

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN
Lehrstuhl für Carbon Composites

Verfahren zur Herstellung funktionalisierter Hohlprofilbauteile aus endlosfaserverstärktem thermoplastischem Kunststoff

Clemens Stefanziosa

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart

Prüfer der Dissertation: Prof. Dr.-Ing. Klaus Drechsler
Prof. Dr.-Ing. Ralf Schledjewski

Die Dissertation wurde am 26.06.2017 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 24.10.2017 angenommen.

Technische Universität München
Fakultät für Maschinenwesen
Lehrstuhl für Carbon Composites
Boltzmannstraße 15
D-85748 Garching bei München

Tel.: +49 (0) 89 / 289 – 15092

Fax.: +49 (0) 89 / 289 – 15097

Email: info@lcc.mw.tum.de

Web: www.lcc.mw.tum.de

VORWORT

„Die schöpferische Zerstörung ist ein Prozess der industriellen Mutation, der unaufhörlich die Wirtschaftsstruktur von innen heraus revolutioniert, unaufhörlich die alte Struktur zerstört und unaufhörlich eine neue schafft.“

Joseph Schumpeter

Mein herzlichster Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Drechsler, Leiter des Lehrstuhls für Carbon Composites, für die Kooperationsbereitschaft, die fachliche Unterstützung und die Erstellung des Erstgutachtens.

Besonderen Dank möchte ich Herrn Prof. Dipl.-Ing. Dr.-Ing. Ralf Schledjewski für die Übernahme des Mitberichts aussprechen.

Ich darf mich bei Frau Dr. mont. Ladstätter, Herrn Dr.-Ing. Starke, Herrn Dr.-Ing. Oefele sowie Herrn Dr. Werneck bedanken, die durch die Beantwortung zahlreicher Fragen, Ergänzungen, Ideen, Lösungsvorschlägen und nicht zuletzt durch konstruktive Kritik zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Die vorliegende Arbeit entstand in Rahmen des Doktorandenprogramms der Bayerischen Motoren Werke. Ich danke allen Kolleginnen und Kollegen der Fachabteilungen, vor allem aber bei der Abteilung „Innovationen, Digitalisierung“ für die Expertise, die gute Zusammenarbeit und die fachliche sowie finanzielle Unterstützung.

Insbesondere darf ich mich bei den Studierenden Lisa Wiegerling, Alexander Merk, Christoph Hierl, Thomas Zimmermann, Karl Viehauser, Felix Peisker und Felix Nusser bedanken, die mit Ihren Praktika und Abschlussarbeiten maßgeblich zum Erfolg dieser Arbeit beigetragen haben.

Besonders hervorheben darf ich an dieser Stelle meine Eltern und Geschwister, meine Tante sowie meine Freundin. Sie alle ermöglichten mir diesen akademischen Werdegang und haben durch Ihre liebevolle, familiäre Unterstützung und Ihr immerwährendes Vertrauen maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen – vielen Dank!

KURZFASSUNG

Die Anforderungen der Automobilindustrie bedingen großserientaugliche Herstellungsverfahren, die über kurze Durchlaufzeiten, geringe Bauteilkosten und einen hohen Automatisierungsgrad verfügen. Bei Fahrzeugkarosserien aus endlosfaserverstärktem thermoplastischem Kunststoff zeichnet sich die Hohlprofilbauweise gegenüber der Schalenbauweise unter anderem durch ein höheres Widerstandsmoment der Hohlprofilbauteile aus. Kontinuierliche Herstellungsverfahren ermöglichen ein hohes Produktionsvolumen von Hohlprofilen. Nachteilig ist die eingeschränkte geometrische Komplexität, die wiederum zu starken Restriktionen bei der konstruktiven Umsetzung der Hohlprofilbauweise führt. Zur großserientauglichen Herstellung funktionalisierter Hohlprofilbauteile aus endlosfaserverstärktem thermoplastischem Kunststoff wird daher ein neuartiges Herstellungsverfahren – das sogenannte Funktionalisierte-Hohlprofilbauteile-Verfahren (FuHo-Verfahren) – konzeptioniert. Dieses kombiniert die Vorzüge von kontinuierlichen Herstellungsverfahren (hohes Produktionsvolumen) mit den Vorteilen diskontinuierlicher Verfahren (geometrische Bauteilkomplexität). Das Herstellungsverfahren basiert auf einer Separation von Halbzeugfertigung und Bauteilherstellung. Unter der Verwendung eines Halbzeugs sieht das diskontinuierliche FuHo-Verfahren fünf Prozessschritte zur Herstellung eines funktionalisierten Hohlprofilbauteils vor: Abdichtung, Erwärmung, Umformung, Endbearbeitung und Funktionalisierung. Für die funktions- und prozesstechnische Realisierung des FuHo-Verfahrens wird zunächst die erforderliche Komponenten- sowie Anlagentechnik konzipiert. Anhand unterschiedlicher Geometriemerkmale wird im Rahmen experimenteller Untersuchungen nachgewiesen, dass bei der Herstellung der Hohlprofilbauteile die geometrische Bauteilkomplexität gesteigert werden kann. Mittels zweiteiligem Krafeinleitungselement findet nach der Bauteilherstellung die Funktionalisierung des Hohlprofilbauteils statt. Die Charakteristika des entwickelten Krafeinleitungselements werden nach dem stoffschlüssigen Aufschweißen eruiert. Die mechanischen Eigenschaften berücksichtigend, ist das Krafeinleitungselement insbesondere zur Befestigung von Montagekomponenten geeignet. Für die werkstoff- und fertigungsgerechte Bauteilgestaltung werden auf Basis der experimentellen Untersuchungen konstruktions- und prozessparameterrelevante Fragestellungen bzw. Gestaltungsrichtlinien beleuchtet. Darüber hinaus ermöglicht eine Weiterentwicklung des FuHo-Verfahrens die Herstellung von Hohlprofilbauteilen mit lokaler Wandstärkenvariation. Die Arbeit schließt mit der Konzeptionierung einer seriennahen Produktionszelle zur hochautomatisierten Herstellung funktionalisierter Hohlprofilbauteile.

ABSTRACT

The automotive industry requires processes suitable for large-scale production, which are characterized by short cycle times, low component cost, and a high degree of automation. Contrary to shell construction, car bodies made of fiber-reinforced thermoplastic hollow profile components offer a greater moment of resistance of the hollow profile components, among other benefits. Continuous production processes allow for a high production volume of hollow profiles. A disadvantage, however, is the limited geometrical complexity, which in turn leads to significant restrictions in implementing the construction design of the hollow profile. Therefore, in order to facilitate the large-scale production of functionalized fiber-reinforced thermoplastic hollow profile components, the concept for a new manufacturing process has been developed: the Functionalized Hollow Profile Components Process, or FuHo Process in short. This combines the benefits of continuous procedures (high production volume) with those of discontinuous production processes (geometrical component complexity). The FuHo Process is based on a separation of the manufacturing of the semi-finished product and the component. Using a semi-finished product, the discontinuous FuHo Process comprises five steps required to manufacture a functionalized hollow profile component, namely sealing, heating, forming, final cutting and functionalization. To allow for the functional, procedural and technological realization of the FuHo Process, the appropriate component and facility technology has to be designed first. Focusing on the different geometrical characteristics, the experimental tests demonstrate that the geometrical component complexity can be increased. The hollow profile component is functionalized after the completion of the production process by means of a two-part force application element. The properties of the developed force application element are elicited after the substance-to-substance bonding. Taking the mechanical properties into consideration, the force application element is particularly well suited to the fastening of assembly components. Based on the experimental tests, questions and/or guidelines concerning the design and process parameters are discussed with regard to the material-oriented and production-driven component design. Furthermore, an advanced version of the FuHo Process allows for the production of hollow profile components with local wall thickness variations. The study concludes with the concept design of a near-series production cell for the highly automated production of functionalized hollow profile components.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	ix
Nomenklatur	xii
Abkürzungsverzeichnis	xv
Abbildungsverzeichnis	xix
Tabellenverzeichnis	xxv
1 Einleitung.....	1
1.1 Ausgangssituation.....	1
1.2 Problemstellung	2
1.3 Ziel der Arbeit.....	4
1.4 Gliederung der Arbeit	6
2 Stand der Technik	7
2.1 Hohlprofilbauteile im Automobilbau.....	7
2.2 Herstellungsverfahren für faserverstärkte thermoplastische Hohlkörper	10
2.2.1 Kontinuierliche Herstellungsverfahren.....	10
2.2.2 Diskontinuierliche Herstellungsverfahren	12
2.2.3 Einteilung und Bewertung der Herstellungsverfahren	17
2.3 Funktionalisierung von faserverstärkten thermoplastischen Hohlkörpern	19
3 Konzeptionierung des Herstellungsverfahrens – Das FuHo-Verfahren.....	23
3.1 Anforderungen an das Herstellungsverfahren	24
3.2 Prozessschritte des FuHo-Verfahrens	26
3.2.1 Beschreibung des FuHo-Verfahrens.....	30
3.2.2 Einordnung des FuHo-Verfahrens.....	33
4 Technische Umsetzung der Prozesstechnik.....	37
4.1 Abdichtung.....	37
4.1.1 Grundlagen zur Abdichtung und Handhabung.....	37
4.1.2 Technische Umsetzung der Abdichtung.....	42

4.2	Erwärmung	47
4.2.1	Grundlagen zur Erwärmung	48
4.2.2	Technische Umsetzung der Halbzeugerwärmung	50
4.3	Umformung	52
4.3.1	Grundlagen zur Umformung	53
4.3.2	Technische Umsetzung der Formwerkzeuge	58
4.4	Funktionalisierung	59
4.4.1	Grundlagen zum Krafeinleitungselement	60
4.4.2	Technische Umsetzung des Krafeinleitungselements	60
5	Experimentelle Untersuchungen zur Herstellung von Hohlprofilbauteilen	65
5.1	Definition der Komplexitätsgrade und Hohlprofilbauteile	65
5.1.1	Geometrische Komplexitätsgrade	65
5.1.2	Geometrische Gestaltung der Hohlprofilbauteile	67
5.2	Umformung hohlprofilförmiger Halbzeuge	72
5.2.1	Versuchsmaterial	72
5.2.2	Versuchsaufbau	80
5.2.3	Versuchsplanung	84
5.2.4	Versuchsdurchführung	88
5.2.5	Prüfverfahren	89
5.3	Ergebnisse und Diskussion	91
5.3.1	Einfluss des Komplexitätsgrades auf das Hohlprofilbauteil	91
5.3.2	Einfluss des Halbzeugs auf das Hohlprofilbauteil	104
5.3.3	Einfluss des Lagenaufbaus auf das Hohlprofilbauteil	110
5.4	Bewertung der Halbzeugumformung	111
6	Experimentelle Untersuchungen zur Funktionalisierung von Hohlprofilbauteilen	113
6.1	Ultraschallschweißen von Kugelverbindungselementen	113
6.1.1	Versuchsmaterial	114
6.1.2	Versuchsaufbau	115
6.1.3	Versuchsplanung	116

6.1.4	Versuchsdurchführung.....	118
6.1.5	Prüfverfahren	119
6.2	Ergebnisse und Diskussion	121
6.2.1	Einfluss des Kugelverbindungselements auf die Zugeigenschaften der Halbzeuge.....	122
6.2.2	Einfluss des Halbzeugs auf das Kugelverbindungselement	123
6.2.3	Einfluss der Klimawechselbelastung auf das Kugelverbindungselement.....	131
6.3	Bewertung des Kugelverbindungselements.....	132
7	Ableitung von Regeln zur Bauteil-, Prozess- und Produktionsgestaltung	135
7.1	Konstruktion funktionalisierter Hohlprofilbauteile	135
7.1.1	Konstruktion des Hohlprofilbauteils	135
7.1.2	Lokale Verstärkung des Hohlprofilbauteils.....	138
7.1.3	Funktionalisierung des Hohlprofilbauteils	140
7.2	Formwerkzeug und Blasschlauch	146
7.2.1	Formwerkzeug.....	146
7.2.2	Blasschlauch	148
7.3	Prozess- und Produktionsgestaltung	150
7.3.1	Prozessparameter	150
7.3.2	Produktionszelle	157
8	Zusammenfassung.....	163
9	Ausblick	167
	Literaturverzeichnis	169
A	Anhang.....	185
a	Datenblätter.....	185
b	Versuchs-, Prüf- und Messtechnik.....	187
c	Fehlerbildkatalog	190
d	Ablaufplanung.....	192
B	Veröffentlichungen.....	199
C	Betreute studentische Arbeiten	201

Nomenklatur

Formelzeichen	Einheit	Beschreibung
\dot{q}_H	[kW/m ²]	Wärmestrom
s_K	[mm]	Relativer Schweißweg
A_K	[mm ²]	Fügefläche
b_H	[mm]	Wandstärke des Halbzeugs
D_B	[mm]	Außendurchmesser des Hohlprofilbauteils
D_H	[mm]	Außendurchmesser des Halbzeugs
D_K	[mm]	Durchmesser des Kugelverbindungselements
F_A	[N]	Abziehungskraft Clipelement
F_{\max}	[N]	Maximale Prüfkraft
F_Q	[N]	Querkraft Krafteinleitungselement
F_R	[N]	Radialkraft Dichtstempel
F_v	[N]	Verspannkraft der Dichtstempel
h_K	[mm]	Resthöhe des Kugelverbindungselements nach dem Schweißprozess
h_Q	[mm]	Querschnittshöhe des Halbzeugs
$h_{Q\min}$	[mm]	Minimale Querschnittshöhe des Hohlprofilbauteils
$h_{\ddot{u}}$	[mm]	Übergangshöhe
K	[-]	Komplexitätsgrad
l_F	[%]	Faserlaufängenunterschied
$l_{F\max}$	[mm]	Maximale Faserlänge im Übergangsbereich
$l_{\ddot{u}}$	[mm]	Übergangslänge

Formelzeichen	Einheit	Beschreibung
P_{IR}	[kW]	Maximale IR-Strahlerleistung
p_u	[bar]	Umformdruck
R_a	[mm]	Außenradius des Hohlprofilbauteils
R_i	[mm]	Innenradius des Hohlprofilbauteils
t_A	[s]	Abkühldauer
T_B	[°C]	Oberflächentemperatur zu Beginn des Erwärmungsvorgangs
T_D	[°C]	Temperatur des Druckmediums
T_G	[°C]	Glasübergangstemperatur
T_I	[°C]	Innenflächentemperatur des Halbzeugs
T_{IB}	[°C]	Innenflächentemperatur des Blasschlauchs
t_{IR}	[s]	Erwärmungsdauer
T_O	[°C]	Oberflächentemperatur des Halbzeugs
t_U	[s]	Umformdruckdauer
T_{WZ}	[°C]	Formwerkzeugtemperatur
α	[°]	Faserwinkel
α_H	[mm ² /s]	Temperaturleitfähigkeit des Halbzeugs in Wandstärkenrichtung
β_H	[%]	Relative Höhenänderung
λ_H	[W/(m · K)]	Wärmeleitfähigkeit des Halbzeugs in Wandstärkenrichtung
ρ	[kg/m ³]	Dichte des Halbzeugs
φ	[%]	Faservolumengehalt
Ω_K	[-]	Durchmesser-Höhenverhältnis

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Beschreibung
ASTM	American Society for Testing and Materials
BEA	Blasschlauch-Entnahmeanlage
BIM	Bladder Inflation Moulding
BMW	Bayerische Motoren Werke
BP	Blasschlauch-Puffer
bspw.	beispielsweise
BSW	Blasschlauch-Wanne
CAD	Computer Aided Design
CF	Kohlenstofffaser
CFD	Computational Fluid Dynamics
CFK	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
CLT	Classical Laminate Theory (engl.)
CT	Computertomographie
DDU	Doppel-Diaphragma-Umformen
DFMA	Design for Manufacturing and Assembly
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
DSC	Dynamische Differenzkalorimetrie
DVS	Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e. V.
E-Modul	Elastizitätsmodul
EN	Europäische Norm
engl.	englisch
EPDM	Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk

Abkürzung	Beschreibung
ERG	Energierichtungsgeber
FEM	Finite Elemente Methode
FIT	Fluidinjektionstechnik
FTK	Faser-Thermoplast-Kreisrohre
FuHo	Funktionalisierte Hohlprofilbauteile
FVG	Faservolumengehalt
GF	Glasfaser
HBM	Höttinger Baldwin Messtechnik
HP	Halbzeug-Puffer
HPP	Hohlprofilbauteil-Puffer
i.O.	In Ordnung
IDU	Innendruckumformen
IFI	Internal Pressure Forming by Injection
IHP	Intervall-Heißpressen
IHU	Innenhochdruckumformung
IR	Infrarotstrahlung
IR-A	Kurzwellige Infrarotstrahlung
IR-B	Mittelwellige Infrarotstrahlung
ISO	International Organization for Standardization
KIF	Konus-Innendruck-Formen
KWT	Klimawechseltest
LGU	Luftgestützte Umformen
LHV	Lokale Hohlprofilverstärkung

Abkürzung	Beschreibung
MEQ	Materialeinsatzquote
n.i.O.	Nicht in Ordnung
NVH	Noise Vibration Harshness
OEM	Original Equipment Manufacturer
PA	Polyamid
PAZ	Profil-Armierungs-Ziehen
PKW	Personenkraftwagen
PP	Polypropylen
PPA	Polyphthalamide
QK	Qualitätskontrolle
RTM	Resin-Transfer-Molding
SDF	Schmelzdruckformen
seg.	segmentiert
SMC	Sheet-Molding-Compound
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
TER	Thermoplastische endlosfaserverstärkte Rohre
TGA	Thermogravimetrische Analyse
ToHoP	Topologie-Hohlprofile
T-RTM	Thermoplastic-Resin-Transfer-Molding
TV	Teilverrichtung
UD	unidirektional
vgl.	vergleiche
VMA	Vormontageanlage

Abkürzung	Beschreibung
WZ	Formwerkzeug
z. B.	zum Beispiel

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1-1:	Schematische Darstellung von Profilen mit offenem und geschlossenem Querschnitt.....	3
Abb. 1-2:	Schematischer Vergleich der Herstellungsverfahren für Bauteile aus endlosfaserverstärktem thermoplastischem Kunststoff	4
Abb. 1-3:	Kontinuierliche Halbzeugherstellung und diskontinuierliche Bauteilherstellung	5
Abb. 2-1:	Potentielle Hohlprofilbauteile einer Fahrzeugkarosserie	8
Abb. 2-2:	Einteilung der Herstellungsverfahren anhand dreier Bewertungskriterien	19
Abb. 2-3:	Funktionalisierung von faserverstärkten thermoplastischen Hohlkörpern [71].....	20
Abb. 3-1:	Vom Rohmaterial zum Hohlprofilbauteil – Funktionsstruktur des FuHo-Verfahrens	27
Abb. 3-2:	Schematische Darstellung der Prozessschritte des FuHo-Verfahrens [88].....	29
Abb. 3-3:	Mögliches Verhalten des Halbzeugs bei der Umformung [54]	31
Abb. 3-4:	Einordnung des FuHo-Verfahrens	35
Abb. 4-1:	Delamination der Fasern auf der Bauteilinnenseite nach [70].....	38
Abb. 4-2:	Einfluss einer fluiddichten Barriere auf das Umformverhalten der Halbzeuge.....	39
Abb. 4-3:	Funktionsprinzip des Dichtstempelkonzepts nach [88, 116]	44
Abb. 4-4:	Temperatur der Halbzeuginnenseite während des Erwärmungsvorgangs nach [115]	45
Abb. 4-5:	Funktionsprinzip der Dichtstempel-Verspannvorrichtung nach [115]	47
Abb. 4-6:	Wärmehaushalt beim einseitigen Aufheizen von Halbzeugen mittels Infrarotstrahler nach [123, 125]	49
Abb. 4-7:	Schematische Darstellung des Wärmetransfers in einer Probe nach [124]	50
Abb. 4-8:	Raytracing bei unterschiedlicher Anzahl der IR-Strahler in Umfangsrichtung [127]	51
Abb. 4-9:	Aufbau der IR-Strahlerhalbschalen.....	52

Abb. 4-10: Faserlauf­längen­un­ter­schied und Über­gangs­be­reich an einem beispielhaften Hohlprofilbauteil.....	54
Abb. 4-11: Schematische Darstellung des Umformmechanismus bei einer Umfangs- und Längenänderung nach [129].....	56
Abb. 4-12: Quetschgrat bei der Umformung eines Halbzeugs mittels Abquetschwerkzeug	57
Abb. 4-13: Ursache von Quetschgraden bei der Verwendung eines Abquetschwerkzeugs.....	58
Abb. 4-14: Schematische Darstellung zum Funktionsprinzip des Formwerkzeugs nach [134].....	59
Abb. 4-15: Schematische Darstellung zum Funktionsprinzip des Krafteinleitungselements [139]	61
Abb. 4-16: Schematische Darstellung zum Funktionsprinzip der Ultraschallschweißanlage zur Aufbringung eines Kugelverbindungselements nach [138].....	62
Abb. 4-17: Schematischer Vergleich der Energierichtungsgeber.....	63
Abb. 5-1: Hohlprofilbauteil WZ 10.3	68
Abb. 5-2: Hohlprofilbauteil WZ 13.6 nach [88].....	69
Abb. 5-3: Hohlprofilbauteil WZ 25.5	70
Abb. 5-4: Hohlprofilbauteil WZ 35.8.....	71
Abb. 5-5: Abmaße der hohlprofilförmigen Halbzeuge nach [143]	73
Abb. 5-6: DSC-Analyse der hohlprofilförmigen Halbzeuge PA6-CF $\pm 75^\circ$ und PA6-GF $\pm 45^\circ$	74
Abb. 5-7: Wärmeleitfähigkeit, Temperaturleitfähigkeit und spezifische Wärmekapazität der hohlprofilförmigen Halbzeuge PA6-CF $\pm 75^\circ$, PA6-GF $\pm 75^\circ$ und PA6-GF $\pm 45^\circ$	75
Abb. 5-8: Schlibfbilder der hohlprofilförmigen Halbzeuge.....	76
Abb. 5-9: CT-Bilder der hohlprofilförmigen Halbzeuge (Einzellagen)	77
Abb. 5-10: Zugfestigkeit der hohlprofilförmigen Halbzeuge PA6-CF $\pm 75^\circ$, PA6-GF $\pm 75^\circ$ und PA6-GF $\pm 45^\circ$	78
Abb. 5-11: Aufbau der Versuchsanlage nach [88]	80
Abb. 5-12: Aufbau der Umformeinheit	81
Abb. 5-13: Konstruktive Umsetzung des Tauchkante	82

Abb. 5-14: Schematische Darstellung der Anlagensteuerung und Messwerterfassung nach [70].....	83
Abb. 5-15: Ursache-Wirkungs-Modell für die Umformung hohlprofilförmiger Halbzeuge.....	84
Abb. 5-16: Experimentelle Bestimmung der Erwärmungsdauer	86
Abb. 5-17: Experimentelle Bestimmung der Umformdruckdauer	87
Abb. 5-18: Ablauf der Sichtprüfung anhand des Fehlerbildkatalogs nach [150].....	90
Abb. 5-19: Aufbau der Radien-Prüfvorrichtung	91
Abb. 5-20: Einfluss des Komplexitätsgrades auf die Hohlprofilbauteile bei Sichtprüfung.....	92
Abb. 5-21: Drapierung des Halbzeugs in die Werkzeugkavität zur Ausformung der Bauteilradien	93
Abb. 5-22: Faserondulation an der Oberfläche der Hohlprofilbauteile bei Sichtprüfung.....	93
Abb. 5-23: Radienprüfung des Hohlprofilbauteils WZ 10.3 (PA6-CF $\pm 75^\circ$, Radius 16 mm).....	94
Abb. 5-24: Schliffbilder des Hohlprofilbauteils WZ 10.3 (PA6-CF $\pm 75^\circ$, Radius 16 mm).....	95
Abb. 5-25: Tröpfchenbildung an der Oberfläche der Hohlprofilbauteile bei Sichtprüfung.....	96
Abb. 5-26: Schnittbild- und Radienprüfung des Hohlprofilbauteils WZ 13.6 (PA6-CF $\pm 75^\circ$).....	97
Abb. 5-27: Schnittbild- und Radienprüfung des Hohlprofilbauteils WZ 13.6 (PA6-CF $\pm 75^\circ$).....	97
Abb. 5-28: Delamination im Querschnitt der Hohlprofilbauteile bei Sichtprüfung.....	98
Abb. 5-29: Schliffbild des Hohlprofilbauteils WZ 25.5 (PA6-CF $\pm 75^\circ$, Sicke).....	98
Abb. 5-30: CT-Bilder zum Vergleich der Faserwinkel (PA6-CF $\pm 75^\circ$)	99
Abb. 5-31: Delamination an der Innenfläche der Hohlprofilbauteile bei Sichtprüfung.....	100
Abb. 5-32: Schnittbilder der Hohlprofilbauteile WZ 25.5 (PA6-CF $\pm 75^\circ$)	100
Abb. 5-33: Tröpfchenbildung an der Oberfläche des Hohlprofilbauteils WZ 25.5 (PA6-CF $\pm 75^\circ$).....	100
Abb. 5-34: Radienprüfung des Hohlprofilbauteils WZ 35.8 (PA6-CF $\pm 75^\circ$, Nut)	101
Abb. 5-35: Schnittbild des Hohlprofilbauteils WZ 35.8 (PA6-CF $\pm 75^\circ$)	102

Abb. 5-36: Querfalten an der Innenfläche der Hohlprofilbauteile bei Sichtprüfung	102
Abb. 5-37: Delamination an der Oberfläche der Hohlprofilbauteile bei Sichtprüfung	103
Abb. 5-38: Einfluss des Halbzeugs auf die Hohlprofilbauteile bei Sichtprüfung	104
Abb. 5-39: Radienprüfung des Hohlprofilbauteils WZ 10.3 (PA6-GF $\pm 75^\circ$, Radius 16 mm)	105
Abb. 5-40: Matrixanhäufungen an der Oberfläche der Hohlprofilbauteile bei Sichtprüfung	106
Abb. 5-41: CT-Bilder zum Vergleich der Faserwinkel (PA6-GF $\pm 75^\circ$)	107
Abb. 5-42: Faserverschiebungen an der Oberfläche der Hohlprofilbauteile bei Sichtprüfung	108
Abb. 5-43: Schnittbild des Hohlprofilbauteils WZ 25.5 (PA6-GF $\pm 75^\circ$)	109
Abb. 5-44: Einfluss des Lagenaufbaus auf die Hohlprofilbauteile bei Sichtprüfung	110
Abb. 5-45: Schliffbild des Hohlprofilbauteils WZ 25.5 (PA6-GF $\pm 45^\circ$, Sicke)	111
Abb. 6-1: Versagensverhalten des Krafteinleitungselements	114
Abb. 6-2: Ursache-Wirkungs-Modell beim Ultraschallschweißen von Kugelverbindungselementen [158]	116
Abb. 6-3: Fehlschweißungen bei Variation der Prozessparameter [139]	117
Abb. 6-4: Schematische Darstellung der Kopfzug-Prüfvorrichtung [139]	120
Abb. 6-5: Einfluss des Kugelverbindungselements auf die Zugeigenschaften der plattenförmigen Halbzeuge [139]	122
Abb. 6-6: Einfluss des Kugelverbindungselements auf die Zugfestigkeit des profilförmigen Halbzeugs PA6-GF $\pm 45^\circ$ im Ringzugversuch	123
Abb. 6-7: Einfluss des Halbzeugs auf die Bruchkraft im Kopfzugversuch [139]	123
Abb. 6-8: Einfluss des Halbzeugs auf die Schweißnahtfestigkeit im Kopfzugversuch [139]	125
Abb. 6-9: Exemplarisches Kraft-Weg-Diagramm der Kopfzugversuche [139]	125
Abb. 6-10: Sichtprüfung der Schweißverbindung PP-GF/PP nach dem Kopfzugversuch [139]	126
Abb. 6-11: CT-Bild der Schweißverbindung PP-GF/PP [139]	127
Abb. 6-12: Schliffbild der Schweißverbindung PP-GF/PP	128

Abb. 6-13: Sichtprüfung der Schweißverbindung PA6-CF/PA6 nach dem Kopfzugversuch [139].....	128
Abb. 6-14: Schliffbild der Schweißverbindung PA6-CF/PA6.....	129
Abb. 6-15: CT-Bild der Schweißverbindung PA6-CF/PA6 [139].....	129
Abb. 6-16: CT-Bild der Schweißverbindung PA6-CF/PA6 [139].....	130
Abb. 6-17: Schliffbild der Schweißverbindung PA6-GF $\pm 45^\circ$ /PA6.....	130
Abb. 6-18: Vergleich der Bruchkraft im Kopfzugversuch vor und nach dem Klimawechseltest (KWT) [139].....	131
Abb. 7-1: Radiengestaltung bei konkaver und konvexer Geometrie des Hohlprofilbauteils	136
Abb. 7-2: Materialeinsatzquote in Abhängigkeit des Materialverschnitts	137
Abb. 7-3: Schematische Darstellung des erweiterten FuHo-Verfahrens zur Herstellung von Hohlprofilbauteilen mit lokaler Verstärkung nach [142]	139
Abb. 7-4: Hohlprofilbauteil WZ 09.7.....	140
Abb. 7-5: Hohlprofilbauteil WZ 09.7 mit lokaler Hohlprofilverstärkung	140
Abb. 7-6: Einteilung der Schnappverbindungen zwischen Clip- und Kugelverbindungselement anhand der Kontaktart.....	142
Abb. 7-7: Schnappverbindungen mit linien- und punktförmigem Kontakt	143
Abb. 7-8: Schematische Darstellung des erweiterten FuHo-Verfahrens zur One-Shot-Funktionalisierung von Hohlprofilbauteilen nach [169, 170].....	145
Abb. 7-9: Breite der Werkzeugkavität und Tauchkante eines zweiteiligen Formwerkzeugs	147
Abb. 7-10: Querschnittsgeometrie des Blasschlauchs in Abhängigkeit vom Halbzeug.	149
Abb. 7-11: Schematische Darstellung eines Blasschlauchs mit lokal unterschiedlichen Elastizitätseigenschaften (z. B. E1 bis E3)	149
Abb. 7-12: Radialkraft des Balgs in Abhängigkeit von der Verspannkraft bei einem Halbzeug mit Kreisquerschnitt nach [115].....	151
Abb. 7-13: CFD-Simulation der Infraroterwärmung nach [127]	153
Abb. 7-14: Umformdruck und Formwerkzeugtemperatur bei der Halbzeugumformung in Abhängigkeit vom Komplexitätsgrad.....	154
Abb. 7-15: Schematischer Aufbau eines Modells zur Simulation der Abkühlrate	155

Abb. 7-16: Layout einer automatisierten Produktionszelle für das FuHo-Verfahren.....	160
Abb. 8-1: Potentielle Zielbauteile für das FuHo-Verfahren am Beispiel einer Fahrzeugkarosserie.....	166
Abb. A-1: Datenblatt PA6-CF Tape	185
Abb. A-2: Datenblatt PA6-GF Tape.....	186
Abb. A-3: Ablaufplanung - Ebene 1 - Teil A	192
Abb. A-4: Ablaufplanung - Ebene 1 - Teil B	193
Abb. A-5: Ablaufplanung - Ebene 2 - Teil A	194
Abb. A-6: Ablaufplanung - Ebene 2 - Teil B	195
Abb. A-7: Ablaufplanung - Ebene 2 - Teil C	196
Abb. A-8: Ablaufplanung - Ebene 2 - Teil D.....	197
Abb. A-9: Ablaufplanung - Ebene 2 - Teil E	198

Tabellenverzeichnis

Tab. 3-1: Konzeptionierung des Herstellungsverfahrens in Anlehnung an die VDI 2221	23
Tab. 3-2: Gewichtung der Anforderungen an das Herstellungsverfahren	26
Tab. 3-3: Vergleichende Bewertung der Herstellungsverfahren	34
Tab. 4-1: Bewertung unterschiedlicher Abdichtkonzepte nach [96]	40
Tab. 4-2: Bewertung unterschiedlicher Erwärmungsverfahren nach [120–122].....	48
Tab. 5-1: Übersicht über die Komplexitätsgrade und Hohlprofilbauteile	66
Tab. 5-3: Kennwerte des Hohlprofilbauteils WZ 10.3	68
Tab. 5-4: Kennwerte des Hohlprofilbauteils WZ 13.6	69
Tab. 5-5: Kennwerte des Hohlprofilbauteils WZ 25.5	70
Tab. 5-6: Kennwerte des Hohlprofilbauteils WZ 35.8	71
Tab. 5-7: Kennwerte der hohlprofilförmigen Halbzeuge	73
Tab. 5-8: Kennwerte des Blasschlauchs	79
Tab. 5-9: Anzahl der Versuche in Abhängigkeit von Material und Hohlprofilbauteil	88
Tab. 5-10: Umformparameter und Halbzeuge in Abhängigkeit vom Hohlprofilbauteil	88
Tab. 5-11: Übersicht über die Prüfverfahren zur Untersuchung der Hohlprofilbauteile	89
Tab. 5-12: Radienprüfung des Hohlprofilbauteils WZ 10.3 (PA6-CF $\pm 75^\circ$)	94
Tab. 5-13: Radienprüfung des Hohlprofilbauteils WZ 35.8 (PA6-CF $\pm 75^\circ$, $T_{WZ} = 120^\circ\text{C}$, $p_u = 35\text{ bar}$).....	101
Tab. 5-14: Radienprüfung des Hohlprofilbauteils WZ 10.3 (PA6-GF $\pm 75^\circ$).....	105
Tab. 6-1: Kennwerte der plattenförmigen Halbzeuge [139].....	115
Tab. 6-2: Schweißparameter in Abhängigkeit von Halbzeug und Kugelverbindungselement	118
Tab. 6-3: Übersicht über die Prüfverfahren zur Bewertung der Kugelverbindungselemente.....	119

Tab. A-1: Thermoelemente zum Messen der Temperatur auf der Halbzeuginnenfläche	187
Tab. A-2: DSC-Messzelle zur Halbzeugcharakterisierung.....	187
Tab. A-3: Thermo-Mikrowaage zur Halbzeugcharakterisierung.....	187
Tab. A-4: Laser Flash Apparatur zur Halbzeugcharakterisierung	187
Tab. A-5: Computertomograph zur Halbzeug- und Bauteilcharakterisierung.....	187
Tab. A-6: Materialographie zur Halbzeug- und Bauteilcharakterisierung	187
Tab. A-7: Karl Fischer Titrator zur Halbzeugcharakterisierung.....	188
Tab. A-8: Prüfmaschine für Zug- und Ringzugversuch.....	188
Tab. A-10: Lasertechnik zur Radiusprüfung	188
Tab. A-11: Aktuatoren der Umformanlage.....	188
Tab. A-12: Messtechnik der Umformanlage	189
Tab. A-13: Ultraschalltechnik zum Schweißen des Kugelverbindungselements	189
Tab. A-14: Trockenschrank zur Lagerung der plattenförmigen Halbzeuge	189
Tab. A-15: Prüfmaschine für den Kopfzugversuch	189
Tab. A-16: Umweltsimulationskammer für die Klimawechselbelastung.....	189
Tab. A-17: Fehlerbildkatalog nach [150].....	190

1 Einleitung

Das erste Kapitel dieser Arbeit befasst sich mit der Ausgangssituation zum Faser-verbundleichtbau in der Automobilindustrie, wobei insbesondere der Einsatz von endlosfaserverstärkten thermoplastischen Kunststoffen und deren Eigenschaften näher betrachtet werden (siehe Abschnitt 1.1). Ausgehend davon wird in Abschnitt 1.2 die zentrale Problemstellung erörtert, um in Abschnitt 1.3 auf das Ziel der Untersuchungen überzuleiten. Abschnitt 1.4 beleuchtet abschließend die Gliederung der vorliegenden Arbeit.

