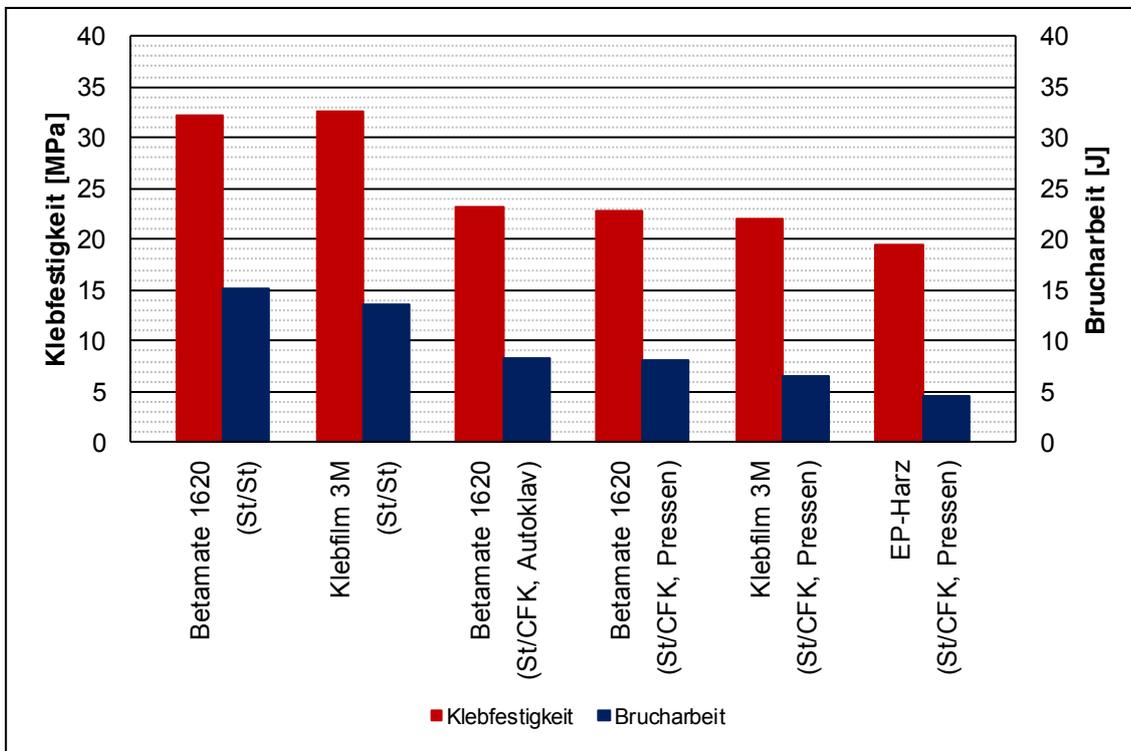


Bild 5.21 Klebfestigkeit und Brucharbeit für verschiedene Kopf-/Scherzug-Proben unter einem Belastungswinkel von 90°

Eine reine Kopfzugbeanspruchung führt bei den geklebten Proben zu keiner weiteren Verschlechterung der Klebfestigkeit (Bild 5.21). Bei den direkt verpressten Proben steigt die Klebfestigkeit hingegen deutlich an. Die Brucharbeit sinkt bei den geklebten Proben ab. Bei den direkt verpressten Proben liegt sie leicht über denen bei einer Kopf-/Scherzug-Belastung. Die maximal ertragenen Spannungen der Hybridproben liegen mit um 20 N/mm^2 im Bereich der aus Zugversuchen ermittelten Zugfestigkeit des FVKs quer zu den Verstärkungsfasern. Da die Klebstoffsysteme in der Lage sind, deutlich höhere Kräfte zu übertragen, liegen bei diesen Proben in allen Fällen Zwischenfaserbrüche bzw. Delaminationen als Versagensart vor (Bild 5.23).

Zusammenfassend ist in Bild 5.22 eine Gegenüberstellung der Versagenskurven der verschiedenen Proben dargestellt. Es lassen sich drei Gruppen zusammenfassen. Die reinen Stahl-Stahl-Klebungen erreichen die höchsten Werte für die Klebfestigkeit, wobei der Unterschied zwischen den beiden getesteten Systemen nur gering ist. Die mittels Klebstoff gefügten Hybridproben können zu einer zweiten Gruppe zusammengefasst werden. Beide Klebstoffe erreichen annähernd gleich gute Festigkeiten, wobei der Betamate in diesem Fall etwas besser abschneidet. Ein Einfluss des Herstellungsverfahrens ist nicht ersichtlich. Die direkt über das Matrixharz verpressten Hybridproben erreichen die geringsten Festigkeiten. Das Versagensverhalten ist zudem sehr spröde, was sich auch in den geringen Werten für die Brucharbeit äußert. Damit bestätigen sich die Ergebnisse der Scherzugversuche (Kapitel 5.3.1).

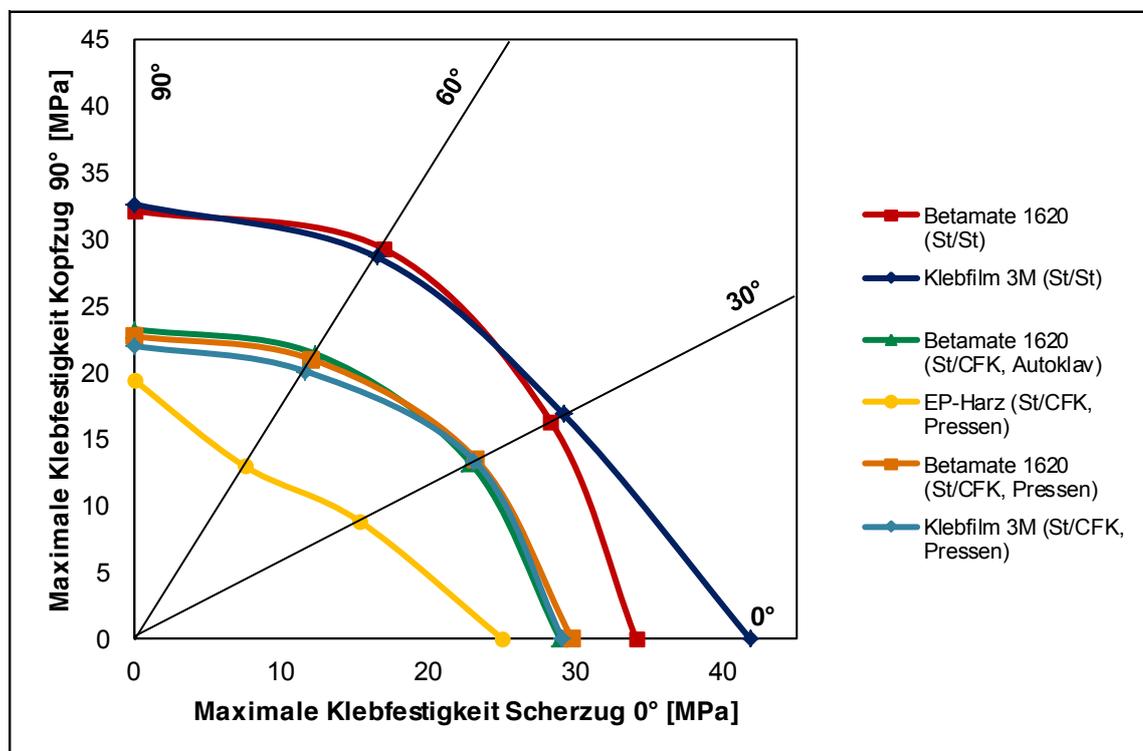


Bild 5.22 Gegenüberstellung der Versagenskurven verschiedener Kopf-/Scherzug-Proben

Die Klebfestigkeit nimmt für die geklebten Proben mit zunehmendem Belastungswinkel ab. Die ermittelten Werte liegen zum Teil über den Herstellerangaben, was z. B. auf

andere Prüfkörpergeometrien mit höheren Steifigkeiten sowie eine andere Vorbehandlung der Oberflächen zurückzuführen sein kann. Für starre Fügeteile ergibt sich beispielsweise bei einer Scherzugbeanspruchung über die Überlappungslänge eine gleichmäßige Verformung der Klebschicht, was zu einer reinen Schubspannung führt. Auch die Spannungsverteilung ist über die gesamte Überlappungslänge gleichmäßig. Bei elastischen Fügeteilen bildet sich zusätzlich eine weitere Schubspannungskomponente infolge der elastischen Fügeteilverformung aus. Daraus resultieren ungleichmäßige Klebschichtverformungen. ^[109] Bei den mittels Prepregpressen gefügten Prüfkörpern zeigt sich bei einer Kombination aus Schub- und Zugbeanspruchung ein deutlicher Abfall der Klebfestigkeit. Dabei spielt die nicht vorhandene Optimierung des Matrixharzes hinsichtlich der Klebeigenschaften eine Rolle.

Die Bruchbilder der einzelnen Klebungen weisen verschiedene Charakteristika auf (Bild 5.23). So tritt in fast allen Fällen ein Versagen überwiegend oder ausschließlich in einer Matrixharzschicht auf. Einzige Ausnahme bilden die direkt verpressten Proben. Eine Anpassung der Festigkeitseigenschaften von Matrix und Klebstoff könnte zu einer Verbesserung der Gesamteigenschaften der Klebung führen.

	0°	30°	60°	90°
Betamate 1620 (St/St)				
Klebfilm 3M (St/St)				
Betamate 1620 (St/CFK, Autoklav)				
EP-Harz (St/CFK, Pressen)				
Betamate 1620 (St/CFK, Pressen)				
Klebfilm 3M (St/CFK, Pressen)				

Bild 5.23 Bruchbilder verschiedener Kopf-/Scherzug-Proben unter variierenden Belastungswinkeln

5.3.2.2 Zusammenfassung

Unterschiedliche Belastungswinkel haben verschieden große Auswirkungen auf die Verbindungseigenschaften von Stahl-Stahl- sowie Stahl-FVK-Klebungen. Die Proben mit einer reinen Metall-Klebung erreichen für alle Belastungswinkel die höchsten Kennwerte, wobei sich das jeweilige Versagensverhalten ähnelt. Anders ist dies bei den untersuchten Stahl-FVK-Klebungen. Während bei einer Scherzugbeanspruchung das Versagen in bzw. nahe an der Klebschicht auftrat, wandert der Ort des Versagens mit zunehmendem Belastungswinkel in das FVK-Laminat. Dort treten schließlich bei Kopfzug-Beanspruchung Delaminationen innerhalb einer oder über mehrere Prepreg-Lagen auf. Ein Einfluss verschiedener Herstellungsverfahren auf die Verbindungseigenschaften konnte nicht nachgewiesen werden.

6 Herstellprozess für Hybridbauteile

Im folgenden Kapitel wird der Prozess des Prepregpressens zur Herstellung von Hybridbauteilen genauer betrachtet. Dabei orientiert sich das Vorgehen an ausgewählten Einflussgrößen auf die Bauteilqualität und -eigenschaften (Kapitel 3.3). Anschließend wird der Einfluss verschiedener Prozessparameter, verschiedener geometrischer Merkmale und verschiedener Geometrien dargelegt. Darüber hinaus werden Untersuchungen des Materialverhaltens während des Herstellprozess beschrieben. Weitere Aspekte sind der Vergleich unterschiedlicher Werkzeugkonzepte, die Bauteileigenschaften oder mögliche Herstellungsprozesse für große Serien.

6.1 Einflussgrößen auf die Bauteilqualität und -eigenschaften

Bei FVK- und Hybridbauteilen gibt es eine Vielzahl von Einflussgrößen auf die Bauteilqualität und -eigenschaften. Anders als bei metallischen Werkstoffen müssen beispielsweise Kennwerte jeweils für eine ganz bestimmte Konfiguration ermittelt werden, z. B. für ein bestimmtes Matrixsystem in Verbindung mit einem bestimmten Fasertyp in zuvor definierter Ausrichtung, welches mit einem spezifischen Verfahren weiterverarbeitet wurde. Zudem sind die potentiellen Fehlerquellen beim Prepregpressen vielschichtiger als z. B. beim Autoklavverfahren. Bei beiden können aufgrund des identischen Halbzeugs verschiedene Garn-, Gewebe- oder Prepregfehler auftreten. ^[236N] Bei Autoklavverfahren und dem Tape-Ablegen kann es jedoch i. d. R. lediglich zu Fehlern bei der Matrixdurchtränkung kommen. Erfolgt die Konsolidierung des Prepregs in einer Presse, kann dies in Fehlern durch Quetschfließen resultieren. Wird zusätzlich noch die Umformung in einer Presse realisiert, ist auch interlaminares Gleiten und Schubgleiten eine mögliche Fehlerquelle.

Die Einflussgrößen auf die Bauteilqualität und -eigenschaften von prepreggepressten Bauteilen reichen von den Prozessparametern über die Geometrie und Geometriemerkmale sowie das Materialverhalten bis hin zu geeigneten Werkzeugkonzepten und der Bestimmung der Bauteileigenschaften. Darüber hinaus gilt es Aspekte eines späteren Fertigungsprozesses fortlaufend zu beachten. Auch der Entwicklungsprozess weist eine höhere Komplexität auf als bei Strukturen aus einem homogenen Werkstoff (Bild 6.1). Die im Folgenden beschriebenen Untersuchungen orientieren sich an diesen Aspekten.

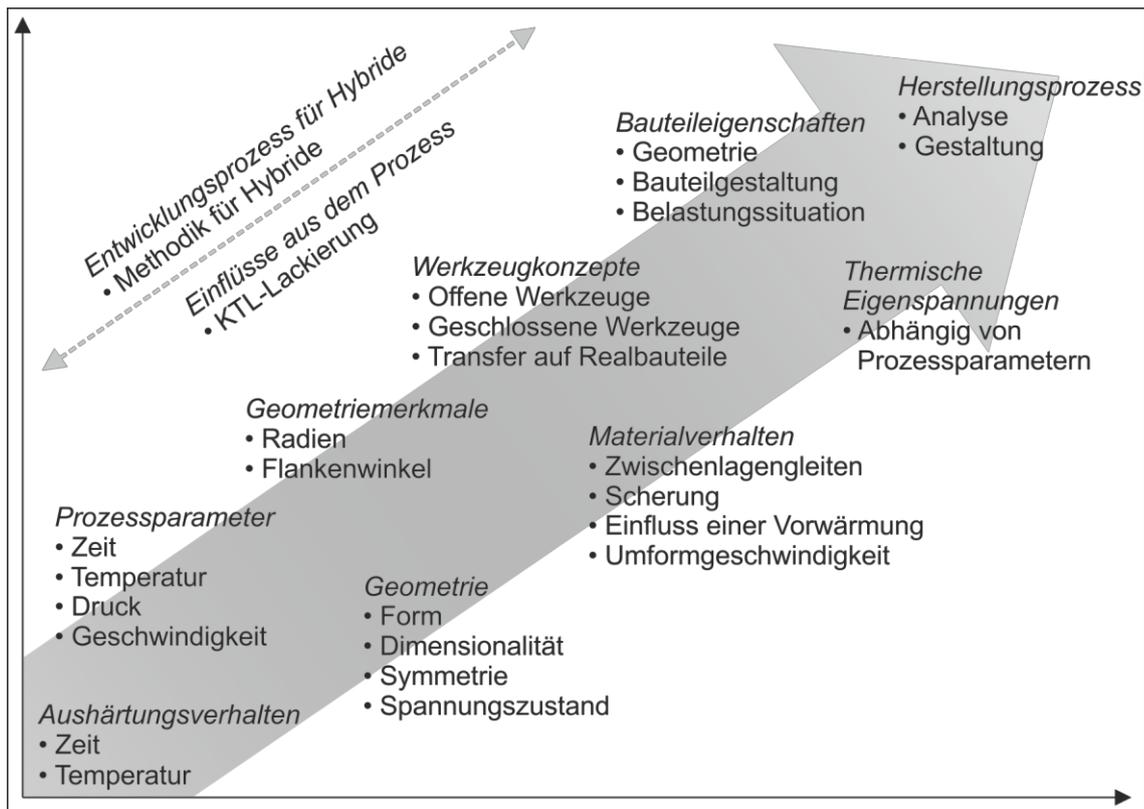


Bild 6.1 Ausgewählte relevante Einflussgrößen auf prepeggepresste Bauteile und deren Entwicklungsprozess

6.2 Aushärtungsverhalten

Das Aushärtungsverhalten des Epoxidharzes bzw. der Prepregs ist ein wesentlicher Bestandteil der Herstellung von Hybridbauteilen. Im Folgenden werden die Herstellerangaben sowie die Reaktionsgeschwindigkeit-Temperatur(RGT)-Regel nach ARRHENIUS als Grundlage herangezogen und die Ergebnisse von dynamischen Differenzkalorimetrien (DDK) erläutert. Nach Untersuchungen zur Temperaturentwicklung in den Prepregs in Kapitel 6.2.3 folgt in Kapitel 6.3 hierauf aufbauend eine Betrachtung der Prozessparameter für das Prepregpressen.

6.2.1 Herstellerangaben und RGT-Regel

Den Ausgangspunkt für die Untersuchung der Prozessparameter bildeten die Herstellerangaben für das verwendete Epoxidharz der Firma SGL vom Typ E201, die mithilfe der RGT-Regel variiert wurden. Aus der RGT-Regel folgt, dass eine Temperaturerhöhung um 10 K die Reaktionsgeschwindigkeit in den für Härtungsvorgänge relevanten Temperaturbereichen näherungsweise verdoppelt. ^[152] Die herstellerseitig für Harzsystem E201 empfohlenen Aushärtetemperaturen liegen zwischen 80 und etwa 160 °C. Zur Erreichung eines möglichst gleichmäßigen Vernetzungsgrades wurden die Angaben für den Aushärtezyklus im Autoklav als Ausgangspunkt für die Parametervariation verwendet. Die Prozessdauer beträgt hier bei einer Temperatur von 130 °C etwa

100 min. ^[168N] Hiervon ausgehend wurden unter Zuhilfenahme der RGT-Regel nach ARRHENIUS die weiteren Aushärtezeiten für unterschiedliche Temperaturen in einem Bereich bis 200 °C abgeschätzt. In Bild 6.2 sind diese Abschätzung sowie die von der Firma SGL ermittelten Umsatzgradkurven dargestellt.

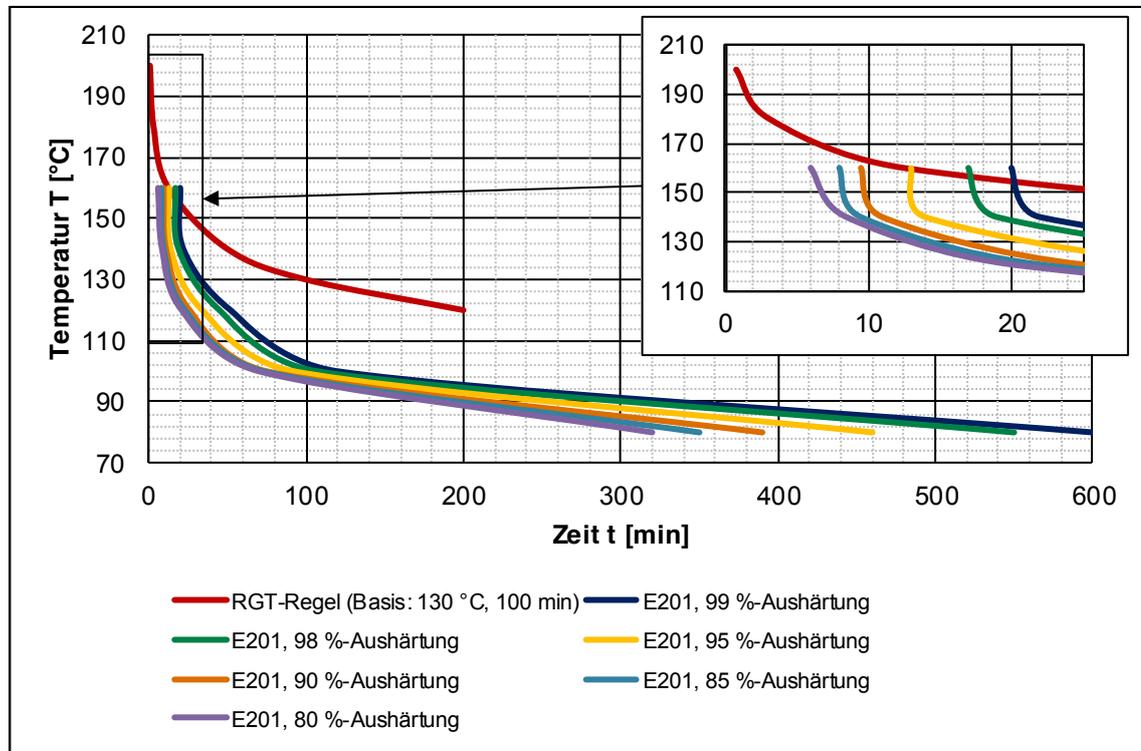


Bild 6.2 Festlegung der Prozessparameter nach der RGT-Regel nach ARRHENIUS sowie dem Härungsverhalten des Matrixharzes SGL E201 nach SGL epo GmbH ^[169N]

Eine 80 %-Aushärtung des reinen Matrixharzes ist bei einer Temperatur von 160 °C nach etwa 8 min erreicht. Eine mehrstufige Aushärtung bestehend aus einer Vor- und einer Nachhärtung ist laut Hersteller ebenfalls möglich. ^[169N] Um die Aushärtungszeit weiter zu senken, besteht bei dem verwendeten Harzsystem die Möglichkeit, die Aushärtetemperatur bis etwa 200 °C zu erhöhen.

6.2.2 Dynamische Differenzkalorimetrie

Um fundierte Erkenntnisse über das Aushärtungsverhalten der verwendeten FVK zu gewinnen, wurde die Dynamische Differenzkalorimetrie (Englisch: Differential Scanning Calometry (DSC)) an dem Epoxid-Matrixharz und den Prepregs angewendet. ^[237S] Dies stellt eine einfache und rasche Methode zur Ermittlung des Härungsgrades dar. ^[86]

Dieses Messverfahren beruht darauf, dass physikalische und chemische Umwandlungsvorgänge von Kunststoffen mit einer Änderung der Wärmemenge bzw. der Energie einhergehen. Bei exothermen Prozessen wird Energie abgegeben, während bei endothermen Prozessen Energie aufgenommen wird. Die resultierenden Wärmeströme werden als Funktion der Zeit oder der Temperatur gemessen. In der Praxis ist hierbei die Änderung der Enthalpie ΔH von Relevanz: ^{[238] [239] [240] [241] [242]}

$$\Delta H = \int c_p dT \quad (6.1)$$

Darin enthalten ist die Temperaturdifferenz dT sowie die spezifische Wärmekapazität c_p bei konstantem Druck. Diese ist ein Maß dafür, wie viel Energie aufgebracht werden muss, um bei 1 g eines Stoffes eine Temperaturerhöhung von 1 K zu erreichen. Die Bestimmung von c_p erfolgt bei der DDK über den Wärmestrom \dot{Q} bezogen auf die Masse m . Dieser ist über die Heizrate ϑ proportional zur spezifischen Wärmekapazität: ^[238]
^{[239] [241]}

$$\frac{\dot{Q}}{m} = \vartheta \cdot c_p \quad (6.2)$$

Die ablaufenden Umwandlungsprozesse können die Enthalpie entweder erhöhen oder erniedrigen. Dabei werden endotherme Vorgänge (Energie wird aufgenommen) positiv und exotherme Vorgänge (Energie wird frei) negativ aufgetragen. Beispiele für endotherme Vorgänge sind das Aufschmelzen, das Verdampfen und der Glasübergang. Durch Kristallisations-, Härtungs- und Zersetzungsvorgänge wird dagegen Energie freigesetzt. Ein Kalorimeter misst die Enthalpie-Änderung über die Abweichung des Wärmestroms von der Basislinie (Bild 6.3). Die Basislinie ist eine Gerade, die durch den Bereich gelegt wird, bei dem die Reaktions- und/oder die Umwandlungswärme den Wert null einnimmt. ^{[91] [98] [238] [239] [240]}

Die DDK-Analyse basiert auf einer vergleichenden Messung der Wärmestromdifferenz zwischen einer Probe des zu untersuchenden Kunststoffes und einer Referenzsubstanz (Bild 6.3). Zu diesem Zweck wird ein Tiegel mit Probenmaterial befüllt (hier: etwa 10 bzw. 20 mg). Ein zweiter Tiegel, der sogenannte Referenztiegel, bleibt für gewöhnlich leer und wird zur Ermittlung des Tiegeleinflusses genutzt. Beide Tiegel bestehen aus dem gleichen Werkstoff (hier: Aluminium). Die Tiegel werden in eine Messzelle eingebracht und zur kontinuierlichen Temperaturmessung auf Metallscheiben mit integrierten Temperatursensoren platziert. Anschließend werden die Proben einem definierten Temperaturprofil unterzogen. Der Ofenraum wird während der Messung kontinuierlich mit Schutzgas (hier: Stickstoff, 20 bis 50 ml/min) gespült, um oxidative Reaktionen zu verhindern. ^{[98] [112] [154] [238] [239] [241] [243] [244N] [245] [246] [247]}

Sind die Wärmeströme von dem Heiz-/Kühlsystem von und zur Probe sowie der Referenz während des Aufheizens bzw. Abkühlens identisch, dann ist keine Temperaturdifferenz vorhanden. Kommt es zu chemischen oder physikalischen Umwandlungsprozessen im Proben Tiegel, ergeben sich durch die Wärmeaufnahme bzw. -abgabe unterschiedliche Wärmeströme und damit Temperaturdifferenzen. Dabei führen die registrierten Temperaturgradienten zu exothermen oder endothermen Peaks in der DDK-Kurve. ^{[238] [239]}

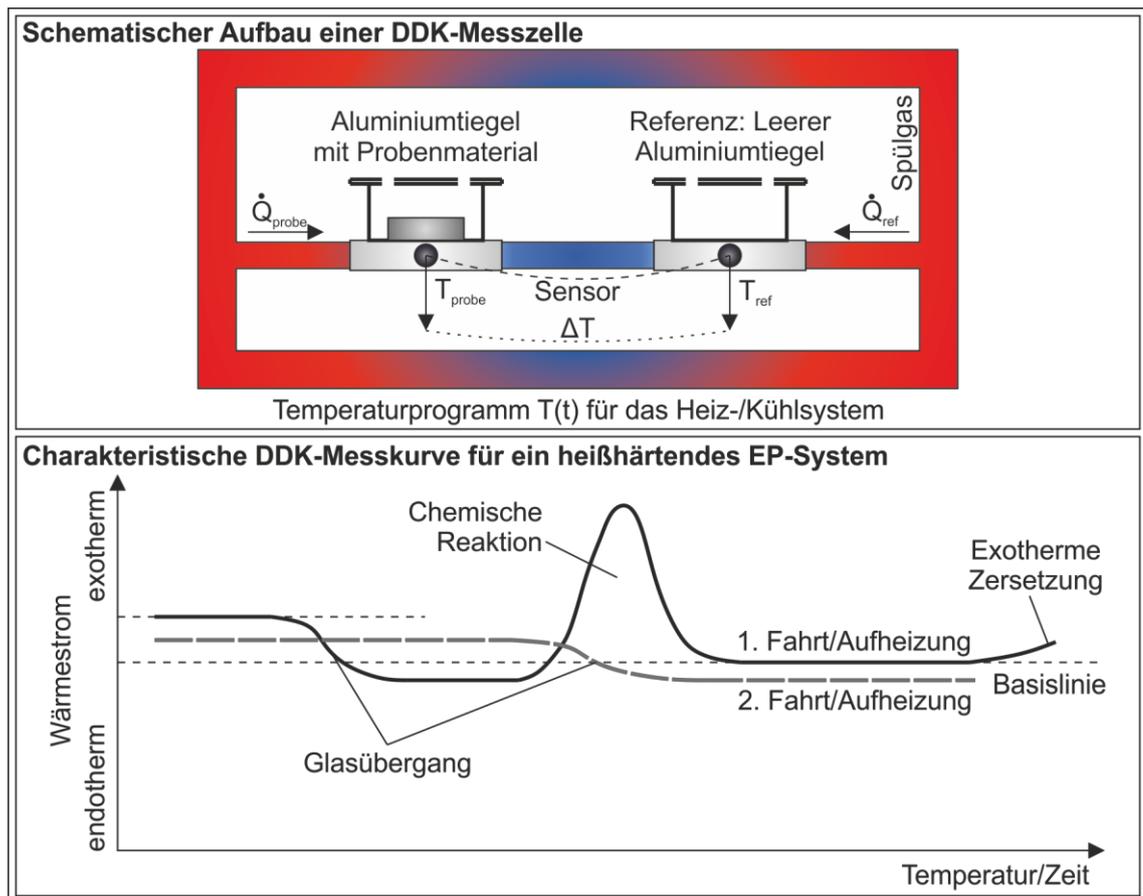


Bild 6.3 Schematischer Aufbau einer DDK-Messzelle sowie charakteristische DDK-Messkurve für ein heißhärtendes Epoxidharz-System

Unter der Annahme gleicher Verlustwärmeströme auf der Proben- und Referenzseite kann die Änderung der Reaktionsenthalpie bzw. des exothermen Wärmestroms wie folgt beschrieben werden: ^[7]

$$\Delta H = \frac{dH}{dt} = \dot{Q}_{exo} = \dot{Q}_{probe} - \dot{Q}_{ref} \quad (6.3)$$

Unter Anwendung des FOURIER'schen Gesetzes kann die Reaktionsenthalpie durch Integration dieser Gleichung über die Reaktionszeit berechnet werden. Zu berücksichtigen sind hierbei der Wärmeleitwiderstand der Wärmeleitstrecke zwischen der Probe bzw. der Referenz und dem DDK-Sensor. Der auf diese Weise berechnete Wert gibt die Enthalpieänderung zwischen zwei Zuständen im interessierenden Bereich an: ^[245]

$$\Delta H = \int \frac{dH}{dt} dt = \int \frac{T_{ref} - T_{probe}}{R} dt \quad (6.4)$$

mit

$$\dot{Q}_{probe} = \frac{T_{sensor} - T_{probe}}{R} \quad (6.5)$$

und

$$\dot{Q}_{ref} = \frac{T_{sensor} - T_{ref}}{R} \quad (6.6)$$

6.2.2.1 Dynamische Temperaturführung

DDK-Analysen mit einer dynamischen Temperaturführung wurden eingesetzt, um Informationen über die ablaufende Härtingsreaktion im Epoxidharz bzw. im Prepreg zu erhalten. Es können der Beginn der Härtingsreaktion, die resultierende Gesamtreaktionsenthalpie sowie der Bereich des Glasübergangs bestimmt werden. Für die Untersuchungen wurden drei Aufheizraten gewählt, die bei DDK-Analysen typischerweise Verwendung finden: 5, 10 und 20 K/min. ^{[112] [238] [242] [244N]} Die Messungen beginnen jeweils bei einer Temperatur von -50 °C. Anschließend wurde die Probe mit der entsprechenden Aufheizrate auf eine Endtemperatur von 250 °C gebracht. Zur Bestimmung des Glasübergangs des ausgehärteten Harzsystems wurde eine zweite Aufheizung durchgeführt. Dazu wurde die bereits ausgehärtete Probe mit einer definierten Abkühlrate von 100 °C/min wieder auf die Starttemperatur gebracht und erneut aufgeheizt.

Die Ergebnisse der DDK-Analysen mit dynamischer Temperaturführung für das Matrixharz und das Prepreg sind in Bild 6.4 dargestellt. Zunächst verlaufen die Kurven im endothermen Bereich, d. h., es wird dem Probenmaterial Energie zugeführt. ^[247] Je nach Aufheizrate und Probe erfolgt ab etwa 120 bis 140 °C ein starker Anstieg des Wärmestroms weit in den exothermen Bereich. Dieser Peak charakterisiert die Enthalpie der Aushärtungsreaktion. Bei der zweiten Aufheizung ist dieser bei keiner der Kurven zu erkennen, was auf eine vollständige Aushärtung des Probenmaterials nach der ersten Aufheizung schließen lässt. Daneben ist der Einfluss der Aufheizrate zu erkennen. ^[112]

Aus diesen Kurven können verschiedene kalorimetrische Kennwerte ermittelt werden (Bild 6.5). ^{[246] [248N]} Neben der Start- und der Peaktemperatur sind die spezifischen Reaktionsenthalpien für die unterschiedlichen Aufheizraten dargestellt. Da die Prepregs einen Matrixharz-Anteil von rund 39 Gew.-% aufweisen und die Kohlenstofffasern für die Reaktion weitgehend inert sind ^{[93] [249]}, wurde zudem die spezifische Reaktionsenthalpie für den jeweiligen realen Matrixharz-Anteil berechnet. Hieraus lässt sich ableiten, dass in den Prepregs eine Voraushärtung von etwa 10 bis 25 % vorliegt. Dies ist die Folge des Herstellungsprozesses von Prepregs, bei dem den Werkstoffen Wärme zugeführt wird. ^[44] Währenddessen erfolgt der Übergang von einem nicht vernetzten Zustand (A-Stage) zu einem leicht vernetzten Zustand mit hoher Viskosität (B-Stage). ^[86] Zu erkennen ist ferner der Einfluss der Aufheizrate auf die Start- und Peaktemperaturen sowie die Reaktionsenthalpien. Die Verminderung der spezifischen Reaktionsenthalpie kann eine Folge veränderter Aushärtungsmechanismen bei beschleunigter Aushärtung sein. Hierdurch kann es zu einer teilweisen Homopolymerisation der Harze kommen. Daneben kann es durch sterische Hinderungen auch zu einer Abschirmung funktioneller Gruppen kommen, wodurch die Reaktion beeinflusst wird. ^[245]

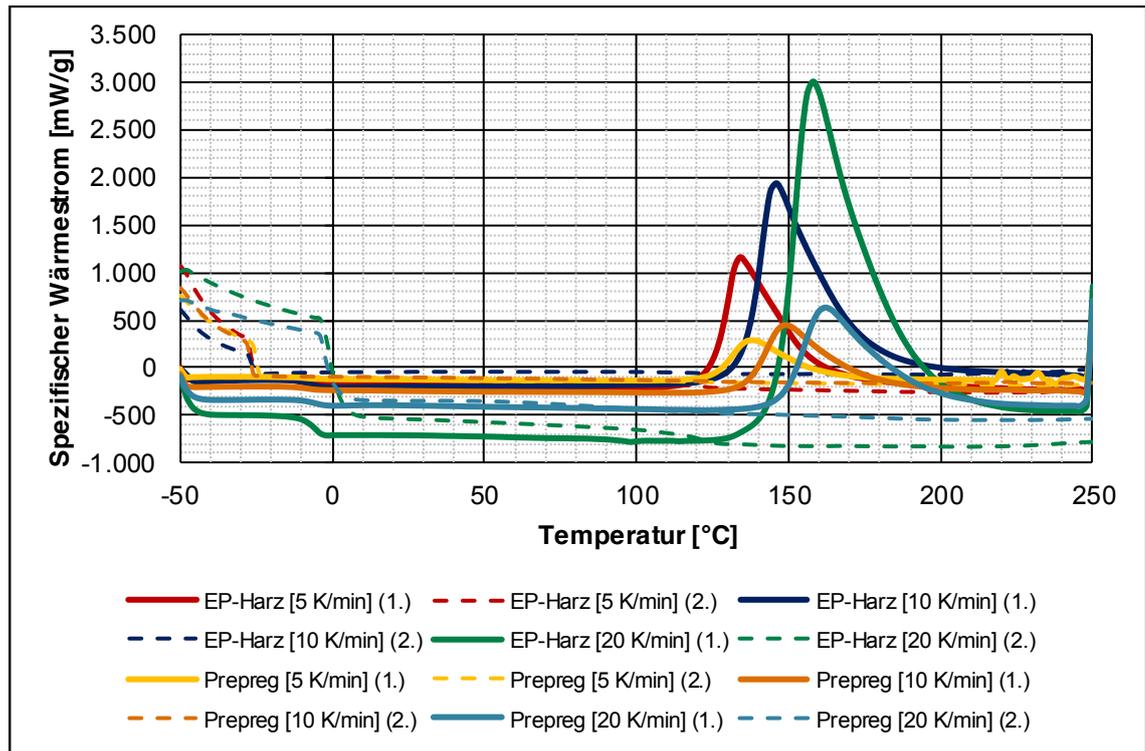


Bild 6.4 Ergebnisse der dynamischen DDK-Analysen an Matrixharz und Prepreg für unterschiedliche Aufheizraten

	Starttemperatur [°C]	Peaktemperatur [°C]	Spezifische Reaktionsenthalpie [J/g]	Spezifische Reaktionsenthalpie [%]	Spezifische Reaktionsenthalpie EP [J/g]	Spezifische Reaktionsenthalpie EP/Prepreg-Harz [%]
EP-Harz						
5 K/min	125	134	404	100	-	-
10 K/min	136	146	325	81	-	-
20 K/min	146	158	315	78	-	-
Prepreg						
5 K/min	125	138	121	100	310	77
10 K/min	136	149	113	93	289	89
20 K/min	148	162	95	79	245	78

Bild 6.5 Kalorimetrische Kennwerte der untersuchten Werkstoffe

Die Glasübergangstemperaturen für die jeweiligen Aufheizraten und Proben wurden mithilfe des Mittelpunktverfahrens bestimmt. ^[86] ^[248N] Für die ausgehärteten Proben schwanken diese zwischen etwa 118 und 123 °C und entsprechen damit den Herstel-

lerangaben. ^[196N] Für die nicht ausgehärteten Materialien liegen die Glasübergangstemperaturen für das Matrixharz und das Prepreg zwischen -6 und -10 °C. Die Glasübergangstemperatur spielt in der Faserverbundtechnik beispielsweise für die Nachhärtung eine besondere Rolle. Liegt die Härtingsreaktion über dieser Temperatur, läuft die Reaktion sehr rasch ab, da Umlagerungen von Makromolekülen begünstigt werden. Die Nachhärtung bzw. das Tempern wird genutzt, um einen möglichst hohen Vernetzungsgrad zu erreichen. ^[86]

6.2.2.2 Isotherme und quasi-isotherme Temperaturführung

Die während eines realen Prepreg-Pressvorganges vorherrschenden thermischen Bedingungen lassen sich durch DDK-Analysen mit isothermer Temperaturführung simulieren. ^[250] Hierbei wurde die Messzelle auf eine zuvor definierte Temperatur vorgeheizt. ^[251] Hiernach wurden der Proben- und der Referenztiegel eingebracht und die Messung gestartet. Dieser Vorgang erfolgte automatisiert. Die Messung des Wärmestroms startet erst, wenn der Probentiegel auf dem Temperaturfühler platziert wurde. Bei höheren Temperaturen erfahren die Proben daher bereits eine Voraushärtung von wenigen Sekunden. Aus diesem Grund konnten die isothermen Messungen nur bis zu einer Temperatur von 160 °C durchgeführt werden. Bild 6.6 zeigt für diese Temperatur für das Matrixharz und das Prepreg jeweils die erste und zweite Aufheizung. Die Kurvenverläufe sind zu Beginn durch einen deutlichen exothermen Peak charakterisiert. Anschließend nähern sich die Kurven der Abszisse an. ^[252] Bei höheren Temperaturen lagen die Peaks bereits vor der Aufzeichnung der Messung vor.

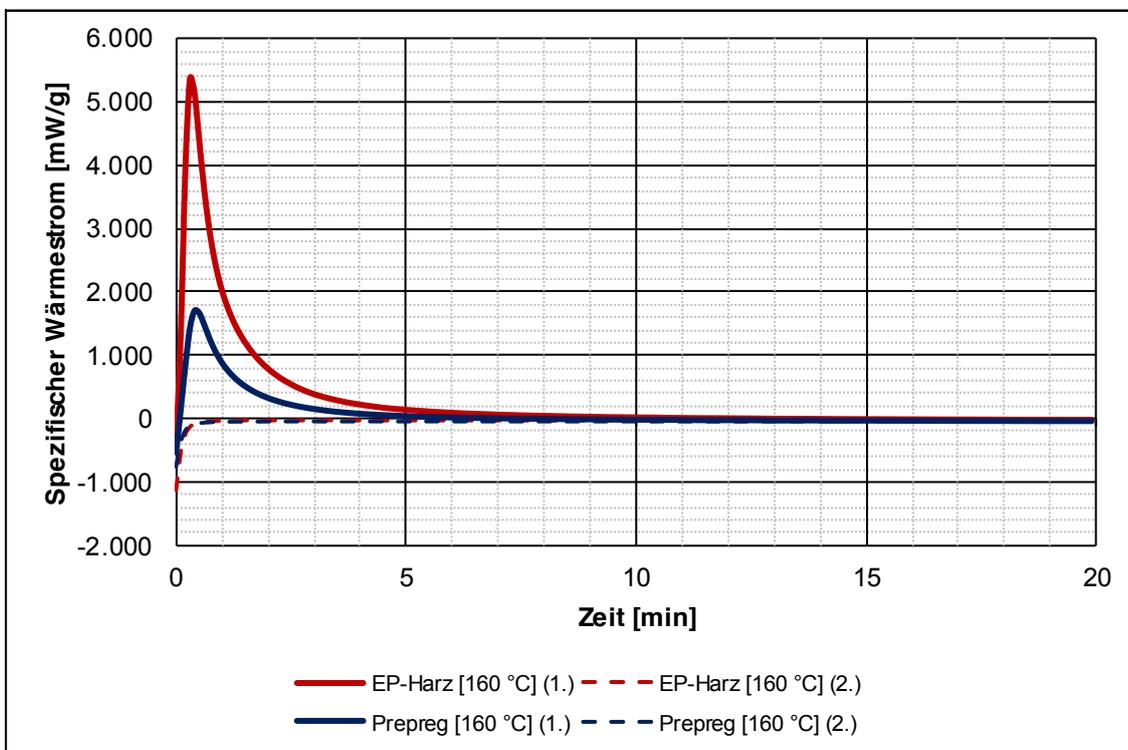


Bild 6.6 Ergebnisse der isothermen DDK-Analysen an Matrixharz und Prepreg für eine Temperatur von 160 °C

Hieraus kann die spezifische Reaktionsenthalpie berechnet werden. Diese liegt für das Harzsystem bei 350 J/g und für das Prepreg bei 125 J/g. Damit liegen diese Werte im Bereich der dynamischen DDK-Analysen (Bild 6.5).

Bei dem Prozess des Prepregpressens werden jedoch möglichst kurze Zykluszeiten angestrebt, was höhere Aushärtungstemperaturen bedingt. Da mit den zur Verfügung stehenden Anlagen höhere isotherme Temperaturen nicht realisiert werden konnten, wurden die entsprechenden Messungen quasi-isotherm durchgeführt.^[250] Die Messungen starteten bei 0 °C. Anschließend erfolgte eine Aufheizung mit einer möglichst hohen Aufheizrate. Bei dem verwendeten Messsystem lag die maximale Aufheizrate, bei der noch kein Überschwingen in der Messung vorlag, bei 50 °C/min. Diese quasi-isothermen Messungen wurden für die Temperaturen 160, 180 und 200 °C durchgeführt. Nach dem Erreichen der jeweiligen Temperatur erfolgte eine 15-minütige isotherme Haltephase. Zur Bestimmung des Reaktionspeaks bzw. des Aushärtegrades wird eine Basislinie benötigt. Diese wurde durch eine zweite Aufheizung der ausgehärteten Probe mit identischem Temperaturprogramm gewonnen. Dazu wird die Probe nach der isothermen Phase mit einer Abkühlrate von 100 °C/min auf Raumtemperatur (Ausgangszustand) abgekühlt sowie anschließend wieder mit einer Aufheizrate von 50 °C/min auf die jeweilige Temperatur aufgeheizt und isotherm gehalten.^[245] Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in Bild 6.7 dargestellt.

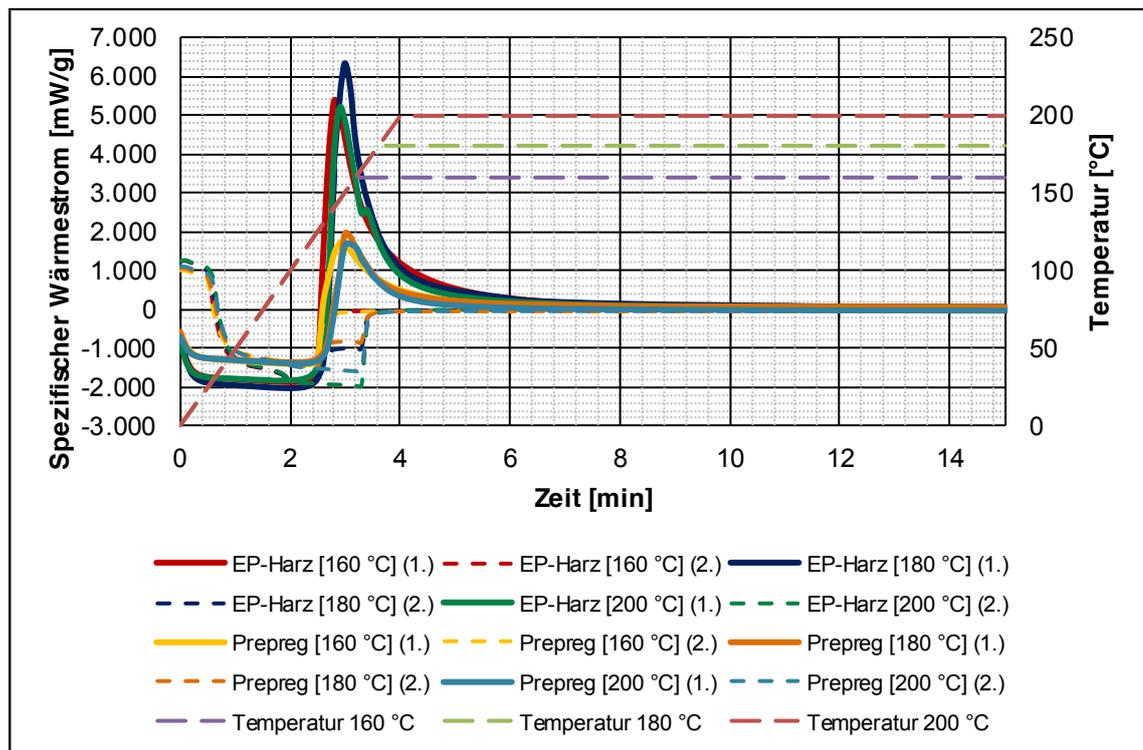


Bild 6.7 Ergebnisse der quasi-isothermen DDK-Analysen an Matrixharz und Prepreg

Aus diesen DDK-Kurven wurden die jeweiligen Reaktionsenthalpien bestimmt (Bild 6.8). Die spezifischen Reaktionsenthalpien sinken mit steigender Aufheizrate und Haltezeittemperatur.^[245] Die Werte für die isothermen und die quasi-isothermen DDK-Analysen stimmen sehr gut überein.

	Spezifische Reaktionsenthalpie [J/g]	Spezifische Reaktionsenthalpie [%]	Spezifische Reaktionsenthalpie EP [J/g]	Spezifische Reaktionsenthalpie EP/Prepreg-Harz [%]
EP-Harz				
5 K/min	404	100	-	-
10 K/min	325	81	-	-
20 K/min	315	78	-	-
50 K/min (160 °C)	350	88	-	-
50 K/min (180 °C)	328	81	-	-
50 K/min (200 °C)	298	74	-	-
Isotherm (160 °C)	350	88	-	-
Prepreg				
5 K/min	121	100	310	77
10 K/min	113	93	289	89
20 K/min	95	79	245	78
50 K/min (160 °C)	125	103	313	89
50 K/min (180 °C)	117	97	293	89
50 K/min (200 °C)	86	71	215	72
Isotherm (160 °C)	125	103	311	89

Bild 6.8 Ergebnisse der dynamischen, quasi-isothermen und isothermen DDK-Analysen an Matrixharz und Prepreg

Diese Ergebnisse lassen sich auch in ein Umsatzgrad-Zeit-Diagramm überführen. ^[251] Hierzu wird die zu einem bestimmten Zeitpunkt erreichte Reaktionsenthalpie ins Verhältnis zur gesamten Reaktionsenthalpie gesetzt (Bild 6.9). Betrachtet wird hierbei nur der exotherme Bereich der Reaktion. Zu Beginn der Reaktion wird der größte Umsatzgradzuwachs verzeichnet. Eine höhere Temperatur resultiert in einer beschleunigten Reaktion. ^{[102] [112] [252]} Beispielsweise wird ein Umsatzgrad von 80 % im Epoxid-Harz bei 160 °C nach etwa 195 s erreicht, während bei einer Temperatur von 200 °C lediglich ca. 145 s benötigt werden. Das Erreichen eines Umsatzgrades von annähernd 100 % beträgt knapp über 20 min bei 160 °C bzw. knapp 16 min bei 200 °C. Die Werte für eine vollständige Aushärtung bei 160 °C stimmen sehr gut mit den Herstellerangaben überein (Kapitel 6.2.1). ^[169N] Die übrigen Umsatzgrade werden rascher erreicht. Bezogen auf den realen Prepreg-Press-Prozess können bereits nach kürzeren Zeiten höhere Umsatzgrade erreicht werden als hier ermittelt, da z. B. eine deutlich höhere Aufheizrate (Kapitel 6.2.3) vorhanden ist und ein Druck überlagert wird. Die Einlaufphase zu Beginn wie in Bild 6.9 ist dann nicht so deutlich ausgeprägt und der Wärmeübergang wird begünstigt.

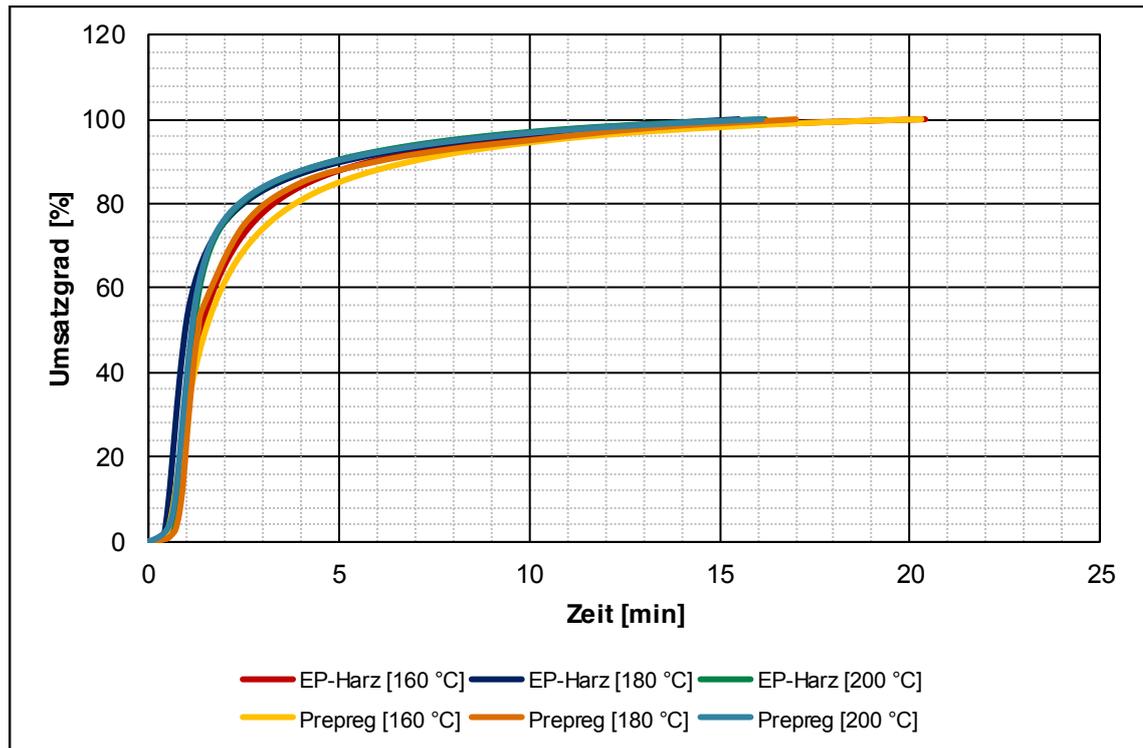


Bild 6.9 Umsatzgrad-Zeit-Diagramm für Matrixharz und Prepreg bei verschiedenen Temperaturen

Während des Herstellungsprozesses eines hybriden automobilen Strukturbauteils erfährt das Prepreg nicht nur eine Erwärmung im geschlossenen Werkzeug, sondern zusätzlich noch eine Nachhärtung durch eine kathodische Tauchlackierung. Um diesen Prozess nachzubilden, wurden in einem weiteren Schritt entsprechende Temperaturprofile definiert. ^[253] Von einer Starttemperatur von 0 °C wurden die Proben zunächst mit einer Aufheizrate von 20 K/min auf eine definierte Haltetemperatur gebracht. Diese entsprach der Temperatur des Werkzeugs und wurde für jeweils 60 s gehalten. Nach einer Abkühlung auf Raumtemperatur (20 °C) mit einer Abkühlrate von 20 K/min wurden die Proben wiederum mit 20 K/min auf die Haltetemperatur aufgeheizt. Hierbei spiegelt die Haltetemperatur die eingebrachte Wärme während der Tauchlackierung wider. Die Ergebnisse sind in Bild 6.10 dargestellt. Die gewählten Aufheizraten liegen um einen Faktor 15 bis 25 unter den real ermittelten Werten (Kapitel 6.2.3).

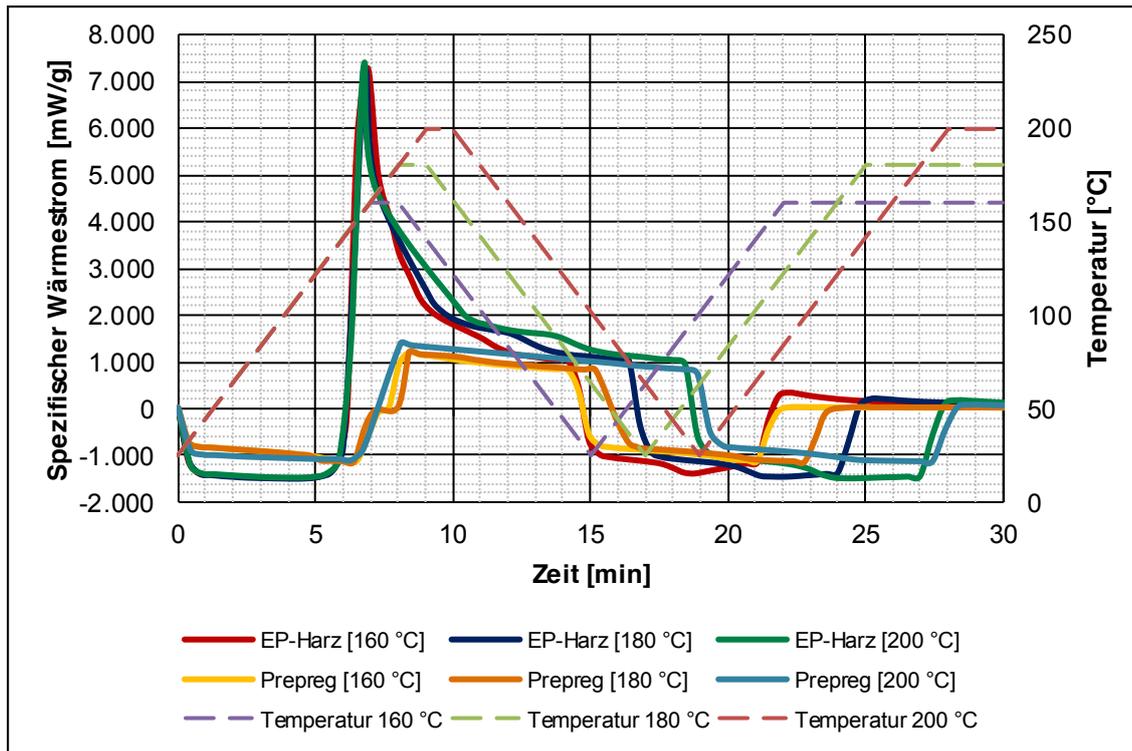


Bild 6.10 Ergebnisse der dem realen Prepreg-Pressprozess nachempfundenen Prozessführung

Der überwiegende Anteil der Reaktion findet während der ersten Aufheizung statt. Bereits nach einer Gesamtzeit von 30 min liegt bei den einzelnen Proben kein exothermer Wärmestrom mehr vor. Die spezifischen Reaktionsenthalpien der Prepreg-Proben liegen auf dem Niveau der isothermen Messungen und der Referenzuntersuchungen (Bild 6.11). Damit ist von einer abgeschlossenen Reaktion und einer vollständigen Aushärtung des Prepregs auszugehen. Die Werte für das reine Matrixharz liegen etwas unter den isothermen Messungen und den Referenzmessungen. Da jedoch kein weiterer exothermer Wärmestrom messbar war, liegt auch in diesem Fall eine vollständige Aushärtung vor.

	Spezifische Reaktionsenthalpie [J/g]	Spezifische Reaktionsenthalpie [%]	Spezifische Reaktionsenthalpie EP [J/g]	Spezifische Reaktionsenthalpie EP/Prepreg-Harz [%]
EP-Harz				
Isotherm, 20 K/min (Referenz)	315	100	-	-
Isotherm, 20 K/min (160 °C)	364	116	-	-
Isotherm, 20 K/min (180 °C)	326	104	-	-
Isotherm, 20 K/min (200 °C)	298	95	-	-
Real, ± 20 K/min (160 °C)	288	91	-	-
Real, ± 20 K/min (180 °C)	281	89	-	-
Real, ± 20 K/min (200 °C)	275	87	-	-
Prepreg				
Isotherm, 20 K/min (Referenz)	95	100	245	78
Isotherm, 20 K/min (160 °C)	148	156	370	102
Isotherm, 20 K/min (180 °C)	133	140	333	102
Isotherm, 20 K/min (200 °C)	115	121	288	97
Real, ± 20 K/min (160 °C)	128	135	320	111
Real, ± 20 K/min (180 °C)	123	129	308	110
Real, ± 20 K/min (200 °C)	129	136	323	122

Bild 6.11 Ergebnisse der quasi-isothermen und realen DDK-Analysen an Matrixharz und Prepreg

6.2.3 Temperaturlausbreitung im Prepreg

Beim Prepregpressen wird ein umgeformtes Prepreg zwischen zwei beheizten Werkzeugoberflächen ausgehärtet. Insbesondere für dickere Laminataufbauten ist zur Realisierung niedriger Taktzeiten eine Kenntnis über die reale Temperaturlausbreitung in Dickenrichtung über die Zeit notwendig. Zudem lassen sich hieraus Erkenntnisse über den Aushärtungszustand des Epoxidharzes ableiten.

Hierfür wurden unterschiedliche Prepregstapel mit den Abmaßen 50 x 50 mm präpariert. Der Lagenaufbau war symmetrisch, wobei die Lagen jeweils um 90° versetzt geschichtet wurden. Für die im Folgenden dargestellten Ergebnisse wurde ein neunlagiges Prepreg mit dem Aufbau (0/90/0/90/0/90/0/90/0)° sowie ein 45-lagiges Prepreg mit entsprechendem Aufbau verwendet. Zwischen die Prepreglagen wurden bei jedem Stapel jeweils acht NiCrNi-Thermoelemente symmetrisch eingebracht. Bei dem neunlagigen Laminataufbau ergab sich folgende Schichtreihenfolge: (0/T₁/90/T₂/0/T₃/90/T₄/0/T₅/90/T₆/0/T₇/90/T₈/0)°. Für den 45-lagigen Aufbau wurden je-

weils Thermoelemente unter die äußeren Schichten sowie um die mittlere Lage platziert. Die restlichen Thermoelemente wurden gleichmäßig über die übrigen Schichten verteilt. Die Datenaufzeichnung erfolgte mit einem Datenlogger. Bei den Versuchen wurden die Proben nach der Vorbereitung zwischen die vorgeheizten Werkzeughälften eines Plattenwerkzeugs gelegt und mit einem gleichbleibenden Druck von $p = 0,3 \text{ N/mm}^2$ verpresst.

Für den neunlagigen Laminataufbau sind die Temperatur-Zeit-Verläufe in Bild 6.12 dargestellt. Nach dem Einlegen des Prepregstapels in das auf $190 \text{ }^\circ\text{C}$ beheizte Werkzeug steigt die Temperatur binnen 30 s auf deutlich über $190 \text{ }^\circ\text{C}$ an. Das Temperaturmaximum von knapp $200 \text{ }^\circ\text{C}$ wird nach ca. 40 s erreicht. Es liegen hierbei Aufheizraten von etwa 400 K/min vor. Das Überschwingen der Temperatur über den eingestellten Sollwert ist auf die exotherme Reaktion des Epoxidharzes zurückzuführen. Anschließend sinkt die Temperatur wiederum ab und nähert sich der Temperatur der Werkzeugoberfläche an. Nach etwa 70 s weisen alle Thermoelemente eine konstante Temperatur auf, die der Temperatur auf der Werkzeugoberfläche entspricht. Ein Unterschied der gemessenen Temperaturen der einzelnen Thermoelemente ist lediglich zu Beginn festzustellen. Ab einer Zeit von 10 s und einer Temperatur von etwa $40 \text{ }^\circ\text{C}$ liegen die Kurven jedoch mit sehr guter Übereinstimmung übereinander.

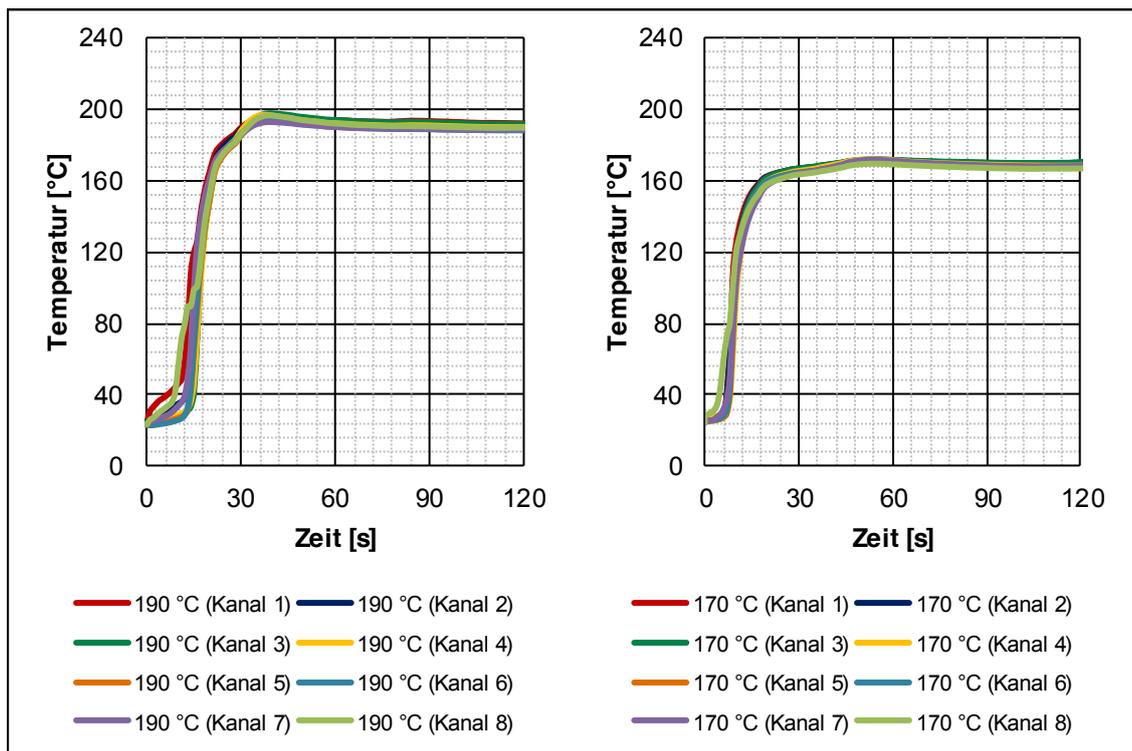


Bild 6.12 *Temperaturausbreitung in 9-lagigem Prepreg*

Bei einer Temperatur von $170 \text{ }^\circ\text{C}$ ist ebenfalls ein sehr zügiger Anstieg der Temperatur durch das gesamte Prepreg festzustellen. Die Unterschiede zu Beginn der Aufheizung sind nur marginal. Nach etwa 20 s ist an allen Thermoelementen die eingestellte Temperatur von $170 \text{ }^\circ\text{C}$ erreicht. Auch in diesem Fall kommt es zu einem Überschwingen. Die Maximaltemperatur von fast $180 \text{ }^\circ\text{C}$ konnte nach 50 s festgestellt werden, was ei-

ner Aufheizrate von rund 200 K/min entspricht. Anschließend nähern sich auch hier die Kurvenverläufe einem niedrigeren, konstanten Wert an.

Nach dem geringen Einfluss der Prepregdicke des neunlagigen Aufbaus auf die Temperaturentwicklung wurden weitere Proben präpariert. Die maximale Lagenanzahl bei den Untersuchungen waren 45 Schichten. Auch in diesem Fall wurden Temperatur-Zeit-Verläufe ermittelt (Bild 6.13). Die eingestellte Werkzeugtemperatur von 190 °C wurde hier erst nach ca. 100 s in allen Prepreglagen gemessen (Aufheizrate: ca. 100 K/min). Während sich die äußeren Prepreglagen sehr schnell aufheizen, dauert dies wie zu erwarten bei den mittleren Lagen deutlich länger. Zudem ist ein deutlich stärker ausgeprägtes Überschwingen im Inneren des Prepregs zu beobachten. Die Maximaltemperatur beträgt hier ca. 220 °C nach 115 s. Anschließend fällt die Temperatur langsam auf ein konstantes Niveau ab. In den äußeren Lagen ist quasi keine Überhöhung zu erkennen. Hier weicht allerdings auch der Kurvenverlauf bis zum Erreichen der Solltemperatur maßgeblich von den übrigen Temperaturfühlern ab. Daraus kann abgeleitet werden, dass die Härtingsreaktion zu diesem Zeitpunkt bereits abgeschlossen ist. Das Prepreg härtet somit deutlich erkennbar von außen nach innen aus.

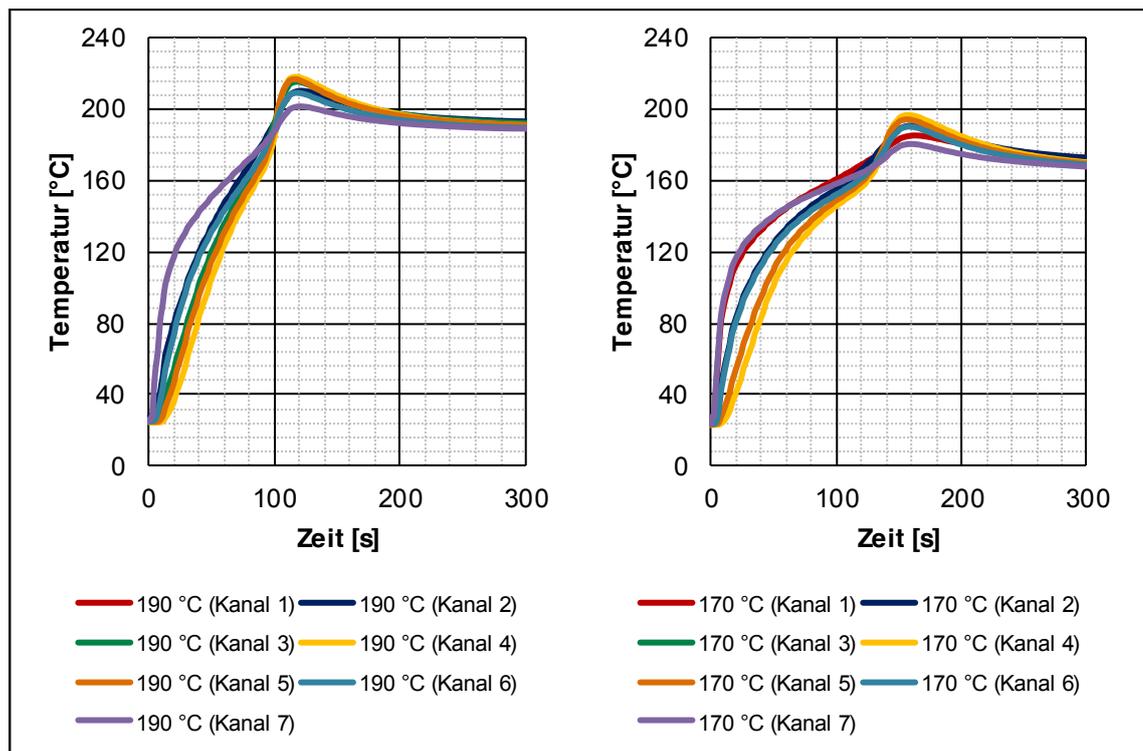


Bild 6.13 Temperaturentwicklung in 45-lagigem Prepreg

Einen vergleichbaren Verlauf weisen auch die für eine Werkzeugtemperatur von 170 °C ermittelten Kurven auf. Die Darstellung ist wiederum um 100 s verschoben. Dabei ist auffällig, dass die äußeren Lagen sich zunächst rasch aufheizen. Die Temperatur von 170 °C erreichen sämtliche Lagen jedoch erst nach ca. 130 s, was zu einer Aufheizrate von etwa 75 K/min führt. Die bei dem Überschwingen auftretende Maximaltemperatur beträgt im Inneren des Prepregs bis zu 200 °C. Abschließend nähert sich der Kurvenverlauf wiederum langsam einem gleichmäßigen Niveau an.

Die ermittelten Kurvenverläufe sind aus der Literatur bekannt. Mit Beginn der Aufheizung zum Zeitpunkt t_0 startet auch die Fließzeit des Harzes. Während dieser Zeit kann das Harz aufgrund einer Verringerung der Viskosität frei fließen. Ist zu dem Zeitpunkt t_{wp} , dem sogenannten Gelierpunkt, die Anspringtemperatur des Härters erreicht, wird die exotherme Vernetzungsreaktion eingeleitet. Aufgrund der damit verbundenen Viskositätserhöhung sollten zu diesem Zeitpunkt alle Verformungs- und Fließvorgänge im Werkzeug abgeschlossen sein. Die gesamte Verarbeitungszeit wird auch als Topfzeit bezeichnet. Während der Vernetzungsreaktion ist eine Differenz zwischen der Temperaturkurve und der Aufheizkurve zu beobachten, die zum Zeitpunkt t_{Tm} das Maximum erreicht und die exotherme Reaktion darstellt. Bei diesem Maximum liegt eine Vernetzung von etwa 95 % vor. Nach der Durchschreitung dieses Temperaturmaximums ist der Härteprozess abgeschlossen. Die Presse kann geöffnet und das fertige Bauteil aus dem Werkzeug entnommen werden. ^{[44] [73] [83] [95] [101] [121] [129] [254N] [255] [256N]}

Für den Prozess des Prepregpressens bedeutet dies, dass z. B. bei einer Werkzeugtemperatur von 190 °C und einem 9-lagigen Prepreg-Aufbau die Reaktion bereits nach ca. 40 bis 50 s weitestgehend abgeschlossen ist. Die ermittelte Zeit an einem 9-lagigen Prepreg für eine 95 %-Aushärtung liegt bei etwa 60 bis 90 s. Laut Herstellerangaben wird für eine 95 %-Aushärtung des Matrixharzes bei einer Temperatur von 160 °C eine Aushärtedauer von 13 min angegeben. Aus den DDK-Analysen ergaben sich Aushärtezeiten von ca. 120 bis 180 s bei 180 °C für das Prepregmaterial. Ein Grund für die unterschiedlichen Werte ist in den verschiedenen Aufheizraten zu sehen, die einen starken Einfluss auf die Reaktion haben.