1.1 Ausgangssituation

Im Automobilbau haben wachsende Kundenansprüche sowie gesetzliche Vorgaben zur aktiven und passiven Sicherheit in den letzten Jahrzehnten zu einem stetig steigenden Komponentengewicht und in weiterer Folge zu einer Erhöhung des Gesamtfahrzeuggewichts geführt. Gleichzeitig resultiert aus gesetzlichen Reglementierungen eine kontinuierliche Verschärfung der flottenübergreifenden Emissionsgrenzwerte. Die Verringerung der durch die Antriebseinheit hervorgerufenen Schadstoffemissionen, beispielsweise durch Hybridtechnologien, sowie eine Reduktion des Gesamtfahrzeuggewichts sind zwei wesentliche Stellhebel um die gesetzlichen Emissionsziele zu erreichen. Eine mittels Leichtbaumaßnahmen gewichtsoptimierte Fahrzeugkarosserie kann dabei einen wichtigen Beitrag zur Lösung dieses Zielkonfliktes leisten, zumal 38 bis 40 % des gesamten Fahrzeuggewichts der Karosserie zugeordnet werden [1]. Die Bayerischen Motoren Werke (BMW) bauen aus diesem Grund im Karosseriebau als erster Automobilhersteller auf die großserientechnische Produktion von Strukturbauteilen aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff (CFK), der sich durch ein geringes spezifisches Gewicht bei gleichzeitig hoher Steifigkeit und Festigkeit auszeichnet. Daraus resultieren neue Anforderungen und Herausforderungen an die Konstruktion, Produktion, Wirtschaftlichkeit, Nachhaltigkeit sowie an die Verbindungstechnik, die durch die Wahl von Faser und Matrix des Faserverbundwerkstoffes wesentlich beeinflusst werden. Neben den bis dato überwiegend zum Einsatz kommenden duroplastischen Matrixsystemen nehmen Anwendungen mit thermoplastischem Matrixsystem sowohl mit Glas- als auch mit Kohlenstofffaserverstärkung stetig zu [2]. Dies unterstreicht der seit 2004 steigende Anteil von Bauteilen aus endlosfaserverstärktem thermoplastischem Kunststoff im Automobilbereich [3, 4].

Dem liegen werkstoffliche und prozesstechnische Vorzüge des endlosfaserverstärkten thermoplastischen Kunststoffes gegenüber Faserverbundwerkstoffen mit duroplastischem Matrixsystem zugrunde:

Werkstoffliche Vorteile:

- Stauch- und Knickverhalten [5]
- Rezyklierbarkeit [6, 7]
- Schadenstoleranz [5]
- Lagerstabilität [2, 8]
- Dämpfungseigenschaften [5]
- Bruchdehnung [5, 9]
- Schlagzähigkeit [2, 5, 9]
- Medienbeständigkeit [5]
- Delaminationswiderstand [5, 10]

Prozesstechnische Vorteile:

- Großserientaugliche Verarbeitungsverfahren [11, 12]
- Kurze Durchlaufzeiten [2, 5, 13, 14]
- Mehrfache Umformbarkeit [8]
- Schweißbarkeit [15]
- Reparaturfähigkeit [16, 17]

Detaillierte Informationen zu den Vorteilen sind den jeweiligen Quellenangaben zu entnehmen. Insbesondere die prozesstechnischen Vorteile von endlosfaserverstärkten thermoplastischen Kunststoffen und die damit einhergehende Kostenreduktion bei der Bauteilherstellung gelten als Befähiger für den Einsatz dieser Werkstoffklasse in der automobilen Großserie.

Nachteilig an Thermoplasten ist deren, verglichen mit Duroplasten, geringere Festigkeit, Steifigkeit und Härte [18]. Aufgrund der fehlenden räumlichen Vernetzung weisen Thermoplaste zudem eine höhere Kriechneigung auf [19]. Die hohe Viskosität von thermoplastischen Matrixpolymeren erschwert bei der Herstellung des endlosfaserverstärkten thermoplastischen Kunststoffes die Benetzung der Fasern [20].

1.2 Problemstellung

Beim Aufbau von Fahrzeugkarosserien kann grundsätzlich zwischen der Rahmenstruktur- und Schalenbauweise unterschieden werden [21]. Bei der Herstellung von schalenförmigen Bauteilen aus endlosfaserverstärktem thermoplastischem Kunststoff erlauben bereits etablierte Herstellungsverfahren, wie beispielsweise das Thermoformen von vorimprägnierten Halbzeugen (sogenannter Organobleche oder Tapes), Durchlaufzeiten von circa 60 Sekunden [12, 13].

Beim Thermoformverfahren wird das Halbzeug zunächst auf die Umformtemperatur erwärmt und anschließend in einem doppelseitigen Stempel- bzw. Formwerkzeug umgeformt sowie abgekühlt [20]. Weiters können Schalenbauteile mittels Tapelegeverfahren hergestellt werden. Beim Tapelegeverfahren werden vorimprägnierte Faserbänder (engl. „Tapes“) lokal erwärmt und mittels Tapelegekopf auf einem einseitigen Formwerkzeug abgelegt (siehe Abb. 1-2) [22]. Das Umformen von flächigen Halbzeugen zu komplexen Geometrien kann zudem zur Funktionalisierung des Schalenbauteils mit einem Spritzgießprozess überlagert werden.

Im Fokus der nachfolgenden Untersuchungen steht die vorrangig aus Profilen bestehende Rahmenstrukturbauweise. Profile aus endlosfaserverstärktem thermoplastischem Kunststoff gliedern sich gemäß Abb. 1-1 zum einen in offene, meist verrippte Profile und zum anderen in Profile mit geschlossenem Querschnitt [23].

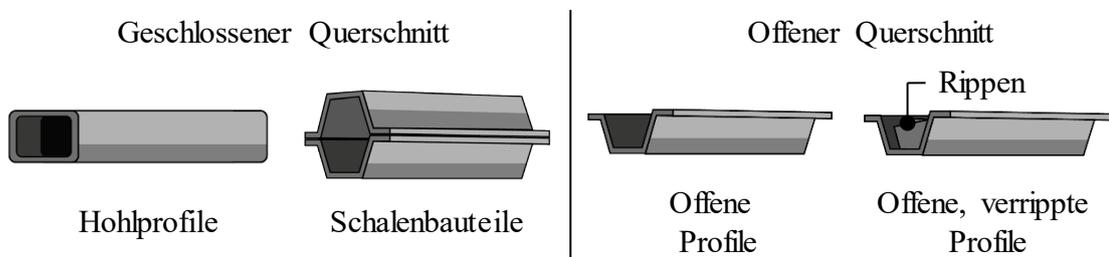


Abb. 1-1: Schematische Darstellung von Profilen mit offenem und geschlossenem Querschnitt

Bei verrippten Profilen (siehe Abb. 1-1) steigen mit zunehmender Rippenanzahl nicht nur die Torsions- und Biegesteifigkeit des Profils, sondern aufgrund der thermoplastischen Spritzgießmasse auch dessen Gewicht. Gegenüber Schalenbauteilen oder den offenen, verrippten Profilen ermöglicht die Hohlprofilbauweise eine erhöhte Torsions- und Biegesteifigkeit der Faserverbundbauteile, hervorgerufen durch das hohe Widerstandsmoment des geschlossenen Profilquerschnitts. Verglichen mit Schalenbauteilen reduziert die endkonturnahe Profil- bzw. Bauteilfertigung den Materialverschchnitt deutlich. Zudem ermöglichen Pultrusionsverfahren, durch ein kontinuierliche Herstellung des profilförmigen Halbzeugs, hohe Produktionsvolumina und eignen sich demnach für hohe Stückzahlen (siehe Abb. 1-2 und Abschnitt 2.2.1.1) [24]. Nachteilig gegenüber Tapelege- oder Thermoformverfahren ist hingegen die geringe geometrische Komplexität der profilförmigen Halbzeuge, die wiederum zu starken Restriktionen bei der konstruktiven Bauteilgestaltung führt.

Für die Erfüllung der mannigfaltigen Anforderungen an heutige Fahrzeugkarosserien (z.B. Bauraum, Gewicht, Torsionssteifigkeit, Design etc.) ist eine gewisse geometrische Komplexität der Hohlprofilbauteile jedoch zwingend erforderlich.

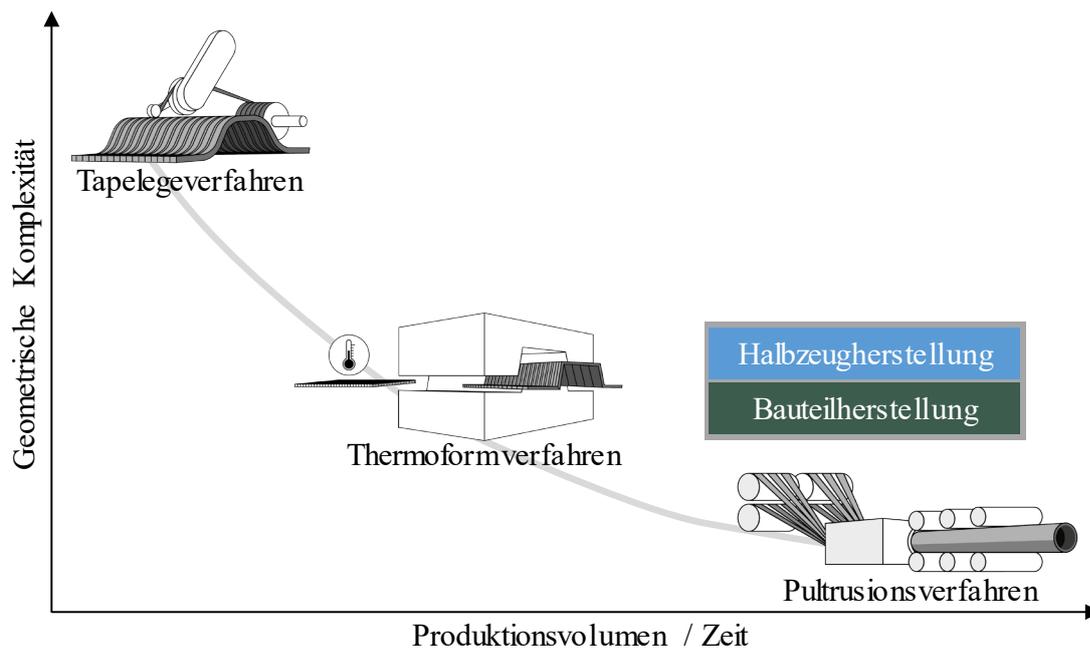


Abb. 1-2: Schematischer Vergleich der Herstellungsverfahren für Bauteile aus endlosfaserverstärktem thermoplastischem Kunststoff

Die fertigungsbedingten Einschränkungen pultrudierter thermoplastischer Faserverbundprofile mit geschlossenem Querschnitt schließen eine Eignung für komplex geformte Bauteile vielfach aus.

1.3 Ziel der Arbeit

Ziel der Arbeit ist die grundlegende Konzeptionierung, Umsetzung und experimentelle Untersuchung eines neuartigen Herstellungsverfahrens, das die Vorzüge eines kontinuierlichen Herstellungsverfahrens (hohes Produktionsvolumen) mit den Vorteilen diskontinuierlicher Herstellungsverfahren (geometrische Bauteilkomplexität, z.B. Querschnittsänderung, Krümmung etc.) kombiniert. Die Grundlage des Herstellungsverfahrens zur Erhöhung der geometrischen Bauteilkomplexität und -funktionalität bildet die Trennung des kontinuierlichen Pultrusionsverfahrens zur Halbzeugherstellung von der diskontinuierlichen Bauteilherstellung (siehe Abb. 1-2 und Abb. 1-3).

Die kontinuierliche Herstellung (Pultrusion) eines Halbzeugs bzw. Hohlprofils aus endlosfaserverstärktem thermoplastischem Kunststoff mit geschlossenem Querschnitt wird nicht betrachtet. Für experimentelle Untersuchungen wird auf am Markt erhältliche Hohlprofile respektive Halbzeuge zurückgegriffen. Im Fokus dieser Arbeit steht die Konzeptionierung eines Verfahrens zur Bauteilherstellung (siehe Prozessschritt 2 in Abb. 1-3). Die geometrische Komplexität der Halbzeuge wird im Rahmen des Herstellungsverfahrens durch eine Umformung gesteigert.

Die Konzeptionierung einer Anlagentechnik zur Umformung und die experimentelle Untersuchung des Umformprozesses hinsichtlich der Umformgrenzen stellen wesentliche Entwicklungsziele dar. Sie sind die Basis für die Erarbeitung eines grundlegenden Prozessverständnisses. Daraus leiten sich die dem Herstellungsverfahren zugrunde liegenden Gestaltungsregeln ab, die bei der Konstruktion von Hohlprofilbauteilen zu berücksichtigen sind. Jedes Herstellungsverfahren stellt in gewissem Umfang individuelle prozesstechnische Ansprüche an die Bauteilkonstruktion. Für die Erarbeitung einer Prozessstrategie werden die grundlegenden Umformmechanismen sowie Verfahrensgrenzen ermittelt und die relevanten Prozessparameter definiert.

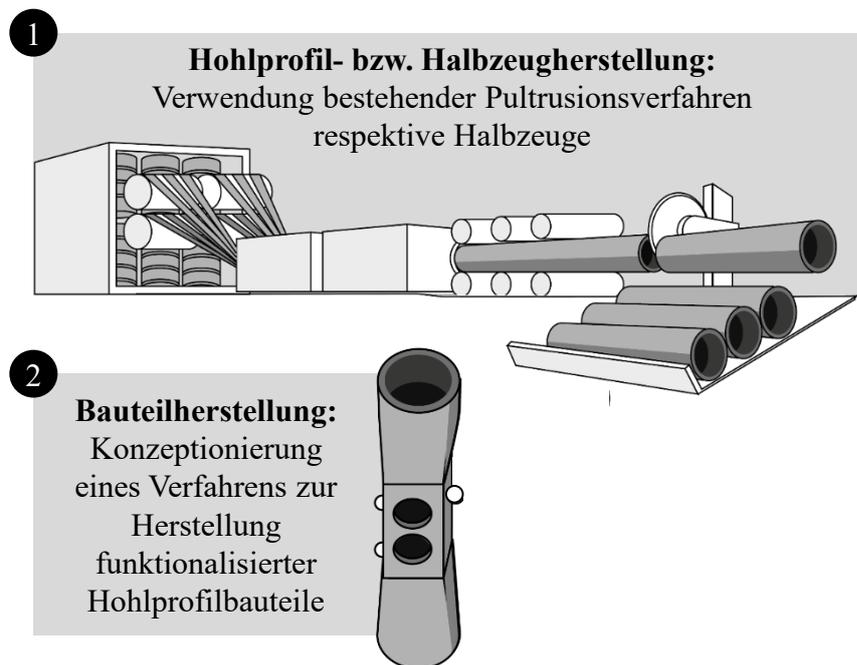


Abb. 1-3: Kontinuierliche Halbzeugherstellung und diskontinuierliche Bauteilherstellung
Die Halbzeugherstellung wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht betrachtet.

Beim zu konzeptionierenden Herstellungsverfahren werden die werkstofflichen und prozesstechnischen Vorteile von endlosfaserverstärkten thermoplastischen Kunststoffen nicht nur bei der Halbzeugumformung, sondern auch bei der Funktionalisierung des Hohlprofilbauteils berücksichtigt. Das Ziel ist, ein neuartiges Krafteinleitungselement zur Funktionserweiterung des Hohlprofilbauteils zu entwickeln. Die mechanischen und prozesstechnischen Charakteristika des konzeptionierten Krafteinleitungselements werden experimentell ermittelt. Daraus leiten sich – analog zur Halbzeugumformung – werkstoff- und fertigungsgerechte Gestaltungsrichtlinien und Prozessfenster ab.

Das durch diese Arbeit erarbeitete Verständnis für die Prozess- und Bauteilgestaltung ist ein wichtiger Grundstein für die fehlerfreie Serienfertigung von funktionalisierten Hohlprofilbauteilen aus endlosfaserverstärktem thermoplastischem Kunststoff.

1.4 Gliederung der Arbeit

Die vorliegende Arbeit gliedert sich im Wesentlichen in neun Kapitel. Das erste Kapitel ordnet die Aufgabenstellung ein und erläutert die Zielstellung sowie den Aufbau der Arbeit.

Daran anknüpfend befasst sich der Stand der Technik zunächst mit der Anwendung von Hohlprofilbauteilen im Automobilbau. Anschließend werden die unterschiedlichen Herstellungsverfahren für thermoplastische, faserverstärkte Hohlkörperstrukturen betrachtet. Durch eine Bewertung der Herstellungsverfahren hinsichtlich unterschiedlicher Kriterien werden deren Vor- und Nachteile identifiziert. Diese bilden die Basis für das zu entwickelnde Herstellungsverfahren. Zudem werden technische Lösungen zur Funktionalisierung von Hohlkörperstrukturen beleuchtet.

Aus dem Ansatz der Verfahrenstrennung zwischen kontinuierlicher Halbzeugherstellung und diskontinuierlicher Bauteilherstellung leitet sich der spezifische Handlungsbedarf ab. Kapitel 3 definiert zunächst die Anforderungen an das Herstellungsverfahren. Darauf aufbauend wird das Herstellungsverfahren vorgestellt und mit seinen Prozessschritten detaillierter beschrieben.

In Kapitel 4 wird die Prozesstechnik zur technischen Umsetzung des Herstellungsverfahrens vorgestellt. Das Kapitel orientiert sich dabei an den im vorherigen Abschnitt definierten Prozessschritten. Neben der funktions- und prozesstechnischen Umsetzung der jeweiligen Anlagenkomponente werden auch die zur Realisierung erforderlichen Grundlagen aufgezeigt.

Die Kapitel 5 und 6 umfassen die experimentellen Untersuchungen zur Halbzeugumformung sowie Funktionalisierung. In beiden Kapiteln werden zunächst die Rahmenbedingungen der experimentellen Untersuchungen vorgestellt und anschließend die Ergebnisse der jeweiligen Untersuchungen aufgezeigt und diskutiert.

Auf Basis der experimentellen Untersuchungen definiert Kapitel 7 grundsätzliche Rahmenbedingungen, die es bei einer fertigungsgerechten Werkzeug-, Prozess- und Bauteilgestaltung zu beachten gilt. Darüber hinaus werden in diesem Kapitel weitere Möglichkeiten zur lokalen Bauteilverstärkung und -funktionalisierung aufgezeigt. Der theoretische Aufbau einer Produktionszelle zur Serienfertigung von Hohlprofilbauteilen nach dem Herstellungsverfahren fasst die Ergebnisse zusammen.

Die Kapitel 8 und 9 schließen die Arbeit mit einer Zusammenfassung der Ergebnisse und einem Ausblick auf mögliche weitere Forschungsaktivitäten ab.

2 Stand der Technik

Der Stand der Technik wird mit der Analyse seriell eingesetzter Hohlprofilbauteile im Automobilbau eingeleitet (siehe Abschnitt 2.1). Daran anknüpfend folgt in Abschnitt 2.2 eine grundlegende Betrachtung sowie Einteilung und Bewertung der Herstellungsverfahren für faserverstärkte thermoplastische Hohlkörper. Zusätzlich sei auf die umfangreiche Literatur zu Faser, Matrix und Faserverbundwerkstoffen verwiesen [14, 19, 24–26]. Unter dem Begriff „Faser“ sind in dieser Arbeit Faserbündel (engl. „Rovings“) aus Glas- und/oder Kohlenstofffasern zusammengefasst. Zum Abschluss des Abschnitts wird auf die Funktionalisierungsmöglichkeiten von Hohlkörpern näher eingegangen (siehe Abschnitt 2.3).

2.1 Hohlprofilbauteile im Automobilbau

Bei der nun folgenden Betrachtung von Hohlprofilen im Automobilbau liegt der Schwerpunkt auf der Analyse von Fahrzeugkarosserien. Es werden sowohl Metall- als auch Faserverbundprofile betrachtet. Hierbei wird zwischen Struktur- und Anbauteilen unterschieden. Hohlprofile eignen sich aufgrund ihres geschlossenen Querschnitts und dem damit einhergehenden hohen Widerstandsmoments insbesondere für Torsions- und Biegebeanspruchungen. Sie finden neben dem Karosseriebereich (siehe Abb. 2-1) auch bei Fahrwerks- und Antriebskomponenten Anwendung (z.B. CFK-Gelenkwelle [27]). Auf Basis der bereits zum Einsatz gekommenen Hohlprofilbauteile aus Metall- oder Faserverbundwerkstoffen illustriert Abb. 2-1 potentielle Struktur- und Anbauteile für eine Hohlprofilbauweise am Beispiel einer Fahrzeugkarosserie.

Als *Strukturbauteile* kommen Hohlprofilbauteile bei Rahmenstrukturbauweisen zum Einsatz, bei denen die Fahrzeugkarosserie als lastpfadgerechte Fachwerkstruktur aus Biege-, Zug/Druck- sowie Torsionsprofilen aufgebaut ist [21]. Die Audi AG hat die als „Audi Space Frame“ bezeichnete Rahmenstrukturbauweise bestehend aus Aluminiumprofilen im Jahr 1994 erstmalig mit dem Audi A8 eingeführt und im Audi A2 sowie den A8-Nachfolgern weitergeführt [28]. Insbesondere die Bodengruppe sowie der Dachrahmen sind aus Strangpressprofilen mit geschlossenem Querschnitt aufgebaut. Aktuell sind Vorderwagen, Dachrahmen sowie Hinterwagen des Audi R8 Coupé als Aluminium-Fachwerk ausgeführt [29]. Profilmäßige Strukturbauteile aus Faserverbundwerkstoffen mit duroplastischer Matrix finden sich bei BMW-Fahrzeugen wieder. Der BMW 7er weist neben den flächigen Faserverbundbauteilen auch einen geflochtenen und im RTM-Verfahren infiltrierten Dachrahmen sowie Dachspriegel auf (siehe Abb. 2-1) [30].

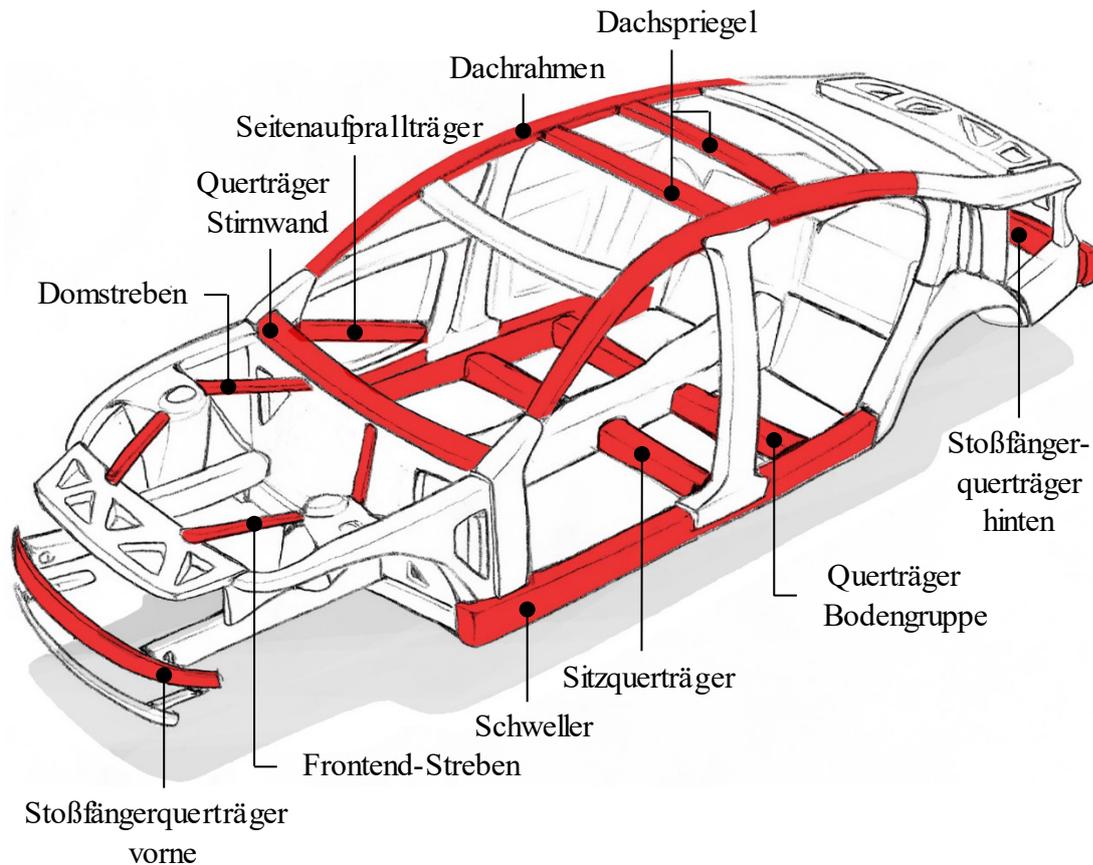


Abb. 2-1: Potentielle Hohlprofilbauteile einer Fahrzeugkarosserie

Rot eingefärbte Komponenten eignen sich aufgrund der bauteilspezifischen und globalen Anforderungen an die Fahrzeugkarosserie für eine Hohlprofilbauweise.

Darüber hinaus sind auch bei den Fahrzeugen BMW i3 und BMW i8 Teile des Dachrahmens und Schwellers als Flechtprofil ausgeführt [31, 32]. Die Faserverbundstrukturen des Dachaufbaus sorgen für eine hohe Steifigkeit der Fahrzeugkarosserie gegenüber den Torsionsbelastungen im Fahrbetrieb. Bei Schalen- und Rahmenstrukturbauweise werden zur Versteifung der Fahrzeugkarosserie profilförmige Streben im Bereich der Bodengruppe eingesetzt. Die Bodengruppe ist ein zentrales Bauteil der Gesamtfahrzeugkarosserie und wird zur Kostenreduktion vielfach als gemeinsames Bauteil derivate- und/oder markenübergreifend eingesetzt. Dem Baukastenprinzip folgend kann dadurch ein Cabrio, Coupé oder Kombi mit der gleichen Bodengruppe, jedoch mit unterschiedlichen Streben ausgestattet werden. Der Bentley Azure wies zur Versteifung der Cabrio-Karosserie bereits Streben aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff auf, um die Gewichtszunahme der Rohkarosserie möglichst gering zu halten [33]. Neben globalen Steifigkeitsanpassungen einer Fahrzeugkarosserie ist oftmals auch eine Veränderung der lokalen, dynamischen Steifigkeiten erforderlich. Dies betrifft vor allem den Vorderwagen mit seinen Karosseriekoppelstellen zu Antriebsaggregat und Fahrwerk.

Sogenannte Domstreben verbessern die Crash-, Geräusch- und Vibrationseigenschaften (NVH) der Fahrzeugkarosserie und leiten die Kräfte des Fahrwerks in den Stirnwandquerträger ein [34]. Im BMW M4 wird zur Reduktion des Fahrzeuggewichts und zur Steigerung der Fahrdynamik erstmalig eine Dom-Frontendstrebe aus Kohlenstofffasergeflecht und duroplastischem Matrixsystem eingesetzt [27].

Im Bereich der *Anbauteile* eignen sich aufgrund der Gesetzes- und Verbraucherschutzanforderungen insbesondere Stoßfängerquerträger und Seitenaufprallträger für eine Hohlprofilbauweise. Diese für die Fahrzeugsicherheit relevanten Bauteile sind bei aktuellen Fahrzeugen überwiegend aus metallischen Profilen (Stahl oder Aluminium) konzipiert. Stoßfängerquerträger aus Kohlenstofffasergeflecht und duroplastischem Matrixsystem kamen beim BMW M6 zum Einsatz [35]. Stoßfängerquerträger aus endlosfaserverstärktem thermoplastischem Kunststoff wurden erstmalig im BMW M3 verwendet [36]. Das Crashbauteil besteht dabei aus zwei, zu einem Hohlprofilbauteil gefügten flächigen Halbzeugen (siehe Abschnitt 2.2.2.4). Als Pultrusionsbauteil aus endlosfaserverstärktem thermoplastischem Kunststoff (vergleiche Abschnitt 2.2.1.1), jedoch mit offenem Querschnitt, ist ein Stoßfängerquerträgerkonzept der Firma Hyundai ausgeführt [37]. Die zu den Anbauteilen einer Fahrzeugkarosserie zählenden Türen sind zur Erfüllung der seitlichen Craschanforderungen mit sogenannten Seitenaufprallträgern versehen. Die Verwendung eines formadaptiven Seitenaufprallträgers mit U-förmiger Hohlstruktur aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff wird von [38] untersucht.

Bei einem frontalen Zusammenstoß werden die entstehenden Kollisionskräfte durch die Stoßfängerquerträger in die Fahrzeugkarosserie eingeleitet [31]. Über die Motorträger sowie den Stirnwandquerträger verteilen sich die Kräfte möglichst gleichmäßig auf die beiden Schweller und Dachrahmen des Fahrzeugs. Zudem trägt der Stirnwandquerträger maßgeblich zur Biegesteifigkeit und zur Crashsicherheit der Fahrzeugkarosserie beim Seitencrash bei [39]. Schweller, Dachspiegel, Seitenaufprallträger, Sitzquerträger sowie die B-Säule sind bei einem Seiten- oder Pfahlcrash ebenfalls zentrale Bestandteile des Crashlastpfades. Sie schützen die Insassen und – falls es sich um ein Elektro- oder Hybridfahrzeug handelt – den Hochvoltspeicher des Fahrzeugs und verhindern hohe Intrusionen in den Fahrgastraum. Inwiefern ein Serieneinsatz der in Abb. 2-1 dargestellten Hohlprofilbauteile möglich ist, hängt von mannigfaltigen Faktoren ab (bspw. dem Gesamtfahrzeugkonzept, dem Herstellungsverfahren, der Integrationsfähigkeit in Produktionsstrukturen, den fahrzeugpezifischen Bauteilanforderungen usw.), die individuell für jedes potentielle Zielbauteil zu bewerten sind.

Alle Hohlprofilbauteile der in Abb. 2-1 illustrierten Fahrzeugkarosserie und der bereits in Serie befindlichen Struktur- und Anbauteile aus Stahl, Aluminium oder CFK weisen eine globale oder lokale Verformung auf. Dies unterstreicht das im Zuge des Herstellungsverfahrens definierte Ziel (siehe Abschnitt 1.3), die Komplexität von Halbzeugen durch eine Umformung zu steigern.

2.2 Herstellungsverfahren für faserverstärkte thermoplastische Hohlkörper

Für die im Rahmen dieses Abschnitts dargestellten Herstellungsverfahren existiert eine Vielzahl von Unterverfahren und Verfahrensvarianten. Grundsätzlich kann zunächst zwischen kontinuierlichen (siehe Abschnitt 2.2.1) und diskontinuierlichen Herstellungsverfahren (vergleiche Abschnitt 2.2.2) unterschieden werden. Nach einer Beschreibung der wichtigsten Herstellungsverfahren erfolgt abschließend eine Einteilung hinsichtlich weiterer Kriterien sowie eine vergleichende Bewertung der Herstellungsverfahren (siehe Abschnitt 2.2.3).

2.2.1 Kontinuierliche Herstellungsverfahren

Charakteristisch für diese Kategorie der Herstellungsverfahren ist ein kontinuierlicher Materialfluss. Die Materialzuführung, der Materialtransport sowie der Materialausstoß erfolgen dabei simultan. [40]

2.2.1.1 Pultrusionsverfahren

Pultrusionsverfahren dienen zur kontinuierlichen Herstellung endlosfaserverstärkter thermoplastischer Hohlkörper bzw. Profile [25]. Die Profile werden mit offenem oder geschlossenem Querschnitt ausgeführt und können eine komplexe Querschnittsgeometrie aufweisen [41].

Pultrusionsverfahren mit thermoplastischen Matrixwerkstoffen gliedern sich in reaktive und nicht reaktive Thermoplast-Pultrusionsverfahren. Nicht reaktive Pultrusionsverfahren basieren auf der Verwendung von Polymerpulver, Polymerschmelzen, Tapes oder Hybridgarne. Hybridgarne sind Faserbündel, die sich bspw. aus Glas- oder Kohlenstofffasern und thermoplastischen Fasern zusammensetzen. Die Tapes oder Hybridgarne werden zuerst in einer Vorheizzone erwärmt. Bei der Verwendung von Tapes erfolgt anschließend im Formwerkzeug eine Konsolidierung, bei Hybridgarne eine vollständige Imprägnierung. [26, 42]

Bei reaktiven Pultrusionsverfahren wiederum werden den Fasern Matrix-Monomere zugeführt, die im Formwerkzeug polymerisieren [42]. Neu entwickelte Verfahren im Bereich der reaktiven Pultrusion ermöglichen auch die Herstellung in Längsrichtung gekrümmter Profile mit offenem Querschnitt [37]. Von der Profillängsrichtung abweichende Faserorientierungen können durch Sonderverfahren wie Pullwinding, Pullbraiding oder Pullforming realisiert werden [26].

Das *Pullwinding* resultiert aus einer Überlagerung des Wickel- und Pultrusionsprozesses [26]. Die Spezifika des Wickelverfahrens werden in Abschnitt 2.2.2.1 erörtert.

Unter dem Begriff *Pullbraiding* oder *Flechtpultrusion* wird eine Kombination aus Flechtprozess und Pultrusionsprozess verstanden [26, 43].

Pullforming ist ein langsames, nur noch quasi-kontinuierliches Pultrusionsverfahren zur Herstellung von Profilen mit veränderlichem Querschnitt. Dazu werden mehrere, geteilte Formwerkzeuge eingesetzt. Befindet sich ein Werkzeug zur Formgebung des Profils im geschlossenen Zustand, wird der Pultrusionsprozess bis zur Formstabilität des Abschnitts angehalten. Durch komplexe, umlaufende Formwerkzeuge lassen sich auch gekrümmte Profile realisieren. [26, 44]

2.2.1.2 Profil-Armierungs-Ziehen

Das *Profil-Armierungs-Ziehen* (PAZ) ist ein kontinuierliches Pultrusionsverfahren zur Herstellung von Hohlkörpern mit unveränderlicher Querschnittsgeometrie über die Bauteillänge. Beim Verfahren in seiner ursprünglichen Form wird zunächst ein extrudiertes Thermoplastrohr mit unimprägnierten Verstärkungsfasern bewickelt. Anschließend wird das bewickelte Thermoplastrohr in einer Heizzone auf die Schmelztemperatur des thermoplastischen Kunststoffes erwärmt und über einen einseitig gelagerten Aufweitdorn gezogen. Dies führt zu einer Tränkung der Fasern durch den aufgeschmolzenen Thermoplast. Der anschließende Stabilisierungsbereich kühlt das endlosfaserverstärkte thermoplastische Profil ab und kalibriert Innen- und Außendurchmesser. [45, 46]

Die Tränkzeit zur vollständigen Benetzung der Fasern stellt den limitierenden Faktor für die Verfahrensgeschwindigkeit dar. Aufgrund der hohen Viskosität des thermoplastischen Kunststoffes ist mit zunehmenden Abzugsgeschwindigkeiten keine vollständige Faserimprägnierung gewährleistet. In einer Verfahrensweiterentwicklung werden daher anstatt trockener Verstärkungsfasern und extrudierter Thermoplastrohre bereits vorimprägnierte Faserbänder als Halbzeug verwendet. Diese Tapes werden zuerst in Profillängsrichtung auf ein Trägerrohr gezogen und gewährleisten eine sichere Einleitung der hohen Abzugskräfte in das Pultrusionsprofil. Darauffolgend können in einer integrierten Wickelstation weitere Tapelagen in Umfangsrichtung mit unterschiedlicher Faserorientierung (Winkellagen) aufgebracht werden. Nach den Wickellagen werden erneut Tapes in Profillängsrichtung aufgebracht, um anschließend sämtliche Tapelagen in einer Heizzone auf die Schmelztemperatur der thermoplastischen Matrix aufzuschmelzen. Zur Kompaktierung wird das erzeugte Kreisrohrprofil im erwärmten Zustand über einen Aufweitdorn gezogen. Dabei wird der Lagenaufbau verdichtet und die einzelnen Winkellagen werden stoffschlüssig verbunden. [47]

Die im PAZ-Verfahren entstehenden Hohlkörper können auch kontinuierlich in andere Profile geformt werden. Die Umformung erfolgt dabei entweder nach der Kalibrierung durch ein erneutes Aufheizen oder direkt im Anschluss an den Aufweitdorn. [48]

Im zuletzt genannten Fall werden die Kreisrohrprofile über einen beheizten Umformdorn gezogen, der einen kontinuierlichen Übergang von der Kreisgeometrie in eine andere Geometrie gleichen Umfangs abbildet. In Abhängigkeit von der Geometrie sind dabei auch Außenwerkzeuge vonnöten, die eine Herstellung von offenen Profilen ermöglichen. [48]

Durch die Weiterentwicklung des Profil-Armierungs-Ziehens unter Verwendung von Tapes weist das PAZ-Verfahren Parallelen zum Pullwinding auf (siehe Abschnitt 2.2.1.1).