6.3 Untersuchung der Prozessparameter

Aufbauend auf den Untersuchungen zur Qualifikation des Prepregpressens (Kapitel 5) sowie den Untersuchungen zum Aushärtungsverhalten des Epoxidharzes bzw. des Prepregs (Kapitel 6.2) werden im vorliegenden Kapitel die Prozessparameter für das Prepregpressen untersucht. Ziel war es, die optimalen Prozessparameter für das Prepregpressen der verwendeten Halbzeuge zu bestimmen. Dabei wurde versucht, die Untersuchungen möglich seriennah zu gestalten und am realen Prozessablauf zu orientieren. Das Hauptaugenmerk liegt auf der Zeit, dem Druck, der Temperatur sowie der Kombinationen dieser Parameter.

Für die Untersuchungen wurden im ersten Schritt jeweils Referenzstrukturen mit zuvor definierten Parametern hergestellt. Neben Prüfplatten wurden hierfür auch Hutprofilstrukturen (Kapitel 6.4.1) genutzt. ^{[257S] [258S] [259S] [260S]} Der gewählte Hutprofilquerschnitt findet sich in verschiedenen strukturellen Automobilbauteilen wieder und ermöglicht somit eine Extrapolation der Ergebnisse auf unterschiedlichste Komponenten. Aus den hergestellten Strukturen wurden Proben nach einem zuvor definierten Entnahmeschema herausgetrennt, einer Dreipunkt-Biegeprüfung nach DIN 14125 unterzogen und analysiert (Bild 6.14). ^{[189N] [195S]} Für die Untersuchungen wurde der definierte 9-lagige Prepregaufbau verwendet. Die Biegeprüfung ermöglichte an dieser Stelle eine unkomplizierte Versuchsdurchführung und eine Belastungssituation, die vielen realen Struktu-

ren näherkommt als z. B. ein Zugversuch. Für die Untersuchungen der Prozessparameter dienen die Randfaserdehnung sowie die Randfaserdehnung als Vergleichskriterium, da hierdurch die höchste Werkstoffbeanspruchung abgebildet werden konnte.

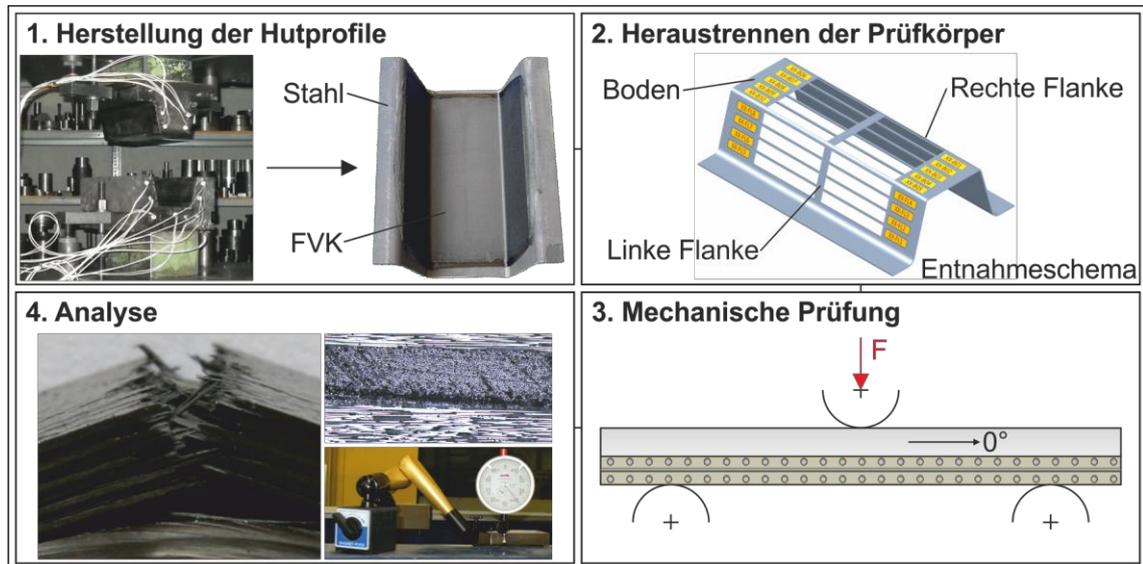


Bild 6.14 Vorgehen bei der Untersuchung der Prozessparameter

6.3.1 Konsolidierungszeit

Als maßgebender Prozessparameter für großserientaugliche Prozesse wurde zunächst die Konsolidierungszeit näher untersucht. Im Folgenden dargestellt sind die Ergebnisse aus Dreipunkt-Biegeversuchen für Zeiten zwischen 30 und 1500 s, für eine Temperatur von 180 °C und für einen Druck von 0,3 N/mm² (Kapitel 4.1.1 und 5.2) bei einer Blechdicke von 2,0 mm S235JR (Bild 6.15).^[261]

Der Grad der Aushärtung der Prepregs kann bereits nach dem Pressvorgang beurteilt werden. Eine unzureichende Aushärtung äußert sich in schlechten Oberflächen, einer hohen Nachgiebigkeit des Werkstoffs sowie einem nicht spröden Materialversagen. Zudem können Rückschlüsse aus der Bearbeitung gezogen werden. Die Gelierung, d. h. die Beendigung der Topfzeit und möglicher Fließvorgänge, findet bei Epoxidharzen üblicherweise ab einem Umsatzgrad von 50 bis 70 % statt.^[86]

Aus dem Diagramm ist ersichtlich, dass etwa ab einer Voraushärtungszeit von 90 s eine ausreichende Grundvernetzung des Prepregs stattgefunden hat. Ab dieser Zeit variieren für die gewählte Temperatur und den gewählten Pressdruck die maximale Biegespannung und die Dehnung der Randfaser nur noch leicht. Bei geringeren Zeiten liegt keine ausreichende Vernetzung des Matrixharzes nach der Voraushärtung vor. Dadurch kann es zu weiteren chemischen Reaktionen (Polyaddition) in dem nachgeschalteten, simulierten KTL-Prozess^[164] kommen, die Volumenschwindungen nach sich ziehen. Dies kann zu Poren im Laminat führen, da kein Druck anliegt, der ein gegebenenfalls noch mögliches Nachfließen des Harzes zur Füllung der Poren unterstützt.^[86] Dies resultiert letztlich in geringeren Biegespannungen, während die Dehnung der Randfaser nahezu konstant bleibt.

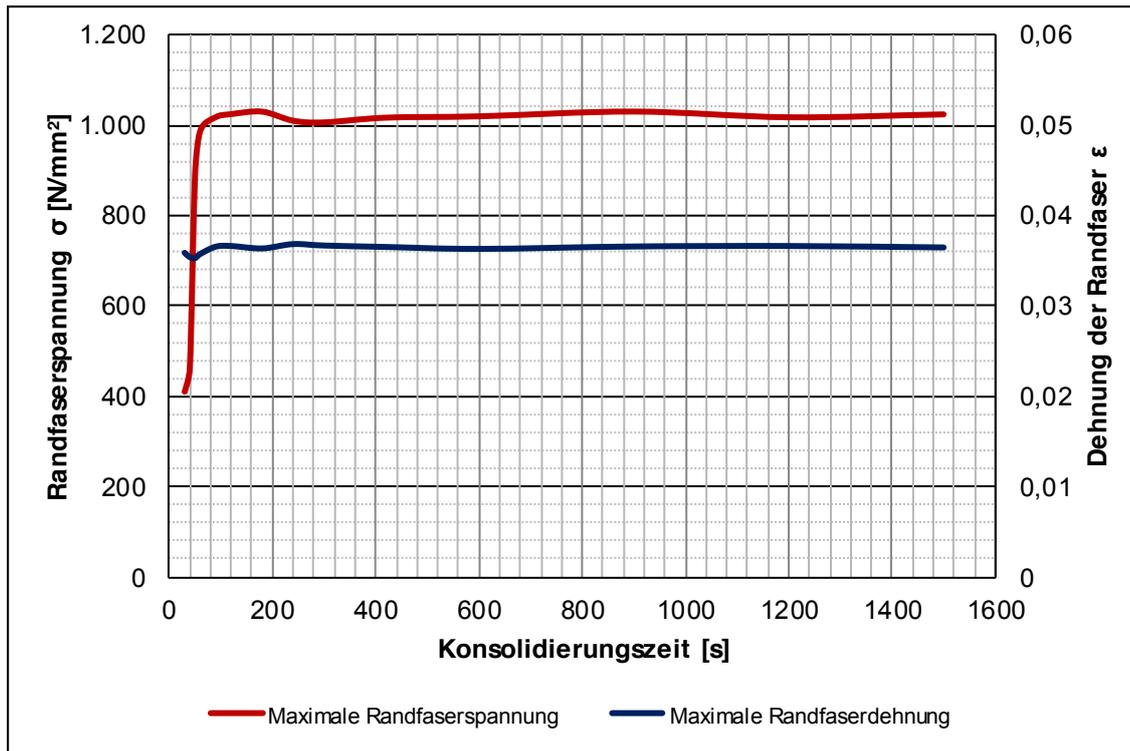


Bild 6.15 Einfluss unterschiedlicher Konsolidierungszeiten auf die mechanischen Eigenschaften von Dreipunkt-Biegeproben ($T = 180 \text{ }^\circ\text{C}$, $p = 0,3 \text{ N/mm}^2$)

6.3.2 Konsolidierungstemperatur

Zur Herstellung von Hybridverbunden mittels Prepregpressen wurden verschiedene Aushärtetemperaturen untersucht. Die Ergebnisse aus Dreipunkt-Biegeversuchen für einen Temperaturbereich von $120 \text{ }^\circ\text{C}$ bis $210 \text{ }^\circ\text{C}$, eine Aushärtezeit von 120 s und einen Druck von $0,3 \text{ N/mm}^2$ bei einer Blechdicke von $2,0 \text{ mm}$ S235JR sind in Bild 6.16 dargestellt.

Bei den Scherzugeigenschaften wurden als optimale Werkzeugtemperatur $180 \text{ }^\circ\text{C}$ ermittelt (Kapitel 5.3.1). Im Fall der Dreipunkt-Biegeversuche ist ein Plateau zu erkennen. Ab einer Temperatur von $150 \text{ }^\circ\text{C}$ bis hin zu einer Temperatur von $180 \text{ }^\circ\text{C}$ liegen sowohl die gemessenen maximalen Biegespannungen als auch die Dehnung der Randfaser in einem definierten Streubereich um den Maximalwert. Die geringeren Werte für die Biegespannungen für Temperaturen unterhalb von $150 \text{ }^\circ\text{C}$ sind wahrscheinlich auf eine nicht ausreichende Vorvernetzung im geschlossenen Presswerkzeug zurückzuführen. Hierdurch entstehen während der nachgeschalteten Restaushärtung im Umluftofen durch weitere chemische Reaktionen und fehlende Druckeinwirkung Poren im Laminat. Oberhalb einer Temperatur von $180 \text{ }^\circ\text{C}$ sinkt die Dehnung der Randfaser sukzessive ab. Hier setzt offensichtlich eine Versprödung des FVKs ein. Der Verbund verhält sich steifer, versagt aber auch entsprechend spröde. Dies könnte die Folge einer Überlagerung von Härtings- und Abbaureaktion infolge eines thermischen Abbaus sein. Dieser Effekt setzt je nach Zusammensetzung des Epoxidharzes bereits bei Temperaturen um etwa $200 \text{ }^\circ\text{C}$ ein. ^[262]

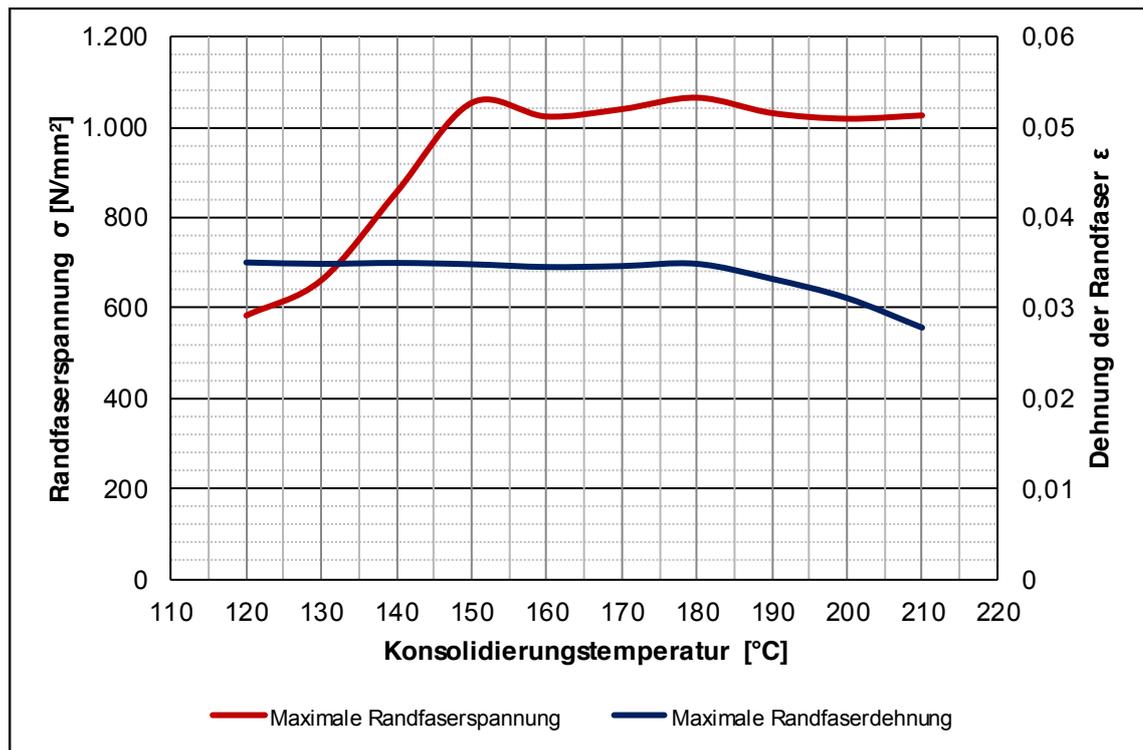


Bild 6.16 Einfluss unterschiedlicher Konsolidierungstemperaturen auf die mechanischen Eigenschaften von Dreipunkt-Biegeproben ($t = 120 \text{ s}$, $p = 0,3 \text{ N/mm}^2$)

Da bei einer höheren Temperatur die Aushärtung schneller vonstattengeht, ist im Sinne eines Großserienprozesses tendenziell eine höhere Temperatur vorzuziehen. Zu beachten sind im Einzelfall aber auch daraus resultierende höhere Eigenspannungen infolge unterschiedlicher Wärmeausdehnungskoeffizienten der Einzelwerkstoffe (Kapitel 6.7).

6.3.3 Konsolidierungsdruck

Ein passend gewählter Konsolidierungsdruck kann die Laminatqualität positiv beeinflussen und die Bildung von Poren während der Aushärtungsreaktion unterbinden. Aus diesem Grund wurde als dritter wesentlicher Prozessparameter der Konsolidierungsdruck untersucht. Dabei wurde auf ein 2,0 mm dickes DD11-Grundblech zurückgegriffen. Den Einfluss unterschiedlicher Konsolidierungsdrücke auf die mechanischen Eigenschaften von Dreipunkt-Biegeproben zeigt Bild 6.17.

Die verschiedenen Konsolidierungsdrücke haben allesamt einen spezifischen Einfluss auf die FVK-Komponente und die Laminatqualität (Bild 6.18). Während sehr geringe Drücke ein porenbehaftetes Laminat zur Folge haben, wird bei höheren Drücken sehr viel Harz- und Fasermaterial ausgepresst, was u. U. zu einem zu hohen Faservolumenanteil führt. Somit resultieren niedrige ebenso wie zu hohe Drücke in einem Abfall der mechanischen Eigenschaften. Ein Optimum kann aus den durchgeführten Versuchen im Bereich von 0,3 bis 0,4 N/mm² festgestellt werden. Ein höherer Druck hat ferner eine verbesserte Adhäsion durch eine Verringerung des Abstands der Moleküle

von Klebstoff bzw. Matrixharz und Fügeiteiloberfläche zur Folge. Auch wird durch einen höheren Druck die wirksame Oberfläche der Klebung und damit deren Festigkeit erhöht. ^[109]

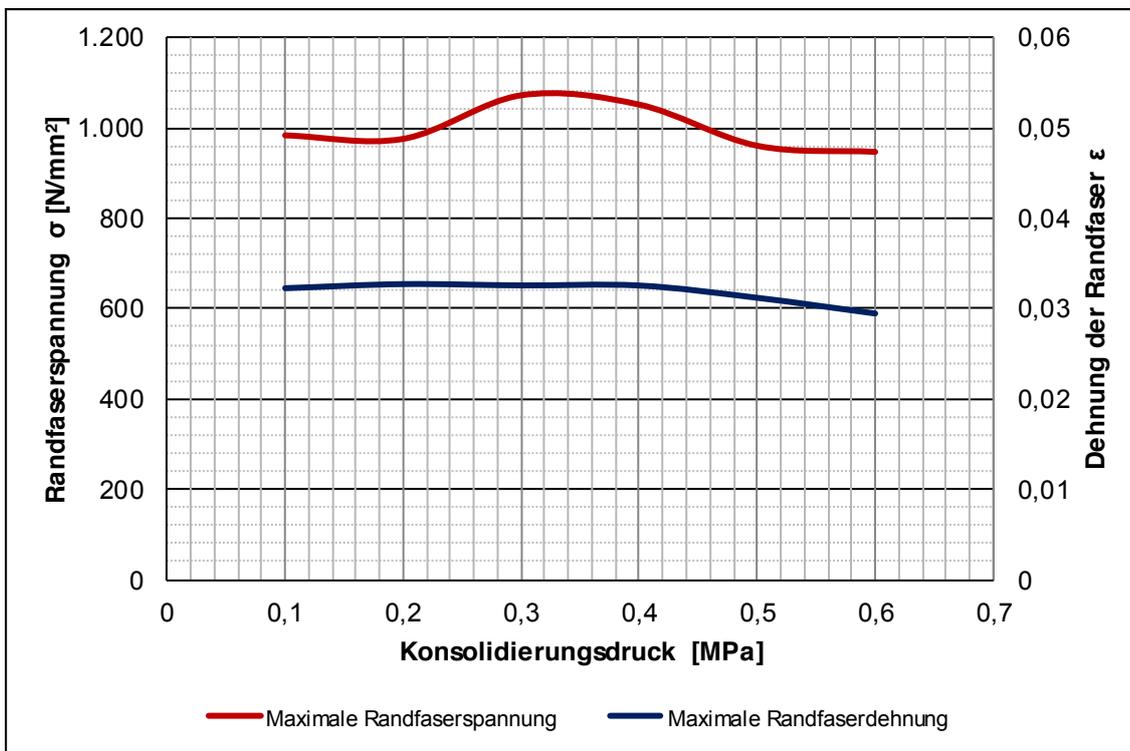


Bild 6.17 Einfluss unterschiedlicher Konsolidierungsdrücke auf die mechanischen Eigenschaften von Dreipunkt-Biegeproben ($T = 180\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t = 120\text{ s}$)

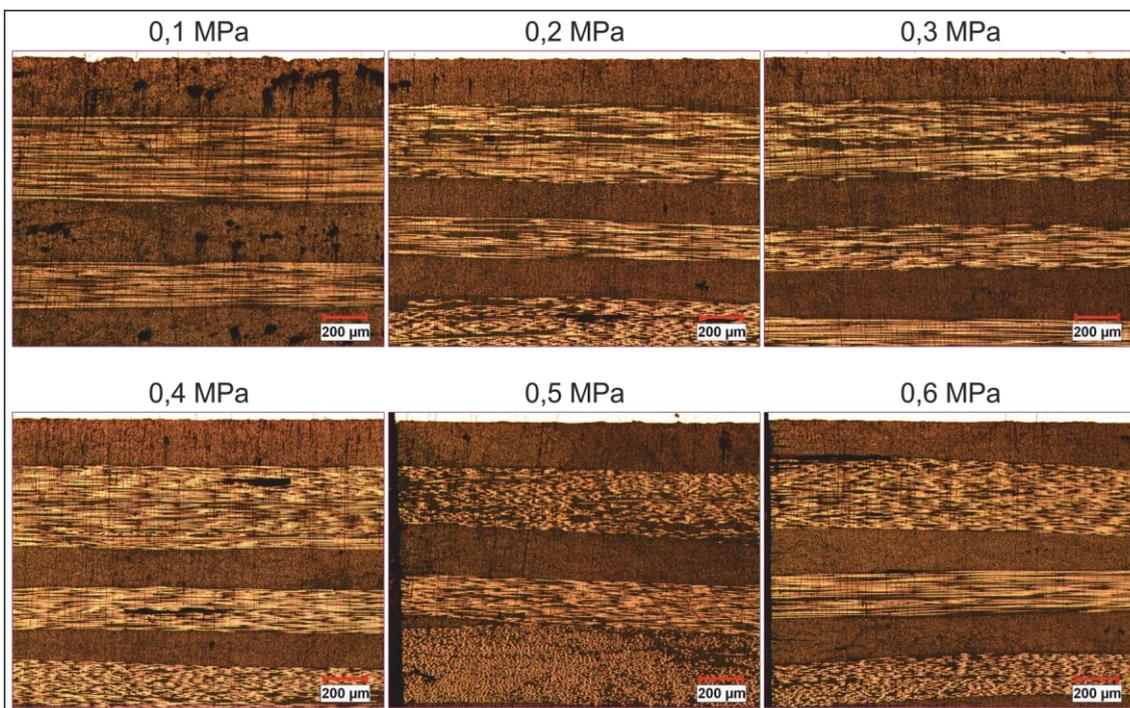


Bild 6.18 Schlifffbilder für bei unterschiedlichen Drücken hergestellte Laminare ($T = 180\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t = 120\text{ s}$)

6.3.4 Kombinationen unterschiedlicher Prozessparameter

Die einzelnen Prozessparameter beeinflussen sich auch wechselseitig. Im Folgenden werden daher verschiedene Kombinationen unterschiedlicher Prozessparameter erläutert. In Bild 6.19 ist zunächst der Einfluss verschiedener Temperaturen und Zeiten auf die Biegespannung von Dreipunkt-Biegeproben auf Basis eines 2,0 mm-Stahlblechs vom Typ S235JR dargestellt.

Wie auch aus den Untersuchungen der Einzelparameter ersichtlich wurde, steigen die Biegespannungen mit zunehmender Temperatur und Zeit bis zu einem Maximalwert an. Mit Erreichen dieses Plateaus kommt es nur noch zu geringen Schwankungen, die z. B. auf Toleranzen im Herstellungs- oder Prüfprozess zurückzuführen sind. Bei zu hohen Temperaturen sinken die maximalen Biegespannungen wieder ab.

Auch für Kombinationen aus verschiedenen Temperaturen und Drücken ist eine charakteristische Oberfläche zu erkennen (Bild 6.20). Für beide Parameter ergibt sich unter Verwendung eines 2,0 mm dicken DD11-Bleches ein parabelförmiger Verlauf mit einem Optimum im Bereich einer Temperatur von 180 °C und einem Druck von 0,3 bis 0,4 N/mm².

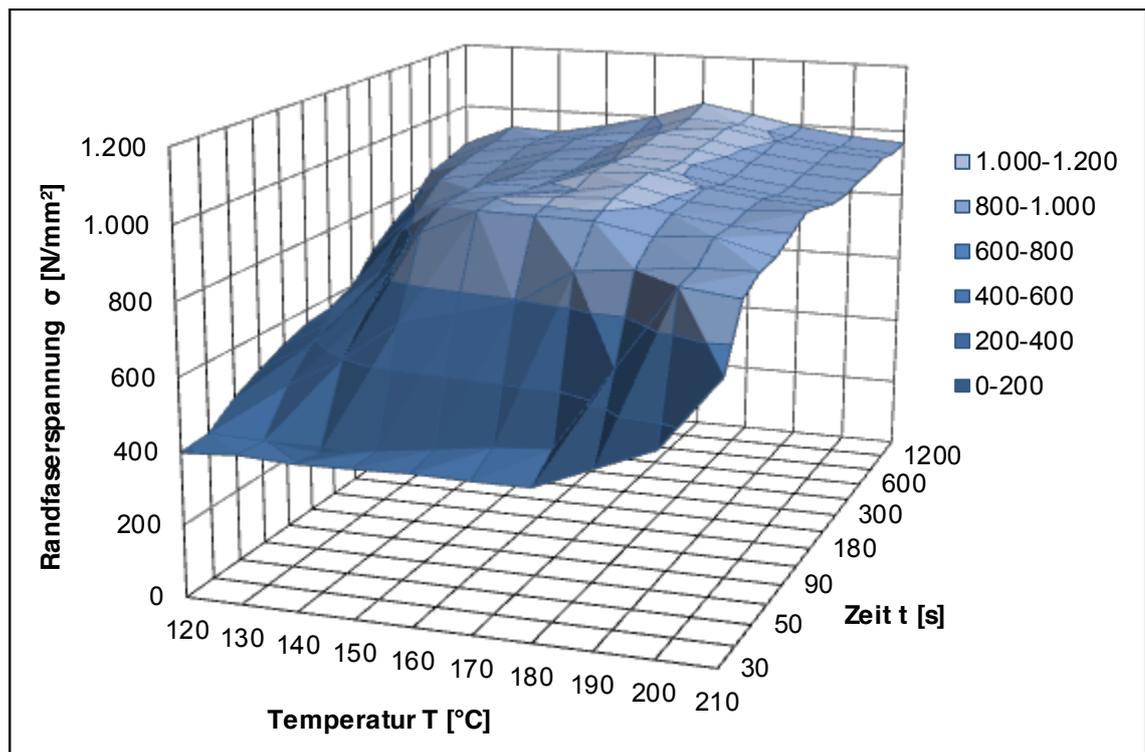


Bild 6.19 Einfluss unterschiedlicher Temperaturen und Zeiten auf die mechanischen Eigenschaften von Dreipunkt-Biegeproben ($p = 0,3 \text{ N/mm}^2$)

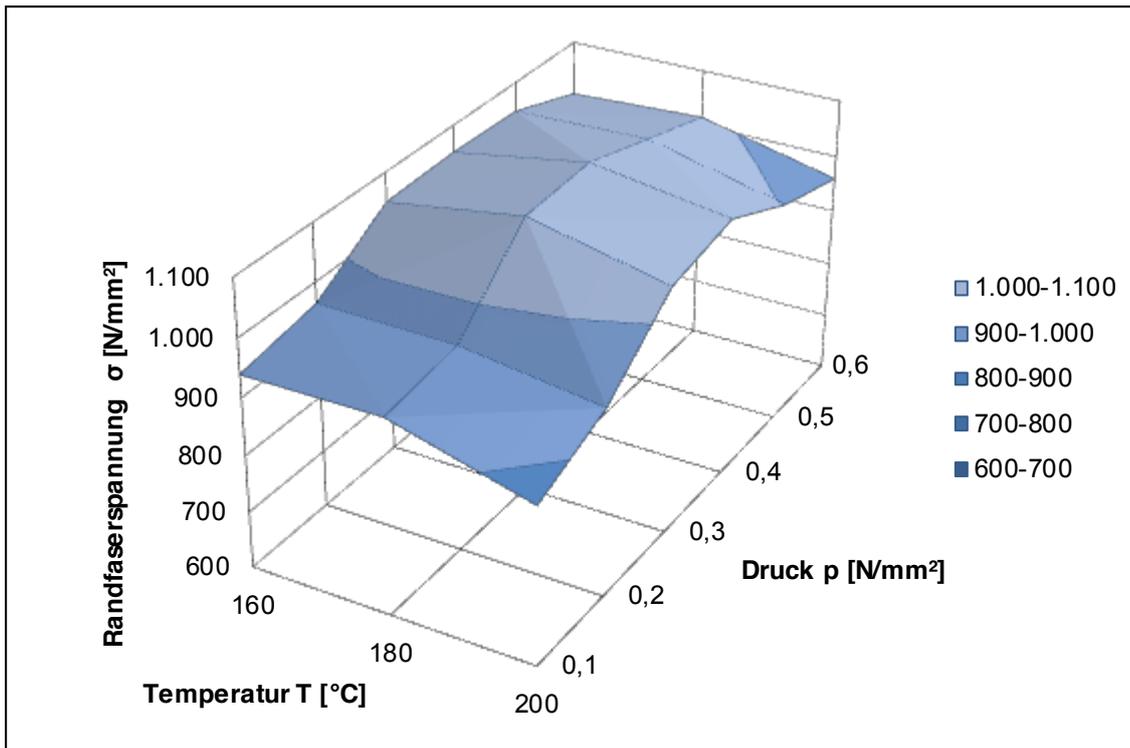


Bild 6.20 Einfluss unterschiedlicher Temperaturen und Drücke auf die mechanischen Eigenschaften von Dreipunkt-Biegeproben ($t = 120$ s)

6.3.5 Ableitung optimaler Prozessparameter

Die Prozessparameter sind eine Funktion verschiedener Einflussfaktoren. Hierzu gehören u. a. der Matrixwerkstoff, der Laminataufbau oder der Faserwerkstoff. Insofern sind die vorliegenden Ergebnisse nicht verallgemeinerbar. Für die gewählten Randbedingungen können jedoch optimale Prozessparameter abgeleitet werden.

Die Konsolidierungszeit sollte möglichst gering sein, um einen großserientauglichen Prozess mit einer hohen Ausbringungsmenge zu ermöglichen. Entsprechend den Versuchsergebnissen sollte die Zeit mindestens 90 s betragen, wenn eine Nachhärtung von 30 min bei einer Temperatur von 180 °C erfolgt.

Die Konsolidierungstemperatur sollte tendenziell höher gewählt werden, um die Reaktion des Matrixharzes zu beschleunigen. Zudem werden automobiler Strukturbauteile i. d. R. mit einer KTL versehen. Insofern ist bei einem späteren Serienprozess davon auszugehen, dass auch Hybridbauteile diesen Prozess bei etwa 180 °C für ca. 30 bis 45 min unbeschadet überstehen müssen. Dies korreliert mit den Versuchsergebnissen, aus denen als optimale Konsolidierungstemperatur 180 °C abgeleitet werden konnte. Zu beachten sind jedoch bei höheren Temperaturen die thermischen Eigenspannungen im Werkstoffverbund (Kapitel 6.7).

Ein optimaler Konsolidierungsdruck liegt zwischen 0,3 und 0,4 N/mm². Um das Umformergebnis weiter zu verbessern, sollte der Konsolidierungsdruck im Idealfall dynamisch geregelt werden, um den sich während des Pressvorganges ändernden Materi-

aleigenschaften gerecht zu werden. So würde der Druck während der Fließzeit zunächst geringer gewählt werden und anschließend während des Gelierens des Harzes erhöht werden. ^[168N]

6.3.6 Umformgeschwindigkeit

Hohe Umformgeschwindigkeiten können bei endlosfaserverstärkten Strukturen zu einem gestörten Faserverlauf im Bereich von Radien führen. ^[263] Dies führt einerseits zu der Bildung von Falten und Aufwerfungen in und um den Radius. Hinzu kommt das Abgleiten der einzelnen Faserlagen gegeneinander. Bei höheren Geschwindigkeiten wird dieser Effekt behindert (Kapitel 6.6.1). Andererseits wird eine möglichst hohe Schließgeschwindigkeit angestrebt, um die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens zu optimieren und die teilweise kurze Verarbeitungszeit des Harzes nicht zu überschreiten. Bei SMC erlauben Hochgeschwindigkeitspressen Schließgeschwindigkeiten von bis zu 1000 mm/s. Damit ist das Auspressen eines Formteils innerhalb von einer Sekunde möglich. ^[121] Es ist jedoch zu beachten, dass SMC Kurz- und Langfasern beinhalten und es zu einem Fließen der Pressmasse kommt. Eine Umformung wie bei endlosfaserverstärkten FVK erfolgt nicht.

Die Qualität des Umformergebnisses hängt auch von den gewählten Halbzeugen ab. So bieten Gewebe-Prepregs oder verwirkte Gelege-Prepregs ein größeres Umform- bzw. Drapiervermögen als unidirektionale oder bidirektionale Gelege. Für das Prepregpressen kommen konventionelle hydraulische Pressen zum Einsatz, wie sie auch in der Blechumformung verwendet werden. Hierdurch ist es möglich auf Erkenntnisse und Erfahrungen aus diesem Bereich zurückzugreifen. Anders als in der Faserverbundtechnologie ist in der Blechumformung die Großserienanwendung seit vielen Jahren Standard.

Die Untersuchungen wurden mit vier verschiedenen Umformgeschwindigkeiten von etwa 2,5 bis ca. 30 mm/s durchgeführt. Als Referenzstruktur diente ein V-Profil mit einem Winkel von 90° und einem Radius von 10 mm. Es wurden jeweils Schliffproben an den Schenkeln nahe dem Radius entnommen. In diesem Bereich sind gegebenenfalls vorhandene Aufwerfungen bzw. Falten vorhanden und es erfolgt ein Lagengleiten. Die hergestellten Strukturen zeigen bei den gewählten Umformgeschwindigkeiten keine signifikanten Unterschiede (Bild 6.21). Die Dicke der Faserlagen ist gleichmäßig und einheitlich. Bei höheren Geschwindigkeiten ist eine Tendenz dahingehend zu erkennen, dass die Dicke der einzelnen Schichten leicht variiert. Zudem ist bei höheren Umformgeschwindigkeiten davon auszugehen, dass sich insgesamt negative Auswirkungen auf die Laminatqualität einstellen.

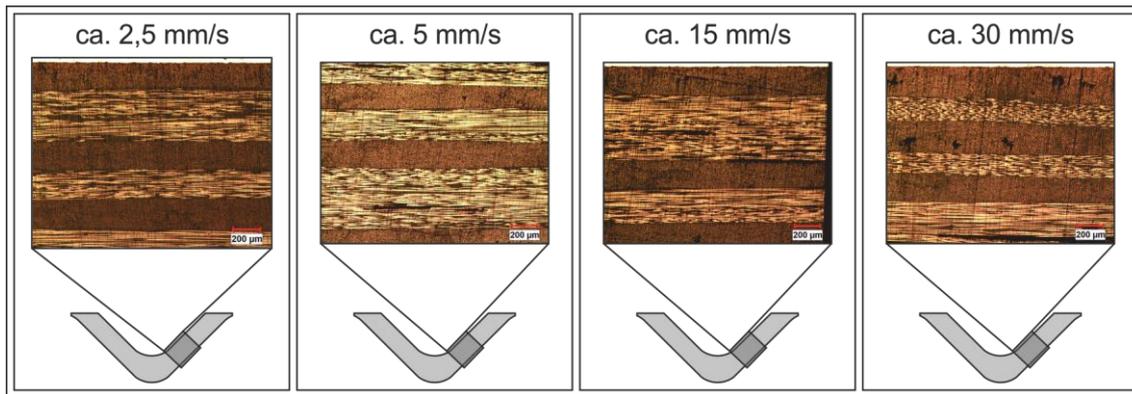


Bild 6.21 Einfluss verschiedener Umformgeschwindigkeiten

6.4 Einfluss von Geometriemerkmalen

Geometriemerkmale wie Flankenwinkel oder Radien können einen Einfluss auf die Bauteile und Bauteilqualität beim Prepregpressen haben. Im Folgenden wird anhand des Hutprofils zunächst der Einfluss der Flankenwinkel erörtert. Anschließend wird auf die mittels des Prepregpressens herstellbaren Radien eingegangen.

6.4.1 Flankenwinkel

Der Einfluss eines Flankenwinkels auf die Bauteilqualität beim Prepregpressen ist sehr stark ausgeprägt. Es ist jedoch zu beachten, dass der Grund hierfür in der Werkzeugtechnik und nicht in den Halbzeugen bzw. dem Prozess an sich zu suchen ist. Bei sehr großen Flanken von annähernd 90° liegt die Herausforderung darin, auch im Bereich der Flanken einen Druck auf das aushärtende Prepreg aufzubringen. ^[73] Eine Werkzeugabdichtung kann hier Abhilfe schaffen (Kapitel 6.8.2). Je nach Komplexität der Geometrie, der teilweise kurzen Verarbeitungszeit sowie dem eingeschränkten Fließvermögen endlosfaserverstärkter Prepregs können gegebenenfalls trotz dieser Maßnahme keine hydrostatischen Druckverhältnisse in der Kavität erzeugt werden.

Ein Druck auf die Flanken kann durch eine entsprechend enge Tolerierung begünstigt oder z. B. durch Schieber oder ausstellbare Werkzeugflanken realisiert werden. Eine andere Möglichkeit ist die Verwendung von Silikonstempeln, die sich unter Druckwirkung definiert verformen und auf diese Weise einen gleichmäßigen Anpressdruck gewährleisten (Bild 6.22). Ein wesentlicher Nachteil von Silikonstempeln sind die vergleichsweise geringen möglichen Stückzahlen herzustellender Bauteile. Den gleichen Nachteil weisen Diaphragma-Verfahren auf, die jedoch in der Lage sind, auch sehr komplexe Geometrien, z. B. mit Hinterschneidungen, abzubilden. ^[263] ^[264] Aus Kostengesichtspunkten sowie im Hinblick auf die höheren erreichbaren Standzeiten bei späteren Großserienprozessen werden massive Stahl-Werkzeuge als Grundlage für das Prepregpressen genutzt.

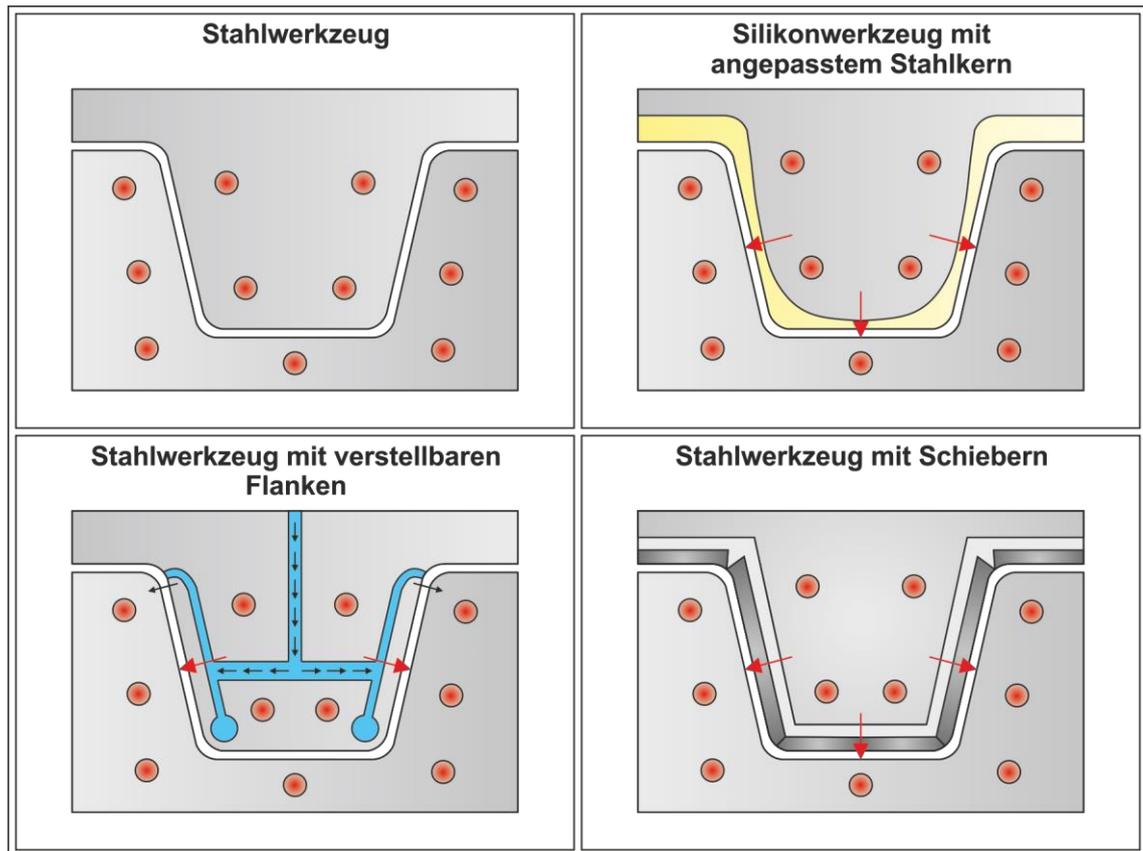


Bild 6.22 Schematische Darstellung verschiedener Werkzeugkonzepte für das Prepreggen

Im Rahmen der Untersuchungen wurden zunächst an einem entsprechenden Stahlwerkzeug hybride Hutprofilabschnitte hergestellt. ^[259S] ^[260S] Als Stahlwerkstoff kam ein USIBOR 1500 P mit einer Dicke von 2,0 mm zum Einsatz. Damit wurde der spätere Prozess zur Herstellung höchstfester hybrider Strukturen nachgebildet. Auf der Grundlage der bereits durchgeführten Untersuchungen (Kapitel 5.1, 5.2 und 6.3) wurden verschiedene Prozessparameter definiert. Dies diente der Untersuchung des Einflusses von Toleranzen und Schwankungen im Prozess auf die Qualität der hergestellten Bauteile. Die Temperatur variierte zwischen 180 und 200 °C, der Druck zwischen 0 und 0,6 N/mm² und die Zeit zwischen 90 und 900 s. Im Anschluss wurden, wie auch bei den in Kapitel 6.3 beschriebenen Untersuchungen, Proben nach einem zuvor definierten Entnahmeschema herausgetrennt, die anschließend einer Dreipunkt-Biegeprüfung nach DIN 14125 unterzogen und analysiert wurden (Bild 6.14). ^[189N] Die Biegeproben zeigen allesamt das charakteristische Versagensverhalten, welches in Kapitel 5.1.2 erläutert wurde und sich in den entsprechenden Kraft-Weg- bzw. Spannungs-Dehnungs-Verläufen äußert.

In dem folgenden Bild 6.23 sind die Ergebnisse aus Dreipunkt-Biegeversuchen für verschiedene Prozessparameter dargestellt. Die Ergebnisse sind zudem nach der Entnahmestelle aus dem Hutprofil, d. h. linke Flanke, Boden und rechte Flanke, unterteilt. Die Ergebnisse für die linke bzw. rechte Flanke sind dabei bis auf eine leichte Streuung identisch. Die Werte für den Bodenbereich liegen etwas höher.

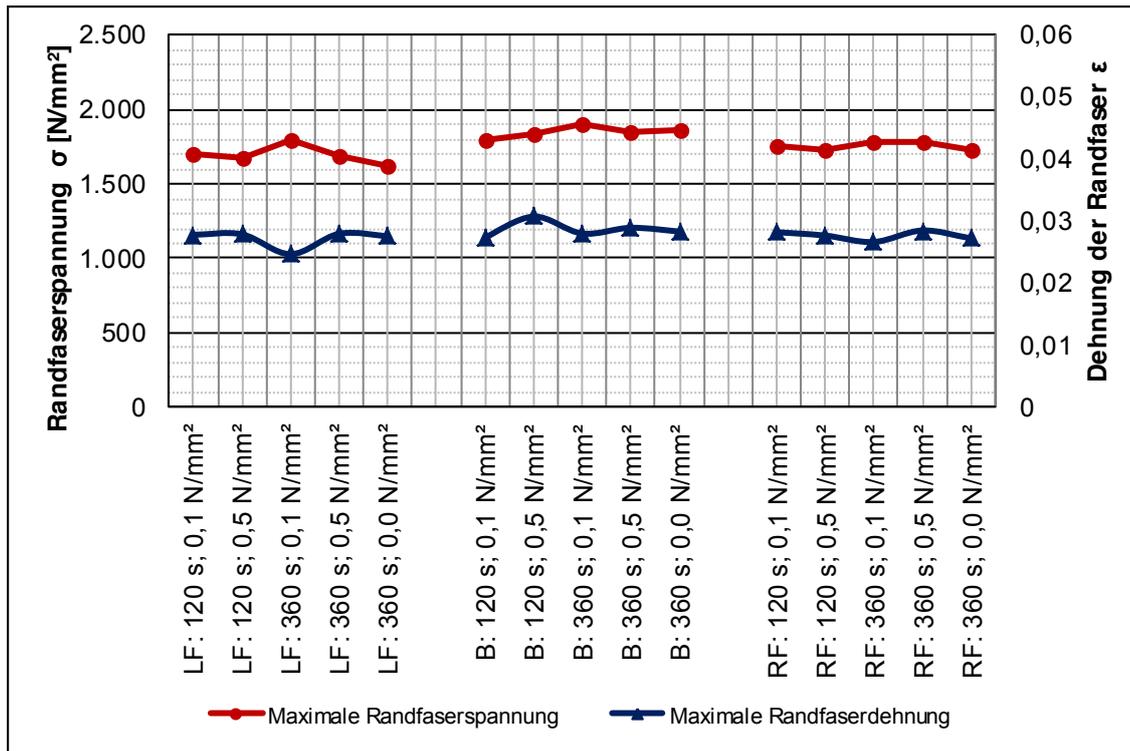
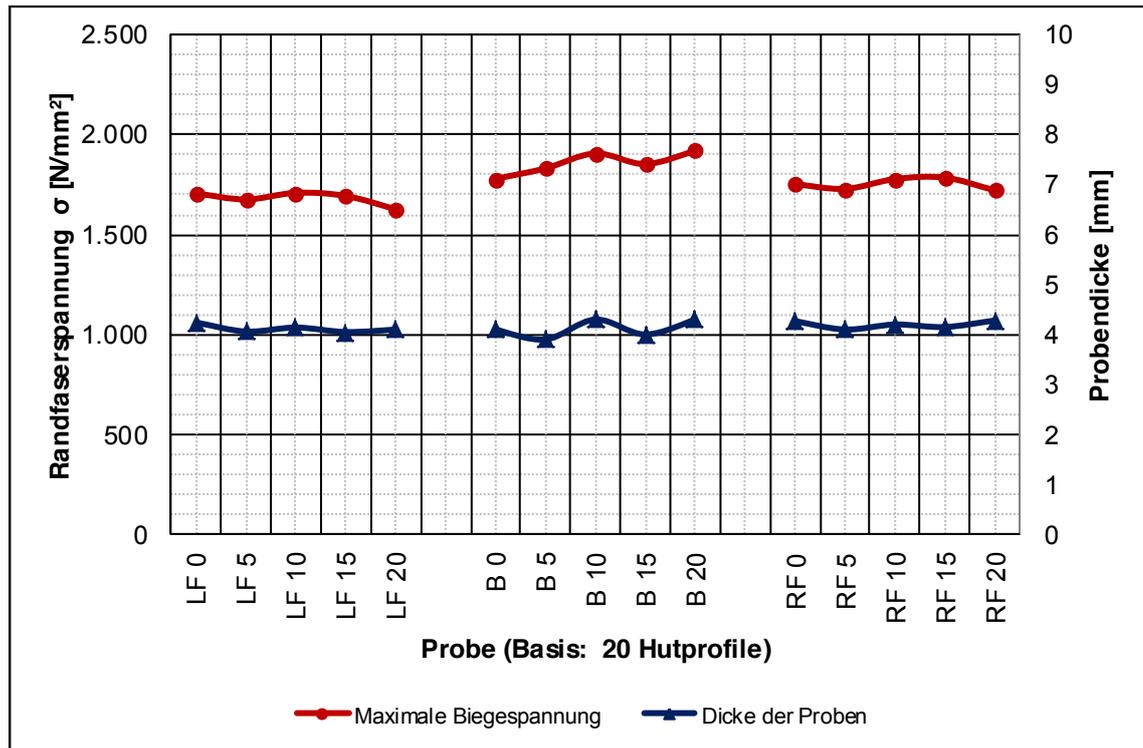


Bild 6.23 Biegespannung und Dehnung der Randfaser für Proben aus der linken (LF) und rechten (RF) Flanke sowie dem Hutprofilboden (B) für unterschiedliche Prozessparameter

Aufgrund des starren Werkzeugs schwankt die Probendicke für alle Proben nur geringfügig (Bild 6.24). Ein signifikanter Einfluss der unterschiedlichen Prozessparameter konnte nicht nachgewiesen werden. Die aus dem Boden entnommenen Proben weisen jedoch wiederum bessere mechanische Eigenschaften auf. Eine Ursache hierfür könnten die Fließbewegungen im Prepreg sein. Im Hutprofilboden werden diese in Breitenrichtung durch die Radien bzw. Flanken behindert, so dass sich ein wirksamer Fließprozess nur in Längsrichtung ausbreitet. Dieser beeinflusst die Ausrichtung der 0°-Fasern nicht. Diese haben für die durchgeführte Biegeprüfung die größte Relevanz. In den Flanken wird lediglich die Fließbewegung in Richtung des Radius bzw. Bodens behindert. Die übrigen drei Richtungen können ungehindert fließen. Hierdurch ändert sich auch die Ausrichtung der 0°-Fasern um einige Grad.

Untersuchungen der Druckverteilung mittels Drucksensoren und Druckmessfolien an U-Profilen haben gezeigt, dass der Druck in den Radien und im Bodenbereich z. T. deutlich höher ist als in den Flanken. Eine signifikante Auswirkung auf die mechanischen Eigenschaften konnte jedoch nicht nachgewiesen werden.

Festzustellen ist, dass ein Flankenwinkel einen Einfluss auf die Qualität von prepreggepressten Bauteilen hat. Wie groß dieser Einfluss ist und ob er eine kritische Auswirkung auf die Eigenschaften des Bauteils hat, muss für jede Geometrie und jedes Werkzeugkonzept im Einzelfall untersucht werden.



Nr.	T [°C]	t [s]	p [MPa]
1	180	900	Drucklos/Kontakt
2	180	900	ca. 0,5
3	180	900	ca. 0,5
4	180	360	ca. 0,5
5	180	300	ca. 0,5
6	180	360	ca. 0,5
7	180	360	ca. 0,5
8	180	120	ca. 0,5
9	180	360	Drucklos/Kontakt
10	180	360	ca. 0,5

Nr.	T [°C]	t [s]	p [MPa]
11	180	180	ca. 0,5
12	200	90	Drucklos/Kontakt
13	200	120	Drucklos/Kontakt
14	200	120	ca. 0,5
15	180	240	ca. 0,5
16	180	300	ca. 0,5
17	180	420	ca. 0,5
18	180	480	ca. 0,5
19	200	120	ca. 0,5
20	180	90	ca. 0,5

Bild 6.24 Biegespannungen und Probendicken für 20 bei verschiedenen Prozessparameterkombinationen hergestellte Hutprofile

6.4.2 Radien

In diesem Kapitel werden die durchgeführten Untersuchungen zu den durch das Prepregpressen darstellbaren Radien beschrieben, um die fertigungstechnischen Grenzen des Verfahrens diesbezüglich aufzuzeigen. Bei der Biege-Umformung von Mehrschichtenverbunden kommt es zu einer Verschiebung der einzelnen Faserlagen zueinander. Dies ist die Folge unterschiedlicher Biegeradien über den Querschnitt. Ein fehlerfreies Produkt lässt sich herstellen, wenn das Zwischenlagengleiten nicht unterbunden wird. Ist dies nicht der Fall, kann es zu Aufwerfungen oder Faseranhäufungen im Bereich des Radius kommen.

Für die Untersuchungen des Einflusses unterschiedlicher Radien wurde ein Versuchswerkzeug entwickelt ^[265S]. Mit dieser Vorrichtung konnten die Radien 1,0 mm, 2,5 mm, 5,0 mm und 10,0 mm abgebildet werden. Das Werkzeug wurde über Heizpatronen beheizt. Die Presskraft konnte stufenlos eingestellt werden. Die auszuhärtenden Prepregs wurden auf eine Größe von 130 x 40 mm zugeschnitten, mit einer Trennfolie versehen und anschließend verpresst. Die Temperatur betrug für 90 s 180 °C und die Presskraft wurde auf 0,3 N/mm² eingestellt. Es wurde eine Nachhärtung in einem Umluftofen für 30 min bei 180 °C durchgeführt. Anschließend wurden die Proben mikroskopisch untersucht und einer Aufbiegeprüfung unterzogen. Der Versuchsaufbau und die Probenform sind in Bild 6.25 dargestellt.

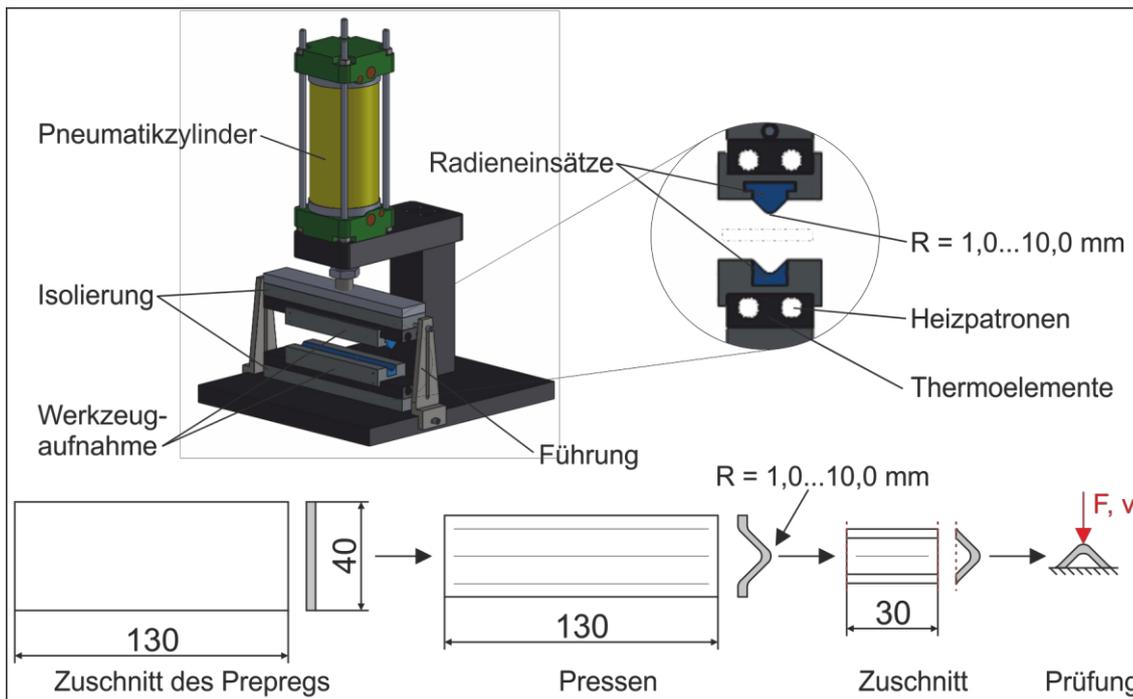


Bild 6.25 Versuchsaufbau, Herstellung der Proben und Probenform

Die Aufbiegeprüfung ermöglicht einen qualitativen Vergleich zwischen den einzelnen Proben. Hierfür wurden die hergestellten Strukturen besäumt und plan geschliffen. Sind z. B. Faseranhäufungen im Laminat vorhanden oder liegen die Fasern nicht mehr in der entsprechenden Ausrichtung vor, hat dies einen Einfluss auf die Aufziehspannungen. Es entstehen neben Biegespannungen auch interlaminare Aufziehspannungen. ^[86]

In Bild 6.26 sind Schliiffbilder der untersuchten Proben für verschiedene Radien dargestellt. Für alle Radien konnte eine sehr gute Ausformung der Geometrie ohne Aufwerfungen gezeigt werden. Allerdings ist bei allen Proben eine ungleichmäßige, schwankende Schichtdicke über den Querschnitt zu beobachten. Auch treten an den Radienaußenseiten Materialanhäufungen der längsgerichteten Verstärkungsfasern auf. Diese Phänomene sind mit abnehmendem Radius stärker ausgeprägt. Der Grund hierfür ist in der Halbzeugform zu suchen. Die verwendeten bidirektionalen Prepregs liegen als unverwirte Gelege vor, so dass die senkrecht zur Umform- bzw. Konsolidierungskraft

liegenden Fasern keinen Zusammenhalt aufweisen und entsprechend den lokal herrschenden Druckverhältnissen wegfließen bzw. verschwimmen. Zusammenfassend können jedoch selbst kleine Radien von 1,0 mm durch das Prepregpressen gut dargestellt werden.

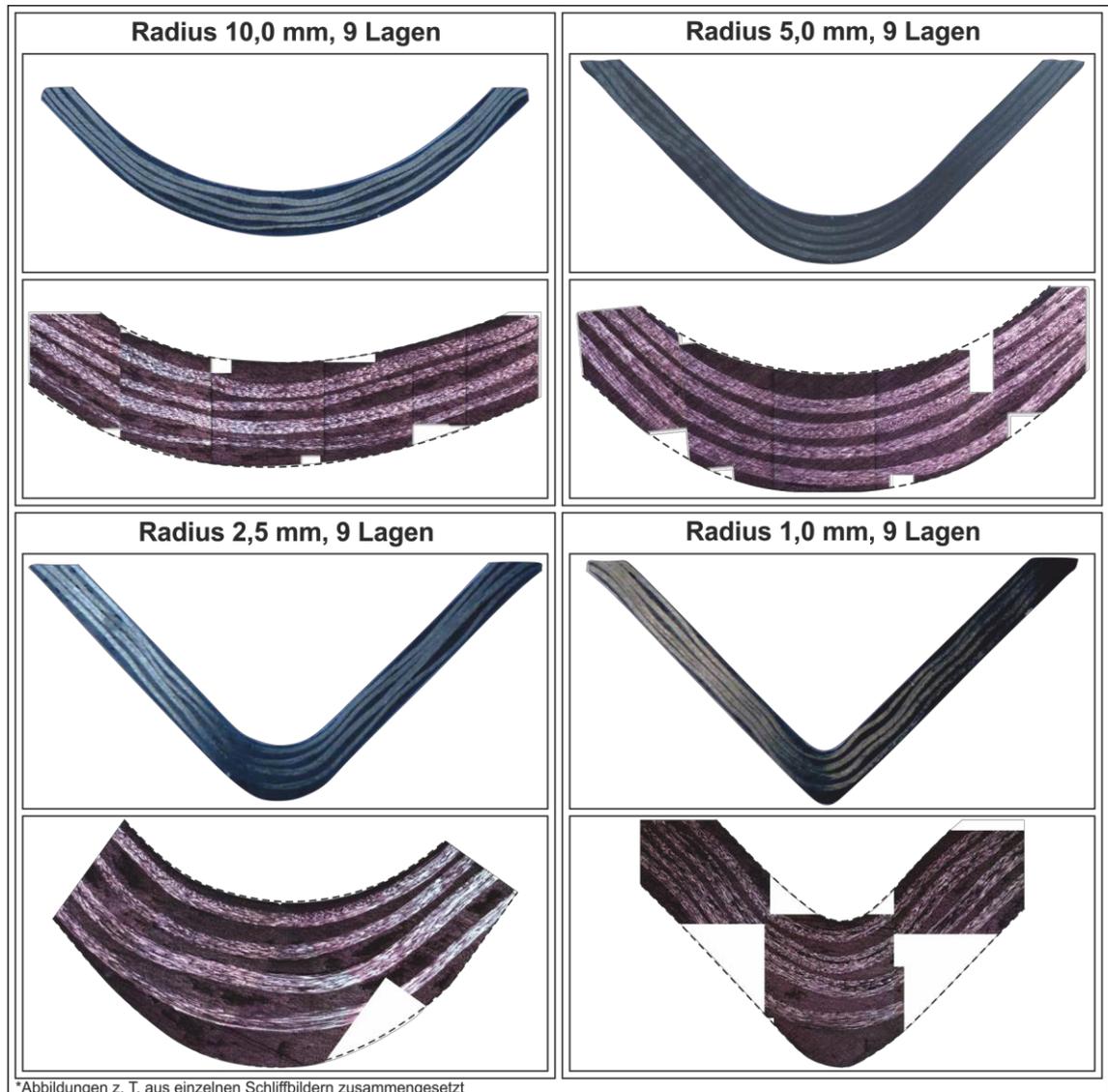


Bild 6.26 Darstellungen und Schliffbilder der Proben für verschiedene Radien

Die Ergebnisse der Aufbiegeprüfung für die unterschiedlichen Radien zeigt Bild 6.27. Es ist ersichtlich, dass eine längere Voraushärtezeit zu einer leicht höheren Maximalkraft und einem leicht vergrößerten elastischen Verformungsweg führt. Die ermittelten Kraft-Weg-Verläufe zeigen ansonsten ein identisches Material- und Versagensverhalten.

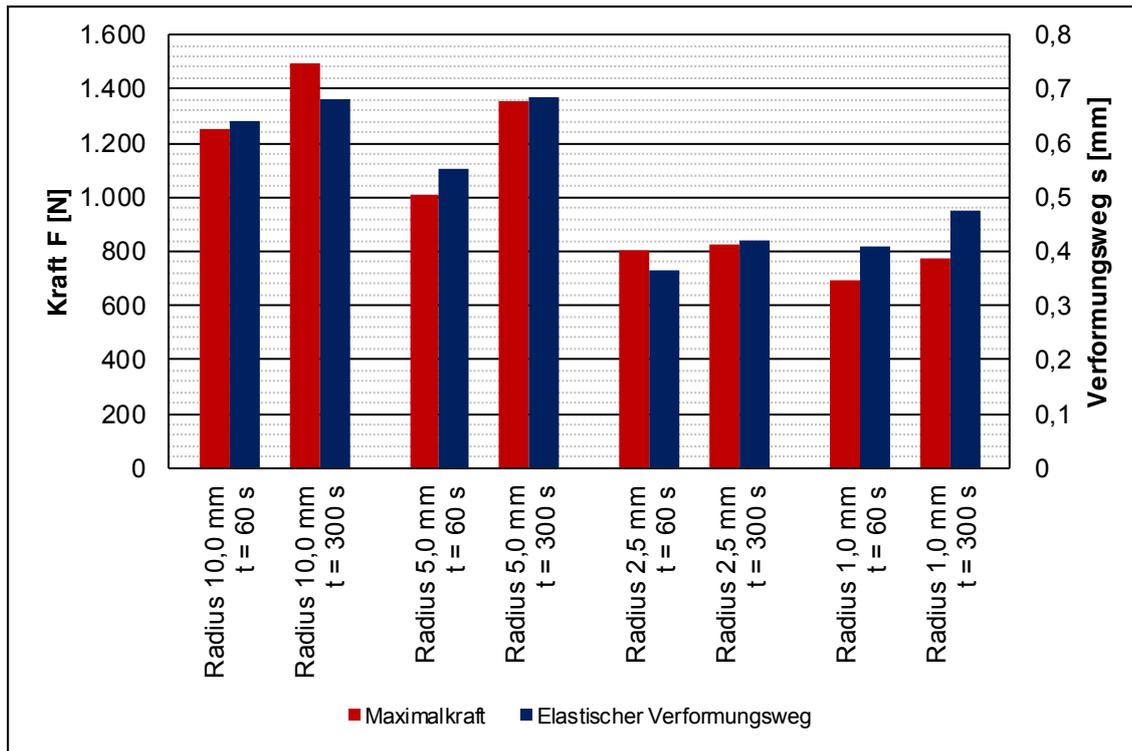


Bild 6.27 Ergebnisse der Aufbiegeprüfung für unterschiedliche Radien

6.5 Einfluss der Geometrie

Zum Einfluss der Geometrie beim Prepregpressen wurden verschiedene Untersuchungen an Strukturen mit ansteigendem Komplexitätsgrad durchgeführt. ^[266S] Ziel war es, die Prozessgrenzen hinsichtlich der mittels des Prepregpressens von UD-Gelegen herstellbaren Geometrien zu erfassen. Zur positiven Beurteilung des Umformergebnisses dienten gleichmäßige Wanddicken, Schichtdicken und Faserverläufe im Schnitt. Daneben waren die oberflächlich sichtbaren Faserverläufe sowie die Oberflächenqualität Kriterien. Im Rahmen dieser Arbeit erfolgte anhand der in Bild 6.28 dargestellten Werkzeuge eine erste Klassifizierung auf Basis gängiger bzw. relevanter Geometrien. Die Geometrien wurden dabei so ausgewählt, dass alle charakteristischen Merkmale eines realen automobilen Strukturbauteils abgedeckt wurden. Diese können auch entsprechend den unterschiedlichen Umformkrümmungen eingeteilt werden: einachsige Krümmungen (V-, U- oder Hut-Profil), einfache zweiachsige Krümmungen (zulaufendes U-Profil, Kugel oder Napf) sowie komplexe zweiachsige Krümmungen (B-Säule). ^[267] Neben der Geometrie wurden weitere Aspekte wie beispielsweise der Einfluss einer Vorwärmung des Prepregs auf die Bauteilqualität untersucht. Hierfür wurden die Prepregs vor dem Umformvorgang in einem Ofen auf eine definierte Temperatur erwärmt.

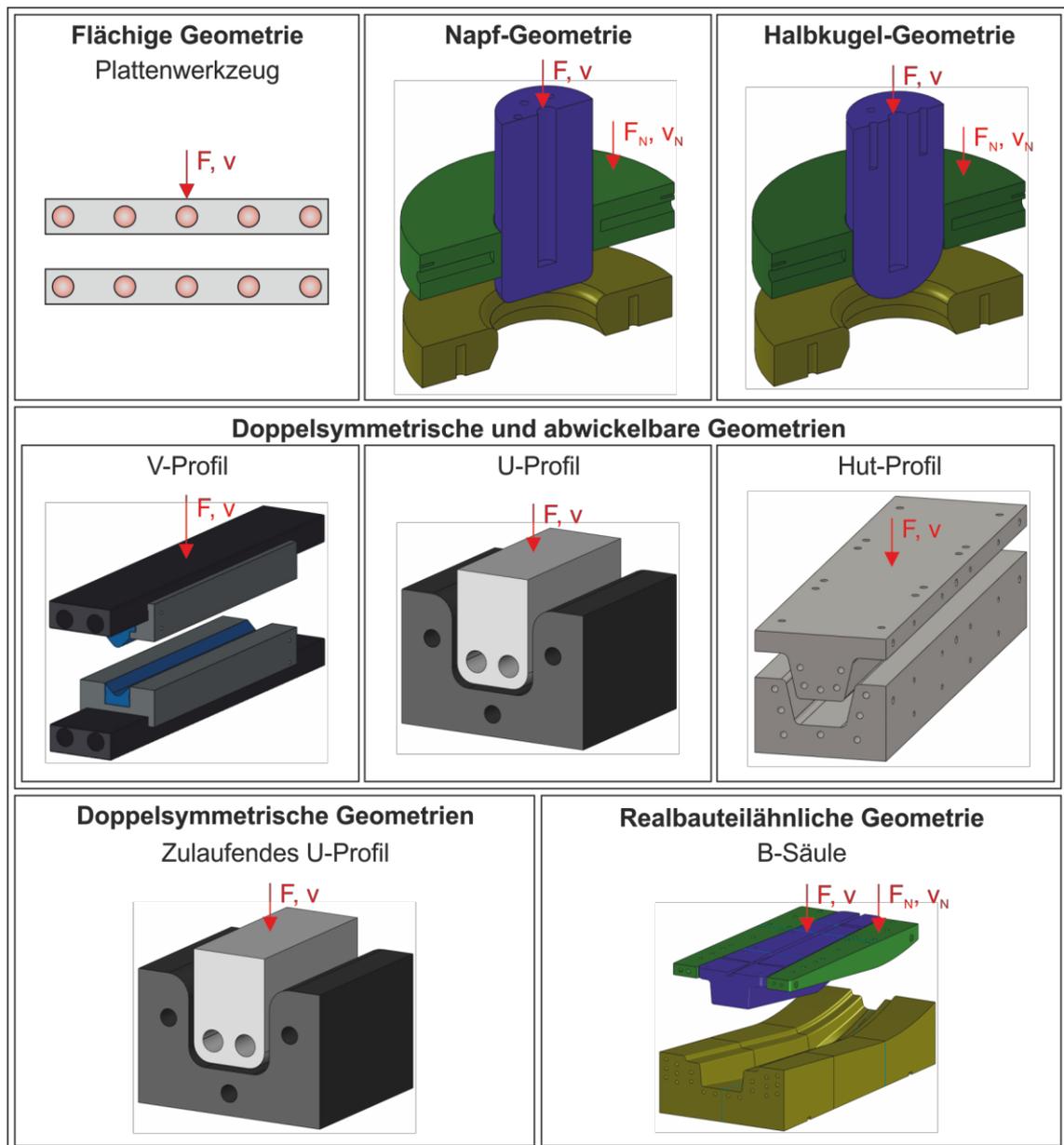


Bild 6.28 Verwendete Werkzeuge zur Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Geometrien

6.5.1 Flächige Geometrien

Die flächigen Geometrien wurden an einem offenen Plattenwerkzeug untersucht. Der Druck hat wie bei anderen Werkzeugkonzepten (Kapitel 6.8) einen entscheidenden Einfluss auf die Laminatqualität sowie die Endkonturengenauigkeit. In Bild 6.29 ist eine Hybridplatte zu sehen, die mittels eines Druckes von $0,2 \text{ N/mm}^2$ hergestellt wurde. Aufgrund der parallelen, ebenen Werkzeugoberflächen wurde eine sehr gleichmäßige Wanddicke erreicht. Die einzelnen Schichten weisen eine konstante Dicke ohne signifikante Schwankungen auf. Selbst die doppelte 0° -Lage ist gut ausgebildet. Eine Vorwärmung des Prepregs auf $60 \text{ }^\circ\text{C}$ führt zu einer etwas besseren Konturengenauigkeit und einer etwas größeren Wanddicke. Dies liegt daran, dass die Topfzeit des Harzes be-

reits außerhalb des Werkzeugs startet und somit zu Beginn des Pressvorgangs die Mechanismen der Aushärtung bereits ablaufen.