2.2.1.3 Intervallheißpressverfahren

Das *Intervallheißpressen* (IHP) ist ein Verfahren zur quasi-kontinuierlichen Herstellung von geschlossenen und offenen Hohlkörpern bzw. Profilen. Dabei werden Tapes über eine Vorform- und Vorwärmeeinheit in ein Pressensystem eingezogen. Das Pressensystem ist in drei wesentliche Bereiche untergliedert: Im ersten Bereich werden die vorimprägnierten Faserbänder auf die Schmelztemperatur des Matrixwerkstoffs erwärmt. Im zweiten Schritt folgt die Umformung der Tapes in die gewünschte Profilgeometrie. Im dritten und letzten Bereich wird das Profil unter Druck konsolidiert und anschließend gekühlt. Sowohl der Vorschub als auch die Hubbewegung der Formwerkzeuge erfolgt dabei getaktet. Die Verwendung von schwimmenden Kernen erlaubt die Herstellung von Profilen mit geschlossenem Querschnitt. [46, 48]

2.2.2 Diskontinuierliche Herstellungsverfahren

Nach der Beschreibung der kontinuierlichen Verfahren im vorherigen Abschnitt befasst sich dieser Abschnitt mit den diskontinuierlichen Herstellungsverfahren. Wesentliches Grundmerkmal dieser Herstellungsverfahren sind die zeitlichen Unterbrechungen im Verfahrensablauf [40].

2.2.2.1 Wickelverfahren

Das *Wickelverfahren* dient zur Herstellung endlosfaserverstärkter thermoplastischer Hohlkörper, wobei die meisten im Betrieb befindlichen Wickelanlagen auf eine diskontinuierliche Herstellung ausgelegt sind. Zunehmend werden auch Wickelanlagen zur kontinuierlichen Herstellung von Hohlkörpern eingesetzt und mit moderner Anlagentechnik ist es möglich, auch nicht-rotationssymmetrische Bauteile herzustellen.

Wickelverfahren mit thermoplastischen Matrixwerkstoffen sind in zwei unterschiedliche Verfahrensvarianten untergliedert: Zum einen werden Tapes eingesetzt, die unmittelbar vor dem Ablegen aufgeschmolzen werden und sich dadurch mit dem bereits abgelegten endlosfaserverstärktem thermoplastischem Kunststoff stoffschlüssig verbinden. Das Aufheizen erfolgt meist mittels Laser, Infrarot, Heißgas oder offener Flamme. Zum anderen besteht die Möglichkeit der Direktimprägnierung. Das Verfahren beinhaltet einen Extruder, der den schmelzflüssigen Thermoplast erst am Konsolidierungspunkt den bis dahin unimprägnierten Fasern zuführt. Die Kosten für Faser und Kunststoff sind gegenüber Tapes dabei deutlich geringer, jedoch ist ein zusätzlicher Extruder erforderlich. Der Konsolidierungsdruck wird bei beiden Wickelverfahren entweder durch die Faserspannung und/oder eine Andrückrolle sichergestellt. [41]

2.2.2.2 Flechtverfahren

Das *Flechtverfahren* ermöglicht die diskontinuierliche Herstellung endlosfaserverstärkter Vorformlinge (engl. „Preforms“), die in einem zweiten Prozessschritt zu fertigen Hohlprofilbauteilen weiterverarbeitet werden. Das Prinzip des Rundflechtens zur Herstellung eines Flechtschlauchs kommt dabei bei der Herstellung von Faserverbundbauteilen am häufigsten zur Anwendung. Eine detaillierte Beschreibung des Flechtverfahrens ist folgender Literatur zu entnehmen: [26, 49, 50].

Beim Flechten mit thermoplastischen Matrixwerkstoffen kommen Hybridgarne, Tapes oder unimprägnierte Fasern zum Einsatz [48, 51]. Geflochtene Preforms aus Tapes oder Hybridgarnen müssen anschließend noch konsolidiert bzw. imprägniert werden. Bei Preforms aus reinen Fasern erfolgt die Tränkung der Fasern beispielsweise im Thermoplastic-Resin-Transfer-Molding-Verfahren (T-RTM) [48].

2.2.2.3 Schleuderverfahren

Das *TER-Verfahren* (TER: Thermoplastische endlosfaserverstärkte Rohre) eignet sich zur diskontinuierlichen Herstellung kreiszylindrischer Hohlkörper. Im ersten Schritt werden unimprägnierte Fasern in beliebiger Anordnung auf ein thermoplastisches Rohr aufgebracht. Um die Tränkzeit zur vollständigen Benetzung der Fasern zu reduzieren, können auch Hybridgarne zum Einsatz kommen. Das mit Fasern bewickelte Rohr wird im zweiten Schritt in eine Schleuderkokille eingebracht, mittels einer Vakuumpumpe evakuiert und auf Schmelztemperatur des thermoplastischen Kunststoffes erhitzt. Die durch den Schleuderprozess hervorgerufene Zentrifugalkraft führt zu einer Tränkung der Fasern mit dem aufgeschmolzenen Kunststoff. [52]

2.2.2.4 Fügen flächiger Halbzeuge

Das Fügen flächiger Halbzeuge eignet sich zur diskontinuierlichen Herstellung von komplexen Hohlkörpern. Die Halbzeuge (z. B. Organobleche, Tapes etc.) werden im ersten Schritt beispielsweise mittels Stempelumformen, Rollformen, Gleitziehbiegen oder Vakuumformen umgeformt, um anschließend zur Herstellung der Hohlkörperstruktur stoffschlüssig miteinander verbunden zu werden [53–55]. Dafür haben sich insbesondere Schweißverfahren als geeignet erwiesen. Die Einbringungsart der Schweißenergie kann mittels Laser, Heizelementen, Ultraschall, Vibration oder Induktion erfolgen [12, 53, 56].

Beim *FIT-Hybrid-Verfahren* (FIT: Fluidinjektionstechnik) werden zunächst zwei flächige Halbzeuge (z. B. Organobleche) auf die Schmelztemperatur des Matrixwerkstoffes erwärmt. Als Zwischenschritt wird anschließend ein Sandwich erzeugt, indem eine zur Matrix des Halbzeugs kompatible Thermoplastschmelze zwischen die Halbzeuge gespritzt oder als Strang abgelegt wird. [57, 58]

Die Kunststoffmasse dient als Barriere für den aufzubringenden Gasdruck, der analog zur konventionellen Fluidinjektionstechnik über eine Injektornadel in die Struktur eingeleitet wird. Für die partielle Umformung der flächigen Halbzeuge zu einem Hohlkörper stehen zwei Verfahrensvarianten zur Wahl. In einer ersten Verfahrensvariante ist das Volumen der Thermoplastschmelze so groß, dass der Prägehub des Spritzgießwerkzeugs zu einer vollständigen Umformung der Halbzeuge führt. Die Fluidinjektion verdrängt im Nachgang die überschüssige Schmelze. Bei der zweiten Verfahrensvariante werden die Halbzeuge hingegen nur teilweise durch den Prägehub umgeformt. Die finale Drapierung in die Kavität des Spritzgießwerkzeugs erfolgt bei der Fluidinjektion durch das Aufblasen der Thermoplastschmelze. Das Spritzgießverfahren erlaubt zudem die Integration von zusätzlichen Funktionselementen (siehe Abschnitt 2.3). [57, 58]

Das *Twin-O-Sheet-Verfahren* hat sich aus dem FIT-Hybrid-Verfahren heraus entwickelt. In Anlehnung an dieses Verfahren wird aus zwei flächigen Halbzeugen ein Hohlkörper hergestellt. Die Halbzeuge werden auf die matrixspezifische Schmelztemperatur erhitzt und anschließend in ein Spritzgießwerkzeug eingelegt. Über eine Injektornadel, die zwischen den erwärmten Halbzeugen liegt, wird der zur Drapierung der Halbzeuge erforderliche Gasdruck aufgebracht. Nach der Innendruckumformung werden die Halbzeuge durch die Schließkraft der geschlossenen Formwerkzeuge im Randbereich des Bauteils vollständig verschweißt. Um signifikante Umformgrade mittels Fluidinjektion realisieren zu können, ist laut Drummer et al. zur Sicherstellung der Gasdichtigkeit eine Modifizierung des Halbzeugs erforderlich. Als Barriere wird vor der Umformung eine zusätzliche Halbzeugdeckschicht in Form einer strahlenvernetzten Folie auf das Halbzeug aufgeschmolzen. [59, 60]

2.2.2.5 Schlauchblasverfahren

Das *Doppel-Diaphragma-Umformen* (DDU) ist ein Verfahren zur diskontinuierlichen Herstellung von komplexen faserverstärkten thermoplastischen Hohlkörpern. Dabei wird zunächst eine Preform aus Hybridgarnzuschnitten zwischen zwei Diaphragmen eingelegt. Das äußere Diaphragma dient als Transporthilfe, das innere Diaphragma fungiert als Blasmembran. Anschließend wird die zwischen den Diaphragmen befindliche Preform in ein Formwerkzeug eingelegt und auf die Schmelztemperatur der thermoplastischen Fasern erhitzt. Über das innenliegende Diaphragma wird Druck auf die Preform aufgebracht. Dies führt sowohl zu einer Tränkung der Fasern, als auch zu einer Drapierung der Preform in das Formwerkzeug. [53]

Das *Bladder-Inflation-Moulding-Verfahren* (BIM) ist ähnlich dem Doppel-Diaphragma-Umformen konzipiert. Ein Flechtschlauch (siehe Abschnitt 2.2.2.2) bestehend aus Hybridgarn wird über einen Blasschlauch aus Silikon oder Thermoplast gezogen. Die beim DDU erforderliche Transporthilfe kann beim BIM aufgrund der Stabilität der geflochtenen Preform entfallen.

Nach Long [61] werden beim nicht-isothermen BIM Preform und Blasschlauch außerhalb des Formwerkzeugs auf die Schmelztemperatur der thermoplastischen Fasern erhitzt und anschließend mittels Innendruck in das kalte Formwerkzeug drapiert. Dabei erfolgt auch die Tränkung der Fasern. Beim isothermalen BIM hingegen werden Preform und Blasschlauch in ein variothermes Formwerkzeug eingelegt und zuerst auf die Schmelztemperatur der thermoplastischen Fasern erwärmt. Anschließend erfolgt durch die Druckbeaufschlagung eine Tränkung der Fasern sowie die Drapierung des Geflechts. Abschließend wird das variotherme Formwerkzeug abgekühlt. Der Thermoplastschlauch verbleibt dabei im Bauteil, der Blasschlauch aus Silikon hingegen wird nach der Abkühlung des Bauteils entnommen und in der Regel mehrfach verwendet. [61–63]

Das *Topologie-Hohlprofile-Verfahren* (ToHoP) ist stark verwandt mit dem BIM-Verfahren, erlaubt jedoch die Herstellung von Mehrkammerprofilen. Dazu werden mehrere Flechtschläuche inklusive ihrer Kerne gestapelt und zusammen erneut umflochten. Die Preform aus Hybridgarn wird anschließend analog zum BIM in einem variothermen Formwerkzeug durch einen Blasschlauch in die Kavität drapiert und die Fasern werden getränkt. [64]

Zur diskontinuierlichen Herstellung komplexer Hohlkörper aus faserverstärktem thermoplastischem Kunststoff wurde das *Innendruckumformen segmentierter Faser-Thermoplast-Kreisrohre* (IDU seg. FTK) erarbeitet. Ausgangsbasis ist ein aus segmentierten Tapes im TER-Verfahren (siehe Abschnitt 2.2.2.3) hergestelltes rohrförmiges Halbzeug. Bei der Segmentierung werden Tapes auf Umfangs- und Axiallänge des Halbzeugs zugeschnitten, um anschließend je nach Basis- und Zielgeometrie Einschnitte in diese Tapes vorzunehmen. In das erzeugte rohrförmige Halbzeug wird ein Blasschlauch drapiert und die Enden des Blasschlauchs werden abgedichtet. Darauf folgend wird das Halbzeug im Umluftofen auf die Schmelztemperatur des Matrixwerkstoffs erwärmt und nach Erreichen der Umformtemperatur in ein erwärmtes Formwerkzeug gesetzt. Die Temperatur des Formwerkzeugs liegt dabei über der Matrix-Schmelztemperatur. Durch den Blasschlauch – dieser ist notwendig, da das erwärmte Halbzeug durch die Segmentierung nicht mehr gasdicht ist – wird das Halbzeug mit Innendruck beaufschlagt und in die Kavität drapiert. Abschließend wird das Formwerkzeug inklusive Halbzeug bzw. Hohlprofilbauteil mittels eines Gebläses abgekühlt. Die Segmentierung der Tapes bei der Halbzeugherstellung erlaubt bei der Innendruckumformung eine Umfangsänderung. [48]

2.2.2.6 Innendruckverfahren

Das *Schmelzdruckformen* (SDF) wird den diskontinuierlichen Herstellungsverfahren zugeordnet. Zuerst wird ein Thermoplastrohr mit Fasern oder Hybridgarn bewickelt und anschließend von außen erwärmt. Durch eine gezielte Temperaturführung wird lediglich die äußere Schicht des Thermoplastrohrs auf Schmelztemperatur erwärmt.

Eine definierte innere Schicht hingegen bleibt unterhalb der Schmelztemperatur. Das erwärmte und bewickelte Kernrohr wird in ein Formwerkzeug eingelegt und druckdicht verschlossen. Durch die Druckbeaufschlagung werden die Fasern mit dem aufgeschmolzenen Thermoplast getränkt und gleichzeitig wird die Bauteilgeometrie abgeformt. Ein Blasschlauch, der bei ähnlichen Verfahren benötigt wird, ist beim Schmelzdruckformen nicht erforderlich, da die nicht erwärmte innere Schicht des Kernrohres die Gasdichtigkeit sicherstellt. [45, 65]

Mittels *Konus-Innendruck-Formen* (KIF) werden insbesondere dickwandige konische Hohlkörper diskontinuierlich hergestellt. Zuerst wird ein konischer Wickelkern mit Tapes umwickelt und nach dem Erwärmen der Tapes auf Schmelztemperatur unter axialem Druck in eine konische Kavität gepresst. Durch den Konuswinkel von 0,5 bis 1,5° führt ein Axialdruck auf den Wickelkern zu einer Konsolidierung der Tapes. Nach dem Abkühlen im Formwerkzeug unter Axialdruck kann das Bauteil entnommen werden. [66]

Das *Internal-Pressure-Forming-by-Injection-Verfahren* (IFI) nützt den Einspritzdruck beim Spritzgießen zur Konsolidierung. Analog zum KIF wird ein Wickelkern mit Tapes umwickelt. Anschließend wird der Rohling vom Wickelkern entnommen und auf einen Spritzgießkern platziert, der inklusive der zuvor erwärmten Tapes in ein Spritzgießwerkzeug eingelegt wird. Im Gegensatz zum KIF wird der zur Tape-Konsolidierung erforderliche Druck über die Injektion der Schmelze erzeugt. Die Spritzgießmasse wird in einen mindestens 0,5 mm großen Fließspalt zwischen Tapes und Spritzgießkern injiziert. [66]

2.2.2.7 Biegeumformverfahren

Das *Biegeumformen* endlosfaserverstärkter thermoplastischer Hohlkörper wird im Wesentlichen durch zwei zum Patent angemeldete diskontinuierliche Verfahren beschrieben.

Im ersten Verfahren werden bereits konsolidierte, profilmäßige Halbzeuge nach der Erwärmung auf Matrix-Schmelztemperatur mittels schwenkbarer, mehrteiliger Formwerkzeuge gebogen. Zur finalen Drapierung des Halbzeugs wird ein Blasschlauch mit Druck beaufschlagt. Die durch die Biegung hervorgerufenen, unterschiedlichen Faserlaufängen zwischen Innen- und Außenradius werden mit einem Knicken der Halbzeugenden entgegen der Biegerichtung kompensiert. [67]

Ein von der Daimler AG angemeldetes Verfahren kombiniert das Biegeumformen zusätzlich mit dem Innendruck- und Spritzgießprozess. Zur Stabilisierung der Verstärkungsfasern wird ein Blasschlauch eingesetzt, der mit Fasern entweder umflochten (Flechtpultrusion, siehe Abschnitt 2.2.1.1) oder umwickelt (Wickelverfahren, siehe Abschnitt 2.2.2.1) wird. Während das erwärmte Halbzeug biegeumgeformt wird, beispielsweise mittels Rotationszugbiegeverfahren, wird der Blasschlauch mit Druck beaufschlagt, um ein Ausknicken der Fasern zu verhindern. [68]

Anschließend erfolgt das Innendruckumformen des gebogenen Halbzeugs in einer Spritzgießanlage bei gleichzeitiger Funktionalisierung (siehe Abschnitt 2.3) des Hohlprofilbauteils im Spritzgießprozess. [68]

Abschließend sei auf die Veröffentlichung der AFPT GmbH verwiesen, die in Kooperation mit der Universität Siegen ein bis dato nicht näher beschriebenes Verfahren zum automatisierten Biegen von faserverstärkten Hohlkörpern entwickelt hat [69].

2.2.3 Einteilung und Bewertung der Herstellungsverfahren

Nach einer Beschreibung der kontinuierlichen und diskontinuierlichen Herstellungsverfahren in den Abschnitten 2.2.1 und 2.2.2 befasst sich dieser Abschnitt abschließend mit der Einteilung und Bewertung der Verfahren. Die Einteilung der Herstellungsverfahren kann grundsätzlich nach unterschiedlichen Bewertungskriterien erfolgen [70]:

- Ur- und/oder Umformverfahren
- Produktionsvolumen pro Zeit
- Automatisierungsgrad
- Komplexitätsgrad der Bauteile
- Fasern in Umfangsrichtung (unterbrechungsfrei)
- Faservolumenanteile und mechanische Eigenschaften
- Faserondulation
- Bauteil- und Oberflächenqualität
- Investitions- und Produktionskosten

Auf eine Unterscheidung der Herstellungsverfahren in *Ur- und Umformverfahren* analog zu [48] wird verzichtet, da diese Abgrenzung bei Faserverbundwerkstoffen nicht immer möglich oder sinnvoll erscheint. Die Herstellungsverfahren PAZ (Abschnitt 2.2.1.2) und IHP (Abschnitt 2.2.1.3) sind beiden Kategorien zuzuordnen. Der integrierte Spritzgießprozess führt beispielsweise bei den Herstellungsverfahren Twin-O-Sheet, FIT-Hybrid (siehe Abschnitt 2.2.2.4) oder IFI (siehe Abschnitt 2.2.2.6) zu einer Überlagerung von Urformen, Umformen und Fügen.

Für Herstellungsverfahren von Serienbauteilen ist im Automobilbau insbesondere das Verhältnis von *Produktionsvolumen pro Zeit* zu realisierbarer Bauteilkomplexität von Bedeutung.

Da zu den meisten Herstellungsverfahren keine konkreten Angaben zur Durchlaufzeit oder – für kontinuierliche Verfahren – dem Produktionsvolumen pro Zeit vorliegen, erfolgt die Einteilung anhand einer vergleichenden Einschätzung. Die Höhe des Produktionsvolumens pro Zeit ist bei kontinuierlichen Verfahren wie Pultrusion, Pullwinding, Pullbraiding, IHP und PAZ (siehe Abschnitt 2.2.1) in hohem Maße von der Produktionsgeschwindigkeit abhängig.

Bei den diskontinuierlichen Herstellungsverfahren werden die Produktionsvolumina pro Zeit im Wesentlichen durch die verfahrensspezifische Durchlaufzeit bestimmt. Beispielsweise setzt sich das Fügen flächiger Halbzeuge (siehe Abschnitt 2.2.2.4) aus dem Thermoformen, mit sehr kurzer Durchlaufzeiten, und dem Fügen, mit verhältnismäßig längerer Durchlaufzeit zusammen.

Der *Automatisierungsgrad* beschreibt den Anteil von automatisierten Abläufen in Bezug auf das gesamte Herstellungsverfahren. Ein hohes Produktionsvolumen pro Zeit geht meist mit einem hohen Automatisierungsgrad einher. Am Beispiel Pullforming (siehe Abschnitt 2.2.1.1) wird jedoch deutlich, dass dies nicht zwangsläufig der Fall ist.

Insbesondere für die mechanische Torsions- und Biegebelastung der Hohlkörper sind *Fasern in Umfangsrichtung* ohne Unterbrechung (z.B. durch eine Fügezone) von Bedeutung. Die Herstellungsverfahren Twin-O-Sheet und FIT-Hybrid können dieses Kriterium beispielsweise nicht erfüllen.

Die Bewertung der *Bauteilkomplexität* erfolgt nach [70] auf Basis unterschiedlicher Geometriemerkmale. Diese werden separat voneinander betrachtet und unterteilen sich in Längskrümmung, konkave Sicken und/oder kleinen Radien, Mehrkammer-Geometrie und Umfangsänderung. Der Einteilung der Herstellungsverfahren nach diesen Geometriemerkmale liegen Beschreibungen und Bauteilabbildungen zugrunde (siehe Literaturangaben in Abschnitt 2.2). Umfangsänderungen können, mit Ausnahme des Pullformingverfahrens, ausschließlich bei der Verwendung diskontinuierlicher Herstellungsverfahren realisiert werden. Mithilfe der diskontinuierlichen Herstellungsverfahren sind grundsätzlich höhere Bauteilkomplexitäten erreichbar.

Abb. 2-2 illustriert abschließend in graphischer Form die Bewertungskategorien Produktionsvolumen pro Zeit, Bauteilkomplexität und Umfangsverstärkung. Die Bauteilkomplexität nimmt entlang der Ordinatenachse ebenso zu, wie mit fortschreitender Abszissenachse das Produktionsvolumen pro Zeit. Herstellungsverfahren, die eine Endlosfaserverstärkung in Umfangsrichtung ermöglichen, sind in Abb. 2-2 fett gedruckt. Der Kursivdruck weist darauf hin, dass mit diesem Herstellungsverfahren keine Endlosfaserverstärkung in Umfangsrichtung möglich ist.

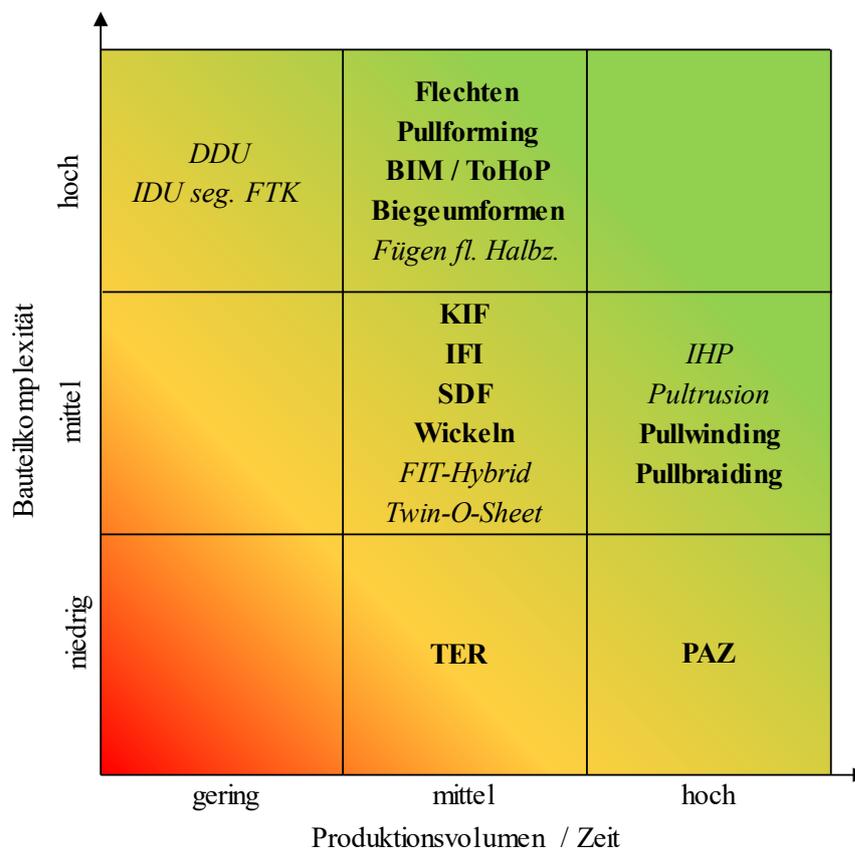


Abb. 2-2: Einteilung der Herstellungsverfahren anhand dreier Bewertungskriterien
 Fettgedruckte Herstellungsverfahren ermöglichen eine Endlosfaserverstärkung in Umfangsrichtung. Bei kursiv gedruckte Herstellungsverfahren ist dies nicht möglich.

2.3 Funktionalisierung von faserverstärkten thermoplastischen Hohlkörpern

Der folgende Abschnitt beinhaltet ausschließlich den Stand der Technik zur Funktionalisierung von faserverstärkten thermoplastischen Hohlkörpern. Die Wiederaufschmelzbarkeit der thermoplastischen Matrix eröffnet, neben den klassischen Faserverbund-Verbindungstechniken (z.B. Kleben, Schrauben und Nieten), zahlreiche weitere Möglichkeiten. Die Funktionalisierung lässt sich dabei in zwei wesentliche Bereiche unterteilen.

- **Bauteilverstärkung:**
Aufbringen von lokalen Verstärkungen (z B. Tapes) oder Rippenstrukturen
- **Funktionserweiterung:**
Um- und/oder Anspritzen von thermoplastischem Kunststoff, Bauteilbeschichtungen, Inserts, Onserts

Bei der Funktionalisierung von Hohlkörpern im *Spritzgießverfahren* erfolgt häufig sowohl eine Verstärkung als auch eine Funktionserweiterung des Faserverbundbauteils. Die Funktionalisierung findet entweder im Zuge der Bauteilherstellung (One-Shot-Verfahren) oder in einem separaten Prozessschritt statt. Um ein Kollabieren des Hohlkörpers infolge des Einspritzdrucks zu vermeiden, ist ein partikelbasiertes Stützsystem erforderlich [71, 72]. Die Stützung des Hohlkörpers über einen innenliegenden, mit Druck beaufschlagten Blasschlauch ist ebenfalls möglich [68]. Da beispielsweise beim Twin-O-Sheet-Verfahren (siehe Abschnitt 2.2.2.4) kein Stützsystem vorliegt, ist bei diesem Herstellungsverfahren lediglich eine Funktionalisierung im Bereich der Fügeflansche umsetzbar. Das Anspritzen von Rippen verstärkt die Struktursteifigkeit des Hohlkörpers. Zur Erweiterung der Bauteilfunktionen können Flansche, Onserts oder Inserts angespritzt werden (siehe Abb. 2-3).

Inserts sind lokal in den endlosfaserverstärkten oder den unverstärkten thermoplastischen Kunststoff eingelassene Krafteinleitungselemente (Kraft-, Form- oder Stoffschluss), die in der Regel aus einem anderen Werkstoff als das Faserverbundbauteil bestehen. Sie können während der Bauteilfertigung in die Hohlkörperstruktur integriert, im Spritzgießverfahren eingebettet oder nachträglich (After-Mould-Inserts) eingebracht werden [72–78].

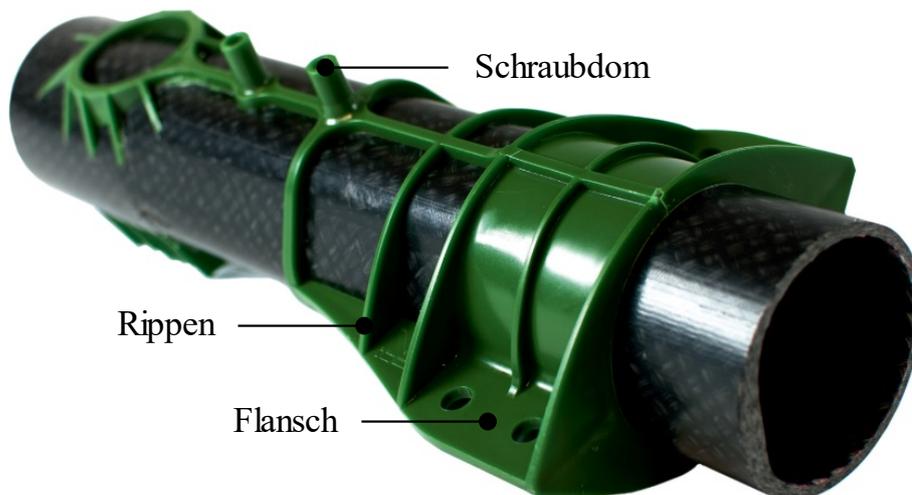


Abb. 2-3: Funktionalisierung von faserverstärkten thermoplastischen Hohlkörpern [71]
Der Hohlkörper wurde nach der Herstellung im Spritzgießverfahren funktionalisiert und dabei u.a mit Schraubdomen, Rippen sowie einem umspritzten Metallflansch versehen.

Onserts sind hingegen Krafteinleitungselemente die kraft-, form- oder stoffschlüssig auf den faserverstärkten thermoplastischen Hohlkörper aufgesetzt sind. Elemente wie Schraubdome, Gewinde, Schnapphaken oder sonstige Halterungen lassen sich ohne Oberflächenvorbehandlung im Spritzgießverfahren stoffschlüssig mit dem Hohlkörper verbinden (siehe Abb. 2-3) [71, 72, 78].

Die nachträgliche Anbringung eines Onserts mittels Klebtechnik bedingt neben einer Vorbehandlung der Fügefläche auch ein Mehrgewicht aufgrund des erforderlichen Klebstoffsystems und wurde bis dato lediglich für flächige Halbzeuge untersucht [79].

Wird auf das eingangs erwähnte Stützsystem hingegen verzichtet, ermöglicht das *Spritz-Umformverfahren* eine stirnseitige Funktionalisierung von FTV-Profilstrukturen. Die metallischen, mit Hinterschnitten versehenen Krafteinleitungselemente werden an den Enden der zylindrischen Profilstruktur eingebracht. In einem Spritzgießwerkzeug wird der an den Profilenden erwärmte Hohlkörper anschließend mit einer thermoplastischen Formmasse umspritzt. Durch den Einspritzdruck der Formmasse wird eine gleichmäßige Verpressung des Hohlkörpers mit dem Krafteinleitungselement sichergestellt. [80, 81]

3 Konzeptionierung des Herstellungsverfahrens – Das FuHo- Verfahren

Das zu konzeptionierende Herstellungsverfahren wird im folgenden Kapitel näher erörtert. Aus Tab. 3-1 wird ersichtlich, dass die Realisierung in Anlehnung an die VDI-Richtlinie 2221 [82] erfolgt. Zunächst befasst sich Abschnitt 3.1 mit den grundsätzlich zu berücksichtigenden Anforderungen und deren Gewichtung. Anschließend werden die notwendigen Funktionen des Herstellungsverfahrens erarbeitet (siehe Abschnitt 3.2). Im dritten Schritt wird das Verfahren zur Herstellung funktionalisierter Hohlprofilbauteile – kurz *FuHo-Verfahren* – in Module respektive Prozessschritte gegliedert und detaillierter beschrieben. Die Prozessschritte des FuHo-Verfahrens bilden die Basis für die Suche nach Lösungsprinzipien und die Gestaltung der Module, die mit ihrer technischen Umsetzung in Kapitel 4 näher vorgestellt werden. Zur Gestaltung des gesamten Produkts wird abschließend eine Produktionszelle aufgezeigt, bei der die zuvor erarbeiteten Prozesstechniken miteinander verknüpft werden (siehe Tab. 3-1 bzw. Abschnitt 7.3.2). Auf die Produktdokumentation wird im Rahmen dieser Arbeit nicht näher eingegangen.

Tab. 3-1: Konzeptionierung des Herstellungsverfahrens in Anlehnung an die VDI 2221

Aufgabe	Arbeitsergebnis	Kapitel
Klären und Präzisieren der Aufgabenstellung	Anforderungen	3.1
Ermitteln von Funktionen und deren Strukturen	Funktionsstrukturen	3.2
Gliedern in realisierbare Module	Modulare Strukturen / Prozessschritte	3.2
Suche nach Lösungsprinzipien und deren Strukturen	Prinzipielle Lösungen / Grundlagen	4.1.1 / 4.2.1 / 4.3.1 / 4.4.1
Gestalten der maßgebenden Module	Entwürfe / Technische Umsetzung	4.1.2 / 4.2.2 / 4.3.2 / 4.4.2
Gestalten des gesamten Produkts	Gesamtentwurf / Produktionszelle	7.3.2
Ausarbeiten der Ausführungs- und Nutzungsangaben	Produktdokumentation	-

3.1 Anforderungen an das Herstellungsverfahren

Bei der Realisierung innovativer Konzepte kann grundsätzlich zwischen mannigfaltigen Produkt- und Prozessanforderungen auf unterschiedlicher Detailebene unterschieden werden. Die Eigenschaften des Produktes werden maßgeblich durch das Design, die Konstruktion und den Werkstoff definiert, wobei je nach Produkt, Funktion und Anwender unterschiedliche Rahmenbedingungen zu beachten sind [83]. Die Konstruktion des Produktes wird wiederum wesentlich durch die Wahl des Herstellungsverfahrens und die damit einhergehenden prozesstechnischen Vorgaben beeinflusst.

Vorrangiges Ziel des Herstellungsverfahrens ist die Erreichung und Einhaltung der geforderten Produkteigenschaften und Produktqualität [84]. Sekundärziele des Herstellungsverfahrens betreffen die Invest- und Produktionskosten, die Automatisierbarkeit, die Flexibilität, das Produktionsvolumen pro Zeit und die Materialeinsatzquote.

Für die *Produktqualität* ist ein umfassendes Verständnis des Herstellungsverfahrens erforderlich. Die daraus abgeleitete, fertigungsgerechte Produkt- bzw. Bauteilgestaltung liefert einen weiteren wichtigen Beitrag für die fehlerfreie Serienfertigung. Während des Herstellungsverfahrens sollte nach wesentlichen Prozessschritten eine kontinuierliche, zerstörungsfreie Qualitätskontrolle erfolgen. Für zerstörungsfrei nicht detektierbare Qualitätsmängel ist stichprobenartig eine zerstörende Qualitätsprüfung vorzusehen.

Die erforderlichen *Invest- und Produktionskosten* sind bei jedem Herstellungsverfahren auf ein Minimum zu reduzieren. Durch die Entkoppelung der Halbzeugherstellung von der Bauteilherstellung (siehe Abschnitt 1.3) ist eine klare Schnittstelle definiert, die eine Aufteilung der Invest- und Produktionskosten ermöglicht. Beispielsweise kann die Halbzeugherstellung bei einem oder mehreren, auf das Verfahren spezialisierten Halbzeugproduzenten mit bereits vorhandener Anlagentechnik erfolgen. Die spezifische Bauteilherstellung findet dann bei einem oder mehreren Bauteilproduzenten statt. Um die Produktionskosten gegenüber anderen Herstellungsverfahren (z. B. verlorener Kern beim Flechtverfahren) zu reduzieren, ist bei der Prozessentwicklung eine Wiederverwendbarkeit der Materialien und Komponenten anzustreben. Die Integrationsfähigkeit des Herstellungsverfahrens in bestehende Werks- und Produktionsstrukturen sowie die Nutzung bereits vorhandener Anlagen- und Prozesstechnik trägt zur Reduktion des erforderlichen Einmalaufwands bei.

Die *Automatisierbarkeit* bildet aus technischer Sicht eine weitere Anforderung an die Entwicklung. Sowohl die Prozessschritte des Herstellungsverfahrens als auch die daraus abgeleitete Anlagentechnik haben infolge ihrer konstruktiven und prozesstechnischen Gestaltung ein hohes Automatisierungspotential aufzuweisen.

Unter dem Begriff *Flexibilität* werden vier Anforderungen an das zu entwickelnde Herstellungsverfahren adressiert. Das Herstellungsverfahren bzw. die Anlagentechnik ist auf eine Flexibilität der herzustellenden Hohlprofilbauteile hinsichtlich ihrer geometrischen Abmessungen (z. B. Länge, Wandstärke etc.) und/oder geometrischen Bauteilkomplexität auszulegen. Die Materialflexibilität des Herstellungsverfahrens erlaubt zudem eine Variation der Faser (z. B. Glas- oder Kohlenstofffaser) und/oder des thermoplastischen Matrixmaterials (z. B. PP, PA6 oder PPA). Bei markt- bzw. nachfragegetriebenen Schwankungen ist außerdem eine Stückzahlflexibilität des Herstellungsverfahrens vonnöten.

Ein hohes *Produktionsvolumen pro Zeit* ist im Automobilbau eine weitere wesentliche Anforderung an das Herstellungsverfahren. Bei der Kombination einer kontinuierlichen Halbzeugherstellung mit einer diskontinuierlichen Bauteilherstellung wird das realisierbare Produktionsvolumen pro Zeit maßgeblich durch das diskontinuierliche Herstellungsverfahren definiert (siehe Abb. 1-2). Letzteres soll bei hoher Automatisierung der Anlagentechnik ein Produktionsvolumen auf dem Niveau von bereits in Serie befindlicher Thermoformverfahren ermöglichen.

Eine geringe *Materialeinsatzquote* (MEQ) ist die Grundlage für eine materialsparende und kosteneffiziente Bauteilherstellung. Durch die hohen Materialkosten für endlosfaserverstärkte thermoplastische Kunststoffe ist die Materialeinsatzquote ein elementarer Stellhebel zur Kostensenkung. Daraus leitet sich die Anforderung an das Herstellungsverfahren und die zu entwickelnde Anlagentechnik nach einer möglichst endkonturnahen Bauteilherstellung ab, die zur Verringerung des späteren Materialverschnitts beiträgt. Die Realisierung eines Herstellungsverfahrens mit hoher Bauteilfunktionalität führt durch den möglichen Entfall von Einzelbauteilen zu einer weiteren Reduktion der Materialeinsatzquote. Darüber hinaus können durch eine hohe Bauteilfunktionalität nachgelagerte Fügeprozesse entfallen.

Tab. 3-2 zeigt eine Gewichtung der Anforderungen, wobei dabei zwischen drei unterschiedlichen Kategorien differenziert wird [85]:

- Festforderungen: Müssen in jedem Fall erfüllt werden
- Mindestforderungen: Dürfen nach der günstigen Seite über- oder unterschritten werden
- Wünsche: Sollen nach Möglichkeit berücksichtigt werden

Tab. 3-2: Gewichtung der Anforderungen an das Herstellungsverfahren

Anforderung	Gewichtung		
	Festforderung	Mindestforderung	Wunsch
Hohe Produktqualität	x		
Geringe Invest- und Produktionskosten			x
Hohe Automatisierbarkeit	x		
Hohe Flexibilität		x	
Hohes Produktionsvolumen pro Zeit	x		
Geringe Materialeinsatzquote		x	

3.2 Prozessschritte des FuHo-Verfahrens

Die Konzeptionierung der Prozessschritte basiert auf einer Separation von kontinuierlicher Halbzeugherstellung und diskontinuierlicher Bauteilherstellung (siehe auch Abschnitt 1.3). Zunächst wird die Beschaffenheit des Halbzeugs definiert, da dieses die nachgelagerte Gestaltung des FuHo-Verfahrens entscheidend beeinflusst. Beim Halbzeug können im Wesentlichen zwei Ausgangszustände unterschieden werden:

- Das Halbzeug liegt vorimprägniert und konsolidiert vor (z. B. als Hohlprofil, Organoblech etc.). Im Zuge der Bauteilherstellung finden dann eine Umformung des Halbzeugs gemäß der gewünschten Bauteilkontur und eine Rekonsolidierung der Faserlagen statt.
- Das Halbzeug liegt als Preform weder imprägniert noch konsolidiert vor (z. B. Hybridgarn-Flechtschlauch etc.). Bei der Bauteilherstellung wird die Umformung sowohl mit der Benetzung der Fasern als auch mit der Konsolidierung überlagert. Abb. 3-1 zeigt die Hauptfunktionen eines solchen Verfahrens am Beispiel Bladder-Inflation-Moulding. Die Imprägnierung geht bei der Bauteilherstellung mit einer steigenden Durchlaufzeit einher. Die Kombination aus Imprägnierung und Umformung führt des Weiteren zu einer steigenden Verfahrenskomplexität.

Ausgangsbasis für das FuHo-Verfahren ist daher ein vorimprägniertes Halbzeug, wobei die Halbzeugherstellung für hohe Produktionsvolumina zweckmäßigerweise im Pultrusionsverfahren erfolgt (siehe Abschnitt 2.2.1). Die für eine Faserimprägnierung erforderliche Prozesszeit entfällt somit beim FuHo-Verfahren und die Verfahrenskomplexität verringert sich. Die klare Trennung zwischen Halbzeug- und Bauteilherstellung erlaubt eine umfangreiche Qualitätskontrolle des Halbzeugs. Vor dem Einspeisen des Halbzeugs in das FuHo-Verfahren können charakteristische Qualitätsmerkmale des Halbzeugs (z. B. Abmaße, Porengehalt, Faservolumengehalt, Faserwinkel etc.) kontrolliert werden.

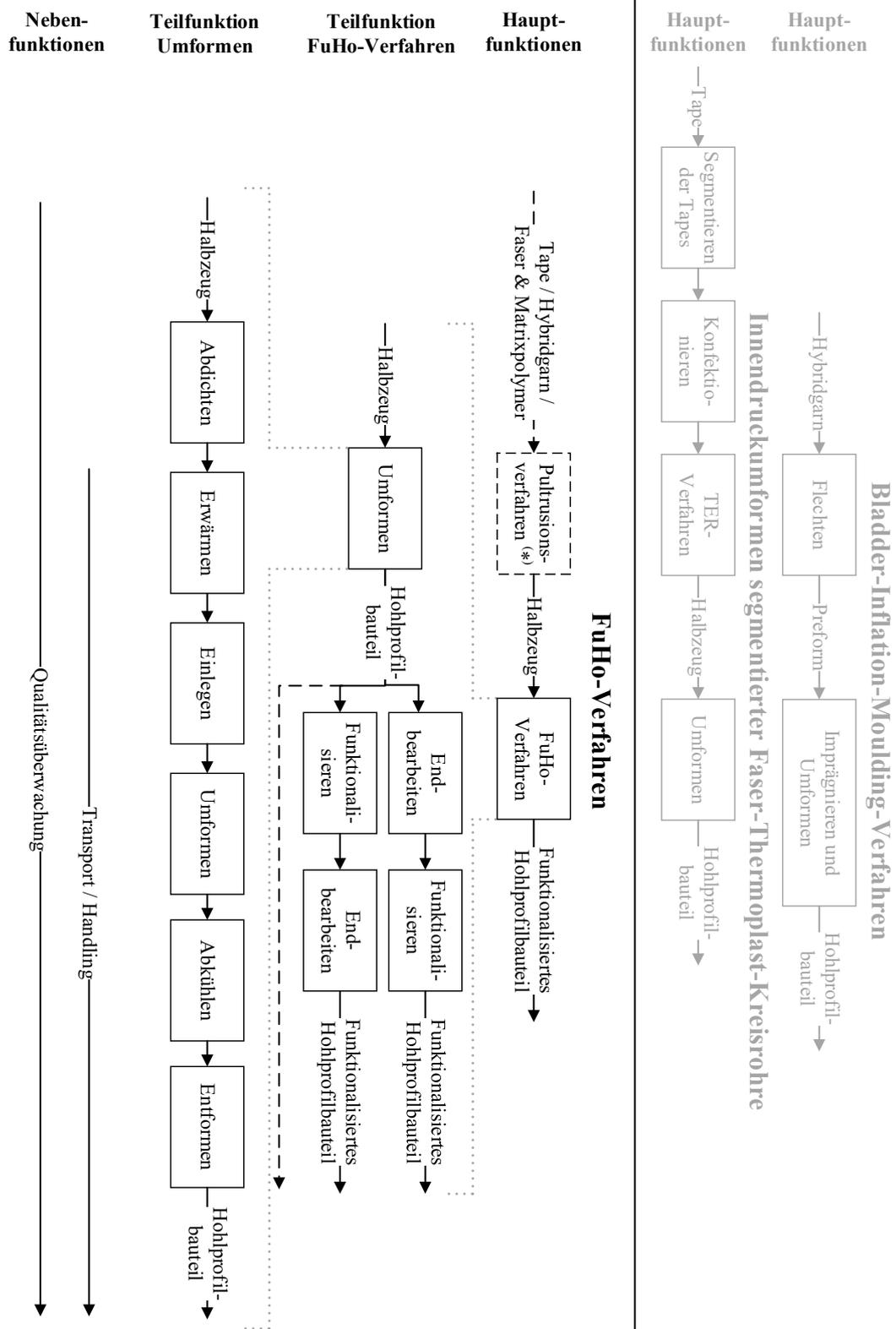


Abb. 3-1: Vom Rohmaterial zum Hohlprofilbauteil – Funktionsstruktur des FuHo-Verfahrens

(*) Die kontinuierliche Halbzeugherstellung wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht betrachtet. Hauptfunktionen zum Innendruckumformen segmentierter Faser-Thermoplast-Kreisrohre nach [48]. Hauptfunktionen zum Bladder-Inflation-Moulding-Verfahren nach [63]

Nach dem Pultrusionsverfahren liegt ein Halbzeug mit konstanter Querschnittsgeometrie vor, dessen geometrische Komplexität im Zuge der Bauteilherstellung durch eine *Umformung* gesteigert wird (siehe Teilfunktion FuHo-Verfahren in Abb. 3-1). Zur Formgebung des Halbzeugs ist eine Umformkraft bzw. ein Umformdruck notwendig. Die Aufbringung des Umformdrucks auf das hohlprofilförmige Halbzeug kann auf zwei Arten erfolgen.

- Über Formwerkzeuge von außen:
Um dabei eine unkontrollierte Umformung oder das Kollabieren des Halbzeugs zu verhindern, muss das Halbzeug währenddessen von innen gestützt werden. Der von außen gleichmäßig aufgebaute Umformdruck gestaltet sich jedoch schwierig, weshalb dieser in der Regel im Inneren des Halbzeugs aufgebracht wird (siehe Abschnitt 2.2).
- Mittels Umformdruck im Halbzeuginneren:
Formgebende Werkzeuge umschließen das Halbzeug während der Druckbeaufschlagung und Abkühlung. Der Umformdruck kann über einen Feststoff bzw. Kern (siehe z. B. KIF-Verfahren in Abschnitt 2.2.2.6) oder ein Fluid (siehe z. B. BIM-Verfahren in Abschnitt 2.2.2.5) aufgebracht werden. Bei Kernsystemen ist deren Inkompressibilität und geometrische Genauigkeit vorteilhaft. Problematisch, insbesondere bei hinterschnittigen Geometrien, ist deren Entformbarkeit nach der Herstellung des Hohlprofilbauteils.

Beim FuHo-Verfahren wird daher auf ein Fluid als Umformmedium zurückgegriffen. Voraussetzung für den Aufbau eines solchen Umformdrucks ist die fluiddichte *Abdichtung* des Halbzeugs (siehe Teilfunktion Umformen in Abb. 3-1). Zumindest für die Dauer der Druckbeaufschlagung müssen sowohl die Halbzeuginnenfläche als auch die beiden Halbzeugenden für das Druckmedium undurchlässig sein.

Die fehlerfreie Umformung des vorimpregnierten und konsolidierten Halbzeugs ist erst bei einer ausreichenden Beweglichkeit der Fasern möglich [86]. Aus diesem Grund folgt auf das Abdichten die *Erwärmung* des Halbzeugs auf die matrixspezifische Umformtemperatur (siehe Abb. 3-1).

Nach der Umformung des Halbzeugs zum Hohlprofilbauteil ist – in Abhängigkeit von den konstruktiven Randbedingungen – eine Endbearbeitung des Bauteils erforderlich. Die *Endbearbeitung* kann mit geometrisch bestimmter Schneide (z. B. Fräsen, Bohren etc.), unbestimmter Schneide (z. B. Wasserstrahlschneiden) und thermisch abtragenden Verfahren (z. B. Laserstrahlschneiden) erfolgen.

Für eine Bauraum-, Gewichts- und Kostenreduktion von Hohlprofilbauteilen ist eine Funktionsintegration analog zu Schalenbauteilen (z. B. „SpriForm“-Verfahren) anzustreben. Im Zuge des FuHo-Verfahrens findet die *Funktionalisierung* im Sinne einer Funktionserweiterung statt (siehe Abschnitt 2.3).

Im Unterschied zu Schalenbauteilen besteht bei einer Funktionalisierung von Hohlprofilbauteilen während des Umformvorgangs die Gefahr, dass das erwärmte, biegeschlaflfe Halbzeug unter dem Füge- oder Einspritzdruck kollabiert. Aus diesem Grund wird das Hohlprofilbauteil gemäß der Teilfunktion in Abb. 3-1 erst nach der Umformung, Abkühlung und Entformung funktionalisiert.

Das in Abb. 3-2 schematisch dargestellte FuHo-Verfahren resultiert aus den wesentlichen Funktionen der Funktionsstruktur (siehe Abb. 3-1). Das konzeptionierte FuHo-Verfahren setzt sich demnach aus fünf Prozessschritten zusammen:

- Abdichtung
- Erwärmung
- Umformung
- Endbearbeitung
- Funktionalisierung

Eine detaillierte Beschreibung der Prozessschritte ist dem Abschnitt 3.2.1 zu entnehmen. Sofern sich die Prozessschritte „Endbearbeitung“ und „Funktionalisierung“ nicht reziprok beeinflussen, ist deren Reihenfolge grundsätzlich substituierbar. In Ausnahmefällen können die letzten beiden Prozessschritte entfallen, wenn es keiner Endbearbeitung und/oder Funktionalisierung des Hohlprofilbauteils bedarf (siehe Abb. 3-1).

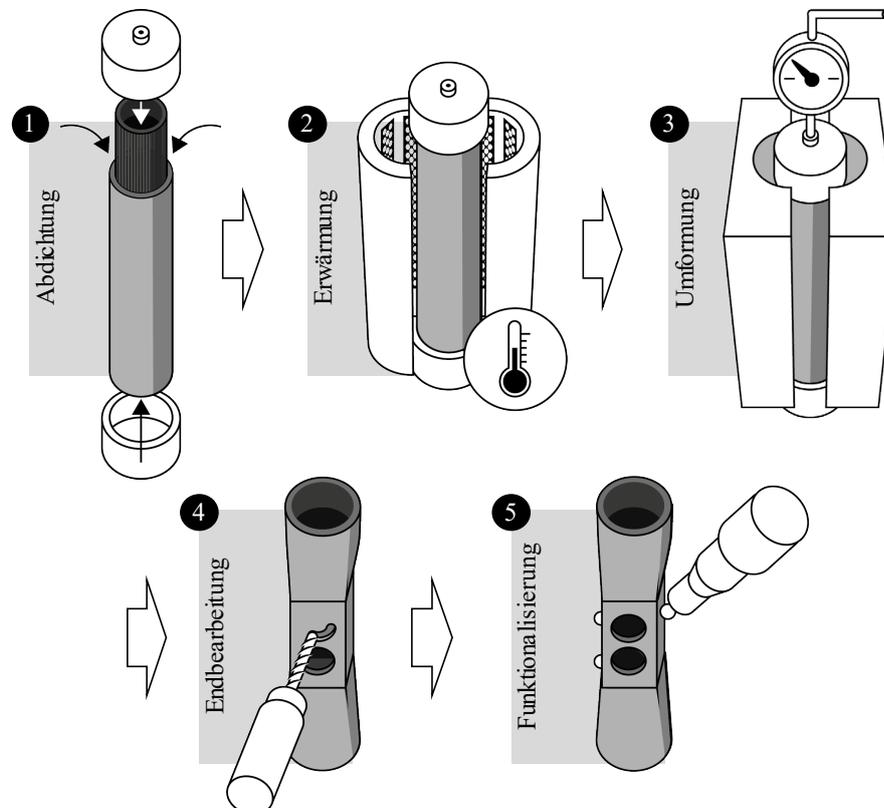


Abb. 3-2: Schematische Darstellung der Prozessschritte des FuHo-Verfahrens [87]

3.2.1 Beschreibung des FuHo-Verfahrens

Die zu Beginn von Abschnitt 3.2 vorgestellten Prozessschritte sind der Ausgangspunkt für die Beschreibung des FuHo-Verfahrens. In den Abschnitten 3.2.1.1 bis 3.2.1.5 werden die einzelnen Prozessschritte und deren Rahmenbedingungen genauer vorgestellt.

3.2.1.1 Abdichtung

Im ersten Prozessschritt ist eine fluiddichte Abdichtung des Halbzeugs erforderlich, um die spätere Umformung bzw. Druckbeaufschlagung des bereitgestellten Halbzeugs zu ermöglichen (siehe Abb. 3-2). Diese umfasst sowohl die Halbzeuginnenfläche als auch die beiden Halbzeugenden. Aus dem Abdichtvorgang darf kein axialer Druck auf das Halbzeug resultieren, da die Kombination aus Axialdruck und anschließender Erwärmung bzw. Erweichung zum Knicken des Halbzeugs führen würde. Für die Handhabung des Halbzeugs in den nachgelagerten Prozessschritten des FuHo-Verfahrens ist eine Verformung der Halbzeugenden im Einspann- bzw. Abdichtbereich unzulässig. Folglich ist in diesem Bereich eine Erwärmung der thermoplastischen Matrix über die Schmelztemperatur zu vermeiden. Inwiefern der Abdichtbereich nach der Umformung entfernt werden muss, hängt von der Bauteilkonstruktion ab (siehe Abschnitt 3.2.1.4). Eine Aufweitung der Halbzeugenden im nicht erwärmten Abdichtbereich durch den Rohrinnendruck oder das Abdichtprinzip muss ebenfalls unterbunden werden, da dies zu einer strukturellen Schädigung des endlosfaserverstärkten thermoplastischen Kunststoffes führen würde. Für die Umformdruckbeaufschlagung des Halbzeugs muss die Abdichtung der Halbzeugenden über eine Möglichkeit zur Druckeinleitung verfügen.

3.2.1.2 Erwärmung

Nach der Abdichtung wird das Halbzeug im zweiten Prozessschritt des FuHo-Verfahrens auf die matrixspezifische Umformtemperatur erwärmt (siehe Schritt 2 in Abb. 3-2). Analog zum Stand der Technik können dabei unterschiedliche Verfahren Verwendung finden (siehe Abschnitt 2). Die Flexibilitätsanforderung (siehe Abschnitt 3.1) fordert ein Erwärmungsverfahren, das sowohl für glas- als auch für kohlenstoffaserverstärkte Halbzeuge anwendbar ist. Unabhängig vom Erwärmungsverfahren gilt es grundsätzlich, das Kollabieren des hohlprofilförmigen Halbzeugs während der Erwärmung zu vermeiden, weshalb eine vertikale Positionierung des Halbzeugs bevorzugt wird. Die homogene Erwärmung des Halbzeugs ist lediglich einseitig von außen möglich, da das Halbzeug im ersten Prozessschritt des FuHo-Verfahrens an den beiden Enden fluiddicht verschlossen wird.

3.2.1.3 Umformung

Das abgedichtete und auf Umformtemperatur erwärmte Halbzeug wird im dritten Prozessschritt in die finale Bauteilgeometrie umgeformt (vergleiche Abb. 3-2). Nicht nur bei der Erwärmung, sondern auch bei der Umformung ist ein mögliches Kollabieren des Halbzeugs zu vermeiden. Das Halbzeug ist daher weiterhin vertikal positioniert und das Formwerkzeug wird über eine horizontale Verfahrbewegung geschlossen. Die Verfahrbewegung des Formwerkzeugs und die Aufbringung der Schließkraft können durch Spritzgießmaschinen mit horizontaler Schließeinheit erfolgen. Die weite Verbreitung dieser Anlagentechnik im Automobilbau verbessert die Integrationsfähigkeit des FuHo-Verfahrens in bestehende Werks- und Produktionsstrukturen. Darüber hinaus ist hiermit die Möglichkeit zur Bauteilfunktionalisierung gegeben (siehe Abschnitt 2.3).

Während des Schließvorgangs des Formwerkzeugs findet bereits eine erste Vorverformung des erwärmten Halbzeugs statt. Ist das Formwerkzeug vollständig geschlossen, resultiert aus der Druckbeaufschlagung des Halbzeugs eine Umformung des endlosfaserverstärkten thermoplastischen Kunststoffes in die Werkzeugkavität. Dabei werden die Fasern weder als stauch- noch als dehnbar betrachtet. Grundlage für die Umformung ist eine relative Lageänderung der einzelnen Fasern [55]. Die Relativbewegungen der Fasern in Abhängigkeit der Faserarchitektur (Gelege, Gewebe und Geflechte) sowie der Belastungsart (Biegung, Zug, Druck und Scherung) sind in [88–91] ausführlich beschrieben. Abb. 3-3 zeigt das mögliche Verhalten eines Halbzeugs bei einer Krümmung senkrecht zur Faserrichtung.

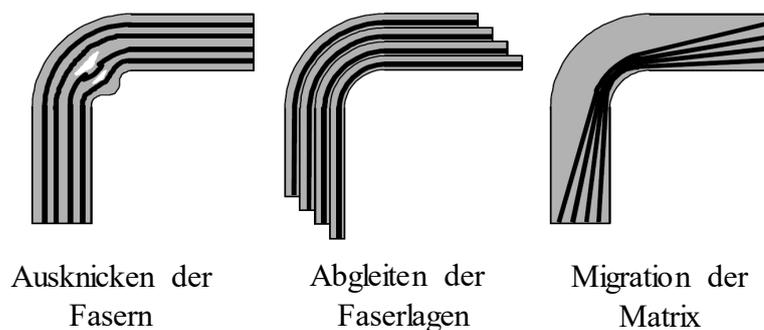


Abb. 3-3: Mögliches Verhalten des Halbzeugs bei der Umformung [54]

Im Falle einer Matrixmigration (siehe Abb. 3-3 rechts) verschieben sich die Fasern zum inneren Radius und führen zu einer matrixreichen Zone im Außenbereich. Werden die Fasern auf der Radiusinnenseite gestaucht, kann es zum Ausknicken der Fasern kommen (siehe Abb. 3-3 links). Die Fasern werden nicht in Faserlängsrichtung belastet, es entstehen Poren und die Formhaltigkeit ist nicht mehr gegeben. [92]

Bei einer doppelt gekrümmten Geometrie treten zusätzliche Schubverformungen auf, die bei unidirektionalen Gelegen zu einer interlaminaren Rotation und somit zu einer Verschiebung der Faserorientierung führen [93, 94]. Damit die Umformung des Halbzeugs fehlerfrei ablaufen kann, sind die in Abb. 3-3 mittig dargestellten interlaminaren Gleitbewegungen der Faserlagen notwendig [94]. Diese Bewegungen sind nur dann möglich, wenn die matrixreichen Schichten zwischen den Faserlagen aufgeschmolzen werden [94]. Die Umformung kann also nur nach einer homogenen Erwärmung des Halbzeugs auf die Schmelztemperatur des Matrixpolymers erfolgen.

Zur Umformung wird über die Abdichtung der Halbzeugenden das Druckmedium ins Halbzeuginnere eingeleitet. Voraussetzung dafür ist eine fluiddichte Isolation der Halbzeuginnenfläche und der Halbzeugenden im ersten Prozessschritt des FuHo-Verfahrens (siehe Abschnitt 3.2.1.1). Bei der Innendruckumformung von metallischen Halbzeugen kommen als Druckmedium vorwiegend Emulsionen auf Wasserbasis zum Einsatz [95]. Beim FuHo-Verfahren erfolgt die Druckbeaufschlagung hingegen mithilfe eines gasförmigen Fluids (z. B. Luft, Stickstoff etc.). Gegenüber anderen Druckmedien, wie beispielsweise Emulsionen oder Öl, ergeben sich dadurch vier Vorteile:

- Hohe Verfügbarkeit des gasförmigen Fluids
- Geringe Aufbereitung erforderlich (z. B. Filtration der Luft)
- Keine Verschmutzung des Hohlprofilbauteils durch die Fluidbeaufschlagung
- Kein Entleeren und Trocknen des Hohlprofilbauteils notwendig

Das Umformwerkzeug bleibt mindestens so lange geschlossen, bis das Halbzeug durch die Druckbeaufschlagung vollständig in die Werkzeugkavität drapiert und die Matrix-Rekristallisationstemperatur unterschritten wurde. Abschließend wird der Druck auf Atmosphärendruck reduziert und das zum Hohlprofilbauteil umgeformte Halbzeug kann aus dem geöffneten Formwerkzeug entnommen werden.

3.2.1.4 Endbearbeitung

Im vierten Prozessschritt des FuHo-Verfahrens wird die finale Geometrie des Hohlprofilbauteils erzeugt (siehe Abb. 3-2). Durch die Bearbeitung werden die fertigungsbedingten Bauteilmängel beseitigt. Die Bearbeitung umfasst unter anderem das Besäumen und Entgraten des Hohlprofilbauteils. In Abhängigkeit von der Bauteilkonstruktion ist auch ein Beschnitt des nicht umgeformten Abdichtbereichs vonnöten. Im Sinne einer geringen Materialeinsatzquote (vergleiche Abschnitt 3.1) ist bei der Endbearbeitung auf möglichst wenig Verschnitt zu achten. Wird das Halbzeug lediglich lokal umgeformt und behält im restlichen Bauteilbereich die konstruktiv erwünschte Querschnittsgeometrie des Halbzeugs bei, so kann ein Beschnitt des Abdichtbereichs komplett entfallen. Neben der Beseitigung von fertigungsbedingten Bauteilmängeln hat die Endbearbeitung das Einbringen von Funktionselementen zum Ziel. Dabei handelt es sich z. B. um konstruktiv benötigte Aussparungen, Bohrungen oder Langlöcher.

Vom Autor durchgeführte experimentelle Untersuchungen zur frästechnischen Bearbeitung des Halbzeugs – eingebracht wurden dabei Bohrungen und Langlöcher – zeigten, dass sich die spanende Bearbeitung von Hohlprofilbauteilen nicht wesentlich von den dazu bereits durchgeführten Untersuchungen für flächige Halbzeuge unterscheidet. Das Aufschwingen des Materials infolge der auftretenden Schneidkräfte ist durch ein geeignetes Bauteilspannkonzentration lösbar.

Umfassendere Untersuchungsergebnisse zur Bearbeitung von endlosfaserverstärkten thermoplastischen Kunststoffen mittels unterschiedlicher Verfahren liegen mit den Arbeiten von [96–101] vor. Die Endbearbeitung des Hohlprofilbauteils wird im Rahmen dieser Arbeit daher nicht weiter betrachtet.

3.2.1.5 Funktionalisierung

Im fünften und letzten Prozessschritt findet die Funktionalisierung des Hohlprofilbauteils statt (vergleiche Abb. 3-2). Im Gegensatz zur Funktionalisierung im Spritzgießverfahren wird auf das dabei notwendige Stützsystem (siehe Abschnitt 2.3) verzichtet. Dadurch entfallen neben Prozesszeiten für das Befüllen und Entleeren des Hohlprofilbauteils auch die Materialkosten für das Stützsystem. Der geschlossene Querschnitt des Hohlprofilbauteils erfordert die kostengünstige und automatisierte Auf- bzw. Anbringung des Funktionselements bei lediglich einseitiger Zugänglichkeit. Für den Fall eines Produktionsfehlers ist eine manuelle Nacharbeitsmöglichkeit zu berücksichtigen. Außerdem sollte das Element zur Funktionalisierung im Sinne der Leichtbauanforderungen zu keinem erheblichen Mehrgewicht des Hohlprofilbauteils führen. Die fortwährende Funktionsfähigkeit des Elements ist durch die Vermeidung von Korrosion gewährleistet.

3.2.2 Einordnung des FuHo-Verfahrens

Zur Einordnung des Herstellungsverfahrens sei zu Beginn auf die im Stand der Technik beschriebenen Herstellungsverfahren (siehe Abschnitt 2.2) sowie deren Einteilung (siehe Abschnitt 2.2.3) verwiesen. Diese Herstellungsverfahren und die zuvor definierten Anforderungen bildeten die Ausgangsbasis für das Herstellungsverfahren, bei dem gemäß Abb. 3-2 zur Steigerung der geometrischen Bauteilkomplexität eine Abdichtung, Erwärmung und Umformung des Halbzeugs stattfindet. Daran schließt sich die Endbearbeitung und Funktionalisierung des hergestellten Hohlprofilbauteils an. Die zuletzt genannten Prozessschritte werden zur Einordnung des Prozesses nicht näher betrachtet, da diese bei vergleichenden Herstellungsverfahren oftmals nicht berücksichtigt werden (siehe Tab. 3-3). In Abb. 3-4 ist das Herstellungsverfahren – mit den Prozessschritten Abdichtung, Erwärmung und Umformung – in die Verfahrenübersicht gemäß Abb. 2-2 eingeordnet.

Gegenüber vergleichbaren Herstellungsverfahren weisen mittels FuHo-Verfahren hergestellte Hohlprofilbauteile folgende Vorteile auf:

- Variable Querschnittsänderung über die Bauteillänge
- Konkave Bauteilgeometrie
- Endlosfaserverstärkung in Umfangsrichtung
- Endlosfaserverstärkung in Längsrichtung
- UD-Lagenaufbau
- Durchlaufzeiten im Bereich des Thermoformens
- Kein Fügebereich
- Hohe Automatisierbarkeit

Tab. 3-3: Vergleichende Bewertung der Herstellungsverfahren

Herstellungsverfahren	Bewertungskriterien			
	Produktionsvolumen pro Zeit	Automatisierung	Bauteilkomplexität	Endlosfaserverstärkung in Umfangsrichtung
FuHo-Verfahren	O	+	+	+
Pultrusion	+	+	O	O
Pullbraiding Pullwinding	+	+	O	+
PAZ	+	+	-	+
IHP	+	+	O	-
Wickeln	O	+	-	+
Flechten	O	+	O	+
TER	-	O	-	+
Fügen flächiger Halbzeuge	O	+	+	-
FIT-Hybrid Twin- O-Sheet	O	+	+	-
DDU	-	O	+	-
BIM / ToHoP	-	O	+	+
IDU seg. FTK	-	O	+	-
SDF / KIF / IFI	-	O	O	+

Legende: + = positive Erfüllung, O = mäßige Erfüllung, - = negative Erfüllung

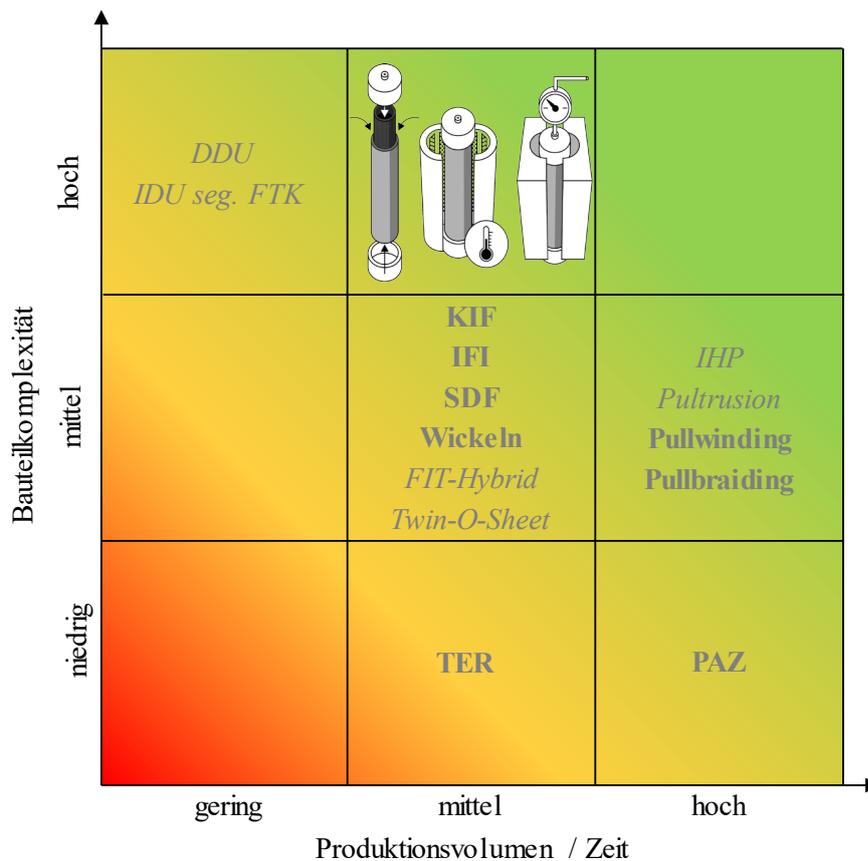


Abb. 3-4: Einordnung des FuHo-Verfahrens

Kursiv gedruckte Herstellungsverfahren bilden keine Umfangsverstärkung ab. Zur Vergleichbarkeit mit anderen Herstellungsverfahren werden nur die ersten drei Prozessschritte des FuHo-Verfahrens betrachtet.

Das Fügen flächiger Halbzeuge gilt als Herstellungsverfahren mit mittlerem Produktionsvolumen pro Zeit und hoher Bauteilkomplexität (siehe Tab. 3-3). Das Fügen flächiger, zuvor oftmals thermogeformter Halbzeuge ermöglicht die Herstellung komplexer Bauteilgeometrien. Diese weisen jedoch einen Fügebereich auf, in dem keine Faserverstärkung vorliegt. Bei einer torsionalen Belastung des Hohlbauteils führen die entstehenden Schubspannungen in der nicht faserverstärkten Fügezone zu einer hohen Belastung des Matrixwerkstoffs, der dadurch eine potentielle Versagensstelle darstellt [48]. Des Weiteren sorgt der Fügebereich – im Vergleich zum FuHo-Verfahren – für einen erhöhten Bauraumbedarf und ein zusätzliches Gewicht des Bauteils. Dies gilt gleichermaßen für das FIT-Hybrid und Twin-O-Sheet Verfahren (siehe Abb. 3-4).

Durch die Segmentierung der Tapes bei der Halbzeugherstellung ist beim Innendruckumformen dieser Faser-Thermoplast-Kreisrohre (IDU seg. FTK) ebenfalls eine hohe Bauteilkomplexität mit variablem Bauteilumfang realisierbar.

Die zur Segmentierung erforderlichen Einschnitte in die Tapes und die anschließende Konditionierung stellen jedoch zusätzlichen Prozessschritte dar und führen zu einem erschwerten Handling des Materials (siehe Hauptfunktionen des Verfahrens in Abb. 3-1). Durch die Segmentierung der Tapes liegt darüber hinaus keine Endlosfaserverstärkung in Umfangsrichtung mehr vor. Für die Umformung sind nach [48] Werkzeugtemperaturen oberhalb der Schmelztemperatur des Matrixpolymers erforderlich. Dies führt, verglichen mit dem FuHo-Verfahren, zu einem geringeren Produktionsvolumen pro Zeit (siehe Abb. 3-4).

Die Schlauchblasverfahren DDU, BIM und ToHoP (siehe Abb. 2-2 und Abb. 3-4) verwenden als Halbzeug gleichermaßen Geflechte aus Hybridgarn. Die Verwendung von Hybridgarnen erlaubt eine gute Umformung des Halbzeugs und somit eine hohe Bauteilkomplexität. Ein Nachteil gegenüber dem FoHo-Verfahren ist die Konsolidierung und Imprägnierung des Halbzeugs im Zuge der Bauteilherstellung, die zu einer längeren Durchlaufzeit und einer höheren Prozesskomplexität führt. Durch die hohe Viskosität thermoplastischer Kunststoffe besteht die Gefahr der Porenbildung [63].

Verglichen mit dem beim Herstellungsverfahren verwendeten Halbzeug mit unidirektionaler Faserorientierung führt die aus der Flechttechnik resultierende Faserondulation sowohl bei den Schlauchblasverfahren als auch beim Pullbraiding und Flechten (siehe Abb. 2-2) zu geringeren mechanischen Eigenschaften.

Dank der kontinuierlichen Herstellung ermöglichen die in Abb. 3-4 und Tab. 3-3 aufgeführten Pultrusionsverfahren ein hohes Produktionsvolumen bei mittlerer Profil- bzw. Bauteilkomplexität. Die Herstellung von Hohlprofilbauteilen mit variabler lokaler Querschnittsänderung ist hingegen nicht möglich.

4 Technische Umsetzung der Prozesstechnik

Das folgende Kapitel befasst sich gemäß Tab. 3-1 mit der Suche nach Lösungsprinzipien zur Realisierung der zuvor in den Abschnitten 3.1 und 3.2 definierten Anforderungen und Funktionen. Der Aufbau dieses Kapitels orientiert sich an den in Abschnitt 3.2 eingeführten Prozessschritten des FuHo-Verfahrens (siehe Abb. 3-2). Zu Beginn der Abschnitte 4.1 bis 4.4 werden für jeden Prozessschritt die zur Umsetzung der jeweiligen Anlagenkomponente erforderlichen Grundlagen beleuchtet und bereits bestehende technische Lösungen systematisch bewertet. Anschließend wird das Konzept zur technischen Umsetzung des FuHo-Verfahrens detaillierter vorgestellt.