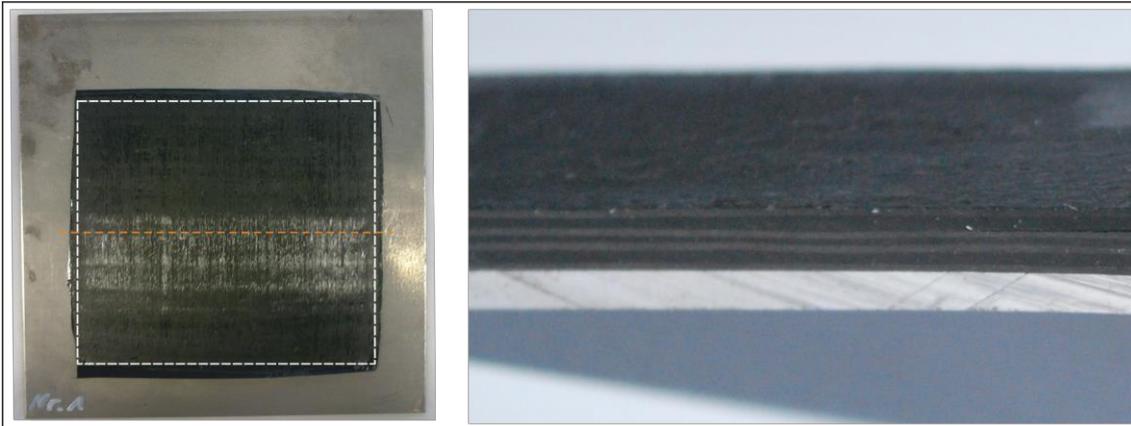


Bild 6.29 Hybridplatte und Schnittansicht

6.5.2 Doppelsymmetrische und abwickelbare Geometrien

Als doppelsymmetrische Geometrien wurden V-, U- und Hutprofile herangezogen. Die Ergebnisse für die V-Profile wurden bereits in Kapitel 6.4.2 diskutiert. Die U- und Hutprofile erfordern eine Umformung der Prepregs. Bei den V-Profilen reichte eine einfache Biegeoperation aus. Das U- und das Hutprofil unterscheiden sich insbesondere hinsichtlich der Flankenwinkel. Bei den U-Profilen beträgt dieser 90° , während bei den Hutprofilen ein Winkel von $102,5^\circ$ vorliegt. Bild 6.30 zeigt die Ergebnisse der Umformung der Prepregs in die bereits umgeformte Stahlstruktur. Beide Geometrien konnten sehr gut abgebildet werden. Der im Schnitt zu erkennende Faserverlauf ist sehr gleichmäßig und zeichnet sich durch konstante Schichtdicken aus. Das Auspressen von Fasern im Flanschbereich kann durch geeignete Werkzeugkonzepte verhindert werden (Kapitel 6.8.2).^[34]

Für die einzelnen Profile wurden die Laminatdicken nach der Umformung bestimmt, um einen Hinweis auf die Laminatqualität zu erhalten. Bei den U-Profilen schwankt die Dicke außerhalb der Bodenradien um etwa 0,2 mm. Die Wanddicken im Zargenbereich liegen dabei über den Wanddicken im Bodenbereich. Im Bereich der Bodenradien steigt die Schwankung auf bis zu 0,4 mm an. Eine Vorwärmung der Prepregs auf 60°C führt zu einer insgesamt leicht größeren Schichtdicke. Ein Grund hierfür ist wiederum das Starten der Verarbeitungszeit des Harzes außerhalb des Presswerkzeugs. Die Schwankungen sind ein wenig geringer als bei dem Verzicht auf eine Vorwärmung.

Bei den Hutprofilen zeigt sich ein ähnliches Bild. Ohne eine Vorwärmung schwankt die Wanddicke um etwa 0,3 mm zwischen Zargen- und Bodenbereich. Im Bereich der Bodenradien steigt die Schwankung auf bis etwa 0,4 mm an. Eine Vorwärmung der Prepregs führt in diesem Fall zu konstanteren Wanddicken. Die Schwankung beträgt etwa 0,2 mm zwischen Zargen- und Bodenbereich sowie 0,3 mm im Bereich der Eckradien. Bezüglich einer Vorwärmung der Prepregs vor der Umformung kann festgehalten werden, dass ein leicht positiver Einfluss festgestellt werden kann.

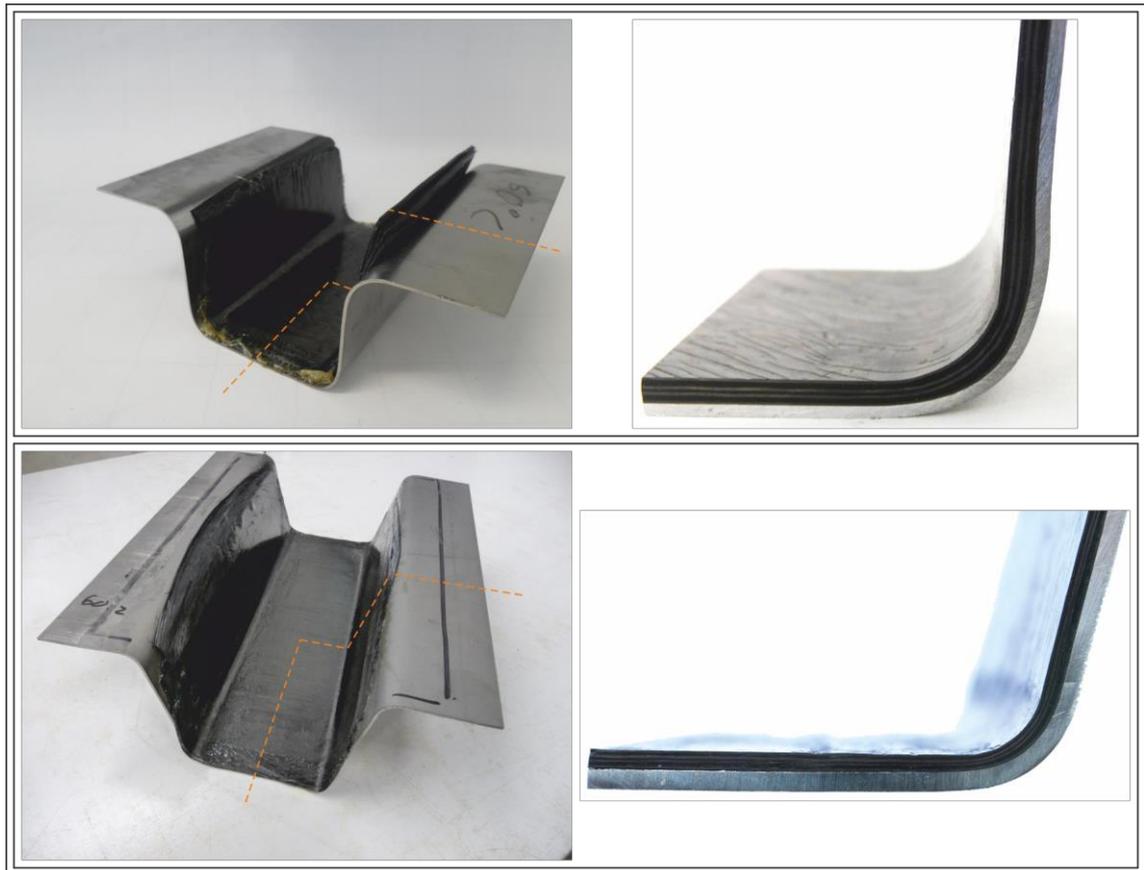


Bild 6.30 Hybrides U- und Hutprofil sowie Schnittansichten

6.5.3 Doppelsymmetrische Geometrien

Um eine repräsentative einfachsymmetrische Geometrie bereitzustellen, wurde das bereits erwähnte U-Profil um eine Verjüngung ergänzt. Die Flankenwinkel betragen weiterhin 90° . Wie in Bild 6.31 zu erkennen, zeigt der durch das Werkzeug druckbeaufschlagte Bereich eine insgesamt gute Qualität des Laminats und der Oberfläche auf.



Bild 6.31 Hybrides U-Profil mit Verjüngung sowie Schnittansicht

In der Schnittansicht wird ersichtlich, dass die einzelnen Lagen jedoch unterschiedlich dick sind und die Schichtdicke zudem deutlich schwankt. Letzteres ist insbesondere im

Bereich des Bodenradius der Fall. Die Schwankung der Wanddicke beträgt im Zargenbereich etwa 0,2 mm, während sie im Bodenbereich bei 0,1 mm liegt. Im Bereich der Bodenradien nimmt die Dicke um bis zu 0,2 mm gegenüber dem Zargenbereich ab. Bei der Verwendung von auf 60 °C vorgewärmten Prepregs wird eine etwas größere Wanddicke bei geringfügig kleineren Schwankungen erreicht.

6.5.4 Napf-Geometrie

Nach den Profil-Geometrien wurden Napf-Geometrien untersucht (Bild 6.32). Diese weisen eine deutlich höhere Komplexität auf und sind nicht abwickelbar. Die Geometrie konnte gut ausgeformt werden.^[268] Im oberen Zargenbereich ist jedoch ein starker Einfluss der Faltenbildung im Flanscbereich zu erkennen.^{[269] [270]}

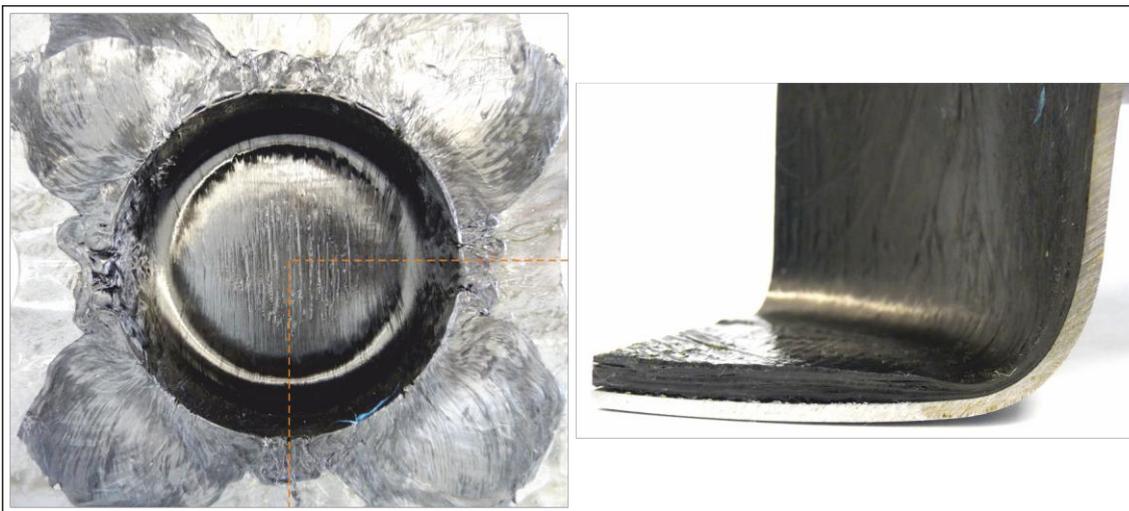


Bild 6.32 Hybride Napf-Geometrie sowie Schnittansicht

Die Faltenbildung ist eine Folge von auftretenden Schubspannungen innerhalb des Prepregs während der Umformung bzw. des Drapierens. Eine Möglichkeit zur Untersuchung dieses Effekts bietet ein Scherrahmen. Hierdurch lassen sich Merkmale eines Textils wie der kritische Scherwinkel bestimmen. Des Weiteren sind oberflächlich Lücken (Gaps) zwischen einzelnen Rovings im Flankenbereich zu erkennen. Dies ist eine Folge der zweiachsigen Krümmung des Bauteils.^[267] Durch einen im Bodenbereich fehlenden Gegenhalter konnte kein genügend hoher Druck auf den Hybridverbund aufgebaut werden. Die Folge sind einzelne Delaminationen sowie Poren. Im äußeren Bereich des Bodenradius und der Zarge ist ein insgesamt zufriedenstellender Verbund entstanden. Die Schichten verlaufen hier parallel bei annähernd gleichen Schichtdicken. Die Schwankung der Gesamtschichtdicke beträgt hier durchschnittlich nur etwa 0,05 mm mit einer Vorwärmung auf 60 °C und 0,1 mm ohne Vorwärmung des Prepregs.

6.5.5 Halbkugel-Geometrie

Bei der ebenfalls aus klassischen Tiefungsversuchen bekannten Halbkugelgeometrie konnten nach der Umformung annähernd gleichbleibende Schichtdicken nachgewiesen werden (Bild 6.33). Die Geometrie wurde gut ausgeformt. ^[268] Die Schwankungen der Wanddicke betragen bis zu 0,6 mm. Faltenbildungen im Flansch- und oberen Zargenbereich sowie leichte oberflächliche Gaps zwischen Rovings sind, wie auch bei dem Napf, vorhanden. Ein signifikanter Einfluss einer Vorwärmung auf die Schichtdicken oder die Bauteilqualität konnte nicht festgestellt werden. Allerdings bedingt eine Vorwärmung der Prepregs deren Umformeigenschaften (Kapitel 6.6.1 und 6.6.3). ^[271] Bei den hier verwendeten vergleichsweise dicken Stahlblechen in Kombination mit einer aufgelegten FVK-Verstärkung sind jedoch die Effekte der Stahlblechumformung maßgebend.

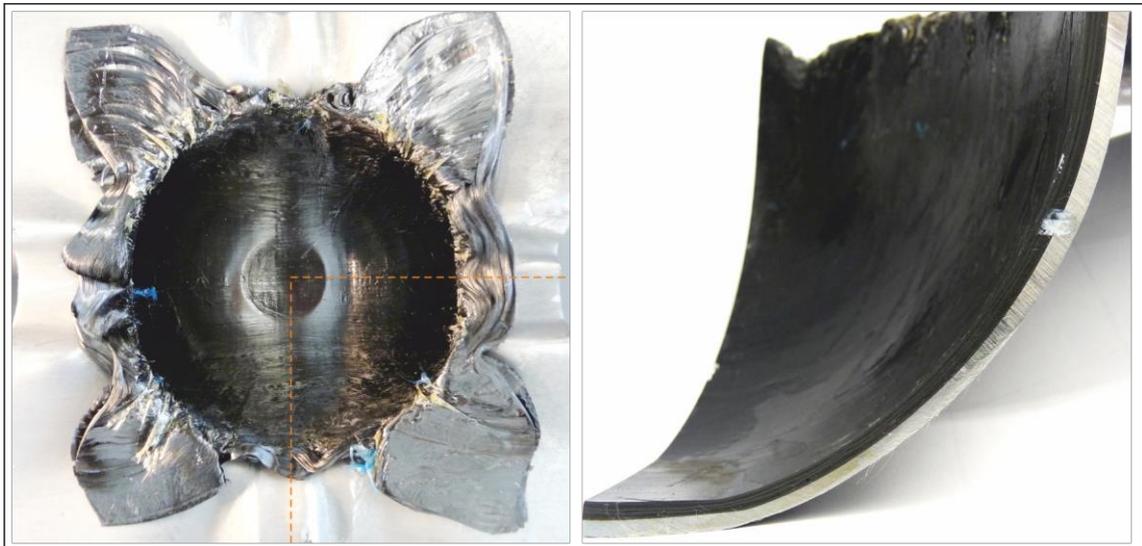


Bild 6.33 Hybride Halbkugel-Geometrie sowie Schnittansicht

6.5.6 Realbauteilähnliche Geometrie

Als realbauteilähnliche Geometrie wurde eine B-Säule genutzt. Aufgrund der Werkzeuggestaltung konnte hier lediglich ein reiner FVK-Verbund erstellt werden (Bild 6.34). Die Umformung des Prepregs wurde unter Zuhilfenahme eines Niederhalters realisiert. Dies führte zu einer sehr guten Abbildung der Werkzeugkontur. In den Schnittansichten ist eine deutliche Änderung der einzelnen Schichtdicken zu erkennen. Insbesondere im Bereich der Werkzeugradien beschreiben die inneren Laminatlagen einen deutlich größeren Radius. In Schlifffbildern konnte jedoch eine insgesamt gute Konsolidierung des Verbunds nachgewiesen werden. Die Schwankung der Wanddicke beträgt über die definierten Querschnitte maximal etwa 0,5 mm. Unter Einsatz einer Vorwärmung der Prepregs auf 60 °C sinkt diese leicht ab, wobei die Wanddicke insgesamt etwas größer wird.



Bild 6.34 FVK-B-Säule und Schnittansichten

6.6 Materialverhalten

Bei dem Prepregpressen erfolgt, anders als beispielsweise bei dem SMC-Verfahren, ein Formpressen. Durch die endlos vorliegenden Verstärkungsfasern ist ein Fließen des Werkstoffs nur begrenzt möglich. Vielmehr kann es aufgrund der Steifigkeit der Fasern zu einem Zwischenlagengleiten und/oder einer Faltenbildung in Abhängigkeit von dem Umformgrad kommen. Eine Ausformung komplexer Geometrien resultiert in einer Verschiebung der Faserlagen bis zu einem kritischen Punkt, an dem ebenfalls eine Faltenbildung einsetzt. Das Materialverhalten wird zudem durch weitere Faktoren, wie eine Vorwärmung oder die Geschwindigkeit der Umformung, beeinflusst. Im folgenden Kapitel werden diese Aspekte näher betrachtet.

6.6.1 Zwischenlagengleiten

Das Zwischenlagengleiten tritt bei der Formgebung von endlosfaserverstärkten Laminaten in einfach gekrümmte Geometrien auf und ist einer der Hauptumformmechanismen beim Thermoformen. Die Gründe für das interlaminare Gleiten sind die unterschiedlichen Verschiebungen an der Ober- und Unterseite bei der Umformung von Laminaten: die Außenseite eines Radius ist auf Zug, die Innenseite auf Druck belastet. Das Zwischenlagengleiten findet vor allem in matrixreichen Lagen statt. Ziel der folgenden Untersuchungen ist die Klärung und Quantifizierung des Einflusses der Parameter Auszugsgeschwindigkeit, Vorwärmtemperatur und Klemmkraft. Daneben werden verschiedene Reibpartner sowie Radien in die Untersuchungen mit einbezogen. Hieraus werden anschließend Rückschlüsse für den realen Prepreg-Press-Prozess gezogen.

Bei einer Be- oder Verhinderung des interlaminaren Gleitens kann es zu Faserwelligkeit und zu einem Ausknicken von Fasern kommen, da die Matrix die auf Druck belasteten Fasern nicht ausreichend stützen kann (Bild 6.35). Zudem sind weitere Fehler Delaminationen, Knickfalten, Springwinkel und Bauteilverzug.^{[264] [272] [273]}

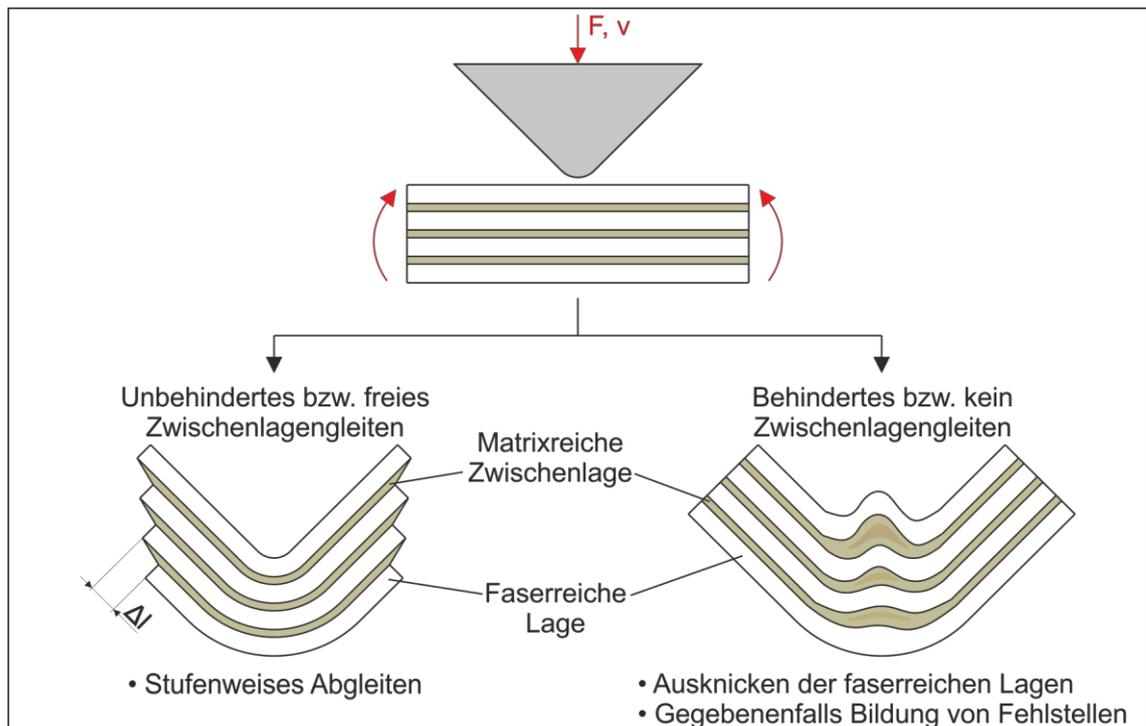


Bild 6.35 Freies und behindertes Abgleiten von Faserlagen beim Thermoformen eines 90°-Winkels nach SCHERER^[273]

Bisher wurde das interlaminaire Gleiten z. B. von BERTHOLD, SCHERER und BREUER insbesondere für FVK-Halbzeuge mit thermoplastischer Matrix untersucht. BERTHOLD untersuchte das Zwischenlagengleiten mit einer universellen Zwei-Rollen-Reibungs- und Scherprüfvorrichtung.^[272] SCHERER verwendete für seine Untersuchungen einen Ply-Pull-Out-Versuch bzw. Streifen-Auszugsversuch. Hiermit untersuchte er die Reib- und Scherkraftverhältnisse zwischen den einzelnen Lagen eines Laminats.^[273]^[141] BREUER untersuchte das Zwischenlagengleiten zunächst rein phänomenologisch anhand von praktischen Thermoformversuchen. Dabei untersuchte er vor allem die Wirkungsweise der Werkzeugsysteme und ihren Einfluss auf das Zwischenlagengleiten.^[274] Anschließend griff auch er auf Auszugsversuche zurück.

Um das Zwischenlagengleiten für duroplastische Prepregs untersuchen zu können, wurde ein Auszugsversuch entwickelt.^[275S]^[141]^[276] Die Versuchsvorrichtung wurde in die Universalprüfmaschine UTS 50-1 eingebaut. Durch die Prüfmaschine werden die erforderlichen Auszugskräfte erzeugt und über eine Einspannung auf die auszuziehende Faserlage übertragen. Die Proben werden zwischen den beheizbaren Klemmbanken und einer zusätzlichen Klemmleiste fixiert. Um eine zusätzliche Anpresskraft orthogonal zur Auszugsrichtung auf die Proben aufbringen zu können, verfügt die Auszugsvorrichtung über vier Stahldruckfedern. Über eine Stellschraube kann die Anpresskraft variiert werden. Der maximale Auszugsweg betrug 120 mm. Der Aufbau und die Elemente des Auszugsversuchs sind in Bild 6.36 dargestellt.

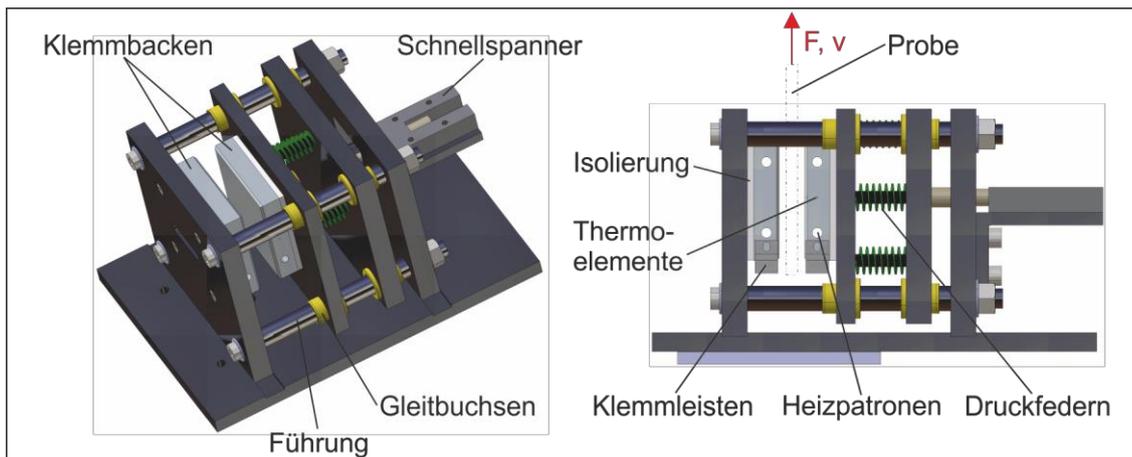


Bild 6.36 Aufbau des linearen Auszugsversuchs

Der lineare Auszugsversuch wurde anschließend zu einem umgelenkten Auszugsversuch erweitert (Bild 6.37) ^[277S]. Durch eine Umlenkung des zu prüfenden Prepregs um 90° und über einen definierten Eckradius wurde die Untersuchung weiterer Einflüsse auf die Umformung von Prepregs ermöglicht. Hierfür wurde der lineare Auszugsversuch um 90° gedreht, so dass die Klemmbacken horizontal ausgerichtet waren. Anschließend wurden Aufsätze mit unterschiedlichen Radien entwickelt, über welche die ausziehende Prepreglage geführt wurde (Bild 6.37). Die Auszugskraft wurde wiederum durch die Universalprüfmaschine UTS 50-1 erzeugt und durch eine Einspannung auf die Probe übertragen.

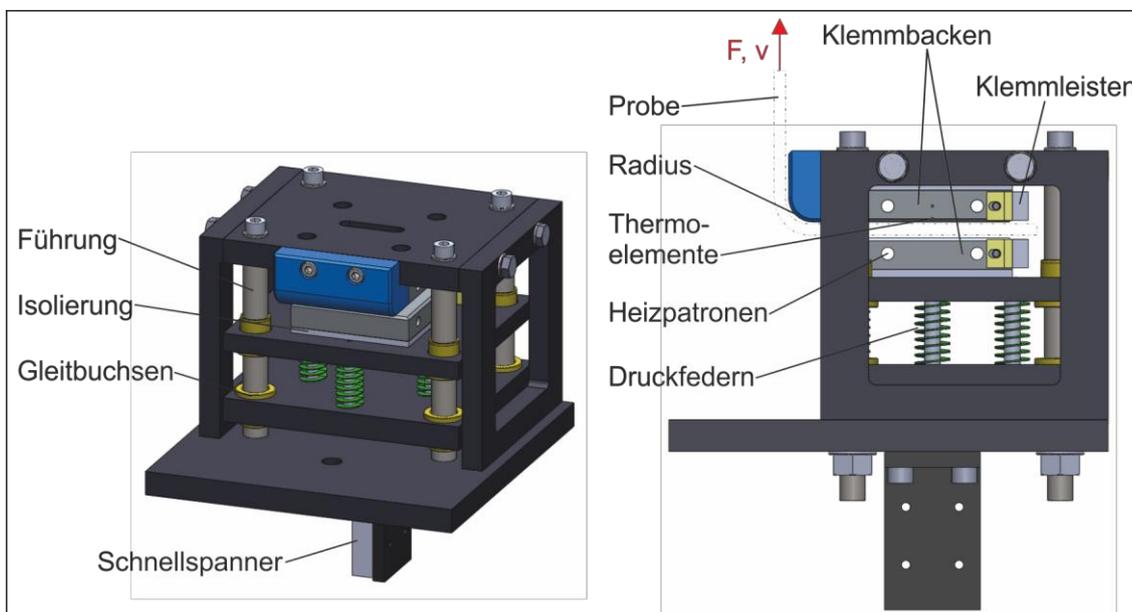


Bild 6.37 Aufbau des umgelenkten Auszugsversuchs

Die Proben für die Auszugsversuche bestanden aus nicht ausgehärteten Prepregs. Die rechteckigen Proben besaßen eine Breite von 50 mm. Die ausziehende mittlere Lage besaß bei den linearen Auszugsversuchen eine Länge von 150 mm und bei den umgelenkten Auszugsversuchen eine Länge von 300 mm. Die äußeren Lagen waren

120 mm lang. Der Überlappungsbereich betrug 100 mm. Nach dem Zuschnitt der Prepregs wurden drei 0°-Lagen aufeinander gestapelt und im Überlappungsbereich definiert verpresst. Um die Klemmbacken vor Verunreinigungen zu schützen und die Ergebnisse der Auszugsversuche nicht durch die Reibung zwischen den äußeren Prepreglagen und den Stahloberflächen zu beeinflussen, wurde auf der Ober- und Unterseite der Proben eine Trennfolie aufgebracht. Im Bereich der Klemmung der Spannbacken der Prüfmaschine und der Klemmleisten des Prüfstandes wurden zudem Krafteinleitungselemente aus Aluminium aufgebracht (Bild 6.38).

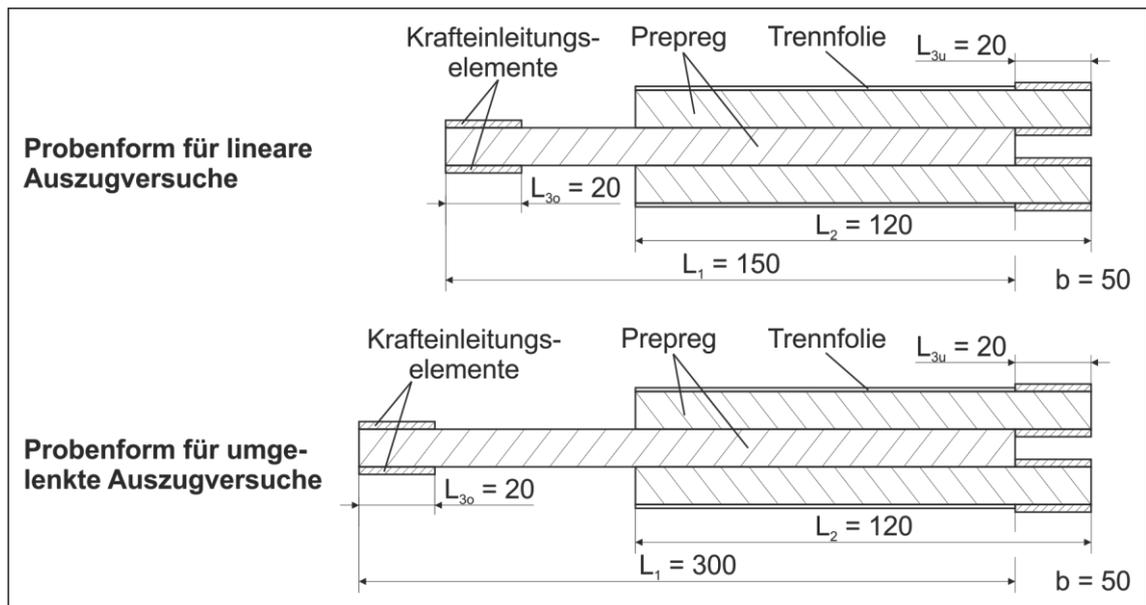


Bild 6.38 Probenformen für die Auszugsversuche

Zur Auswertung der Untersuchungen wurde die auftretende Schubspannung berechnet:

$$\tau = \frac{F}{2 \cdot A(s_A)} \quad (6.7)$$

Der Reibungskoeffizient wurde aus der Auszugs- bzw. Reibkraft bezogen auf die Normalkraft und die Reibflächen berechnet: ^[278] ^[279] ^[276]

$$\mu = \frac{F}{2 \cdot A(s_A) \cdot p_n} \text{ mit } p_n = \frac{F_n}{A(s_A)} \quad (6.8)$$

6.6.1.1 Lineare Auszugsversuche

Die linearen Auszugsversuche geben einen Aufschluss über das Zwischenlagengleiten zwischen den einzelnen Lagen eines Prepreg-Laminats. Dabei wurde der Einfluss der Temperatur, der Klemmkraft (als Abstraktion z. B. einer realen Niederhalterkraft) und der Auszugsgeschwindigkeit untersucht. ^[275S] ^[280S] Diese Parameter lassen sich später auch bei dem Prepreg-Press-Prozess einstellen bzw. anpassen.

Die in Bild 6.39 dargestellten Kraft-Weg-Verläufe wurden bei einer Auszugsgeschwindigkeit von $v_A = 100 \text{ mm/min}$ ermittelt. Die Klemmkraft betrug $F_K = 1000 \text{ N}$. Die Verläufe weisen einen charakteristischen Verlauf auf. Zunächst ist ein steiler Anstieg zu beobachten. An dem Punkt der höchsten Kraft erfolgt der Übergang von der Haft- zur Gleitreibung. In der Folge sinkt die Kraft zunächst deutlich ab. Anschließend ist ein stetiger leichter Rückgang der Auszugskraft infolge der sich verringernden Überlappungsfläche bis zum vollständigen Herausziehen der mittleren Lage aus der Versuchsvorrichtung zu erkennen. ^[272] ^[279]

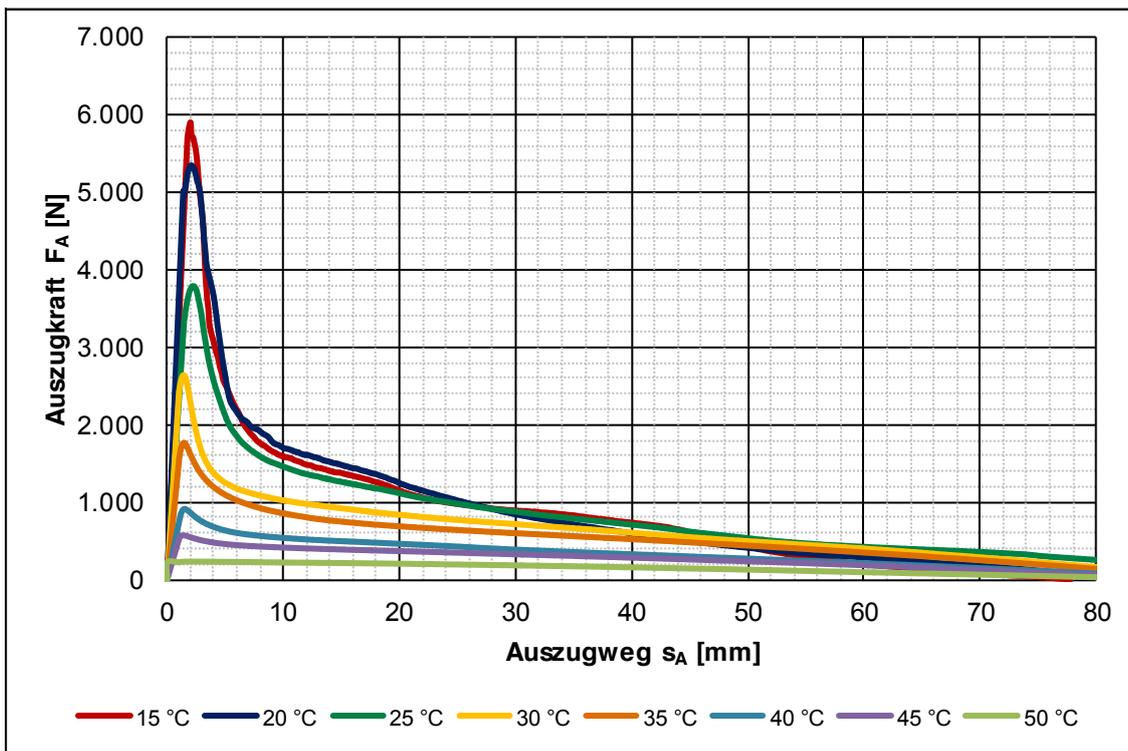


Bild 6.39 Einfluss unterschiedlicher Temperaturen auf die Kraft-Weg-Verläufe

Eine ansteigende Temperatur hat einen signifikanten Einfluss auf die maximale Auszugskraft. ^[272] Diese sinkt mit ansteigender Temperatur ab, bis ab einer Temperatur von 50 °C kein Kraftpeak beim Übergang von Haft- zu Gleitreibung mehr erkennbar ist. ^[25] Die mit der Temperatur absinkende Viskosität der Matrix ist der Grund für die sinkenden Auszugskräfte. ^[169N] Ein weiterer Anstieg der Temperatur führt zwar zu einem weiteren Absinken der Auszugskraft, jedoch wird die Verarbeitung der Prepregs infolge der sinkenden Viskosität der Matrix schwieriger. Zudem ist bei steigenden Temperaturen insbesondere oberhalb der Reaktionsstarttemperatur eine nicht unbeträchtliche, undefinierte Voraushärtung des Epoxidharzes möglich. Dies ist bei einem späteren Serienprozess möglichst auszuschließen. Ein analoges Verhalten ist für die weiteren charakteristischen Kenngrößen erkennbar (Bild 6.40).

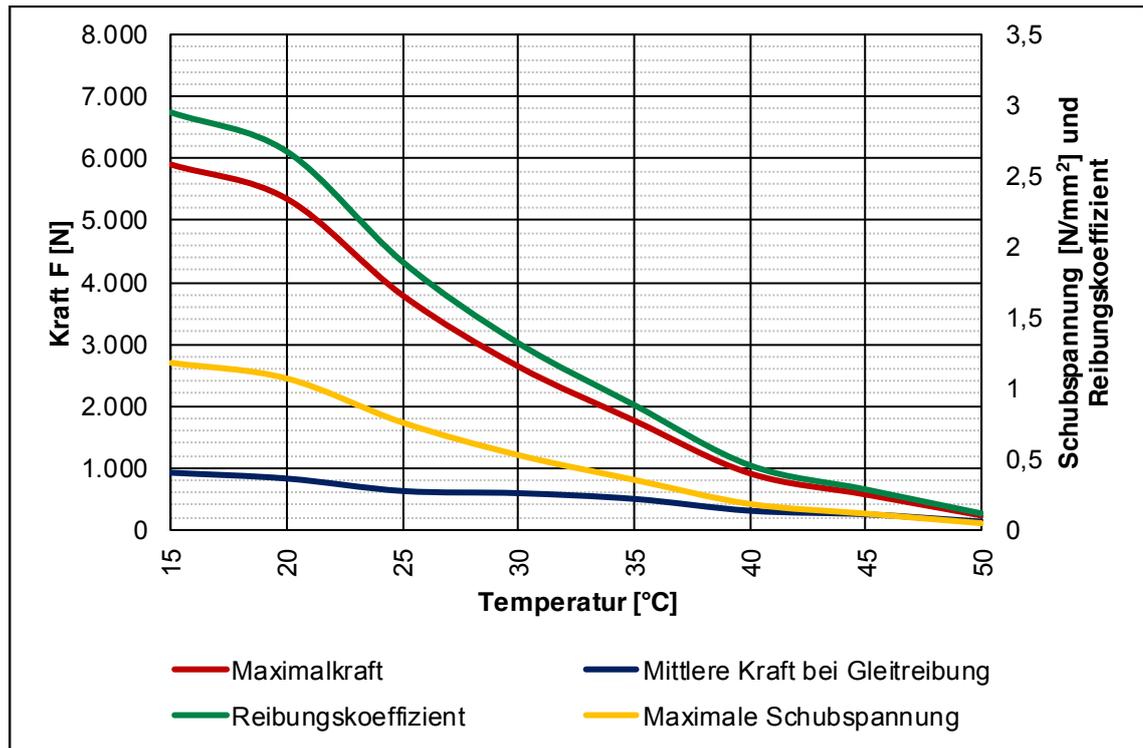


Bild 6.40 Einfluss unterschiedlicher Temperaturen auf die Maximalkraft, die maximale Schubspannung, die mittlere Kraft bei Gleitreibung sowie die Haft- und Gleitreibungskoeffizienten

Einen gegenläufigen Effekt auf die Kennwerte beim Auszugsversuch hat eine Erhöhung der Auszugsgeschwindigkeit. Um den Einfluss zu bestimmen, wurden Versuche bei Raumtemperatur ($T = 20 \text{ °C}$) und Klemm- bzw. Normkräften von $F_n = 500 \text{ N}$, $F_n = 1000 \text{ N}$ und $F_n = 2000 \text{ N}$ durchgeführt. Die Kraft-Weg-Verläufe weisen den gleichen charakteristischen Verlauf auf wie zuvor. Die Maximalkraft, die mittlere Kraft bei Gleitreibung sowie die Haft- und Gleitreibungskoeffizienten sind Bild 6.41 zu entnehmen. Es ist zu erkennen, dass eine höhere Auszugsgeschwindigkeit zu einer höheren maximalen Auszugskraft führt. Zudem ist das Kraftniveau im Bereich der Gleitreibung für eine niedrige Auszugsgeschwindigkeit deutlich geringer.

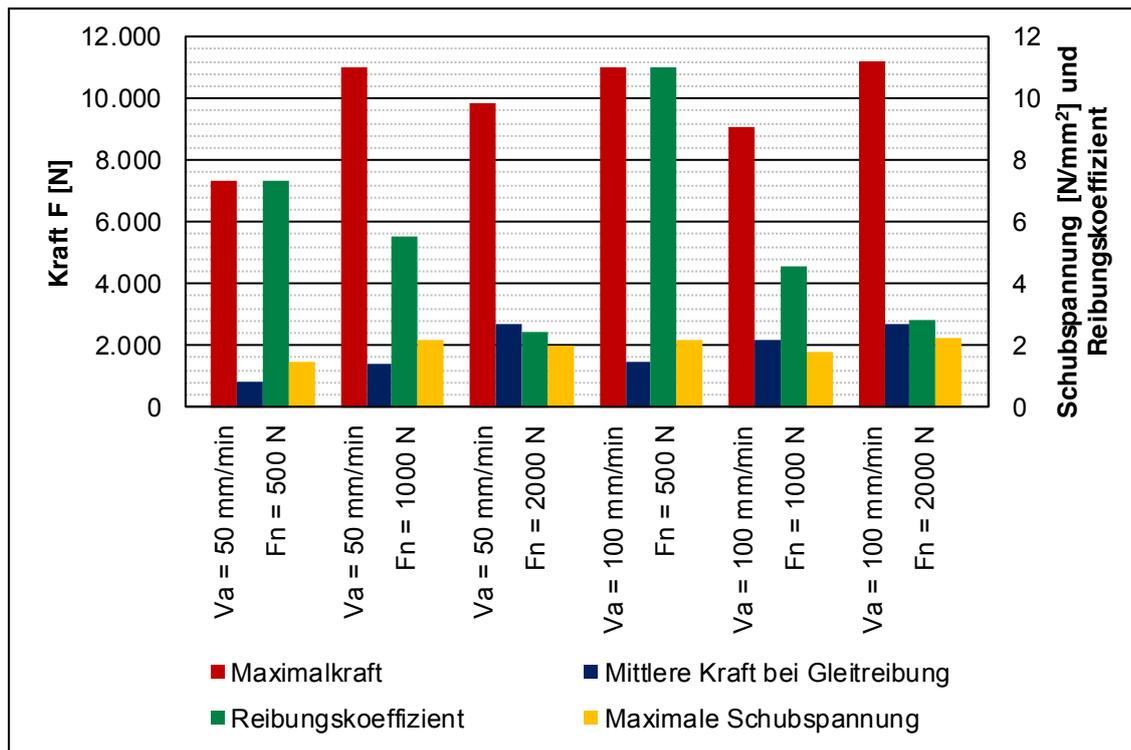


Bild 6.41 Einfluss unterschiedlicher Auszugsgeschwindigkeiten und Klemmkräfte auf die Maximalkraft, die maximale Schubspannung, die mittlere Kraft bei Gleitreibung sowie die Haft- und Gleitreibungskoeffizienten

Eine höhere Klemmkraft führt bei den linearen Auszugsversuchen ebenfalls zu einer höheren maximalen Auszugskraft sowie zu einem höheren mittleren Kraftniveau im Bereich der Gleitreibung. Dies ist damit zu begründen, dass eine höhere Klemmkraft zu einer entsprechend höheren Reibkraft in der Einspannung der Probe führt.

6.6.1.2 Gleiten zwischen Prepreg und Metalloberfläche

Neben dem interlaminaren Gleiten spielt für das Prepregpressen während des Umformprozesses auch das Gleiten zwischen Prepreg und Metalloberfläche eine bedeutende Rolle. Bei dem direkten Prepregpressen wird das unausgehärtete Prepreg in eine bereits umgeformte Metallstruktur eingeformt, sodass das Prepreg während der Umformoperation auf dem Metallbauteil, d. h. beispielsweise bei dem Hutprofil insbesondere im Flanschbereich, abgleitet. Als Metalloberfläche in dem Prozess sind der Werkzeugstempel sowie Niederhalter oder Ziehleisten zu sehen. Hierzu wurde der lineare Auszugsversuch genutzt. Auf den Klemmböcken wurden Blechplatten befestigt, die als Reibpartner zu dem Prepreg dienen. Bei den Versuchen wurde lediglich eine Prepreglage zwischen die Klemmböcke gelegt und über die Klemmkraft fixiert. Anschließend wurde diese Einzellege ausgezogen. Die maximalen Auszugskräfte für verschiedene Versuchsparameter sind in Bild 6.42 abgebildet.

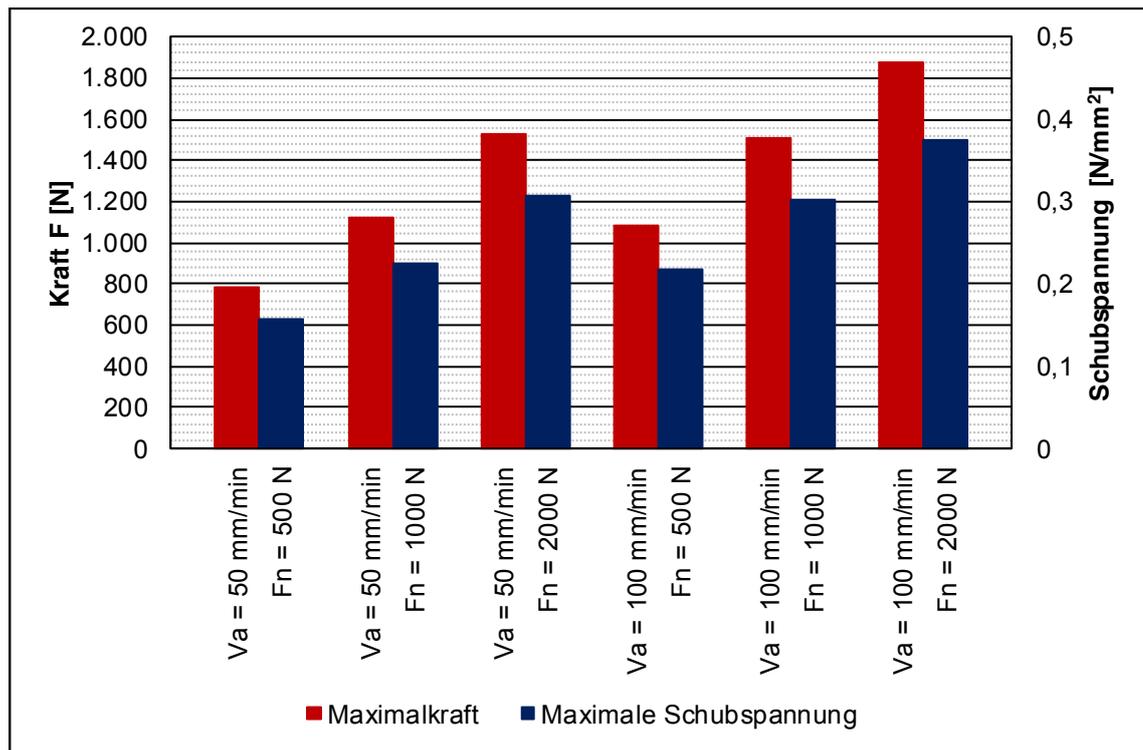


Bild 6.42 Gleiten zwischen Prepreg und Metalloberfläche

Im Vergleich zu den linearen Auszugsversuchen (Kapitel 6.6.1.1, Bild 6.41) liegen die Maximalkräfte bzw. maximalen Schubspannungen deutlich niedriger. Teilweise wird nur etwa ein Zehntel der Kraft benötigt. Dieser Unterschied kann auf die glatte Oberfläche der Blechhalbzeuge zurückgeführt werden.

Es können die gleichen Schlüsse wie bei den linearen Auszugsversuchen gezogen werden. Eine Erhöhung der Auszugsgeschwindigkeit führt ebenso wie eine größere Klemmkraft zu einer höheren Auszugskraft. Der Einfluss der Temperatur wurde an dieser Stelle nicht explizit untersucht. Es lässt sich jedoch vermuten, dass eine steigende Temperatur auch beim Gleiten zwischen Prepreg und Metalloberfläche zu niedrigeren Auszugskräften führt.

6.6.1.3 Umgelenkte Auszugsversuche

Die umgelenkten Auszugsversuche ermöglichen eine Untersuchung des Zwischenlagengleitens von Prepregs unter zusätzlicher Beachtung des Einflusses eines Einzugs über einen Flanschradius. Dadurch sollen Rückschlüsse auf die Gestaltung von Flanscbereichen beim Prepregpressen ermöglicht werden.

Der Einfluss der Temperatur, der Einfluss verschiedener Radien sowie der Einfluss der Auszugsgeschwindigkeit wurden bei einer Klemmkraft von $F_K = 1000$ N untersucht. ^[277S] Wie bei den linearen Auszugsversuchen zeigt sich ein charakteristischer Kraft-Weg-Verlauf. Nach einem steilen, linearen Anstieg bis zur maximalen Auszugskraft erfolgt zunächst ein deutlicher Kraftabfall. Dieser ist jedoch weniger stark ausgeprägt als bei den linearen Auszugsversuchen. Vielmehr ist ein sukzessives Absinken der

Auszugskraft festzustellen. Anschließend folgt ein stetiger Kraftabfall bis zum vollständigen Auszug der mittleren Prepreglage. Für höhere Temperaturen ist der Übergang von Haft- zu Gleitreibung deutlich schwächer ausgeprägt. Ab etwa 50 °C verschwindet der damit einhergehende Kraftpeak vollständig.

Der Einfluss der unterschiedlichen Parameter auf die maximale Auszugskraft und auf die maximale Schubspannung ist in Bild 6.43 dargestellt. Die Kraft sinkt mit steigender Temperatur deutlich ab. Dahingegen steigen die Kräfte mit steigender Auszugsgeschwindigkeit an. Bei höheren Temperaturen wird der Einfluss einer höheren Auszugsgeschwindigkeit jedoch geringer. Für eine Temperatur von $T = 60\text{ °C}$ sind die Unterschiede in der maximalen Auszugskraft und dem sich anschließenden Kraftniveau nur marginal. Es lassen sich keine signifikanten Unterschiede mehr in den Kurvenverläufen feststellen. Eine höhere Auszugsgeschwindigkeit führt hier lediglich zu einem rascheren Erreichen der maximalen Auszugskraft.

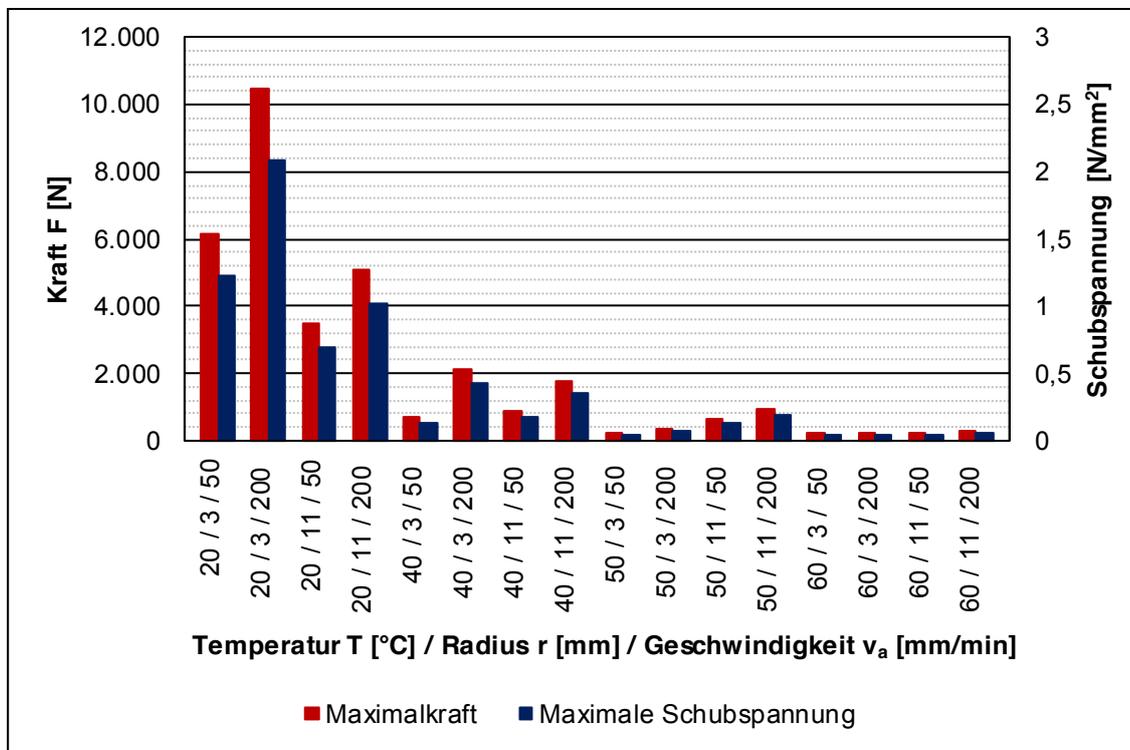


Bild 6.43 Einfluss unterschiedlicher Temperaturen, Radien und Auszugsgeschwindigkeiten

Wie auch bei den linearen Auszugsversuchen (Kapitel 6.6.1.1) kann eine Abhängigkeit der Auszugskräfte von der Temperatur bzw. der Viskosität des Matrixharzes beobachtet werden. Insbesondere für niedrige Temperaturen wie z. B. 20 °C zeigt sich, dass die maximalen Auszugskräfte sowie das sich anschließende Kraftniveau für einen kleinen Radius deutlich höher liegen als für einen größeren Radius. Bei ansteigender Temperatur wird dieser Unterschied geringer. Zum Teil kehrt er sich um, so dass ein größerer Radius zu höheren Auszugskräften führt. Der Radius von $r = 3\text{ mm}$ wirkt eher als Kante, über die das Prepreg gezogen wird. Dabei entstehen aufgrund der kleinen Kontaktfläche nur geringe Reibkräfte. Vielmehr wird insbesondere bei höheren Temperaturen Matrixharz abgestreift. Das Entstehen von wirksamen Reibkräften, die der Aus-

zugsrichtung entgegengerichtet sind, erfolgt erst bei einem größeren Radius, wie z. B. dem Radius $r = 11$ mm. Die ausziehende Prepreglage liegt in diesem Fall großflächiger an dem Flansch an.

6.6.1.4 Zusammenfassung

Aus den Untersuchungen zum Zwischenlagengeiten können verschiedene Rückschlüsse auf den Prozessablauf des Prepregpressens gezogen werden. Sehr deutlich ist der Einfluss der Temperatur. Um komplexe Bauteilgeometrien mittels Prepregpressen in einer hohen Qualität fertigen zu können, sollten die Prepregs vor der Formgebung vorgewärmt werden. Eine niedrigere Auszugsgeschwindigkeit führt zu geringeren Kräften und damit zu einem besseren Umformverhalten, da ein Lagengleiten begünstigt wird. Eine niedrigere Umformgeschwindigkeit, die mit der hier untersuchten Auszugsgeschwindigkeit korreliert, führt zu besseren Ergebnissen. Beispielsweise liegt die Verschiebungsgeschwindigkeit zwischen zwei benachbarten Lagen bei einer realen, sehr schnellen Umformoperation (Umformzeit 0,5 s) bei ca. 40 mm/min^[281]. Insofern ist die Umformgeschwindigkeit unter Abwägung wirtschaftlicher und technischer Aspekte eher niedriger zu wählen. Eine höhere Klemmkraft führt auch zu höheren Auszugskräften. Dies ist z. B. bei der Wahl der Niederhalterkräfte zu beachten. Höhere Klemm- bzw. Niederhalterkräfte erlauben die Abformung komplexerer Geometrien, jedoch kann dies in den Radien der herzustellenden Bauteilgeometrie zu den eingangs beschriebenen Problemen wie z. B. dem Faserknicken oder Faserwelligkeit führen. Wird das Prepreg bei dem Umformprozess über einen Radius wie den Flanschradius geführt, ist zu beachten, dass größere Radien zu höheren Kräften führen. Gegebenenfalls können hier das lokale Einbringen von Trennfolien bzw. geeigneten Schmiermitteln oder ein automatisiertes Drapieren mit einem entsprechenden Drapierwerkzeug^{[282P] [283P]} positiv wirken.

6.6.2 Scherrahmenversuch

Bei der Umformung von FVK-Halbzeugen kommt es u. a. zu einer Umorientierung der Verstärkungsfasern.^{[264] [284]} Dies ist durch die anisotropen Eigenschaften von FVK bedingt. Das charakteristische Verhalten von FVK-Halbzeugen wie Geweben zeigt sich in der Spannungs-Dehnungs-Kurve oder einer Scherspannungs-Scherwinkel-Kurve. Für trockene Gewebehalbzeuge gibt es hierzu eine Reihe von Forschungsarbeiten. Für die Umformung von Prepregs, die als Gelege vorliegen, sind aktuell kaum Erkenntnisse vorhanden. Ergebnisse experimenteller Untersuchungen stammen beispielsweise von WARRIOR et al.^[285].

Zugversuche für textile Flächengebilde sind in DIN EN ISO 13934 beschrieben.^[286N]^[287N] Hierüber kann die wahre Spannungs-Dehnungs-Kurve bzw. Fließkurve bestimmt werden. Bei der Umformung von FVK besitzt die Formänderung durch Scherung die größte Bedeutung, da z. B. Gewebe dieser Belastungsart den mit Abstand geringsten Widerstand entgegensetzen. Es kommt zu dem sogenannten TRELIS-Effekt. Dabei

ändert sich der Winkel zwischen den Kett- und Schussfäden. Daneben kann es bei ondulierten Fasern zu einer Faserstreckung kommen. Weitere Effekte sind die Faserverschiebung, die Faserdehnung oder die Bildung von Falten durch lokale Schubbeanspruchungen. Während der Scherung laufen drei Phasen ab. Zunächst erfolgt eine Scherung ohne Gleiten, gefolgt von einer Scherung mit Gleiten und einer anschließenden Blockierung der Fasern. Diese Blockierung führt schließlich zur Faltenbildung, da das Ausweichen des kompaktierten Materials aus der Ebene den geringsten Widerstand bietet (Bild 6.44). ^{[264] [284] [288]}

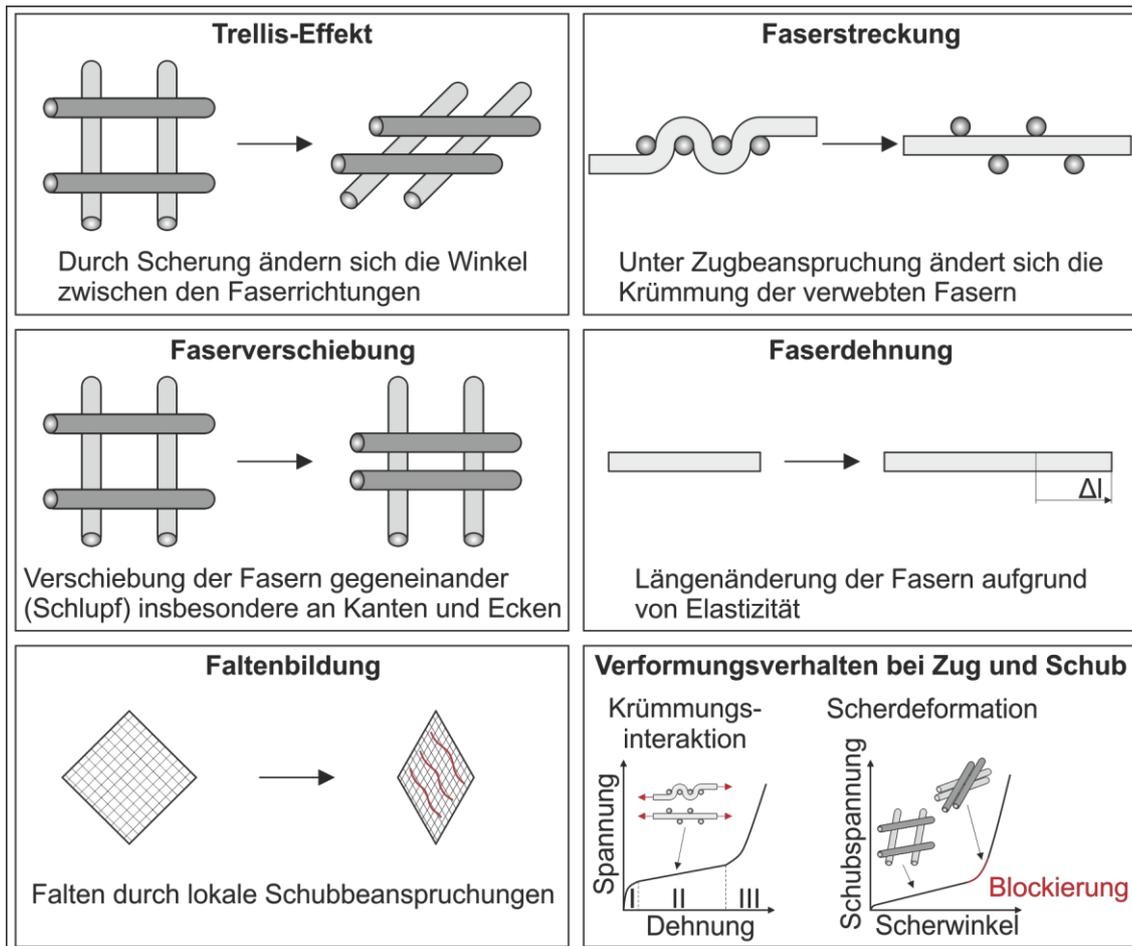


Bild 6.44 Effekte, die zu einer Änderung der Faserorientierung führen, und Verformungsverhalten bei Zug- und Schubbelastung nach BERTHOLD ^[272], BALLHAUSE ^[289] und SKÖCK-HARTMANN ^[267]

Zur Untersuchung des Scherverhaltens von FVK-Halbzeugen kann ein einfacher Schubversuch, ein Schrägzugversuch oder ein Scherrahmenversuch verwendet werden. Im Folgenden soll auf den Scherrahmenversuch oder auch Picture-Frame-Test zurückgegriffen werden. Dieser Versuchsaufbau wird oftmals zur Parameteridentifikation verwendet. In der Literatur wurden u. a. verschiedene Gewebetypen und Prepregs untersucht. Die den Scherverlauf charakterisierenden Größen sind der Scherwinkel, der Scherwinkel am Blockierungspunkt und die Scherspannung. ^{[267] [284] [290] [291] [292] [293]}

Diese Kennwerte werden anschließend im Allgemeinen in Materialkarten für die Finite-Elemente-Simulation abgelegt. In dieser Arbeit werden Rückschlüsse auf das Umformverhalten von Prepregs gezogen. Diese Erkenntnisse fließen z. B. in die Definition von Gestaltungsrichtlinien (Kapitel 7.5) ein.

Ein Scherrahmen besteht aus einem quadratischen Rahmen mit gelenkig gelagerten Eckpunkten. In zwei gegenüberliegende Eckpunkte wird bei den Versuchen eine Zugkraft eingeleitet, wodurch sich der Rahmen verzerrt und eine Scherung in das zu prüfende Textil induziert wird. Es gibt verschiedene Aufbauten von Scherrahmen, wobei sich zudem die Größe der Versuchsaapparaturen und die Abmaße der eingesetzten Proben unterscheiden. Der entwickelte und im Folgenden verwendete Aufbau ist in Bild 6.45 illustriert. ^[294S] Das Prepreg weist hierbei eine Prüffläche von 150 x 150 mm auf.

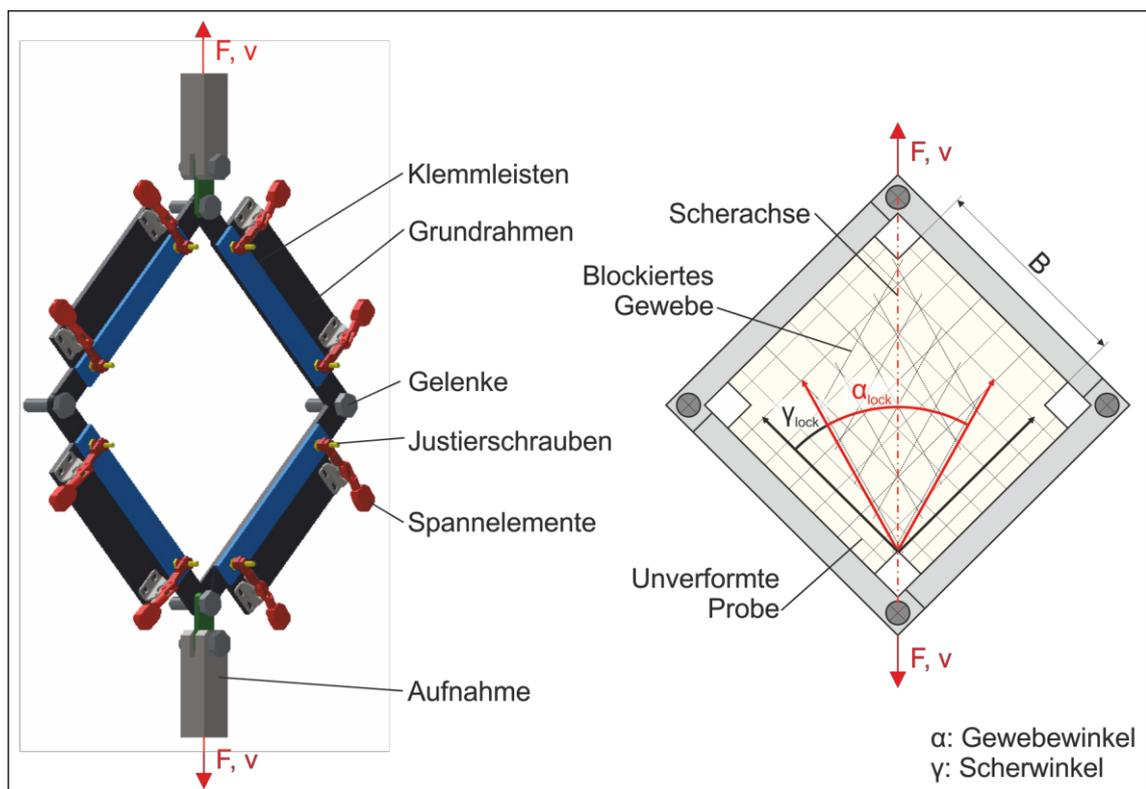


Bild 6.45 Aufbau des Scherrahmenversuchs

Die Kraft-Weg-Verläufe lassen sich mittels der folgenden Beziehungen in einen Scherspannungs-Scherwinkel-Verlauf überführen:

$$\gamma = 90^\circ - \alpha \quad (6.9)$$

$$\tau_s = \frac{F}{2 \cdot \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot B} \quad (6.10)$$

Die für die Untersuchungen verwendeten Proben wurden zunächst auf das vorgesehene Maß geschnitten und mit einem Linienmuster versehen, um neben den gemessenen Kennwerten auch eine optische Auswertung zu ermöglichen. Anschließend wurden sie in den Scherrahmen eingespannt und dieser in die Prüfmaschine eingesetzt.

Es wurden verschiedene Laminataufbauten untersucht. In Bild 6.46 dargestellt sind die Ergebnisse für 9-lagige $(90/0/90/0/90)_s$ sowie für 3-lagige $(0/0)_s$ Lamine unter verschiedenen Winkeln. Der Winkel wurde dabei auf die Faserausrichtung der obersten Lage bezogen. Ein Winkel von 0° entspricht der Scherachse. In dem Diagramm sind verschiedene Kraft-Weg-Verläufe sowie ein Scherspannungs-Scherwinkel-Verlauf zu sehen. Bei Winkeln von $22,5^\circ$ und 45° steigt die Kraft zunächst an. Bereits nach kurzer Zeit flacht die Steigung der Kurve ab und geht in einen linear steigenden Bereich über. Zum Ende hin steigt die Kraft wiederum an. Ein Winkel von 45° bedingt ein geringeres Kraft- bzw. Spannungsniveau, da die Fasern deutlicher außerhalb der Belastungsrichtung liegen. Einen gegenteiligen Effekt hat ein Winkel von 0° sowie bei einem bidirektionalen Laminataufbau auch ein Winkel von 90° . Hier steigen die Kräfte und Spannungen aufgrund der Faserausrichtung in Belastungsrichtung sehr stark an.

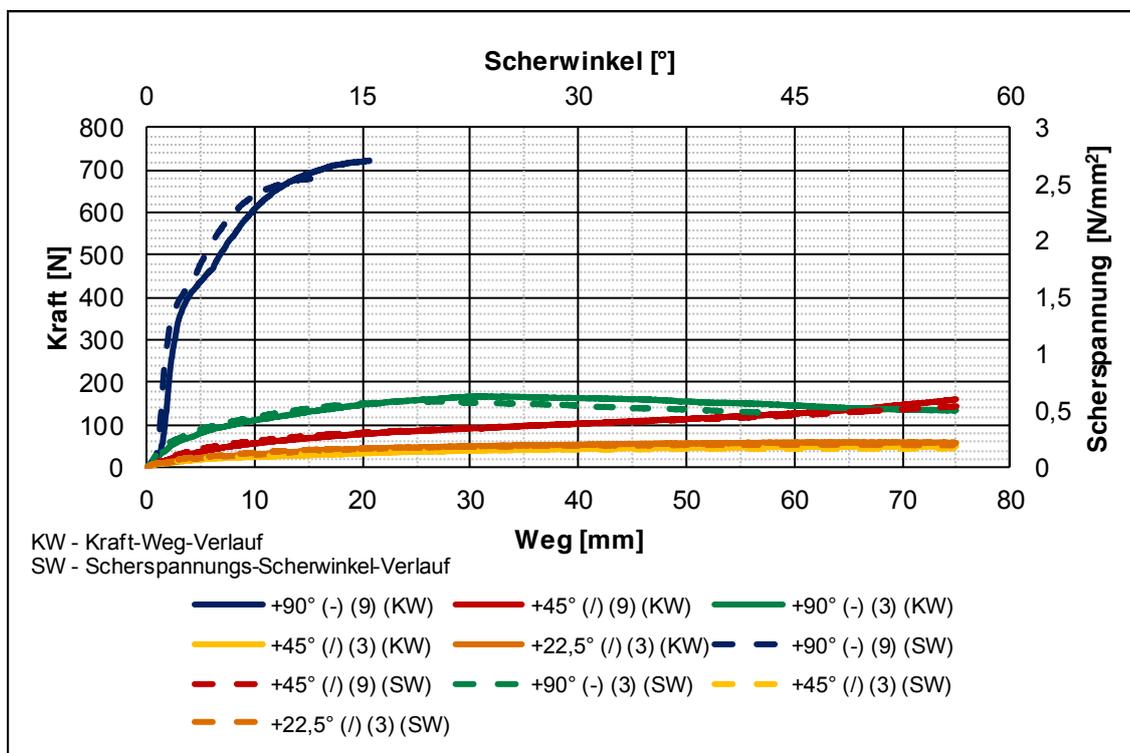


Bild 6.46 Mittels Scherrahmenversuchen ermittelte Kraft-Weg- und Scherwinkel-Scherspannungs-Verläufe für unterschiedliche Prepregaufbauten

Bei allen getesteten Prüfkörpern kam es bereits nach einem geringen Weg zur Bildung kleiner Falten in und zu Aufwölbungen auf den obersten Faserlagen. Die Größe dieser Fehlstellen lag im Bereich weniger Millimeter. Die Defekte waren über die gesamte Probe regelmäßig verteilt. Die inneren Faserlagen blieben hiervon unbeeinträchtigt. Bei den unter einem Winkel von 90° geprüften Proben erfolgte zeitnah hierauf die Bildung weiterer großer Falten. Bei den übrigen Proben kam es erst zum Ende des Versuchs zur Bildung großer Falten über die gesamte Probe, was sich auch in dem Kraftanstieg äußert. Die kritischen Scherwinkel liegen gemäß BERTHOLD^[272] und BALLHAUSE^[289] bei den untersuchten Halbzeugen zwischen etwa 3° und ca. 30° . Die Ergebnisse korrelieren mit anderen Scherrahmenversuchen, wie denen von WARRIOR et al.^[285] Diese Er-

gebnisse können z. B. für die Simulation des Umformvorganges genutzt werden. ^[284] Hierfür empfiehlt sich eine Erweiterung der experimentellen Basis, z. B. um verschiedene Gelege- oder Gewebetypen sowie andere Lamine.

6.6.3 Einfluss der Vorwärmung und der Umformgeschwindigkeit

Der deutliche Einfluss der Temperatur und der Umformgeschwindigkeit auf die Umformigenschaften von duroplastischen Prepregs sind u. a. aus den Versuchen zum Zwischenlagengleiten bekannt. An einer Halbkugelgeometrie wurde der Einfluss einer Vorwärmung sowie unterschiedlicher Umformgeschwindigkeiten auf die Bauteilqualität untersucht. Für die Untersuchung des Temperatureinflusses wurden nach dem Zugschnitt die Prepregs in einem Umluftofen auf eine definierte Temperatur aufgewärmt und die Temperatur für eine bestimmte Zeit gehalten. Dabei wurde ein Temperaturbereich von 20 bis 90 °C betrachtet. ^{[14] [295S]} Die Untersuchungen unter erhöhter Temperatur wurden bei einer konstanten Umformgeschwindigkeit von 100 mm/min durchgeführt. Die Variation der Umformgeschwindigkeit erfolgte bei Raumtemperatur.

Der Einfluss verschiedener Vorwärmtemperaturen auf die Umformung einer Halbkugel-Geometrie ist in Bild 6.47 dargestellt. Die Geometrie konnte bei allen Temperaturen gut ausgeformt werden. Mit steigender Temperatur verringerte sich die Anzahl und die Größe der Falten im Flanschbereich.

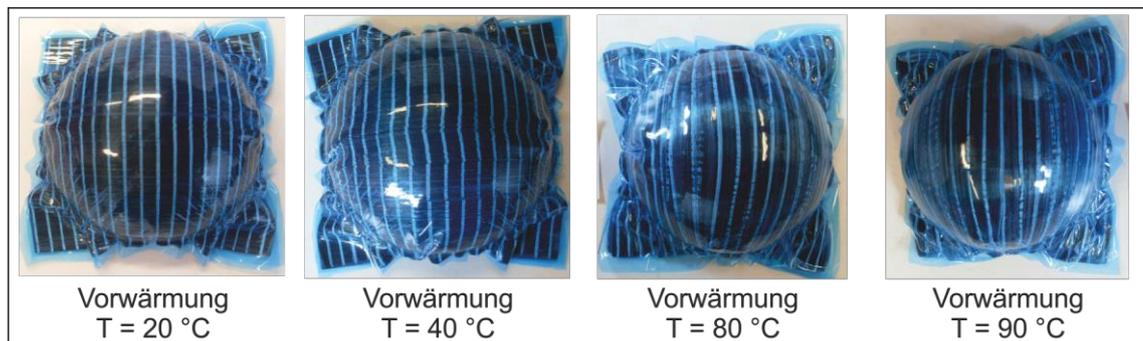


Bild 6.47 Einfluss verschiedener Vorwärmtemperaturen auf die Umformung einer Halbkugel-Geometrie

Der Einfluss einer Vorwärmung der Prepregs auf die während der Umformung aufgenommenen Kraft-Weg-Verläufe ist in Bild 6.48 deutlich zu erkennen. Mit steigender Temperatur sinkt das durchschnittliche Kraftniveau ab, wobei dies deutlich unter dem einer gemeinsamen Umformung liegt. ^[271] Bei einem Weg von etwa 45 mm, was einer fast vollständigen Einformung des Prepregs entspricht, liegt die Differenz zwischen Raumtemperatur und 90 °C bei ca. 450 N. Dabei ist zu erwähnen, dass die notwendige Umformkraft bei 90 °C lediglich 250 N beträgt. Insofern konnten die Ergebnisse der Untersuchungen zum Zwischenlagengleiten bestätigt werden. Eine erhöhte Vorwärmtemperatur führt zu besseren Umformigenschaften, d. h. einer verminderten Faltenbildung und einer geringeren Faserverschiebung.

In Bild 6.48 sind zudem Kraft-Weg-Verläufe für verschiedene Umformgeschwindigkeiten aufgetragen. Der Umformvorgang beginnt bei einem Weg von 10 mm. Zunächst steigen die Kräfte leicht an. Ab einem Weg von etwa 30 mm nehmen die Kurven einen exponentiellen Verlauf an. Der Kraftanstieg zum Ende der Umformung ist die Folge des vollständigen Zufahrens des Werkzeugs bei einem Weg von 45 mm. Zwischen einem Weg von etwa 36 mm und 45 mm kommt es zu einem Plattdrücken von großen Falten im Flanschbereich. Dies äußert sich ebenso in einer erhöhten Kraft wie das anschließende Verdrängen des noch nicht ausgehärteten Prepregs aus der Kavität ab einem Weg von 45 mm. Mit zunehmender Geschwindigkeit steigt die durchschnittliche Kraft leicht an, wobei die Differenz nur sehr gering ist. Allerdings muss hier festgehalten werden, dass die hier realisierten Umformgeschwindigkeiten deutlich unter denen einer hydraulischen Umformpresse liegen.

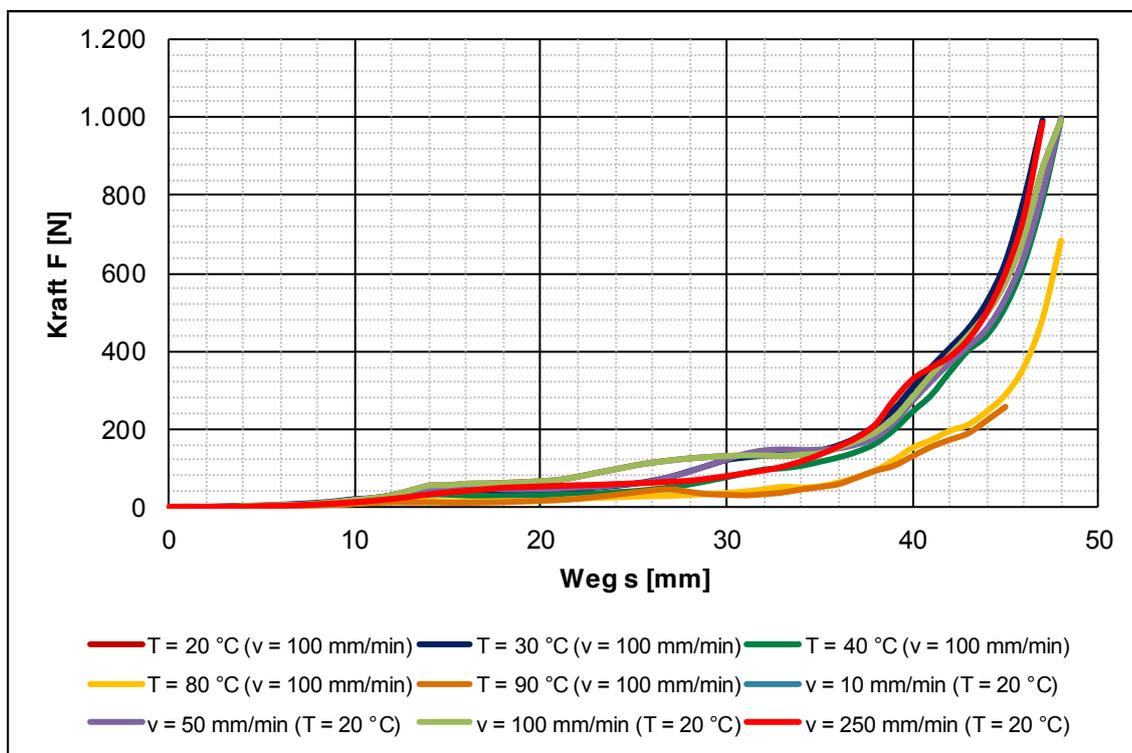


Bild 6.48 Einfluss verschiedener Vorwärmtemperaturen und Umformgeschwindigkeiten

6.7 Thermische Eigenspannungen in Hybridwerkstoffen

Aufgrund der unterschiedlichen Werkstoffeigenschaften, insbesondere der unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten von Kohlenstofffasern, Epoxidharzmatrix und metallischer Komponente kommt den thermischen Eigenspannungen im Hybridverbund eine besondere Rolle zu. Diese Problematik wird durch unsymmetrische Lageraufbauten und hohe Fertigungstemperaturen, welche genutzt werden, um den Prozess zu beschleunigen, zusätzlich verschärft. Zur Abschätzung der wirkenden Spannungen wurden diese in einem ersten Schritt für unterschiedliche Materialkombinationen und Prozessparameter analytisch berechnet. Anschließend wurden diese Ergebnisse mit

real hergestellten Proben verifiziert. Dies erfolgte anhand einer mechanischen Biege- bzw. Krümmungsmethode. [6] [142] [163] [296] [297]

Für die Berechnungen wurden die an den verwendeten Werkstoffen ermittelten mechanischen Kennwerte, wie die E-Moduln, verwendet (Kapitel 5.1.1). Hinzu kamen Literaturwerte für die Wärmeausdehnungskoeffizienten sowie Querkontraktionszahlen. Für reine Kohlenstofffasern beträgt der Wärmeausdehnungskoeffizient $-0,1 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$ (0° -Richtung) und $10 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$ (90° -Richtung), während Epoxidharz einen Wärmeausdehnungskoeffizienten von 60 bis $70 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$ aufweist. [298] Im Werkstoffverbund aus Faser und Matrix liegt dieser Kennwert bei $0,2 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$ (0° -Richtung) bzw. $23 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$ (90° -Richtung). [299] [300] Für einen Mehrschichtenverbund sind Werte zwischen 2 und $4 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$ zu finden. [301] Der Wärmeausdehnungskoeffizient für Stahl beträgt rund $12 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$. [191] [301] Da die analytischen Berechnungen von einem Verkleben der Komponenten bei erhöhter Temperatur mit anschließendem Abkühlprozess ausgehen, gilt: $\Delta T < 0$. [302]

Zur Durchführung der experimentellen Untersuchungen wurden zunächst Hybridplatten gepresst, aus denen anschließend Streifenproben entnommen wurden. Die Aushärtetemperaturen variierten zwischen 140 und 200°C bei einer Presszeit von 10 min bzw. 15 min bei 140°C . Zudem wurde der reale Prepreg-Press-Prozess mit einer Haltezeit von 90 s bei 180°C sowie einer anschließenden Nachhärtung für 30 min bei 180°C simuliert. Die Prüfkörper weisen bedingt durch die wirkenden Eigenspannungen eine Verformung auf. Mittels einer Biegevorrichtung wurden die verformten Proben bis zu einem definierten Nullniveau in den ursprünglichen ebenen Zustand zurückverformt. Während dieses Vorgangs wurden die Kraft und der Weg aufgezeichnet. Aus den Ergebnissen wurden in einem letzten Schritt die thermischen Eigenspannungen bestimmt (Bild 6.49).

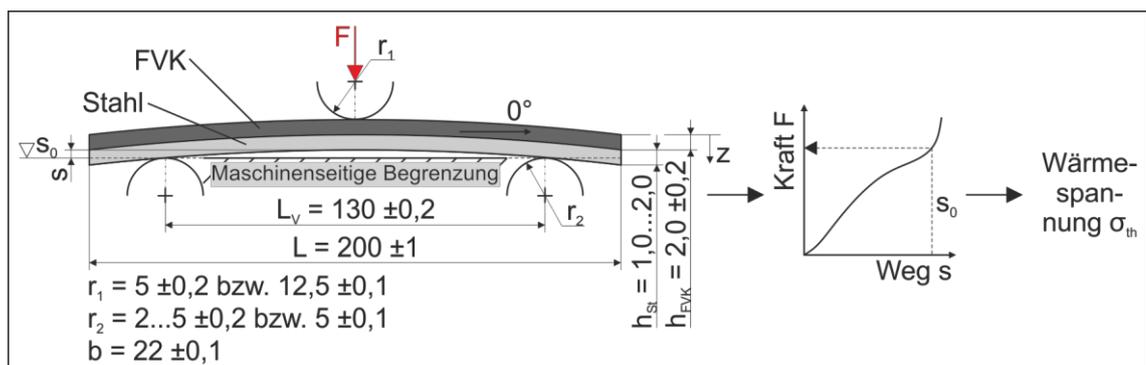


Bild 6.49 Versuchsaufbau zur Ermittlung der thermischen Eigenspannungen

6.7.1 Analytische Berechnung der thermischen Eigenspannungen

Eine Möglichkeit, die thermischen Eigenspannungen zu berechnen, ist die Anwendung der Balkentheorie. Hierfür wurden zunächst die jeweiligen Flächenschwerpunkte (5.1) und Flächenträgheitsmomente (5.2) für die einzelnen Lagen des Hybrid-Aufbaus bestimmt. Anschließend wurden die thermischen Belastungen ermittelt:

$$N_{xth} = \int E \cdot \alpha_{th} \cdot \Delta T \, dA \quad (6.11)$$

$$M_{zth} = - \int E \cdot y \cdot \alpha_{th} \cdot \Delta T \, dA \quad (6.12)$$

$$M_{yth} = \int E \cdot z \cdot \alpha_{th} \cdot \Delta T \, dA \quad (6.13)$$

Unter Anwendung von

$$EA = \int E \, dA \quad (6.14)$$

$$EI_z = \int E \cdot y^2 \, dA \quad (6.15)$$

$$EI_y = \int E \cdot z^2 \, dA \quad (6.16)$$

konnten die Spannungen anschließend mittels (6.17) berechnet werden:

$$\sigma_x = E \cdot \left(\frac{N_x + N_{xth}}{EA} - \frac{M_z + M_{zth}}{EI_z} \cdot y + \frac{M_y + M_{yth}}{EI_y} \cdot z - \alpha_{th} \cdot \Delta T \right) \quad (6.17)$$

Die äußeren Lasten N_x , M_y , M_z sowie M_{zth} nahmen in dem vorliegenden Fall den Wert null an. Ferner gilt, dass die Biegung des Balkens dem Reziproken des Krümmungsradius entspricht:

$$\varphi_y = \frac{M_y + M_{yth}}{EI_y} = \frac{1}{R} \quad (6.18)$$

Mithilfe des Krümmungsradius kann anschließend die Verschiebung in der Mitte der Biegeprobe bestimmt werden:

$$h = \frac{l^2}{8 \cdot R} \text{ für } R \gg l \quad (6.19)$$

Die auf diese Weise berechneten Verläufe der thermischen Spannungen in den bei unterschiedlichen Temperaturen hergestellten Hybridverbunden zeigen Bild 6.50 und Bild 6.51. Die einzelnen Verläufe ähneln sich entsprechend dem Lagenaufbau: ((90/0/0/90/0)_s/St). Im FVK weisen die in Belastungsrichtung ausgerichteten Lagen deutlich höhere Spannungsniveaus auf als die quer angeordneten Lagen. Für die einzelnen Orientierungen ist jeweils ein linearer Verlauf erkennbar. Die 90°-Lagen sind im Mittel mit rund 15 bis 25 N/mm² beansprucht, wobei das Minimum in Grenzschichtnähe erreicht wird. Die 0°-Lagen weisen im Mittel Spannungen zwischen ca. 25 und -100 N/mm² (1 mm Stahl) bzw. zwischen ca. -10 und -90 N/mm² (2 mm Stahl) auf. Das Minimum liegt auch hier in Grenzschichtnähe. Die Spannungen im Stahl betragen im Mittel zwischen rund 100 und -50 N/mm² (1 mm Stahl) bzw. zwischen etwa -125 und -90 N/mm² (2 mm Stahl). In der Grenzschicht liegen Spannungen im Bereich von

rund 20 bis 25 N/mm² vor. Insgesamt liegen somit je nach Verbundaufbau und Herstellungstemperaturen z. T. erhebliche thermische Eigenspannungen im Verbund vor.

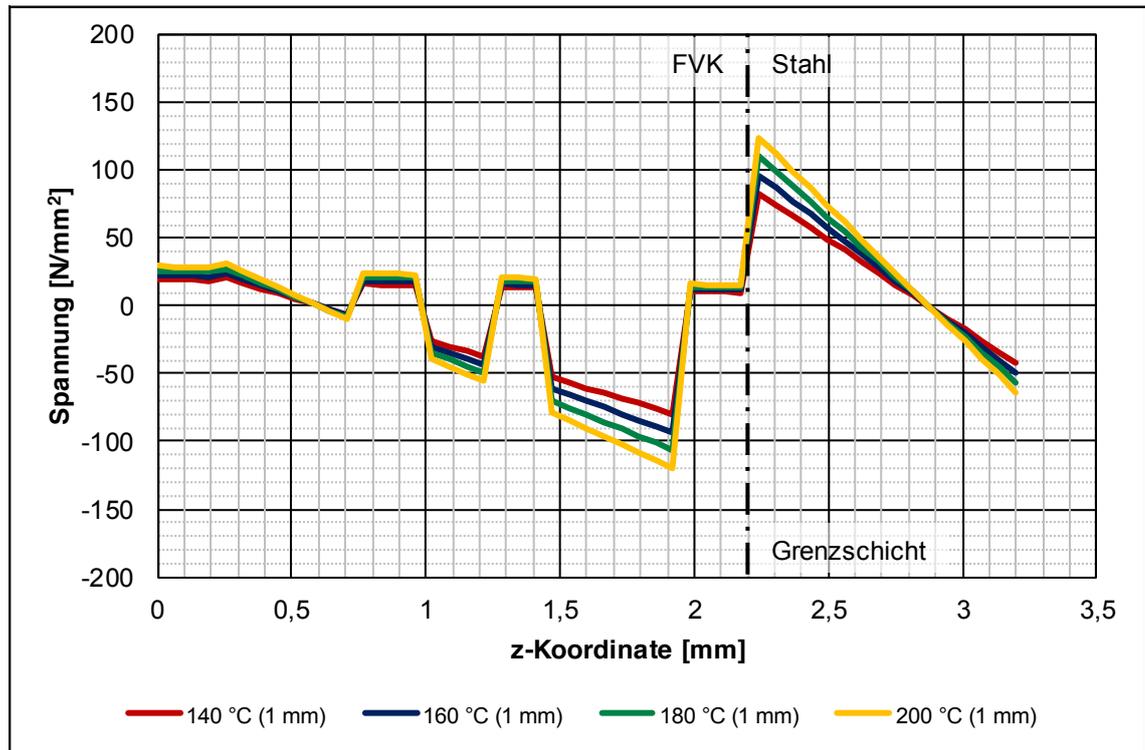


Bild 6.50 Berechnete Verläufe der thermischen Spannungen in bei unterschiedlichen Temperaturen hergestellten Hybridverbunden mit 1 mm Stahl-Wanddicke

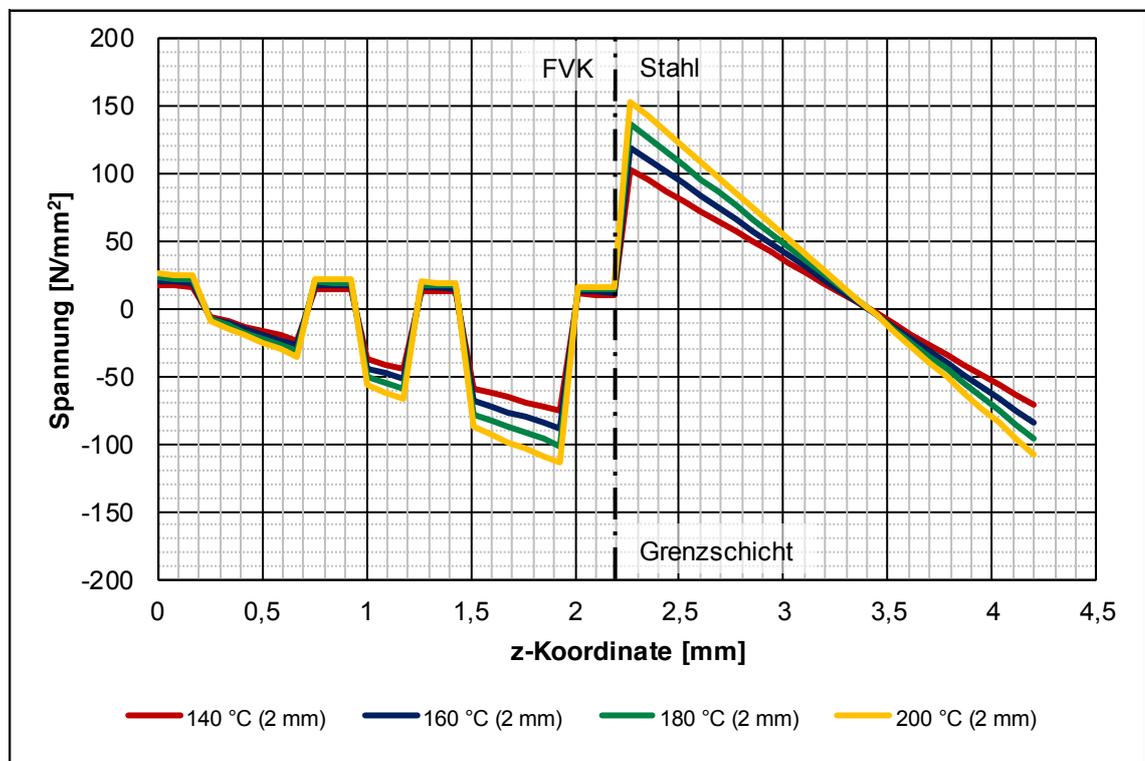


Bild 6.51 Berechnete Verläufe der thermischen Spannungen in bei unterschiedlichen Temperaturen hergestellten Hybridverbunden mit 2 mm Stahl-Wanddicke

Neben den Spannungsverläufen konnten die Durchbiegungen der Hybridverbunde infolge der thermischen Eigenspannungen mit (6.18) und (6.19) berechnet werden (Bild 6.52). Diese steigen mit zunehmender Herstellungstemperatur und abnehmender Stahl-Wanddicke an.

	140 °C	160 °C	180 °C	200 °C
1 mm Stahl	-1,42 mm	-1,65 mm	-1,89 mm	-2,13 mm
2 mm Stahl	-0,98 mm	-1,14 mm	-1,30 mm	-1,47 mm

Bild 6.52 Berechnete Durchbiegungen der Hybridverbunde

6.7.2 Abschätzung der real wirkenden thermischen Eigenspannungen

Um die analytisch ermittelten Ergebnisse für die thermischen Eigenspannungen in den Hybridverbunden zu verifizieren, wurden Proben mit den entsprechenden Prozessparametern hergestellt und untersucht. Die Vorverformung der Prüfkörper in der Probenmitte beträgt im Ausgangszustand zwischen etwa 1,4 und 2,2 mm für die Hybridstrukturen aus 1 mm DC01-Stahl und Prepreg sowie zwischen etwa 0,9 und 1,4 mm für diejenigen aus 2 mm DD11-Stahl und Prepreg (Bild 6.53).

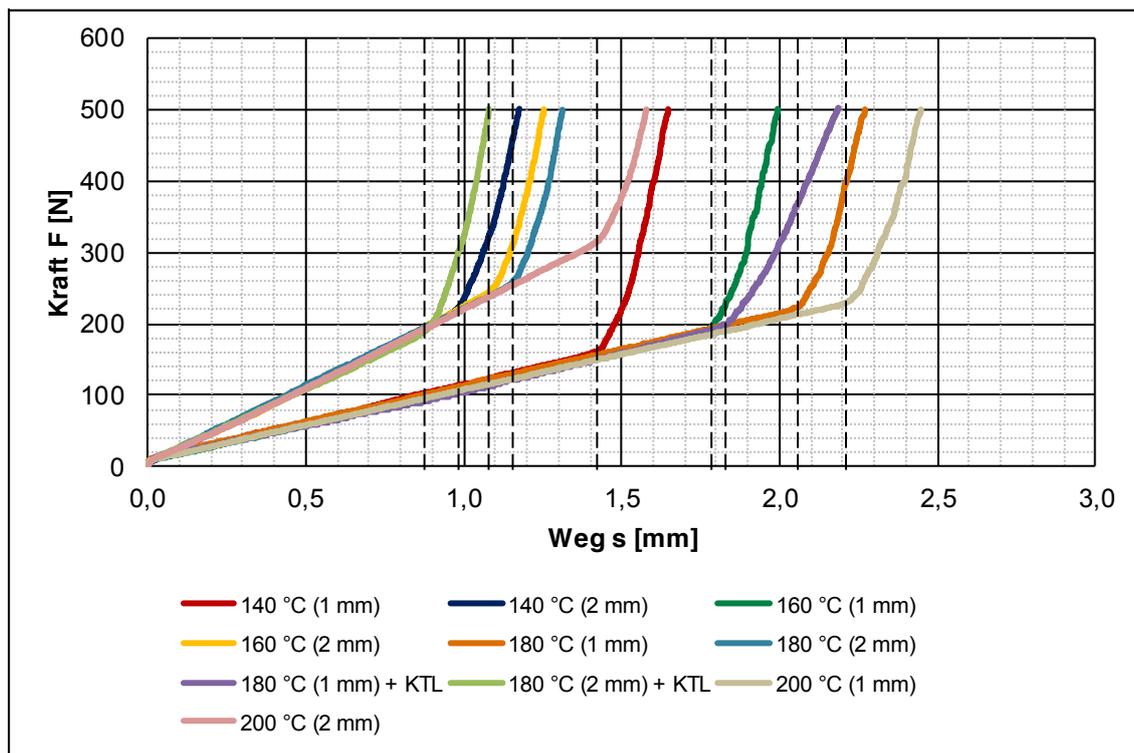


Bild 6.53 Während der Rückverformung der Biegeproben ermittelte Kraft-Weg-Verläufe

Die während der Rückverformung der Biegeproben ermittelten Kraft-Weg-Verläufe sind in Bild 6.53 dargestellt. Alle Verläufe weisen zu Beginn ein lineares Verhalten auf. Beim Auftreffen auf die maschinenseitige Wegbegrenzung steigt die Kraft rasch an. Aus dem Kraft-Weg-Niveau zu Beginn dieser Kraftüberhöhung können Rückschlüsse auf die in der Struktur vorherrschenden thermischen Eigenspannungen gezogen werden. Dieses liegt für die Hybridstrukturen aus 1 mm DC01-Stahl und Prepreg zwischen etwa 160

und 225 N sowie zwischen etwa 190 und 315 N für die Hybride aus 2 mm DD11-Stahl und Prepreg. Dabei steigen die zur Rückverformung notwendigen Kräfte mit zunehmender Temperatur an. Eine nachgeschaltete simulierte KTL reduziert die Kräfte deutlich von 224 N auf 199 N (1 mm, 180 °C, -11,1 %) bzw. von 258 N auf 191 N (2 mm, 180 °C, -25,8 %). Gleiches gilt für die Verschiebungen. Dieser Effekt ist wahrscheinlich auf die Temperaturerhöhung weit über die Glasübergangstemperatur des ausgehärteten Matrixharzes von ca. 120 °C während der KTL zurückzuführen. Hierdurch sinken die mechanischen Eigenschaften, wie z. B. die Steifigkeiten oder die Festigkeiten, deutlich ab und es werden Kriech- und Relaxationsvorgänge im Kunststoff begünstigt. Dies kann wiederum in Kräfteumlagerungen und/oder (Rück-)Verformungen resultieren. ^[86]

Eine Aufstellung der experimentell ermittelten Verschiebungs- und Kraftwerte zeigt Bild 6.54. Die Abweichungen der Verschiebungen zwischen analytischer Berechnung und Experiment liegen zwischen +0,7 und +8,3 % (1 mm) bzw. zwischen 0,0 und -9,2 % (2 mm). Unter Beachtung der Tatsache, dass Literaturwerte für die Berechnung verwendet wurden, z. B. für die Wärmeausdehnungskoeffizienten, ist eine gute Übereinstimmung zu erkennen.

	Verschiebung [mm]			Kraft [N]
	Rechnung	Experiment	Abweichung [%]	Experiment
1 mm				
140 °C	1,42	1,43	+0,7	162,68
160 °C	1,65	1,80	+8,3	190,57
180 °C	1,89	2,04	+7,4	224,30
200 °C	2,13	2,20	+3,2	228,56
2 mm				
140 °C	0,98	0,98	0,0	220,52
160 °C	1,14	1,10	-3,6	246,60
180 °C	1,30	1,19	-9,2	258,02
200 °C	1,47	1,43	-2,8	317,09

Bild 6.54 Experimentell ermittelte Verschiebungen und Kräfte der Biegeproben

Die in den Hybridproben wirkenden Eigenspannungen äußern sich in einer Verformung. An dieser Stelle wurde angenommen, dass sich das verformte System in einem Gleichgewichtszustand befindet. Dies bedeutet, dass die Rückverformung unabhängig von den Eigenspannungen ist, wodurch gilt:

$$w_{\text{verformt}}(x, T) + w_{\text{rückverformt}}(x, F) = 0 \quad (6.20)$$

Hierbei war $w_{\text{verformt}}(x, T)$ aus den experimentellen Untersuchungen bekannt. Die für die Verschiebung $w_{\text{rückverformt}}(x, F)$ notwendige Querkraft musste nun ermittelt werden. Anschließend konnte ein Abgleich mit der analytischen Berechnung der thermischen Eigenspannungen erfolgen.

Ausgegangen wurde hierbei für das vorliegende Mehrbereichsproblem von der Differentialgleichung der Biegelinie des Balkens für statisch bestimmt gelagerte Systeme, wobei es sich um eine Differentialgleichung zweiter Ordnung handelt: ^[191]

$$\frac{w''}{(1 + w'^2)^{\frac{3}{2}}} = -\frac{M(x)}{E \cdot I_y} = \frac{F}{2} \cdot \frac{x}{E \cdot I_y} \quad (6.21)$$

Ist die Durchbiegung sehr klein im Verhältnis zur Länge des Balkens, vereinfacht sich dieser Zusammenhang.

$$w'' = \frac{F \cdot x}{2 \cdot E \cdot I_y} \quad (6.22)$$

Die Integration lieferte zunächst den Neigungswinkel und schließlich die Durchbiegung der Biegelinie:

$$w' = \frac{F}{2 \cdot E \cdot I_y} \cdot \left[\frac{x^2}{2} + c_1 \right] \quad (6.23)$$

$$w = \frac{F}{2 \cdot E \cdot I_y} \cdot \left[\frac{x^3}{6} + c_1 \cdot x + c_2 \right] \quad (6.24)$$

Die Integrationskonstanten konnten über die Randbedingungen bestimmt werden. Der Neigungswinkel in der Balkenmitte war null:

$$w' \left(x = \frac{l}{2} \right) = 0 \Rightarrow c_1 = -\frac{l^2}{8} \quad (6.25)$$

Dazu war die Durchbiegung an der Lagerstelle bekannt, woraus sich die zweite Integrationskonstante ergab:

$$w(x = 0) = 0 \Rightarrow c_2 = 0 \quad (6.26)$$

Somit ergab sich der Neigungswinkel und die Durchbiegung der Biegelinie zu:

$$w' = \frac{F}{2 \cdot E \cdot I_y} \cdot \left[\frac{x^2}{2} - \frac{l^2}{8} \right] \quad (6.27)$$

$$w = \frac{F}{2 \cdot E \cdot I_y} \cdot \left[\frac{x^3}{6} - \frac{l^2}{8} \cdot x \right] \quad (6.28)$$

Für den betrachteten Hybridbalken setzte sich die Biegesteifigkeit aus dem Anteil für den Stahl sowie für den FVK zusammen:

$$E \cdot I_y = E_S \cdot I_{y,S} + E_F \cdot I_{y,F} \quad (6.29)$$

Ein Auflösen des Zusammenhangs für die Durchbiegung nach der Kraft führte zu:

$$F(x) = \frac{2 \cdot w(x) \cdot E \cdot I_y}{\frac{x^3}{6} - \frac{l^2}{8} \cdot x} \quad (6.30)$$

beziehungsweise für die gesuchte Position $x = \frac{l}{2}$ zu:

$$F\left(x = \frac{l}{2}\right) = -\frac{48 \cdot w\left(x = \frac{l}{2}\right) \cdot E \cdot I_y}{l^3} \quad (6.31)$$

Die auf diesem Weg berechneten Kraftwerte sind gemeinsam mit den experimentell ermittelten Werten in Bild 6.55 dargestellt. Für die 1-mm-Hybride zeigt sich dabei eine sehr gute Übereinstimmung der Ergebnisse. Die Abweichung liegt hier je nach Herstellungstemperatur zwischen -2,1 und 7,2 %. Bei den 2-mm-Proben liegen die experimentell ermittelten deutlich unterhalb der berechneten Werte. Die Abweichungen betragen zwischen 15,8 und 20,2 %. Ein möglicher Erklärungsansatz für die variierenden Abweichungen könnte in einem unterschiedlich ausgeprägten Relaxations- oder Kriechverhalten der Proben liegen, wodurch sich die zeitabhängigen thermischen Eigenspannungen z. T. wieder abbauen.^[86] Des Weiteren ist zu beachten, dass bei dem gewählten Versuchsaufbau (Dreipunkt-Biegung) eine mittige Einleitung einer Einzellast in die Probe erfolgt, wodurch sich ein nicht konstanter Biegemomenten-Verlauf ergibt. Hierdurch könnte sich aufgrund einer nicht idealen, vollständigen Rückverformung eine Abweichung, d. h. eine geringere Kraft, im Vergleich zu einem konstanten Biegemoment bzw. einer idealen, vollständigen Rückverformung über die gesamte Länge der Probe einstellen. Daneben sind die vorliegenden Randbedingungen, z. B. das Zurückgreifen auf Literaturwerte für die Wärmeausdehnungskoeffizienten, als Ursprung möglicher Abweichungen in Betracht zu ziehen. Dass die berechneten Kennwerte für FVK oftmals von dem realen Verhalten abweichen, ist bekannt und wird beispielsweise durch Korrekturfaktoren berücksichtigt. Die Abweichungen betragen bei Versuchen von KOKE für CFK bei den Werten für die E-Moduln beispielsweise rund -21,9 %.^[70]

	Experiment		Berechnung	Abweichung [%]
	Verschiebung [mm]	Kraft [N]	Kraft [N]	
1 mm				
140 °C	1,43	162,68	159,32	-2,1
160 °C	1,80	190,57	200,55	5,2
180 °C	2,04	224,30	227,29	1,3
200 °C	2,20	228,56	245,11	7,2
2 mm				
140 °C	0,98	220,52	255,36	15,8
160 °C	1,10	246,60	286,63	16,2
180 °C	1,19	258,02	310,08	20,2
200 °C	1,43	317,09	372,62	17,5

Bild 6.55 Vergleich der experimentell ermittelten und der berechneten Kraftwerte

Die Abschätzung der thermischen Eigenspannungen zeigt, dass je nach Herstellungstemperatur beträchtliche Wärmespannungen in Hybriden vorliegen können. Die Spannungen liegen in den vorliegenden Fällen für die Einzelkomponenten im elastischen Bereich. Ist der Hybrid Aufbau nicht symmetrisch, äußern sich die Spannungen in einer unerwünschten Verformung der Struktur. Im Einzelfall sind die Auswirkungen auf eine

Konstruktion in Abhängigkeit von den Prozessparametern zu überprüfen. Bei realen Geometrien mit einer großen Steifigkeit bzw. einem großen Flächenträgheitsmoment, wie B-Säulen oder Hutprofilen, sind keine signifikanten Verformungen detektierbar.

6.8 Werkzeugkonzepte

Zur Herstellung von FVK-Bauteilen stehen verschiedene Werkzeugtechnologien zur Verfügung. Es kann zwischen offenen und geschlossenen Werkzeugen unterschieden werden. Offene Werkzeuge besitzen keine geschlossene Kavität. Überschüssiges Matrixharz oder Fasern können herausgedrückt werden. Bei geschlossenen Werkzeugen ist dies durch eine im geschlossenen Zustand entstehende Kavität und eine zusätzlich aufgebrauchte Dichtwirkung nicht bzw. nur in geringem, gewolltem Ausmaß der Fall.

Hybridbauteile unterscheiden sich jedoch hinsichtlich der Anforderungen an die Werkzeugtechnologie von FVK-Bauteilen. So ist z. B. für eine lokale Verstärkung eine Abdichtung auf der metallischen Bauteilkomponente erforderlich. Auch eine konventionelle (Kontur-)Nachbearbeitung oder ein Besäumen der FVK-Komponente sind nicht ohne weiteres möglich. Entsprechend ist ein wesentliches Ziel der Herstellprozesse für Hybridbauteile eine möglichst exakte Abbildung der gewünschten FVK-Kontur, um ein Bauteil ohne eine aufwändige und teure Nachbearbeitung herstellen zu können.

Im Folgenden wird zunächst am Beispiel eines Plattenwerkzeugs die Eignung verschiedener Werkzeugkonzepte zur Herstellung von Hybridbauteilen untersucht. ^[303S] Bei den Versuchen wurden vereinfachend reine FVK-Strukturen auf Basis neunlagiger Prepregs hergestellt. Anschließend werden Möglichkeiten zur Übertragung der Erkenntnisse auf komplexe Geometrien aufgezeigt.

6.8.1 Offene Werkzeuge

Bei den offenen Werkzeugen wird ein nicht ausgehärtetes Prepreg zwischen zwei ebene Platten gelegt. Durch die Beaufschlagung des Prepregs mit Druck und Temperatur beginnt dieses auszuhärten (Bild 6.56). Allerdings sinkt mit steigender Temperatur zunächst die Viskosität der Epoxidharzmatrix ab. In diesem Zeitfenster erfolgt bei konstantem Konsolidierungsdruck ein Auspressen von Matrixharz und Faserlagen, die quer zur Fließrichtung liegen. ^{[101] [264]}

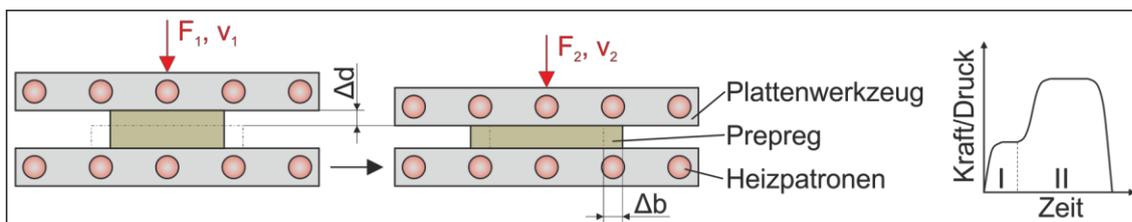


Bild 6.56 Versuchsaufbau für die offenen Werkzeuge

Es wurden verschiedene Untersuchungen mit konstanten Konsolidierungsdrücken zwischen $0,1 \text{ N/mm}^2$ und $1,0 \text{ N/mm}^2$ jeweils bei einer konstanten Temperatur von $180 \text{ }^\circ\text{C}$

durchgeführt. Die Aushärtezeit betrug 5 min. Die nachgeschaltete vollständige Aushärtung erfolgte drucklos in einem Umluftofen bei 180 °C für 30 min. Für die konstanten Drücke war die Abbildung der angestrebten Sollkontur unzureichend. Bei den gewählten Probenabmaßen von 150 x 150 mm betrug der Ausfluss bis zu 35 mm (Bild 6.57). Herausgedrückt wurden jeweils nur Fasern, die senkrecht zur Flussrichtung orientiert waren. Die in Flussrichtung ausgerichteten Fasern blieben von diesem Vorgang unberührt. In den mittleren Bereichen der Platten war die Oberflächenqualität durch den direkten Kontakt zur Werkzeugoberfläche sehr gut. Aus den Platten wurden anschließend Proben entnommen und Schlibfbilder angefertigt. Ab einem Konsolidierungsdruck von über 0,3 N/mm² konnten sehr gute Ergebnisse hinsichtlich der Faserverteilung und des Porengehalts erzielt werden. Bei geringeren Drücken steigt die Porenanzahl merklich an. Gleiches gilt für die Bereiche, in denen Harz und Fasern ausgeflossen sind. Durch den nicht mehr vorhandenen Werkzeugkontakt härten diese Bereiche drucklos aus. Hierdurch wird die Entstehung von Poren begünstigt.

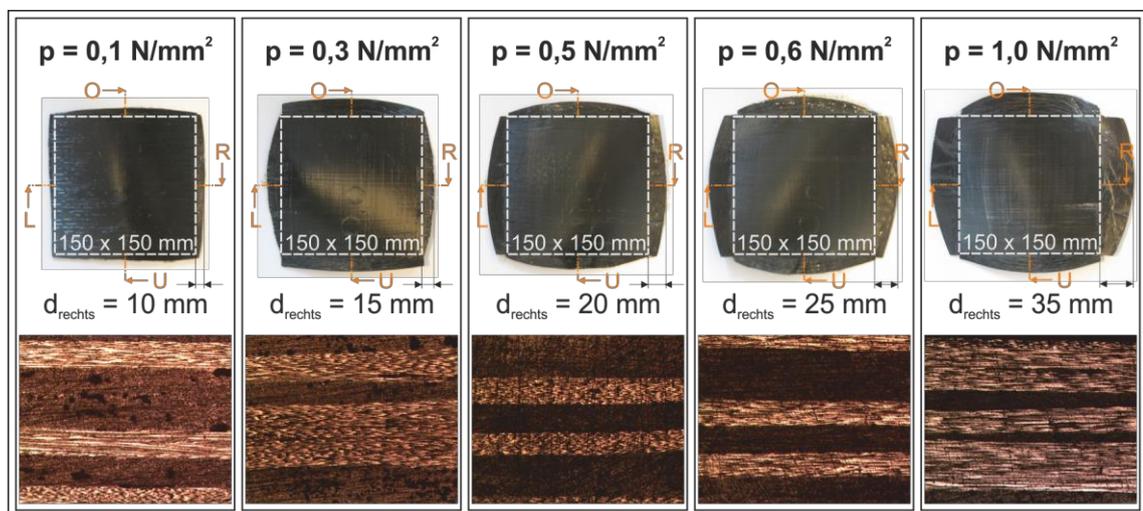


Bild 6.57 Abweichungen von der Sollkontur und Schlibfbilder für verschiedene konstante Konsolidierungsdrücke

Beispielsweise für komplexe Geometrien oder kleine Serien könnte eine aufwändige Dichttechnik auf dem Metallbauteil (Kapitel 6.8.5) technisch nicht umsetzbar oder zu kostspielig sein. Somit gilt es im Rahmen der Untersuchungen des Prepregpressens Ansätze zu finden, um die Bauteile auch mit einem offenen Werkzeugkonzept in hoher Qualität fertigen zu können. Dem signifikanten Ausfließen von Matrix und Fasern kann z. B. durch eine variable Einstellung der Presskraft begegnet werden. So wird zu Beginn ein geringer Druck gewählt. Nach Durchschreiten des Viskositätsminimums der Matrix, insbesondere der äußeren Faserlagen, wird der Druck erhöht, um das Laminat zu verdichten und die Bildung von Poren im Inneren des Verbundes zu verhindern. ^[304P] Diese Art der Prozessführung bedingt eine sehr exakte Einstellung des Konsolidierungsdruckes und eine genaue Kenntnis über den Aushärtegrad der einzelnen Schichten des Prepregs.

6.8.2 Geschlossene Werkzeuge

Die geschlossenen Werkzeuge besitzen im Gegensatz zu den offenen Werkzeugen eine abgedichtete Kavität. Hierdurch kann eine sehr gute Konturgenauigkeit gewährleistet werden. Es wurden vier verschiedene Werkzeugkonzepte entwickelt und untersucht: ein Tauchkantenwerkzeug, ein Quetschkantenwerkzeug, ein Werkzeug mit einer Silikonabdichtung und ein Werkzeug mit einem Dichtrahmen. Die Aufbauten der einzelnen Konzepte sind schematisch in Bild 6.58 dargestellt. ^{[270] [305]}

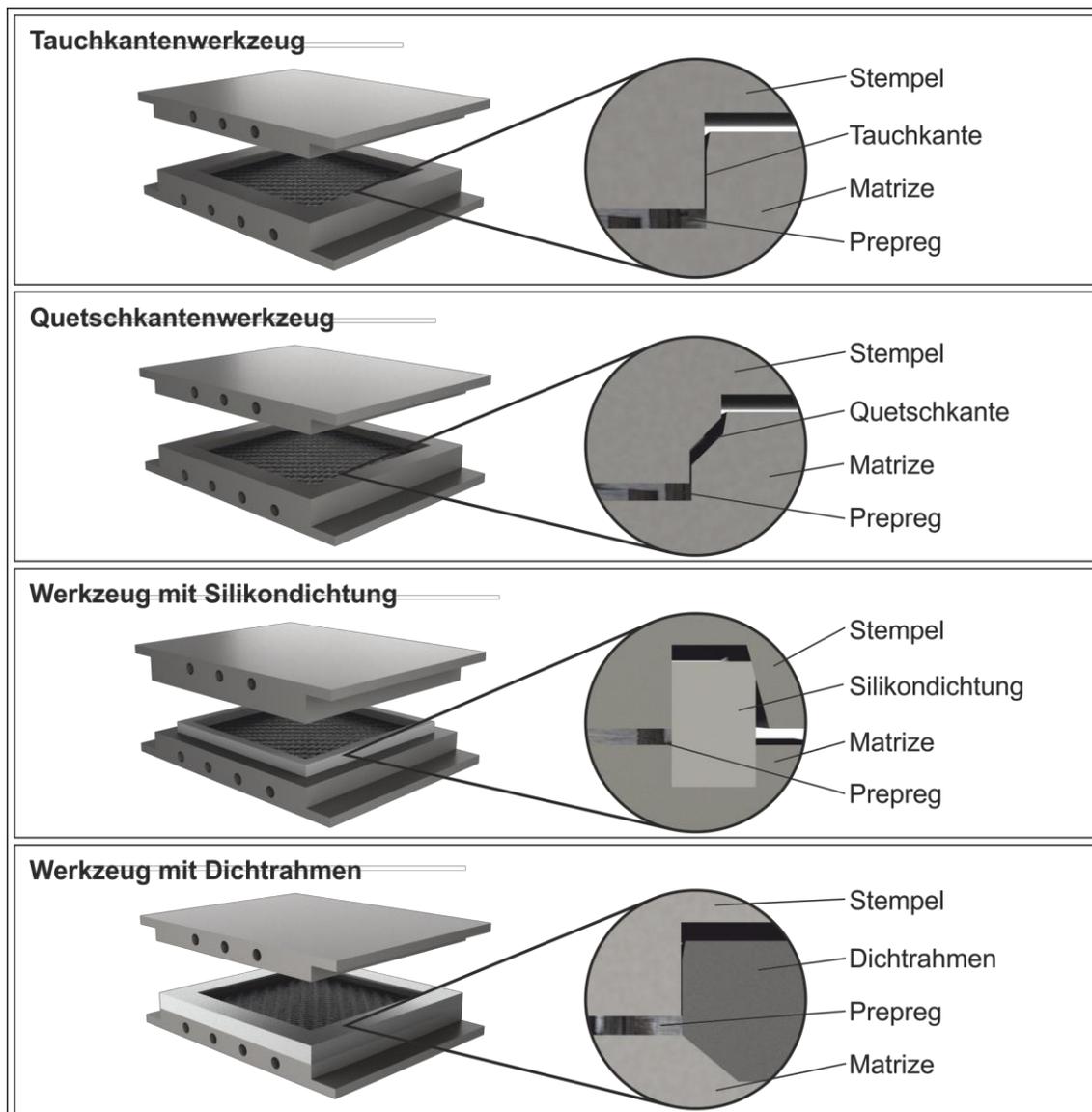


Bild 6.58 Schematische Darstellung des Aufbaus der untersuchten Werkzeugkonzepte

6.8.2.1 Tauchkantenwerkzeug

Tauchkantenwerkzeuge werden bei der Verarbeitung von SMC-Formmassen, beim Nasspressen oder beim Spritzgießen eingesetzt. ^{[73] [83] [98] [255] [306]} Dabei wird der von dem Stempel durchdrungene Raum als Tauchraum und die angrenzende Trennebene als Tauchkante bezeichnet. Zwischen Stempel und Matrize bildet sich der Tauchspalt

aus. ^{[73] [121] [307]} Beim Schließen des Werkzeugs taucht der Stempel in die Matrize ein, so dass die Kavität bereits vor dem eigentlichen Pressvorgang in Öffnungsrichtung abgedichtet wird. Für die Dichtwirkung sind die Tauchkante sowie der Tauchspalt verantwortlich. Ein enger Spalt führt aufgrund der besseren Dichtwirkung zu einer gleichmäßigeren Komprimierung des Prepregs. Allerdings ist die Abnutzung der Tauchkanten bei einer zu engen Gestaltung sehr hoch. Ein zu großer Spalt wiederum verursacht einen hohen Austrieb von Material und führt unweigerlich zu einem höheren Nachbearbeitungsaufwand.

Die Untersuchungen wurden bei verschiedenen Konsolidierungsdrücken durchgeführt. Nach dem Zuschnitt der Prepregs wurden diese in das Werkzeug eingelegt und verpresst. Für alle untersuchten Pressdrücke konnte eine exakte Abbildung der gewünschten Sollkontur sowie eine sehr gute Oberflächenqualität festgestellt werden (Bild 6.59). Durch den Tauchspalt bedingt bildete sich bei allen Proben ein stehender Grat aus. Dieser war mit steigendem Pressdruck stärker ausgeprägt. Die Grate konnten jedoch mit geringem Nachbearbeitungsaufwand entfernt werden. Durch eine enge Tolerierung des Tauchspalts kann gegebenenfalls vollständig auf eine Nachbearbeitung verzichtet werden. Die Schlifffbilder der Proben zeigen, dass auch hier ein Konsolidierungsdruck größer $0,3 \text{ N/mm}^2$ gewählt werden sollte, da dies zu einer guten Faser-Verteilung, einer gleichmäßigen Schichtdicke und einem nahezu porenfreien Laminat führt.

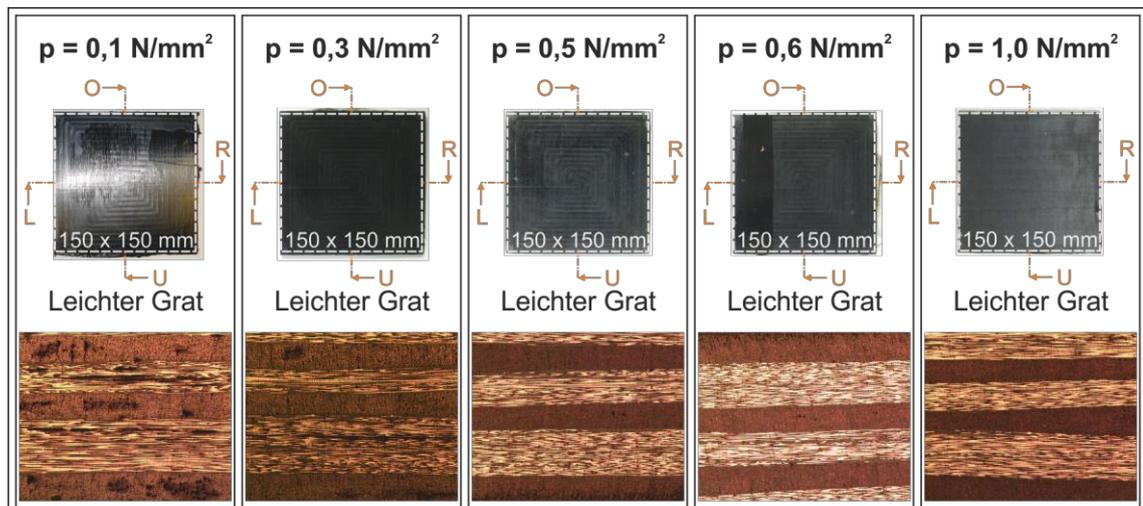


Bild 6.59 Ergebnisse der Untersuchungen an dem Tauchkantenwerkzeug

6.8.2.2 Quetschkantenwerkzeug

Das zweite geschlossene Werkzeugkonzept war als Quetschkantenwerkzeug ausgeführt. Der Aufbau ist vergleichbar mit dem eines Tauchkantenwerkzeugs. Charakteristisch für diese Werkzeugform ist die Abquetschkante. Diese wird durch matrizen- und stempelseitige Gravurflächen gebildet. ^{[73] [307]} Bei dem Pressvorgang wird der unausgehärtete FVK so verdichtet, dass der Materialüberschuss zwischen die Dichtflächen fließt und abgequetscht wird. Durch die Quetschkante entsteht ein charakteristischer,

nahezu liegender Grat. ^[111] Im Gegensatz zum Tauchkantenwerkzeug wird mit einem Materialüberschuss gearbeitet. Dadurch wird eine exakte Füllung der Kavität gewährleistet. Da die Werkzeuge im geschlossenen Zustand mit den Dichtflächen aufeinanderliegen, ist es nicht mehr möglich, das Prepreg weiter zu komprimieren. Sollte zu wenig Material in das Werkzeug eingebracht worden sein, führt dies zu einer unzureichenden Abbildung des Bauteils, schlechteren Eigenschaften und einer schlechteren Oberflächenqualität. ^{[98] [121] [255]}

Die Untersuchungen an diesem Werkzeugkonzept wurden mit den identischen Parametern wie bei dem Tauchkantenwerkzeug durchgeführt. Das Quetschkantenwerkzeug führte zu vergleichbar guten Ergebnissen wie der Tauchkantenverschluss. Bei allen Drücken konnte eine sehr gute Konturgenauigkeit nachgewiesen werden. Der charakteristische liegende Grat bildete sich jedoch erst ab einem Druck von über $0,1 \text{ N/mm}^2$ aus. Dieser konnte jedoch mit vergleichsweise geringem Aufwand entfernt werden, wobei der Aufwand im Vergleich zum Tauchkantenwerkzeug anstieg. Bis zu einem Druck von $0,3 \text{ N/mm}^2$ bestand der Grat fast ausschließlich aus Matrixharz. Bei höheren Drücken kam es auch zum Ausdrücken von Verstärkungsfasern bedingt durch das gewählte Prepreg-Halbzeug. Die Verwendung von Geweben oder verwirkten Gelegen anstatt von nicht verwirkten Gelegen könnte hier Abhilfe schaffen. Die Laminatqualität sowie die Oberflächenqualität waren, wie bei dem Tauchkantenwerkzeug, ab einem Konsolidierungsdruck von $0,3 \text{ N/mm}^2$ sehr gut.

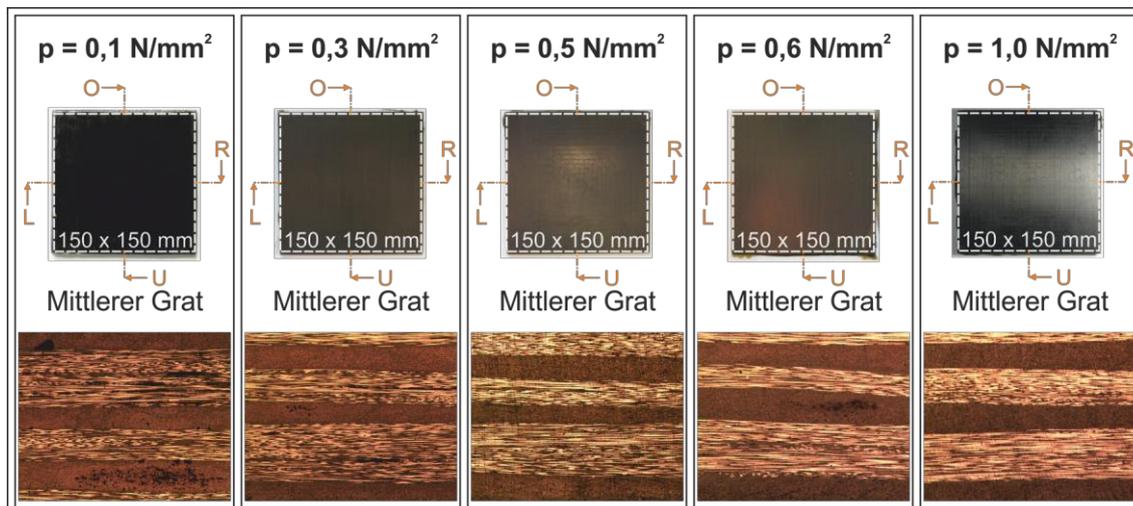


Bild 6.60 Ergebnisse der Untersuchungen an dem Quetschkantenwerkzeug

6.8.2.3 Werkzeug mit Silikonabdichtung

Ein weiteres Konzept stellte ein Werkzeug mit einer Silikonabdichtung dar. Dabei wird die Abdichtung der Kavität durch eine temperaturbeständige Rahmendichtung aus Silikon realisiert. Derartige Dichtungen sind im Bereich der Faserverbundtechnologie aus Autoklav- und RTM-Prozessen bekannt, bei denen sie für eine Vakuumdichtheit sorgen bzw. das Austreten von niedrigviskosem Matrixharz verhindern. ^{[83] [73]} Die Dichtung wird in einer Nut in der Matrize fixiert. Im Stempel ist wiederum eine vergleichbare Nut

vorgesehen, die zusätzlich mit einer einseitigen Schräge auf der dem Prepreg abgewandten Seite versehen ist. Diese Schräge führt während des Pressvorganges zu einer definierten Komprimierung der Dichtung. Ein wesentlicher Vorteil der Silikondichtung ist die Möglichkeit zum Ausgleich von Oberflächenrauigkeiten oder -welligkeiten. [308] Daneben kann das unausgehärtete Prepreg leicht in dem Werkzeug platziert und das fertige Bauteil nach dem Pressvorgang leicht entnommen werden.

Die Untersuchungen des Werkzeugkonzepts mit Silikonabdichtung haben gezeigt, dass für die gewählten Konsolidierungsdrücke zwischen $0,1$ und $1,0 \text{ N/mm}^2$ eine endkonturenahe Bauteilfertigung möglich ist. Die Qualität der hergestellten Bauteile war ab einem Druck von $0,3 \text{ N/mm}^2$ hinsichtlich des Laminats und der Oberfläche sehr gut. Mit steigendem Pressdruck bildete sich jedoch ein leichter stehender Grat aus, indem Matrixharz und bei einem Druck von $1,0 \text{ N/mm}^2$ auch Fasern zwischen Stempel und Silikondichtung geflossen sind. Dieser Grat war vergleichbar mit dem Tauchkantenwerkzeug und konnte mit geringem Aufwand entfernt werden. Durch eine konstruktive Anpassung der stempelseitigen Nut könnte die Dichtpressung optimiert und damit die Gratbildung verhindert werden.

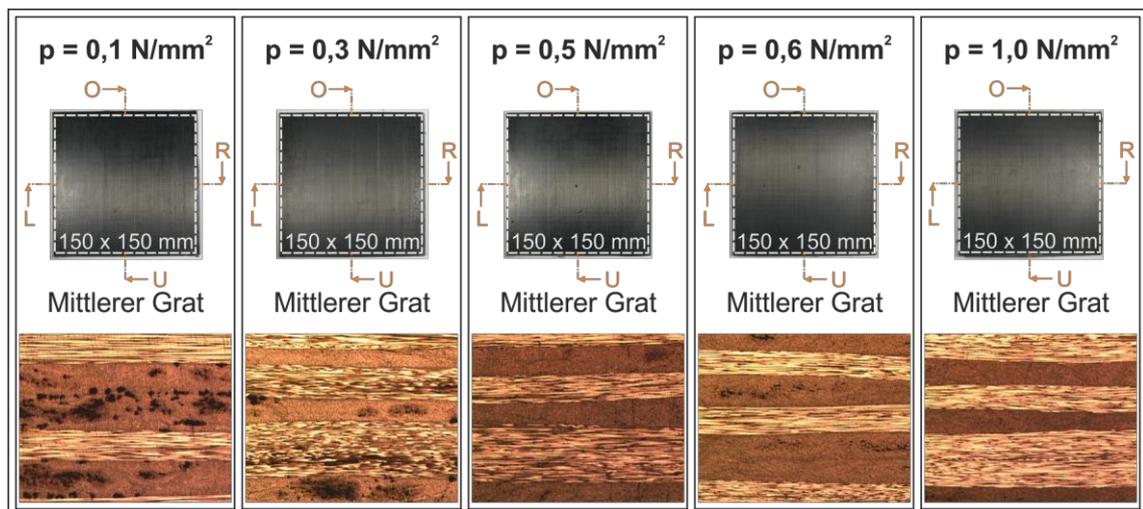


Bild 6.61 Ergebnisse der Untersuchungen an dem Werkzeug mit Silikonabdichtung

6.8.2.4 Werkzeug mit Dichtrahmen

Das letzte untersuchte Konzept war ein Werkzeug mit einem metallischen Dichtrahmen. Dabei wird die Trennebene zwischen Stempel und Matrize durch einen Dichtrahmen abgedichtet. [98] [306] [309] Der Rahmen wird z. B. über Druckfedern am Stempel befestigt. Beim Schließen des Werkzeugs wird der axial bewegliche Rahmen dann auf die Matrize gepresst und gegen diese abgedichtet. Dabei wird er über ineinanderlaufende Schrägen auf der Matrize zentriert. Die als Plateau ausgebildete Matrize ermöglicht ein einfaches Einlegen und Entnehmen der Werkstücke. Bei weiter fortgeschrittenem Schließvorgang des Werkzeugs bildet sich zwischen Dichtrahmen und Stempel ein Tauchspalt aus. Dessen Dichtwirkung ist vergleichbar mit der des Tauchkantenwerkzeugs.

Die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen mit dem Dichtrahmenwerkzeug waren vergleichbar mit denen des Tauchkantenwerkzeugs. Ab einem Druck von $0,3 \text{ N/mm}^2$ kam es zu einem verstärkten Herausdrücken von Matrixharz und Verstärkungsfasern in den Tauchspalt. Der sich bildende Grat konnte wiederum vergleichsweise einfach entfernt werden. Die Konturgenauigkeit der Proben war ebenso wie die Oberflächenqualität sehr gut. Das Dichtrahmenkonzept zeichnete sich durch ein einfaches Entformen der hergestellten Bauteile aus. Ein Konsolidierungsdruck von mindestens $0,3 \text{ N/mm}^2$ führte zu einer guten Laminatqualität und nur wenigen Fehlstellen.

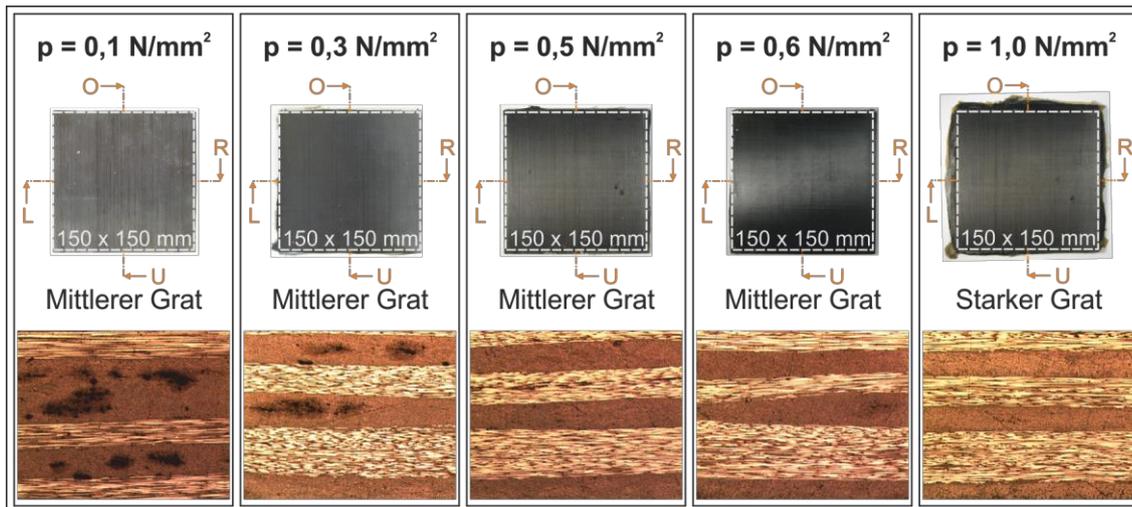


Bild 6.62 Ergebnisse der Untersuchungen an dem Werkzeug mit Dichtrahmen

6.8.3 Einfluss des Werkzeugkonzepts auf die mechanischen Eigenschaften

Neben der Konturgenauigkeit spielt die Laminatqualität eine wesentliche Rolle bei FVK-Bauteilen. Die Laminatqualität hat wiederum einen entscheidenden Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften von Strukturen. Aus diesem Grund wurden mit den vorgestellten Werkzeugkonzepten verschiedene Prüfplatten hergestellt, aus denen anschließend Biegeproben entnommen wurden.

Die maximal erreichten Biegespannungen der Proben liegen zwischen ca. 1400 und 1900 N/mm^2 (Bild 6.63), wobei die Maximalwerte der einzelnen Werkzeugkonzepte bzw. Verfahren zwischen etwa 1770 und 1900 N/mm^2 variieren. Sowohl mit den offenen Werkzeugen als auch mit den verschiedenen geschlossenen Werkzeugkonzepten lassen sich die Eigenschaften der mittels des Autoklavverfahrens hergestellten Proben nachstellen. Bei den mittels offener Werkzeugkonzepte hergestellten Proben zeigen sich optimale Eigenschaften bei einem Druck von etwa $0,3 \text{ N/mm}^2$, während sich die Eigenschaften bei den mittels geschlossener Werkzeuge hergestellten Proben mit zunehmendem Druck verbessern. Wird der Druck bei dem offenen Werkzeug zu groß, resultiert dies in einem Auspressen von Matrixharz und Fasern sowie z. T. in deutlichen Verschiebungen der Fasern. Durch die geschlossene Kavität bei den abgedichteten Werkzeugen werden diese Effekte unterbunden. Höhere Drücke führen hier zu

einer besseren und gleichmäßigeren Konsolidierung bzw. Solidifikation des Laminats, d. h. beispielsweise zu weniger Poren oder zu gleichmäßigeren Schichtdicken.

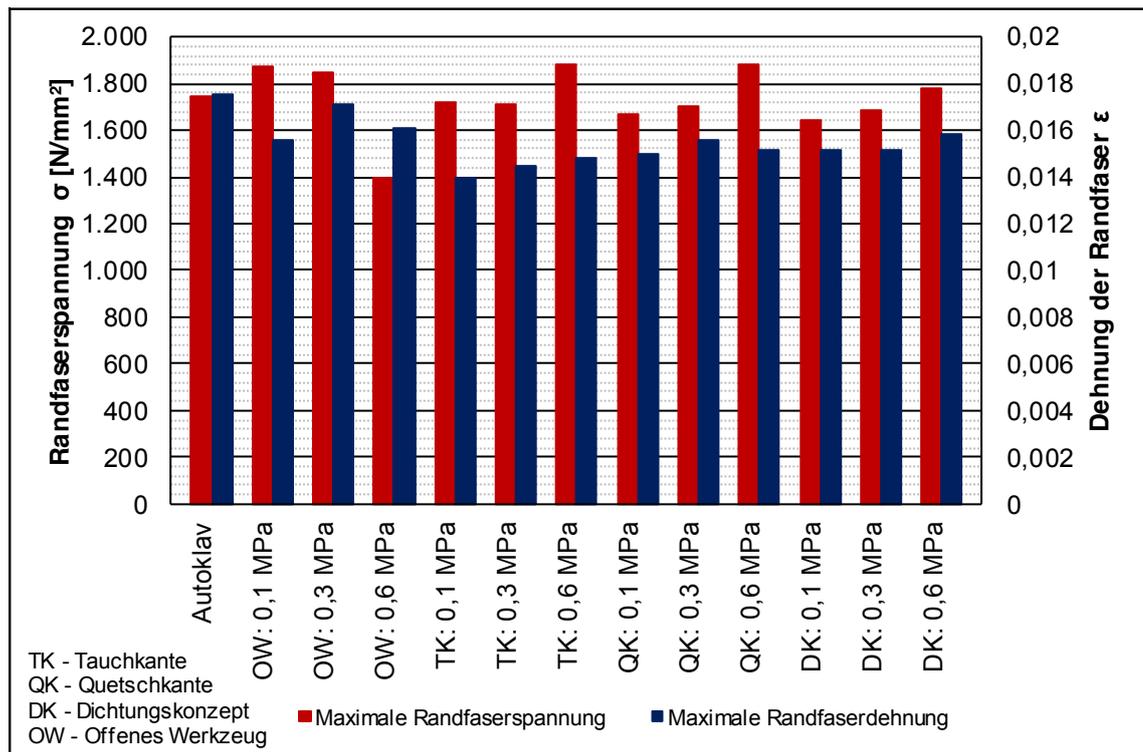


Bild 6.63 Einfluss unterschiedlicher Werkzeugkonzepte und Konsolidierungsdrücke auf die mechanischen Eigenschaften von Biegeproben

6.8.4 Steuerung des Materialflusses während der Umformung

Mit zunehmender Komplexität der herzustellenden Geometrie bedarf es einer Steuerung des Materialflusses während der Umformung, um die Umform- und damit die Bauteilqualität zu optimieren. Diese ist, wie auch bei der Umformung von metallischen Blechen, durch verschiedene Maßnahmen, wie z. B. angepasste Ziehleisten oder segmentierte Niederhalter, realisierbar. ^[271] Das Halbkugelwerkzeug (Kapitel 6.6.3) wurde hierfür um einen segmentierten Niederhalter ergänzt, dessen Niederhalterkraft stufenlos eingestellt werden konnte. ^[310S] Die Krafterzeugung erfolgte mittels Druckfedern. Jedes Segment verfügte über eine Feder sowie eine Führung. Ohne den Einsatz eines Niederhalters konnte das Umformergebnis durch eine Vorwärmung bereits verbessert werden. Trotzdem kam es im Flanschbereich auf den Symmetrieachsen zur Bildung deutlicher Falten im oberen Zargenbereich. Durch den Niederhalter konnten diese Falten vollständig verhindert werden. Lediglich um die umzuformende Geometrie herum entstanden deutliche Falten.