4.1 Abdichtung

Für die spätere Umformung findet zu Beginn des FuHo-Verfahrens eine fluiddichte Abdichtung der Halbzeuginnenfläche sowie der beiden Halbzeugenden statt. Das hierfür erarbeitete Abdichtkonzept wird in Abschnitt 4.1.2 näher erläutert. Zuvor beinhaltet Abschnitt 4.1.1 die Grundlagen sowie Vor- und Nachteile vorhandener Abdicht- und Handhabungskonzepte.

4.1.1 Grundlagen zur Abdichtung und Handhabung

Bereits bestehende Verfahren für die Umformung und Handhabung von Hohlprofilen sind Grundlage für die technische Umsetzung des neuen Abdichtkonzepts. Die Möglichkeiten zur Sicherstellung einer fluiddichten Halbzeuginnenfläche werden in Abschnitt 4.1.1.1 aufgezeigt. Abschnitt 4.1.1.2 befasst sich mit den etablierten Verfahren zur Abdichtung der Halbzeugenden. Abschnitt 4.1.1.3 schließt mit den Grundlagen zur Handhabung von Halbzeugen ab.

4.1.1.1 Abdichtung der Halbzeuginnenfläche

Die Dichtigkeit des Halbzeugs gegenüber dem zur Umformung erforderlichen Druckmedium bzw. gasförmigen Fluid kann grundsätzlich auf drei unterschiedliche Arten sichergestellt werden. Zunächst ist die Abdichtung des Halbzeugs durch eine gezielte Temperaturführung während der Halbzeugerwärmung naheliegend. Über die Wandstärke des Halbzeugs wird ein Temperaturgradient eingestellt, der die äußeren Schichten des endlosfaserverstärkten thermoplastischen Kunststoffes auf die Schmelztemperatur des Matrixwerkstoffs erhitzt.

Die innere Schicht des Halbzeugs bleibt hingegen unterhalb der Schmelztemperatur und fungiert als fluiddichte Barriere (siehe Schmelzdruckformen in Abschnitt 2.2.2.6). Durch die von [45] angewandte Abdichtung ist keine Materialoptimierung des Halbzeugs erforderlich und es bedarf keiner zusätzlichen Materialien, die als fluiddichte Barriere fungieren. Experimentelle Untersuchungen zur Übertragung dieser Abdichtung auf das FuHo-Verfahren haben jedoch gezeigt, dass die Temperaturgradientensteuerung nicht möglich ist. Während der Umformung des Halbzeugs in die Werkzeugkavität riss die Barrierschicht auf, was vielfach zur Undichtigkeit des Halbzeugs und zum schlagartigen Entweichen des gasförmigen Fluids führte. In weiterer Folge konnte der Rohrinnendruck nicht reproduzierbar aufrechterhalten werden. Dies bestätigen auch von Schmidt [48] durchgeführte Untersuchungen. Erschwert wird die prozesssichere Temperaturgradientensteuerung durch die vertikale Positionierung des Halbzeugs während der Erwärmung (siehe Abschnitt 3.2.1.2). Hervorgerufen durch die freie Konvektion steigt die erwärmte Luft im Inneren des Halbzeugs auf; es kommt zu einer ungleichmäßigen Temperaturverteilung auf der Halbzeuginnenseite. Durch die Umformung des hohlprofilförmigen Halbzeugs kam es zudem zur lokalen Delamination einzelner Fasern auf der Bauteilinnenseite. Abb. 4-1 zeigt stellvertretend für diesen Effekt ein hohlprofilförmiges Halbzeug mit kreisförmigem Ausgangsquerschnitt, das zu einem Hohlprofilbauteil mit rechteckigem Querschnitt umgeformt wurde.

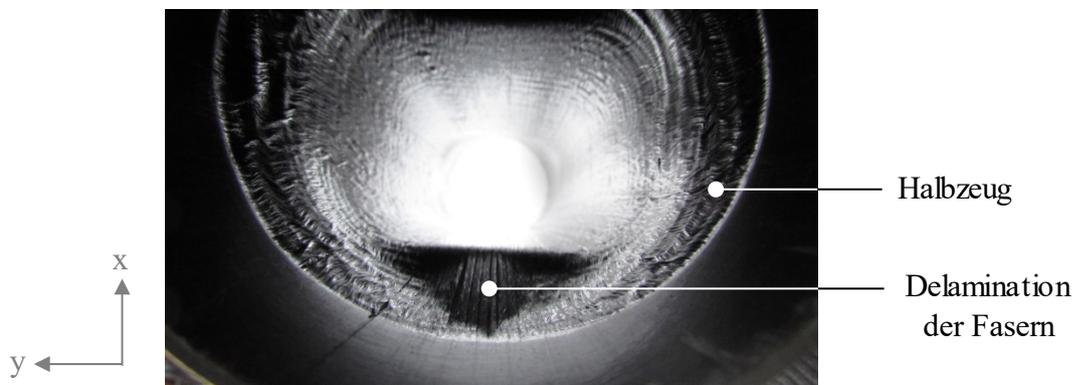


Abb. 4-1: Delamination der Fasern auf der Bauteilinnenseite nach [70]

Die inneren Fasern des endlosfaserverstärkten thermoplastischen Kunststoffes folgen nicht der konkaven Geometrie der Werkzeugkavität. Dies führt zu einer tangentialen Ablösung der Fasern im Übergangsbereich zwischen Kreis- und Rechteckquerschnitt (siehe Abb. 4-1). Dabei delaminieren die Lagen vom restlichen, gemäß der Werkzeugkavität drapierten Laminat. Die fluiddichte innere Schicht ist lokal durchbrochen und der im Halbzeug herrschende Umformdruck p_u stellt sich auch zwischen den delaminierten Fasern und dem restlichen Laminat ein (vergleiche Abb. 4-2 links). Da sich folglich immer ein Druckgleichgewicht einstellt, ist keine vollständige Drapierung der delaminierten Fasern mehr möglich.

Versuche mit erhöhter Schichtdicke unterhalb der Schmelztemperatur konnten zwar den Effekt der Delamination verringern, gingen aber mit einem erschwerten Drapierverhalten des Halbzeugs einher. Dies führte zu zunehmender Faltenbildung auf der Halbzeuginnenseite.

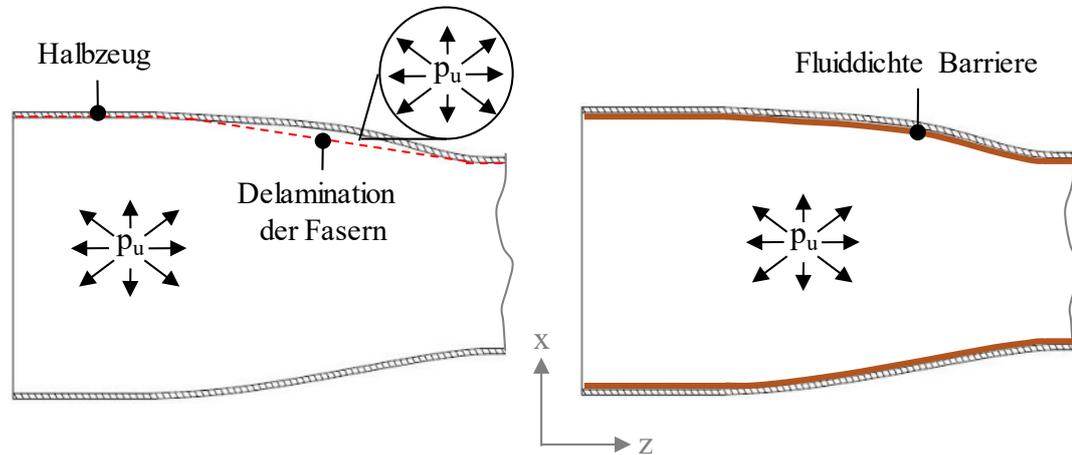


Abb. 4-2: Einfluss einer fluiddichten Barriere auf das Umformverhalten der Halbzeuge
Schematische Darstellung. Links: Delamination der Fasern bei Halbzeugumformung mit Temperaturgradientensteuerung. Rechts: Halbzeugumformung mit fluiddichter Barriere.

Eine weitere Möglichkeit stellt die Modifikation des Halbzeugs zur Verbesserung der Dichtigkeit gegenüber einem gasförmigen Fluid dar. Das Strahlenvernetzen von thermoplastischen Kunststoffen führt zu einem gummielastischen Verhalten oberhalb der Kristallitschmelztemperatur und damit – gegenüber unvernetzten Kunststoffen – zu einer erhöhten Steifigkeit und Viskosität des Materials [102, 103]. Da eine vollständige Strahlenvernetzung des Matrixsystems zu signifikant steigenden Umformkräften führt, wurde von [59] die Modifikation der Randschicht entwickelt. Durch Aufbringen einer zusätzlichen Halbzeugdeckschicht, in Form einer strahlenvernetzten Folie, wird die Fluiddichtigkeit des Materials verbessert, ohne die Umformbarkeit stark einzuschränken [59] (siehe auch Twin-O-Sheet-Verfahren in Abschnitt 2.2.2.4).

Die Modifikation des hohlprofilförmigen Halbzeugs analog zum Twin-O-Sheet-Verfahren ist jedoch aus prozesstechnischen Gründen nicht möglich. Im Zuge der kontinuierlichen Halbzeugherstellung wurde das Einbringen einer strahlenvernetzten Folie als Deckschicht im Halbzeuginneren untersucht. Bei den im PAZ-Verfahren (siehe Abschnitt 2.2.1.2) üblichen Prozessparametern haftet die Folie am Aufweidorn an und staut sich auf diesem auf. In weiterer Folge kommt es zu einer zunehmenden Materialanhäufung und zum Reißen der Folie. Bei verringerter Temperatur des Aufweidorns kommt keine stoffschlüssige Verbindung zwischen der strahlenvernetzten Folie und den Tapelagen zustande. [104]

Das Einbringen eines zusätzlichen Materials ist nach der Temperaturgradientensteuerung und der Halbzeugmodifikation die dritte Möglichkeit zur Abdichtung der Halbzeuginnenfläche. Dieses Zusatzmaterial, z. B. in Form eines Blasschlauchs, fungiert gemäß Abb. 4-2 als fluiddichte Barriere zwischen Druckmedium und Halbzeug. Die beispielsweise in Abschnitt 2.2.2.5 erläuterten Schlauchblasverfahren stellen auf diese Weise eine Abdichtung zwischen den Hybridgarnen und dem Druckmedium her. Der Blasschlauch steht, zumindest während der Beaufschlagung mit Umformdruck (p_u), in unmittelbarem Kontakt mit dem umzuformenden Halbzeug. Somit beeinflusst der Blasschlauch die innere Oberflächenbeschaffenheit des Hohlprofilbauteils. Unregelmäßigkeiten im Blasschlauch (z. B. Fügstellen) können sich während der Druckbeaufschlagung auf das Halbzeug übertragen und zu fehlerhaften Bauteilen führen. Der Blasschlauch kann nach der Umformung im Inneren des Hohlprofilbauteils verbleiben (Einweg-Blasschlauch) oder aber entnommen und wiederverwendet werden (Mehrweg-Blasschlauch). [53]

4.1.1.2 Abdichtung der Halbzeugenden

Neben einer Abdichtung der Halbzeuginnenfläche (siehe Abschnitt 4.1.1.1) ist die Abdichtung der beiden Halbzeugenden eine wesentliche Voraussetzung für die spätere Umformdruckbeaufschlagung des Halbzeugs. Beim Umformen von metallischen Hohlprofilen wird zwischen dem Innenhochdruckumformen (IHU) und dem luftgestützten Umformen (LGU) unterschieden [95, 105]. Zur Herstellung von Hohlkörpern aus thermoplastischem Kunststoff ist das Blasformen etabliert [106]. Bestehende technische Lösungen, die für das IHU- und LGU-Verfahren zur Abdichtung der Halbzeugenden erarbeitet wurden, sind in Tab. 4-1 gegenübergestellt.

Tab. 4-1: Bewertung unterschiedlicher Abdichtkonzepte nach [95]

Bewertungskriterien	Abdichtkonzept				
	gestufte Dichtung	Ringzackendichtung	Konusdichtung	Keilelementdichtung	O-Ringdichtung
Abdichtung durch Axialdruck	+	+	+	+	-
Hoher Umformdruck	+	O	O	O	-
Halbzeugverformung	+	+	+	+	-
Selbstzentrierung	+	-	+	+	-
Abdichtung dünnwandiger Halbzeuge	-	-	-	+	+

Legende: + = positive Erfüllung, O = mäßige Erfüllung, - = negative Erfüllung

Aus dem in Tab. 4-1 dargestellten Vergleich der Abdichtkonzepte wird ersichtlich, dass mit Ausnahme der O-Ring-Abdichtung sämtliche bestehenden Abdichtkonzepte über den Aufbau eines Axialdrucks auf das Halbzeug abdichten. Dies ermöglicht hohe Umformdrücke, da die Abdichtkonzepte mittels hydraulischem, axialem Stellzylinder verfahren, um der aus dem Umformdruck resultierenden Reaktionskraft entgegenzuwirken [95]. Eine Abdichtung nach diesem Prinzip ist beim zu entwickelnden Abdichtvorgang gemäß Abschnitt 3.2 jedoch technisch nicht möglich, da ein Axialdruck bei der nachgelagerten Erwärmung zum Kollabieren des Halbzeugs führen würde. Nachteilig an der Abdichtung mittels Axialdruck ist zudem, dass metallische Halbzeuge im Abdichtbereich plastisch verformt werden. Dies gilt gleichermaßen für das Blasformverfahren, bei dem der konische Blasdorn auch als Abdichtkonzept fungiert und analog zur Konusdichtung den thermoplastischen Vorformling zur Abdichtung verformt [106, 107]. Diese plastische Verformung des Halbzeugs würde jedoch zu einer Beschädigung des Faserverbundwerkstoffs führen und ist daher auch nicht zulässig (siehe Abschnitt 3.2). Einzig die O-Ring-Dichtung dichtet nicht über einen Axialdruck, sondern über den radialen Anpressdruck des O-Rings an die Innenseite des Halbzeugs ab. Ein Axialdruck zum Anpressen des O-Rings führt nicht zu einer höheren Abdichtwirkung. Eine Selbstzentrierung zwischen Abdichtkonzept und Halbzeug ist zwar mit der gestuften Dichtung, der Konusdichtung und der Keilelementdichtung möglich, wird aber aufgrund des Axialdrucks nicht weiter in Betracht gezogen [95]. Die O-Ring-Dichtung und die Keilelementdichtung sind auch bei dünnwandigen Halbzeugen anwendbar (siehe Tab. 4-1) [95]. Die von Schmidt [48] und Strohäcker [53] zur Abdichtung verwendete Doppelkonusgeometrie kommt für das FuHo-Verfahren ebenfalls nicht in Betracht. Ähnlich der Konusdichtung beim IHU-Verfahren wird durch die Verspannung zweier Konuselemente gegeneinander der verwendete Blasschlauch geklemmt und abgedichtet. Das Halbzeug wird hingegen nicht verspannt, da dies zu einer Beschädigung des Materials führen würde. Ohne das gezielte Greifen des Halbzeugs ist jedoch keine exakte Handhabung (siehe Abschnitt 4.1.1.3) in den nachgelagerten Prozessschritten möglich.

4.1.1.3 Handhabung von hohlprofilförmigen Halbzeugen

Handhabung (engl. „handling“) ist das definierte Verändern oder vorübergehende Aufrechterhalten einer vorgegebenen räumlichen Anordnung von geometrisch bestimmten Körpern in einem Bezugskoordinatensystem ohne beabsichtigte Veränderung am Objekt selbst [108]. Nach [109, 110] kann zwischen mechanischen, pneumatischen, magnetischen und adhäsiven Greifern differenziert werden. Aufgrund des hohlprofilförmigen Halbzeugs, des Faserverbundmaterials und des FuHo-Verfahrens (siehe Abschnitt 3.2) sind magnetische, adhäsive und pneumatische Greifersysteme für die Handhabung nicht geeignet. Die in Betracht gezogenen mechanischen Greifer machen sich das Prinzip der Reib- bzw. Druckkraft zunutze.

Mechanische Greifer können wiederum in Fingergreifer, Parallelgreifer und Innengreifer untergliedert werden, wobei sich Innengreifer insbesondere zur Handhabung von hohlprofilförmigen Halbzeugen eignen [109, 110]. Für den Innengriff können Zwei- oder Mehrfingergreifer sowie Greifer mit einem elastischen Greiforgan eingesetzt werden. Innengreifer halten ein Werkstück meist durch das Wirkprinzip des Klemmens fest [109]. Sowohl die Firma FIPA GmbH als auch die Firma Gimatic s.r.l haben einen einfachwirkenden Dehnungsgreifer entwickelt [111]. Dabei wird ein elastomerer Greifbalg über einen druckluftbetätigten Kolben gequetscht und radial expandiert. Folglich wird der expandierte Greifbalg gegen die Innenseite des Hohlprofils geklemmt. Somit kann das zu handhabende Bauteil angehoben und bewegt werden. Der Expansions-Fingergreifer ermöglicht eine gute und einfache Handhabung von hohlprofilförmigen Halbzeugen. Die gemäß Abschnitt 3.2 erforderliche Umformdruckbeaufschlagung des Halbzeugs oder eine Vermeidung der Halbzeugerwärmung im Abdichtbereich ist mit diesen Systemen hingegen nicht möglich.

4.1.2 Technische Umsetzung der Abdichtung

Die bestehenden technischen Möglichkeiten zur Abdichtung und Handhabung (siehe Abschnitt 4.1.1) von hohlprofilförmigen Halbzeugen zeigen bereits erste Lösungsansätze zur Erfüllung der definierten Rahmenbedingungen auf. Während zur Abdichtung der Halbzeuginnenfläche auf ein bestehendes Konzept zurückgegriffen werden kann (siehe Abschnitt 4.1.2.1), ist zur Abdichtung der Halbzeugenden die Erarbeitung eines neuen Abdichtkonzepts erforderlich (siehe Abschnitt 4.1.2.2).

4.1.2.1 Abdichtung der Halbzeuginnenfläche

Da sich zur Abdichtung der Halbzeuginnenfläche sowohl die Temperaturgradientensteuerung als auch die Halbzeugmodifikation als nicht geeignet erwiesen haben (vergleiche Abschnitt 4.1.1.1), wird analog zu den Schlauchblasverfahren (siehe Abschnitt 2.2.2.5) ein Blasschlauch verwendet. Der sich während der Druckbeaufschlagung mit gasförmigem Fluid im Blasschlauch einstellende Umformdruck (p_u) führt zu einem gleichmäßigen und reproduzierbaren Umform- bzw. Konsolidierungsdruck. Der Blasschlauch muss der matrixspezifischen Umformtemperatur des Halbzeugs standhalten und ist nach der Umformung gemäß den Anforderungen (vergleiche Abschnitt 3.1) für weitere Umformvorgänge wiederzuverwenden.

Der Mehrweg-Blasschlauch muss zu jedem Zeitpunkt und nach mehrfacher Verwendung stets dicht sein. Neben einer hohen Temperaturbeständigkeit ist auch eine gute Verformbarkeit bei Raumtemperatur erforderlich, um das Einbringen des Blasschlauchs ins Halbzeuginnere sowie die Abdichtung der Halbzeugenden zu ermöglichen. Weiter ist eine homogene Struktur und Oberflächenqualität des Blasschlauchs anzustreben, da sich Inhomogenitäten im Blasschlauch am Hohlprofilbauteil abzeichnen. [53]

Für eine gute Entformbarkeit und Formflexibilität des Blasschlauchs wird eine geringe Wandstärke des Blasschlauchs angestrebt. Dies steht jedoch im Widerspruch zu einer hohen Robustheit, die mit einer Erhöhung der Wandstärke einhergeht. [53]

Für das konzeptionierte FuHo-Verfahren werden zur Sicherstellung einer fluiddichten Barriere Blasschläuche aus peroxisch vernetztem Silikon und mit kreisförmigem Querschnitt herangezogen. Die Einsatzfähigkeit ist bis zu einer Temperatur von 300 °C gewährleistet. Die Blasschläuche weisen durch die Herstellung im Extrusionsverfahren eine homogene Struktur sowie eine gleichmäßige Oberflächenqualität auf. Mit der Unterstützung von [70] durchgeführte Untersuchungen haben gezeigt, dass ein auf der Halbzeuginnenfläche anliegender Blasschlauch zu einer stark verlängerten Erwärmungsdauer führt. Ein auch bei [48] verwendeter, anliegender Blasschlauch entzieht dem Halbzeug während des einseitigen Erwärmungsvorgangs Wärme und verzögert dadurch das Erreichen der matrixspezifischen Umformtemperatur. Der Außendurchmesser des Blasschlauchs ist daher kleiner als der Innendurchmesser des Halbzeugs. Während der Erwärmung liegt der Blasschlauch somit nicht auf der Halbzeuginnenfläche an und das Erwärmungsverhalten des Halbzeugs wird nicht beeinträchtigt. Durch einen Blasschlauch mit Untermaß wird zudem die Vorverformung des Halbzeugs während dem Schließvorgang des Formwerkzeugs nicht beeinträchtigt (vgl. Abschnitt 3.2.1.3). Bei einer Druckbeaufschlagung weitet sich der Blasschlauch zur Umformung des Halbzeugs auf. Nach dem Umformvorgang wird der Umformdruck auf Atmosphärendruck reduziert und der Blasschlauch schrumpft auf sein ursprüngliches Nenn- bzw. Untermaß. Dies wiederum verbessert die Entformbarkeit des Blasschlauchs nach der Herstellung des Hohlprofilbauteils und erleichtert die Einbringung in ein neues, umzuformendes Halbzeug.

4.1.2.2 Abdichtung der Halbzeugenden

Das methodische Vorgehen bei der Realisierung des Abdichtkonzepts basiert auf einer Kombination des Münchner Vorgehensmodells nach Lindemann [112] und des Spiralmodells nach Böhm [113]. Sie bilden die Grundlage für die in Zusammenarbeit mit [114] und unter Zuhilfenahme des morphologischen Kastens systematisch erarbeiteten Lösungsalternativen. Jenes Abdichtkonzept, welches sich unter Berücksichtigung der Rahmenbedingungen und Anforderungen als besonders geeignet erwiesen hat, wird in seiner Funktionsweise und Prozesstechnik nun detaillierter beschrieben. Das Abdichtkonzept basiert auf den technischen Lösungsansätzen der O-Ring-Dichtung und des Dehnungsgreifens (siehe Abschnitt 4.1.1), die um prozesstechnisch erforderliche Funktionen erweitert wurden.

Das Abdichtkonzept, im Folgenden auch Dichtstempel genannt, besteht aus vier Komponenten: Kolbenstange, Teller, Außenhülse und Balg (siehe Abb. 4-3). Die Kolbenstange ist zur Druckmessung und Umformdruckbeaufschlagung des Halbzeugs bzw. Blasschlauchs sowie zur Temperaturmessung im Halbzeuginneren mit zwei Durchgangsbohrungen versehen.

Am oberen Ende der Kolbenstange befindet sich für die externe axiale Stellbewegung der Kolbenstange ein zylindrischer Kopf. Am unteren Ende der Kolbenstange ist zur Anbindung des Tellers ein Außengewinde angebracht. Kommt es im laufenden Betrieb zu einer Beschädigung des Balgs, kann dank der Verschraubung der Teller abgenommen und der defekte Balg wartungsfreundlich getauscht werden. Mithilfe des Tellers wird der Balg bei einer axialen Stellbewegung der Kolbenstange expandiert. Dies führt zu einer Aufweitung des zuvor ins Halbzeuginnere eingebrachten Blasschlauchs. In weiterer Folge entsteht eine Radialkraft im Inneren des hohlprofilförmigen Halbzeugs. Dadurch wird der Blasschlauch fluiddicht an den Dichtstempel gekoppelt. Da der Außendurchmesser des Blasschlauchs kleiner als der Innendurchmesser des Halbzeugs ist (siehe Abschnitt 4.1.2.1), reicht im Gegensatz zum Balg die bei einer O-Ring-Dichtung mögliche Expansion des O-Rings nicht für eine fluiddichte Koppelung aus.

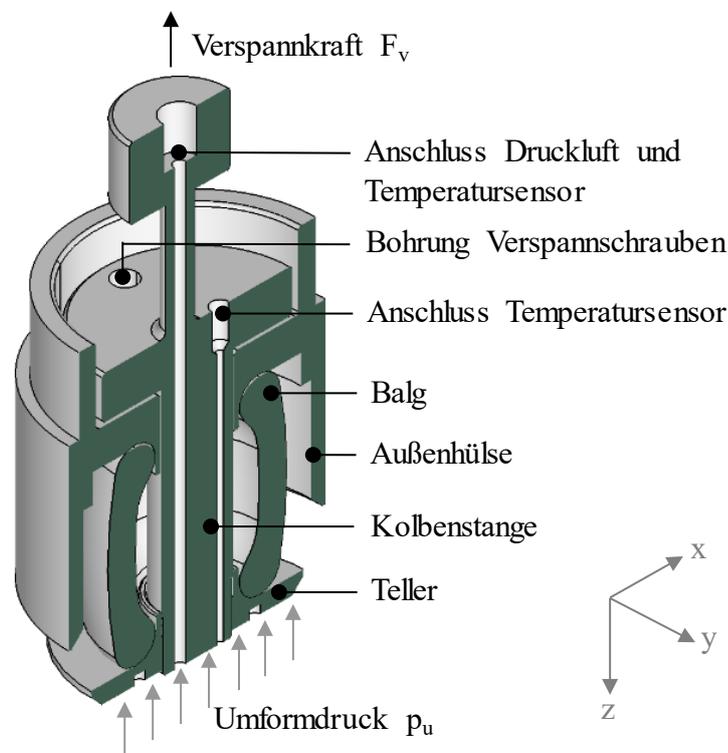


Abb. 4-3: Funktionsprinzip des Dichtstempelkonzepts nach [87, 115]

Die plattenförmige Ausführungsform des Tellers bietet den Vorteil, dass der zur Umformung im Halbzeug bzw. Blasschlauch aufgebaute Umformdruck (p_u) flächig auf den Teller wirkt und somit eine Druckkraft erzeugt (siehe Abb. 4-3). Diese Druckkraft bewirkt eine zusätzliche axiale Kompression des Balgs, welche dessen radiale Expansion verstärkt und somit zu einer Selbstverstärkung der Dichtfunktion führt. Die Fase am unteren Ende der Außenhülse verhindert eine Beschädigung des Halbzeugs bei der Montage des Dichtstempels.

Die innere Fläche der Außenhülle sorgt für eine Zentrierung des Dichtstempels und verhindert, dass die bei der Expansion des Balgs auftretende Radialkraft das Halbzeug verformt bzw. beschädigt. Die Außenseite der Außenhülle unterbindet eine Erwärmung des Halbzeugs im Abdichtbereich während des Erwärmungsvorgangs (siehe Abschnitt 4.2). Abb. 4-4 zeigt exemplarisch den Temperaturverlauf während der Erwärmung auf der Innenseite des Halbzeugs im Bereich der Außenhülle.

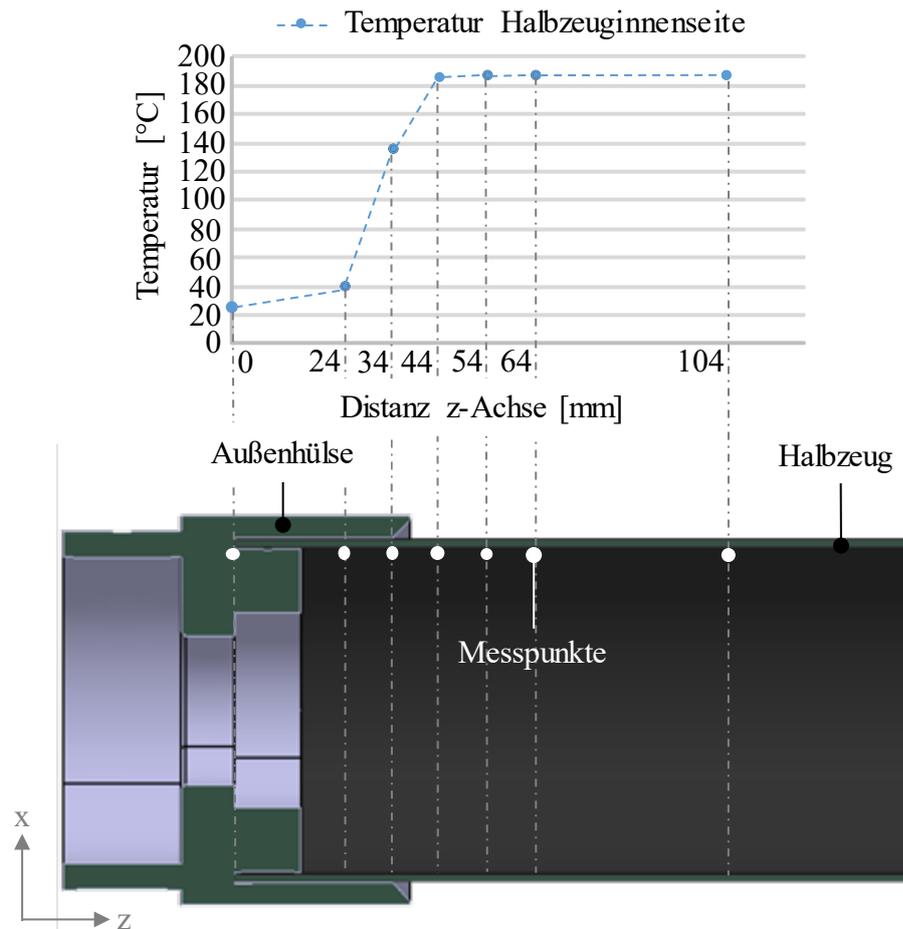


Abb. 4-4: Temperatur der Halbzeuginnenseite während des Erwärmungsvorgangs nach [114]
Temperaturmessung auf der Innenseite des Halbzeugs (Wandstärke 1,6 mm) nach 25 Sekunden Erwärmungszeit.

Im Inneren des Halbzeugs wurden dazu in unterschiedlichen Abständen Thermoelemente (Details siehe Anhang, Tab. A-1) aufgebracht, die eine Messung der Halbzeugtemperatur ermöglichen. Aus Abb. 4-4 wird ersichtlich, dass die abschirmende Wirkung der Aluminium-Außenhülle (6 mm Wandstärke) einen deutlichen Abfall der Halbzeugtemperatur zur Folge hat.

Die im Randbereich der Außenhülse auftretende Temperatur von 140 °C auf der Innenseite des Halbzeugs liegt unterhalb der zulässigen Dauereinsatztemperatur eines Balgs aus Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk (EPDM) [116]. Da sich zwischen Balg und Halbzeuginnenseite zudem noch der Blasschlauch befindet, stellt das in Abb. 4-4 dargestellte Szenario bereits einen Extremfall dar.

Die axiale Stellbewegung der Kolbenstange wird beim erarbeiteten Abdichtkonzept durch eine sogenannte Dichtstempel-Verspannvorrichtung bewerkstelligt (siehe Abb. 4-5). Die Verspannvorrichtung übt zur Expansion des Balgs eine Verspannkraft F_V auf die Kolbenstange aus. Dazu ist der pneumatische Zylinder der Dichtstempel-Verspannvorrichtung gemäß Abb. 4-5 über eine gabelförmige Kupplung formschlüssig mit dem zylindrischen Kopf der Kolbenstange verbunden. Während über den pneumatischen Zylinder die Verspannkraft aufgebracht wird, stützt sich die Außenhülse des Dichtstempels auf der Gegenhalterplatte ab. Nach einer Arretierung der mit Verspannkraft beaufschlagten Kolbenstange kann die Kupplung gelöst und der Dichtstempel aus der Dichtstempel-Verspannvorrichtung entnommen werden.

Durch die Entkoppelung von Dichtstempel und Dichtstempel-Verspannvorrichtung ergeben sich gegenüber bestehenden Lösungskonzepten, bspw. dem Expansions-Fingergreifer (siehe Abschnitt 4.1.1.3), folgende Vorteile:

- Die Verspannvorrichtung kann unabhängig vom Dichtstempel ausgelegt und konzipiert werden. So ist grundsätzlich eine Variation der Vorrichtung möglich, bspw. hinsichtlich der maximal erzielbaren Verspannkraft (F_V) durch Veränderung des pneumatischen Zylinders, ohne den Dichtstempel selbst zu beeinflussen.
- Durch die Verlagerung der Verspannfunktion in die Dichtstempel-Verspannvorrichtung reduzieren sich Größe, Gewicht und Komplexität des Dichtstempels.
- Der pneumatische Zylinder muss nur zur Expansion des Balgs und nicht dauerhaft mit Druckluft beaufschlagt werden.
- Die Dichtstempel-Verspannvorrichtung kann unabhängig von den nachgelagerten Prozessschritten mehrere Halbzeuge abdichten.
- Über den zylindrischen Kopf der Kolbenstange bzw. des Dichtstempels ist eine Handhabung des abgedichteten Halbzeugs in den nachgelagerten Prozessschritten möglich.

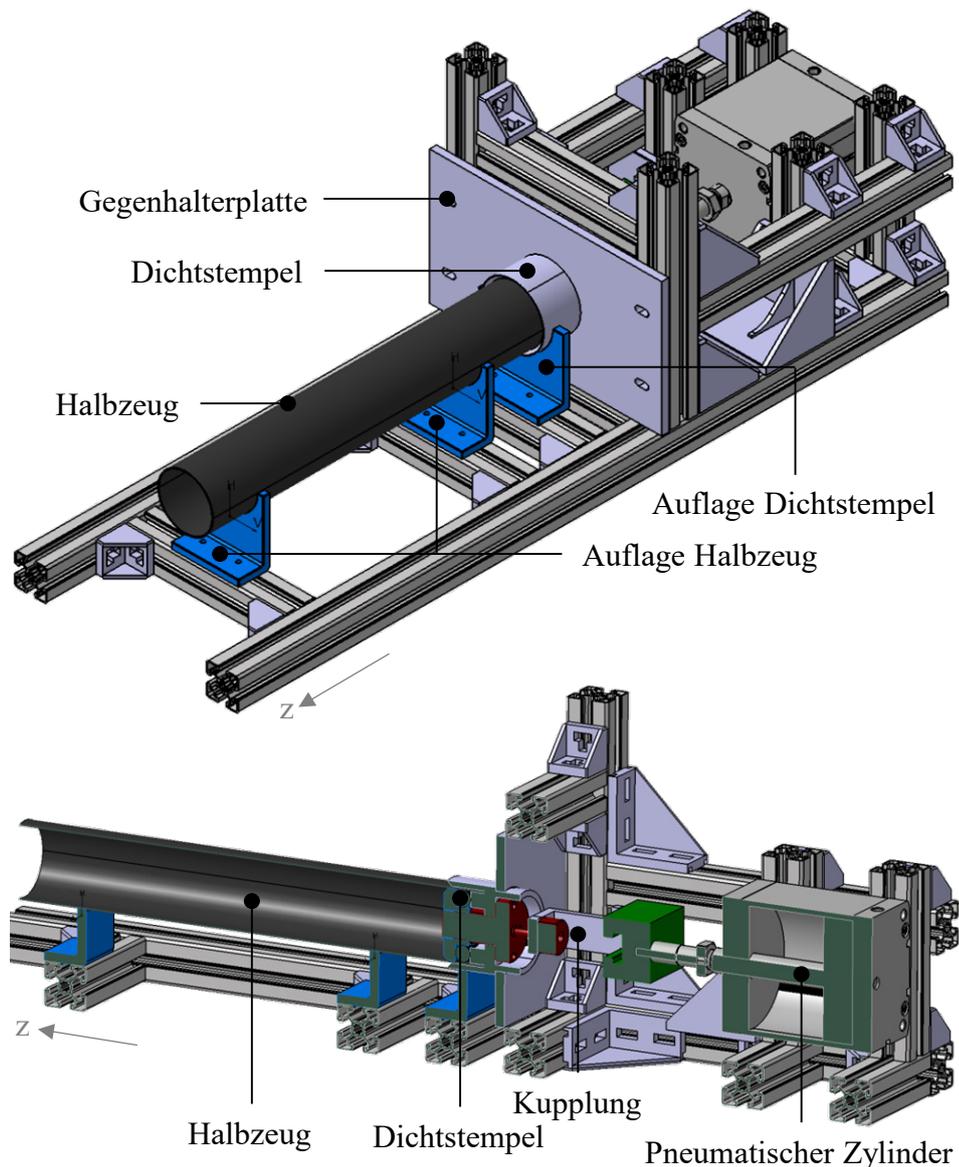


Abb. 4-5: Funktionsprinzip der Dichtstempel-Verspannvorrichtung nach [114]

4.2 Erwärmung

Im zweiten Prozessschritt des FuHo-Verfahrens wird das zuvor abgedichtete Halbzeug auf die matrixspezifische Schmelz- bzw. Umformtemperatur erwärmt. Entscheidend ist eine möglichst konstante Verteilung der erforderlichen Verarbeitungstemperatur [117]. In Abschnitt 4.2.1 werden zunächst verschiedene Erwärmungsverfahren bewertet, um für das FuHo-Verfahren ein geeignetes Verfahren auszuwählen. Das ausgewählte Verfahren wird anschließend genauer beschrieben. Abschnitt 4.2.2 befasst sich abschließend mit der technischen Umsetzung des Erwärmungskonzepts.