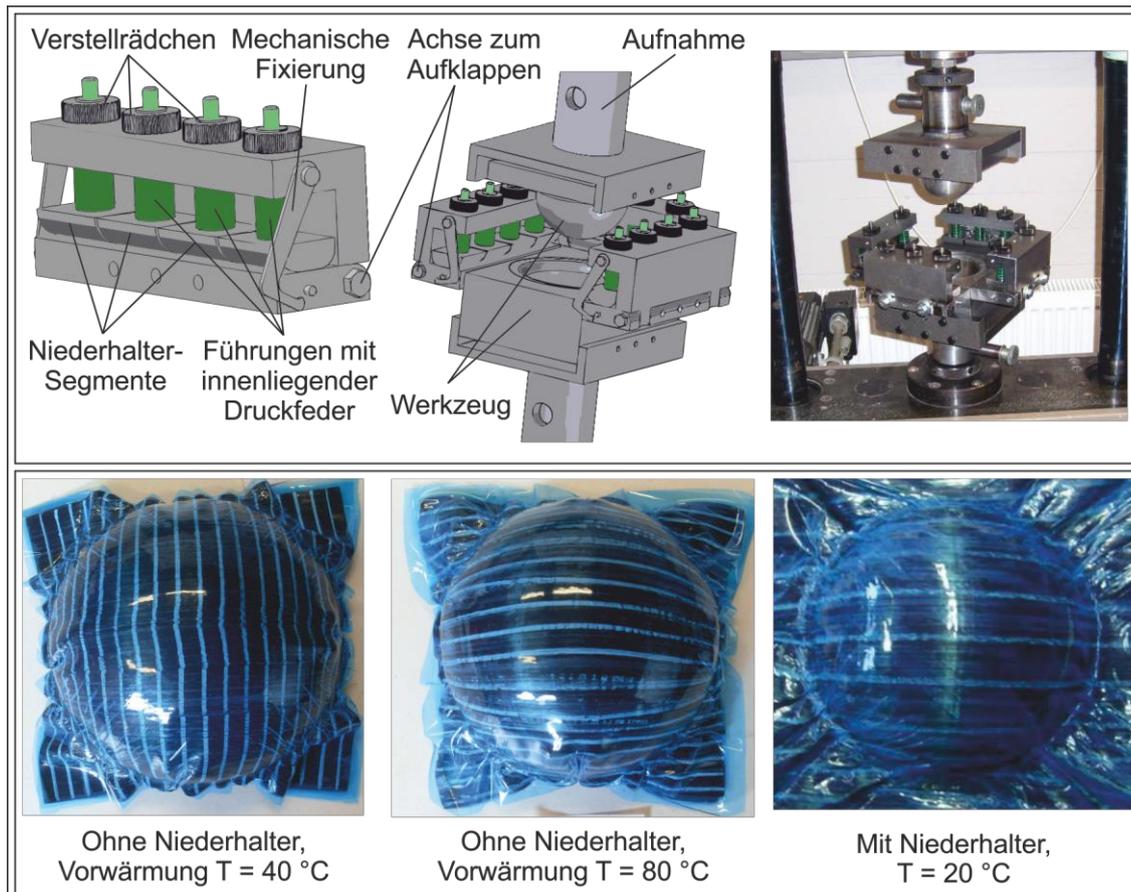


Bild 6.64 Aufbau des Versuchswerkzeugs und Ergebnisse der Umformung einer Halbkugelgeometrie ohne und mit segmentiertem Niederhalter

6.8.5 Werkzeugkonzept zur Herstellung komplexer Geometrien

Die endkonturennahe Herstellung von lokal mit FVK verstärkten metallischen Strukturen mit komplexen Geometrien ist mit den zuvor genannten Werkzeugkonzepten nicht ohne weiteres umsetzbar. Die Realisierung z. B. eines Hutprofils oder einer B-Säule in Hybridbauweise bedingt ein weitergehendes Werkzeugkonzept. Um eine bereits umgeformte metallische Grundstruktur unter Verwendung des Prepregpressens lokal mit einem Prepreg zu verstärken, muss zunächst eine Abdichtung des Oberwerkzeugs auf dem Metallbauteil erfolgen. Zum einen ist die Verstärkung in Längsrichtung begrenzt, zum anderen müssen die Flanschbereiche frei von Matrixharz und Fasern bleiben, um in nachfolgenden Schritten ein Schließblech definiert applizieren zu können. Um auch Fertigungstoleranzen sicher ausgleichen zu können, bietet sich z. B. ein Silikondichtrahmen an.

Für komplexe Geometrien hat sich zudem gezeigt, dass Systeme zur Steuerung des Materialflusses während der Umformung, wie Niederhalter oder Ziehleisten, zu installieren sind. Diese Anforderung wird durch einen gegebenenfalls segmentierten Rahmen erfüllt, in dem auch die Silikondichtung fixiert ist. Beim Schließen des Werkzeugs formt zunächst der Stempel das Prepreg ein. Der Rahmen dient als Niederhalter. Sobald das Prepreg aus dem Flanschbereich herausgezogen wurde, wird der Silikonrah-

men mit einer definierten Kraft auf das Grundbauteil gepresst und erzeugt durch seine charakteristische Form eine Tauch- oder Quetschkante. Das Gegenstück hierzu ist im Stempel ausgeprägt. Nach dem Schließen des Werkzeugs entsteht zwischen dem Rahmen und dem Stempel eine abgedichtete Kavität. Der beim Pressen entstehende Grat kann nach der Entnahme des Bauteils aus dem Werkzeug leicht entfernt oder durch eine Aufwärtsbewegung des Rahmens nach dem Aushärten des Prepregs abgeschert werden.

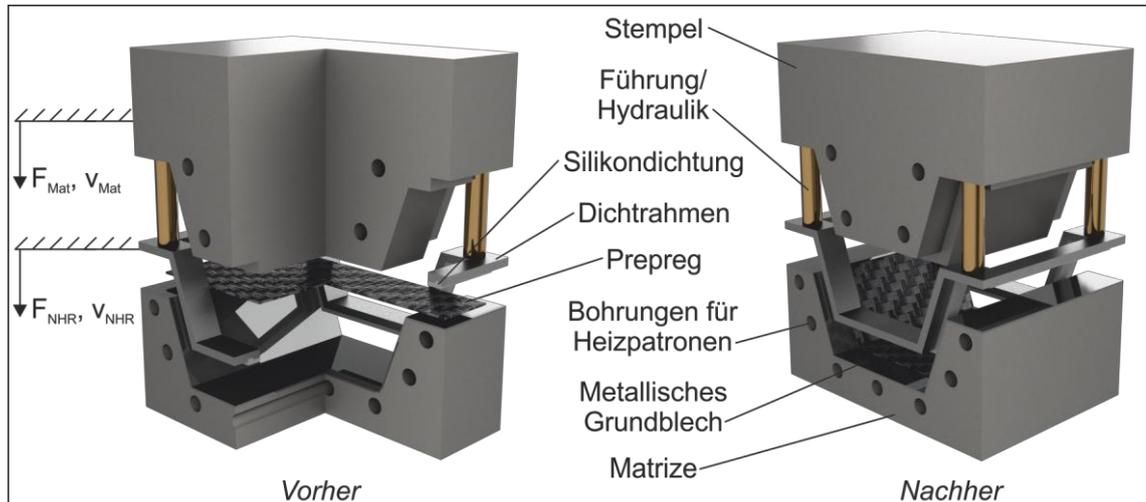


Bild 6.65 Werkzeugkonzept zur Herstellung lokal verstärkter Hybridbauteile mit komplexer Geometrie

6.9 Bauteileigenschaften

Ein wichtiger Faktor für Fertigungsverfahren für FVK-Bauteile sind die Eigenschaften der mit diesem Prozess hergestellten Strukturen. In dem Kapitel Bauteileigenschaften werden die Ergebnisse von Untersuchungen an verschiedenen Hybridbauteilen unter quasistatischer und Crashbelastung vorgestellt. Das Hauptaugenmerk liegt hierbei in dem Aufzeigen des Verbesserungspotentials des Eigenschaftsprofils sowie des Leichtbaupotentials von Hybridsystemen im Vergleich zu konventionellen Stahllösungen. Darüber hinaus werden der Einfluss unterschiedlicher Konsolidierungszeiten auf die Bauteileigenschaften untersucht und Informationen für die Methodik zur Entwicklung von Hybridstrukturen (insbesondere Kapitel 7.5) gewonnen.

6.9.1 Versuchsaufbauten und -auswertung

6.9.1.1 Quasistatische Dreipunkt-Biegeprüfung

Die quasistatischen Dreipunkt-Biegeprüfungen wurden an einer hydraulischen Presse der Firma Oevermann durchgeführt. Hierfür wurde auf dem unteren Spanntisch der Presse eine Vorrichtung mit zwei Auflagerpunkten befestigt. Auf diesen Auflagern wurden die Proben für die Dreipunkt-Biegeprüfung aufgelegt. Mittig zwischen diesen Auf-

lagern wurde auf dem oberen Spanntisch der Presse ein Impaktor befestigt, der das Biegeprofil verformen konnte. Die Kraft wurde mittels einer Kraftmessdose aufgenommen, die über dem Impaktor angeordnet war. Der Weg wurde über ein externes Wegmesssystem ermittelt (Bild 6.66). Auch die Durchführung von quasistatischen Stauchversuchen ist hiermit möglich. Anstatt der Auflager wird eine ebene Auflagerplatte verwendet. Der Impaktor wird durch eine Prallplatte ersetzt.

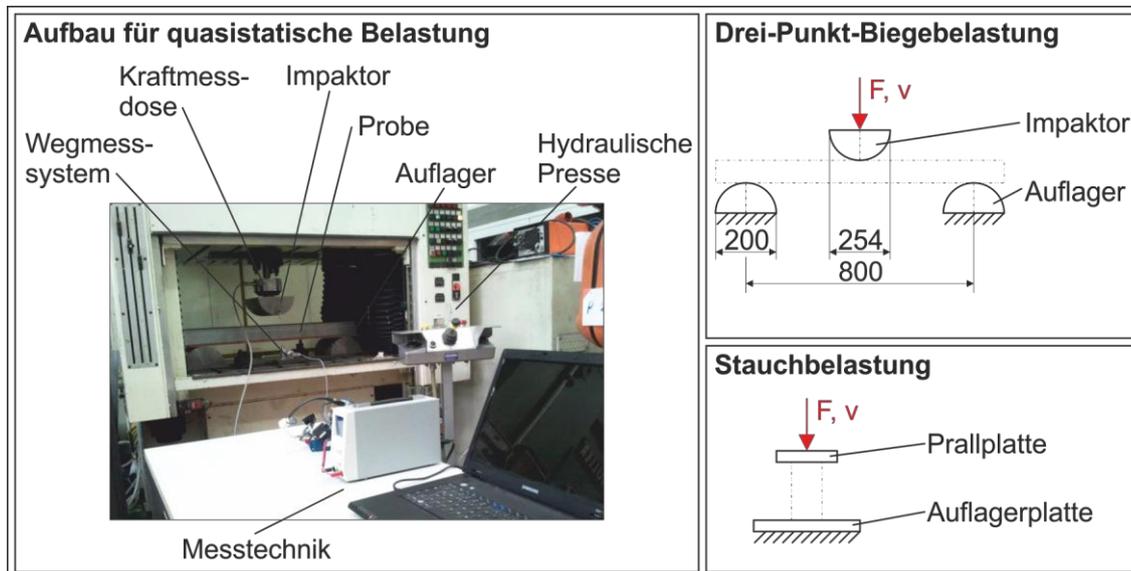


Bild 6.66 Versuchsaufbau für die quasistatischen Dreipunkt-Biegeversuche

6.9.1.2 Crashprüfstand

Für Crashuntersuchungen wurde ein Schlittenprüfstand verwendet. Hierbei wird hydraulisch ein Seilzugsystem betätigt, das einen Schlitten beschleunigt. Der Schlitten wird auf Schienen in einer Bahn geführt und ist je nach Konfiguration mit einem Wegmesssystem und einem Beschleunigungssensor bestückt. An dem Schlitten können unterschiedliche Impaktoren oder Prallplatten fixiert werden. Die Schlittenmasse beträgt zwischen 50 und 500 kg. Die maximale Schlittengeschwindigkeit liegt bei 25 m/s. Die zu prüfenden Bauteile werden durch spezielle und an die durchzuführenden Versuche angepasste Aufnahmen gehalten. Die entwickelten Bauteilaufnahmen sind an einem Spannungsfeld mit direkt angebundener Reaktionsmasse befestigt ^[311S]. Für die Untersuchungen wurde eine Dreipunkt-Biege- sowie eine Stauchvorrichtung verwendet. Zudem können Hochgeschwindigkeitskameras der Firma GOM zur optischen Datenerfassung, z. B. der Verformungen, genutzt werden (Bild 6.67). Die Steuerung der Anlage und die Aufzeichnung der Messgrößen werden mittels der Software LabView realisiert.

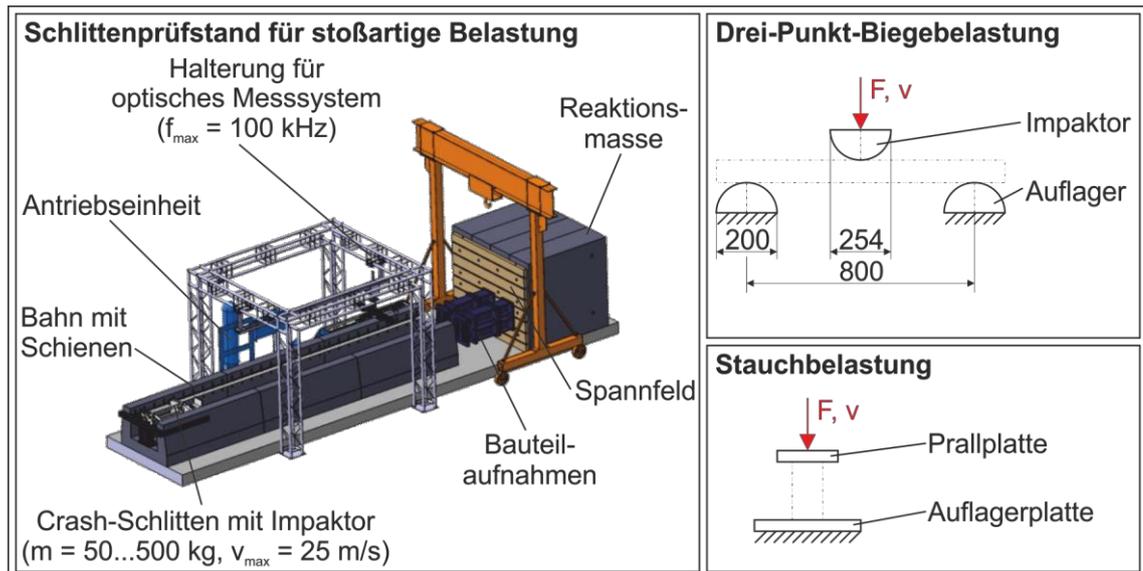


Bild 6.67 Versuchsaufbau für die Crashuntersuchungen

6.9.1.3 Auswertung

Zu der Auswertung, dem Vergleich und der Bewertung der unterschiedlichen Prüfkörper können verschiedene Kenngrößen verwendet werden. Die meisten Kenngrößen können aus Kraft-Weg-Verläufen abgeleitet bzw. berechnet werden. ^{[152] [312] [313] [314]}

Die maximale Kraft gibt den größten Kraftausschlag während der Verformung an:

$$F_{max} = \max\{F_i\} = F_{Trigger} \quad (6.32)$$

Üblicherweise tritt die maximale Kraft zu Beginn der Verformung auf. Dieser Wert wird auch als Triggerkraft oder Stabilitätsspek bezeichnet und ist ein Maß dafür, welchen Widerstand das Profil einer Verformung entgegensetzt. Die Kraft ist bei dynamischen Untersuchungen stark von den Schwingungseigenschaften des Versuchsaufbaus sowie der Filterung der Messdaten abhängig. Daher wird oftmals eine wegspezifische mittlere Kraft berechnet. Diese wegspezifische mittlere Kraft bzw. Faltenbeullast kann aus dem Mittelwert der Kraft über einen festgelegten Verformungsweg bezogen auf den Deformationsweg berechnet werden:

$$F_m = \frac{1}{\Delta s} \int_{s_1}^{s_2} F(s) ds \text{ mit } \Delta s = s_2 - s_1 \quad (6.33)$$

Die maximale Energieabsorption ist wie folgt definiert:

$$E_{max} = \int_0^{s_{max}} F(s) ds = F_m \cdot s_{max} \quad (6.34)$$

Die spezifische Energieabsorption ergibt sich als Verhältnis von der absorbierten Energie und der Masse der verformten Länge einer auf Stauchung belasteten Probe:

$$E_s = \frac{E(s)}{\Delta m(s)} \text{ mit } \Delta m(s) = m \cdot \frac{s_{max}}{l_0} \quad (6.35)$$

Die hier gewählte Formel zur Berechnung der spezifischen Energieabsorption ist für experimentelle Untersuchungen gut geeignet, da eine vollständige Verformung der Prüfkörper i. d. R. nicht stattfindet. Diese Kenngröße gibt darüber hinaus einen guten Aufschluss über das Gewichteinsparpotential eines Werkstoffs.

Die spezifische Energieabsorption einer auf Biegung belasteten Probe wird bestimmt mittels folgender Formel:

$$E_s = \frac{E(s)}{m} \quad (6.36)$$

Bei der totalen spezifischen Energieabsorption oder Gewichtseffizienz handelt es sich um das reale Verhältnis der maximalen Energieabsorption und der Gesamtmasse des Prüfkörpers:

$$E_t = \frac{E_{max}}{m} \quad (6.37)$$

Als absorbierte Bruchenergie wird diejenige Energie bezeichnet, die bis zum Versagen bzw. Bruch der Probe aufgenommen wird:

$$E_{Bruch} = \int_0^{s_{Bruch}} F(s) ds \quad (6.38)$$

Die Anzahl der Proben je Prüfreihe wurde auf drei festgelegt. Die im Folgenden dargestellten berechneten Kennwerte wurden aus dem arithmetischen Mittel jeweils einer Prüfreihe bestimmt.

6.9.2 Untersuchungen an Demonstratorbauteilen

Die Untersuchungen an Demonstratorbauteilen wurden anhand eines Doppel-Z-Profiles durchgeführt. ^[315S] Dieses symmetrische Profil bietet eine einfache und bei der Herstellung gut beherrschbare Geometrie, deren metallische Grundstruktur durch Biegeoperationen hergestellt und durch Prepregpressen verstärkt werden kann. Wie auch für Hutprofilstrukturen, die als Demonstratorbauteile dienen, existieren für die Doppel-Z-Profile keine Standardabmaße. Dennoch werden beide Profilformen häufig als bauteilähnliche Probenkörper im Automobilbau eingesetzt und besitzen hinsichtlich der experimentellen Untersuchung zur Ermittlung von Proben- und Verbindungseigenschaften einen hohen Stellenwert. ^{[152] [156]}

Die Festlegung der Probengeometrie erfolgte anhand von Literaturangaben ^{[152] [150] [316] [317] [318]} und unter Berücksichtigung der lokalen Prepreg-Verstärkung. Die Querschnittsfläche der Geometrie betrug ca. 100 x 100 mm, wobei als Biegeradien jeweils 6 mm gewählt wurden. Die beiden Hälften der Probenkörper wurden an dem 20 mm breiten Flansch durch den Strukturklebstoff Betamate 1620 gefügt. Die Länge der Proben für

die Dreipunkt-Biegeversuche betrug 1000 mm, die der Proben für die Stauchversuche 280 bzw. 320 mm. Die Hybrid-Bauteilproben wurden vor dem Fügen der beiden Hälften mit einem neunlagigen Prepreg mit einer Länge von 260 bis 300 mm und einer Breite von 140 mm verstärkt. Die Stauchproben wurden zudem mit einer 3 mm breiten Einfalthilfe versehen (Bild 6.68).

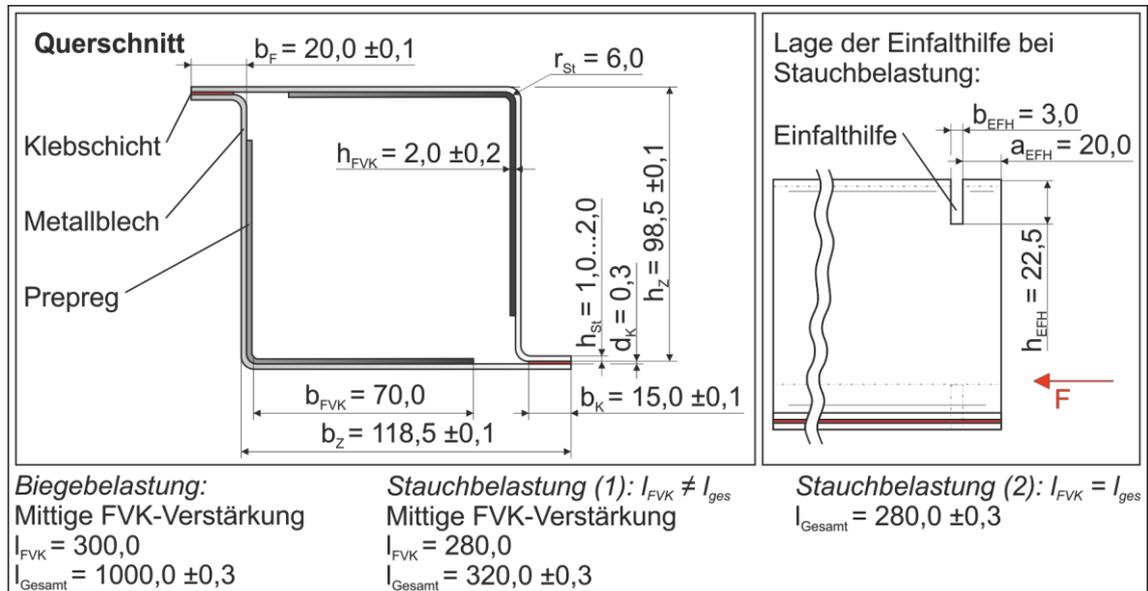


Bild 6.68 Verwendete Probenformen der Doppel-Z-Profile

Zur Herstellung der lokalen FVK-Verstärkung wurde eine entsprechende Versuchsvorrichtung konstruiert, die ein Einpressen des Prepregs in die zuvor durch zwei Biegeoperationen umgeformte metallische Grundstruktur sowie ein anschließendes Aushärten der Matrix ermöglichte ^[319S]. Die Doppel-Z-Profile wurden anschließend durch das Verkleben zweier Probenhälften hergestellt. Entsprechend dem Verfahrensablauf des Prepregpressens wurden die Prepregs nach dem Einpressen in die Metallstruktur nur vorausgehärtet. Die vollständige Aushärtung erfolgte nach dem Klebstoffauftrag und Verklammern der beiden Probenhälften und in einem Umluftofen.

In diesem Prozessschritt wurde die Fügestelle an den Flanschen ausgebildet. Um eine ausreichende Aushärtung des Klebstoffs entsprechend den Herstellerangaben zu gewährleisten, wurde für die unterschiedlichen verwendeten Werkstoffe und Blechdicken zunächst das Aufheizverhalten der Proben untersucht. ^[114] Aus diesen Ergebnissen wurden die Aushärtezeiten für die Proben in dem Umluftofen, der einen in der Realität nachgeschalteten Lackierprozess simuliert, ermittelt. Die gewählte Klebschichtdicke wurde in allen Fällen auf 0,3 mm festgelegt. Hierzu wurden Crashuntersuchungen an Stauchprofilen mit Klebschichtdicken von 0,3 und 0,5 mm durchgeführt, die jedoch zu identischen Ergebnissen führten.

Um gleichmäßige Randbedingungen zu gewährleisten, wurden die Flansche ebenso wie die mit Prepregs zu verstärkenden Flächen der Metallbleche mit Isopropanol gereinigt. Die Prepregs wurden mit der Versuchsvorrichtung in die Metallstruktur eingepresst und mit zuvor definierten Prozessparametern ausgehärtet. Die Versuchsvorrich-

tung wurde als offenes Werkzeugkonzept ausgeführt. Aufgrund der einfachen Geometrie konnte auf eine aufwändige Werkzeugtechnik verzichtet und eine konstante Qualität erreicht werden.

Nach der Entnahme der Stahlbauteile zeigte sich ein leichter Bauteilverzug infolge thermischer Eigenspannungen. Etwaige Winkelabweichungen lagen im Bereich der Toleranzen der Biegeoperationen zur Herstellung der Metallstruktur. Anders sah dies bei Aluminiumbauteilen aus AlMg3 aus. Hier waren die Winkelabweichungen von der geforderten Geometrie und die Durchbiegung des Profils infolge des größeren Wärmeausdehnungskoeffizienten so beträchtlich, dass keine Doppel-Z-Profile aus diesen Proben hergestellt werden konnten.

6.9.2.1 Doppel-Z-Profile unter schlagartiger Stauchbelastung

Die Untersuchungen an Doppel-Z-Profilen unter schlagartiger Stauchbelastung wurden an unverstärkten und verstärkten Stahlproben durchgeführt. ^{[311S] [319S] [320S]} Zum Einsatz kamen dabei drei verschiedene Wanddicken der metallischen Grundstruktur, d. h. DC01 in 1,0 mm sowie DD11 in 1,5 mm und 2,0 mm, sowie der bekannte neunlagige Prepreg-Aufbau als Verstärkungsgeometrie. ^[321]

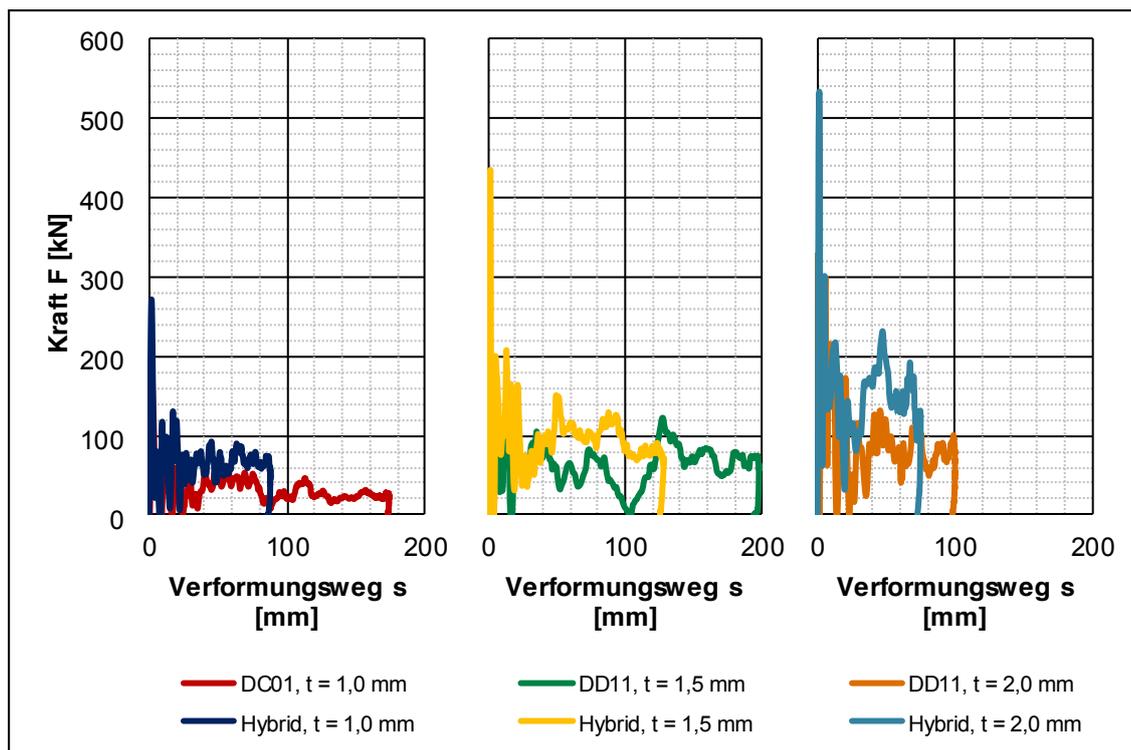


Bild 6.69 Kraft-Weg-Verläufe für schlagartig auf Stauchung belastete Doppel-Z-Profile

In Bild 6.69 sind Kraft-Weg-Verläufe der Crashuntersuchungen dargestellt. ^[152] Zunächst ist ein sehr steiler Kraftanstieg zu verzeichnen. Im Anschluss pendelt sich der Verlauf um eine mittlere Kraft ein. Abschließend flacht sich der Verlauf der Kurve bis zum Ende der Verformung ab. In dem Kraft-Weg-Diagramm zeigt sich der deutliche Einfluss einer FVK-Verstärkung auf das Crashverhalten. ^{[317] [318] [321] [322]} Die Trigger-

kraft sowie die mittlere Kraft über den Verformungsweg sind bei den Hybriden größer als bei dem entsprechenden Stahlprofil, während der maximale Verformungsweg geringer ausfällt. Der relative Einfluss der Verstärkung verringert sich mit zunehmender Wanddicke der Stahlkomponente, da die eingebrachte Menge FVK konstant gehalten wurde.

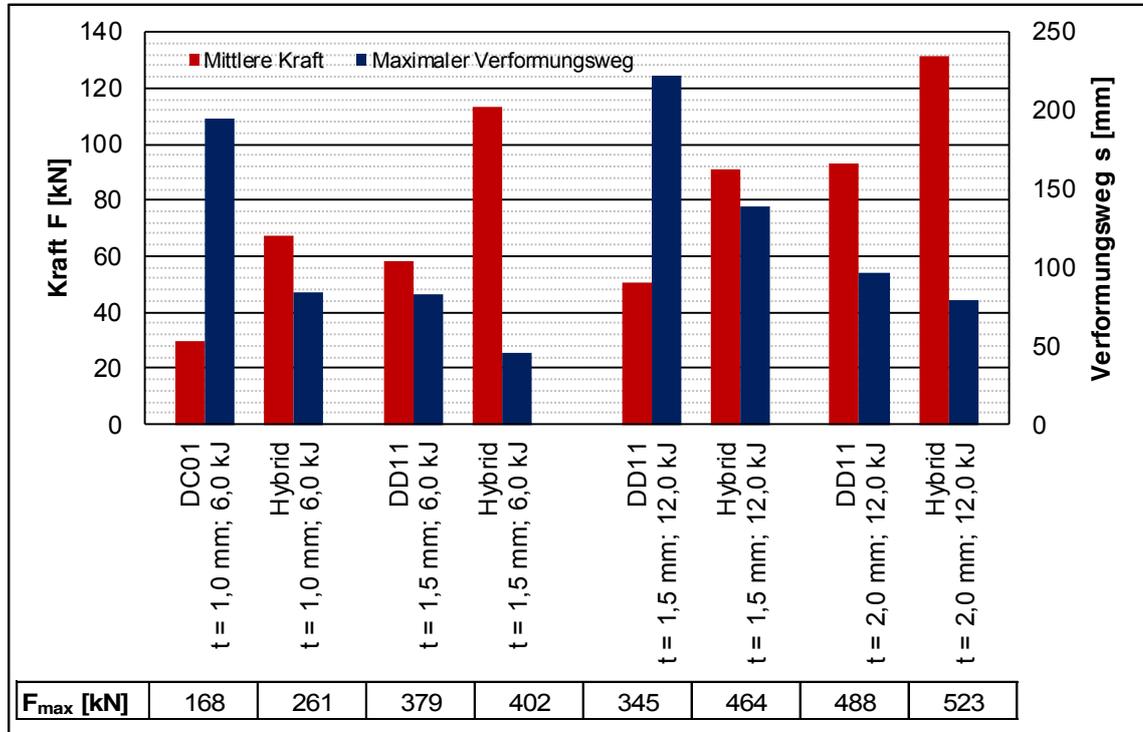


Bild 6.70 Maximalkraft, mittlere Kraft und maximaler Verformungsweg für schlagartig auf Stauchung belastete Doppel-Z-Profile

In Bild 6.70 sind jeweils die Maximalkraft, die mittlere wegspezifische Kraft sowie der maximale Verformungsweg für die untersuchten Profile aufgetragen. ^[321] Diese Kennwerte sind nicht gewichtsbereinigt, zeigen jedoch bereits das Potential der Hybridstrukturen auf. So liegen die mittleren Kräfte der Hybride zwischen 41 % (2 mm) und fast 130 % (1,0 mm) über denen der reinen Stahllösung. Die Verformungswege nehmen um einen Betrag von rund 20 (2,0 mm) bis 110 mm (1,0 mm) ab, was einer Reduzierung von knapp 20 bzw. 60 % entspricht. Zu beachten ist hierbei auch, dass vergleichsweise weiche Stahlgüten verwendet wurden und die Belastungssituation dem FVK entgegenkommt, d. h., das Versagen des FVK tritt nicht nur lokal auf, sondern über einen großen Bereich.

Die Werte für die maximale Energieabsorption, die spezifische Energieabsorption sowie die totale spezifische Energieabsorption der untersuchten Prüfkörper sind in Bild 6.71 dargestellt. Bei der spezifischen Energieabsorption wurde die Energie auf die verformte Masse und bei der totalen spezifischen Energieabsorption auf die Gesamtmasse der Probe bezogen. Der Einfluss der konstant bleibenden FVK-Verstärkung nimmt wiederum mit zunehmender Stahl-Wanddicke ab. Die Proben in Hybridbauweise erreichen im Vergleich zu einer reinen Stahlbauweise bei dem vorherrschenden Lastfall und

unter den hier angenommenen Randbedingungen um etwa 24 % (2,0 mm) bis fast 80 % (1,0 mm) höhere Werte für die spezifischen und totalen spezifischen Energien. ^[317] Damit konnte das Verbesserungspotential der Hybridsysteme unter schlagartiger Stauchbelastung für die gewählte Versuchskonfiguration nachgewiesen werden. In der Realität ist davon auszugehen, dass die erreichbaren Leichtbaupotentiale beispielsweise aufgrund fertigungstechnischer Restriktionen oder einer anderen Werkstoffkombination (z. B. höherfeste Stähle) geringer ausfallen.

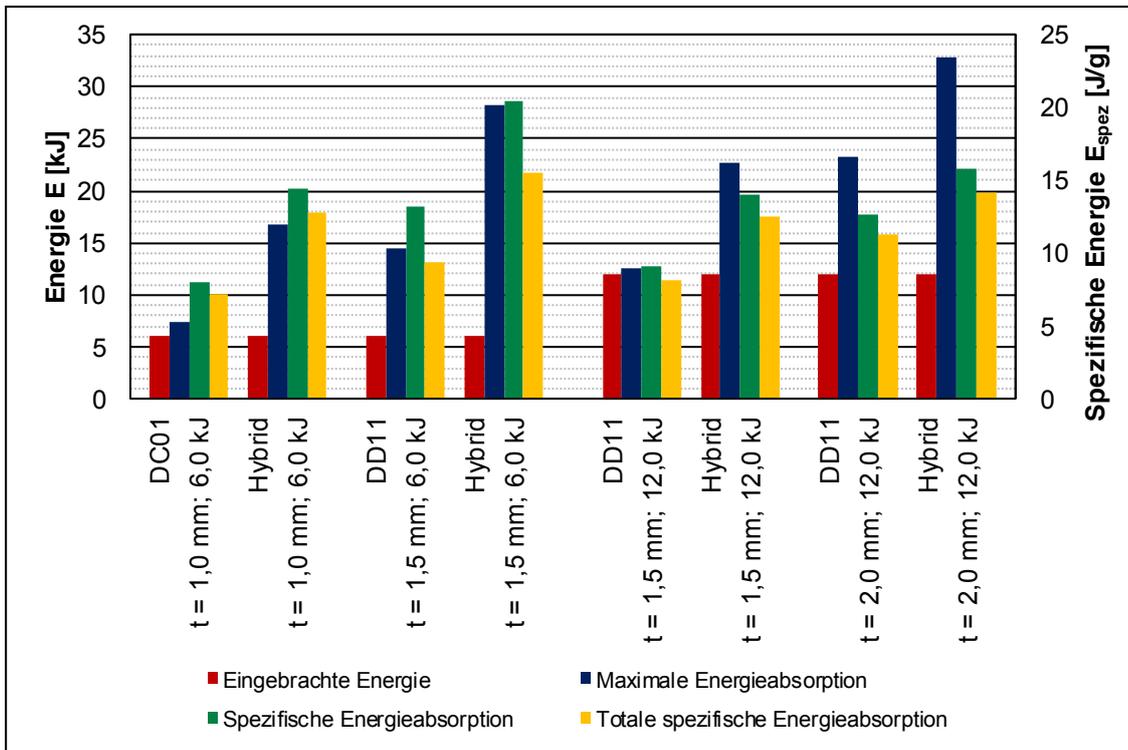


Bild 6.71 Eingebroughte Energie, maximale Energieabsorption, spezifische Energieabsorption und totale spezifische Energieabsorption für schlagartig auf Stauchung belastete Doppel-Z-Profile

6.9.2.2 Doppel-Z-Profile unter quasistatischer Biegebelastung

Als zweite Variante wurden Doppel-Z-Profile unter quasistatischer Biegebelastung untersucht. Die Wanddicken der metallischen Grundstruktur sowie der Aufbau der FVK-Verstärkung und die Prozessparameter wurden analog zu den Untersuchungen in Kapitel 6.9.2.1 gewählt.

Die dabei ermittelten Kraft-Weg-Verläufe sind in Bild 6.72 aufgetragen. Die Verläufe steigen zunächst fast linear an. Ab einer gewissen Kraft erfolgt bei den rein metallischen Profilen eine plastische Deformation, verbunden mit einem sukzessiven Kraftabfall. Die Hybridstrukturen erreichen jeweils höhere maximale Kräfte. Der leicht wellenförmige Verlauf der 1,0-mm-Hybridprobe zwischen einem Weg von 10 und 40 mm liegt in einer Deformation der metallischen Grundstruktur im Bereich der Auflager begründet. Wäre dieses überlagerte Versagen nicht aufgetreten, wäre eine höhere Maximalkraft möglich gewesen. Das Versagen der Verstärkungskomponente erfolgt schließlich

bei allen Hybridsystemen mittig. Dabei wird das FVK-Laminat vollständig durchtrennt. Die Kraftniveaus bleiben bis zum Ende des Prüfweges über denen der Stahl-Profile. Eine Verstärkungs- bzw. Versteifungswirkung ist somit auch nach dem Versagen der FVK-Struktur gegeben. Je größer der relative Anteil an FVK in den Profilen ist, desto größer ist der Unterschied in den Kraftniveaus.

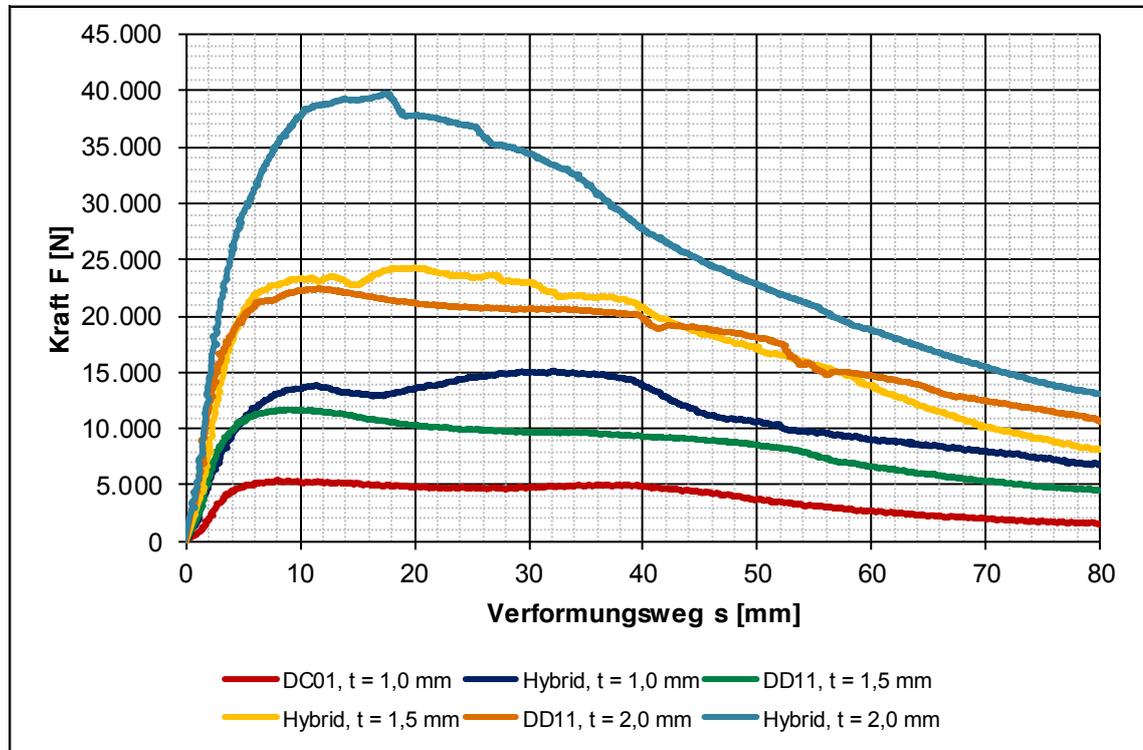


Bild 6.72 Kraft-Weg-Verläufe für quasistatisch auf Biegung belastete Doppel-Z-Profile

In Bild 6.73 sind, neben der maximalen und der mittleren Kraft, auch die spezifische Energie sowie die spezifische Energie bis zum ersten Kraftmaximum dargestellt. Es ist der positive Einfluss der FVK-Verstärkung und des relativen Anteils an FVK im Hybridverbund für die gewählten Versuchsrandbedingungen zu erkennen. Beispielsweise erreicht der Hybrid aus 1,5 mm Stahl eine vergleichbar hohe Energieaufnahme wie die 2,0 mm dicke Stahlstruktur, allerdings bei einer um fast 24 % reduzierten Masse. Insgesamt steigen die maximalen Kräfte durch den Einsatz von Hybriden um 80 % (2,0 mm) bis zu 157 % (1,0 mm) an. Die spezifischen Energien steigen hingegen sogar um 95 % (2,0 mm) bis zu 190 % (1,0 mm). Dies bedeutet, dass der vergleichsweise kleine Anteil der FVK-Verstärkung von rund 250 g je Probe bei einem Gewicht der Stahlstruktur von ca. 3600 g bzw. 6,9 % (1,0 mm), 5350 g bzw. 4,7 % (1,5 mm) und 7300 g bzw. 3,4 % (2,0 mm) einen beträchtlichen Einfluss auf die quasistatischen Eigenschaften der Struktur besitzt. Einschränkend ist auch hier zu beachten, dass diese Werte nur für die hier zugrunde gelegte Versuchskonfiguration und die verwendeten Werkstoffe Bestand haben.

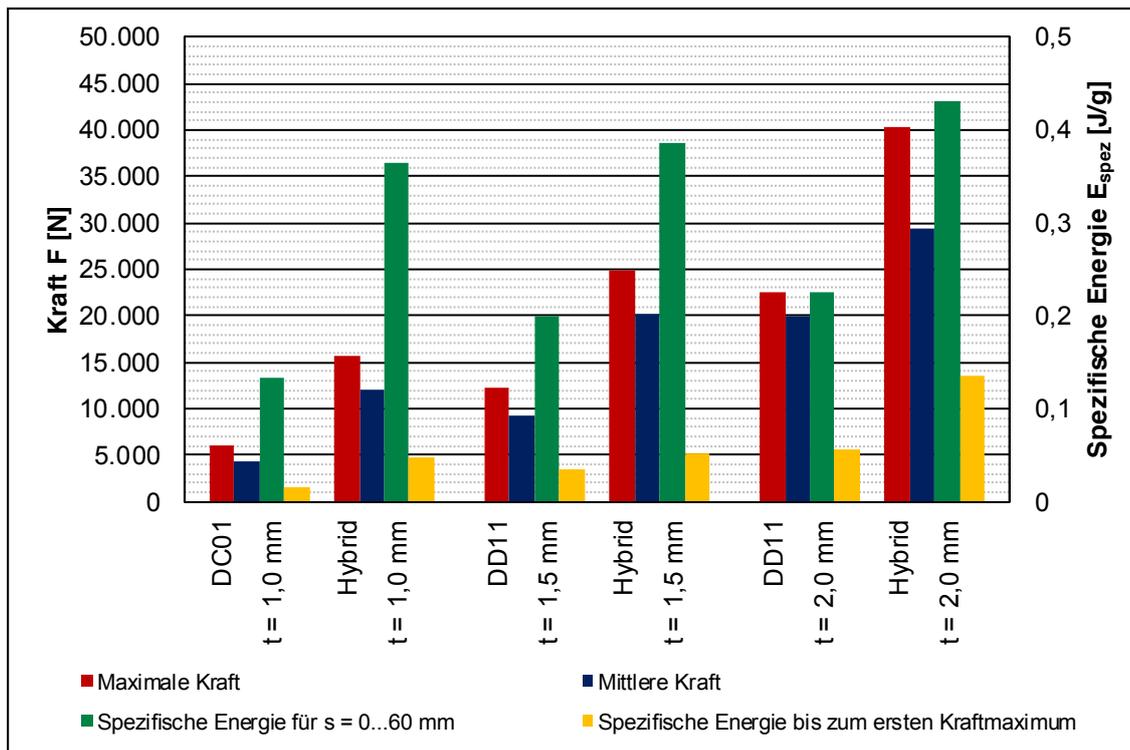


Bild 6.73 Maximalkraft, mittlere Kraft, spezifische Energie und spezifische Energie bis zum ersten Kraftmaximum für quasistatisch auf Biegung belastete Doppel-Z-Profile

6.9.2.3 Doppel-Z-Profile unter schlagartiger Biegebelastung

Neben der schlagartigen Stauchbelastung und der quasistatischen Biegebelastung wurde auch eine schlagartige Biegebelastung an unverstärkten und verstärkten Stahlproben untersucht. ^[323S] Zum Einsatz kamen dabei wiederum drei verschiedene Wanddicken, d. h. 1,0 mm, 1,5 mm und 2,0 mm, der metallischen Grundstruktur sowie der bekannte neunlagige Prepreg-Aufbau als Verstärkungsgeometrie. Als Konsolidierungszeiten wurden 2 und 5 min untersucht, wobei eine Nachhärtung in einem Umluftofen erfolgte. ^[324] Es sollte geklärt werden, ob diese unterschiedlichen Konsolidierungszeiten einen Einfluss auf die Bauteileigenschaften haben.

Die Kraft-Weg-Verläufe zeigen zu Beginn einen steilen Kraftanstieg, der allerdings weder die hohe Steigung noch das hohe Kraftmaximum der Stauchproben erreicht (Bild 6.74). Nach dem Stabilitätsspeak sinkt die Kraft auf ein niedrigeres Niveau ab und pendelt sich mit fallender Tendenz um eine mittlere Kraft ein. Zum Ende des Versuchs flacht sich der Verlauf weiter ab, bis es zu keiner Verformung mehr kommt. ^[324]

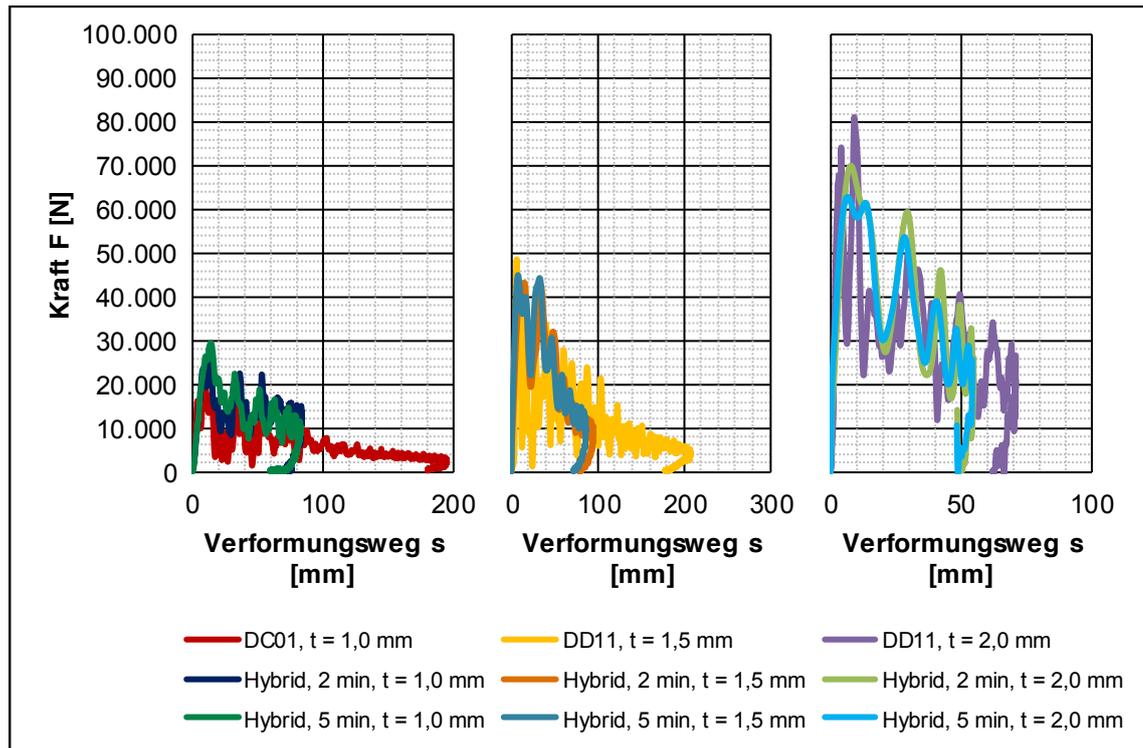


Bild 6.74 Kraft-Weg-Verläufe für schlagartig auf Biegung belastete Doppel-Z-Profile

Für die untersuchten Proben wurden anschließend die Maximalkräfte, die mittleren Kräfte sowie die maximalen Verformungswege bestimmt (Bild 6.75). Ein erkennbarer Einfluss der beiden unterschiedlichen Voraushärtungszeiten von 120 und 300 s ist dabei nicht festzustellen. Hingegen steigen die mittleren Kräfte bei den Hybriden wiederum deutlich von 16 % (2,0 mm) bis 72 % (1,0 mm) an. Die Verformungswege nehmen zugleich um 23 % (2,0 mm) bis 67 % (1,0 mm) ab.

Die ebenfalls aus den Mittelwerten der Prüfreihen bestimmten Werte für die maximale Energieabsorption sowie die totale spezifische Energieabsorption sind in Bild 6.76 dargestellt. Die spezifischen Energieabsorptionen sind für die einzelnen Wandstärken nahezu konstant. Die totalen spezifischen Energieabsorptionen liegen für die Hybride um etwa 11 % (2,0 mm) bis 60 % (1,0 mm) höher. Somit zeigt sich hier deutlich, dass der Einfluss der konstant bleibenden FVK-Verstärkung mit zunehmender Stahl-Wanddicke abnimmt.

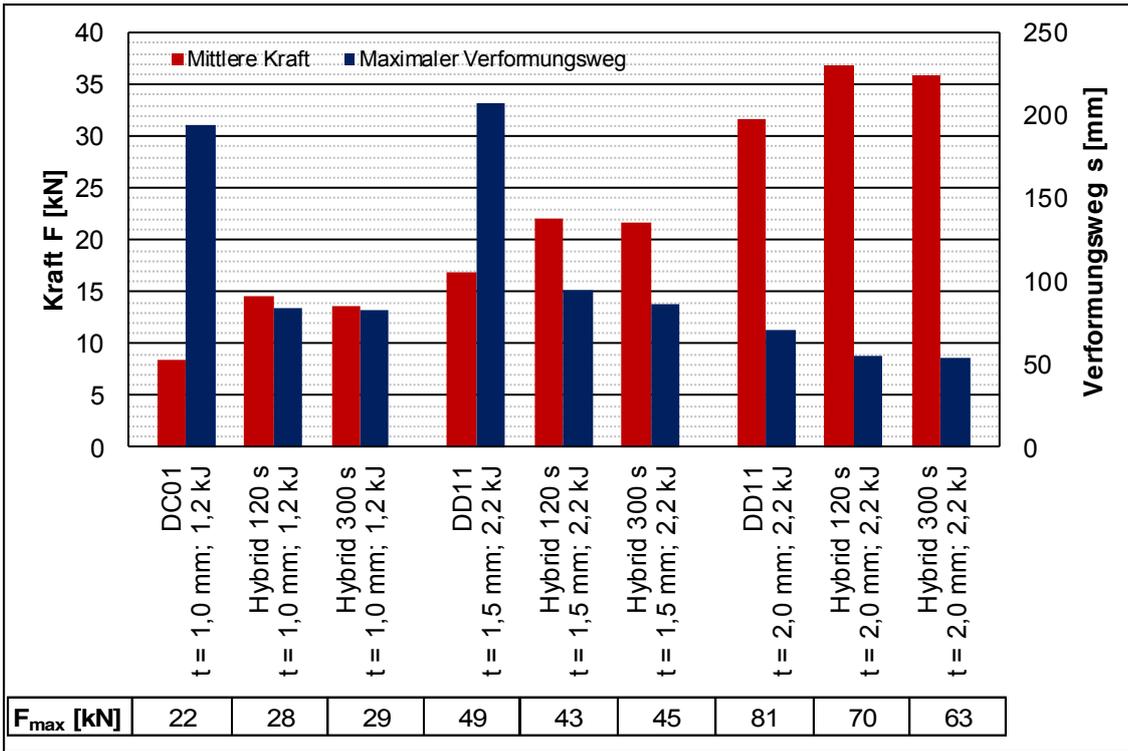


Bild 6.75 Maximalkraft, mittlere Kraft und maximaler Verformungsweg für schlagartig auf Biegung belastete Doppel-Z-Profile

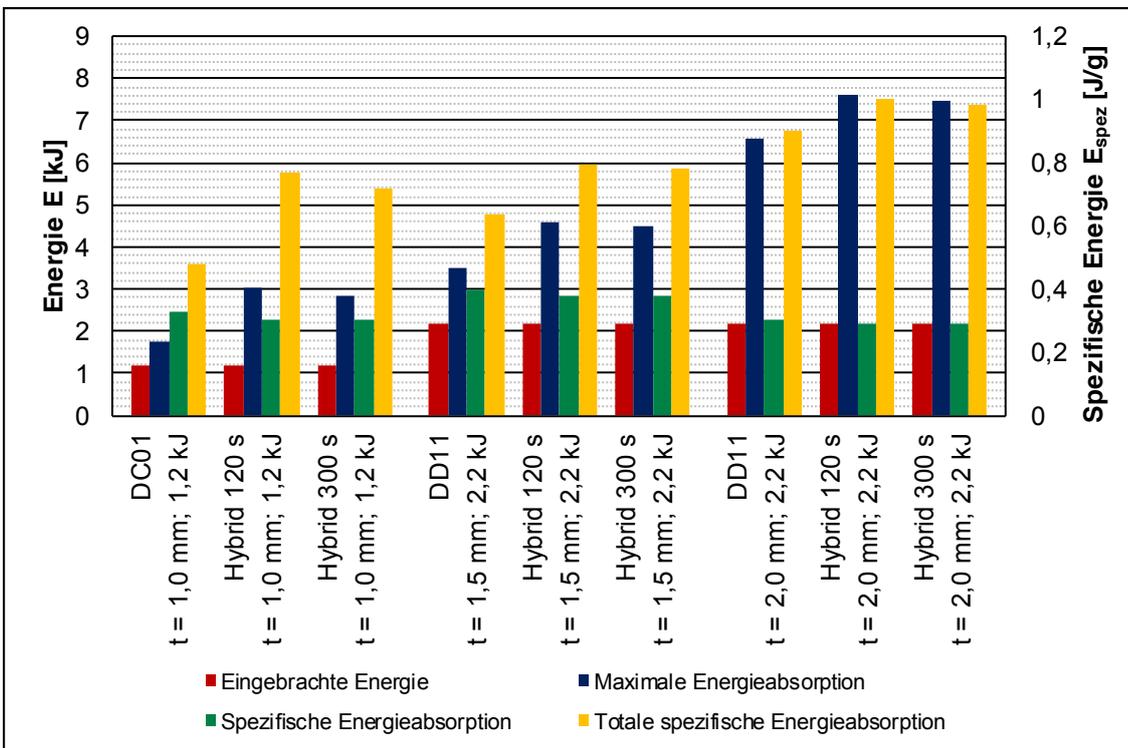


Bild 6.76 Eingebrachte Energie, maximale Energieabsorption, spezifische Energieabsorption und totale spezifische Energieabsorption für schlagartig auf Biegung belastete Doppel-Z-Profile

6.9.3 Untersuchungen an einer realbauteilähnlichen Geometrie

Zur Untersuchung des Einflusses einer lokalen Verstärkung auf eine realbauteilähnliche Geometrie wurde ein Hutprofilquerschnitt gewählt. ^[315S] Dieser Querschnitt wurde gebildet, indem ein repräsentativer Querschnitt einer realen B-Säule übernommen und anschließend symmetrisch ausgeprägt wurde (Bild 6.77). Die Länge wurde ebenfalls an ein entsprechendes Realbauteil angepasst. Das Profil bietet eine höhere Komplexität für die Fertigungstechnik zur Herstellung der FVK-Verstärkung als das Doppel-Z-Profil. Die Geometrie ist jedoch aufgrund der Symmetrie und Abwickelbarkeit aus umformtechnischer Sicht weiterhin gut beherrschbar. Die Ergebnisse lassen sich zudem auf verschiedene reale Bauteile, wie z. B. B-Säulen, Schweller oder vergleichbare Profilstrukturen, übertragen. ^[146]

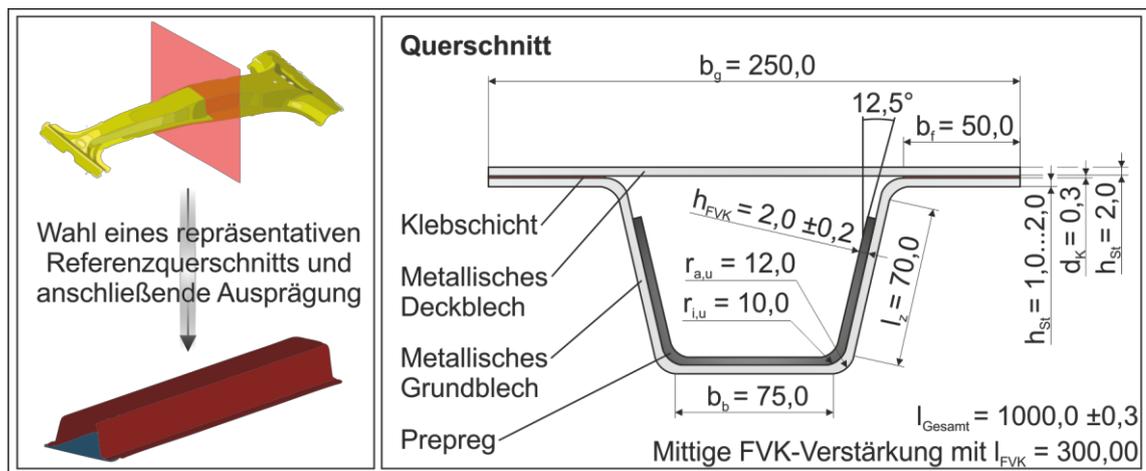


Bild 6.77 Ableitung und Darstellung der verwendeten Probenformen

Die Herstellung der lokalen FVK-Verstärkung wurde durch ein zuvor entwickeltes beheiztes Stahlwerkzeug realisiert. Mit diesem Werkzeug konnte zudem die metallische Komponente aus Blechplatten-Zuschnitten hergestellt werden. ^[325S] In dieses Hutprofil wurde anschließend lokal ein Prepreg eingepresst und vorausgehärtet. Das Schließblech wurde mittels eines Betamate 1620 MB mit der Hutprofilstruktur gefügt. Die Aushärtung des Klebstoffs sowie die Restaushärtung des Matrixharzes erfolgten anschließend in einem Umluftofen.

6.9.3.1 Hutprofile unter quasistatischer Biegebelastung

Zunächst wurden die Hutprofile einer quasistatischen Biegebelastung unterzogen. Die zugehörigen Kraft-Weg-Verläufe zeigt Bild 6.78. Nach einem fast linearen Anstieg zu Beginn erfolgt ab einem charakteristischen Kraftniveau ein Übergang in ein plastisches Versagen und bei den Hybridstrukturen zusätzlich das Versagen der Verstärkungskomponente. Die Hybrid-Profile zeigen zu Beginn ein deutlich höheres Kraftniveau. Nach dem Versagen der Verstärkungsstruktur sinkt die Kraft jedoch deutlich ab. ^[326] Auffällig ist, wie auch bei den Doppel-Z-Profil-Strukturen (Kapitel 6.9.2.2), der wellenförmige Verlauf der 1,0-mm-Hybridstruktur bei einem Verformungsweg zwischen 8 und

30 mm. Hier versagt die Probe wiederum infolge einer zu geringen Steifigkeit der metallischen Grundstruktur durch plastische Verformungen in den nicht verstärkten Auflagerbereichen. Die Kraft bleibt jedoch bei allen Wanddicken oberhalb der Kraft der reinen Stahlstrukturen. Wie auch bei den Doppel-Z-Profilen ist zu erkennen, dass, je größer der relative Anteil an FVK in den Profilen ist, desto größer der Unterschied in den Kraftniveaus ist.

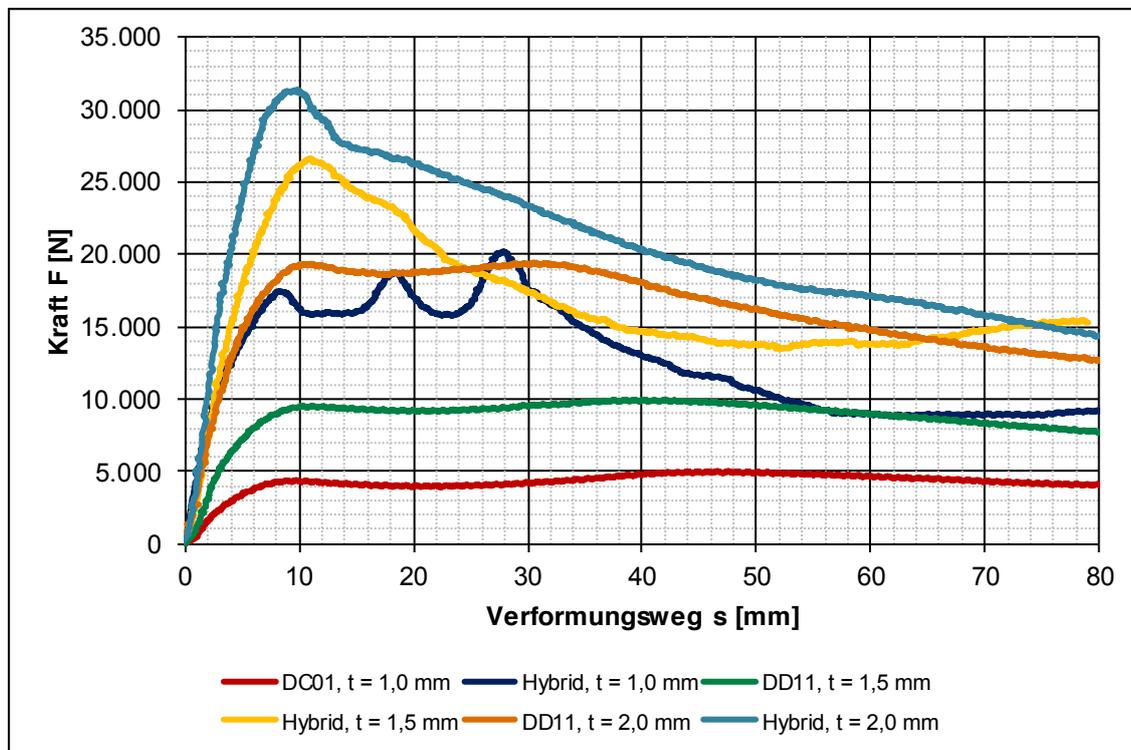


Bild 6.78 Kraft-Weg-Verläufe für quasistatisch auf Biegung belastete Hutprofile

In Bild 6.79 sind die Maximalkraft, die mittlere Kraft, die spezifische Energie sowie die spezifische Energie bis zum ersten Kraftmaximum dargestellt. Wie bei den Doppel-Z-Profilen zeigt sich der positive Einfluss der FVK-Verstärkung und des relativen Anteils an FVK im Hybridverbund für die gewählten Versuchsrandbedingungen. Die Maximalkräfte der Hybridssysteme liegen um 58 % (2,0 mm) bis 285 % (1,0 mm) über denen der reinen Stahlkomponenten. Die spezifischen Energien für einen Verformungsweg bis 60 mm sind zwischen 28 % (2,0 mm) und 235 % (2,0 mm) höher. Dieser z. T. beträchtliche Einfluss wurde durch einen vergleichsweise kleinen FVK-Anteil von rund 400 g je Probe bei einem Gewicht der Stahlstruktur von ca. 7200 g bzw. 5,5 % (1,0 mm), 8800 g bzw. 4,5 % (1,5 mm) und 10300 g bzw. 3,9 % (2,0 mm) erreicht. Bei diesen Werten ist zu beachten, dass diese nur für die hier zugrunde gelegte Versuchskonfiguration und die verwendeten Werkstoffe Bestand haben.

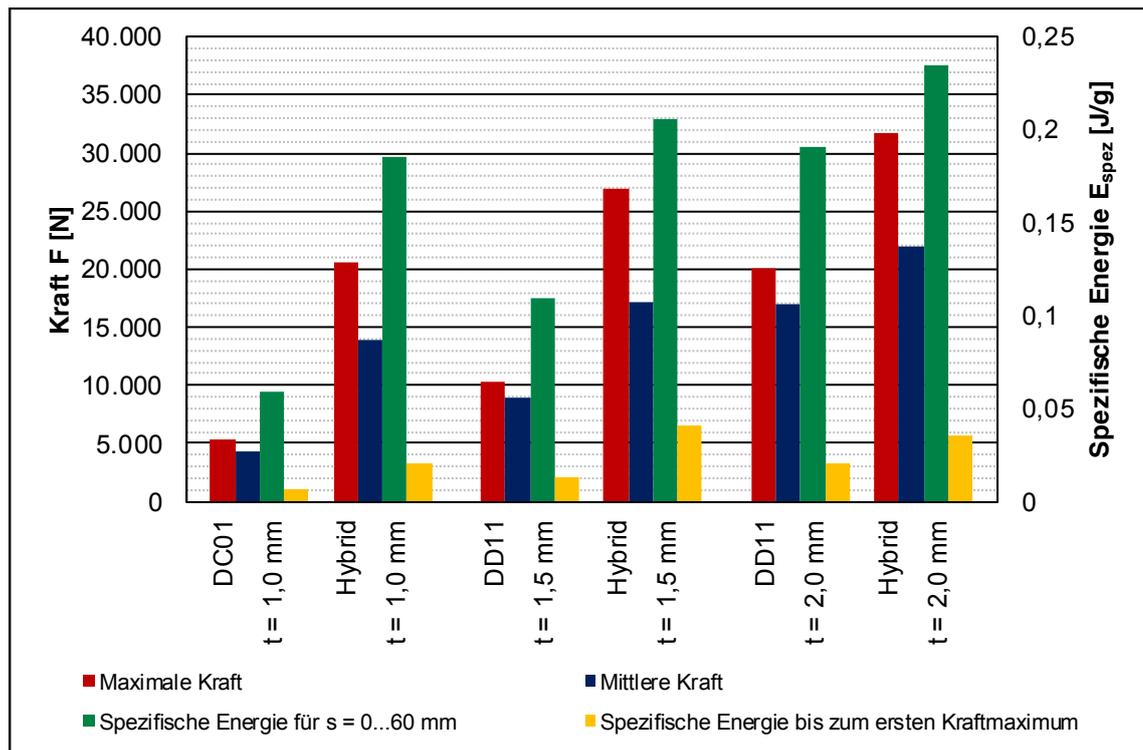


Bild 6.79 Maximalkraft, mittlere Kraft, spezifische Energie und spezifische Energie bis zum ersten Kraftmaximum für quasistatisch auf Biegung belastete Hutprofile

6.9.3.2 Hutprofile unter schlagartiger Biegebelastung

Nach den quasistatischen Untersuchungen folgten Versuche mit schlagartiger Biegebelastung der Hutprofile. Für reale Strukturbauteile wie eine B-Säule, welche in der vorliegenden Arbeit durch die Hutprofilstruktur abstrahiert wurde, ist eine Crashbelastung eine wesentliche Auslegungsgröße. Die entsprechenden Kraft-Weg-Verläufe sind in Bild 6.80 dargestellt. Die Kurven zeigen den aus den vorherigen Untersuchungen bekannten Verlauf. Bis zum Stabilitätspeak ist ein steiler Kraftanstieg zu erkennen. Anschließend sinkt die Kraft rasch auf ein niedrigeres Niveau ab und pendelt sich mit fallender Tendenz um eine mittlere Kraft ein.

Die aus den Kraft-Weg-Verläufen ermittelten maximalen und mittleren Kräfte sowie maximalen Verformungswegen sind in Bild 6.81 dargestellt. Die Verstärkung der Stahlprofile durch ein FVK-Prepreg führt zu deutlich höheren Kräften bei gleichzeitig reduzierten Verformungswegen. Die mittlere Kraft steigt um 10 % (2,0 mm) bis 133 % (1,0 mm) an, während sich die maximalen Verformungswegen um 15 % (2,0 mm) bis 63 % (1,0 mm) verringern.

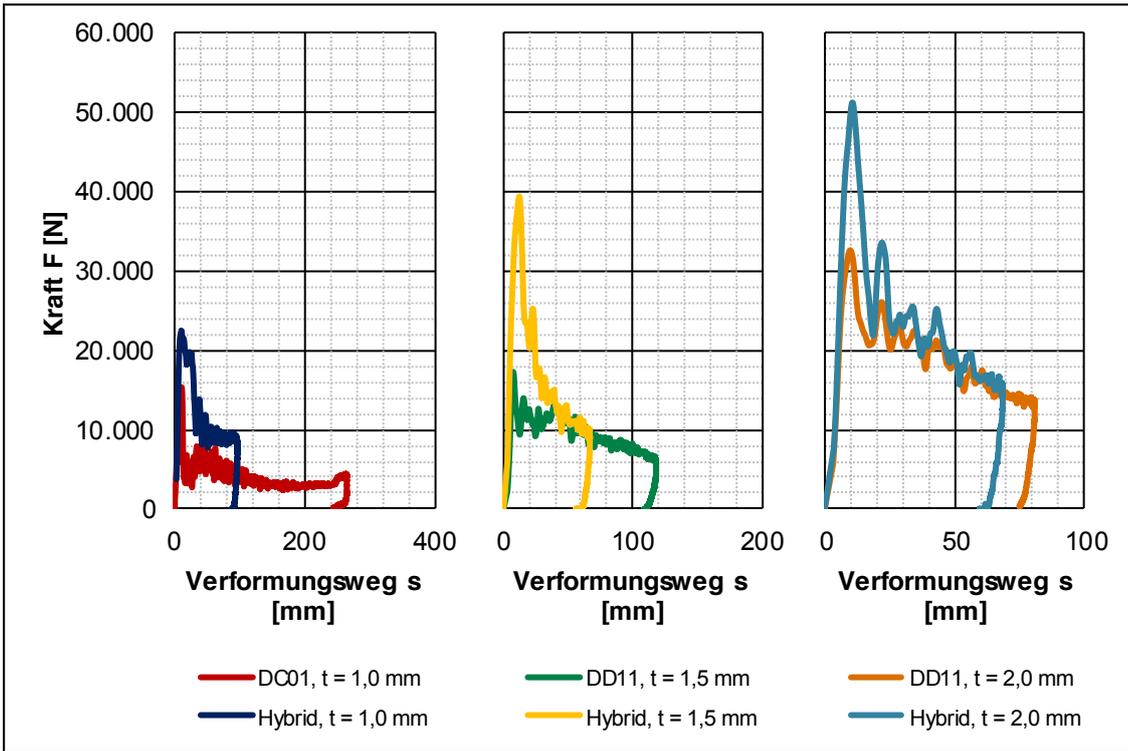


Bild 6.80 Kraft-Weg-Verläufe für schlagartig auf Biegung belastete Hutprofile

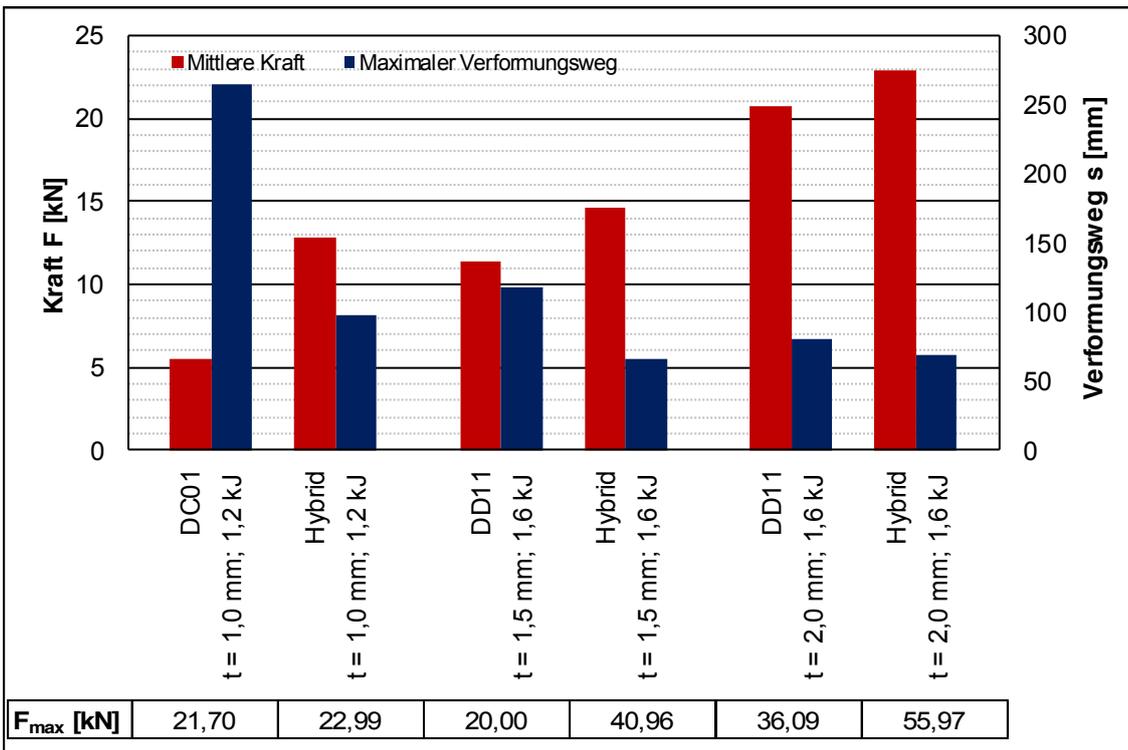


Bild 6.81 Maximalkraft, mittlere Kraft und maximaler Verformungsweg für schlagartig auf Biegung belastete Hutprofile

Diese Tendenzen konnten auch bei der maximalen Energieabsorption, der spezifischen Energieabsorption und der totalen spezifischen Energieabsorption festgestellt werden (Bild 6.82). Die spezifischen Energien sind für die einzelnen Wandstärken na-

hezu konstant, wobei die Hybride jeweils marginal, d. h. ca. 0,5 % (1,0 mm) bis 3 % (2,0 mm), geringere Werte aufweisen. Dagegen liegen die totalen spezifischen Energieabsorptionen für die Hybride um etwa 6 % (2,0 mm) bis 120 % (1,0 mm) höher. Damit zeigt sich hier, dass der Einfluss der konstant bleibenden FVK-Verstärkung mit zunehmender Stahl-Wanddicke abnimmt.

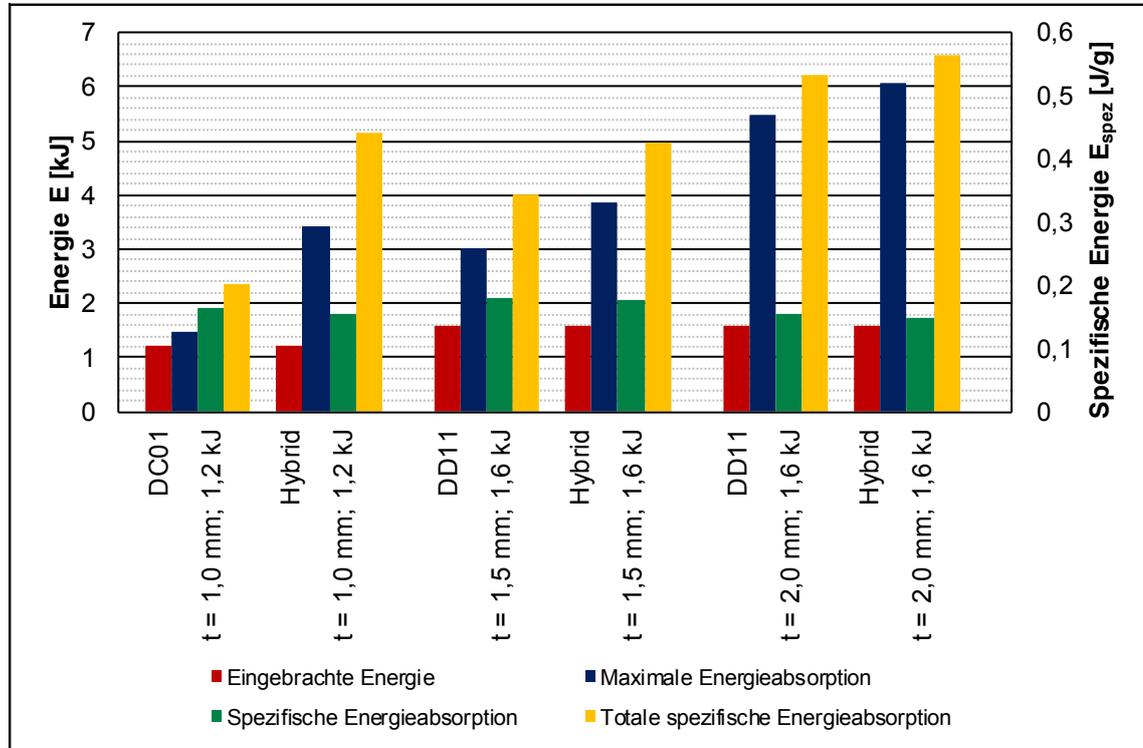


Bild 6.82 Eingebbrachte Energie, maximale Energieabsorption, spezifische Energieabsorption und totale spezifische Energieabsorption für schlagartig auf Biegung belastete Hutprofile

6.9.4 Zusammenfassung

Im Rahmen der Untersuchungen zu den Bauteileigenschaften wurden verschiedene Aspekte beleuchtet. Für die unterschiedlichen Belastungsfälle (Stauchung und Biegung bzw. quasistatische und schlagartige Belastung) konnte das große Leichtbau- bzw. Verbesserungspotential der Hybridbauweise gegenüber den reinen Stahlstrukturen aufgezeigt werden. In den untersuchten Fällen konnte beispielsweise für eine schlagartige Stauchbelastung eines Doppel-Z-Profiles je nach Wanddicke des Metalls ein Leichtbaupotential von rund 24 bis fast 80 % ermittelt werden. Diese Potentiale sind von den jeweils verwendeten Versuchskonfigurationen und Werkstoffen abhängig. Bei Verwendung von höherfesten Stahlwerkstoffen verringert sich das Leichtbaupotential entsprechend. Die beiden untersuchten Belastungssituationen (Stauchung, Biegung) resultierten in einem völlig unterschiedlichen Versagensverhalten des FVKs. Während bei den Stauchproben der FVK über die deformierte Länge der Probe annähernd vollständig zerstört wurde, erfolgte bei den Biegeproben lediglich ein mittlerer Bruch durch die FVK-Struktur. Die restliche Verstärkungskomponente blieb bis auf wenige, lokale

Delaminationen und Ablösungen vom Stahl in Bereichen großer plastischer Verformungen weitestgehend intakt. Allerdings hatte die FVK-Verstärkung insbesondere bei den metallischen Grundstrukturen mit geringeren Wanddicken eine deutliche Erhöhung der Steifigkeit zur Folge, was einen positiven Effekt auf die Gesamtbauteilperformance hatte. Neben diesen Aspekten wurden unterschiedliche Prozessparameter untersucht. Ein Einfluss unterschiedlicher Konsolidierungszeiten konnte jedoch nicht nachgewiesen werden. Aus diesen Erkenntnissen wurden schließlich Hinweise für die Methodik zur Entwicklung von Hybridstrukturen abgeleitet (Kapitel 7.5).

6.10 Einfluss einer kathodischen Tauchlackierung

Bei der großserientauglichen Herstellung von Metall-FVK-Hybriden mittels des Prepregpressens soll die in der Automobilindustrie für Strukturbauteile übliche kathodische Tauchlackierung (KTL) zur Vervollständigung der Aushärtung des Matrixharzes genutzt werden. Auch an vollständig ausgehärtete FVK-Komponenten kann im Rahmen eines Automobilfertigungsprozesses die Anforderung nach einer KTL-Tauglichkeit gestellt werden. Während dieses Lackierprozesses werden die Bauteile für etwa 20 bis 45 min auf bis zu 190 °C erhitzt. ^[164] Anders als bei metallischen Werkstoffen können diese Belastungen kritisch sein, da die Glasübergangstemperatur des Matrixharzes bei weitem überschritten ist. Sind jedoch keine oder nur geringe mechanische Belastungen überlagert, ist dies i. d. R. unproblematisch. Ansonsten treten nach SCHÜRMAN im Automobilbau Temperaturen von etwa -40 bis +130 °C auf. ^[86]

In diesem Zusammenhang wurde der Einfluss einer KTL auf die Eigenschaften prepreggepresster Strukturen untersucht. Hierfür wurden zunächst Prüfplatten hergestellt und lackiert. ^[188N] Anschließend wurden aus den Platten die Zugproben entnommen. Bild 6.83 zeigt die Ergebnisse der durchgeführten Zugversuche. Es ist zu erkennen, dass die KTL-Beschichtung keinen signifikanten Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften der Proben hat. Bei den reinen FVK-Proben liegen die Werte der lackierten Proben leicht unter denen der unbeschichteten Prüfkörper. Die Abweichungen liegen jedoch im Bereich der Toleranz der Prüfreihe. Die mittels Autoklavverfahren hergestellten Proben weisen eine etwas höhere Festigkeit auf. Die Bruchdehnung liegt etwa 6 % unter der Bruchdehnung der prepreggepressten Proben. Bei den DD11-CFK-Hybridproben sieht das Ergebnis ähnlich aus. Auch hier liegen sowohl die Werte für die Spannung als auch für die Dehnung auf einem gleichen Niveau.

Diese Ergebnisse korrelieren auch mit den Schliffbildern (Bild 6.84). Die KTL-Beschichtung liegt auf dem FVK auf, ohne diesen zu zerstören oder anzugreifen. Vielmehr ist ein ungleichmäßiges Abscheiden des Lacks auf der nicht leitenden Prepreg-Oberfläche zu erkennen (sogenannte Online-Lackierung). ^[164] Entsprechend ist von einer schlechteren Anhaftung des Lacks auf der Oberfläche auszugehen. Bei den durchgeführten Zugversuchen wurden diesbezüglich keine Unzulänglichkeiten sichtbar und der Lack haftete gut an der Oberfläche.

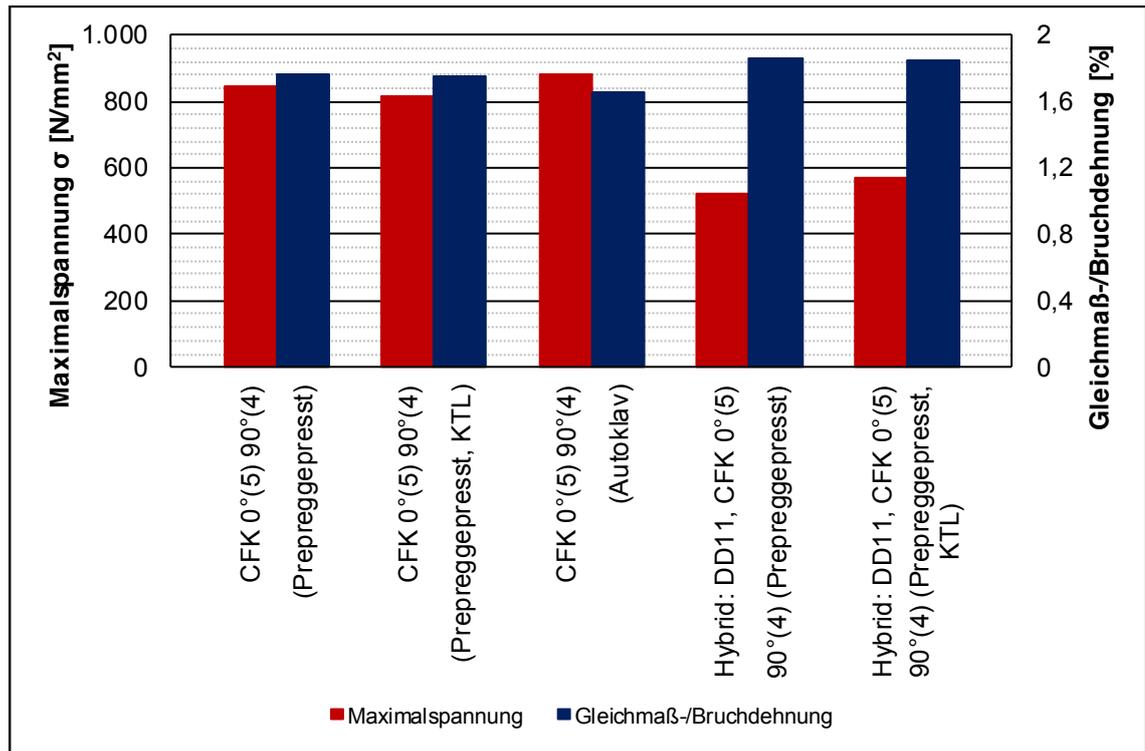


Bild 6.83 Einfluss des Fertigungsverfahrens und einer kathodischen Tauchlackierung auf die Zugeigenschaften von FVK- und Hybridproben

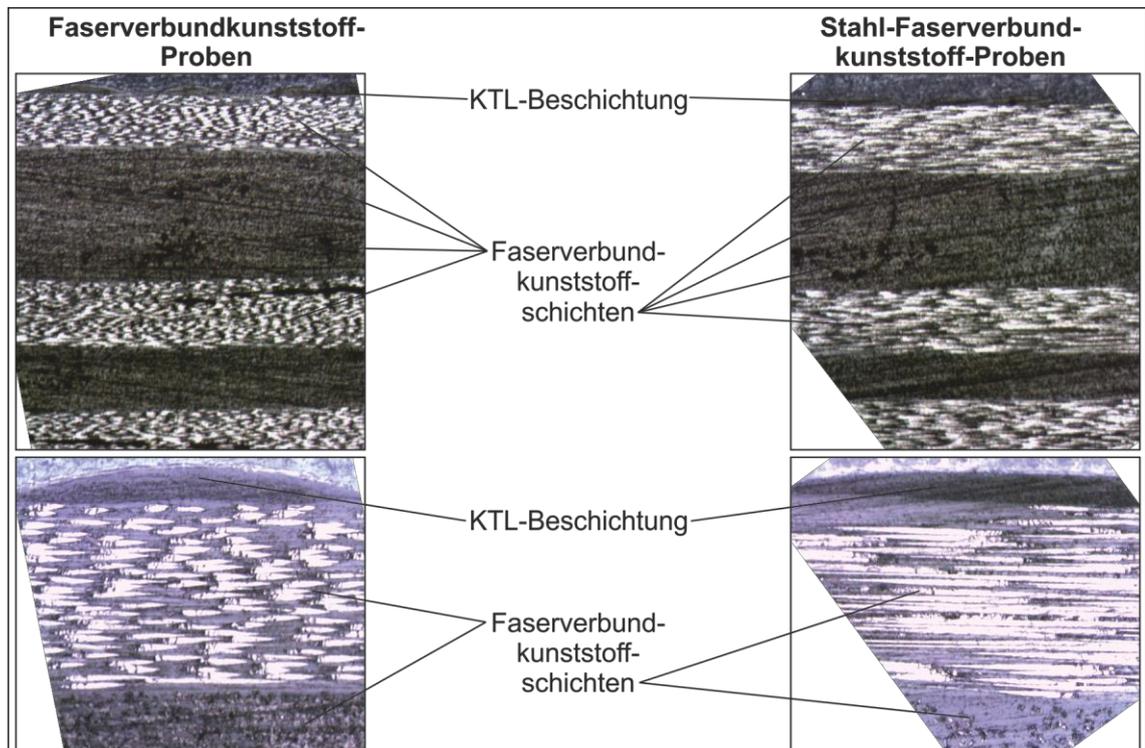


Bild 6.84 Schliffbilder KTL-beschichteter FVK- und Hybridproben

6.11 Gestaltung des Herstellungsprozesses

Das Prepregpressen ist eine Möglichkeit zur effizienten Herstellung hybrider Stahl-FVK-Strukturen. Für die Gestaltung des realen Herstellungsprozesses existieren bereits Lösungsansätze ^{[140] [327P] [328P] [329P]}. In einem textilen Prozess werden Prepregs hergestellt, gestapelt und zugeschnitten. Es schließt sich der eigentliche Hybrid-Herstellungsprozess an, der in Form einer Inselfertigung angelegt ist. Hier werden die bereits umgeformten Stahlblechbauteile zunächst vorgewärmt. Parallel hierzu erfolgt ein manuelles Einlegen der Prepreg-Zuschnitte in eine Entnahmestation. Ein zentraler Handlingroboter legt beide Komponenten anschließend in eine Presse ein. Es erfolgt das Einformen und Aushärten der Prepregs. Das fertige Hybridbauteil wird anschließend entnommen. Die möglichen Taktzeiten liegen laut GRASSER bei ca. 96 s bei 150.000 Bauteilen pro Jahr. Dies ist durch die Nutzung eines modifizierten Matrixharzes möglich, das zum einen schnell aushärtet und zum anderen in der Lage ist, ausreichende Klebeigenschaften zu realisieren. ^[140]

Zur Untersuchung dieses Prozesses wurde ein Versuchsstand entwickelt (Bild 6.85). ^[330S] Dieser verfügt über eine Linearführung, um die insgesamt fünf Stationen der Prozesskette anzufahren. Neben einer Ablage für die zugeschnittenen Prepregs und umgeformten Bleche ist eine Vorheizung der Prepregs durch ein Infrarot-Strahlerfeld möglich. Hierdurch kann die Umformbarkeit verbessert werden (Kapitel 6.6.1 und 6.6.3). Daneben kann die Einförmigkeit in ein Hutprofilwerkzeug erfolgen. Die letzte Station ist die Ablage der fertigen Hybridbauteile. Das Greifen der einzelnen Komponenten wurde über pneumatisch betätigte Sauggreifer mit Auswerfer realisiert. Diese hinterlassen auf den unausgehärteten Prepregs leichte Markierungen bzw. Abdrücke durch den Unterdruck. Diese Fehlstellen konnten durch die Verwendung einer Trennfolie sowie die Optimierung des Saugdrucks verringert werden. Nach dem Verpressen und Aushärten der Prepregs verschwanden die Markierungen jedoch auch ohne den Einsatz einer Trennfolie rückstandslos. Ein Einfluss auf die Faserorientierungen in der äußersten Prepreglage konnte durch Schlibfbilder nicht nachgewiesen werden.

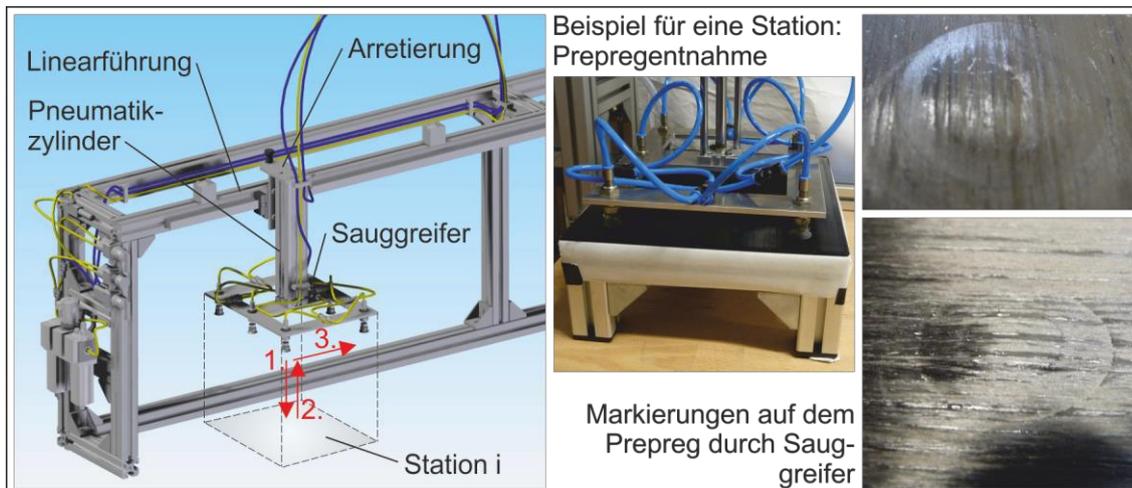


Bild 6.85 Versuchsaufbau und Markierungen auf dem Prepreg durch Sauggreifer

Zu Beginn des Prozesses ist das Trägerpapier auf den Prepregs manuell zu entfernen. Der anschließende Fertigungsprozess konnte mit einer Taktzeit von ca. 30 s realisiert werden. Hinzu kommt die Zeit für eine eventuelle Vorwärmung der Prepregs, welche etwa 30 bis 60 s beträgt, sowie die Zeit für die Voraushärtung im Werkzeug, welche zwischen 90 und 180 s liegt. In Summe ergibt sich somit eine Taktzeit von 150 bis 270 s je Bauteil.

Aufbauend auf diesen Erkenntnissen sowie den weiteren Untersuchungen zu den Prozessparametern (Kapitel 6.2 und 6.3) wurden Konzepte für eine großserientaugliche Fertigung von Hybridbauteilen entwickelt (Bild 6.86).^[260S]

Das erste Fertigungskonzept besteht aus einer hydraulischen Werkzeugpresse mit einem Prepregpress-Werkzeug. Um die Taktzeiten weiter zu reduzieren, kann dieses auch als Mehrfachwerkzeug ausgeführt sein. Einem Einlegeroboter werden die bereits umgeformten Stahlblechbauteile sowie die vorkonfektionierten Prepregs zugeführt. Dieser Roboter kann wie beim Konzept von GRASSER^[140], welches dem typischen Prepreg-Press-Prozess entspricht (Bild 3.1), auch die Entnahme der fertigen Bauteile übernehmen. Werden mehrere dieser Fertigungseinheiten verknüpft, bietet sich beispielsweise ein automatisierter Materialfluss auf der Rückseite der Presse an. Der Nachteil der Pressenlösung ist die Stillstandzeit, welche sich während der Aushärtung des Matrixharzes im geschlossenen beheizten Werkzeug ergibt.

Hieraus wurde das zweite Fertigungskonzept abgeleitet. Dieses verfügt über mehrere autonome Presswerkzeuge, die um einen Roboter angeordnet sind. Dieser legt entsprechend dem Materialzufluss zunächst ein umgeformtes Metallbauteil sowie hierauf ein Prepreg in ein Werkzeug ein. Dieses wird anschließend geschlossen. Die Druckbeaufschlagung auf das Prepreg erfolgt z. B. durch einen Metallstempel oder eine Membranamformung. Bei sechs Werkzeugen ist rechnerisch keine Stillstandzeit mehr vorhanden. Auch diese Fertigungseinheit kann mit weiteren Einheiten zu einer verketteten Reihenfertigung verknüpft werden.

Eine weitere Reduzierung der Taktzeit kann durch das dritte Fertigungskonzept erreicht werden. Hierbei erfolgt ein Wechsel von einer zentralen Fertigung hin zu einer dezentralen Fließbandfertigung. Autonome Presswerkzeuge sind auf einem umlaufenden Band montiert. An definierten Stellen erfolgt das Einlegen der Halbzeuge. Die anschließende Formgebung und Aushärtung erfolgt wie beim zweiten Fertigungskonzept, hier allerdings während der Verweilzeit auf dem Fließband. Durch den Einsatz mehrerer Roboter kann die Ausbringungsmenge gesteigert werden. Die Entnahme der fertigen Bauteile erfolgt am Ende des Fließbandes.

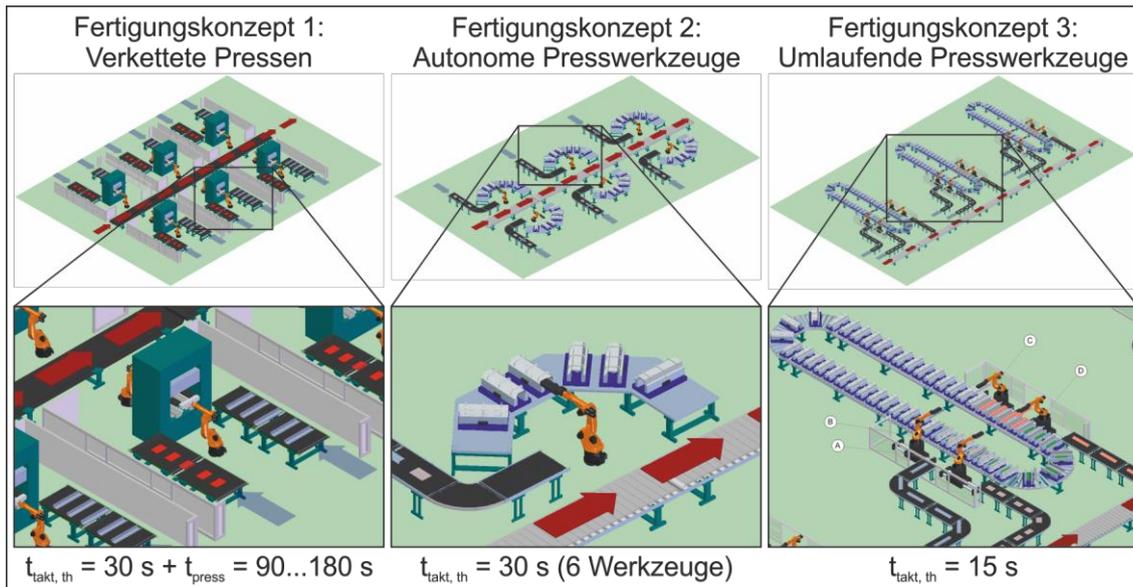


Bild 6.86 Großserientaugliche Fertigungskonzepte für Hybridbauteile

7 Methodik zur Entwicklung von Hybridstrukturen

Aus den vorherigen Ausführungen sind zum einen das Leichtbaupotential von Hybridwerkstoffen und zum anderen das Potential des Prepregpressens zur großserientauglichen Herstellung ebendieser ersichtlich. Bisher fehlt es jedoch an einer übergeordneten Methodik zur Entwicklung von Leichtbaustrukturen unter besonderer Beachtung der Verwendung verschiedener Werkstoffe.^{[15] [165]} Im folgenden Kapitel wird nach der Beschreibung der Grundlagen ein Ansatz geliefert, um eine zielgerichtete und systematische Entwicklung hybrider Leichtbaustrukturen zu unterstützen.

7.1 Grundlagen der Produktentwicklung

Durch die Anwendung von geeigneten Methoden lassen sich Entwicklungs- und Optimierungsprozesse unterstützen, gezielt strukturieren und somit transparent sowie nachvollziehbar gestalten. Methoden dienen auch der Findung von Ideen für neue Produkte, Dienstleistungen, Verfahren oder Strukturen.^{[331] [332]} Für die verschiedenen Domänen wie Softwaretechnik, Informatik, Regelungstechnik oder Maschinenbau existieren verschiedenste, auf den jeweiligen Anwendungsfall angepasste Methoden, um ein systematisches Vorgehen im Entwicklungsprozess zu gewährleisten. Solche Vorgehensmodelle für die Entwicklung technischer Systeme ermöglichen eine einfachere Strukturierung des Entwicklungsprozesses und einen optimierten Informationsfluss.^[157]
[333]

7.1.1 Entwicklungsprozess

Während des Entwicklungsprozesses erfolgt eine Umsetzung von Anforderungen in eine Konzeption bzw. die Erarbeitung einer Lösung zu einem Problem. Der Prozess ist dabei durch eine Aufeinanderfolge von Transformationen charakterisiert. Idealerweise findet er zielgerichtet, geplant und kreativ auf ein Produkt hin statt. Das Ergebnis des Entwicklungsprozesses ist eine Konzeption oder eine Realisierung eines materiellen oder immateriellen, neuwertigen Produkts. An den Entwicklungsprozess schließt sich die Produktion des Produktes an.^[334]

Vor dem Hintergrund immer kürzerer Produktlebenszyklen kommt der rechtzeitigen Entwicklung marktfähiger Produkte eine besondere Bedeutung zu. Hierzu ist ein Vorgehen zur Entwicklung geeigneter Lösungen notwendig, welches planbar, flexibel, optimierbar und nachprüfbar ist. Neben dem rechtzeitigen Eintritt von neuen Produkten in den Markt sind diese passend, kundengerecht und preiswert zu entwickeln. Für die Erfüllung all dieser Anforderungen ist das Vorhandensein von Fachwissen und methodisch-systematischen Arbeiten unabdingbar.^{[158] [334]}

Der Ausgangspunkt für eine Entwicklung sind die Kundenanforderungen. Diese werden durch bestimmte Eigenschaften des Produkts erfüllt. Durch die Anwendung des Pro-

dukts erzielt der Kunde einen Vorteil bzw. Nutzen oder es wird ein Problem durch das Produkt gelöst. ^[334]

7.1.2 Vorgehensmodelle in der Produktentwicklung

7.1.2.1 Klassische Entwicklungsmethodiken im Maschinenbau

Für die systematische Gestaltung eines Entwicklungsprozesses gibt es eine Vielzahl von Vorgehensmodellen. In der VDI-Richtlinie 2221 „Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte“ wird das Vorgehen bei der Entwicklung in sieben Arbeitsschritte unterteilt. ^{[332] [335N] [336]} In den einzelnen Schritten werden verschiedene Lösungsvarianten entwickelt, untersucht und gegebenenfalls erprobt. Anschließend erfolgt eine Beurteilung. In allen Arbeitsschritten werden zudem Auswahlen, Optimierungen und Entscheidungen durchgeführt. Bei einer hohen Komplexität der Problemstellung sollten die Arbeitsschritte in kleinere, überschaubare Schritte untergliedert werden. ^[334]

1. Anforderungsanalyse

Während der Anforderungsanalyse werden Anforderungen geklärt und präzisiert, verfügbare Informationen zusammengetragen und vorhandene Informationsdefizite oder -lücken gesucht. Zudem erfolgen die Überprüfung und das Ergänzen externer Anforderungen, das Hinzufügen unternehmensinterner Anforderungen und das Formulieren der Problemstellung. ^[334]

2. Entwurf von Funktionen und Struktur

Bei dem Entwurf von Funktionen und Strukturen werden die Funktionsschemen und die wesentlichen von dem zu entwickelnden Produkt zu erfüllenden Haupt- bzw. Teilfunktionen erarbeitet. Die Gliederung und Kombination der Funktionen zu Strukturen bilden die Basis der Suche nach Lösungen für das Endprodukt. ^[334]

3. Prinzipien und Struktur

In diesem Schritt wird nach Lösungsprinzipien für die Funktionen gesucht. Hierfür werden zunächst physikalische, chemische und andere Effekte gesucht und anschließend durch wirkstrukturelle Festlegungen realisiert. Durch diese Festlegungen wird das Lösungsprinzip gebildet. Hiernach werden die Lösungsprinzipien entsprechend den Funktionsstrukturen zu einer Wirkstruktur verknüpft. ^[334]

4. Modularisierung

Bevor eine weitere Konkretisierung der Lösungen erfolgt, werden die prinzipiellen Lösungen im Rahmen der Modularisierung in mögliche Module eingeteilt. ^[334]

5. Konkretisierung der Module

Bei der Konkretisierung der Module werden die für die Produktoptimierung maßgeblichen Module gestaltet. Der Konkretisierungs- und Vollständigkeitsgrad der geometrischen, stofflichen und programmtechnischen Festlegung wird dabei nur so weit getrieben, dass ein Erkennen und Auswählen eines Gestaltungsoptimums ermöglicht wird. Dieser Schritt wird häufig auch als Vorgestalten oder Grobgestalten bezeichnet. ^[334]

6. Endgestalten

Beim Endgestalten oder auch Feingestalten werden die konkretisierten bzw. grobgestalteten Module mittels weiterer Detailangaben, durch das Ergänzen weiterer Gruppen und Elemente sowie durch das Verknüpfen aller Gruppen und Teile endgültig festgelegt. ^[334]

7. Ausarbeitung

Während der Ausarbeitung werden wesentliche Festlegungen zur fertigungstechnischen Realisierung und zum Produktgebrauch getroffen. ^[334]

Die Ablaufpläne bei der Entwicklung maschinenbaulicher Produkte nach PAHL/BEITZ (Bild 7.1) oder ROTH stimmen mit der VDI-Richtlinie 2221 überein. Es werden jedoch zum Teil unterschiedliche Nomenklaturen verwendet. ^[157]

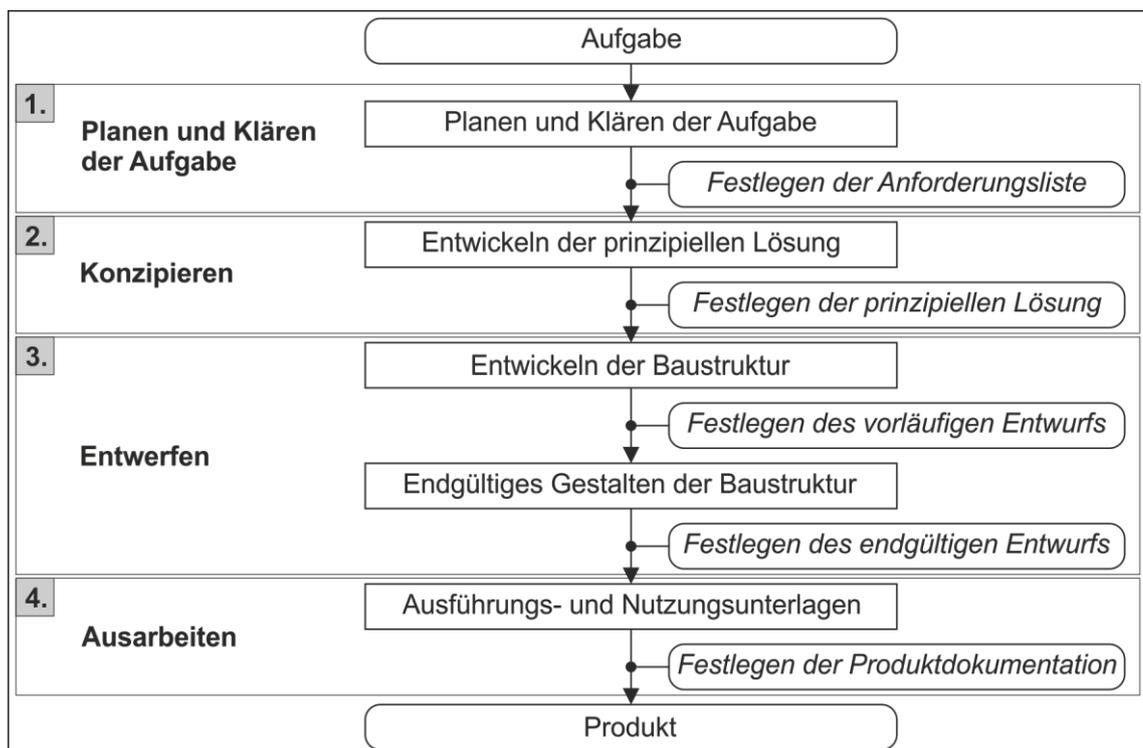


Bild 7.1 Hauptarbeitsschritte beim Planen und Konzipieren nach PAHL et al. ^[158]

7.1.2.2 Entwicklung von Bauteilen aus Faser-Kunststoff-Verbund

Die VDI-Richtlinie 2014 zur Entwicklung von Bauteilen aus FVK ist in drei Teile untergliedert. Blatt 1 beinhaltet die Grundlagen von FVK ^[337N]. In Blatt 2 werden die Themen Konzeption und Gestaltung von FVK-Bauteilen behandelt ^[338N] und in Blatt 3 steht die Berechnung im Mittelpunkt. ^[339N]

In der Richtlinie wird der Entwicklungsprozess von FVK-Bauteilen in fünf Phasen unterteilt. Dabei wird auch dem Umstand Rechnung getragen, dass die Eigenschaften des FVKs erst bei der Herstellung des Bauteils entstehen und daher signifikant von den Herstellungsbedingungen abhängen. Entsprechend ist eine enge Verknüpfung von Fertigung, Konstruktion und Versuch vorgesehen. Die einzelnen Phasen sind die Konzepterstellung, die Konstruktionsentwicklung, die Qualifikation sowie die Serie. Der Ablauf der Entwicklung von FVK-Bauteilen nach der VDI-Richtlinie 2014 ist in Bild 7.2 dargestellt.

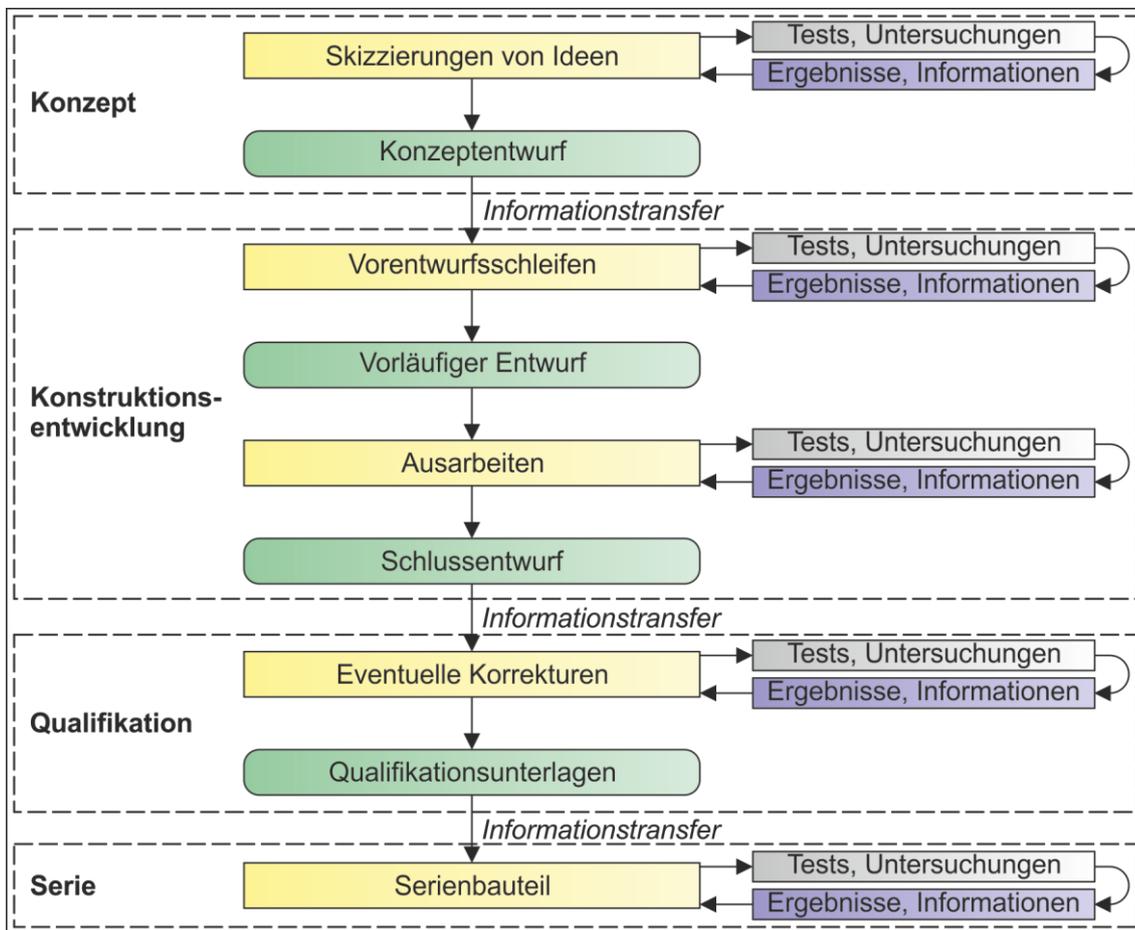


Bild 7.2 Ablauf der Entwicklung von FVK-Bauteilen nach VDI 2014 ^[338N]

7.1.3 Handlungsbedarf

Die bekannten Vorgehensmodelle in der Produktentwicklung sind nur bedingt geeignet, den Entwicklungs- und Optimierungsprozess hybrider Leichtbaustrukturen mit einer

Vielzahl an Freiheitsgraden und einer enormen Komplexität bei der Entwicklungsaufgabe zu unterstützen und gezielt zu fördern. So fehlt es den klassischen Entwicklungsmethodiken im Maschinenbau beispielsweise an spezifischen Vorgehensmodellen, die Werkstoff- oder Prozesseigenheiten beachten können, oder an einer durchgehenden Wissensbasis.

7.2 Überblick über die Methodik

Die vorgeschlagene Methodik zur Entwicklung von Hybridstrukturen unterteilt sich gemäß Bild 7.3 in sechs Module. Die einzelnen Module weisen untereinander Interdependenzen auf. In Modul 1 erfolgen die Erfassung der Markt- und Wettbewerbssituation sowie die Abschätzung von gegenwärtigen und zukünftigen Trends. Modul 2 befasst sich mit der Entwicklung der Hybridstruktur an sich. Hierfür liefert auch das Modul 3 einen Beitrag, welches Aspekte des methodischen Gestaltens, wie z. B. Gestaltungsrichtlinien, beinhaltet. Modul 4, d. h. die Optimierung von Produkten, ist parallel zu Modul 2 angeordnet. Die Optimierung eines konventionellen oder eines in Hybridbauweise realisierten Produkts beinhaltet jedoch auch das Modul 2, also die Entwicklung der Hybridstruktur. Die Planung der Herstellungsprozesse ist der Schwerpunkt von Modul 5. Das Modul 6 stellt ein Vorgehen zur Planung der Herstellungsprozesse bereit. Die einzelnen Module werden vom letzten Modul eingerahmt. In der Wissensbasis, Modul 6, wird das gesamte Wissen abrufbar bereitgestellt.

Je nach Entwicklungsaufgabe können unterschiedliche Pfade durch diese Methodik gelegt werden. Ist die Marktsituation beispielsweise bekannt, kann auf das Modul 1 verzichtet werden. Bei einer Neuentwicklung kann auch das Modul 4 gegebenenfalls keine Anwendung finden, sondern stattdessen nur das Modul 2. Wichtig ist jedoch, dass die entsprechenden Wechselwirkungen der unterschiedlichen Module beachtet werden. Diese entstehen z. B. an den Schnittstellen zwischen Produkt, Werkstoff oder Herstellung. Insbesondere das Produkt und der Produktionsprozess müssen aus diesem Grund integrativ entwickelt werden. Im Folgenden werden die einzelnen Bestandteile der Methodik erläutert.

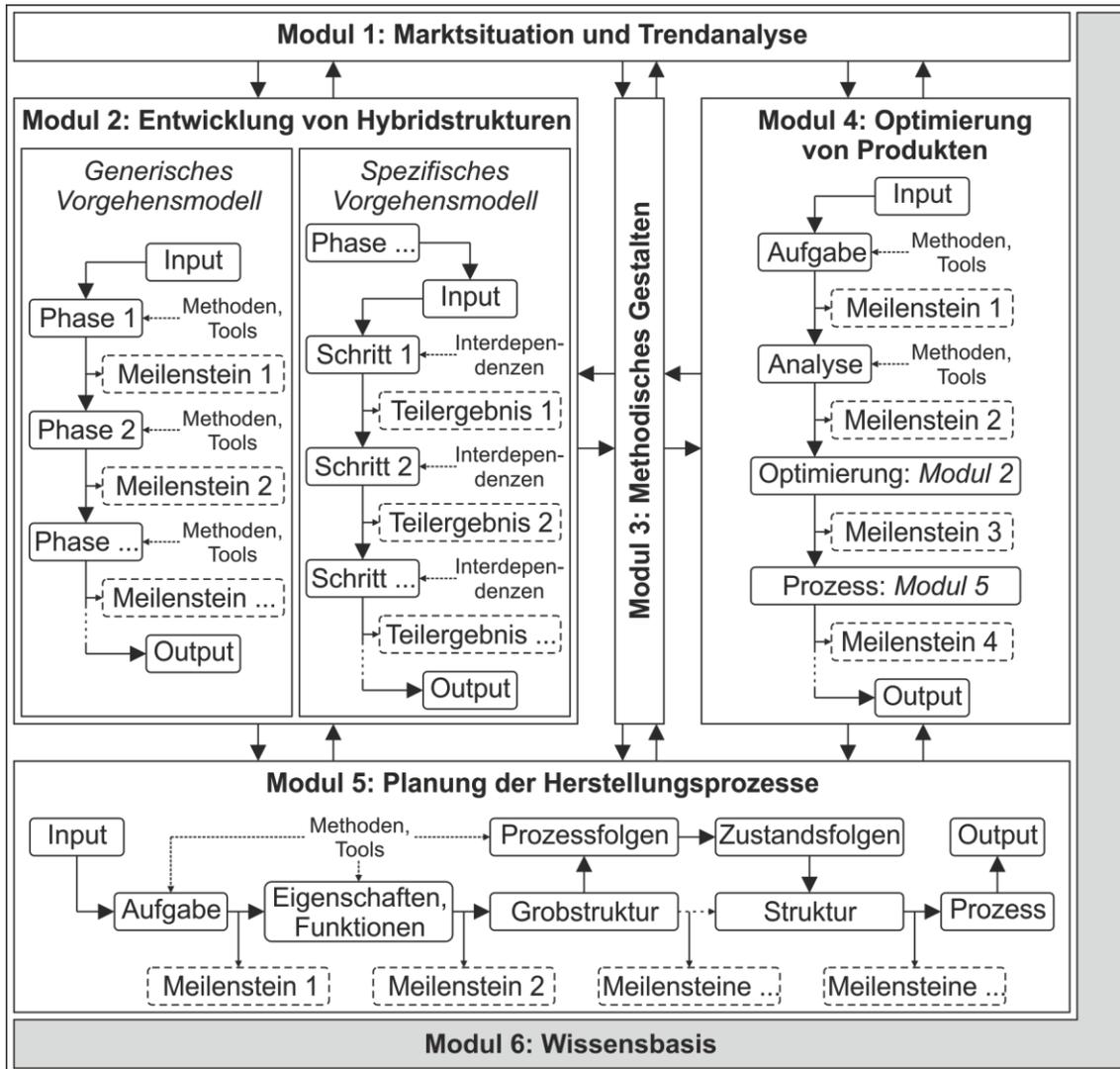


Bild 7.3 Aufbau der Methodik zur Entwicklung von Hybridstrukturen

7.3 Methodik-Modul 1: Marktsituation und Trendanalyse

In Modul 1 der Methodik zur Entwicklung von Hybridstrukturen erfolgt zunächst als Basis für die weitere Arbeit die Erfassung der Markt- und Wettbewerbssituation. Ferner werden gegenwärtige und zukünftige Trends abgeschätzt.

1. Gegenwärtige Situation und Ableitung von Strategieoptionen

Als Grundlage zur Analyse der gegenwärtigen Markt- und Wettbewerbssituation dient wie auch bei WENZELMANN das Verfahren VITOSTRA (Verfahren zur Entwicklung intelligenter technologieorientierter Geschäftsstrategien) nach BÄTZEL. ^[340] ^[341] Dabei handelt es sich um einen diskursiven Ansatz, der verschiedene in sich schlüssige strategische Stoßrichtungen liefert. VITOSTRA unterteilt sich in fünf Phasen: 1. Geschäftsdefinition, 2. Analyse strategischer Optionen, 3. Konsistenzanalyse, 4. Branchenanalyse sowie 5. Bewertung der Strategievarianten. ^[341]

Im Rahmen der Geschäftsdefinition wird zunächst festgelegt, in welchem Bereich bzw. Umfeld das Unternehmen positioniert ist, z. B. im Bereich der Herstellung automobiler Strukturbauteile. Daraus ergeben sich der relevante Markt sowie der Wettbewerb. Es schließt sich die Analyse strategischer Optionen an, in der die systematische Ermittlung strategischer Variablen realisiert wird. Als strategische Variablen werden dabei die Stellgrößen bezeichnet, die einem Unternehmen zur Verfügung stehen, um sich strategisch zu positionieren. Auch die möglichen Ausprägungen jeder Variable werden festgelegt. Bezogen auf ein exemplarisches Unternehmen könnten hierunter Entscheidungen hinsichtlich des Fokus auf eine spezifische Werkstoffkombination (z. B. Stahl-CFK), auf die zu erzielenden Stückzahlen (z. B. Großserie) oder auf ein Fertigungsverfahren (z. B. Prepregpressen) fallen. Die Konsistenzanalyse ergibt als Resultat Kombinationen von Ausprägungen der strategischen Variablen, die innerhalb einer Strategie als konsistent oder auch inkonsistent zu bezeichnen sind. Die Branchenanalyse umfasst beispielsweise einen Vergleich der verfolgten Strategie mit denen möglicher Wettbewerber. Abschließend wird eine Bewertung der Strategievarianten durchgeführt. Als wesentliche Kriterien sind dabei die Erreichbarkeit sowie die Attraktivität der Varianten zu berücksichtigen. Das Ziel dabei ist, die erfolgversprechendste Strategievariante für das betrachtete Unternehmen auszuwählen. ^[340] ^[341]

2. Zukünftige Trends

Die Ermittlung und Erfassung zukünftiger Trends sind die zentralen Ziele dieses Schrittes. Hierfür stehen verschiedene Werkzeuge wie beispielsweise die Szenario-Technik, die Delphi-Methode oder die Trendanalyse zur Verfügung. Die im Folgenden zugrunde gelegte Trendanalyse hat das Ziel, Chancen und Gefahren ebenso wie sich daraus ergebende Entwicklungspotentiale herauszustellen. ^[342] Die verschiedenen Trendanalysen beispielsweise nach GAUSEMEIER ^[342], FINKE/SIEBE ^[343], KLOPP/HARTMANN ^[157] ^[344], PILLKAHN ^[345] oder nach HORX ^[346] bieten diese Möglichkeit.

Bei der Trendanalyse wird im Wesentlichen in vier Schritten vorgegangen. Zunächst erfolgen die Recherche, die Aufnahme sowie die Beschreibung der identifizierten Trends. Aktuelle Trends im Automobilssektor sind beispielsweise die Elektromobilität oder Multimaterial- und Hybridbauweisen. Das Suchfeld kann z. B. durch die ersten Schritte des VITOSTRA-Verfahrens eingeschränkt werden. In diesem Schritt können Verfahren wie die Delphi-Methode eingesetzt werden. Hiernach werden die einzelnen Trends analysiert, gefiltert und bewertet, wobei Aspekte wie Eintrittswahrscheinlichkeit, Auswirkungen oder Stärke eine Rolle spielen. Daraus lassen sich Chancen und Gefahren ableiten. So eröffnet das Konzept des kohlenstofffaserbasierten BMW i3 als Chance einen enormen Erkenntnisvorsprung auf dem Gebiet des breiten Einsatzes dieser Werkstoffklasse. Auf der anderen Seite besteht jedoch die Gefahr, dass sich z. B. aufgrund hoher Werkstoffkosten des CFKs langfristig hybride Strukturen etablieren. Zum Abschluss der Trendanalyse werden schließlich die Entwicklungspotentiale abgeleitet, strategische Maßnahmen erarbeitet oder Ideen für Produkte entwickelt. Die Potentiale

geben Auskunft darüber, wie die Unternehmung die erkannten Chancen nutzen und die erkannten Risiken umgehen kann. ^{[342] [343] [344] [345] [346]}

7.4 Methodik-Modul 2: Entwicklung von Hybridstrukturen

Das Methodik-Modul 2 befasst sich mit der Entwicklung von Hybridstrukturen. Um den spezifischen Anforderungen bei der Kombination verschiedener Werkstoffe gerecht zu werden, ist dieses Modul in zwei Teile unterteilt. Ein generisches Vorgehensmodell bildet die Grundlage der Methodik. Dieses Modell beschreibt und strukturiert den Entwicklungsprozess und unterteilt diesen in Arbeitsphasen, Meilensteine sowie Ein- und Ausgangsgrößen einzelner Prozessschritte. Die spezifischen Vorgehensmodelle beinhalten Eigenschaften der Prozesse, der Verfahren oder der Werkstoffe sowie deren Wechselwirkungen. Dieses Vorgehen wurde auch von KAISER für die Entwicklung mechatronischer Systeme in der Technologie MID vorgeschlagen. ^[347]

7.4.1 Generisches Vorgehensmodell

Das generische Vorgehensmodell beschreibt abstrakt die allgemeinen Schritte zur Entwicklung von Hybridstrukturen und ist auf verschiedene Problemstellungen anwendbar (Bild 7.4). Das Vorgehen orientiert sich an den Hauptarbeitsschritten beim Planen und Konzipieren nach PAHL/BEITZ. ^[158] Es umfasst den gesamten Entwicklungsprozess von der Definition der Problemstellung bis zum fertig entwickelten Produkt. Festgelegt werden die Phasen, mögliche Methoden sowie Meilensteine.

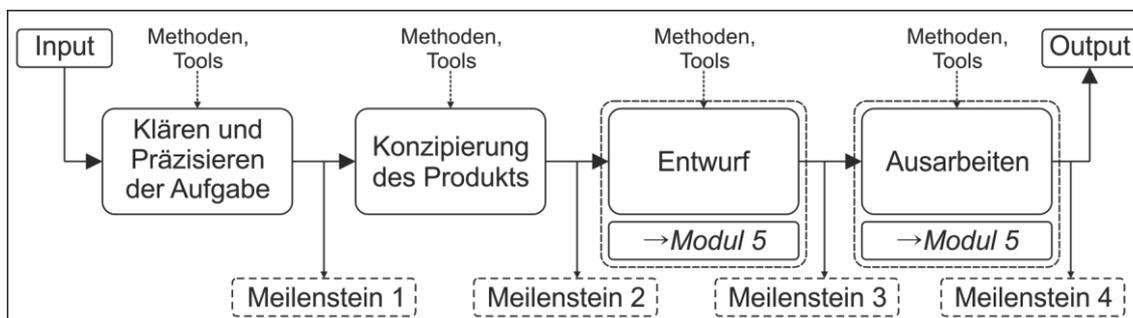


Bild 7.4 Generisches Vorgehensmodell nach PAHL et al. ^[158]

1. Klären und Präzisieren der Aufgabe

Zu Beginn des Entwicklungsprozesses steht die Definition einer Problemstellung oder ein entsprechender Entwicklungsauftrag. Mittels einer Anforderungsanalyse werden die Anforderungen an das zu entwickelnde Produkt ermittelt, analysiert und anschließend dokumentiert. Hierbei unterstützt neben der Anforderungsanalyse nach PAHL/BEITZ ^[157] ^[158] auch die Methode des Quality Function Deployment (QFD) ^{[79] [348] [349] [350]}, welche die Festlegung von marktgerechten Produkteigenschaften unterstützt. Zudem kann beim Bestehen von bereits bekannten oder vergleichbaren Produkten eine Schwach-

stellenanalyse^{[79] [334] [342] [348] [349] [351] [352] [353]} durchgeführt werden. Das Ergebnis dieser Arbeitsphase ist die informative Festlegung in einer Anforderungsliste.^[158]

2. Konzipierung des Produkts

Im Rahmen der Konzipierung erfolgt zunächst eine Abstraktion der geforderten Eigenschaften. Dies wird durch eine Dekomposition des zu betrachtenden Bauteils in definierte Funktionen und Funktionsbereiche erreicht. Diese werden anschließend zu einer Funktionsstruktur verknüpft (Bild 7.5). Den einzelnen Funktionen werden mögliche Wirkprinzipien zugeordnet, deren gezielte Kombination zu einer prinzipiellen Lösung führt. Dabei unterstützen u. a. die verschiedenen Methoden der Lösungssuche.^{[158] [331]}

^{[334] [340] [342] [348] [351] [354] [355] [356] [357] [358]} Die Ideen sowie Lösungen werden nach technischen und wirtschaftlichen Kriterien beispielsweise mittels einer Nutzwertanalyse bewertet. Dabei sind auch Wechselwirkungen mit der Gestaltung oder dem Herstellungsprozess zu beachten. Das Ergebnis der Produktkonzipierung ist ein domänenunabhängig formuliertes Lösungskonzept, das die prinzipielle Gestalt des späteren Produkts beschreibt.^{[158] [347]} Hierbei können existierende Spezifikationstechniken aus anderen Bereichen adaptiert werden, wie beispielsweise die nach FRANK.^[359]

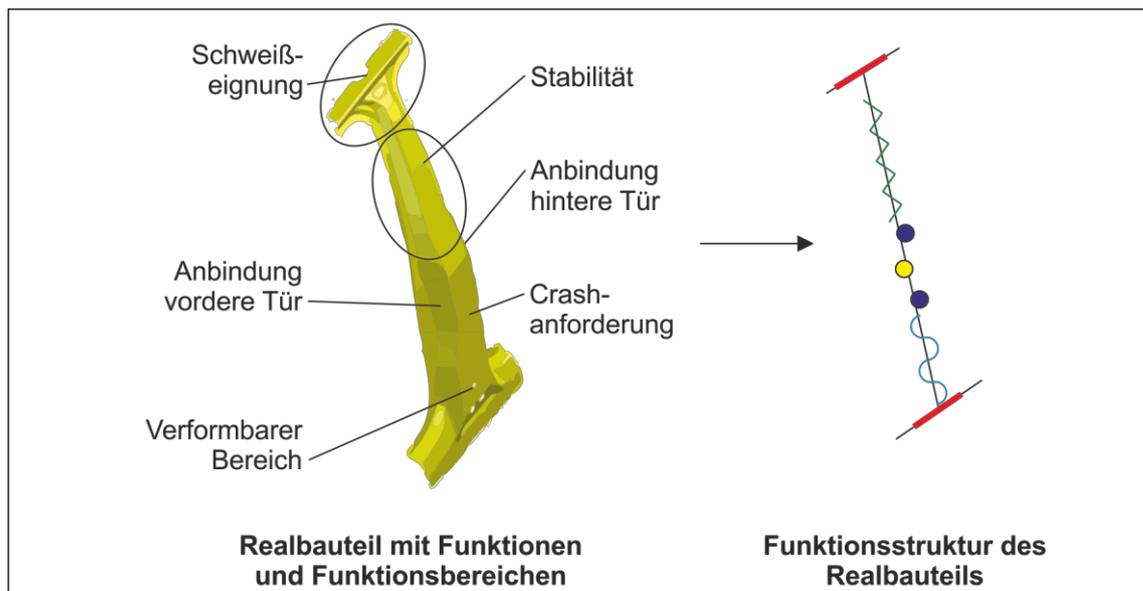


Bild 7.5 Beispiel für die Ableitung von Funktionen, Funktionsbereichen sowie einer Funktionsstruktur für ein Realbauteil

3. Entwurf

Der Entwurf ist als Teil des Konstruktionsprozesses zu sehen. Dabei wird ausgehend von einer prinzipiellen Lösung die Baustruktur nach technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten festgelegt. Anwendung finden hierbei die Ansätze des methodischen Gestaltens (Kapitel 2.6). Je nach Komplexität der Entwicklungsaufgabe und des Kenntnisstandes ist ein iteratives Annähern an eine optimale Lösung notwendig. Abschließend werden die Entwürfe bewertet und der vielversprechendste ausgewählt. Dieser dient als Input für die Ausarbeitung.^[158]

4. Ausarbeiten

Zum Abschluss wird der ausgewählte Entwurf ausgearbeitet. Dies bedeutet, dass alle Werkstoffe, Abmessungen, Toleranzen oder Oberflächenbeschaffenheiten festgelegt werden. In Verbindung mit der Planung der Herstellungsprozesse werden die erforderlichen Fertigungsschritte abgestimmt und die Herstellbarkeit überprüft. ^[158] In diesem Schritt können weitere methodische Ansätze genutzt werden, beispielsweise zur Werkstoffauswahl. ^[127]

7.4.2 Spezifische Vorgehensmodelle

In den spezifischen Vorgehensmodellen werden die einzelnen Entwicklungsschritte in den Mittelpunkt gerückt. Als Basis dient dabei das generische Vorgehensmodell mit den entsprechenden Phasen. Die einzelnen Phasen sind für verschiedene Werkstoffe oder Verfahren jeweils unterschiedlich ausgeprägt. Beispielsweise kann nach KAISER das Klären und Präzisieren der Aufgabe in drei Prozessschritte unterteilt werden: 1. Klären der Aufgabe, 2. Analyse des Umfelds sowie 3. Analyse der Anforderungen. ^[347] Dabei kommen spezifische Methoden und Richtlinien zum Einsatz. Ein Beispiel für die Prozessschritte beim Konzipieren eines Hybridbauteils zeigt Bild 7.6. ^[158] Als Eingangsgrößen existieren eine Anforderungsliste sowie ein entsprechend festgelegtes Bauteil. Dieses wird hinsichtlich der Funktionen und Funktionsbereiche analysiert. Daraus werden Lösungsideen und Wirkmuster entwickelt und verknüpft, woraus am Ende ein Produktkonzept entsteht. Bei der Konzipierung kommen verschiedene Techniken und Methoden beispielsweise zur Lösungssuche oder Kombination verschiedener Wirkprinzipien zum Einsatz. ^{[158] [331] [334] [340] [342] [348] [351] [354] [355] [356] [357] [358]}

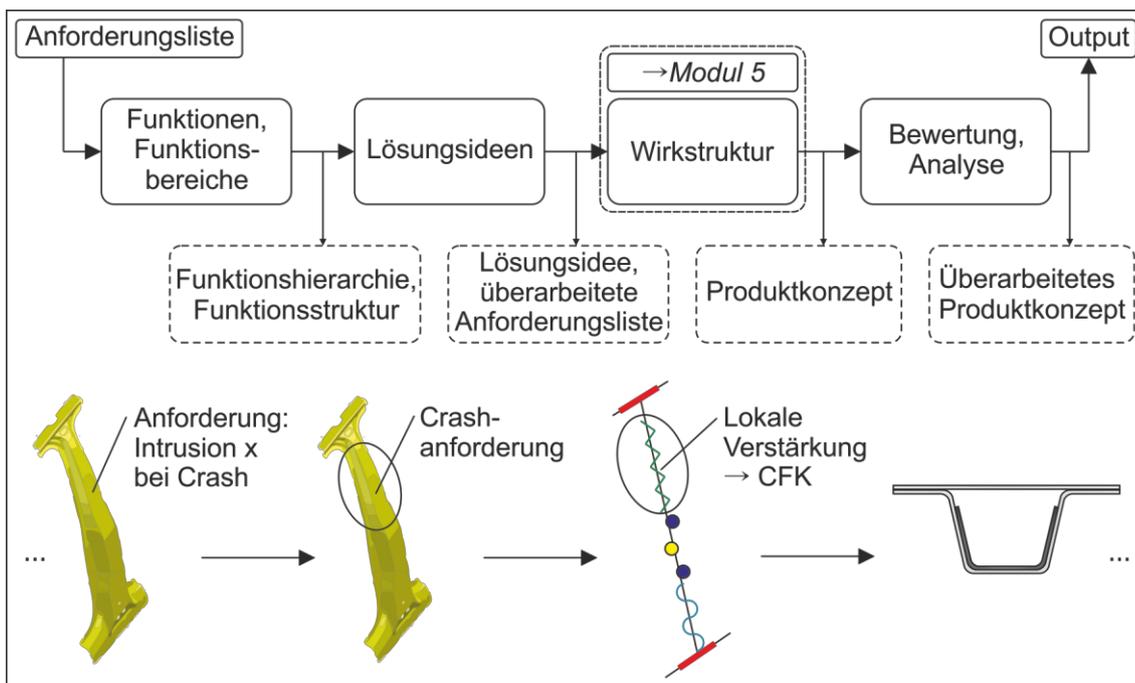


Bild 7.6 Beispiel für einen Teil eines spezifischen Vorgehensmodells: Prozessschritte beim Konzipieren eines Hybridbauteils

7.5 Methodik-Modul 3: Methodisches Gestalten

Das Methodik-Modul 3 beinhaltet die Aspekte des methodischen Gestaltens. Hierzu gehören die Grundregeln der Gestaltung, die verschiedenen Gestaltungsprinzipien sowie Gestaltungsrichtlinien (Kapitel 2.6).

Für das systematische Entwerfen und Ausgestalten eines Produkts sowie des zugehörigen Prozesses unter bestmöglicher Ausnutzung der Potentiale von Werkstoff und Verfahren dienen die verschiedenen Gestaltungsrichtlinien. Neben den allgemeinen Gestaltungsrichtlinien gibt es eine Vielzahl von material- und verfahrensabhängigen Gestaltungsrichtlinien (Kapitel 2.6), welche bereitgestellt und umgesetzt werden sollten. Im Folgenden werden ausgewählte Richtlinien und Aspekte vorgestellt, die bei der Produktentstehung von Metall-FVK-Hybriden von Relevanz sind. Diese basieren im Wesentlichen auf den experimentellen Untersuchungen und erlangten Erkenntnissen aus den vorigen Kapiteln 5 und 6.

Auswahl der Grundwerkstoffe

Bei der Auswahl der Grundwerkstoffe ist auf die Kompatibilität der Werkstoffe zueinander zu achten. Beispielsweise können bestimmte Kombinationen ohne weitere Maßnahmen zu thermischen Eigenspannungs- (Aluminium-CFK-Hybrid) oder Korrosionsproblemen (Stahl-CFK-Hybrid) führen. Zudem sind vorab die Zielkosten für das Produkt zu definieren. Wird ein FVK eingesetzt, ist bei der Wahl eines geeigneten Matrixsystems zunächst das Verfahren festzulegen. Daneben sind weitere Eigenschaften, wie z. B. die Klebeigenschaften des Harzes beim direkten Verpressen, zu definieren. Der Faserdurchmesser und der Fasertyp beeinflussen sowohl die Umformeigenschaften als auch die Drapierbarkeit. Insbesondere bei komplexen Geometrien ist dies zu beachten. Hochpreisige Werkstoffe wie CFK sind möglichst nur dort einzusetzen, wo sie einen nutzbaren Vorteil bieten. Andernfalls ist zwecks Kostenoptimierung eine Substitution z. B. durch GFK zu prüfen. Auch durch die Kombination verschiedener Werkstoffe kann ein Vorteil im Verbund erzielt werden. So könnten kostengünstige Glasfasern in Richtung der beim Herstellungsprozess wirkenden Umformkräfte ausgerichtet sein, also i. d. R. 90° . Die hochpreisigen Kohlenstofffasern würden hingegen in Richtung der auf das spätere Bauteil wirkenden Kräfte ausgerichtet, d. h. in 0° -Richtung.

Einsatz der Werkstoffe

Die Grundidee der hybriden Bauweise ist, dass der richtige Werkstoff am jeweils optimalen Ort des Bauteils eingesetzt wird. Beispielsweise sollte eine CFK-Verstärkung in Bereichen hoher Belastung eingesetzt werden, während in un- oder wenig belasteten Bereichen auch kostengünstigere Werkstoffe zum Einsatz kommen können. Bei der Gestaltung ist darauf zu achten, dass dieses Ziel umgesetzt und erreicht wird. Bei einer schlagartigen Stauchbelastung des Hybridverbunds wird der CFK-Werkstoff bestmöglich ausgenutzt (Kapitel 6.9.2.1), während bei einer schlagartigen Biegebelastung der Bruch mittig erfolgt (Kapitel 6.9.2.3) und so nur ein Teil des FVKs vollständig ausge-

nutzt wird. Wurde allerdings eine steifigkeitsgetriebene Auslegung vorgenommen, kann dies jedoch ausreichen.

Geometrie und Bauteilgestaltung

Die Geometrie des Bauteils sowie die Bauteilgestaltung beeinflusst verschiedenste Aspekte. Im Hinblick auf den Umformprozess ist bei der Gestaltung der Geometrie sowie der Umformwerkzeuge auf die Entformbarkeit zu achten. Bei reinen Stahlwerkzeugen führen 90°-Flanken zu einem geringeren Druck auf das Laminat, was zu schlechteren Qualitäten führen kann. Sind solche Flanken nicht zu vermeiden, sollten die Werkzeuge entsprechend angepasst werden (Kapitel 6.4.1 und 6.5). Je nach Halbzeug ist nur eine gewisse Bauteilkomplexität durch eine Umformoperation abbildbar (Kapitel 6.5 und 6.6.2). Sehr kleine Radien, Ecken oder Kanten sollten vermieden werden. Zwar konnten selbst Radien von 1 mm mittels des Prepregpressens noch gut ausgeformt werden (Kapitel 6.4.2), jedoch ist bei der Umformung von komplexeren Geometrien davon auszugehen, dass sich deutliche Faserverschiebungen oder Fehlstellen einstellen. Zudem sind die möglichen Radien von der Laminatdicke und dem Lagenaufbau abhängig. Entsprechend der Literatur sollten Radien mindestens 2 mm betragen (Kapitel 6.4.2). Bei der Gestaltung des Bauteils ist zudem darauf zu achten, dass die Wandstärken möglichst gering und konstant gehalten werden. Ist dies nicht möglich, dann sind sanfte und gegebenenfalls gestufte Übergänge zu realisieren. Masseanhäufungen und Hinterschnitte sind zu vermeiden. Werden diese Maßnahmen beachtet, kann das Matrixharz schnell und gleichmäßig aushärten (Kapitel 2.6). Sind Bohrungen oder Aussparungen in dem Bauteil vorhanden, so muss nicht nur eine Abdichtung der Werkzeugkavität erfolgen, sondern es muss zusätzlich dafür gesorgt werden, dass kein Matrixharz in den Bereich der Bohrung eindringt. Dies kann beispielsweise durch Dichtelemente ^[360P] oder ein angepasstes Werkzeug ^[361P] realisiert werden. Durch die FVK-Verstärkung kann die Wanddicke der metallischen Grundstruktur verringert werden. Es ist jedoch zu beachten, dass eine zu geringe Wandstärke die erforderliche Steifigkeit z. B. im Bereich von Kräfteinleitungsstellen oder Auflagerpunkten nicht mehr erbringen kann (Kapitel 6.9.2.3). Auf der anderen Seite können auch zusätzlich eingebrachte metallische Verstärkungsstrukturen durch eine FVK-Verstärkung ersetzt werden.