4.2.1 Grundlagen zur Erwärmung

Sämtliche Erwärmungsverfahren haben ein möglichst rasches Erreichen der Umformtemperatur sowie eine möglichst kurze Verweildauer des Halbzeugs bei dieser Umformtemperatur zum Ziel, um eine thermische Degradation des Matrixpolymers zu vermeiden [118]. Tab. 4-2 vergleicht die Erwärmungsverfahren Kontakterwärmung, Heißgas, Induktion, elektrischer Widerstand und Infrarot (IR) anhand unterschiedlicher Bewertungskriterien.

Tab. 4-2: Bewertung unterschiedlicher Erwärmungsverfahren nach [119–121]

Bewertungskriterien	Erwärmungsverfahren				
	Kontakt- erwärmung	Heißgas	Induktion	Elektr. Widerstand	Infrarot
Geschwindigkeit	+	-	+	+	+
Materialvariation	+	+	-	-	+
Flexibilität	-	+	+	+	+
Regelbarkeit	O	O	+	+	O
Maschinenintegration	+	+	+	+	+
Temperaturhomogenität	+	O	+	+	O
Überhitzung	+	-	+	+	O

Legende: + = positive Erfüllung, O = mäßige Erfüllung, - = negative Erfüllung

Die Erwärmung des Halbzeugs mittels Induktion oder direktem elektrischen Widerstand kommt für eine weitere Betrachtung nicht in Frage, da die Erwärmung gemäß der Anforderung an die Materialvariation (vergleiche Abschnitt 3.1) sowohl bei glas- als auch bei kohlenstoffaserverstärkten Halbzeugen durchführbar sein soll. Die beiden Verfahren wären hingegen nur bei Halbzeugen mit Kohlenstoffaserverstärkung anwendbar. Das Erwärmungskonzept soll für eine hohe Flexibilität zudem möglichst unabhängig von der Geometrie des Halbzeugs sein. Somit scheidet das Verfahren der Kontakterwärmung aus, da die erforderlichen Heizplatten für jede Geometrie adaptierbar sein müssen, um einen flächigen Kontakt zwischen Halbzeug und Heizplatte sicherzustellen. Verglichen mit Heißgas ist bei der Infrarot Erwärmung eine deutlich schnellere Erwärmung möglich (siehe Tab. 4-2). Da sich dies wiederum unmittelbar auf die erforderliche Prozesszeit auswirkt, wird für das konzeptionierte FuHo-Verfahren zur Erwärmung des Halbzeugs die Infrarotstrahlung herangezogen. Zudem bietet das Verfahren eine hohe Flexibilität hinsichtlich der räumlichen Strahleranordnung und der individuellen Leistungsregelung [15, 122].

Schnelle Infrarotsysteme reagieren auf eine Leistungsregelung innerhalb weniger Sekunden. Dies führt zu energie- und zeiteffizienten Prozessen, da das System ohne lange Vorlaufzeiten eingeschaltet werden kann [123]. Die kontaktlose Erwärmung vermeidet ein mögliches Anhaften des Halbzeugs am Heizsystem [122]. Das Verfahren hat sich außerdem bereits bei der Erwärmung von flächigen Halbzeugen aus endlosfaserverstärktem thermoplastischem Kunststoff bewährt und wird bei zahlreichen Anwendungen eingesetzt [15].

Infraroterwärmung

In einem Filament aus einem hochschmelzenden Material, wie z. B. Wolfram oder Kohlenstoff, wird durch elektrische Leistung Wärme erzeugt. Diese Wärmestrahlung befindet sich im infraroten Bereich und wird daher als Infrarotstrahlung bezeichnet. Die Wellenlänge der Strahlung ist sowohl von der Temperatur als auch vom Material der Quelle abhängig. Für industrielle Anwendungen liegt der relevante Wellenlängenbereich zwischen 1 und 10 μm . [123]

Die Infrarotstrahlung, in Form elektromagnetischer Wellen, regt die Moleküle des Halbzeugwerkstoffes an. Aufgrund der Reibung der bewegten Moleküle entsteht in weiterer Folge Wärme [117]. Aus den unterschiedlichen Wärmetransportmechanismen, die bei der Erwärmung des Halbzeugs stattfinden, resultiert ein komplexer Wärmehaushalt (siehe Abb. 4-6). Nur ein Teil der elektrischen Energie, die zur Erwärmung benötigt wird, kann im Halbzeug tatsächlich in Wärme umgewandelt werden. Bei der Umwandlung von elektrischer Energie in Wärmestrahlung entstehen gemäß Abb. 4-6 bereits die ersten Verluste. Die Infrarotstrahlen emittieren zudem nicht nur in Richtung des Halbzeugs, sondern in sämtliche Raumrichtungen. Die Luft, die sich zwischen Strahler und Halbzeug befindet, absorbiert ebenfalls teilweise Wärmestrahlung, erwärmt sich dadurch und reduziert somit die Wärmeenergie für das Halbzeug. Zu den Verlusten durch Wärmestrahlung addieren sich außerdem Konvektionsverluste. [122]

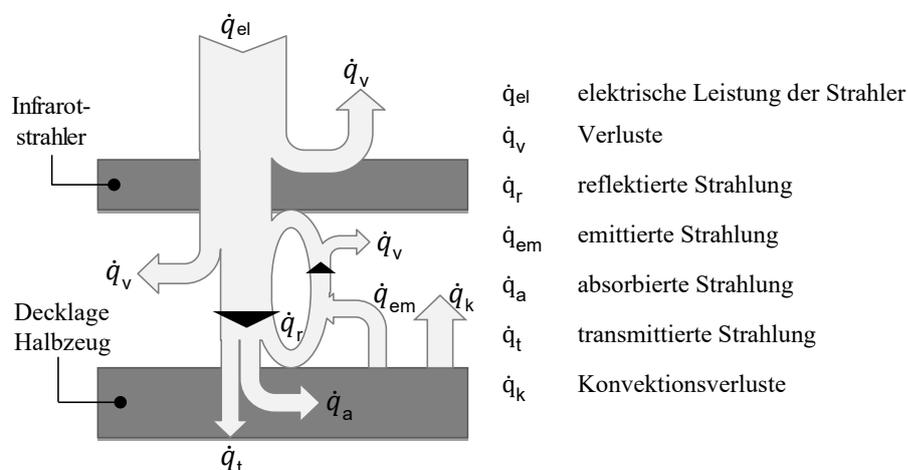


Abb. 4-6: Wärmehaushalt beim einseitigen Aufheizen von Halbzeugen mittels Infrarotstrahler nach [122, 124]

Die nach Abzug der Verluste verbliebene Wärmestrahlung trifft auf das Halbzeug (siehe Abb. 4-6). Die Infrarotstrahlen werden teilweise reflektiert, absorbiert und transmittiert. Die Aufteilung dieser drei Anteile hängt stark von den Werkstoffeigenschaften, der Werkstoffbeschaffenheit sowie von der Wellenlänge der emittierten Strahlung ab [125]. Lediglich der absorbierte Strahlungsanteil wird im Halbzeug in Wärme umgewandelt. Aus diesem Grund ist die individuelle Auswahl der Infrarotstrahler in Abhängigkeit von den Absorptionseigenschaften des zu erwärmenden Halbzeugs unverzichtbar [117, 123]. Grundsätzlich kann zwischen kurz- und mittelwelligen Infrarotstrahlern unterschieden werden (siehe Abb. 4-7) [123].

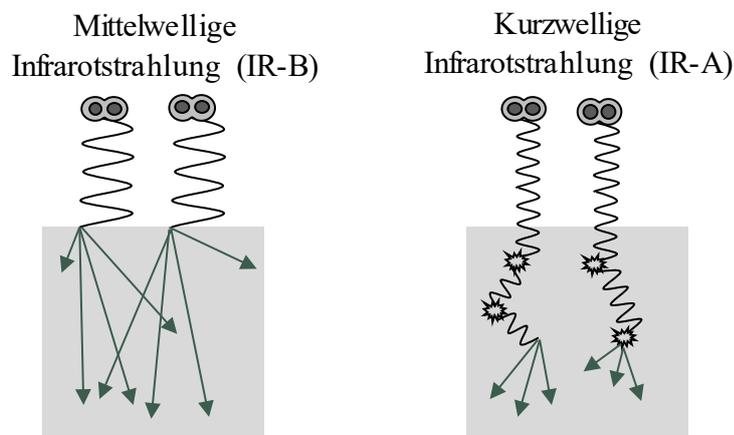


Abb. 4-7: Schematische Darstellung des Wärmetransfers in einer Probe nach [123]
Links: Mittelwellige Infrarotstrahlung. Rechts: Kurzwellige Infrarotstrahlung.

Kurzwellige Strahler haben ihr Intensitätsmaximum im IR-A zwischen 1,0 und 1,5 μm , mittelwellige Infrarotstrahler hingegen im IR-B zwischen 2 und 3 μm . Mittelwellige Infrarotstrahlung absorbiert vornehmlich an der Oberfläche des Halbzeugs und erwärmt dieses (siehe Abb. 4-7 links). Die Durchwärmung des Halbzeugs findet durch Wärmeleitung statt. Die Wärmeleitung in das Materialinnere ist jedoch um ein Vielfaches langsamer als die Strahlungserwärmung. Kurzwellige Infrarotstrahlen dringen hingegen tiefer in das Material ein (siehe Abb. 4-7 rechts). Dies führt zu einer besseren Durchwärmung des Halbzeugs in Wandstärkenrichtung. [123]

4.2.2 Technische Umsetzung der Halbzeugerwärmung

Nach der Auswahl des geeigneten Erwärmungsverfahrens und einer Beschreibung des Wirkprinzips (siehe Abschnitt 4.2.1) befasst sich dieser Abschnitt mit der Anlagenkomponente zur Infraroterwärmung der hohlprofilförmigen Halbzeuge. Da nach der Abdichtung des Halbzeugs lediglich eine einseitige Erwärmung von außen möglich ist, gilt es, auf eine besonders gute Erwärmung des Halbzeugs in Wandstärkenrichtung zu achten.

Aus diesem Grund kommen für die Erwärmung kurzwellige Zwillingsrohr-Infrarotstrahler aus Quarzglas zum Einsatz (siehe Anhang, Tab. A-11). Für eine gleichmäßige Erwärmung des hohlprofilförmigen Halbzeugs sind die IR-Strahler kreisförmig um das Halbzeug angeordnet. Um bei der Erwärmung den gesamten Umfang des Halbzeugs abzudecken, sind bei einem Abstrahlwinkel der IR-Strahler von 30° , deren Abstand zum Halbzeug von konstant 48 mm sowie dem Halbzeugdurchmesser von ca. 78 mm (siehe Abschnitt 5.2.1.1) fünf IR-Strahler erforderlich.

Die in Abb. 4-8 dargestellte Simulation der Strahlungshomogenität weist für diesen Fall eine Inhomogenität der Wärmestromdichte von 36,2 % aus. Durch eine Erhöhung auf neun gleichmäßig um den Umfang angeordnete IR-Strahler kann die Inhomogenität der Wärmestromdichte von 36,2 auf 12,6 % reduziert werden (siehe Abb. 4-8 links). Zu beachten ist, dass die als Raytracing bezeichnete Simulation keine thermischen Effekte (z. B. Wärmeleitung, Konvektion etc.) und Sekundärstrahlungseffekte berücksichtigt [126]. Eine weitere Erhöhung der Strahleranzahl würde zu einer weiteren Abnahme der Inhomogenität führen, geht jedoch mit einer erhöhten Anlagenkomplexität sowie steigendem Stromverbrauch einher. Aus diesem Grund wird die Strahleranzahl in Umfangsrichtung auf neun Stück festgelegt.

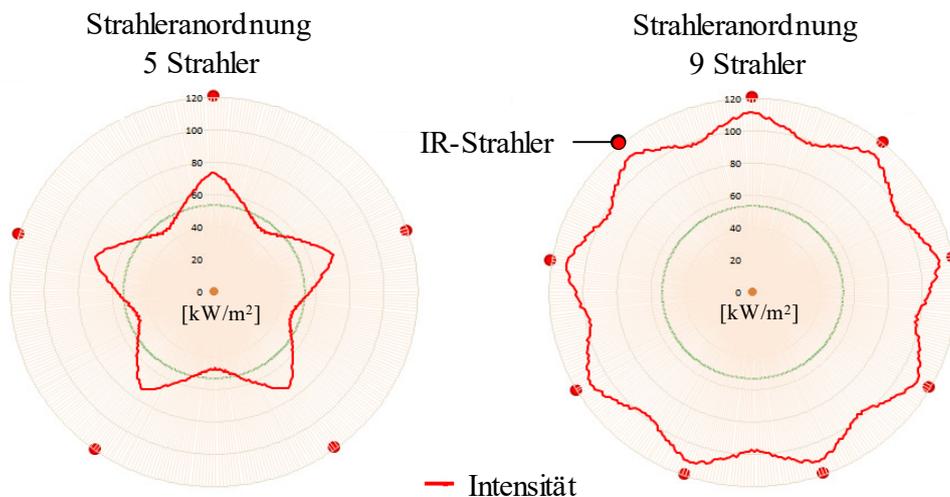


Abb. 4-8: Raytracing bei unterschiedlicher Anzahl der IR-Strahler in Umfangsrichtung [126]
Links: 5 IR-Strahler. Rechts: 9 IR-Strahler.

Das Kollabieren des Halbzeugs während der IR-Erwärmung wird, wie in Abschnitt 3.2.1.2 beschrieben, durch die vertikale Positionierung des Materials vermieden. Um die dadurch während der Erwärmung auftretende freie Konvektion möglichst vollständig zu kompensieren, ist die zu erwärmende Halbzeuglänge durch jeweils drei IR-Strahler abgedeckt.

Durch diese Dreiteilung können die unterschiedlichen Höhenniveaus separat voneinander geregelt werden. Die Strahler sind über die Höhe hinweg jeweils leicht versetzt und mit einer Überlappung angeordnet (siehe Abb. 4-9). Diese Überlappung gewährleistet eine homogene Erwärmung auch an den Strahlerübergängen. Zur weiteren Einschränkung der freien Konvektion sind die zylinderförmigen Strahlerhalbschalen oben und unten weitestgehend abgeschlossen. Dies reduziert das Nachströmen von Umgebungsluft. Aus der Teilung des Erwärmungsfelds in zwei IR-Strahlerhalbschalen und die Aufteilung der IR-Strahler in der Höhe ergeben sich gemäß Abb. 4-9 insgesamt sechs unterschiedlich regelbare Zonen. In jeder Zone wird die Oberflächentemperatur des Halbzeugs mithilfe von Pyrometern überwacht. Anhand der Pyrometer-Information wird die Leistung der IR-Strahler in jeder der sechs Zonen so geregelt, dass die Oberflächentemperatur des Halbzeugs weitestgehend konstant bleibt.

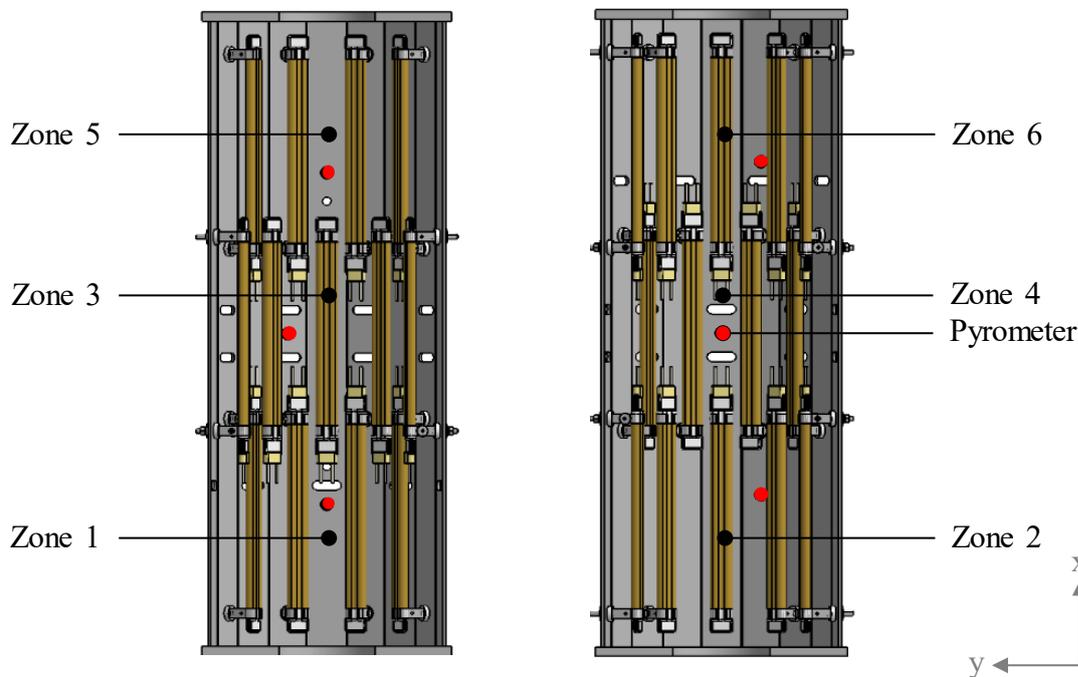


Abb. 4-9: Aufbau der IR-Strahlerhalbschalen

4.3 Umformung

Nach der Abdichtung und Erwärmung des Halbzeugs findet im dritten Prozessschritt die eigentliche Umformung zur Herstellung eines Hohlprofilbauteils statt. Die bei diesem Prozessschritt zu beachtenden Grundlagen werden in Abschnitt 4.3.1 vorgestellt. Eine besondere Herausforderung bei der Umformung stellen die Formwerkzeuge dar. Zur Umsetzung des FuHo-Verfahrens war die Konzeptionierung neuer Formwerkzeuge erforderlich. Deren Funktionsprinzip wird in Abschnitt 4.3.1 erläutert.

4.3.1 Grundlagen zur Umformung

Die Verformungsmechanismen beim Umformen von Halbzeugen aus endlosfaserverstärktem thermoplastischem Kunststoff mit geschlossenem Querschnitt sind aufgrund des anisotropen Materialverhaltens äußerst komplex [48]. Wesentliche Aspekte bei der Umformung von unidirektional verstärkten Halbzeugen werden in Abschnitt 4.3.1.1 beleuchtet. Darüber hinaus werden in Abschnitt 4.3.1.2 die derzeit zur Herstellung von Faserverbundbauteilen verwendeten Formwerkzeuge mit ihren Vor- und Nachteilen vorgestellt.

4.3.1.1 Umformmechanismen

Die Umformmechanismen bei einer kontinuierlichen Umformung von einem Halbzeug mit Kreisquerschnitt in ein Hohlprofilbauteil mit Rechtecksquerschnitt entsprechen nach [46] grundsätzlich den Mechanismen bei der Umformung flächiger Halbzeuge. Die makromechanische Untersuchung der Umformmechanismen befasst sich mit der geometrischen Betrachtung der Umformung, während auf mikromechanischer Ebene die Verschiebung der Fasern (siehe Abschnitt 3.2.1.3) betrachtet wird [48]. Für das FuHo-Verfahren müssen folgende makroskopische und mikroskopische Besonderheiten berücksichtigt werden:

- Makroskopisch: Faserlaufängenunterschiede
- Makroskopisch: Umfangs- und Längenänderung
- Mikroskopisch: Abgleiten der Faserlagen (interlaminar)

Der Faserlaufängenunterschied wird beispielhaft anhand eines Hohlprofilbauteils erläutert. Abb. 4-10 zeigt ein Halbzeug mit kreisförmigem Ausgangsquerschnitt, das zu einem Hohlprofilbauteil mit Rechtecksquerschnitt umgeformt wird. Der Umformbereich mündet beidseitig in Übergangsbereiche. Dies erlaubt die Überführung des veränderlichen Querschnitts hin zum unveränderlichen Abdichtbereich (siehe Abschnitt 3.2.1.1) des Hohlprofilbauteils. Die in axialer Richtung (z-Richtung in Abb. 4-10) ursprünglich gleich verlaufenden Fasern müssen durch die Umformung des Halbzeugs unterschiedliche Laufängen zurücklegen [48]. Die Faserlaufänge A ist demnach länger als die Laufänge von Faser B. Die Länge des Bereichs, auf dem der ursprüngliche Querschnitt des Halbzeugs auf den neuen Zielquerschnitt übergeht, wurde von [48] als Übergangsbereich für die Berechnung des Faserlaufängenunterschieds definiert. Wird vereinfacht von mindestens einer Faser in axialer Richtung in diesem Bereich ausgegangen, die durch die Umformung keine Laufängenveränderung erfährt, so kann der Faserlaufängenunterschied l_F gemäß Formel 4-1 berechnet werden:

$$l_F = \frac{l_{Fmax} - l_{\ddot{U}}}{l_{\ddot{U}}} * 100 \% \quad (4-1)$$

l_F = Faserlaufängenunterschied; l_{Fmax} = maximale Faserlaufänge im Übergangsbereich; $l_{\ddot{U}}$ = Übergangslänge

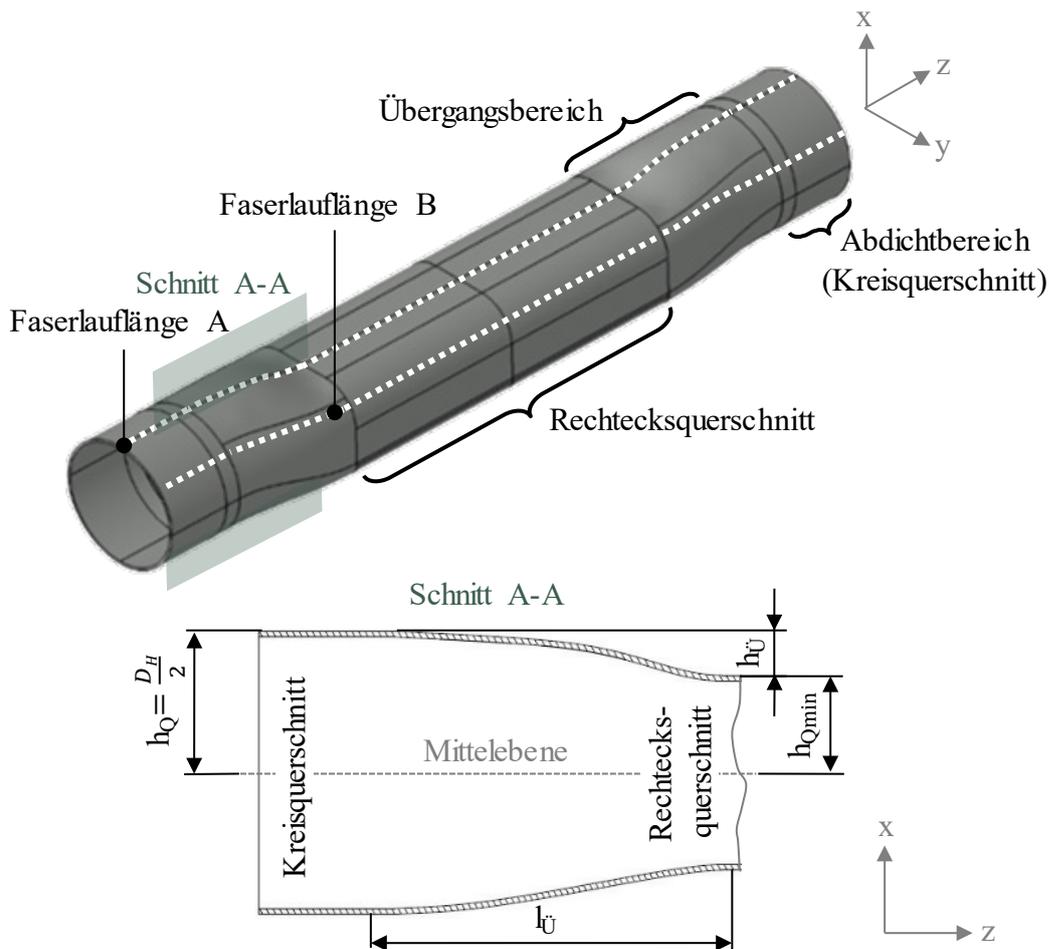


Abb. 4-10: Faserlaufängenunterschied und Übergangsbereich an einem beispielhaften Hohlprofilbauteil

Oben: Faserlaufänge zweier Fasern. Unten: Längsschnitt im Übergangsbereich.

Die Ausprägung des Faserlaufängenunterschieds hängt im Wesentlichen von zwei unterschiedlichen Faktoren ab: zum einen von der Übergangslänge und zum anderen von der Übergangshöhe $h_{\ddot{U}}$ (siehe Abb. 4-10 unten). Die Übergangshöhe wiederum berechnet sich wie folgt:

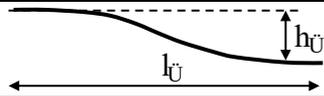
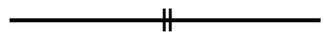
$$h_{\ddot{U}} = h_Q - h_{Qmin} \quad (4-2)$$

$h_{\ddot{U}}$ = Übergangshöhe; h_Q = Querschnittshöhe des Halbzeugs;
 h_{Qmin} = minimale Querschnittshöhe des Hohlprofilbauteils

Im Beispielfall entspricht die Querschnittshöhe des Halbzeugs (h_Q) dem halben Außendurchmesser des Halbzeugs (D_H) und die minimale Querschnittshöhe (h_{Qmin}) der halben Höhe des Rechtecksquerschnitts.

Die Höhenangaben sind stets auf die Mittelebene des Hohlprofilbauteils bezogen, da der Querschnitt – bezogen auf die yz-Ebene – nicht symmetrisch ausgeprägt sein muss. Tab. 4-3 verdeutlicht die Zusammenhänge und zeigt deren Auswirkung auf den Faserlauflängenunterschied anhand dreier Beispiele. Die durch eine Umformung hervorgerufenen Faserlauflängenunterschiede können bis zu einem gewissen Grad durch lokale Faserwinkeländerungen ausgeglichen werden [48]. Laut [127] liegt der dafür maximal zulässige Faserlauflängenunterschied bei 0,5 %.

Tab. 4-3: Faserlauflängenunterschied in Abhängigkeit der Übergangslänge

Übergangslänge ($l_{\ddot{U}}$)	Längsschnitt	Faserlauflängenunterschied (l_F)
$l_{\ddot{U}} = 0$		$l_F = h_{\ddot{U}}$
$0 < l_{\ddot{U}} < \infty$		$0 < l_F < h_{\ddot{U}}$
$l_{\ddot{U}} = \infty$		$l_F = 0$

Die Abstimmung der Übergangshöhe und Übergangslänge ist aufgrund der gegenseitigen Wechselwirkungen ein entscheidendes Kriterium für die spätere Definition der Komplexitätsgrade in Abschnitt 5.1. Darüber hinaus wird dabei die relative Höhenänderung (β_H) miteinbezogen, die sich wie folgt berechnet:

$$\beta_H = \frac{h_{\ddot{U}}}{D_H} * 100 \% \tag{4-3}$$

β_H = relative Höhenänderung; $h_{\ddot{U}}$ = Übergangshöhe;
 D_H = Außendurchmesser des Halbzeugs

Der Zusammenhang beim makroskopischen Umformmechanismus der Umfangs- und Längenänderung ist in Abb. 4-11 bildlich dargestellt. Wird das Halbzeug mit kreisförmigem Querschnitt und Durchmesser D_1 durch den Umformdruck (p_u) auf den Außendurchmesser $D_2 (= D_1 + 2 \cdot \Delta r)$ umgeformt, führt die Umfangsänderung zu einer Scherdeformation des Halbzeugs [48]. Daraus resultiert eine Verkürzung des Hohlprofilbauteils (Δl) und eine Änderung des Faserwinkels von α_1 auf α_2 .

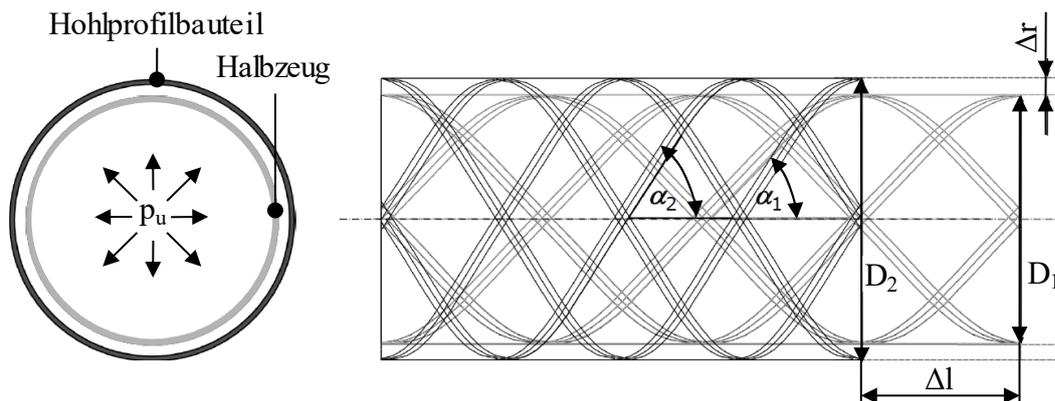


Abb. 4-11: Schematische Darstellung des Umformmechanismus bei einer Umfangs- und Längenänderung nach [128]

Nachdem der Umfang des Halbzeugs, dessen Faserwinkel und der Umfang des herzustellenden Hohlprofilbauteils in der Regel bekannt sind, lässt sich die resultierende Bauteillänge sowie der sich einstellende Faserwinkel mathematisch beschreiben [129]. Liegt im Halbzeug ein Faserwinkel von $\alpha = 90^\circ$ vor (siehe Abb. 4-11), kann die Längenänderung nicht mehr über eine Faserwinkeländerung kompensiert werden. Bei einem Halbzeug mit Fasern in axialer Richtung ($\alpha = 0^\circ$) würde eine Umfangsvergrößerung zur Stauchung der Fasern führen. Es bilden sich Welligkeiten oder Falten im endlosfaserverstärkten thermoplastischen Kunststoff. Aus diesem Grund ist bei Halbzeugen mit Endlosfaserverstärkung in axialer Richtung eine Umformung (z. B. Querschnittsänderung) ohne Änderung des Halbzeugumfangs anzustreben.

Die Querschnittsänderung wird durch Biegeumformungen des Halbzeugs in Querschnittsebene hervorgerufen. Der Umformung mit konstantem Umfang liegt eine einfache Krümmung in der Querschnittsebene zugrunde [48]. Das interlaminare Abgleiten der Faserlagen ist demnach der dominierende Umformmechanismus auf mikroskopischer Ebene (siehe Abschnitt 3.2.1.1).

Der zulässige Faserlauflängenunterschied und die stetige Umfangsgleichheit sind die Ausgangsbasis für die Definition der Geometriemerkmale und Komplexitätsgrade (siehe Abschnitt 5.1).

4.3.1.2 Bestehende Formwerkzeugtechnologien

Sowohl bei duroplastischen als auch bei thermoplastischen Matrixsystemen kann bei der Herstellung von Faserverbundbauteilen zwischen offenen und geschlossenen Formwerkzeugen unterschieden werden. Offene Formwerkzeuge werden beispielsweise beim Autoklav-, Faserspritz-, Wickel- oder Tape-Placement-Verfahren eingesetzt. Geschlossene Formwerkzeuge kommen klassischerweise bei der Herstellung von Bauteilen mittels RTM-, SMC- oder Thermoformverfahren zur Anwendung. [20, 22, 130]

Bei geschlossenen Werkzeugen kann wiederum zwischen Tauchkantenwerkzeugen, auch Füllraumwerkzeuge genannt, und Abquetschwerkzeugen, oftmals auch als Quetschkanten- oder Überlaufwerkzeuge bezeichnet, unterschieden werden. Beim Tauchkantenwerkzeug taucht eine Werkzeughälfte mit senkrechten Außenkanten in eine passgenaue zweite Formwerkzeughälfte ein. Die Werkzeugkavität ist dadurch bereits während des Schließvorgangs frühzeitig geschlossen und das Endvolumen wird druckgesteuert eingestellt, um z. B. bei der Fertigung von SMC-Bauteilen Materialschwankungen auszugleichen. Die erforderliche Passgenauigkeit der beiden Werkzeughälften führt gegenüber Abquetschwerkzeugen zu höheren Werkzeugkosten von 10 bis 15 %. Nachteilig am variablen Endvolumen dieser Formwerkzeuge ist der damit einhergehende variable Umfang der Werkzeugkavität, der wiederum zu fehlerhaften Hohlprofilbauteilen führen kann (siehe Abschnitt 4.3.1.1). [131, 132]

Im Gegensatz zu Tauchkantenwerkzeugen sind Abquetschwerkzeuge so aufgebaut, dass die beiden Werkzeughälften im geschlossenen Zustand aneinander anliegen, um ein stets gleichbleibendes Endvolumen zu garantieren. Durch das Anliegen der beiden Werkzeughälften kann es jedoch zu einem undefinierten Verpressen des Halbzeugs zwischen den beiden Werkzeughälften kommen. [131, 132]

Während des Schließvorgangs des Formwerkzeugs findet beim Prozessschritt der Umformung (vgl. Abschnitt 3.2.1.3) bereits eine erste Vorverformung des erwärmten, hohlprofilförmigen Halbzeugs statt, sobald das Halbzeug die Werkzeugkavität berührt (siehe Schritt 1 in Abb. 4-13). Bei einem Halbzeug mit kreisförmigem Profilquerschnitt führt dies gemäß Schritt 2 in Abb. 4-13 zu einer zunehmenden elliptischen Verformung des Halbzeugs während des Schließvorgangs. Baucht das Halbzeug über die maximale Breite der Werkzeugkavität hin aus, kommt es bei Abquetschwerkzeugen zu einem unerwünschten Verpressen des Halbzeugmaterials zwischen den beiden Werkzeughälften.

Abb. 4-12 zeigt exemplarisch ein hohlprofilförmiges Halbzeug mit kreisförmigem Ausgangsquerschnitt, das mittels Innendruck und Abquetschwerkzeug zu einem Hohlprofilbauteil mit rechteckigem Querschnitt umgeformt wurde. Auf beiden Seiten des Halbzeugs ist im Bereich der Werkzeugtrennung ein deutlich ausgeprägter Quetschgrat erkennbar.

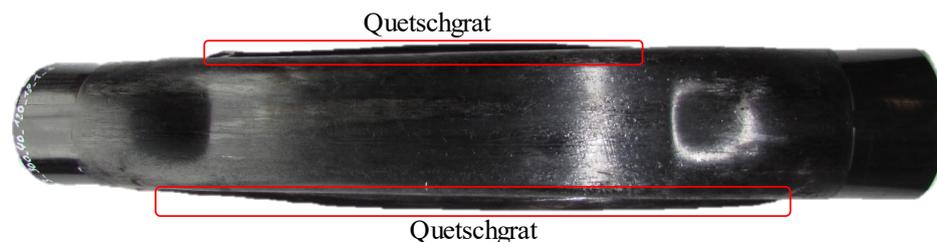


Abb. 4-12: Quetschgrat bei der Umformung eines Halbzeugs mittels Abquetschwerkzeug
Der rot markierte Bereich zeigt den bei Abquetschwerkzeugen entstehenden Quetschgrat.