Thermische Eigenspannungen

Je nach Werkstoffkombination und Prozessparametern sind die thermischen Eigenspannungen in einem Hybridverbund beträchtlich (Kapitel 6.7). Dies muss bei der Auslegung und Gestaltung des Produkts sowie des Prozesses berücksichtigt werden. Die Wärmespannungsproblematik kann durch die Anpassung der Grundwerkstoffe entschärft werden (Kapitel 2.6). Dies kann neben der Wahl anderer Werkstoffkombinationen durch angepasste Lagenaufbauten realisiert werden. Um Verformungen zu unterbinden, sind die Hybridwerkstoffe symmetrisch aufzubauen. Soll lediglich eine Verstärkung in eine Metallstruktur eingebracht werden, muss das Laminat so aufgebaut sein, dass es die Verformungen infolge Wärmespannungen im Verbund ausgleicht.

Korrosion

Bei der Verwendung von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen ist insbesondere in Kombination mit Stahlwerkstoffen zu verhindern, dass Kohlenstofffasern an der metallischen Komponente anliegen, da es sonst zu einem Korrosionsproblem kommen könnte. Entsprechende Vorkehrungen sind beispielsweise eine trennende und isolierende Zwischenschicht aus glasfaserverstärktem Kunststoff oder ein Klebstofffilm.

Fügetechnik

Beim direkten Verpressen der Metall- und der FVK-Komponente sollten die Fasern in der grenzschichtnächsten Prepreg-Lage orthogonal zur Belastungsrichtung ausgerichtet sein (Kapitel 5.3). Bei der Ausbildung einer definierten Klebschicht durch einen Strukturklebstoff oder einen Klebstofffilm kann dies vernachlässigt werden. Es ist jedoch in allen Fällen darauf zu achten, dass die Kräfte idealerweise unter einem Winkel von 0° oder gegebenenfalls auch unter einem Winkel von 90° in die Fasern eingeleitet werden (Kapitel 5.3.1). Eine andere Möglichkeit zur Verbesserung der Verbindungseigenschaften stellt das Einbringen einer Wirrfaser- oder Vliesschicht zwischen Metall und FVK dar ^[362P] ^[363P].

Werkzeuge

Um eine bestmögliche Bauteilqualität beim Prepregpressen zu erreichen, sind angepasste Werkzeuge mit einer abgeschlossenen Kavität zu nutzen (Kapitel 6.8.2). Hierdurch lassen sich Bauteile endkonturennah herstellen. Ist eine Nachbearbeitung am Rand zulässig, ist auch die Verwendung offener Werkzeuge möglich (Kapitel 6.8.1). Die Nachbearbeitung führt jedoch insbesondere bei kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen zu höheren Kosten. Um Realbauteile lokal mit einer FVK-Verstärkung zu versehen, kann eine Abdichtung mittels einer Silikondichtung auf der metallischen Grundkomponente erfolgen. Ein entsprechender Dichtrahmen kann zusätzlich als Niederhalter genutzt werden (Kapitel 6.8.5). Darüber hinaus ist das Werkzeug so zu gestalten, dass ein gleichmäßiger Druck auf das Prepreg einwirkt (Kapitel 6.5.4).

Umformung

Die Umformung von Prepregs wird von einer Reihe von Faktoren beeinflusst. Um das Zwischenlagengleiten während dieser Fertigungsoperation zu verbessern und hierüber die Qualität des Hybridverbunds zu optimieren, sollten die Prepregs vor der Umformung vorgewärmt werden (Kapitel 6.6.1). Die Verwendung segmentierter Niederhalter ermöglicht eine gezielte Steuerung des Materialflusses während der Umformung (Kapitel 6.4.1 und 6.8.4).

7.6 Methodik-Modul 4: Optimierung von Produkten

Das Methodik-Modul 4 umfasst die Optimierung von konventionellen Produkten sowie Hybridstrukturen durch die Anwendung eines Multi-Material- bzw. Hybrid-Ansatzes.

Wesentlicher Unterschied zu der Entwicklung von Hybridstrukturen ist, dass bereits ein funktionstüchtiges Bauteil vorhanden ist. Dieses dient als Input für die Optimierung. Das Modul ist in Anlehnung an PEITZ aufgebaut.^[349] Das Vorgehensmodell ist in vier wesentliche Phasen unterteilt: 1. Klären und Präzisieren der Aufgabe, 2. Analyse bestehender Strukturen, 3. Optimierung und Konzipierung des Produkts sowie 4. Bewertung und Analyse (Bild 7.7). Hinzu kommen entsprechende Meilensteine, Methoden und Tools.

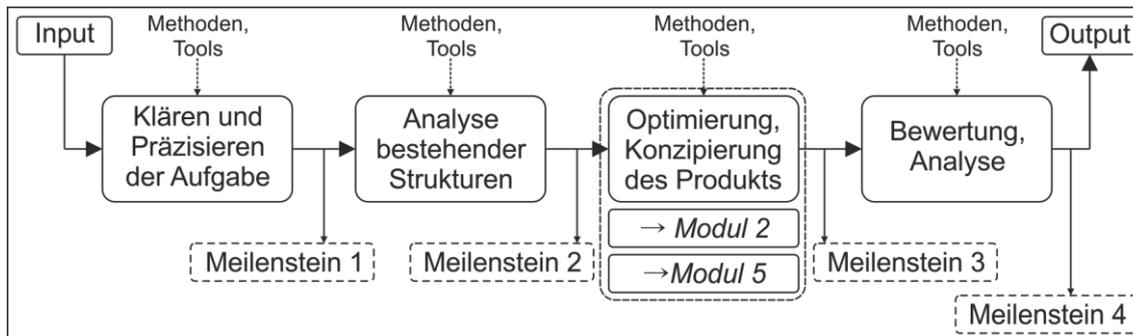


Bild 7.7 Vorgehen bei der Optimierung von Produkten

1. Klären und Präzisieren der Aufgabe

Das Klären und Präzisieren der Aufgabe unterscheidet sich nicht wesentlich von dem Vorgehen bei der Entwicklung von Hybridstrukturen (Kapitel 7.4). Auch hier werden mittels einer Anforderungsanalyse und weiterer Methoden die Anforderungen an das zu optimierende Produkt ermittelt, analysiert und dokumentiert. Daraus können die Ziele der Produktoptimierung abgeleitet werden.^[349]

2. Analyse bestehender Strukturen

In der zweiten Phase werden die bestehenden Strukturen analysiert. Für strukturelle Bauteile ist hier vor allem die Analyse der Gestalt ein zentraler Aspekt, aber auch die Funktionen, die Kosten oder andere Produkteigenschaften spielen eine Rolle. Dabei gilt es insbesondere herauszufinden, welche Schwachstellen die Strukturen besitzen, um diese gezielt optimieren zu können. Ferner wird auch der Herstellungsprozess analysiert. Als Gegenstände der Analyse fungieren wie von PEITZ vorgeschlagen die Komplexität der Prozesskette sowie die Stabilität und Flexibilität des Prozesses.^[349] Darüber hinaus spielen auch die Ausbringungsmenge sowie die erreichbare Qualität wesentliche Rollen. Bei der Analyse kommen verschiedene Verfahren wie die Failure Mode and Effect Analysis (FMEA), die Fehlerbaumanalyse oder das Quality Function Deployment (QFD) zum Einsatz.^{[79] [334] [342] [348] [349] [351] [352] [353]} Zum Abschluss erfolgt eine Bewertung und Dokumentation der Ergebnisse.

3. Optimierung und Konzipierung des Produkts

Die Optimierung und Konzipierung des Produkts teilt sich zunächst in zwei Bereiche auf. Zum einen wird das Produkt selbst betrachtet, zum anderen aber auch der Herstel-

lungsprozess. Entsprechend ergeben sich an dieser Stelle Schnittstellen zu den Modulen 2 (Kapitel 7.4) und 5 (Kapitel 7.7) der Methodik.

Das Vorgehen bei der Konzipierung einer Hybridstruktur ist Teil von Modul 2. Das Vorgehen wird dort durch ein generisches Vorgehensmodell sowie spezifische Vorgehensmodelle beschrieben. Im Rahmen der vorliegenden Phase Optimierung und Konzipierung des Produkts wird auf dieses Vorgehen zurückgegriffen.

Auch für die Konzipierung des Herstellungsprozesses existiert in der hier beschriebenen Methodik ein Modul. Dieses Modul 5 beschäftigt sich mit der Planung der Herstellungsprozesse.

4. Bewertung

Zum Abschluss der Optimierung von Produkten erfolgt eine Bewertung der Lösungsalternativen. Als Bewertungsgrundlage dienen das Ausgangsprodukt sowie die erarbeitete Anforderungsliste. Der Nutzen der einzelnen Lösungen kann beispielsweise durch einen Gesamtnutzwert ausgedrückt werden. Vergleichbar mit einer Nutzwertanalyse werden zunächst die Teilbewertungen mit einem Gewichtungsfaktor zu einem Teilnutzwert multipliziert. Anschließend werden die einzelnen Teilnutzwerte zu dem Gesamtnutzwert aufsummiert. ^[349]

7.7 Methodik-Modul 5: Planung der Herstellungsprozesse

Das Methodik-Modul 5 dient der Planung der Herstellungsprozesse von Hybridstrukturen. Nach MICHELS kann dieses Modul in sieben Unterpunkte von dem Klären und Präzisieren der Aufgabe über die Eigenschaften und Funktionen bis hin zur Struktur des Herstellungsprozesses und zu den Fertigungstechnologien aufgeteilt werden. ^[364] Bild 7.8 zeigt das Vorgehen bei der Planung der Herstellungsprozesse.

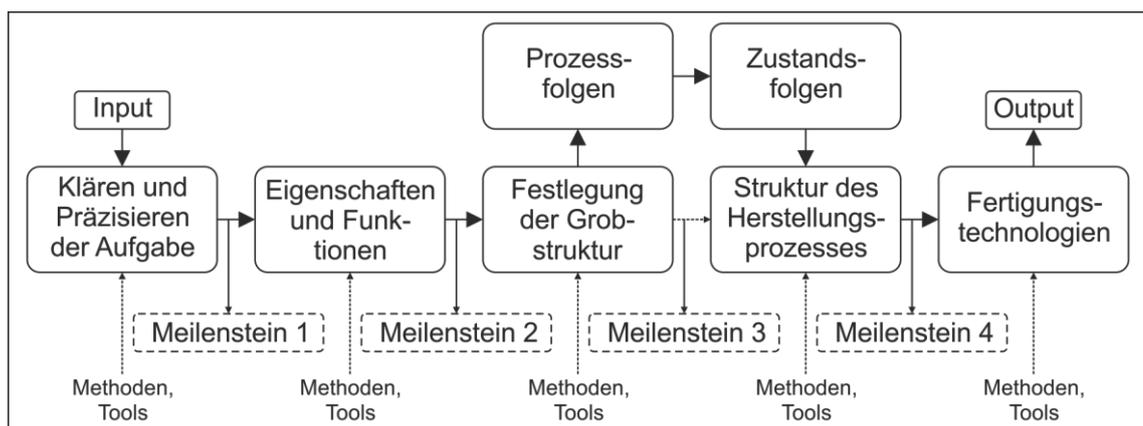


Bild 7.8 Planung der Herstellungsprozesse

1. Klären und Präzisieren der Aufgabe

Auch zu Beginn der Planung der Herstellungsprozesse erfolgt das Klären und Präzisieren der Aufgabe mit dem Ziel, eine Anforderungsliste zu erhalten. Unter Zuhilfenahme

von Methoden wie der Anforderungsanalyse nach PAHL/BEITZ ^{[157] [158]} oder dem Quality Function Deployment (QFD) ^{[79] [348] [349] [350]} werden die Anforderungen an den Herstellungsprozess herausgearbeitet. Auch Schwachstellenanalysen bestehender Prozesse können hilfreich sein, z. B. mittels Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) oder einer Fehlerbaumanalyse. ^{[79] [334] [342] [348] [349] [351] [352] [353]}

2. Eigenschaften und Funktionen der Hybridstruktur

Im zweiten Schritt der Planung der Herstellungsprozesse rücken die Eigenschaften und die Funktionen der zu entwickelnden Hybridstruktur in den Mittelpunkt. Aus Modul 2 bzw. Modul 4 werden neben den Anforderungen an das Produkt dessen Funktionen, Funktionshierarchie und Funktionsstruktur sowie dessen Wirkprinzipien und Wirkstruktur herangezogen. Aus diesen Informationen können die wesentlichen Merkmale der Hybridstruktur abgeleitet werden. Da den Wirkprinzipien von Hybridstrukturen auch Herstellungsverfahren zugeordnet werden können, bietet die Wirkstruktur eines zu entwickelnden Produkts die Grundlage für die weiteren Schritte. Beispielsweise kann eine lokale CFK-Verstärkung einer Stahl-B-Säule mittels des direkten Prepregpressens oder mittels des RTM-Verfahrens mit einem nachgeschalteten Klebprozess hergestellt werden.

3. Festlegung der Grobstruktur

Auf Basis der Wirkstruktur der Hybridstruktur erfolgt zunächst die Festlegung der Grobstruktur des Prozesses (Bild 7.9). Hierbei werden jedem Wirkprinzip mögliche Herstellungsoperationen zugeordnet. Diese werden anschließend bewertet und ausgewählt. Aus diesen Wirkprinzipien wird nun eine vorläufige Grobstruktur für den Prozess abgeleitet.

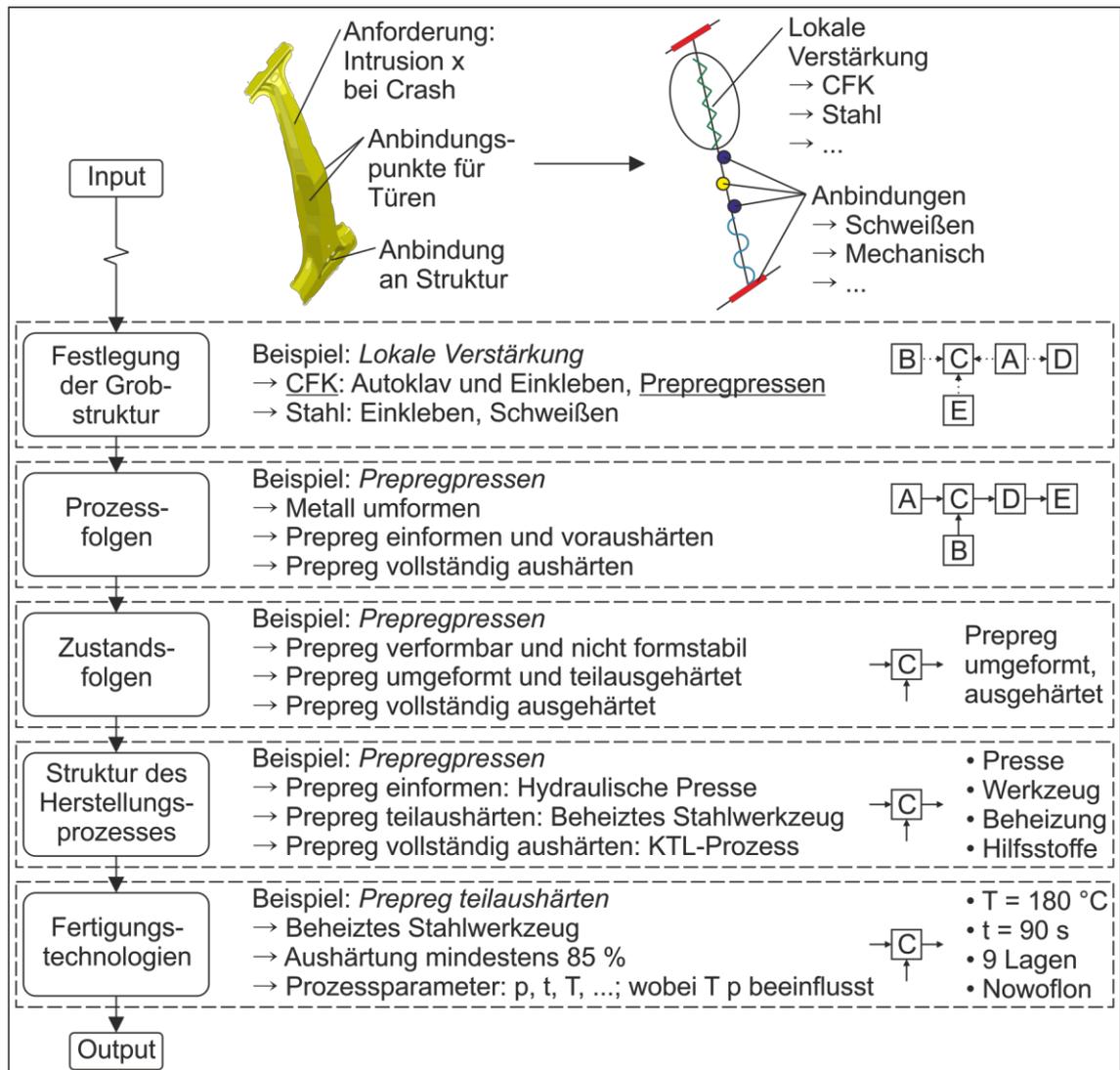


Bild 7.9 Erläuterungen zu den Phasen bei der Planung der Herstellungsprozesse

4. Prozessfolgen

Nach MICHELS beschreibt die Prozessfolge die logische Abfolge der Arbeitsvorgänge, die auf den zur Herstellung eines Produkts eingesetzten Fertigungstechnologien beruhen. Unterscheiden lassen sich Arbeitsvorgänge zur Einzelteilmontage sowie zur Montage. Bei Ersterer wird der Eingangs- oder Zwischenzustand eines Werkstoffs, eines Werkstücks oder eines Bauteils in einen neuen Zustand transformiert. Bei der Montage werden einzelne Werkstücke oder Bauteile zu einer neuen Einheit oder Baugruppe zusammengeführt. Jeder Arbeitsvorgang wird durch entsprechende Fertigungsmittel vollführt. ^[364]

5. Zustandsfolgen

Durch die Zustandsfolgen werden die Zwischenzustände der Werkstoffe, Bauteile und Baugruppen beschrieben, die während des Herstellungsprozesses durchlaufen werden. Die zuvor beschriebenen Arbeitsvorgänge verändern fortlaufend den aktuellen

Zustand der zu fertigenden Einheit bis hin zum fertigen Produkt. Hierdurch können neue Eigenschaften erzeugt oder bestehende Eigenschaften variiert werden. Dies hat wiederum auch Auswirkungen auf die Gestaltung des Herstellungsprozesses. ^[364]

6. Struktur des Herstellungsprozesses

Im Rahmen der Phase Struktur des Herstellungsprozesses werden die Fertigungsmittel, ihre Eigenschaften und ihre Beziehungen festgelegt, die zur Herstellung der Hybridstruktur notwendig sind. Als Fertigungsmittel werden dabei die Anlagen, Vorrichtungen und Werkzeuge bezeichnet, die zur Durchführung der Arbeitsvorgänge der Einzel fertigung und der Montage benötigt werden. Die Struktur des Herstellungsprozesses wird nach MICHELS vor allem von der Art und der Losgröße der zu fertigenden Produkte und den eingesetzten Fertigungstechnologien sowie den Fertigungsmitteln beeinflusst. Unterscheiden lassen sich beispielsweise verschiedene Fertigungsprinzipien, wie die Werkstatt- oder Fließfertigung, und unterschiedliche Fertigungsarten, wie die Kleinserien- oder Massenfertigung. Einzelne Fertigungsmittel können zu logischen Gruppen zusammengefasst werden. ^[364]

7. Fertigungstechnologien

Im letzten Schritt Fertigungstechnologien werden die bisherigen Ergebnisse zusammengeführt und der Herstellungsprozess ausgestaltet. An dieser Stelle sind die Eigenschaften der einzelnen Fertigungstechnologien, die Prozessparameter oder Interdependenzen und Wechselwirkungen zwischen einzelnen Elementen von Bedeutung.

7.8 Methodik-Modul 6: Wissensbasis

Wissen gilt mittlerweile als Produktionsfaktor und erfolgsentscheidende Einflussgröße für die Entwicklung eines Unternehmens. ^[336] Die große Komplexität bei der Entwicklung von Hybridstrukturen erfordert ein umfassendes Wissen z. B. über die verschiedenen Werkstoffe, Herstellungsverfahren und deren Wechselwirkungen, um einen systematischen und zielgerichteten Entwicklungsprozess zu gewährleisten. Eine Wissensbasis soll dazu dienen, Anwendern und Entwicklern das nötige Wissen bereitzustellen. Im Folgenden wird in Anlehnung an KAISER ein Konzept für eine entsprechende Wissensbasis vorgestellt. ^[347]

Anforderungen an die Wissensbasis

Die Wissensbasis soll den Anwender im Entwicklungsprozess von Hybridstrukturen unterstützen. Die wesentliche Anforderung ist dabei die Speicherung und Bereitstellung von Informationen und Daten. Informationen sind z. B. Vorgehensmodelle, Methoden, Richtlinien oder Literatur. Der Aspekt Daten umfasst Werkstoffkennwerte oder Werkstoff- und Prozesseigenschaften ebenso wie Ergebnisse experimenteller Untersuchungen oder spezifische Anforderungen an das Produkt und den Prozess beispielsweise durch bestimmte Kunden. Sowohl die Informationen als auch die Daten sollten durch den Anwender erweiterbar und anpassbar sein, um weitere oder neue Informationen

und Daten einzupflegen. Aus der Wissensbasis sollten zudem Wechselwirkungen, Abhängigkeiten und Verknüpfungen z. B. von verschiedenen Werkstoffen, Produkten und Prozessen ersichtlich werden. Ferner sollte die Wissensbasis in der Lage sein, den Auswahlprozess aus der Vielzahl an Kombinationsmöglichkeiten aus Werkstoff, Materialeinsatz, Prozess und Geometrie für definierte Anforderungen zu unterstützen.

Inhalte der Wissensbasis

Die Inhalte der Wissensbasis werden auf unterschiedlichen Ebenen in definierte Bereiche strukturiert. Die Ebenen orientieren sich an dem Vorgehen im Entwicklungsprozess. Somit ergeben sich die Ebenen Klären und Präzisieren der Aufgabe, Produktkonzipierung, Produktausarbeitung, Prozesskonzipierung und Prozessausarbeitung. Ziel ist die Bereitstellung der erforderlichen Informationen und Daten für die jeweiligen Phasen im Entwicklungsprozess mit dem jeweils dafür notwendigen Detaillierungsgrad und Umfang.

Auf jeder Ebene existieren folgende acht Bereiche: Fachwissen, Methodenwissen, Werkstoffwissen, Produktwissen, Gestaltungswissen, Prozesswissen, Erfahrungswissen und Wissensträger. Der Begriff Wissen umfasst hier jeweils sowohl Daten als auch Informationen. Die Bereiche können zum Teil auch redundante Informationen beinhalten.

Als Fachwissen wird der aktuelle Stand der Technik und Forschung bezeichnet. Die Informationen und Daten sind von der Fach- und Forschungswelt anerkannt. In der Wissensbasis ist das Fachwissen für alle Bereiche vorhanden. Zum Fachwissen zählen nicht Erfahrungswerte oder unternehmensspezifisches Wissen.

Der Aspekt Methodenwissen beinhaltet Informationen und Daten zu bekannten Vorgehensmodellen. Die Vorgehensmodelle stellen die Abläufe während der Entwicklungsprozesse mit definierten Phasen, entsprechenden Tätigkeitsbeschreibungen sowie Ein- und Ausgangsgrößen dar.

Werkstoffwissen umfasst alle Informationen und Daten zu bekannten Werkstoffen. Neben Kennwerten gehören zu diesem Aspekt beispielsweise auch Verarbeitungs- oder Gebrauchseigenschaften. In Abgrenzung zu dem Fachwissen, also dem Stand der Technik, fallen hierunter auch Erfahrungswerte oder unternehmensspezifisches Wissen.

Unter Produktwissen fallen Informationen und Daten zu bekannten Produkten. Hierzu gehören u. a. Anforderungen, Eigenschaften, Leistungsdaten, Kennwerte, Herstellungsverfahren oder Wissensträger.

Anders als das Produktwissen beinhaltet das Gestaltungswissen Angaben zu Detaillösungen, Informationen und Daten zu Berechnungen, zur Gestaltung, zur Herstellbarkeit oder zum Vergleich unterschiedlicher Varianten. Unter dem Gestaltungswissen werden z. B. auch spezifische Gestaltungsrichtlinien für FVK-Konstruktionen zusammengefasst.

Unter Prozesswissen werden Informationen und Daten zu bekannten Herstellungsprozessen verstanden. Im Einzelnen bedeutet dies beispielsweise Wissen zu Taktzeiten, zu erreichbaren Qualitäten, zur Komplexität der herzustellenden Produkte, zu Kosten oder zu Investitionen.

Erfahrungswissen sind Informationen und Daten, die der Anwender im Laufe seiner Tätigkeit zusammenträgt. Dieses Wissen entsteht z. B. durch die Bearbeitung einer Aufgabenstellung, die Entwicklung eines Produktes oder die Durchführung von Untersuchungen.

Als Wissensträger werden Personen, Abteilungen, Einrichtungen, Forschungsstellen oder Unternehmen bezeichnet, die spezifisches Fach- oder Expertenwissen vorweisen können oder vorgewiesen haben. Dabei kann es sich um interne oder externe Mitarbeiter bzw. Einheiten handeln.

Aufbereitung und Verknüpfung der Inhalte

Die Inhalte der Wissensbasis werden in einer domänenübergreifenden Begrifflichkeit einheitlich aufbereitet und mit einer Kurzbeschreibung sowie mit Schlagwörtern versehen. Neben erläuternden Texten werden Informationen und Daten z. B. durch Abbildungen, Diagramme, Tabellen, Videos oder Präsentationen bereitgestellt. Die jeweiligen Dokumente stehen dem Anwender auch für andere Projekte zur Verfügung.

Die einzelnen Inhalte werden in der Datenbank untereinander durch spezifische Beziehungen verknüpft. Die Verknüpfung erfolgt in der Weise, dass für die unterschiedlichen Ebenen und Bereiche die relevanten Informationen zur Verfügung stehen. Beispielsweise wird auf der Ebene der Prozesskonzipierung im Bereich des Produktwissens hinterlegt, welche Kennwerte dieses Produkt besitzt oder wer an der Entwicklung beteiligt war.

Bereitstellung von Wissen und Zugang zu den Inhalten

Das Wissen aus der Wissensbasis kann beispielsweise über eine Abfragemaske abgerufen werden. Zur Unterstützung einer zielgerichteten Wissensabfrage und zur Vermeidung der Anzeige überflüssiger Informationen wählt der Anwender zunächst nach Ebenen und Bereichen den für ihn relevanten Wissenspool aus. Anschließend kann z. B. nach bestimmten Merkmalsausprägungen, Suchbegriffen oder Eigenschaften gesucht werden. Das Wissen wird in aufbereiteter Form dargestellt.

Zur Unterstützung des Auswahlprozesses aus der Vielzahl an Kombinationsmöglichkeiten aus Werkstoff, Materialeinsatz, Prozess und Geometrie existiert aktuell keine durchgängige Lösung. Da bei der Entwicklung von Leichtbaustrukturen aus Hybridwerkstoffen das Produkt die zentrale Komponente ist, liegt es nahe, den Auswahlprozess produktgetrieben aufzubauen, wie es auch bei der Systematik zur Entwicklung mechatronischer Systeme in der Technologie MID vorgeschlagen wird.^[347] In Bezug auf Leichtbaustrukturen muss hier jedoch ein anderer Ansatz gewählt werden. Zweckmäßig erscheint zunächst eine Unterteilung nach übergeordneten Eigenschaftsprofilen,

beispielsweise Steifigkeits-, Festigkeits- oder Craschanforderungen bei einer automobilen Strukturkomponente. Zudem ist beispielsweise zu klären, ob die Belastungssituation ein isotropes Werkstoffverhalten erfordert oder ein anisotropes ausreicht. Bei der Abfrage sind Zielgrößen zu definieren, wie z. B. Stückzahlen, Taktzeiten oder Verarbeitbarkeit und Kompetenz im Unternehmen. Auf dieser Basis erfolgt anschließend eine Unterstützung bei der Auswahl von Werkstoffen, möglichen Herstellungsprozessen oder Zulieferunternehmen.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Um den von Automobilen verursachten Anteil an dem CO₂-Ausstoß und dem Verbrauch fossiler Energieträger zu verringern, ergeben sich verschiedene Handlungsfelder. Neben antriebs- und fahrzeugtechnischen Maßnahmen nimmt insbesondere der Leichtbau gegenwärtig eine zentrale Rolle ein. Ein Hauptaugenmerk in diesem Kontext liegt u. a. auf der konsequenten Evolution des Karosserieleichtbaus.^[4] Bei der Anwendung des Prinzips des Leichtbaus wird die Masse einer Struktur reduziert, wobei die relevanten Eigenschaften mindestens konstant gehalten oder verbessert werden. Im Karosserieleichtbau wurden in den letzten Jahren, z. B. durch den Einsatz neuer Werkstoffe wie presshärterer Stähle oder hochfester Aluminiumlegierungen, deutliche Fortschritte erzielt.

Um weitere Verbesserungen zu erreichen, bedarf es innovativer und vor allem ganzheitlicher Leichtbauansätze. Der aktuell vorherrschende Trend ist der Einsatz von Multi-Material- oder Hybridbauweisen. Diese zeichnen sich durch große Leichtbaupotentiale aus.^{[1] [9] [10]} Bei diesen Werkstoffleichtbau-Ansätzen werden unterschiedliche Werkstoffe auf Baugruppen- (Multi-Material-Design) oder Bauteilebene (Hybridbauweise) miteinander kombiniert. Insbesondere die Hybridbauweise ermöglicht einen belastungsangepassten Bauteilentwurf, z. B. durch die Möglichkeit der lokalen Eigenschaftsanpassung des Werkstoffverbunds hinsichtlich Festigkeit und Steifigkeit. Daneben kann durch den gezielten lokalen Einsatz teurer und energieintensiver Hochleistungswerkstoffe wie CFK ein ökonomischer und ökologischer Leichtbau realisiert werden.^{[11] [12] [365P]}

Das Prepregpressen ist ein Ansatz, Hybridbauteile für automobiler Anwendungen in großen Serien herstellen zu können.^[140] Dieses Verfahren zur Herstellung von hybriden Strukturen aus mindestens einer metallischen und einer FVK-Komponente stellt einen neuen, bisher nur wenig erforschten Ansatz dar. Dabei können drei wesentliche Handlungsfelder identifiziert werden: 1. die Werkstoff- und Bauteileigenschaften, 2. der Herstellungsprozess und 3. der Produktentwicklungsprozess.

In der vorliegenden Dissertation wurde die Entwicklung und Herstellung von Hybridbauteilen aus Metallen und FVK für den Leichtbau im Automobil betrachtet. Die Zielstellung setzte sich entsprechend den Handlungsfeldern aus drei Teilen zusammen. In einem ersten Schritt wurde die grundsätzliche Eignung des Prepregpressens zur großserientauglichen Herstellung von hybriden Metall-FVK-Strukturen nachgewiesen. In einem zweiten Schritt wurde der Prozess im Hinblick auf spezifische Anforderungen aus der Automobilindustrie konkretisiert und die Grenzen des Prozesses erfasst. In einem dritten Schritt wurde ein Ansatz für eine Methodik zur systematischen und durchgängigen Entwicklung von Hybridstrukturen geliefert.

Zunächst konnte die grundsätzliche Eignung des Prepregpressens zur Herstellung hybrider Automobilstrukturen nachgewiesen werden. Dies erfolgte anhand von Zug-

und Biegeversuchen sowie materialographischen Untersuchungen (Kapitel 5.1 und 5.2). Die mittels Prozessparametern gemäß den Herstellerangaben hergestellten Hybridproben zeigten hinsichtlich der maximalen Spannungen und Bruchdehnungen keine Unterschiede im Vergleich zu mittels eines Autoklavverfahrens hergestellten Proben. Die erreichbaren Laminatqualitäten hingen deutlich von den gewählten Prozessparametern ab. Bei der Wahl einer geeigneten Kombination, wie z. B. einem Solidifikationsdruck von rund $0,4 \text{ N/mm}^2$ sowie einem etwas geringeren Konsolidierungsdruck, einer Temperatur von 180 °C sowie einer Voraushärtungszeit von mindestens 90 s , konnten Laminatqualitäten erreicht werden, welche an die eines mittels Autoklavverfahren hergestellten Prüfkörpers heranreichen.

Darüber hinaus wurde die Verbindung von Metall und FVK betrachtet (Kapitel 5.3). Der Fokus lag hierbei aufgrund der ohnehin vorhandenen großen Überlappungsfläche der Komponenten auf dem klebtechnischen Fügen. Die Wahl eines zusätzlichen Klebstoffsystems, d. h. eines Dow-Betamate-Strukturklebstoffs oder eines 3M-Strukturklebfilms, offenbarte die besten Klebeigenschaften. Eine direkte Verbindung der Komponenten durch die Nutzung des Matrixharzes als Klebstoff ist jedoch ebenfalls möglich. In quasistatischen Scherzugversuchen erreichte diese Füge-technik eine um ca. 10% geringere Klebfestigkeit und eine um ca. 25% geringere Brucharbeit als die geklebten Prüfkörper. Der Vorteil des direkten Klebens liegt in dem Wegfall eines zusätzlichen, aufwändigen Klebprozesses. Insofern ist unter den oftmals nicht zu vernachlässigenden Kostengesichtspunkten eine für den spezifischen Anwendungsfall, d. h. beispielsweise unter Beachtung der Belastungsart sowie -richtung, geeignete Füge-technologie auszuwählen.

Nach diesen Voruntersuchungen wurden verschiedene Aspekte des Prepreg-Press-Prozesses beleuchtet. Ein wesentlicher Aspekt war in diesem Zusammenhang das Aushärtungsverhalten der Epoxidharze sowie der Prepregs. Die Herstellerangaben für die Verarbeitung der Prepregs mittels Autoklavverfahren wurden durch dynamische Differenzkalorimetrien sowie Untersuchungen zur Temperaturentwicklung im realen Pressprozess erweitert (Kapitel 6.2). Durch die DDK-Analysen konnte gezeigt werden, dass je nach Temperaturverlauf ein Voraushärtungsgrad der Prepregs von 60 bis 70% bereits nach etwa 80 s erreicht wird. Zu diesem Zeitpunkt liegt bereits eine Handlingfestigkeit der Prepregs vor. Eine annähernd vollständige Aushärtung wird nach etwa 12 min erreicht. In den realen Prozessen konnte eine um ein Vielfaches höhere Aufheizrate festgestellt werden, als es bei den DDK-Analysen realisierbar gewesen wäre. Die exotherme Reaktion ist je nach Versuchsparametern bereits nach rund 70 s überwiegend abgeschlossen.

Aufbauend auf diesen Ergebnissen wurden die relevanten Prozessparameter Zeit, Temperatur und Druck gezielt variiert, um die für den Prozess optimale Kombination zu erhalten (Kapitel 6.3). Die Voraushärtungszeit sollte unter den gewählten Randbedingungen mindestens 90 s betragen. Die vollständige Aushärtung der Hybridstrukturen erfolgt anschließend in einem ohnehin nachgeschalteten KTL-Prozess. Die Konsolidie-

rungstemperatur liegt idealerweise zwischen 150 und 180 °C. Um die Zykluszeiten zu verringern, sind jedoch möglichst hohe Temperaturen anzustreben, da dies einen positiven Einfluss auf die Aushärtungszeit des Harzes hat. Ein Konsolidierungsdruck zwischen 0,3 und 0,4 N/mm² führte bei den offenen Werkzeugkonzepten zu den besten Resultaten. Ist eine dynamische Regelung des Drucks möglich, sollte der Druck zu Beginn des Pressprozesses geringer ausfallen und anschließend erhöht werden. Daneben wurden verschiedene Umformgeschwindigkeiten zwischen 2,5 und ca. 30 mm/s hinsichtlich eines Einflusses auf das Umformergebnis untersucht. Dabei konnte weder ein positiver noch ein negativer Einfluss festgestellt werden.

In den Kapiteln 6.4 und 6.5 wurden Geometriemerkmale wie Radien oder Flankenwinkel sowie verschiedene Bauteilgeometrien untersucht. Ziel war es, die umformtechnischen Grenzen des Prepreg-Press-Verfahrens aufzuzeigen. Durch geeignete Werkzeugkonzepte ist sicherzustellen, dass ein ausreichender Druck auf den FVK während der Aushärtung in den Flanken wirkt. Nur so können optimale Bauteileigenschaften erreicht werden. Die Abbildung auch von sehr kleinen Radien von 1,0 mm war ohne sichtbare Beeinträchtigungen des Verbundes möglich. Die untersuchten Geometrien, wie z. B. Napf-Geometrie, V-, U- und Hut-Profil sowie eine reale B-Säule, konnten alle gut ausgeformt werden. Je nach Komplexität der Geometrie kam es zu Faltenbildungen im Einzugs- oder Flanschbereich und zu Faserverschiebungen. Eine Vorwärmung der Prepregs führte dabei zu verbesserten Umformeigenschaften. Dies wurde u. a. mittels Auszugsversuchen genauer untersucht (Kapitel 6.6). Eine Vorwärmung führte zu einer verminderten Auszugs- und Umformkraft, während eine erhöhte Umformgeschwindigkeit die Auszugs- und Umformkraft erhöhte.

Ein Nachteil der vergleichsweise hohen Presstemperaturen zeigte sich in den resultierenden thermischen Eigenspannungen. Diese wurden mittels einer Biegemethode abgeschätzt und durch analytische Berechnungen validiert (6.7). Je nach Materialkombination und Prozessparameter lagen die Spannungen in der metallischen Komponente bei bis zu 150 N/mm² und in der FVK-Struktur bei bis zu 70 N/mm².

Um ein großserientaugliches Verfahren zur Herstellung von Automobilstrukturen realisieren zu können, muss die Nachbearbeitung auf ein Minimum reduziert werden. Bei dem Prepreg-Press-Verfahren betrifft dies insbesondere die Konturgenauigkeit bzw. einen undefinierten Harzausfluss. Verschiedene Werkzeugkonzepte, die über eine abgedichtete Kavität verfügen, wurden auf ihre Eignung für das Prepregpressen hin untersucht (Kapitel 6.8). Alle Konzepte, d. h. Tauchkante, Quetschkante, Dichtrahmen und Silikondichtung, ermöglichten die Herstellung endkonturennaher Bauteile mit hoher Laminatqualität und geringer bis keiner Nachbearbeitung. Die Ergebnisse wurden im Rahmen einer Konzeptentwicklung auf ein reales Strukturbauteil übertragen.

Die Eigenschaften mittels Prepregpressen hergestellter Bauteile wurden anhand von Prüfungen mit quasistatischer und schlagartiger Stauch- bzw. Biegebelastung untersucht (Kapitel 6.9). Zum Einsatz kamen Doppel-Z- und Hut-Profile, die (lokal) mit einer FVK-Komponente verstärkt waren. Ein positiver Einfluss einer Voraushärtungszeit grö-

ßer 120 s konnte hierbei nicht festgestellt werden. Offensichtlich wurde jedoch das Leichtbaupotential der Hybridstrukturen. Dieses lag je nach Materialkombination und Belastung zwischen 24 und fast 80 %.

Im Hinblick auf den realen Herstellungsprozess in der Automobilindustrie wurde zum Abschluss des experimentellen Teils der Arbeit der Einfluss einer KTL-Lackierung auf die Hybride betrachtet (Kapitel 6.10). Die mechanischen Eigenschaften der Bauteile wurden hierdurch nicht beeinflusst. Die KTL-Beschichtung lagerte sich lediglich an der Oberfläche des nicht leitenden FVK ab.

Auf der Grundlage der gesammelten Erkenntnisse wurden die erreichbare Taktzeit des Prepreg-Press-Prozesses mit einem Versuchsaufbau und einer Handlingapparatur ermittelt (Kapitel 6.11). Diese liegt je nach Aushärungszeit und Vorwärmung bei 150 bis 270 s je Bauteil. Durch verschiedene entwickelte Fertigungskonzepte kann diese weiter gesenkt werden. Es wurden hierfür verschiedene Konzepte für eine mögliche spätere Serienumsetzung erarbeitet. Neben verketteten Pressen waren dies die Verwendung autonomer Presswerkzeuge sowie umlaufende autonome Presswerkzeuge.

In Kapitel 7 wurde eine Methodik zur Entwicklung von Hybridstrukturen vorgeschlagen. Diese gliedert sich in insgesamt sieben Module, die je nach Entwicklungsaufgabe variabel zusammengestellt bzw. bearbeitet werden können. Die einzelnen Module sind: 1. Marktsituation und Trendanalyse, 2. Entwicklung von Hybridstrukturen, 3. Methodisches Gestalten, 4. Optimierung von Produkten, 5. Planung der Herstellungsprozesse sowie 6. Wissensbasis. Ein wesentlicher Aspekt der Methodik ist die Aufteilung der Entwicklungsprozesse in generische und spezifische Vorgehensmodelle. Erstere bilden dabei die Grundlage für das Vorgehen und strukturieren den Entwicklungsprozess. Letztere beinhalten Eigenschaften der Verfahren und der Werkstoffe sowie deren Wechselwirkungen. Diese Methodik kann den Entwicklungsprozess von hybriden Leichtbaustrukturen unterstützen.

Die vorliegende Arbeit liefert die Grundlagen für weitere Untersuchungen im Bereich der Entwicklung und Herstellung hybrider Metall-FVK-Hybridbauteile. Zu erforschende Aspekte im Bereich der Werkstoff- und Bauteileigenschaften können die gezielte Variation und Ausweitung der eingesetzten Werkstoffe und Fügeverfahren betreffen. Interessant ist z. B. der Einsatz von Aluminium, der nochmals ein erhöhtes Leichtbaupotential beinhaltet. ^[76] Aber auch die Verwendung anderer Fasertypen, z. B. Glas-/Kohlenstofffaser-Mischtextilien zur Optimierung der Kosten, Textilhalbzeuge, z. B. Gewebe-Prepregs zur Erweiterung der Prozessgrenzen bei der Umformung, oder Harzsysteme, z. B. schnellaushärtender Epoxidharze, sollten betrachtet werden. In diesem Zusammenhang sind auch Finite-Elemente-Simulationen zu ergänzen, um u. a. Lagenaufbauten gezielt einstellen oder Bauteileigenschaften vorhersagen zu können. Zudem sind Grundlagen zur Bauteilgestaltung zu erarbeiten. In Crashuntersuchungen an bauteilähnlichen Strukturen hat sich gezeigt, dass eine reine Biegebelastung nur einen Teil der hochwertigen CFK-Verstärkung ausnutzt. Hier sind gestalterische bzw. konstruktive Konzepte zu erarbeiten, wie dieser Umstand verbessert werden kann. Es

ist möglichst allgemein die Frage zu beantworten, in welchen Bereichen und unter welchen Umständen der Einsatz eines zu definierenden Hybrids sinnvoll ist.

Im Bereich des Herstellungsverfahrens sind insbesondere Umform- bzw. Prozesssimulationen, d. h. beispielsweise die Simulation von Aushärtungsverläufen oder thermischen Eigenspannungen, von wissenschaftlichem Interesse. Hierbei sollte versucht werden, Rückschlüsse z. B. bestimmter Prozessvarianten oder -parameter auf die Bauteileigenschaften zu ziehen. Gegebenenfalls können thermische Eigenspannungen auch gezielt genutzt werden, um z. B. Druckeigenspannungen in bestimmten Bereichen zu induzieren. Hierdurch können die Bauteileigenschaften weiter verbessert werden. Die experimentellen Grundlagen für die Simulationen wurden zu großen Teilen bereits in dieser Arbeit gelegt. Bezüglich einer weiteren Optimierung des Prepreg-Press-Prozesses sollte eine gemeinsame Umformung von Metall und FVK angestrebt werden. Bisher ist diese auf vergleichsweise weiche Stahlgüten beschränkt.^[12] Interessant wäre eine Erweiterung dieser Prozessgrenzen für strukturelle Anwendungen für höhere Festigkeitsniveaus durch geeignete Prozessrouten, wie z. B. ein Abkühlen der Prepregs vor der Umformoperation zur Erhöhung der Druckfestigkeit^[14]. Aber auch die Adaption anderer Verfahren wie des RTM verspricht eine Erweiterung der Anwendungsfelder der Hybridtechnologie.

Die in dieser Arbeit erstellte Methodik zur Entwicklung von Hybridstrukturen ist als Rahmenwerk zu sehen. Weitere Anstrengungen sollten hier u. a. bezüglich der Ausarbeitung der einzelnen spezifischen und generischen Vorgehensmodelle oder des Aufbaus der vorgeschlagenen Wissensbasis unternommen werden. Durch anwendungsnahe Projekte können Informationen hierfür und Anhaltspunkte für Optimierungen der Methodik gewonnen werden. Darüber hinaus kann ein Schwerpunkt für zukünftige Arbeiten in einer einheitlichen Beschreibungssprache für den Leichtbau gesehen werden, wie sie bereits für andere Domänen bzw. Disziplinen bekannt ist. Diese Dissertation liefert hierfür Ansätze.

9 Abkürzungen und Symbole

Abkürzungen

<i>Abkürzung</i>	<i>Erläuterung</i>
22MnB5	Presshärtpbarer, borlegierter Vergütungsstahl
A	Autoklavverfahren
Al	Aluminium
B	(Hutprofil-)Boden
BD	Bidirektional
BMC	Bulk Moulding Compound (Deutsch: Press-/Reaktionsmasse)
C	Kohlenstoff
CF	Kohlenstofffaser
CFK	Kohlenstofffaserverbundkunststoff
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
DK	Dichtungskonzept
DDK	Dynamische Differenzkalorimetrie
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
DSC	Differential Scanning Calometry (Deutsch: siehe DDK)
EP	Epoxidharz
E-Typ	Ursprünglich vor allem in der Elektro-Industrie eingesetzter Glasfasertyp; mittlerweile Standardfaser für Kunststoffverstärkungen
FMEA	Failure Mode and Effect Analysis (Deutsch: Fehlermöglichkeits- und Einfluss-Analyse)
FML	Fibre Metal Laminate (Deutsch: Faser-Metall-Laminat)
FVK	Faserverbundkunststoff
Gel	Gelege
GFK	Glasfaserverbundkunststoff
Glare	Glass-Fibre Reinforced Aluminum (Deutsch: Glasfaserverstärktes Aluminium)
GMT	Glasmattenverstärkter Thermoplast
GOM	Gesellschaft für optische Messtechnik mbH
H	Wasserstoff
HM	Hochmodul-Kohlenstofffaser
k	k-Zahl, d. h. Anzahl der Filamente in einem Roving
KTL	Kathodische Tauchlackierung
LD-SMC	Low Density Sheet Moulding Compound (Deutsch: Plattenförmige Pressmasse mit geringer Dichte)
LF	Linke Flanke
LFI	Langfaserinjektion
LFT	Langfaserverstärkter Thermoplast

MID	Moulded Interconnect Devices (Deutsch: Räumliche spritzgegossene Schaltungsträger)
MSV	Mehrschichtenverbund
n	Anzahl der Lagen bei einem Laminataufbau
O	Sauerstoff
OFAT	One Factor at a Time (Deutsch: Ein-Faktor-Methode)
OW	Offenes Werkzeug
P	Prepregpressen
PAN	Polyacrylnitril
Prepreg	Preimpregnated (Deutsch: Vorimprägniert)
QFD	Quality Function Deployment (Deutsch: Qualitätsfunktionen-Darstellung)
QK	Quetschkante
R	Rest einer chemischen Reaktion
RF	Rechte Flanke
RGT	Reaktionsgeschwindigkeit-Temperatur(-Regel)
RTM	Resin Transfer Moulding (Deutsch: Harzinjektionsverfahren)
SCRIMP	Seemann Composites Resin Infusion Moulding Process (Patentiertes Harzinfusionsverfahren)
SMC	Sheet Moulding Compound (Deutsch: Plattenförmige Pressmasse)
St	Stahl
S-Typ	Glasfasertyp mit erhöhter Festigkeit (Englisch: Strength)
TK	Tauchkante
TRIP	Transformation Induced Plasticity (Deutsch: Umwandlungsinduzierte Plastizität)
UD	Unidirektional
UHM	Ultrahochmodul-Kohlenstofffaser
UP	Ungesättigtes Polyesterharz
VARI	Vacuum Assisted Resin Infusion (Deutsch: Vakuumunterstütztes Harzinfusionsverfahren)
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e. V.
VE	Vinylesterharz
VI	Vakuuminjektionsverfahren
VITOSTRA	Verfahren zur Entwicklung intelligenter technologieorientierter Geschäftsstrategien

Lateinische Symbole

<i>Symbol</i>	<i>Einheit</i>	<i>Erläuterung</i>
A	mm ²	Fläche
a	m/s ²	Beschleunigung
a _{EFH}	mm	Abstand der Einfalthilfe

A_{80}	%	Bruchdehnung, ermittelt an Flachprobe mit Anfangsmesslänge (L_0) 80 mm
B	mm	Breite (Versuchsaufbau)
b	mm	Breite
b_b	mm	Breite des Bodens
b_{EFH}	mm	Breite der Einfalthilfe
b_F	mm	Flanschbreite
b_g	mm	Gesamtbreite
b_K	mm	Breite der Klebnaht
b_Z	mm	Breite des Z-Profiles
c_p	J/(g K)	Spezifische Wärmekapazität
c_w	-	Luftwiderstandsbeiwert
d	mm	Dicke
d_K	mm	Klebschichtdicke
E	N/mm ²	E-Modul
E	J	Energie
E_{Bruch}	J	Absorbierte Bruchenergie
E_{max}	J	Maximale Energieabsorption
E_S	J/g	Spezifische Energieabsorption
E_{spez}	J/g	Spezifische Energie
E_t	J/g	Totale spezifische Energieabsorption
F	N	Kraft
F_{Beschl}	W	Leistungsbedarf, um Beschleunigungswiderstand zu überwinden
F_K	N	Klemmkraft
F_{Luft}	W	Leistungsbedarf, um Luftwiderstand zu überwinden
F_m	N	Mittlere Kraft
F_{max}	N	Maximalkraft
F_N	N	Niederhalterkraft
F_n	N	Normalkraft
F_R	N	Reibkraft
F_{Roll}	W	Leistungsbedarf, um Rollwiderstand zu überwinden
$F_{Steigung}$	W	Leistungsbedarf, um Steigungswiderstand zu überwinden
f_{max}	Hz	Maximale Frequenz
FVG	Vol.-%	Faservolumengehalt
H	J	Enthalpie
h	mm	Höhe
h_{EFH}	mm	Höhe der Einfalthilfe
h_{FVK}	mm	Höhe des Faserverbundkunststoffs
h_N	mm	Höhe der Nut
h_{St}	mm	Höhe des Stahls

h_T	mm	Höhe der Aufleimer
h_Z	mm	Höhe des Z-Profiles
I_y	mm ⁴	Flächenträgheitsmoment gegen Biegung
k_r	-	Rollwiderstandskoeffizient
L	mm	Länge (Probe)
L_0	mm	Messlänge, Überlappungslänge
L_F	mm	Freie Länge
L_T	mm	Länge der Aufleimer
L_V	mm	Auflagerabstand
l	mm	Länge
l_{FVK}	mm	Länge des Faserverbundkunststoffs
l_{ges}	mm	Gesamtlänge
l_0	mm	Gesamtlänge der unverformten Stauchprobe
M	Nmm	Moment
m	g	Masse
p	N/mm ²	Druck
p_N	N/mm ²	Flächenpressung infolge Normalkraft
\dot{Q}	W	Wärmestrom
\dot{Q}_{exo}	W	Exothermer Wärmestrom
\dot{Q}_{probe}	W	Probentiegelseitiger Wärmestrom
\dot{Q}_{ref}	W	Referenztiegelseitiger Wärmestrom
R	mm	Schulterradius (Zugprobe), Werkzeugradius
R	K/W	Wärmeleitwiderstand
R_m	N/mm ²	Zugfestigkeit
$R_{p0,2}$	N/mm ²	0,2 %-Dehngrenze
r	mm	Radius
r_{st}	mm	Radius der Stahlkomponente
s	mm	Weg
s_0	mm	Nullniveau des Wegs
s_A	mm	Auszugsweg
s_{max}	mm	Maximaler Weg
T	°C	Temperatur
T_{max}	°C	Maximaltemperatur
T_{probe}	°C	Temperatur am Probentiegel
T_{ref}	°C	Temperatur am Referenztiegel
T_{sensor}	°C	Temperatur am Sensor
t	s	Zeit
t_{takt}	s	Taktzeit
$t_{takt, th}$	s	Theoretische Taktzeit
v	m/s	Geschwindigkeit
v_A	m/s	Auszugsgeschwindigkeit
v_{max}	m/s	Maximalgeschwindigkeit

v_N	m/s	Niederhaltergeschwindigkeit
w_s	mm	Verfahrweg
x	mm	Variable in x-Richtung
x_M	mm	Verschiebung des Kreismittelpunkts in x-Richtung
y	mm	Variable in y-Richtung
y_M	mm	Verschiebung des Kreismittelpunkts in y-Richtung
z	mm	Randfaserabstand
z_{max}	mm	Maximaler Randfaserabstand
z_s	mm	Teilschwerpunktskoordinate in z-Richtung
z_s^*	mm	Gesamtschwerpunktskoordinate in z-Richtung

Griechische Symbole

<i>Symbol</i>	<i>Einheit</i>	<i>Erläuterung</i>
α	1/K	Wärmeausdehnungskoeffizient
α	°	Winkel: u. a. Flankenwinkel, Orientierungswinkel der Graphitebenen bei Kohlenstofffasern, Gewebewinkel
α_{lock}	°	Maximaler Gewebewinkel (Blockiertes Gewebe)
γ	°	Scherwinkel
γ_{lock}	°	Maximaler Scherwinkel (Blockiertes Gewebe)
Δ	-	Differenz, Änderung
ϵ	%	Dehnung
ϵ_{max}	%	Maximale Dehnung, Bruchdehnung
κ	1/mm	Krümmung der Balkenachse
λ	-	Massenfaktor
μ	-	Reibungskoeffizient
ν	K/min	Heizrate
ν	-	Querkontraktionszahl
ρ	g/cm ³	Dichte
ρ	mm	Krümmungsradius
σ	N/mm ²	Spannung
σ_{max}	N/mm ²	Maximalspannung
σ_{th}	N/mm ²	Thermische Spannung
τ	N/mm ²	Schubspannung
τ_K	N/mm ²	Klebfestigkeit
τ_S	N/mm ²	Scherspannung
φ	°	Steigungswinkel der schiefen Ebene
φ_y	1/mm	Biegung des Balkens um die y-Achse

10 Literaturverzeichnis

Literatur

- [1] SCHINDLER, V. und SIEVERS, I.: *Forschung für das Auto von Morgen. Aus Tradition entsteht Zukunft*. Springer Verlag, Berlin, 2008.
- [2] ZHANG, Y.; LAI, X.; ZHU, P. und WANG, W.: *Lightweight design of automobile component using high strength steel based on dent resistance*. *Materials and Design*, Bd. 27, S. 64-68, 2006.
- [3] KLEIN, B.: *Leichtbau-Konstruktion. Berechnungsgrundlagen und Gestaltung*. Vieweg Verlag, Wiesbaden, 2007.
- [4] GOEDE, M.: *Karosserieleichtbau als Baustein einer CO2-Reduzierungsstrategie*. Aachen, 2007.
- [5] ASNAFI, N.; LANGSTEDT, G.; ANDERSSON, C. H.; ÖSTERGREN, N. und HAKANSSON, T.: *A new lightweight metal-composite-metal panel for applications in the automotive and other industries*. *Thin-Walled Structures*, Bd. 36, S. 289-310, 2000.
- [6] WIEDEMANN, J.: *Leichtbau. Elemente und Konstruktion*. Springer Verlag, Berlin, 2007.
- [7] GIROLSTEIN, C.: *Schwingfestigkeitsverhalten induktiv schnell gehärteter Klebverbindungen im automobilen Leichtbau*. Dissertation. Universität Paderborn. Shaker Verlag, Aachen, 2012.
- [8] GROTE, K.-H. und FELDHUSEN, J. (Hrsg.): *Dubbel. Taschenbuch für den Maschinenbau*. Springer Verlag, Berlin, 2007.
- [9] GEIGER, M. und SINGER, R. F. (Hrsg.): *Robuste, verkürzte Prozessketten für flächige Leichtbauteile*. Tagungsband zum Industriekolloquium des SFB 396 in Erlangen. Meisenbach Verlag, Bamberg, 2006.
- [10] HAHN, O. und WIBLING, M.: *Leichtbau erfordert Crashsicherheit. Intelligenter Produzieren*, Nr. 3, S. 19-21, 2007.
- [11] HUFENBACH, W. und HELMS, O.: *Zum methodischen Konstruieren von Leichtbaustrukturen aus kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen*. *Konstruktion*, Nr. 10, S. 69-74, 2010.
- [12] HOMBERG, W.; DAU, J. und DAMEROW, U.: *Combined Forming of Steel Blanks with Local CFRP Reinforcement*. 10th International Conference on Technology of Plasticity, Aachen, 2011.

- [13] YANAGIMOTO, J. und IKEUCHI, K.: *Sheet forming process of carbon fiber reinforced plastics for lightweight parts. CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Bd. 61, S. 247-250, 2012.
- [14] DAU, J.; LAUTER, C.; DAMEROW, U.; HOMBERG, W. und TRÖSTER, T.: *Multi-material systems for tailored automotive structural components*. 18th International Conference on Composite Materials, Jeju Island, 2011.
- [15] LAUTER, C.; TRÖSTER, T.; SKÖCK-HARTMANN, B.; GRIES, T. und LINKE, M.: *Höchstfeste Multimaterialsysteme aus Stahl und Faserverbundkunststoffen. Konstruktion: Zeitschrift für Produktentwicklung und Ingenieur-Werkstoffe*, Nr. 11-12, S. IW 8-IW 9, 2010.
- [16] FLEMMING, M. und ROTH, S.: *Faserverbundbauweisen. Eigenschaften. Mechanische, konstruktive, thermische, elektrische, ökologische, wirtschaftliche Aspekte*. Springer Verlag, Berlin, 2003.
- [17] FUNKE, H.: *Systematische Entwicklung von Ultra-Leichtbaukonstruktionen in Faserverbund-Wabensandwichbauweise am Beispiel eines Kleinflugzeuges*. Dissertation. Universität-GH Paderborn, Paderborn, 2001.
- [18] NIEMANN, G.; WINTER, H. und HÖHN, B.-R.: *Maschinenelemente. Band 1: Konstruktion und Berechnung von Verbindungen, Lagern, Wellen*. Springer Verlag, Berlin, 2005.
- [19] GÖTTLE, T. und REICH, T.: *Jedes Gramm zählt. Automobil Industrie Insight*, S. 6-8, 2012.
- [20] LAUTER, C.; FRANTZ, M.; MARTEN, T.; TRÖSTER, T.; BACH, G. und SELIGER, G.: *Höchstfeste Hybridwerkstoffe aus Stahl und Faserverbundkunststoffen. Konstruktion: Zeitschrift für Produktentwicklung und Ingenieur-Werkstoffe*, Nr. 9, S. IW16-IW17, 2011.
- [21] HENNING, F. und MOELLER, E.: *Handbuch Leichtbau. Methoden, Werkstoffe, Fertigung*. Hanser Verlag, München, 2011.
- [220] FURRER, P.: *Hybridbauweisen im Automobilbau*. URL: <http://www.kmu-ratgeber.ch/docs/Hybridbauweisen%20im%20Automobilbau.pdf>, zuletzt aufgerufen am 22. Januar 2013.
- [23] ZIPSNER, T. (Hrsg.): *Jahrbuch lightweightdesign - JOT - adhäsion. Top-Innovationen aus dem Leichtbau, der Oberflächen- und Klebtechnik*. Springer Vieweg Verlag, Wiesbaden, 2013.
- [240] DRÖDER, K. und GOEDE, M.: *Leichtbaustrategien für zukünftige Fahrzeuggenerationen*. URL: <http://www.leichtbautechnologie.de/karosserie/artikel-leichtbaustrategien-fuer-zukuenftige-fahrzeuggenerationen.html>, zuletzt aufgerufen am 01. November 2011.

- [25] TRÖSTER, T. und LAUTER, C.: *Steel-CFRP hybrid structures for use in automotive light weight construction*. Composites Forum. Composites Europe, Essen, 2010.
- [26] KOCHANEK, C.; SIEWERS, B.; FRANTZ, M.; GLOWANIA, M.; LINKE, M.; LAUTER, C.; GRIES, T. und TRÖSTER, T.: *Hybrid FRP-Steel components for automotive applications*. 5. Aachen-Dresden International Textile Conference, Aachen, 2011.
- [27] CHIMANI, C. M. und UGGOWITZER, P. J. (Hrsg.): *Energieeffiziente Mobilität: Chancen der Werkstoff- und Prozesstechnologie*. LKR Verlag, Ranshofen, 2012.
- [280] N. N.: *CO2-Emissionen von PKW ab 1. Januar 2015 auf 125 g/km begrenzen*. URL: <http://www.europarl.europa.eu/sides/getDoc.do?language=de&type=IM-PRESS&reference=20071023IPR12110>, zuletzt aufgerufen am 31. Oktober 2011.
- [29] GOLLOCH, R.: *Downsizing bei Verbrennungsmotoren. Ein wirkungsvolles Konzept zur Kraftstoffverbrauchssenkung*. Springer Verlag, Berlin, 2005.
- [30] SO, H.; FAßMANN, D.; HOFFMANN, H.; GOLLE, R. und SCHAPER, M.: *An investigation of the blanking process of the quenchable boron alloyed steel 22MnB5 before and after hot stamping process*. *Journal of Materials Processing Technology*, Bd. 212, S. 437-449, 2012.
- [31] NEUGEBAUER, R.; DROSSEL, W. G.; STERZING, A. und SCHIECK, F.: *Strukturbauteile im Automobil. Technologiepotenziale für intelligenten Leichtbau*. Wissenschaftstagung des Institutes für Faserverbundleichtbau und Adaptronik der DLR, Braunschweig, 2009.
- [32] JACOB, A.: *BMW counts on carbon fibre for its Megacity Vehicle*. *Reinforced Plastics*, Nr. September/Oktober, 2010.
- [33] MÜCKLICH, S.; WIELAGE, B. (Hrsg.): *Leichtbaupotenziale durch Einsatz von Leichtmetallen*. Habilitation. Technische Universität Chemnitz, Chemnitz, 2008.
- [34] LAUTER, C.; DAU, J.; TRÖSTER, T. und HOMBERG, W.: *Manufacturing processes for automotive structures in multi-material design consisting of sheet metal and CFRP prepregs*. 16th International Conference on Composite Structures, Porto, 2011.
- [35] KÖTH, C. P. und ZIEGLER, M.: *Nachhaltiger Stahlleichtbau. Automobil Industrie Special. OEM Partners 2012*, Nr. 8, 2012.
- [36] WÖHRMANN, M.; WALLMICHMATH, M. und FREHN, A.; FORSCHUNGSVEREINIGUNG AUTOMOBILTECHNIK E. V. (FAT), (Hrsg.): *Methodischer Ansatz im Stahlleichtbau am Beispiel Federbein/Dämpfer. FAT-Schriftenreihe Nr. 203*. Forschungsvereinigung Automobiltechnik e. V. (FAT), Berlin, 2006.
- [37] ABRATE, S. (Hrsg.): *Impact Engineering of Composite Structures*. Springer Verlag, Wien, 2011.

- [38] SULTAN, M. T.; WORDEN, K.; PIERCE, S. G.; HICKEY, D.; STASZEWSKI, W. J.; DULIEU-BARTON, J. M. und HODZIC, A.: *On impact damage detection and quantification for CFRP laminates using structural response data only. Mechanical Systems and Signal Processing*, Bd. 25, S. 3135-3152, 2011.
- [39] LUO, R. K.; GREEN, E. R. und MORRISON, C. J.: *Impact damage analysis of composite plates. International Journal of Impact Engineering*, Bd. 22, S. 435-447, 1999.
- [40] IQBAL, K.; KHAN, S. U.; MUNIR, A. und KIM, J. K.: *Impact damage resistance of CFRP with nanoclay-filled epoxy matrix. Composites Science and Technology*, Bd. 69, S. 1949-1957, 2009.
- [41] VASSILOPOULOS, A. P. und KELLER, T.: *Fatigue of Fiber-reinforced Composites*. Springer Verlag, London, 2011.
- [42] CHERIF, C. (Hrsg.): *Textile Werkstoffe für den Leichtbau. Techniken, Verfahren, Materialien, Eigenschaften*. Springer Verlag, Berlin, 2011.
- [43] TRÖSTER, T. und LAUTER, C.: *Leichtbau mit höchstfesten Kunststoff-Metall-Hybriden*. TecPart Sitzung der Fachgruppe Automobil-Zulieferer, Coburg, 2009.
- [44] NEITZEL, M. und MITSCHANG, P.: *Handbuch Verbundwerkstoffe. Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung*. Hanser Verlag, München, 2004.
- [45] ZHANG, J.; CHAISOMBAT, K.; HE, S. und WANG, C. H.: *Hybrid composite laminates reinforced with glass/carbon woven fabrics for lightweight load bearing structures. Materials and Design*, Bd. 36, S. 75-80, 2012.
- [46] SCHÜRSMANN, H.: *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden*. Springer Verlag, Berlin, 2005.
- [47] FINK, A.; CAMANHO, P. P.; ANDRÉS, J. M.; PFEIFFER, E. und OBST, A.: *Hybrid CFRP/titanium bolted joints: Performance assessment and application to a spacecraft payload adaptor. Composites Science and Technology*, Bd. 70, S. 305-317, 2010.
- [48] KOPP, G.; BEEH, E.; SCHÖLL, R.; KOBILKE, A.; STRAßBURGER, P. und KRIESCHER, M.: *New Lightweight Structures for Advanced Automotive Vehicles - Safe and Modular. Procedia - Social and Behavioral Sciences*, Bd. 48, S. 350-362, 2012.
- [49] ECKSTEIN, L.; ICKERT, L.; GOEDE, M. und WUTSCHERK, S.: *Belastungsgerechte Leichtbaustrukturen im Automobil aus Faserverbundwerkstoffen. Lightweight Design*, Nr. 6, S. 41-47, 2010.
- [50] TRÖSTER, T.; MARTEN, T.; THOMAS, D.; BLOCK, H.; LAUTER, C. und THÖNE, M.: *Automobilleichtbau mit innovativen Werkstoffen und Prozessen. Forschungsforum Paderborn*, Bd. 15, Nr. 15, S. 30-38, 2012.

- [51] MARTEN, T.; LAUTER, C. und TRÖSTER, T.: *Automobilleichtbau durch höchstfeste Multimaterialsysteme. Ingenieurspiegel*, Nr. 2, S. 67-69, 2011.
- [52] LAUTER, C.; THOMAS, D.; FRANTZ, M.; NIEWEL, J. und TRÖSTER, T.: *Belastungsangepasste Strukturbauteile für Automobile aus höchstfesten Werkstoffen und Hybridwerkstoffen. Werkstoffe in der Fertigung*, Nr. 2, S. 6-7, 2011.
- [53] MAYYAS, A. T.; QATTAWI, A.; MAYYAS, A. R. und OMAR, M.: *Quantifiable Measures of Sustainability: A Case Study of Materials Selection for Eco-lightweight Auto-bodies. Journal of Cleaner Production*, Bd. 40, S. 177-189, 2013.
- [54] MOREIRA, P. M.; SILVA, L. F. und CASTRO, P. M. (Hrsg.): *Structural Connections for Lightweight Metallic Structures*. Springer Verlag, Berlin, 2012.
- [55] KLOCKE, F. und KÖNIG, W.: *Fertigungsverfahren 4. Umformen*. Springer Verlag, Berlin, 2006.
- [56] KOLLECK, R. und VEIT, R.: *Current and future trends in the field of hot stamping of car body parts*. 3rd International Conference on Steels in Cars and Trucks, Salzburg, 2011.
- [57] TRÖSTER, T. und LAUTER, C.: *Leichtbau mit höchstfesten Kunststoff-Metall-Hybriden*. Hochschule trifft Mittelstand vor Ort, Meinerzhagen, 2009.
- [58] BARGEL, H.-J.; HILBRANS, H. und SCHULZE, G.: *Werkstoffkunde*. Springer Verlag, Berlin, 2008.
- [60] BONTE, M. H.: *Optimisation Strategies for Metal Forming Processes*. Dissertation. Universität Twente, Enschede, 2007.
- [61] DOEGE, E. und BEHRENS, B.-A.: *Handbuch Umformtechnik. Grundlagen, Technologien, Maschinen*. Springer Verlag, Berlin, 2007.
- [63] MARTEN, T.; NIEWEL, J. und TRÖSTER, T.: *Untersuchung alternativer Erwärmungsverfahren für den Presshärteprozess. HTM Journal of Heat Treatment and Materials*, Bd. 66, Nr. 6, S. 309-315, 2011.
- [64] NADERI, M.: *Hot Stamping of Ultra High Strength Steels*. Dissertation. RWTH Aachen, Aachen, 2007.
- [66] SHI, Y.; ZHU, P.; SHEN, L. und LIN, Z.: *Lightweight design of automotive front side rails with TWB concept. Thin-Walled Structures*, Bd. 45, S. 8-14, 2007.
- [67] ICKERT, L.; THOMAS, D.; ECKSTEIN, L. und TRÖSTER, T.; FORSCHUNGSVEREINIGUNG AUTOMOBILTECHNIK E. V. (FAT), (Hrsg.): *Beitrag zum Fortschritt im Automobilleichtbau durch belastungsgerechte Gestaltung und innovative Lösungen für lokale Verstärkungen von Fahrzeugstrukturen in*

- Mischbauweise. FAT-Schriftenreihe Nr. 244.* Forschungsvereinigung Automobiltechnik e. V. (FAT), Berlin, 2012.
- [68] ADAM, H.: *Carbon fibre in automotive applications. Materials and Design*, Bd. 18, S. 349-355, 1997.
- [69] WEIßBACH, W.: *Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung.* Vieweg Verlag, Wiesbaden, 2001.
- [70] KOKE, I.: *Werkstoffeigenschaften handlaminiertes Faserverbundkunststoffe, erfasst in realen und virtuellen Laboren der Mechanik unter Einsatz von Methoden zur Wissensorganisation.* Dissertation. Technische Universität Berlin. Cuvillier Verlag, Göttingen, 2012.
- [71] SOBOYEJO, W.: *Mechanical Properties of Engineered Materials.* Dekker Verlag, New York, 2003.
- [72] RUMPELT, T.: *Nächster Schritt: CFK in der Außenhaut. Automobil Industrie*, Nr. 6, S. 40, 2012.
- [73] FLEMMING, M.; ZIEGMANN, G. und ROTH, S.: *Faserverbundbauweisen. Fertigungsverfahren mit duroplastischer Matrix.* Springer Verlag, Berlin, 1999.
- [74] ERHARD, G.: *Konstruieren mit Kunststoffen.* Hanser Verlag, München, 2008.
- [75] HOROSCHENKOFF, A.: *Statt Stahl und Aluminium. Kunststoffe*, Nr. 5, S. 50-54, 2010.
- [76] MACIEJ, M.: *Faserverbundkunststoffe: Von der Kleinserienfertigung von Sichtbauteilen zur Großserienproduktion von Strukturteilen.* InnoMateria - Interdisziplinäre Kongressmesse für innovative Werkstoffe, Köln, 2011.
- [77] FRANTZ, M.; STÜBBE, O.; LAUTER, C.; SCHRAGE, J. und TRÖSTER, T.: *Mechatronisches System zur Bestimmung der Restlebensdauer von Faserverbund-Leichtbaustrukturen am Beispiel einer Lauffeder.* InnoMateria - Interdisziplinäre Kongressmesse für innovative Werkstoffe, Köln, 2011.
- [78] FRANTZ, M.; LAUTER, C. und TRÖSTER, T.: *Schadensdetektion in hybriden Metall-Faserverbundkunststoff-Konstruktionen. Konstruktion: Zeitschrift für Produktentwicklung und Ingenieur-Werkstoffe*, Nr. 10, S. IW8-IW10, 2011.
- [79] REUTER, M.: *Methodik der Werkstoffauswahl. Der systematische Weg zum richtigen Material.* Hanser Verlag, München, 2007.
- [80] RUMPELT, T.: *So gut, so teuer. Automobil Industrie Insight*, S. 49-50, 2012.
- [82] KALWEIT, A.; PAUL, C.; PETERS, S. und WALLBAUM, R. (Hrsg.): *Handbuch für technisches Produktdesign. Material und Fertigung Entscheidungsgrundlag Material und Fertigung - Entscheidungsgrundlagen für Designer und Ingenieure.* Springer Verlag, Berlin, 2006.