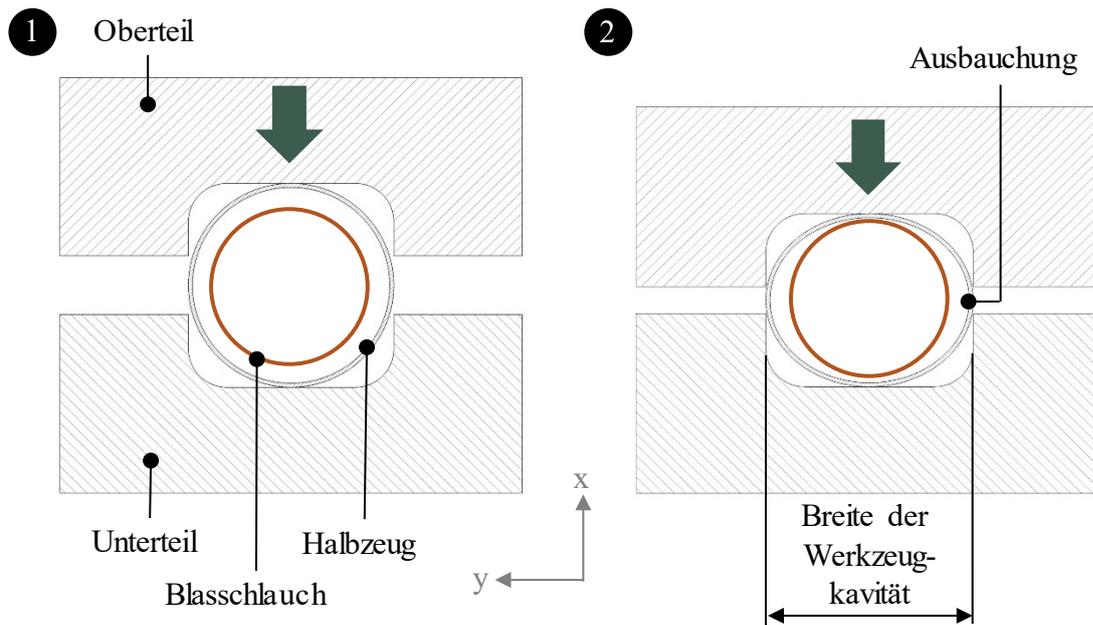


Abb. 4-13: Ursache von Quetschgraden bei der Verwendung eines Abquetschwerkzeugs
Schematische Darstellung.

4.3.2 Technische Umsetzung der Formwerkzeuge

Auf Basis der bestehenden Werkzeugtechnologie wurde für das FuHo-Verfahren ein Formwerkzeug konzeptioniert, welches die wesentlichen Vorteile eines Abquetsch- und Tauchkantenwerkzeugs (vgl. Abschnitt 4.3.1.2) miteinander vereint. Das in Abb. 4-14 dargestellte Funktionsprinzip des Formwerkzeugs ermöglicht die Umformung eines hohlprofilförmigen Halbzeugs bei gleichbleibendem Umfang und annähernder Vermeidung eines Quetschgrats.

Die beiden Formwerkzeughälften sind so ausgebildet, dass bei einer Bewegung in Schließrichtung die Werkzeugkavität bereits vollständig geschlossen ist, bevor die Vorverformung des Halbzeugs einsetzt (siehe Schritt 1 in Abb. 4-14). Durch die frühzeitig geschlossene Werkzeugkavität wird das Ausbauchen des Halbzeugs limitiert und ein Verpressen des Faserverbundmaterials zwischen den beiden Werkzeughälften (Quetschgrat) unterbunden (siehe Schritt 2 in Abb. 4-14).

Während der Schließbewegung bewegen sich die beiden Werkzeughälften, bei geschlossener Werkzeugkavität, weiter aufeinander zu und verfahren gemäß Schritt 3 in Abb. 4-14 in die Endstellung. In der Endstellung liegen die beiden Werkzeughälften analog dem Abquetschwerkzeug aneinander. Dies gewährleistet reproduzierbar einen stets gleichbleibenden Umfang der Werkzeugkavität im geschlossenen Zustand. Nach Erreichen der Endstellung wird der ins Halbzeug eingebrachte Blasschlauch mit dem Umformdruck (p_u) beaufschlagt und das Halbzeug bei gleichbleibendem Umfang zum Hohlprofilbauteil umgeformt (siehe Schritt 3 in Abb. 4-14).

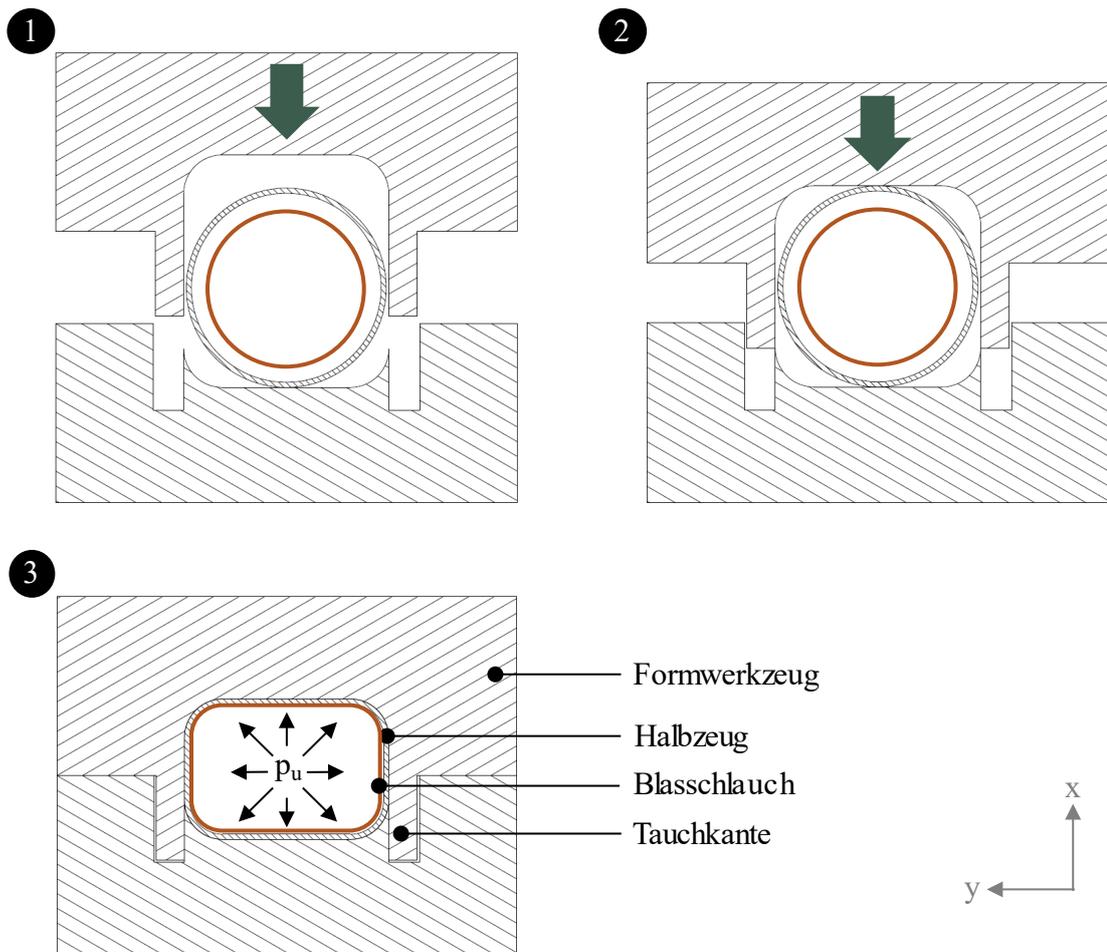


Abb. 4-14: Schematische Darstellung zum Funktionsprinzip des Formwerkzeugs nach [133]

In Endstellung wird zudem eine formschlüssige Nut-Feder-Verbindung zwischen dem Formwerkzeug und den Außenhülsen der beiden Dichtstempel (siehe Abschnitt 4.1.2.2 sowie Abb. 5-12) hergestellt. Dies verhindert eine Verschiebung der Dichtstempel in axialer Richtung infolge der Druckbeaufschlagung p_u (siehe Abb. 4-3).

4.4 Funktionalisierung

Zur Funktionserweiterung des Hohlprofilbauteils im fünften und letzten Prozessschritt des FuHo-Verfahrens wird gemäß der Anforderungen und Rahmenbedingungen ein neuartiges Krafteinleitungselement entwickelt. Dessen Funktionsweise sowie die erforderliche Prozesstechnik werden in Abschnitt 4.4.2 vorgestellt. Ausgangsbasis für die Entwicklung sind bestehende technische Lösungen, deren Funktionsweisen auf einer Kugelgeometrie basieren (siehe Abschnitt 4.4.1).

4.4.1 Grundlagen zum Krafteinleitungselement

Die Firma bigHead Bonding Fasteners definiert in einem Patent [134] eine metallische Kugel, die auf eine metallische Scheibe aufgeschweißt wird. Mittels selbstklebender Pads oder Klebstoffen kann diese Metallscheibe auf Bauteilen befestigt werden. Dieses Krafteinleitungselement aus metallischem Werkstoff weist ein erhöhtes Gewicht auf und reduziert somit das Leichtbaupotential des Krafteinleitungselements. Aus der Metallscheibe und der erforderlichen Klebstoffschicht resultiert zudem ein erhöhter Bauraumbedarf.

Das als „SNAPLOC“ bezeichnete System der Firma Böllhoff besteht aus den zwei Komponenten Kugelbolzen und Kupplung [135]. Der Kugelbolzen kann in ein (Hohlprofil-)Bauteil zwar geschraubt, geklebt oder geclipst, jedoch nicht mit diesem stoffschlüssig verschweißt werden. Die längliche Geometrie des Kugelbolzens führt zudem zu einem hohen Bauraumbedarf des Krafteinleitungselements.

Das in [136] erläuterte Patent beschreibt das stoffschlüssige Aufbringen einer Kugel zur Krafteinleitung. Das Verfahren ist jedoch auf den Einsatz bei metallischen Werkstoffen beschränkt und eignet sich demnach nicht zur Funktionalisierung der Hohlprofilbauteile.

4.4.2 Technische Umsetzung des Krafteinleitungselements

Die Grundlage für das neuartige, zweiteilige Krafteinleitungselement zur Funktionalisierung von Hohlprofilbauteilen stellt die zu Beginn von Abschnitt 4.4 bereits erwähnte Kugelgeometrie dar (siehe Abb. 4-15 oben). Zunächst wird ein Kugelverbindungselement aus thermoplastischem Kunststoff stoffschlüssig mit dem Hohlprofilbauteil verbunden [137]. Anschließend wird ein Clipelement (vergleiche Abb. 4-15 unten) aufgeclipst. Im Clip konstruktiv vorgesehene Rastelemente ragen in einen Hinterschnittbereich des Kugelverbindungselements. Unter dem Begriff Hinterschnitt ist der Bereich zwischen der Äquatorebene und der Oberfläche des Hohlprofilbauteils zu verstehen (siehe Abb. 4-15 oben). Zwischen Clipelement und Kugelverbindungselement entsteht ein Formschluss, der sich einer auf das Clipelement einwirkenden „Abziehungskraft“ widersetzt und somit eine Krafteinleitung in das Hohlprofilbauteil ermöglicht.

Durch den modularen Aufbau des zweiteiligen Krafteinleitungselements lassen sich bspw. Geometrie und Material des Clipelements an die individuellen Funktionsanforderungen anpassen, ohne dabei das Kugelverbindungselement zu beeinflussen. Die spezifische Anpassung des Kugelverbindungselements an den Matrixwerkstoff des Hohlprofilbauteils ist wiederum ohne eine Veränderung des Clipelements möglich. Die zerstörungsfreie Demontage des Clipelements ist bei flexibel gestalteten Rastelementen (analog zu Schnapphaken [76]) ebenfalls möglich. Durch das stoffschlüssige Aufbringen des Kugelverbindungselements kommt es zu keiner lokalen Faserschädigung.

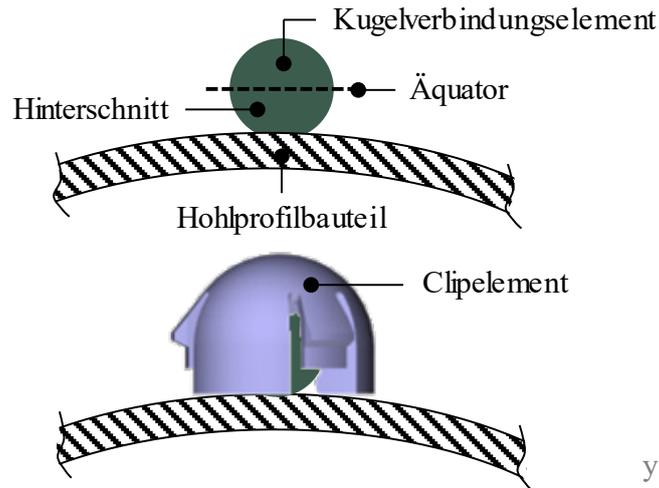


Abb. 4-15: Schematische Darstellung zum Funktionsprinzip des Krafeinleitungselements [138]
Oben: Aufgeschweißtes Kugelverbindungselement. Unten: Clipelement.

Die Akustiktrennung (z. B. NVH) und Medienabschirmung (z. B. Wassereintritt ins Bauteilinnere) des Hohlprofilbauteils werden durch das Element ebenfalls nicht beeinträchtigt, da zur Krafeinleitung keine Bohrungen erforderlich sind. Der gewählte Kugeldurchmesser von 6,35 mm (= ¼ Zoll) ist ein Standardmaß, unter anderem im Bereich der Kunststoff-Kugellager. So wird eine gute Verfügbarkeit, ein geringer Bauraumbedarf und eine kostengünstige Beschaffung des Kugelverbindungselements sichergestellt. Die Kugelgeometrie verringert außerdem das Verletzungsrisiko bei der Montage. Die Dimensionierung von Kugelverbindungselement und Clipelement ist leicht skalierbar. Dadurch können die mechanischen Eigenschaften (z. B. Kugeldurchmesser, Größe der Rastelemente etc.) anwendungsspezifisch variiert werden.

Das Krafeinleitungselement wird mithilfe der Ultraschall-Fügetechnik stoffschlüssig auf das Hohlprofilbauteil aufgeschweißt. Verglichen mit anderen Fügetechnologien weist das Verfahren sehr kurze Durchlaufzeiten auf [139]. Für hohe Stückzahlen ist ein robuster, hochautomatisierbarer Fügeprozess umsetzbar. Gleichzeitig besteht, bei Verwendung von Handschweißgeräten, im Falle eines Produktionsfehlers eine Nacharbeitsmöglichkeit (siehe Anforderungen in Abschnitt 3.1). Abb. 4-16 zeigt schematisch die Funktionsweise und den Aufbau der Ultraschallschweißanlage. Zunächst erfolgt die Aufnahme des Kugelverbindungselements mittels Vakuum. Dazu ist die Sonotrode mit einem Ansaugkanal versehen, der in einer mulden- oder kugelkalottenförmigen Aufnahme mündet, siehe Abb. 4-16 [137]. Die rotationsymmetrischen Eigenschaften des Kugelverbindungselements erlauben eine besonders einfache Zuführung oder Aufnahme, da die geometrische Lage nicht zu berücksichtigen ist. Zur Automatisierung des Schweißprozesses kann das Kugelverbindungselement aus einem Schüttgutbehälter der Sonotrodenspitze zugeführt werden.

Beim manuellen Schweißprozess wird unter Zuhilfenahme eines Handgeräts ein Kugelverbindungselement aus einem Reservoir entnommen. Anschließend wird die Sonotrode inklusive Kugelverbindungselement an das Hohlprofilbauteil herangeführt und der Schweißprozess gestartet. Die vom Konverter erzeugten Schwingungen werden über die Sonotrode und deren kugelkalottenförmige Aufnahme an das Kugelverbindungselement übertragen. Aus der vollständigen Symmetrie des Kugelverbindungselements ergibt sich stets eine punktförmige Berührung mit der Oberfläche des Hohlprofilbauteils. Ähnlich der Funktionsweise eines Energierichtungsgebers (ERG) werden die Ultraschallwellen somit im Berührungspunkt gebündelt und es kommt zu einem gezielten Plastifizieren der Fügezone.

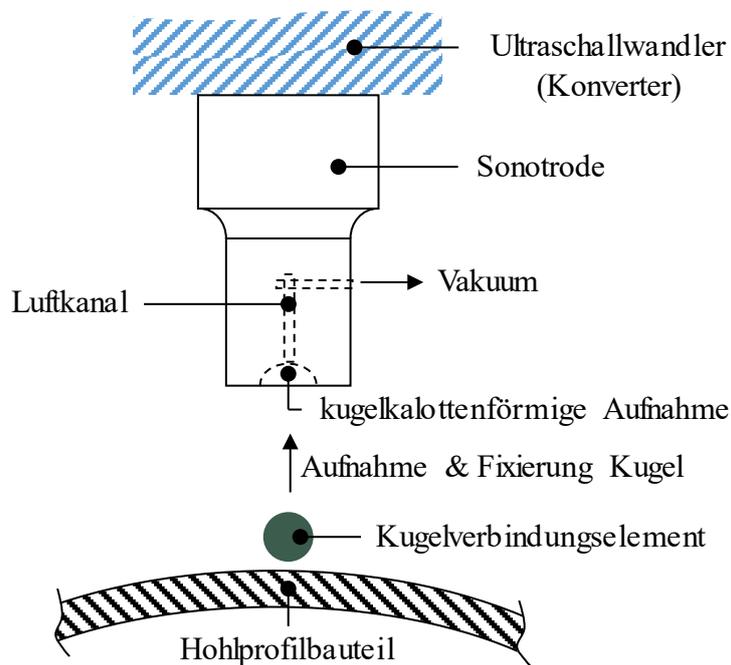


Abb. 4-16: Schematische Darstellung zum Funktionsprinzip der Ultraschallschweißanlage zur Aufbringung eines Kugelverbindungselements nach [137]

Abb. 4-17 zeigt den geometrischen Unterschied zwischen einem kegel- bzw. noppenförmigen Energierichtungsgeber gemäß DVS (Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e. V.) und dem Kugelverbindungselement [140]. Verglichen mit ERG kommt es beim Abschmelzen der Kugel zu einem etwas stärkeren Anstieg der Schweißfläche. Um jederzeit ein formschlüssiges Verrasten des Clielements sicherzustellen, wurde bei einem Kugelverbindungselement mit einem Durchmesser von $6,35 \text{ mm}$ eine Resthöhe nach dem Fügeprozess von $5,7 \pm 0,2 \text{ mm}$ definiert. Daraus leitet sich der in Abb. 4-17 eingezeichnete Schweißweg von $0,65 \pm 0,2 \text{ mm}$ ab.

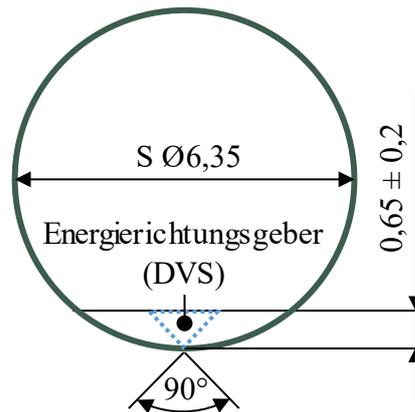


Abb. 4-17: Schematischer Vergleich der Energierichtungsgeber
Alle Maße in mm.

Neben den geometrischen und funktionalen Vorzügen des Kraftereinleitungselements bietet die Prozesstechnik folgende Vorteile [138]:

- Dank sehr kurzer Schweißzeiten ist eine kurze Prozesszeit zur Aufbringung des Kraftereinleitungselements sichergestellt.
- Vor dem Aufschießen ist keine spezielle Oberflächenvorbehandlung der Fügezone vonnöten.
- Die Rotationssymmetrie des Elements erlaubt eine einfache Zuführung und Handhabung im Schweißprozess, da keine spezielle Positionierung erforderlich ist.
- Ein flexibles Aufschießen des Kraftereinleitungselements nach der Bauteilherstellung ist mittels hochautomatisierter Schweißanlage oder Handgerät möglich.
- Bei ausreichender Steifigkeit des Faserverbundbauteils ist ein einseitiges Fügen möglich.
- Bei Variation der Kraftereinleitungszone muss das Spritzguss- oder Formwerkzeug nicht angepasst werden.
- Die einfache Reparaturfähigkeit ist durch Aufschießen eines neuen Elements (z.B. mittels Handgerät) gegeben.

Nach einer detaillierten Beschreibung der fünf wesentlichen Prozessschritte des FuHo-Verfahrens und der darauf aufbauend realisierten Anlagentechnik befassen sich die folgenden beiden Abschnitte mit den experimentellen Untersuchungen zur Herstellung von Hohlprofilbauteilen (Kapitel 5) und deren Funktionalisierung (Kapitel 6).

5 Experimentelle Untersuchungen zur Herstellung von Hohlprofilbauteilen

Das Kapitel zur Herstellung von Hohlprofilbauteilen betrachtet mit der Abdichtung, Erwärmung und Umformung die ersten drei Prozessschritte des FuHo-Verfahrens (vergleiche Abschnitt 3.1). Für die Umformung werden einleitend in Abschnitt 5.1 die unterschiedlichen Komplexitätsgrade und die geometrische Gestaltung der Hohlprofilbauteile definiert. Darauf aufbauend befasst sich Abschnitt 5.2 mit den experimentellen Untersuchungen zur Umformung der hohlprofilförmigen Halbzeuge. Die Ergebnisse der Versuchsreihen werden in Abschnitt 5.3 vorgestellt und analysiert. Abschließend erfolgt eine Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse (siehe Abschnitt 5.4).

5.1 Definition der Komplexitätsgrade und Hohlprofilbauteile

Ausgangsbasis für die Erarbeitung eines grundlegenden Prozessverständnisses ist die experimentelle Herstellung unterschiedlicher Hohlprofilbauteile, die sich in Geometrie und/oder Halbzeugmaterial (siehe Abschnitt 5.2.1.1) unterscheiden. Für eine systematische, geometrische Gestaltung der Hohlprofilbauteile werden in Abschnitt 5.1.1 Komplexitätsgrade definiert. Darauf aufbauend legt Abschnitt 5.1.2 die Geometrie der experimentell zu untersuchenden Hohlprofilbauteile fest.

5.1.1 Geometrische Komplexitätsgrade

Zur Einordnung der unterschiedlichen Hohlprofilbauteile wurden zunächst charakteristische Geometriemerkmale festgelegt. Diese sechs geometrischen Merkmale (G1 bis G6) sind mit steigender Komplexität in Tab. 5-1 vertikal angeordnet. Den Geometriemerkmale sind wiederum Komplexitätsgrade (K0x bis K4x) zugeordnet. Die Bezeichnung WZ resultiert aus dem zur Herstellung des Hohlprofilbauteils erforderlichen Formwerkzeug (siehe Abschnitt 5.1.2).

Den geringsten Komplexitätsgrad (K0x) weist das geometrische Merkmal *große Außenradien* auf (siehe Tab. 5-1). Dieser umfasst per Definition die Umformung des Halbzeugs zu einem Hohlprofilbauteil mit konvexer Geometrie, wobei der Außenradius (R_a) des Hohlprofilbauteils größer als das Achtfache der Wandstärke (b_H) ist (siehe auch Tab. 5-2).

Tab. 5-1: Übersicht über die Komplexitätsgrade und Hohlprofilbauteile

Symbol	Geometrisches Merkmal		Komplexitätsgrad				
			K0x	K1x	K2x	K3x	K4x
	Krümmung in Längsrichtung	G6					
	Lokale Hohlprofilverstärkung	G5	WZ 09.7				
	Hoher Faserlauf-längenunterschied	G4				WZ 35.8	
	Sicke/Nut	G3			WZ 25.5		
	Kleine Außenradien	G2		WZ 13.6			
	Große Außenradien	G1	WZ 05.2	WZ 10.3			

Tab. 5-2: Grenzwerte zur Unterteilung der Komplexitätsgrade K0x bis K3x

Komplexitätsgrad	Außenradius	Relative Höhenänderung [%]	Faserlauf-längenunterschied [%]
K0x	$> 8 \cdot b_H$	< 18	$< 0,75$
K1x	$< 8 \cdot b_H$	< 18	$< 0,75$
K2x	$< 8 \cdot b_H$	> 18	$< 0,75$
K3x	$< 8 \cdot b_H$	> 18	$> 0,75$

Hohlprofilbauteile weisen das geometrische Merkmal *kleine Außenradien* auf (siehe G2 in Tab. 5-1), wenn der Außenradius des Hohlprofilbauteils kleiner als das Achtfache der Wandstärke (b_H) ist. Diesem Geometriemerkmal ist der Komplexitätsgrad K1x zugeordnet.

Das Merkmal *Sicke/Nut* beschreibt Hohlprofilbauteile mit konkaver Geometrie (siehe G3 in Tab. 5-1). Hohlprofilbauteile mit konkaver Querschnittsgeometrie stellen ein potentiell differenzierendes Merkmal dar, da zahlreiche Herstellungsverfahren (vergleiche z. B. Wickelfahren in Abschnitt 2.2.2.1, Flechtverfahren in Abschnitt 2.2.2.2) lediglich Hohlprofilbauteile mit konvexer Geometrie erlauben. Hohlprofilbauteile mit Sicke bzw. Nut weisen zwangsweise eine hohe relative Höhenänderung auf (siehe Abschnitt 4.3.1.1). Zur Unterscheidung der Komplexitätsgrade wird im Rahmen dieser Arbeit eine relative Höhenänderung von über 18 % dem Komplexitätsgrad K2x zugeordnet (siehe Tab. 5-2).

Die in Abschnitt 4.3.1.1 erörterten *Faserlauflängenunterschiede* stellen gemäß Tab. 5-1 ein Geometriemerkmal G4 dar. Bei der kontinuierlichen Umformung von Halbzeugen im Zuge des PAZ-Verfahrens, wurde von [46] ein maximaler Faserlauflängenunterschied von 0,5 % ermittelt (siehe Abschnitt 2.2.1.2 und 4.3.1.1). Eine Übertragung dieses Grenzwerts auf das FuHo-Verfahren würde bei der Gestaltung der Hohlprofilbauteile zu einer starken Geometrieinschränkung führen (vergleiche Abschnitt 5.1.2). Darüber hinaus soll mithilfe der experimentellen Untersuchungen durch eine Variation des Faserlauflängenunterschieds der Grenzwert für eine diskontinuierliche Halbzeugumformung ermittelt werden. Faserlauflängenunterschiede von über 0,75 % werden im Zuge dieser Arbeit gemäß Tab. 5-2 dem Komplexitätsgrad K3x zugeordnet.

Das Geometriemerkmal der *lokalen Hohlprofilverstärkung* (G5) ermöglicht eine Variation von Wandstärke, Faserat und Lagenaufbau über die Länge des Hohlprofilbauteils hinweg [141]. Detaillierter wird das Verfahren in Abschnitt 7.1.2 erläutert.

Die Umformung eines Halbzeugs zu einem Hohlprofilbauteil mit *Krümmung in Längsrichtung* (G6) stellt das komplexeste Geometriemerkmal dar (vergleiche Tab. 5-1). Damit verbunden ist eine aufwendige Anlagentechnik, die mit der entwickelten und aufgebauten Versuchsanlage nicht umgesetzt werden kann (siehe Abschnitt 5.2.2.1). Weist das umzuformende Halbzeug Fasern in Längs- bzw. 0°-Richtung auf, führt eine Krümmung in Längsrichtung zu einer Stauchung der Fasern im Krümmungsinnenbereich. Auf diesen Komplexitätsgrad K4x wird daher im Rahmen dieser Arbeit nicht näher eingegangen.

5.1.2 Geometrische Gestaltung der Hohlprofilbauteile

Sämtliche Hohlprofilbauteile weisen an beiden Bauteilenden nicht umgeformte Abdichtbereiche auf. Die beidseitigen Übergangsbereiche, mit der Übergangslänge $l_{\bar{0}}$, dienen zur Überführung der Abdichtbereiche in den veränderlichen Querschnitt des Hohlprofilbauteils (siehe Abschnitt 4.3.1.1). Der Umfang der Hohlprofilbauteile ist über die Länge der Bauteile hinweg stets konstant. Die Bezeichnung der Hohlprofilbauteile setzt sich aus dem zugeordneten Formwerkzeug (WZ), dem Komplexitätsgrad des Hohlprofilbauteils (K1x bis K3x) und der laufenden Formwerkzeugnummer zusammen.

Die Abschnitte 5.1.2.1 bis 5.1.2.4 beschreiben die aus den zuvor definierten Komplexitätsgraden abgeleiteten Hohlprofilbauteile WZ 10.3, WZ 13.6, WZ 25.5 und WZ 35.8. Deren Zuordnung zu den jeweiligen Komplexitätsgraden ist in Tab. 5-1 dargestellt. Ausgenommen von einer weiteren Betrachtung ist das Hohlprofilbauteil WZ 05.2 (siehe Tab. 5-1), da dieses lediglich für erste Grundsatzuntersuchungen zur Halbzeugumformung verwendet wurde. Auf Basis des Hohlprofilbauteils WZ 09.7 wurden experimentelle Untersuchungen zur lokalen Hohlprofilverstärkung durchgeführt, die in Abschnitt 7.1.2 näher beschrieben sind.

5.1.2.1 Hohlprofilbauteil WZ 10.3

Das Hohlprofilbauteil WZ 10.3 ist dem Komplexitätsgrad K1x zugeordnet. Mithilfe des Hohlprofilbauteils soll die Ausformbarkeit unterschiedlicher Außenradien untersucht werden. Hierzu weist das Hohlprofilbauteil acht verschiedene Außenradien auf (siehe Schnitt A-A und B-B in Abb. 5-1). Auf einer Länge von 15 mm findet in der Mitte des Hohlprofilbauteils der Übergang des jeweiligen Außenradius (z. B. R8 auf R7) statt. Aus dem quadratischen Querschnitt des Hohlprofilbauteils mit einer Seitenlänge von 66,4 mm resultiert eine relative Höhenänderung von 7,44 % (siehe Tab. 5-3).

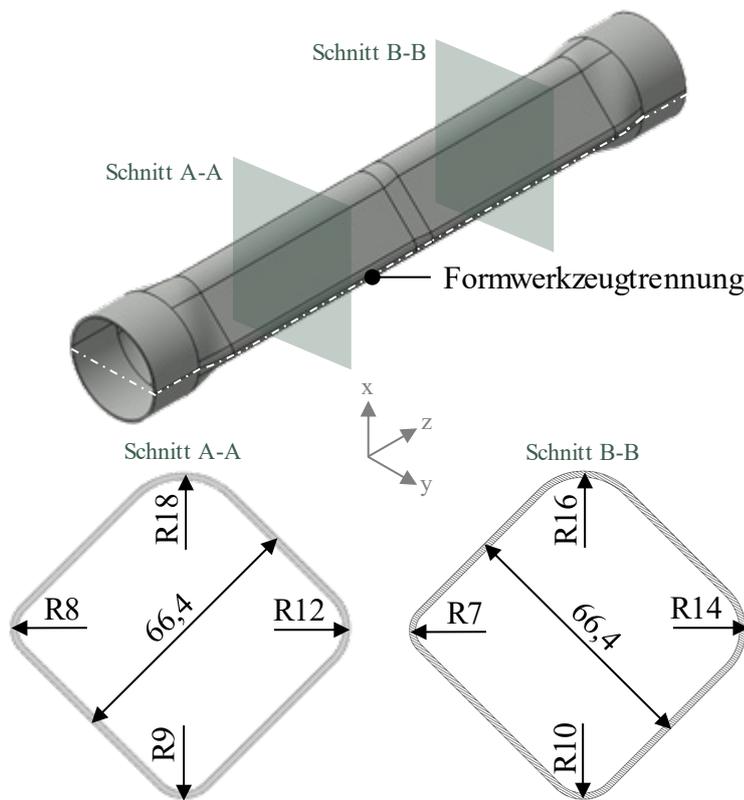


Abb. 5-1: Hohlprofilbauteil WZ 10.3
Alle Maße in mm.

Tab. 5-3: Kennwerte des Hohlprofilbauteils WZ 10.3

Länge Abdichtbereich [mm]	Übergangs- länge [mm]	Relative Höhenänderung [%]	Faserlaufängen- unterschied [%]
41,00	29,00	7,44	0,32

Da die Breite der Werkzeugkavität mindestens dem Außendurchmesser des Halbzeugs entsprechen muss (vergleiche Abschnitt 4.3.1), befindet sich die Trennebene des Formwerkzeugs in der Diagonalen des quadratischen Querschnitts. Die Formwerkzeugtrennung verläuft in der yz-Ebene demnach mittig entlang der Radien R8 und R7 sowie R12 und R14 (siehe Abb. 5-1).

5.1.2.2 Hohlprofilbauteil WZ 13.6

Das Hohlprofilbauteil WZ 13.6 wird aufgrund seiner geometrischen Kennwerte (siehe Tab. 5-4 und Abb. 5-2) ebenfalls dem Komplexitätsgrad K1x zugeordnet. Das Hohlprofilbauteil WZ 13.6 dient zur erstmaligen Absicherung eines Formwerkzeugs mit asymmetrischer Trennebene und Tauchkante. Dadurch liegt das Halbzeug an der Werkzeugkavität an, falls es während des Schließvorgangs symmetrisch ausbaucht (siehe Abb. 4-13). Für die Entformbarkeit des Hohlprofilbauteils weist das Formwerkzeug Entformungsschrägen von $1,5^\circ$ auf. Die Breite des trapezförmigen Querschnitts beträgt 82,4 mm, seine Höhe 54 mm (siehe Schnitt A-A in Abb. 5-2).

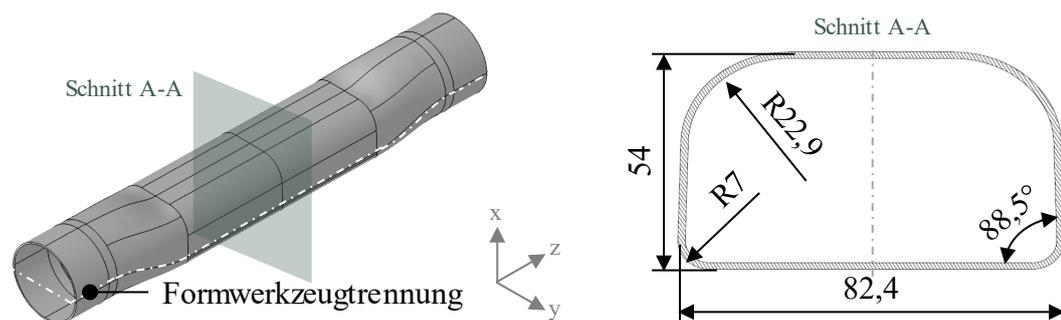


Abb. 5-2: Hohlprofilbauteil WZ 13.6 nach [87]
Alle Maße in mm.

Tab. 5-4: Kennwerte des Hohlprofilbauteils WZ 13.6

Länge Abdichtbereich [mm]	Übergangs- länge [mm]	Relative Höhenänderung [%]	Faserlaufängen- unterschied [%]
41,00	94,00	15,38	0,53

5.1.2.3 Hohlprofilbauteil WZ 25.5

Die Realisierbarkeit einer konkaven Bauteilgeometrie wird erstmalig anhand des Hohlprofilbauteils WZ 25.5 untersucht. Der Kreisquerschnitt des Halbzeugs geht zunächst in einen Rechtecksquerschnitt mit einer Seitenlänge von 84,7 mm, einer Höhe von 50 mm und einem Außenradius R14 über. In der Mitte des Hohlprofilbauteils befindet sich eine 117 mm lange Sicke mit einer Tiefe von 5 mm (siehe Schnitt A-A in Abb. 5-3). Für eine Umfangsgleichheit des Querschnitts entlang der z-Achse beträgt der Außenradius im Bereich der Sicke R15,5. Durch die, verglichen mit den vorherigen Hohlprofilbauteilen WZ 10.3 und WZ 13.6, hohe relative Höhenänderung von 24,36 % (siehe Tab. 5-5) wird dieses Hohlprofilbauteil dem Komplexitätsgrad K2x zugeordnet. Das Hohlprofil umfasst neben dem geometrischen Merkmal der Sicke auch die Merkmale große und kleine Außenradien (siehe Tab. 5-1).