- [83] EHRENSTEIN, G. W.: *Faserverbund-Kunststoffe. Werkstoffe, Verarbeitung, Eigenschaften*. Hanser Verlag, München, 2006.
- [84] KROSCHWITZ, J. I. (Hrsg.): *High performance polymers and composites*. Wiley Verlag, New York, 1991.
- [85] WULFHORST, B.: *Textile Fertigungsverfahren. Eine Einführung*. Hanser Verlag, München, 1998.
- [86] SCHÜRMMANN, H.: *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden*. Springer Verlag, Berlin, 2007.
- [87] GÄDKE, M.: *Hygrothermomechanisches Verhalten kohlenstoffaserverstärkter Epoxidharze*. VDI Verlag, Düsseldorf, 1988.
- [89] BERTHELOT, J.-M.: *Mechanical behavior and structural analysis*. Springer Verlag, New York, 1999.
- [90] HUFENBACH, W. (Hrsg.): *Textile Verbundbauweisen und Fertigungstechnologien für Leichtbaukonstrukturen des Maschinen- und Fahrzeugbaus*. SDV Medien AG, Dresden, 2007.
- [91] FLEMMING, M.; ZIEGMANN, G. und ROTH, S.: *Faserverbundbauweisen. Fasern und Matrices*. Springer Verlag, Berlin, 1995.
- [92] BAUR, E.; BRINKMANN, S.; OSSWALD, T. A. und SCHMACHTENBERG, E. (Hrsg.): *Saechtling Kunststoff Taschenbuch*. Hanser Verlag, München, 2007.
- [93] DAVÉ, R. S. und LOOS, A. C. (Hrsg.): *Processing of Composites*. Hanser Verlag, München, 2000.
- [94] SCHLARF, A. K. (Hrsg.): *IVW-Kolloquium 2004. 5.-6. Oktober 2004*. Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, Technische Universität Kaiserslautern, Kaiserslautern, 2004.
- [95] KAISER, W.: *Kunststoffchemie für Ingenieure. Von der Synthese bis zur Anwendung*. Hanser Verlag, München, 2007.
- [96] ZEPF, H.-P.; BARON, C.; BÖRGER, H.; BREUER, U. P. und HINZ, B.: *Faserverbundwerkstoffe mit thermoplastischer Matrix. Hochleistungswerkstoffe für rationelle Verarbeitung*. Expert Verlag, Renningen-Malmsheim, 1997.
- [97] DOMKE, W.: *Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung*. Cornelsen Verlag, Düsseldorf, Bielefeld, 2001.
- [98] MICHAELI, W.: *Einführung in die Kunststoffverarbeitung*. Hanser Verlag, München, 2006.
- [99] ROOS, E. und MAILE, K.: *Werkstoffkunde für Ingenieure. Grundlagen, Anwendung, Prüfung*. Springer Verlag, Berlin, 2008.

- [100] PHONTHAMMACHAI, N.; LI, X.; WONG, S.; CHIA, H.; TIJU, W. W. und HE, C.: *Fabrication of CFRP from high performance clay/epox nanocomposite: Preparation conditions, thermal-mechanical properties and interlaminar fracture characteristics. Composites: Part A*, Bd. 42, S. 881-887, 2011.
- [101] FLEMMING, M.; ZIEGMANN, G. und ROTH, S.: *Faserverbundbauweisen. Halbzeuge und Bauweisen*. Springer Verlag, Berlin, 1996.
- [102] LEE, J. Y.; CHOI, H. K.; SHIM, M. J. und KIM, S. W.: *Kinetic studies of an epoxy cure reaction by isothermal DSC analysis. Thermochimica Acta*, Bd. 343, S. 111-117, 2000.
- [103] EBELING, F. W.; SCHIRBER, H.; HUBERT, H. und SCHLÖR, N.; SCHWARZ, O. (Hrsg.): *Kunststoffkunde. Aufbau, Eigenschaften, Verarbeitung, Anwendungen der Thermoplaste, Duroplaste und Elastomere*. Vogel Verlag, Würzburg, 1990.
- [104] EYERER, P.; HIRTH, T. und ELSNER, P. (Hrsg.): *Polymer Engineering. Technologien und Praxis*. Springer Verlag, Berlin, 2008.
- [105] WYPYCH, G.: *Handbook of Fillers*. ChemTec Publishing, Toronto, 1999.
- [106] HOLLAWAY, L. (Hrsg.): *Polymers and polymer composites in construction*. Thomas Telford Verlag, London, 1990.
- [107] CHUNG, D. D.: *Carbon Fibre Composites*. Butterworth-Heinemann Verlag, Boston, 1994.
- [108] BROCKMANN, W.; GEIß, P. L.; KLINGEN, J. und SCHRÖDER, B.: *Adhesive Bonding. Materials, Applications and Technology*. Wiley Verlag, Weinheim, 2009.
- [109] HABENICHT, G.: *Kleben. Grundlagen, Technologien, Anwendungen*. Springer Verlag, Berlin, 2009.
- [110] HENNEMANN, O.-D.; BROCKMANN, W. und KOLLEK, H.: *Handbuch Fertigungstechnologie Kleben*. Hanser Verlag, München, 1992.
- [111] CARLOWITZ, B. (Hrsg.): *Die Kunststoffe. Chemie, Physik, Technologie*. Hanser Verlag, München, 1990.
- [112] CAI, H.; LI, P.; SUI, G.; YU, Y.; LI, G.; YANG, X. und RYU, S.: *Curing kinetics study of epoxy resin/flexible amine toughness systems by dynamic and isothermal DSC. Thermochimica Acta*, Bd. 473, S. 101-105, 2008.
- [113] OYAMA, S. T. (Hrsg.): *Mechanisms in Homogeneous and Heterogeneous Epoxidation Catalysis*. Elsevier Verlag, Amsterdam, 2008.
- [114] NEEB, T.: *Adhäsionsmechanismen an mechanisch vorbehandelten Metalloberflächen*. Dissertation. Universität Kaiserslautern, Kaiserslautern, 1999.
- [115] KUCH, R.: *Epoxidharz - (Araldit B): Ein Modellmaterial für brüchige Stoffe*. Dissertation. Technische Universität München, München, 1988.

- [120] MICHAELI, W.; WEGENER, M. und BEGEMANN, M.: *Einführung in die Technologie der Faserverbundkunststoffe*. Hanser Verlag, München, 1989.
- [121] AVK, I. (Hrsg.): *Handbuch Faserverbundkunststoffe. Grundlagen, Verarbeitung, Anwendungen*. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2010.
- [122] HOU, M. und YE, L.: *Manufacturing and Testing of High Performance Sheet Moulding Compound. Advanced Materials Research*, Bd. 32, S. 141-144, 2008.
- [123] LAU, P. und HÜNTELMANN, J.: *Die automatisierte Manufaktur?. Phi - Produktionstechnik Hannover informiert*, Nr. 2, S. 14-15, 2006.
- [124] PUCK, A.: *Festigkeitsanalyse von Faser-Matrix-Laminaten. Modelle für die Praxis*. Hanser Verlag, München, 1996.
- [125] CRISTESCU, N.; CRACIUN, E.-M. und SOÓS, E.: *Mechanics of elastic composites*. Chapman & Hall Verlag, Boca Raton, 2004.
- [126] KOSCHMIEDER, M.: *Verarbeitung und Eigenschaften von Faserverbundkunststoffen mit Elastomermatrix*. Dissertation. RWTH Aachen, Aachen, 2000.
- [127] MOELLER, E. (Hrsg.): *Handbuch Konstruktionswerkstoffe. Auswahl, Eigenschaften, Anwendung*. Hanser Verlag, München, 2008.
- [128] WOLTERS, L.; DERSCH, H.; KROTT, G. und LINNEMANN, L.; AACHEN, I. f. (Hrsg.): *Faserverbundkunststoffe*. Aachen, 2011.
- [129] R&G FASERVERBUNDWERKSTOFFE GMBH, (Hrsg.): *Handbuch Faserverbundwerkstoffe*. Waldenbuch, 2003.
- [130] BROUWER, W. D.; VAN HERPT, E. C. und LABORDUS, M.: *Vacuum injection moulding for large structural applications. Composites: Part A*, Bd. 34, S. 551-558, 2003.
- [131] MATSUZAKI, R.; KOBAYASHI, S.; TODOROKI, A. und MIZUTANI, Y.: *Full-field monitoring of resin flow using an area-sensor array in a VaRTM process. Composites: Part A*, Bd. 42, Nr. 5, S. 550-559, 2011.
- [132] YAMASHITA, M.; SAKAGAWA, T.; TAKEDA, F.; KIMATA, F. und KOMORI, Y.: *Development of Advanced Vacuum-assisted Resin Transfer Molding Technology for Use in an MRJ Empennage Box Structure. Mitsubishi Heavy Industries, Ltd., Technical Review*, Bd. 45, Nr. 4, S. 1-4, 2008.
- [133] SAYRE, J. R.: *Vacuum-Assisted Resin Transfer Molding (VARTM). Model Development, Verification, and Process Analysis*. Dissertation. Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, 2000.
- [134] DIEBOLD, K.: *Komposite verleihen Flügel. Faserverbund-Kunststoffe: Starke Leichtgewichte in Form gebracht. Sonderdruck aus Industrie Anzeiger*, Nr. 26/27, 2008.

- [136] BITTMANN, E.: *Duroplaste. Kunststoffe*, Nr. 10, S. 4-7, 2005.
- [137] MICHAELI, W. und KREMER, C.: *Reproduzierbar Fertigen. Plastverarbeiter*, Nr. 5, S. 50-52, 2009.
- [138] STAUBER, R. und VOLLRATH, L.: *Plastics in Automotive Engineering*. Hanser Verlag, München, 2007.
- [139] BECKE, J. und STIEG, J.: *Advanced SMC. Ein Materialkonzept für Leichtbau in der Fahrzeugaußenhaut*. European Alliance for SMC. Automotive Seminar, Bremen, 2004.
- [140] GRASSER, S.: *Composite-Metall-Hybridstrukturen unter Berücksichtigung großserientauglicher Fertigungsprozesse*. Symposium Material Innovativ, Ansbach, 2009.
- [141] SUN, J.; GU, Y. Z.; LI, M.; LI, Y. X. und ZHANG, Z. G.: *Relationship between slipping friction of prepreg stacks and forming quality of hot diaphragm formed C-shaped thermosetting composite laminates*. 19th International Conference on Composite Materials, Montreal, 2013.
- [142] EHRENSTEIN, G. W.: *Mit Kunststoffen konstruieren*. Hanser Verlag, München, 2007.
- [143] JONG, T.: *Forming of Laminates*. Dissertation. Technische Universität Delft. Delft University Press, Delft, 2004.
- [144] DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR MATERIALKUNDE E. V.: *1. Fachausschuss-Sitzung: Hybride Werkstoffe und Strukturen*. Köln, 2012.
- [145] MÖLLER, F.; THOMY, C.; VOLLERTSEN, F.; SCHIEBEL, P.; HOFFMEISTER, C. und HERRMANN, A. S.: *Novel method for joining CFRP to aluminum*. *Physics Procedia*, Bd. 5, S. 37-45, 2010.
- [146] LAUTER, C.; FRANTZ, M. und TRÖSTER, T.: *Großserientaugliche Herstellung von Hybridwerkstoffen durch Prepregpressen*. *Lightweight Design*, Nr. 4, S. 48-54, 2011.
- [147] BROUGHTON, J. G.; BEEVERS, A. und HUTCHINSON, A. R.: *Carbon-fibre-reinforced plastic (CFRP) strengthening of aluminium extrusions*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Bd. 17, S. 269-278, 1997.
- [149] FRITZ, A. H. und SCHULZE, G. (Hrsg.): *Fertigungstechnik*. Springer Verlag, Berlin, 2006.
- [150] LEIBOLD, H.: *Optimierung des Hybridfügeverfahrens Blindnietkleben zum Verbinden von Feinblechwerkstoffen*. Dissertation. Universität Paderborn. Shaker Verlag, Aachen, 2009.
- [151] EHRENSTEIN, G. W. (Hrsg.): *Handbuch Kunststoff-Verbindungstechnik*. Hanser Verlag, München, 2004.

- [152] WIBBEKE, M.: *Werkstatt-Reparaturkonzept für Kfz-Strukturen aus höherfesten Stahlwerkstoffen unter Einsatz des Fügeverfahrens Blindnietkleben. Dokumentation 755, Projekt-Nr. P617.* Dissertation. Universität Paderborn. Forschungsvereinigung Stahlanwendungen e. V., Verlag und Vertriebsgesellschaft, Düsseldorf, 2006.
- [153] MÜLLER, M.: *Prozesssicheres Montagekleben einer Aluminium-Stahl-Verbindung im Hinblick auf Einsatz unter Temperaturwechselbeanspruchung.* Dissertation. Universität Paderborn. Shaker Verlag, Aachen, 2009.
- [154] BÖDDEKER, T.: *Entwicklung einer Methodik zum Kleben von Stahlrohren.* Dissertation. Universität Paderborn. Shaker Verlag, Aachen, 2011.
- [155] HABENICHT, G.: *Kleben. Erfolgreich und fehlerfrei.* Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2008.
- [156] HAHN, O.; WIBBEKE, M.; BÖHME, D.; ALLMEIER, S.; HAFERKAMP, H.; BOESE, B.; MATTHIß, H. und SCHMID, C.: *Werkstatt-Reparaturkonzept für Kfz-Strukturen aus höherfesten Stahlwerkstoffen im Automobilkarosseriebau. Projekt-Nr. P617.* Forschungsvereinigung Stahlanwendungen e. V., Verlag und Vertriebsgesellschaft mbH, Düsseldorf, 2006.
- [157] GAUSEMEIER, J.; EBBESMEYER, P. und KALLMEYER, F.: *Produktinnovation. Strategische Planung und Entwicklung der Produkte von morgen.* Hanser Verlag, München, 2001.
- [158] PAHL, G.; BEITZ, W.; FELDHUSEN, J. und GROTE, K.-H.: *Konstruktionslehre. Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung. Methoden und Anwendung.* Springer Verlag, Berlin, 2005.
- [159] STEINHILPER, W. und SAUER, B. (Hrsg.): *Konstruktionselemente des Maschinenbaus 1. Grundlagen der Berechnung und Gestaltung von Maschinenelementen.* Springer Verlag, Berlin, 2008.
- [160] BÖGE, A. (Hrsg.): *Vieweg Handbuch Maschinenbau. Grundlagen und Anwendungen der Maschinenbau-Technik.* Vieweg Verlag, Wiesbaden, 2007.
- [161] ELSPASS, W. J. und FLEMMING, M.: *Aktive Funktionsbauweisen. Eine Einführung in die Strukturonik.* Springer Verlag, Berlin, 1998.
- [162] SCHÜTZE, R.: *Lightweight carbon fibre rods and truss structures. Materials & Design*, Bd. 18, Nr. 4-6, S. 231-238, 1997.
- [163] SCHMALE, H. C.: *Einfluss einer induktiv beschleunigten Härtingsreaktion auf die mechanisch-technologischen Eigenschaften einer Klebverbindung unter Schlagbeanspruchung.* Dissertation. Universität Paderborn. Shaker Verlag, Aachen, 2009.

- [164] FINKELDEY, C.: *Warmluftnieten von langglasfaserverstärkten Thermoplasten mit beschichteten metallischen Werkstoffen*. Dissertation. Universität Paderborn. Shaker Verlag, Aachen, 2004.
- [165] LAUTER, C.; TRÖSTER, T.; BRANDIS, R. und GAUSEMEIER, J.: *Methodik für die Produktentstehung hybrider Leichtbaustrukturen*. *Lightweight Design*, Nr. 6, S. 50-56, 2012.
- [166] LAUTER, C.; DAMEROW, U.; FRANTZ, M.; TRÖSTER, T. und HOMBERG, W.: *Produktionsverfahren zur Herstellung höchstfester hybrider Leichtbaustrukturen für den Einsatz im Automobil*. InnoMateria - Interdisziplinäre Kongressmesse für innovative Werkstoffe, Köln, 2011.
- [179] ERIKSSON, L.; JOHANSSON, E.; KETTANEH-WOLD, N.; WIKSTRÖM, C. und WOLD, S.: *Design of Experiments. Principles and Applications*. Umetrics AB, Umea, 2008.
- [191] RICHARD, H. A. und SANDER, M.: *Technische Mechanik. Festigkeitslehre*. Vieweg Verlag, Wiesbaden, 2006.
- [192] GORNY, B.: *Einsatzmöglichkeiten und Anwendungsgrenzen der digitalen Bildkorrelation zur Frühdetektion struktureller und funktioneller Schädigungen und Versagensvorhersage in metallischen Werkstoffen, Werkstoffverbunden und Verbundwerkstoffen*. Dissertation. Universität Paderborn, Paderborn, 2013.
- [193] RICHARD, H. A. und SANDER, M.: *Technische Mechanik. Statik*. Vieweg Verlag, Wiesbaden, 2008.
- [194] LAUTER, C.; SKÖCK-HARTMANN, B.; GRIES, T.; TRÖSTER, T. und LINKE, M.: *Multi-material systems. High strength steels and fibre-reinforced plastics*. 6th European Conference on Steel and Composite Structures, Budapest, 2011.
- [197] GOODWIN, A.; HOWE, C. und PATON, R.: *The role of voids in reducing the interlaminar shear strength in RTM laminates*. 11th International Conference on Composite Materials, Gold Coast, 1997.
- [198] GHIORSE, S. R.: *A comparison of void measurement methods for carbon/epoxy composites*. U. S. Army Materials Technology Laboratory, Watertown, 1991.
- [199] JUDD, N. C. und WRIGHT, W. W.: *Voids and their effects on the mechanical properties of composites. An appraisal*. *SAMPE Journal*, Bd. 14, Nr. 1, S. 10-14, 1978.
- [200] HARPER, B. D.; STAAB, G. H. und CHEN, R. S.: *A Note on the Effects of Voids Upon the Hygral and Mechanical Properties of AS4/3502 Graphite/Epoxy*. *Journal of Composite Materials*, Bd. 21, Nr. 3, S. 280-289, 1987.
- [201] OLIVIER, P.; COTTU, J. P. und FERRET, B.: *Effects of cure cycle pressure and voids on some mechanical properties of carbon/epoxy laminates*. *Composites*, Bd. 26, Nr. 7, S. 509-515, 1995.

- [202] GRUNENFELDER, L. K. und NUTT, S. R.: *Void formation in composite prepregs – Effect of dissolved moisture. Composites Science and Technology*, Bd. 70, S. 2304-2309, 2010.
- [203] GU, Y.; LI, M.; ZHANG, Z. und SUN, Z.: *Void Formation Model and Measuring Method of Void Formation Condition During Hot Pressing Process. Polymer Composites*, Bd. 31, Nr. 9, S. 1562-1571, 2009.
- [204] AFENDI, M.; BANKS, W. M. und KIRKWOOD, D.: *Bubble free resin for infusion process. Composites: Part A*, Bd. 36, S. 739-746, 2005.
- [205] LUNDSTRÖM, T. S. und HOLMGREN, A.: *Dissolution of Voids during Compression Molding of SMC. Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Bd. 29, Nr. 12, S. 1826-1837, 2010.
- [206] PATEL, N.; ROHATGI, V. und JAMES LEE, L.: *Micro Scale Flow Behavior and Void Formation Mechanism During Impregnation Through a Unidirectional Stitched Fiberglass Mat. Polymer Engineering and Science*, Bd. 35, Nr. 10, S. 837-851, 1995.
- [207] HAMIDI, Y. K.; AKTAS, L. und ALTAN, M. C.: *Effect of Packing on Void Morphology in Resin Transfer Molded E-Glass/Epoxy Composites. Polymer Composites*, Bd. 26, Nr. 5, S. 614-627, 2005.
- [208] TANG, J. M.; LEE, W. I. und SPRINGER, G. S.: *Effects of Cure Pressure on Resin Flow, Voids, and Mechanical Properties. Journal of Composite Materials*, Bd. 21, Nr. 5, S. 421-440, 1987.
- [209] GRÜBER, B.; HUFENBACH, W.; KROLL, L.; LEPPER, M. und ZHOU, B.: *Stress concentration analysis of fibre-reinforced multilayered composites with pin-loaded holes. Composites Science and Technology*, Bd. 67, S. 1439-1450, 2007.
- [210] HUFENBACH, W.; GOTTWALD, R.; GRÜBER, B.; LEPPER, M. und ZHOU, B.: *Stress concentration analyses of thick-walled laminate composites with a loaded circular cut-out by using a first-order shear deformation theory. Composites Science and Technology*, Bd. 68, S. 2238-2244, 2008.
- [214] LAUTER, C.; SARRAZIN, M. und TRÖSTER, T.: *Multimaterialsysteme höchstfest verbunden. Adhäsion*, Nr. 3, S. 39-43, 2011.
- [219] LAUTER, C.; SARRAZIN, M. und TRÖSTER, T.: *Joining technologies for hybrid materials consisting of sheet metal and carbon fibre reinforced plastics. 1st International Conference of the International Journal of Structural Integrity*, Porto, 2012.
- [221] LAUTER, C.; FRANTZ, M.; SIEWERS, B. und TRÖSTER, T.: *Hybrid structures for tailored structural automotive components. JEC Composites Magazine*, Bd. 69, Nr. 11/12, S. 35-37, 2011.

- [222] BROCKMANN, W.; GEIß, P. L.; KLINGEN, J. und SCHRÖDER, K. B.: *Klebtechnik. Klebstoffe, Anwendungen und Verfahren*. Wiley Verlag, Weinheim, 2005.
- [223] TEUTENBERG, D.: *Entwicklung einer Vorgehensweise zur Abschätzung der Einflüsse konstruktions- und fertigungsbedingter Toleranzen auf die mechanischen Eigenschaften von Klebverbindungen unter zyklischer Belastung*. Dissertation. Universität Paderborn. Shaker Verlag, Aachen, 2012.
- [224] KLAPP, O.: *Mechanisches Verhalten elastomerer Klebeverbindungen*. Dissertation. Universität Kassel, Kassel, 2003.
- [225] SILVA, L. F. und ADAMS, R. D.: *Techniques to reduce the peel stresses in adhesive joints with composites*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Bd. 27, Nr. 3, S. 227-235, 2007.
- [226] WIßLING, M.: *Methodenentwicklung zur Auslegung mechanisch gefügter Verbindungen unter Crashbelastung*. Dissertation. Universität Paderborn. Shaker Verlag, Aachen, 2008.
- [235] WIRTH, C.: *Berechnungskonzept für die Klebflanschfestigkeit in Gesamtkarosseriemodellen*. Dissertation. Technische Universität München, München, 2004.
- [238] FRICK, A. und STERN, C.: *DSC-Prüfung in der Anwendung*. Hanser Verlag, München, 2006.
- [239] EHRENSTEIN, G. W.; RIEDEL, G. und TRAWIEL, P.: *Praxis der Thermischen Analyse von Kunststoffen*. Hanser Verlag, München, 2003.
- [240] MAFI, R.; MIRABEDINI, S. M.; ATTAR, M. M. und MORADIAN, S.: *Cure characterization of epoxy and polyester clear powder coatings using Differential Scanning Calorimetry (DSC) and Dynamic Mechanical Thermal Analysis (DTMA)*. *Progress in Organic Coatings*, Bd. 54, S. 164-169, 2005.
- [241] HÖHNE, G. W.; HEMMINGER, W. F. und FLAMMERSHEIM, H. J.: *Differential Scanning Calorimetry*. Springer Verlag, Berlin, 2003.
- [242] THERIAULT, R. P.; WOLFRUM, J. und EHRENSTEIN, G. W.: *Härtungsverlauf von Harzsystemen*. *Kunststoffe*, Bd. 89, Nr. 11, S. 112-116, 1999.
- [243] GRELLMANN, W. und SEIDLER, S. (Hrsg.): *Kunststoffprüfung*. Hanser Verlag, München, 2005.
- [245] KAIMANN, A.: *Verkürzung der Prozesszeiten durch Aushärtung von Klebverbindungen mittels induktiver Erwärmung*. Dissertation. Universität Paderborn. Shaker Verlag, Aachen, 2002.
- [246] ZVETKOV, V. L.; KRASTEVA, R. K. und SAMICHKOV, V. I.: *Rate equations in the study of the DSC kinetics of epoxy-amine reactions in an excess of epoxy*. *Thermochimica Acta*, Bd. 478, S. 17-27, 2008.

- [247] KOYRO, M.: *Untersuchungen zum Kleben und mechanischen Fügen von Aluminium-Rahmentragwerken*. Dissertation. Universität Paderborn. Shaker Verlag, Aachen, 2004.
- [249] ODESHI, A. G.; WIELAGE, B. (Hrsg.): *Beitrag zur Herstellung von kohlenstofffaserverstärkten Keramikmatrix-Verbunden*. Dissertation. Technische Universität Chemnitz, Chemnitz, 2001.
- [250] MCHUGH, J.; FIDEU, P.; HERRMANN, A. und STARK, W.: *Determination and review of specific heat capacity measurements during isothermal cure of an epoxy using TM-DSC and standard DSC techniques*. *Polymer Testing*, Bd. 29, S. 759-765, 2010.
- [251] BLUMENSTOCK, T.: *Analyse der Eigenspannungen während der Aushärtung von Epoxidharzmassen*. Dissertation. Universität Stuttgart, Stuttgart, 2003.
- [252] HONG, S. G. und WU, C. S.: *DSC and FTIR analysis of the curing behaviors of epoxy/DICY/solvent open systems*. *Thermochimica Acta*, Bd. 316, S. 167-175, 1998.
- [253] WETTER, H.: *Stanznietkleben von Aluminiumfeinblechen unter Verwendung warmhärtender Klebebandsysteme*. Dissertation. Universität Paderborn. Shaker Verlag, Aachen, 2004.
- [255] WOEBCKEN, W.; BRAUN, D. und BECKER, G. W. (Hrsg.): *Kunststoffhandbuch. Duroplaste*. Hanser Verlag, München, 1988.
- [261] FRANTZ, M.; LAUTER, C. und TRÖSTER, T.: *Advanced manufacturing technologies for automotive structures in multi-material design consisting of high-strength steels and CFRP*. 56th International Scientific Colloquium, Ilmenau, 2011.
- [262] EHRENSTEIN, G. W. und PONGRATZ, S.: *Beständigkeit von Kunststoffen. Band 1*. Hanser Verlag, München, 2007.
- [263] LENGSELD, H. und WERNER, C.: *Warumumformen statt Pressen*. *Kunststoffe*, Nr. 3, S. 28-31, 2008.
- [264] ROBROEK, L. M.: *The Development of Rubber Forming as a Rapid Thermoforming Technique for Continuous Fibre Reinforced Thermoplastic Composites*. Dissertation. Technische Universität Delft. Delft University Press, Delft, 1994.
- [267] SKÖCK-HARTMANN, B. A.: *Prüfverfahren für das Umformen von Multiaxialgelegten für Strukturbauteile*. Dissertation. RWTH Aachen. Shaker Verlag, Aachen, 2013.
- [268] GORNY, B.; HANKELN, F.; LAUTER, C.; SCHMIDT, H. C.; DAMEROW, U.; MAHNKEN, R.; MAIER, H. J.; TRÖSTER, T. und HOMBERG, W.: *Simulation and manufacturing of deep drawn parts reinforced by carbon fibre prepregs*. 1st International Conference on Mechanics of Nano, Micro and Macro Composite Structures, Turin, 2012.

- [269] SCHMIDT, H. C.; DAMEROW, U.; LAUTER, C.; GORNY, B.; HANKELN, F.; HOMBERG, W.; TRÖSTER, T.; MAIER, H. J. und MAHNKEN, R.: *Manufacturing processes for combined forming of multi-material structures consisting of sheet metal and local CFRP reinforcements*. 15th Conference of the European Scientific Association on Material Forming, Erlangen, 2012.
- [270] SCHMIDT, H. C.; DAMEROW, U.; LAUTER, C.; GORNY, B.; HANKELN, F.; HOMBERG, W.; TRÖSTER, T.; MAIER, H. J. und MAHNKEN, R.: *Manufacturing processes for combined forming of multi-material structures consisting of sheet metal and local CFRP reinforcements*. *Key Engineering Materials*, Bd. 504-506, S. 295-300, 2012.
- [271] GRESHAM, J.; CANTWELL, W.; CARDEW-HALL, M. J.; COMPSTON, P. und KALYANASUNDARAM, S.: *Drawing behaviour of metal-composite sandwich structures*. *Composite Structures*, Bd. 78, S. 305-312, 2006.
- [272] BERTHOLD, U.: *Beitrag zur Thermoformung gewebeverstärkter Thermoplaste mittels elastischer Stempel*. Dissertation. Technische Universität Chemnitz, Chemnitz, 2001.
- [273] SCHERER, R.: *Charakterisierung des Zwischenlagenabgleitens beim Thermoformen von kontinuierlich faserverstärkten Polypropylen-Laminaten*. VDI Verlag, Düsseldorf, 1993.
- [274] BREUER, P.: *Beitrag zur Umformtechnik gewebeverstärkter Thermoplaste*. VDI Verlag, Düsseldorf, 1997.
- [276] ENGEL, B. und BRÜHMANN, J.: *Spring-in characteristics of thermoplastic composites with glass fiber fabric reinforcement*. 19th International Conference on Composite Materials, Montreal, 2013.
- [278] AKERMO, M.; LARBERG, Y. R.; SJÖLANDER, J. und HALLANDER, P.: *Influence of interply friction on the forming of stacked UD prepreg*. 19th International Conference on Composite Materials, Montreal, 2013.
- [279] KOUWONOU, K.; PHAM, X. T. und LEBRUN, G.: *Modeling and characterization of thermoplastic composites PEEK/Carbon*. 19th International Conference on Composite Materials, Montreal, 2013.
- [281] BISWAS, A.: *Durchgängige Rechnerunterstützung für die Produktentwicklung umgeformter gewebeverstärkter Thermoplastbauteile*. Dissertation. RWTH Aachen, Aachen, 1996.
- [284] KRIEGER, H.; SKÖCK-HARTMANN, B.; ECKERS, V. und GRIES, T.: *Drapierbarkeit von Verstärkungstextilien*. *Konstruktion: Zeitschrift für Produktentwicklung und Ingenieur-Werkstoffe*, Nr. 11-12, S. IW8-IW10, 2012.

- [285] WARRIOR, N. A.; HARPER, L. T.; TURNER, T. A.; SCHUBEL, P. J. und RUDD, C. D.: *Affordable Lightweight Body Structures (ALBOS)*. JSAE Annual Congress, Yokohama, 2004.
- [288] LINDBERG, J.; BEHRE, B. und DAHLBERG, B.: *Part III: Shearing and Buckling of Various Commercial Fabrics*. *Textile Research Journal*, Bd. 31, Nr. 2, S. 99-122, 1961.
- [289] BALLHAUSE, D.: *Diskrete Modellierung des Verformungs- und Versagensverhaltens von Gewebemembranen*. Dissertation. Universität Stuttgart, Stuttgart, 2007.
- [290] AIMÈNE, Y.; VIDAL-SALLÉ, E.; HAGÈGE, B.; SIDOROFF, F. und BOISSE, P.: *A Hyperelastic Approach for Composite Reinforcement Large Deformation Analysis*. *Journal of Composite Materials*, Bd. 44, Nr. 1, S. 5-26, 2010.
- [291] BOISSE, P.; CHEROUAT, A.; GELIN, J. C. und SABHI, H.: *Experimental Study and Finite Element Simulation of a Glass Fiber Fabric Shaping Process*. *Polymer Composites*, Bd. 16, Nr. 1, S. 83-95, 1995.
- [292] CAO, J.; AKKERMAN, R.; BOISSE, P.; CHEN, J.; CHENG, H. S.; GRAAF, E. F.; GORCZYCA, J. L.; HARRISON, P.; HIVET, G.; LAUNAY, J.; LEE, W.; LIU, L.; LOMOV, S. V.; LONG, A.; LUYCKER, E.; MORESTIN, F.; PADVOISKIS, J.; PENG, X. Q.; SHERWOOD, J.; STOILOVA, T.; TAO, X. M.; VERPOEST, I.; WILLEMS, A.; WIGGERS, J.; YU, T. X. und ZHU, B.: *Characterization of mechanical behavior of woven fabrics: Experimental methods and benchmark results*. *Composites: Part A*, Bd. 39, Nr. 6, S. 1037-1053, 2008.
- [293] NGUYEN, M.; HERSZBERG, I. und PATON, R.: *The shear properties of woven carbon fabric*. *Composite Structures*, Bd. 47, Nr. 1-4, S. 767-779, 1999.
- [296] DAYNES, S. und WEAVER, P.: *Analysis of unsymmetric CFRP-metal hybrid laminates for use in adaptive structures*. *Composites: Part A*, Bd. 41, S. 1712-1718, 2010.
- [297] DORSCH, N. S.: *Zuverlässigkeit von keramischen Mehrlagensubstraten*. Dissertation. Technische Universität Hamburg-Harburg, Hamburg-Harburg, 2010.
- [298] SUTER KUNSTSTOFFE AG: *Faserverbund-Werkstoffdaten*. Fraubrunnen, 2013.
- [299] PRISKA SCHMIDT, A.: *Faserverbundwerkstoffe im Automobilbau: Methodischer Ansatz zur Analyse von Schäden*. Dissertation. Universität Stuttgart, Stuttgart, 2012.
- [300] JÄGER, H. und HAUKE, T.: *Carbonfasern undn ihre Verbundwerkstoffe. Herstellungsprozesse, Anwendungen und Marktentwicklung*. Verlag Moderne Industrie, München, 210.

- [301] APMANN, H.: *Vorteile durch CFK und Leichtbau*. Niedersachsen Aviation. Landesinitiative Luft- und Raumfahrt Niedersachsen: 1. Forum Windkraft - Luftfahrt, Varel, 2011.
- [302] KRÜGER, S. und BECKMANN, M.: *Theoretische Betrachtung der mechanischen Verformungen und Spannungen in vorgeformten feuerfesten Zustellungen*. VGB-Konferenz thermische Abfallverwertung, Fellbaczh, 2008.
- [305] LAUTER, C.; WERNEKE, S.; SIEWERS, B. und TRÖSTER, T.: *Endkonturrennahe Fertigung von höchstfesten Hybridbauteilen*. *Lightweight Design*, Nr. 1, S. 53-58, 2012.
- [306] MICHAELI, W.; BRINKMANN, T. und LESSENICH-HENKYS, V. (Hrsg.): *Kunststoff-Bauteile werkstoffgerecht konstruieren*. Hanser Verlag, München, 1995.
- [307] MENNIG, G. (Hrsg.): *Werkzeuge für die Kunststoffverarbeitung*. Bauarten, Herstellung, Betrieb. Hanser Verlag, München, 1995.
- [308] STEINHILPER, W. und SAUER, B. (Hrsg.): *Konstruktionselemente des Maschinenbaus 2. Grundlagen von Maschinenelementen für Antriebsaufgaben*. Springer Verlag, Berlin, 2008.
- [309] WALTHER, T. und MÜLLER, R. U.: *Grenzenlos prägen*. *Kunststoffe*, Nr. 11, S. 32-36, 2009.
- [312] KRÖGER, M.: *Methodische Auslegung und Erprobung von Fahrzeug-Crashstrukturen*. Dissertation. Universität Hannover, Hannover, 2002.
- [313] SOMASUNDARAM, S.: *Experimentelle und numerische Untersuchungen des Tragverhaltens von Fließformschraubverbindungen für crashbelastete Fahrzeugstrukturen*. Dissertation. Universität Paderborn. Shaker Verlag, Aachen, 2009.
- [314] MAMALIS, A. G.; MANOLAKOS, D. E.; IOANNIDIS, M. B. und PAPAPOSTOULOU, D. P.: *Crashworthy characteristics of axially statically compressed thin-walled square CFRP composite tubes: experimental*. *Composite Structures*, Bd. 63, S. 347-360, 2004.
- [316] OETER, M.: *Beitrag zur Entwicklung einer Versuchsmethodik zur Bewertung des Crashverhaltens geklebter und hybridgefügter Verbindungen*. Dissertation. Universität Paderborn. Shaker Verlag, Aachen, 2005.
- [317] BAMBACH, M. R.; ELCHALAKANI, M. und ZHAO, X. L.: *Composite steel-CFRP SHS tubes under axial impact*. *Composite Structures*, Bd. 87, S. 282-292, 2009.
- [318] BAMBACH, M. R.; JAMA, H. H. und ELCHALAKANI, M.: *Static and dynamic axial crushing of spot-welded thin-walled composite steel-CFRP square tubes*. *International Journal of Impact Engineering*, Bd. 36, S. 1083-1094, 2009.

- [321] LAUTER, C.; FRANTZ, M.; KOHLER, J. P. und TRÖSTER, T.: *Crash tests of hybrid structures consisting of sheet metal and local CFRP reinforcements*. 15th European Conference on Composite Materials, Venedig, 2012.
- [322] BAMBACH, M. R. und ELCHALAKANI, M.: *Plastic mechanism analysis of steel SHS strengthened with CFRP under large axial deformation*. *Thin-Walled Structures*, Bd. 45, S. 159-170, 2007.
- [324] LAUTER, C.; NIEWEL, J.; SIEWERS, B.; ZANFT, B. und TRÖSTER, T.: *Crash worthiness of hybrid pillar structures consisting of sheet metal and local CFRP reinforcements*. 15th International Conference on Experimental Mechanics, Porto, 2012.
- [326] REUTER, C.; FRANTZ, M.; LAUTER, C.; BLOCK, H. und TRÖSTER, T.: *Simulation and testing of hybrid structures consisting of press-hardened steel and CFRP*. 1st International Conference on Mechanics of Nano, Micro and Macro Composite Structures, Turin, 2012.
- [331] DISSELKAMP, M.: *Innovationsmanagement. Instrumente und Methoden zur Umsetzung im Unternehmen*. Gabler Verlag, Wiesbaden, 2005.
- [332] PONN, J. und LINDEMANN, U.: *Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte. Optimierte Produkte - systematisch von Anforderungen zu Konzepten*. Springer Verlag, Berlin, 2008.
- [333] OBERSCHELP, O.: *Strukturierter Entwurf selbstoptimierender mechatronischer Systeme*. Dissertation. Universität Paderborn, Paderborn, 2008.
- [334] HOLZBAUR, U.: *Entwicklungsmanagement. Mit hervorragenden Produkten zum Markterfolg*. Springer Verlag, Berlin, 2007.
- [336] MÜLLER, S.: *Methodik für die entwicklungs- und planungsbegleitende Generierung und Bewertung von Produktionsalternativen. Forschungsberichte IWB Nr. 209*. Utz Verlag, München, 2008.
- [340] WENZELMANN, C.: *Methode zur zukunftsorientierten Entwicklung und Umsetzung von Strategieoptionen unter Berücksichtigung des antizipierten Wettbewerbsverhaltens*. Dissertation. Heinz Nixdorf Institut, Universität Paderborn, Paderborn, 2009.
- [341] BÄTZEL, D.: *Methode zur Ermittlung und Bewertung von Strategiealternativen im Kontext Fertigungstechnik*. Dissertation. Heinz Nixdorf Institut, Universität Paderborn, Paderborn, 2004.
- [342] GAUSEMEIER, J.; PLASS, C. und WENZELMANN, C.: *Zukunftsorientierte Unternehmensgestaltungs. Strategien, Geschäftsprozesse und IT-Systeme für die Produktion von morgen*. Hanser Verlag, München, 2009.

- [343] FINK, A. und SIEBE, A.: *Handbuch Zukunftsmanagement. Werkzeuge der strategischen Planung und Früherkennung*. Campus Verlag, Frankfurt/Main, 2011.
- [344] KLOPP, M. und HARTMANN, M. (Hrsg.): *Das Fledermausprinzip. Strategische Früherkennung für Unternehmen*. Logis Verlag, Stuttgart, 1999.
- [345] PILLKAHN, U.: *Trends und Szenarien als Werkzeuge zur Strategieentwicklung. Wie Sie die unternehmerische Zukunft planen und gestalten*. Publicis Corporate Publishing, Erlangen, 2007.
- [346] HORX, M.; HUBER, J.; STEINLE, A. und WENZEL, E.: *Zukunft machen. Wie Sie von Trends zu Business-Innovationen kommen..* Campus Verlag, Frankfurt/Main, 2007.
- [347] KAISER, I.: *Systematik zur Entwicklung mechatronischer Systeme in der Technologie MID (Molded Interconnect Devices)*. Dissertation. Heinz Nixdorf Institut, Universität Paderborn, Paderborn, 2009.
- [348] OPHEY, L.: *Entwicklungsmanagement. Methoden in der Produktentwicklung*. Springer Verlag, Berlin, 2005.
- [349] PEITZ, T.: *Methodik zur Produktoptimierung mechanisch elektronischer Baugruppen durch die Technologie MID (Molded Interconnect Devices)*. Dissertation. Heinz Nixdorf Institut, Universität Paderborn, Paderborn, 2008.
- [350] LINß, G.: *Qualitätsmanagement für Ingenieure*. Hanser Verlag, München, 2011.
- [351] LINDEMANN, U.: *Methodische Entwicklung technischer Produkte. Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden*. Springer Verlag, Berlin, 2007.
- [352] GEIGER, W. und KOTTE, W.: *Handbuch Qualität. Grundlagen und Elemente des Qualitätsmanagements: Systeme - Perspektiven*. Vieweg Verlag, Wiesbaden, 2008.
- [353] POOK, S.: *Eine Methode zum Entwurf von Zielsystemen selbstoptimierender mechatronischer Systeme*. Dissertation. Heinz Nixdorf Institut, Universität Paderborn, Paderborn, 2011.
- [354] MAGIERA, C.: *Einsatz und Anwendung von Innovationstechniken. Betrachtung unter dem Effizienzaspekt*. Diplomica Verlag, Hamburg, 2009.
- [355] BORSTNAR, N. und KÖHRMANN, G.: *Selbstmanagement mit System. Das Leben proaktiv gestalten*. Ludwig Verlag, Kiel, 2004.
- [356] LACKUM, K.-H.: *Do you speak Marketing? Fachbegriffe aus Marketing und Management verständlich erklärt*. Books on Demand, Norderstedt, 2010.
- [357] GAUSEMEIER, J.; HAHN, A.; KESPOHL, H. D. und SEIFERT, L.: *Vernetzte Produktentwicklung. Der erfolgreiche Weg zum Global Engineering Networking*. Hanser Verlag, München, 2006.

- [358] WITTEN, E.; MATHES, V. und MENCKE, M.: *Betriebliches Innovationsmanagement. Wie Sie erfolgreich neue Produkte und Dienstleistungen entwickeln*. Cornelsen Verlag, Berlin, 2007.
- [359] FRANK, U.: *Spezifikationstechnik zur Beschreibung der Prinziplösung selbstoptimierender Systeme*. Dissertation. Heinz Nixdorf Institut, Universität Paderborn, Paderborn, 2006.
- [364] MICHELS, J. S.: *Integrative Spezifikation von Produkt- und Produktionssystemkonzeptionen*. Dissertation. Heinz Nixdorf Institut, Universität Paderborn, Paderborn, 2006.

Normen, Richtlinien und Datenblätter

- [59N] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.: *DIN 8580: Fertigungsverfahren. Begriffe, Einteilung*. Beuth Verlag, Berlin, 2003.
- [62N] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.: *DIN 8582: Fertigungsverfahren Umformen. Einordnung; Unterteilung, Begriffe, Alphabetische Übersicht*. Beuth Verlag, Berlin, 2003.
- [65N] ARCELORMITTAL DISTRIBUTION GMBH: *Warmumformstähle. Höchstfeste Stähle. Auszug aus dem Europäischen Produktangebot*. Köln, 2012.
- [81N] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.: *DIN EN 7000-11: Luft- und Raumfahrt. Nichtmetallische Werkstoffe. Regeln für die Abfassung und Gestaltung von Werkstoffnormen. Teil 11: Prepregs*. Beuth Verlag, Berlin, 2000.
- [148N] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.: *DIN 8593: Fertigungsverfahren Fügen. Teil 8: Kleben. Einordnung, Unterteilung, Begriffe*. Beuth Verlag, Berlin, 2003.
- [167N] SGL TECHNOLOGIES GMBH: *Sigrafil. Prepreg aus Multifilament-Carbonfaser 50K*. Meitingen, 2007.
- [168N] SGL TECHNOLOGIES GMBH: *Composite Materials. Sigrafil/Sigratex Prepregs. Tailor-Made Pre-Impregnated Products for Fiber Composite Structures*. Meitingen, 2008.
- [169N] SGL EPO GMBH: *Produkt Information Epoxid-Prepreg E201/E201S*. Willich, 2010.
- [170N] SALZGITTER FLACHSTAHL GMBH: *DC04. Weiche Stahlsorten zum Kaltumformen mit organischer Beschichtung*. Salzgitter, 2006.
- [171N] SALZGITTER FLACHSTAHL GMBH: *DC01. Weiche Stahlsorten zum Kaltumformen mit organischer Beschichtung*. Salzgitter, 2006.
- [172N] SALZGITTER FLACHSTAHL GMBH: *DD11. Weiche Stähle zum Kaltumformen*. Salzgitter, 2006.

- [173N] SALZGITTER FLACHSTAHL GMBH: *S235JR. Unlegierte Baustähle*. Salzgitter, 2011.
- [174N] THYSSENKRUPP STEEL AG: *Mangan-Bor-Stähle MBW zum Warmformhärten. Für höchste Festigkeiten*. Duisburg, 2008.
- [175N] DOW EUROPE GMBH: *Betamate 1620. Crashstabiler Strukturklebstoff. Technisches Datenblatt*. Horgen, 2006.
- [176N] 3M LABORATORIES EUROPE: *SAF 6068 Konstruktionsklebstoff-Film. Technisches Datenblatt*. Neuss, 2002.
- [177N] NOWOFOL KUNSTSTOFFPRODUKTE GMBH & CO. KG: *Nowoflon ET Fluorpolymerfolie. Technische Informationen*. Siegsdorf, 2009.
- [178N] HENKEL AG & CO. KGAA: *Frekote. Formentrennmittel für Mehrfachentformungen*. Garching, 2009.
- [180N] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.: *DIN EN 2002-001: Luft- und Raumfahrt. Metallische Werkstoffe. Prüfverfahren. Teil 1: Zugversuch bei Raumtemperatur*. Beuth Verlag, Berlin, 2006.
- [181N] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.: *DIN EN ISO 527-1: Kunststoffe. Bestimmung der Zugeigenschaften. Teil 1: Allgemeine Grundsätze*. Beuth Verlag, Berlin, 1996.
- [182N] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.: *DIN EN ISO 527-4: Kunststoffe. Bestimmung der Zugeigenschaften. Teil 4: Prüfbedingungen für isotrop und anisotrop faserverstärkte Kunststoffverbundwerkstoffe*. Beuth Verlag, Berlin, 1997.
- [183N] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.: *DIN EN ISO 527-5: Kunststoffe. Bestimmung der Zugeigenschaften. Teil 5: Prüfbedingungen für unidirektional faserverstärkte Kunststoffverbundwerkstoffe*. Beuth Verlag, Berlin, 1997.
- [184N] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.: *DIN EN 2561: Luft- und Raumfahrt. Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe. Unidirektionale Lamine. Zugprüfung parallel zur Faserrichtung*. Beuth Verlag, Berlin, 1995.
- [188N] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.: *DIN EN 2565: Luft- und Raumfahrt. Herstellen von CFK-Prüfplatten*. Beuth Verlag, Berlin, 1993.
- [189N] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.: *DIN EN ISO 14125: Faserverstärkte Kunststoffe. Bestimmung der Biegeeigenschaften*. Beuth Verlag, Berlin, 1998.
- [190N] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.: *DIN EN 2562: Luft- und Raumfahrt. Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe. Unidirektionale Lamine. Biegeprüfung parallel zur Faserrichtung*. Beuth Verlag, Berlin, 1997.
- [196N] SGL GROUP: *Sigrafil. Unidirektionale Prepregs*. Meitingen, 2008.
- [212N] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.: *DIN EN 1465: Klebstoffe. Bestimmung der Zugscherfestigkeit von Überlappungsklebgungen*. Beuth Verlag, Berlin, 2008.

- [213N] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.: *DIN 65148: Luft- und Raumfahrt. Prüfung von faserverstärkten Kunststoffen. Bestimmung der interlaminaeren Scherfestigkeit im Zugversuch.* Beuth Verlag, Berlin, 1986.
- [215N] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.: *DIN EN 6060: Luft- und Raumfahrt. Faserverstärkte Kunststoffe. Prüfverfahren. Bestimmung der Bindefestigkeit von einschnittig überlappten Klebungen im Zugversuch.* Beuth Verlag, Berlin, 1996.
- [216N] GESIPA BLINDNIETTECHNIK GMBH: *PolyGrip Mehrbereichs-Blindniete Alu/Stahl Standard. Technische Informationen.* Mörfelden-Walldorf, 2012.
- [217N] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.: *DIN 7513: Gewinde-Schneidschrauben. Sechskantschrauben, Schlitzschrauben. Maße, Anforderungen, Prüfung.* Beuth, Berlin, 1995.
- [218N] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.: *DIN EN ISO 10365: Klebstoffe. Bezeichnung der wichtigsten Bruchbilder.* Beuth Verlag, Berlin, 1995.
- [220N] H. B. FULLER AUSTRIA GESMBH: *Isamet R 8268 + Härter 8269. Produktinformation.* Wels, 2009.
- [227N] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.: *DIN EN ISO 14869-2: Strukturklebstoffe. Bestimmung des Scherverhaltens struktureller Klebungen. Teil 2: Scherprüfung für dicke Fügebauteile.* Beuth Verlag, Berlin, 2011.
- [233N] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.: *DIN EN ISO 14869-1: Strukturklebstoffe. Bestimmung des Scherverhaltens struktureller Klebungen. Teil 1: Torsionsprüfverfahren unter Verwendung stumpf verklebter Hohlzylinder.* Beuth Verlag, Berlin, 2011.
- [234N] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.: *DIN EN 13887: Strukturklebstoffe. Leitlinien für die Oberflächenvorbereitung von Metallen und Kunststoffen vor dem Kleben.* Beuth Verlag, Berlin, 2003.
- [236N] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.: *DIN 65673: Luft- und Raumfahrt. Faserverstärkte Kunststoffe. Garn-, Gewebe- und Prepregfehler. Definitionen.* Beuth Verlag, Berlin, 1999.
- [244N] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.: *DIN EN ISO 11357-1: Kunststoffe. Dynamische Differenz-Thermoanalyse (DSC). Teil 1: Allgemeine Grundlagen.* Beuth Verlag, Berlin, 2010.
- [248N] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.: *DIN 65467: Luft- und Raumfahrt. Prüfung von Reaktionsharzsystemen mit und ohne Verstärkung. DSC-Verfahren.* Beuth Verlag, Berlin, 1999.
- [254N] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.: *DIN 29971: Luft- und Raumfahrt. Unidirektionalgelege-Prepreg aus Kohlenstofffasern und Epoxidharz. Technische Lieferbedingungen.* Beuth Verlag, Berlin, 1991.

- [256N] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.: *DIN EN ISO 12114: Faserverstärkte Kunststoffe. Härtbare Formmassen und Prepregs. Bestimmung des Härungsverhaltens.* Beuth Verlag, Berlin, 1997.
- [286N] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.: *DIN EN ISO 13934-1: Textilien. Zugeigenschaften von textilen Flächengebilden. Teil 1: Bestimmung der Höchstzugkraft und Höchstzugkraft-Dehnung mit dem Streifen-Versuch.* Beuth Verlag, Berlin, 1999.
- [287N] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.: *DIN EN ISO 13934-2: Textilien. Zugeigenschaften von textilen Flächengebilden. Teil 2: Bestimmung der Höchstzugkraft mit dem Grab-Zugversuch.* Beuth Verlag, Berlin, 1999.
- [335N] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: *VDI 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte.* Beuth Verlag, Berlin, 1993.
- [337N] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: *VDI 2014: Entwicklung von Bauteilen aus Faser-Kunststoff-Verbund. Grundlagen.* Beuth Verlag, Berlin, 1989.
- [338N] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: *VDI 2014: Entwicklung von Bauteilen aus Faser-Kunststoff-Verbund. Konzeption und Gestaltung.* Beuth Verlag, Berlin, 1993.
- [339N] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: *VDI 2014: Entwicklung von Bauteilen aus Faser-Kunststoff-Verbund. Berechnungen.* Beuth Verlag, Berlin, 1993.

Patente

- [116P] Jellinek, K.; Meier, B. und Zehrfeld, J.: Verbundwerkstoffe, Verfahren zu ihrer Herstellung und Verwendung. Patentnr. EP0242512A2, Europa, 1987.
- [117P] Lang, R.; Tesch, H.; Linden, G. und Schornick, G.: Epoxidharzmischungen für Faserverbundwerkstoffe. Patentnr. EP0356946A2, Europa, 1990.
- [118P] Staengle, M.; Weber, T.; Tesch, H.; Allspach, T.; Altstaedt, V. und Stutz, H.: Epoxidharzmischungen für Faserverbundwerkstoffe. Patentnr. EP0490230A2, Europa, 1992.
- [119P] Gentzkow, W. v.; Huber, J.; Kapitza, H. und Rogler, W.: Epoxidharzmischungen für Prepregs und Verbundwerkstoffe. Patentnr. EP0779906B1, Europa, 1997.
- [135P] Eichler, K.: Verfahren zum Herstellen von Formteilen aus Harzmatten. Patentnr. DE2024745B2, Deutschland, 1978.
- [228P] Richard, H. A. und Hahn, H. G.: Vorrichtung zur Einleitung von überlagerter Normal- und Schubbeanspruchung in Proben. Patentnr. DE3041704C2, Deutschland, 1983.

- [229P] Rohde, A.; Gieske, D. und Hahn, O.: Probe und Probenspannvorrichtung zum Einsatz in Zugprüfmaschinen. Patentnr. DE19510366C1, Deutschland, 1996.
- [230P] Rohde, A.; Gieske, D. und Hahn, O.: Probe und Probenspannvorrichtung zum Einsatz in Zugprüfmaschinen. Patentnr. DE19522247A1, Deutschland, 1997.
- [231P] Hahn, O.; Wißling, M. und Döpmeier, T.: Prüfvorrichtung für Proben unter Stoßbelastung. Patentnr. DE102007010426B4, Deutschland, 2008.
- [282P] Konrad, S.; Howe, T.; Maciej, M. und Wohletz, B.: Vorrichtung sowie Verfahren zum Herstellen eines Faserverbundwerkstoffbauteils für ein Krafffahrzeug. Patentnr. DE102011050102A1, Deutschland, 2012.
- [283P] Konrad, S.; Howe, T.; Maciej, M. und Wohletz, B.: Drapierwerkzeug sowie Verfahren zum Herstellen eines Faserverbundwerkstoffbauteils. Patentnr. DE102011050099A1, Deutschland, 2012.
- [304P] Schwab, P.: Verfahren zur Verringerung der Planparallelitätstoleranz einer Presse, sowie Prepreg zur Durchführung des Verfahrens. Patentnr. DE102006058474A1, Deutschland, 2008.
- [327P] Böke, J.; Maciej, M.; Gojny, F. H.; Howe, C.; Grasser, S.; Wohletz, B. und Heilmeier, G.: Verfahren zum Herstellen von Leichtbauteilen. Patentnr. DE102008039869A1, Deutschland, 2010.
- [328P] Przybylski, S. und Maciej, M.: Vorrichtung und Verfahren zur Herstellung von Formbauteilen durch Formgebung von Prepregs. Patentnr. DE102008056307A1, Deutschland, 2010.
- [329P] Wibbeke, M.; Maciej, M. und Rostek, W.: Krafffahrzeug-Strukturbauteil sowie Verfahren und Vorrichtung zur Herstellung eines Krafffahrzeug-Strukturbauteils. Patentnr. DE102009009112A1, Deutschland, 2010.
- [360P] Howe, T.; Böke, J.; Maciej, M. und Wohletz, B.: Verfahren zur Herstellung eines Hybridbauteils und Krafffahrzeughybridbauteil. Patentnr. DE102010048118A1, Deutschland, 2012.
- [361P] Howe, T.; Böke, J.; Maciej, M. und Wohletz, B.: Verfahren zur Herstellung eines Hybridbauteils und Pressenwerkzeug zur Herstellung eines Krafffahrzeughybridbauteils. Patentnr. DE102010048399A1, Deutschland, 2012.
- [362P] Howe, C.; Böke, J. und Maciej, M.: Krafffahrzeugbauteil und Verfahren zur Herstellung des Krafffahrzeugbauteils. Patentnr. EP2481569A1, Europa, 2012.
- [363P] Howe, C.; Böke, J. und Maciej, M.: Krafffahrzeugbauteil und Verfahren zur Herstellung des Krafffahrzeugbauteils. Patentnr. DE102011009892A1, Deutschland, 2012.
- [365P] Wohletz, B.; Grasser, S.; Heilmeier, G.; Verdenhalven, J.; Böke, J.; Howe, C. und Rostek, W.: Verfahren zur Herstellung eines Karosserie- und Fahrwerksbauteils

sowie Karosserie- und Fahrwerkbauteil. Patentnr. DE102006058601B4, Deutschland, 2011.

Studentische Arbeiten

- [188S] RIEMER, A.: *Entwicklung einer multifunktionalen Presseneinrichtung zur Untersuchung der Umformbarkeit und Herstellung von hybriden Stahl/CFK-Verbundstrukturen*. Nicht veröffentlichte Studienarbeit. Lehrstuhl für Leichtbau im Automobil, Universität Paderborn, Paderborn, 2010.
- [185S] NITSCHKE, A.: *Analyse des mechanischen Verhaltens hybrider Bauteilstrukturen aus Stahl und Faserverbundkunststoffen unter Variation maßgeblicher Einflussfaktoren*. Nicht veröffentlichte Studienarbeit. Lehrstuhl für Leichtbau im Automobil, Universität Paderborn, Paderborn, 2009.
- [186S] STUKE, J.: *Experimentelle Untersuchung der mechanischen Eigenschaften hybrider Stahl-/CFK-Strukturen und Auswertung der Einflüsse der Einzelkomponenten auf das Gesamtbauteilverhalten*. Nicht veröffentlichte Studienarbeit. Lehrstuhl für Leichtbau im Automobil, Universität Paderborn, Paderborn, 2009.
- [187S] HOCHSCHULZ, T.: *Untersuchungen zu den mechanischen Eigenschaften von Metall-FVK-Hybriden unter dem Einfluss unterschiedlicher Randbedingungen*. Nicht veröffentlichte Bachelorarbeit. Lehrstuhl für Leichtbau im Automobil, Universität Paderborn, Paderborn, 2012.
- [195S] SIEPE, P.: *Charakterisierung von mittels Prepregpressen hergestellten hybriden Stahl/CFK-Verbundstrukturen*. Nicht veröffentlichte Studienarbeit. Lehrstuhl für Leichtbau im Automobil, Universität Paderborn, Paderborn, 2011.
- [211S] SARRAZIN, M.: *Experimentelle Untersuchung von verschiedenen Fügekonzepten für die Anwendung in hybriden Stahl/CFK-Strukturen*. Nicht veröffentlichte Diplomarbeit. Lehrstuhl für Leichtbau im Automobil, Universität Paderborn, Paderborn, 2010.
- [232S] FISCHER, M.: *Untersuchung der Verbindungseigenschaften von geklebten Stahl-CFK-Hybridstrukturen unter verschiedenen Belastungswinkeln*. Nicht veröffentlichte Studienarbeit. Lehrstuhl für Leichtbau im Automobil, Universität Paderborn, Paderborn, 2012.
- [237S] RISTHAUS, J.: *Analyse des Härungsverhaltens von Epoxid-Harzen und Epoxid-Harz-Prepregs für Hybridwerkstoffe*. Nicht veröffentlichte Studienarbeit. Lehrstuhl für Leichtbau im Automobil, Universität Paderborn, Paderborn, 2012.
- [257S] ARNTZ, S.: *Analyse geeigneter Prozessparameter zur Großserienherstellung von hybriden Bauteilstrukturen aus Stahl und CFK durch Prepregpressen*. Nicht

- veröffentlichte Diplomarbeit. Lehrstuhl für Leichtbau im Automobil, Universität Paderborn, Paderborn, 2009.
- [258S] KROOß, T.: *Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften von hybriden Stahl/CFK-Verbundstrukturen unter Variation maßgeblicher Prozessparameter*. Nicht veröffentlichte Studienarbeit. Lehrstuhl für Leichtbau im Automobil, Universität Paderborn, Paderborn, 2011.
- [259S] BUKARZ, A.: *Experimentelle Untersuchung hybrider Stahl/FVK-Strukturen am Beispiel einer Hutprofilgeometrie*. Nicht veröffentlichte Studienarbeit. Lehrstuhl für Leichtbau im Automobil, Universität Paderborn, Paderborn, 2010.
- [260S] NITSCHKE, A.: *Entwicklung großserientauglicher Prozessketten für die Verarbeitung von Faserverbundwerkstoffen in der Automobilindustrie*. Nicht veröffentlichte Studienarbeit. Lehrstuhl für Leichtbau im Automobil, Universität Paderborn, Paderborn, 2010.
- [265S] VORDERWÜLBECKE, P.: *Entwicklung und Bau eines Versuchswerkzeugs zur Untersuchung des Umformverhaltens vorimprägnierter Faserverbundkunststoffhalbzeuge*. Nicht veröffentlichte Diplomarbeit. Lehrstuhl für Leichtbau im Automobil, Universität Paderborn, Paderborn, 2010.
- [266S] KROOß, T.: *Experimentelle Untersuchungen zu den Umformeigenschaften von FVK-Prepregs und zu dem Einfluss der Umformung auf Stahl-FVK-Hybridstrukturen*. Nicht veröffentlichte Masterarbeit. Lehrstuhl für Leichtbau im Automobil, Universität Paderborn, Paderborn, 2012.
- [275S] MICHAELIS, J.: *Entwicklung und Bau einer Versuchsvorrichtung zur Untersuchung des Reibverhaltens vorimprägnierter Faserverbundkunststoffhalbzeuge*. Nicht veröffentlichte Diplomarbeit. Lehrstuhl für Leichtbau im Automobil, Universität Paderborn, Paderborn, 2010.
- [277S] KLOPPENBURG, C.: *Entwicklung und Bau eines Auszugversuchs zur Abbildung des Flanscheinzugverhaltens beim Umformen von Faserverbundkunststoff-Prepregs*. Nicht veröffentlichte Studienarbeit. Lehrstuhl für Leichtbau im Automobil, Universität Paderborn, Paderborn, 2010.
- [280S] STIZENBERG, A.: *Auszugversuche an vorimprägnierten Faserverbundkunststoff-Halbzeugen zur Ermittlung von Umformparametern für das Prepregpressen*. Nicht veröffentlichte Studienarbeit. Lehrstuhl für Leichtbau im Automobil, Universität Paderborn, Paderborn, 2011.
- [294S] PETERS, B.: *Entwicklung einer Vorrichtung zur Untersuchung des Umformverhaltens vorimprägnierter Faserverbundkunststoffhalbzeuge*. Nicht veröffentlichte Studienarbeit. Lehrstuhl für Leichtbau im Automobil, Universität Paderborn, Paderborn, 2010.

- [295S] BIALUSCHEWSKI, S.: *Experimentelle Untersuchung des Umformverhaltens von vorimprägnierten Faserverbundkunststoffen*. Nicht veröffentlichte Bachelorarbeit. Lehrstuhl für Leichtbau im Automobil, Universität Paderborn, Paderborn, 2010.
- [303S] WERNEKE, S.: *Konzepte zur endkonturennahen Fertigung von Hybridbauteilen aus Stahl und Faserverbundkunststoffen mittels Prepregpressen*. Nicht veröffentlichte Diplomarbeit. Lehrstuhl für Leichtbau im Automobil, Universität Paderborn, Paderborn, 2011.
- [310S] BRAND, M.: *Segmentierter Niederhalter für ein Halbkugelwerkzeug zur Umformung von vorimprägnierten Faserverbundkunststoff-Halbzeugen*. Nicht veröffentlichte Studienarbeit. Lehrstuhl für Leichtbau im Automobil, Universität Paderborn, Paderborn, 2011.
- [311S] BUKARZ, A.: *Experimentelle Untersuchung von Faserverbundstrukturen unter schlagartiger Belastung*. Nicht veröffentlichte Diplomarbeit. Lehrstuhl für Leichtbau im Automobil, Universität Paderborn, Paderborn, 2010.
- [315S] KRUSCHINSKI, G.: *Entwicklung eines Referenzprofils zur quasistatischen und dynamischen Untersuchung von hybriden Stahl/FVK-Multi-Material-Systemen*. Nicht veröffentlichte Studienarbeit. Lehrstuhl für Leichtbau im Automobil, Universität Paderborn, Paderborn, 2010.
- [319S] NIGGEMANN, S.: *Experimentelle Untersuchung der Eigenschaften von hybriden Stahl/CFK-Verbundstrukturen unter schlagartiger Belastung*. Nicht veröffentlichte Diplomarbeit. Lehrstuhl für Leichtbau im Automobil, Universität Paderborn, Paderborn, 2010.
- [320S] KOHLER, J. P.: *Experimentelle Untersuchung der Eigenschaften von Hybridwerkstoffen unter schlagartiger Belastung*. Nicht veröffentlichte Diplomarbeit. Lehrstuhl für Leichtbau im Automobil, Universität Paderborn, Paderborn, 2011.
- [323S] ZANFT, B.: *Experimentelle Untersuchung von hybriden Balkenstrukturen aus Stahl und Faserverbundkunststoffen unter schlagartiger Belastung*. Nicht veröffentlichte Diplomarbeit. Lehrstuhl für Leichtbau im Automobil, Universität Paderborn, Paderborn, 2011.
- [325S] REUTER, C.: *Numerische Auslegung, Fertigung und Erprobung von Hybridstrukturen aus Stahl und Faserverbundkunststoffen*. Nicht veröffentlichte Masterarbeit. Lehrstuhl für Leichtbau im Automobil, Universität Paderborn, Paderborn, 2012.
- [330S] ECHTERHOFF, D.: *Entwicklung einer Prozesskette zur automatisierten Verarbeitung von vorimprägnierten Faserverbundkunststoffhalbzeugen*. Nicht veröffentlichte Diplomarbeit. Lehrstuhl für Leichtbau im Automobil, Universität Paderborn, Paderborn, 2010.

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name Christian Lauter
Geburtsdaten 08.03.1983 in Bielefeld

Schulbildung

08.1993 – 06.2002 Niklas-Luhmann-Gymnasium Oerlinghausen
Abschluss: Allgemeine Hochschulreife

Wehrersatzdienst

07.2002 – 04.2003 Klinik am Hellweg, Oerlinghausen

Hochschulstudium

10.2003 – 06.2008 Universität Paderborn, Maschinenbau (DII)
Abschluss: Diplom (Dipl.-Ing.)
04.2006 – 04.2009 Universität Paderborn, Wirtschaftsingenieurwesen (Fachrichtung Maschinenbau)
Abschluss: Diplom (Dipl.-Wirt.-Ing.)
04.2006 – 08.2006 Qingdao University of Science and Technology, China
Auslandsaufenthalt
08.2007 – 11.2007 Chalmers University of Technology, Göteborg, Schweden
Auslandsaufenthalt

Berufliche Erfahrung

04.2006 – 08.2006 Chinesisch-Deutsche Technische Fakultät, Institut für Mechatronik, Qingdao University of Science and Technology, China
Wissenschaftlicher Mitarbeiter
01.2008 – 06.2008 Diplomand im Bereich Forschung und Entwicklung
Benteler Automobiltechnik GmbH
Seit 06.2008 Universität Paderborn, Lehrstuhl für Leichtbau im Automobil
Wissenschaftlicher Mitarbeiter
Seit 11.2010 Universität Paderborn, Lehrstuhl für Leichtbau im Automobil
Teamleiter für den Bereich „Faserverbundkunststoffe und Hybridsysteme“

Paderborn, den 07.07.2014