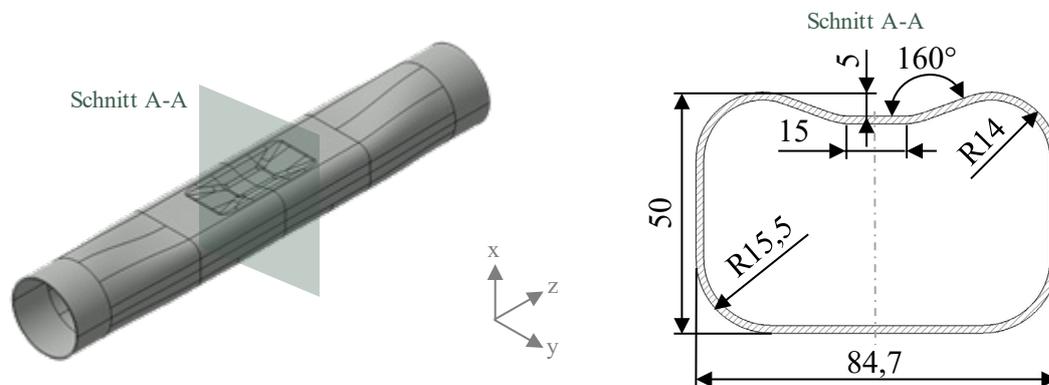


Abb. 5-3: Hohlprofilbauteil WZ 25.5
Alle Maße in mm.

Tab. 5-5: Kennwerte des Hohlprofilbauteils WZ 25.5

Länge Abdichtbereich [mm]	Übergangs- länge [mm]	Relative Höhenänderung [%]	Faserlaufängen- unterschied [%]
41,00	106,00	24,36	0,71

5.1.2.4 Hohlprofilbauteil WZ 35.8

Die im Hohlprofilbauteil WZ 35.8 vorhandene Nut in Längsrichtung ermöglicht eine weitere Steigerung der konkaven Bauteilgeometrie (vergleiche Abb. 5-4). Die Nut führt zu einer hohen relativen Höhenänderung von 28,65 % (siehe Tab. 5-6).

Unter Einhaltung der Faserlauf­längen­unterschiede vorheriger Hohlprofilbauteile (siehe Abschnitte 5.1.2.1 bis 5.1.2.3) würde dies wiederum zu einem Anstieg der erforderlichen Übergangslänge führen und die konstruktive Bauteilgestaltung einschränken. Anhand des Hohlprofilbauteils WZ 35.8 wird daher die Halbzeugumformung mit einem maximalen Faserlauf­längen­unterschied von 1,29 % untersucht. Dies ermöglicht die in Tab. 5-6 aufgeführte Übergangslänge von 139 mm. Die Länge der Nut in der Mitte des Hohlprofilbauteils beträgt somit 140 mm.

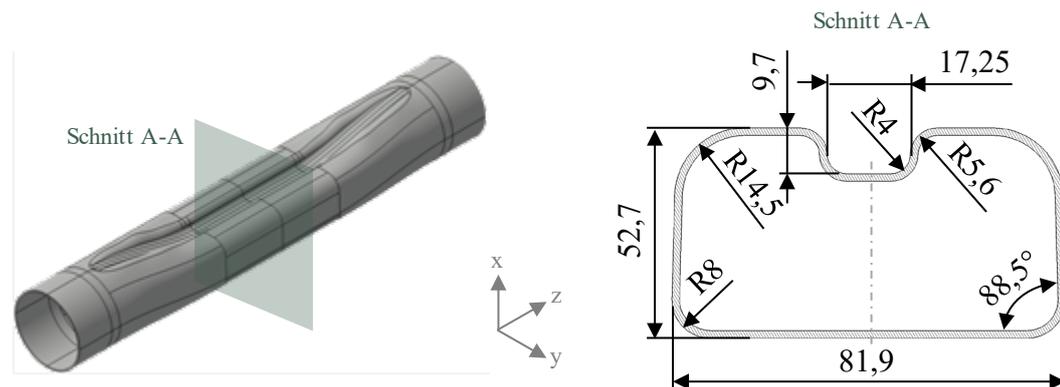


Abb. 5-4: Hohlprofilbauteil WZ 35.8
Alle Maße in mm.

Aus Schnitt A-A in Abb. 5-4 wird ersichtlich, dass die Nut des Hohlprofilbauteils eine Breite von 17,25 mm sowie eine Tiefe von 9,7 mm aufweist. Analog zum Hohlprofilbauteil WZ 13.6 besitzt das Formwerkzeug Entformungsschrägen von 1,5°. Mit einem hohen Faserlauf­längen­unterschied, einer Nut sowie kleinen und großen Außenradien weist das Hohlprofilbauteil die geometrischen Merkmale G1 bis G4 aus Tab. 5-1 auf. Durch den Faserlauf­längen­unterschied von über 0,75 % entspricht das Hohlprofilbauteil dem Komplexitätsgrad K3x.

Tab. 5-6: Kennwerte des Hohlprofilbauteils WZ 35.8

Länge Abdichtbereich [mm]	Übergangs- länge [mm]	Relative Höhenänderung [%]	Faserlauf­längen- unterschied [%]
41,00	139,00	28,65	1,29

5.2 Umformung hohlprofilförmiger Halbzeuge

Die Umformung der hohlprofilförmigen Halbzeuge zur Steigerung der geometrischen Komplexität ist die Grundlage für die Herstellung der Hohlprofilbauteile. Die Ermittlung der prozessualen und geometrischen Rahmenbedingungen für diesen Prozessschritt steht daher im Fokus der experimentellen Untersuchungen. Darauf aufbauend werden in Kapitel 7 die fertigungsgerechten Gestaltungsrichtlinien definiert. Die experimentellen Untersuchungen zur Umformung schließen die beiden vorhergehenden Prozessschritte des FuHo-Verfahrens mit ein (Abdichtung und Erwärmung). Die verwendeten Versuchsmaterialien, der konzeptionierte Versuchsaufbau, die Versuchsplanung, die Versuchsdurchführung und die Prüfverfahren zur Versuchsauswertung werden in den folgenden Abschnitten 5.2.1 bis 5.2.5 vorgestellt.

5.2.1 Versuchsmaterial

Im ersten Teil dieses Abschnitts werden die charakteristischen Materialeigenschaften der hohlprofilförmigen Halbzeuge beleuchtet (siehe Abschnitt 5.2.1.1). Zur Abdichtung der Halbzeuginnenfläche während der Umformdruckbeaufschlagung ist ein Blaschlauch erforderlich (siehe Abschnitt 4.1.2.1). Dessen technische Details beschreibt Abschnitt 5.2.1.2.

5.2.1.1 Hohlprofilförmige Halbzeuge

Die Untersuchungen zur Umformung wurden mit kontinuierlich hergestellten Halbzeugen durchgeführt [142]. Die Abmaße der hohlprofilförmigen Halbzeuge sind Abb. 5-5 zu entnehmen. Die hohen Toleranzwerte, insbesondere beim Halbzeugdurchmesser, sind auf den verfahrensbedingt einseitig gelagerten Aufweidorn zurückzuführen (PAZ-Verfahren siehe Abschnitt 2.2.1.2). Verfahrensbedingt weisen die Halbzeuge zudem an der Halbzeugoberfläche und -innenfläche 0° -Lagen auf. Der im Rahmen der Arbeit gewählte Kreisquerschnitt als Ausgangsbasis für das Hohlprofilbauteil ermöglicht eine homogene Erwärmung des Halbzeugs (siehe Abschnitt 4.2.2). Darüber hinaus hat sich in Voruntersuchungen die Annahme bestätigt, dass der Querschnitt auch während der Erwärmung auf Matrix-Schmelztemperatur in seiner geometrischen Form stabil bleibt. Bezogen auf die Kreisrohrgeometrie ergibt sich ein symmetrischer Lagenaufbau der Halbzeuge (siehe Tab. 5-7).

Bei der Auswahl der Halbzeuge lag das Hauptaugenmerk auf einer Variation von Faserart und Lagenaufbau bei gleichbleibenden Abmaßen (siehe Abb. 5-5). Die Auswahl eines geeigneten Matrixpolymers erfolgt grundsätzlich anhand von wirtschaftlichen, thermischen, chemischen und mechanischen Kriterien [143]. Halbzeuge mit PA6-Matrix weisen eine gute Marktverfügbarkeit auf und sind bereits bei zahlreichen Bauteilen (z. B. Sitzschale, Bremspedal, Infotainment-Halter etc.) in Serienanwendung. Zudem eignet sich das Matrixpolymer nach [143] auch für den Einsatz in hochbelasteten Strukturbauteilen des Automobilbaus.

Die experimentellen Untersuchungen wurden daher mit hohlprofilförmigen Halbzeugen aus glas- oder kohlenstofffaserverstärktem PA6 durchgeführt (siehe Tab. 5-7).

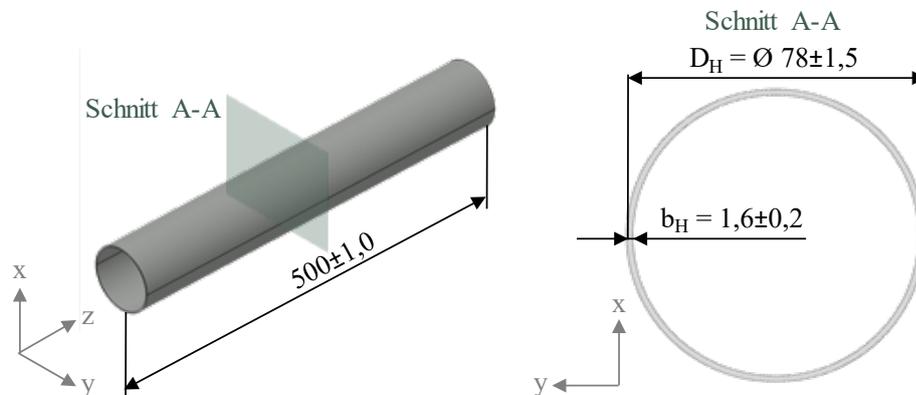


Abb. 5-5: Abmaße der hohlprofilförmigen Halbzeuge nach [142]
Alle Maße in mm.

Der Einfluss der Faserart kann durch die vergleichende Betrachtung von PA6-CF $\pm 75^\circ$ und PA6-GF $\pm 75^\circ$ untersucht werden. Da die Dicke der zur Halbzeugherstellung verwendeten PA6-CF-Tapes lediglich die Hälfte des PA6-GF-Tapes betrug (siehe Abb. A-1 und Abb. A-2), wurde für eine annähernd identische Wandstärke (b_H) die Lagenanzahl beim Halbzeug PA6-CF $\pm 75^\circ$ verdoppelt (siehe Tab. 5-7). Dies führt außerdem zu unterschiedlichen Faservolumengehalten zwischen PA6-CF $\pm 75^\circ$ und PA6-GF $\pm 75^\circ$ bzw. PA6-GF $\pm 45^\circ$. Inwiefern eine Variation des Lagenaufbaus das Umformverhalten beeinflusst, kann mithilfe der beiden Halbzeugtypen PA6-GF $\pm 75^\circ$ und PA6-GF $\pm 45^\circ$ untersucht werden.

Tab. 5-7: Kennwerte der hohlprofilförmigen Halbzeuge

Bezeichnung	Matrix	Faser	FVG [%]	T_s [°C]	Dichte [g/cm ³]	Lagenaufbau [°]
PA6-CF $\pm 75^\circ$	PA6	HT-Kohlenstoff	45,6	221,3	1,41	(0/0/+75/+75/0/0/ 0/-75/-75/0/0)
PA6-GF $\pm 75^\circ$	PA6	E-Glas	34,7	223,8	1,62	(0/+75/0/-75/0)
PA6-GF $\pm 45^\circ$	PA6	E-Glas	34,6	223,8	1,69	(0/+45/0/-45/0)

Zur Materialcharakterisierung über die Herstellerangaben hinaus wurden bei sämtlichen Halbzeugen physikalisch-chemische, mikroskopische und mechanische Analysen durchgeführt.

Dichte und Faservolumengehalt

Zunächst wurde die Dichte der Halbzeuge nach DIN ISO 1183-1 [144] bestimmt. Die Masseanteile von Faser und Matrix konnten mithilfe der thermogravimetrischen Analyse (TGA) nach DIN 51006 [145] ermittelt werden. Die daraus resultierenden Faservolumengehälter (FVG) der Halbzeuge (Dreifachbestimmung) sind Tab. 5-7 zu entnehmen. Für PA6-GF $\pm 75^\circ$ sowie PA6-GF $\pm 45^\circ$ liegt der ermittelte Wert (34,7 % bzw. 34,6 % unterhalb des Tape-Faservolumengehalts von 39 % (siehe Anhang, Abb. A-2).

Zersetzung und Kristallisationsgrad

Die thermogravimetrische Analyse (DIN 51006 [145]) wurde zudem zur Ermittlung von Zersetzungstemperatur und Kristallisationsgrad des Matrixpolymers herangezogen (Details siehe Anhang, Tab. A-3). Da es sich bei allen Halbzeugen um das identische Matrixpolymer PA6 handelt, wurden die Untersuchungen stellvertretend am Halbzeug PA6-GF $\pm 45^\circ$ durchgeführt. Durch das Lösen leichtflüchtiger Komponenten konnte bei 250 °C ein erster Massenverlust (0,3 %) festgestellt werden. Bei 320 °C wurde ein starker Abbau des Matrixpolymers detektiert (= Zersetzungstemperatur). Um eine thermische Schädigung der Halbzeuge beim Erwärmungsvorgang zu vermeiden, darf diese Temperatur daher nicht überschritten werden. Aus der benötigten Schmelzenergie und der TGA resultierte ein Kristallisationsgrad von 33,4 %.

Schmelztemperatur und Rekristallisationstemperatur

Für die Umformung des Halbzeugs ist zunächst eine homogene Erwärmung auf die PA6-Schmelztemperatur erforderlich (siehe Abschnitt 3.2.1.3). Die Schmelz- und Rekristallisationstemperatur des Matrixpolymers wurden anhand der dynamischen Differenzkalorimetrie (engl. DSC) nach ISO 11357-5 [146] bestimmt. Daten zum Messgerät sind Tab. A-2 im Anhang zu entnehmen. In Abb. 5-6 zeigt sich eine leichte Abweichung der Schmelztemperaturen zwischen PA6-CF $\pm 75^\circ$ und PA6-GF $\pm 45^\circ$ (1. Aufheizung). Die Datenblätter des Tape-Herstellers weisen eine Schmelztemperatur von jeweils 220 °C aus (siehe Abb. A-1 und Abb. A-2).

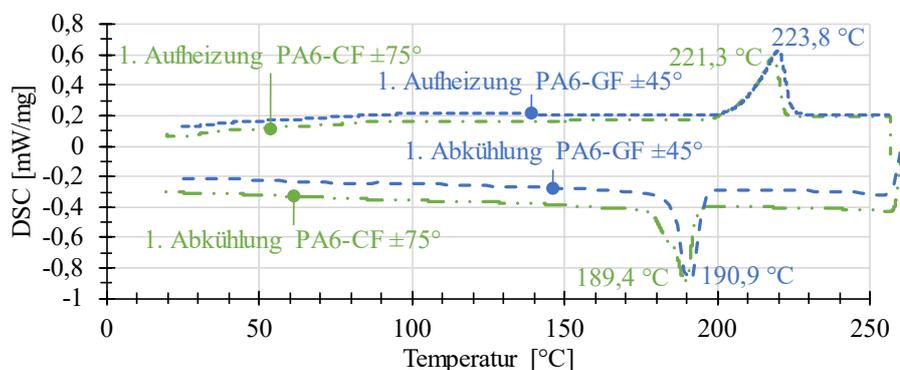


Abb. 5-6: DSC-Analyse der hohlprofilförmigen Halbzeuge PA6-CF $\pm 75^\circ$ und PA6-GF $\pm 45^\circ$

Die Rekristallisationstemperatur beläuft sich auf 189,4 °C für PA6-CF $\pm 75^\circ$ bzw. 190,9 °C für PA6-GF $\pm 45^\circ$ (1. Abkühlung in Abb. 5-6).

Temperaturleitfähigkeit, Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität

Die Wärmeleitfähigkeit (λ_H) in Wandstärkenrichtung (vergleiche DIN EN 12667 [147]) und die spezifische Wärmekapazität wurden gemäß Abb. 5-7 für sämtliche Halbzeuge auf drei unterschiedlichen Temperaturniveaus (25 °C, 100 °C, 200 °C) bestimmt.

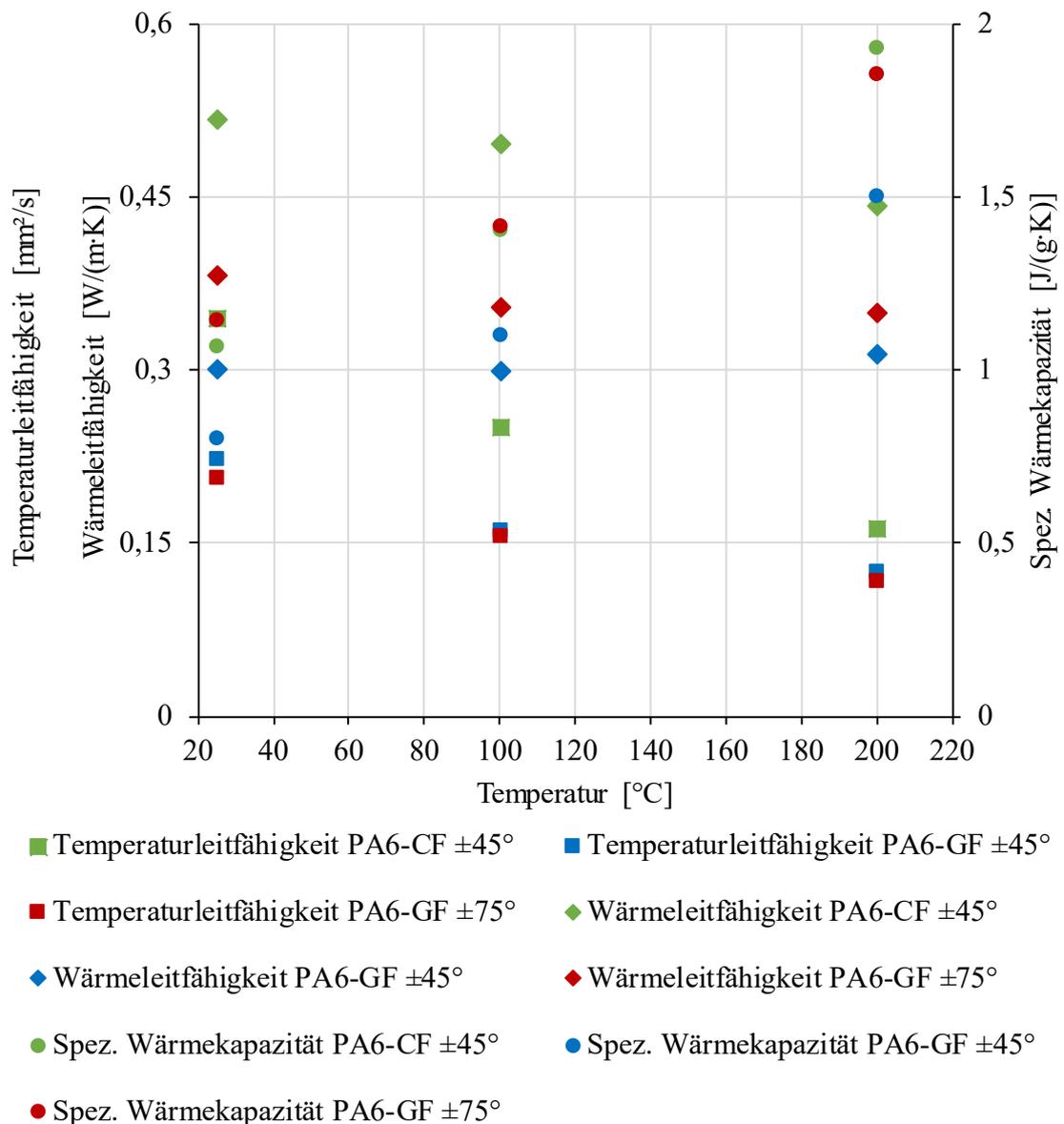


Abb. 5-7: Wärmeleitfähigkeit, Temperaturleitfähigkeit und spezifische Wärmekapazität der hohlprofilförmigen Halbzeuge PA6-CF $\pm 75^\circ$, PA6-GF $\pm 75^\circ$ und PA6-GF $\pm 45^\circ$

Die in Abb. 5-7 dargestellte Temperaturleitfähigkeit der Halbzeuge in Wandstärkenrichtung (α_H) konnte analytisch berechnet werden. Bei einer einseitigen Erwärmung der Halbzeuge (siehe Abschnitt 3.2.1.2) wird die erforderliche Erwärmungszeit zur Erreichung der Schmelztemperatur auf der Halbzeuginnenseite wesentlich durch die Wärme- und Temperaturleitfähigkeit in Wandstärkenrichtung beeinflusst. Das Halbzeug PA6-CF $\pm 75^\circ$ weist die höchste Wärme- und Temperaturleitfähigkeit auf. Bei höherem Temperaturniveau gleichen sich die Kennwerte jedoch zunehmend an. Geringe Unterschiede in Wandstärkenrichtung sind auf das identische Matrixpolymer (PA6) zurückzuführen. Eine untergeordnete Rolle spielt die Faserart, da die Wärmeleitfähigkeit quer zur Faserachse bei Kohlenstofffasern praktisch null beträgt [14]. Die ermittelten Kennwerte sind für die zukünftige Berechnung und Simulation des einseitigen Erwärmungsvorgangs von Bedeutung (siehe Abschnitt 7.3.1.2). Informationen zur verwendeten Messapparatur sind Tab. A-4 im Anhang zu entnehmen.

Materialographie

Zur mikroskopischen Untersuchung der Halbzeugqualität wurden von sämtlichen Halbzeugen Proben für die Materialographie entnommen (Details zur Gerätetechnik siehe Anhang, Tab. A-6). Die Schlibfbilder der Halbzeuge PA6-CF $\pm 75^\circ$ und PA6-GF ± 75 sind in Abb. 5-8 gegenübergestellt.

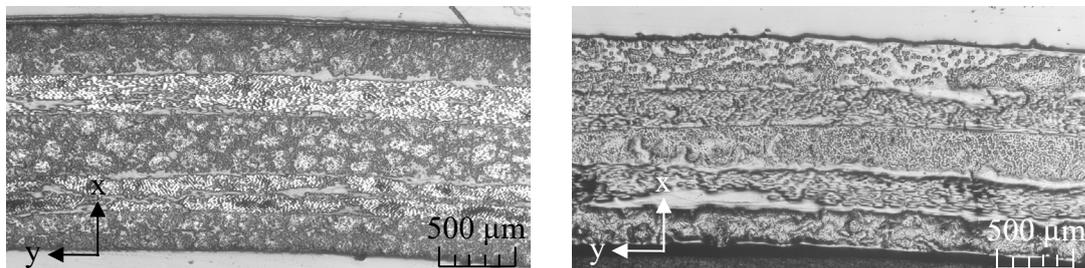


Abb. 5-8: Schlibfbilder der hohlprofilförmigen Halbzeuge
Links: PA6-CF $\pm 75^\circ$. Rechts: PA6-GF $\pm 75^\circ$.

Das Schlibfbild des Halbzeugs PA6-CF $\pm 75^\circ$ zeigt eine homogene Verteilung der Kohlenstofffasern (siehe Abb. 5-8 links). Lediglich zwischen den Einzellagen sind leichte matrixreiche Bereiche feststellbar. Mit einer Wandstärke von 1,62 mm entspricht das Halbzeug der nominellen Wandstärke von $1,6 \pm 0,2$ mm (vergleiche Abb. 5-5). Für PA6-GF ± 75 zeigt sich nach Abb. 5-8 rechts ein deutlich inhomogenerer Aufbau des Halbzeugs. Im Schlibfbild sind matrixreiche Bereiche zwischen den Einzellagen und eine ungleichmäßige Faserverteilung im Bereich der Halbzeugoberfläche erkennbar. Dies ist, verglichen mit PA6-CF $\pm 75^\circ$, auf die Dicke des Tape-Materials (PA6-GF-Tape siehe Anhang, Abb. A-2) und den geringen Faservolumengehalt (siehe Tab. 5-7) zurückzuführen.

Computertomographie

Mithilfe der Computertomographie (CT) wurde der Lagenaufbau der hohlprofilförmigen Halbzeuge untersucht. Abb. 5-9 zeigt in Wandstärkenrichtung, beginnend mit der Halbzeugoberfläche, Ausschnitte aus den CT-Bildern der Einzellagen (vergleiche Tab. 5-7). Sowohl in den 0° -Lagen als auch in den $\pm 75^\circ$ -Lagen des Halbzeugs PA6-CF $\pm 75^\circ$ ist eine homogene Verteilung der Kohlenstofffasern bei geringer Ondulation detektierbar (siehe Abb. 5-9 links). Die CT-Bilder zum Lagenaufbau des Halbzeugs PA6-GF $\pm 75^\circ$ zeigen insbesondere in den $\pm 75^\circ$ -Lagen eine verstärkte Ondulation der Glasfasern (siehe Abb. 5-9 rechts). Die 0° -Lagen des Halbzeugs weisen hingegen keine Ondulation auf. Die Inhomogenitäten in den Winkellagen resultieren daher vermutlich aus dem Wickelprozess im PAZ-Verfahren (siehe Abschnitt 2.2.1.2).

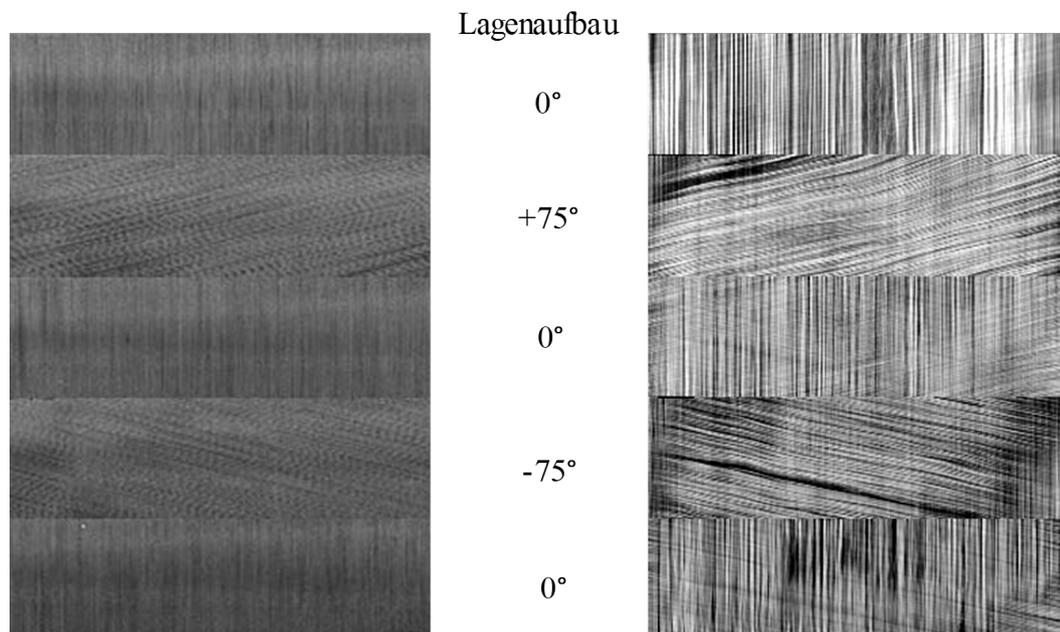


Abb. 5-9: CT-Bilder der hohlprofilförmigen Halbzeuge (Einzellagen)
Links: PA6-CF $\pm 75^\circ$. Rechts: PA6-GF $\pm 75^\circ$.

Technische Details zum verwendeten Computertomographen sind Tab. A-5 im Anhang zu entnehmen.

Außendurchmesser

Aufgrund der hohen Toleranzangaben für den Außendurchmesser von Seiten des Halbzeugherstellers (siehe Abb. 5-5) wurde bei 15 Halbzeugen je PA6-CF $\pm 75^\circ$, PA6-GF $\pm 75^\circ$ und PA6-GF $\pm 45^\circ$ der Außendurchmesser an 20 Messpunkten überprüft. Das Halbzeug PA6-CF $\pm 75^\circ$ weist einen durchschnittlichen Außendurchmesser von 78,25 mm (Standardabweichung: 0,20 mm) auf.

Der gemittelte Außendurchmesser für das Halbzeug PA6-GF $\pm 75^\circ$ beträgt 78,04 mm (Standardabweichung: 0,31 mm). Für PA6-GF $\pm 45^\circ$ wurde ein Außendurchmesser von 78,12 mm (Mittelwert) bei einer Standardabweichung von 0,48 mm gemessen. Die Streuung der Außendurchmesser ist bei PA6-CF $\pm 75^\circ$ deutlich geringer als bei den Halbzeugen PA6-GF $\pm 75^\circ$ und PA6-GF $\pm 45^\circ$. [70, 148, 149]

Ringzugversuch

Zur Charakterisierung der mechanischen Halbzeugeigenschaften wurde der Ringzugversuch in Anlehnung an die ASTM D2290-12 [150] herangezogen. Aus jeweils einem PA6-CF $\pm 75^\circ$, PA6-GF $\pm 75^\circ$ sowie PA6-GF $\pm 45^\circ$ Halbzeug wurden fünf Prüfkörper mit 15 mm Breite entnommen und an einer Materialprüfmaschine getestet (Details siehe Anhang, Tab. A-8). Die Prüfgeschwindigkeit bei Raumtemperatur betrug bei allen Versuchen 2 mm/min (Vorkraft: 10 N).

In Abb. 5-10 sind die Zugfestigkeiten der drei unterschiedlichen Halbzeuge gegenübergestellt. Es zeigt sich ein deutlicher Einfluss von Faserart und Lagenaufbau. Das Halbzeug PA6-CF $\pm 75^\circ$ weist mit 364,91 N/mm² erwartungsgemäß die höchste Zugfestigkeit auf. Bedingt durch die Glasfaser und den geringeren Faservolumengehalt (siehe Tab. 5-7) erreicht das Halbzeug PA6-GF $\pm 75^\circ$ lediglich eine Zugfestigkeit von 193,60 N/mm². Aus der Veränderung des Faserwinkels auf $\pm 45^\circ$ resultiert im Ringzugversuch ein matrixdominanter Lastfall. Die Zugfestigkeit des Halbzeugs PA6-GF $\pm 75^\circ$ fällt auf 79,02 N/mm² ab.

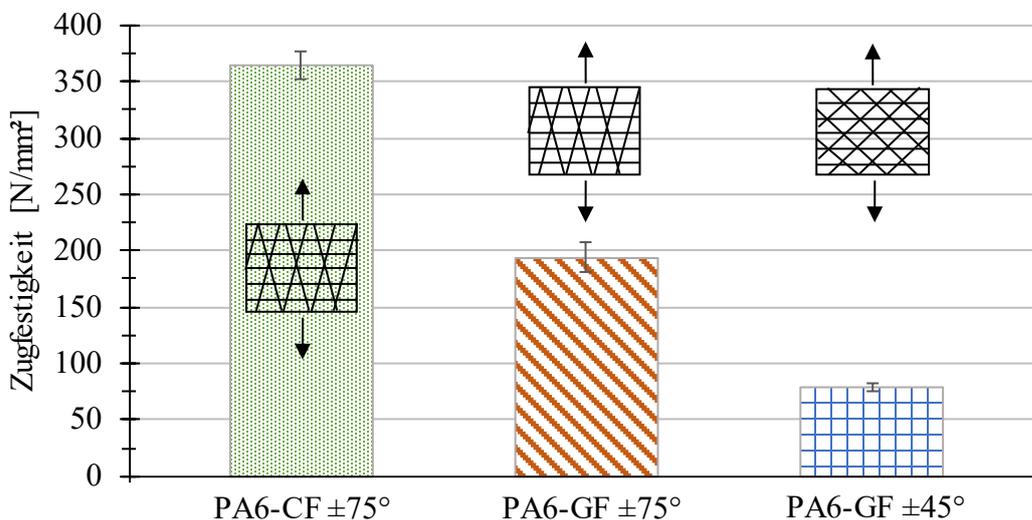


Abb. 5-10: Zugfestigkeit der hohlprofilförmigen Halbzeuge PA6-CF $\pm 75^\circ$, PA6-GF $\pm 75^\circ$ und PA6-GF $\pm 45^\circ$

(n = 5 je Halbzeug, Mittelwerte inkl. Konfidenzintervall, Konfidenzniveau: 95 %)

Beim simulativen Abgleich des experimentell ermittelten Strukturversagens zeigte sich eine gute Übereinstimmung der mechanischen Kennwerte [148]. Für eine simulative Vorhersage ist zum einen der thermische Spannungsaufbau des Matrixpolymers ab Rekristallisationstemperatur bis zur Abkühlung auf Raumtemperatur zu berücksichtigen [151, 152]. Zum anderen führt die Krümmung des Prüfkörpers zu einer Spannungskonzentration, die die Zugfestigkeit um bis zu 20 % gegenüber einer ebenen Platte reduziert [54].

Zusammenfassend zeigen sich anhand physikalisch-chemischer, mikroskopischer und mechanischer Analysen schwankende Halbzeugeigenschaften sowie eine ungleichmäßige Halbzeugqualität. Die Unterschiede zwischen PA6-GF ± 75 , PA6-GF ± 75 sowie PA6-GF ± 45 sind bei der späteren Bewertung der Hohlprofilbauteile zu berücksichtigen.

5.2.1.2 Blasschlauch

Für die Umformung wurde die Innenfläche der Halbzeuge mit Blasschläuchen aus peroxidisch vernetztem Silikon und mit Kreisquerschnitt abgedichtet (siehe Abschnitt 4.1.2.1). Die Eckdaten zum Blasschlauch sind der Tab. 5-8 zu entnehmen (Toleranzen nach DIN ISO 3302-1 E2 [153]).

Tab. 5-8: Kennwerte des Blasschlauchs

Bezeichnung	Innen- \emptyset [mm]	Außen- \emptyset [mm]	Wandstärke [mm]	Härte [Shore A]
SI-64	64 \pm 2,0	67 \pm 2,0	1,5 \pm 0,5	60 \pm 5,0

Bei der im Rahmen dieser Arbeit konzeptionierten Prozesstechnik erwies sich ein nicht anliegender Blasschlauch als sinnvoll, da dieser während des Erwärmungsvorgangs dem Halbzeug keine Wärme entzieht und eine gute Entformbarkeit ermöglicht (siehe Abschnitt 4.1.2.1). Der Außendurchmesser des Blasschlauchs ist daher mit 67 \pm 2,0 mm in etwa 8 mm kleiner als der Innendurchmesser des Halbzeugs (vergleiche Abb. 5-5). Die Wandstärke von 1,5 \pm 0,5 mm gewährleistet eine Formflexibilität bei gleichzeitig hoher Robustheit. Um ein Anhaften am Hohlprofilbauteil zu verhindern, ist der Blasschlauch talkumiert. Nach der Umformung kann der Blasschlauch entformt und mehrfach verwendet werden.

5.2.2 Versuchsaufbau

Auf Basis der in Kapitel 4 erarbeiteten Anlagenkomponenten für die Prozessschritte Abdichtung, Erwärmung und Umformung wurde eine nachfolgend beschriebene Versuchsanlage zur Herstellung der Hohlprofilbauteile aufgebaut. Gesondert betrachtet wird der Aufbau der Umformeinheit bzw. Formwerkzeuge (siehe Abschnitt 5.2.2.2). Die Anlagensteuerung und Messwerterfassung wird in Abschnitt 5.2.2.3 vorgestellt.

5.2.2.1 Versuchsanlage

Wie in Abb. 5-11 gezeigt, umfasst die Versuchsanlage im Wesentlichen eine Hydraulikpresse, ein zweiteiliges, temperiertes Formwerkzeug und zwei IR-Strahlerhalbschalen. Diese Hydraulikpresse bewegt über eine horizontale Schließbewegung (x-Richtung) das sogenannte Oberteil des Formwerkzeugs, während das feststehende Unterteil in seiner Position verbleibt. Die in Abschnitt 4.2.2 detaillierter beschriebenen IR-Strahlerhalbschalen öffnen und schließen pneumatisch entlang der y-Achse (siehe Abb. 5-11). Durch die 27 Zwillingsrohr-IR-Strahler summiert sich die installierte Leistung der beiden IR-Strahlerhalbschalen auf 28 kW (Details siehe Anhang, Tab. A-11). Bedingt durch die kompakte, kreuzförmige Anordnung der Komponenten, wird nach Abschluss des Erwärmungsvorgangs ein schnelles Schließen des Formwerkzeugs ermöglicht. Dadurch wird ein starkes Abkühlen des auf Matrix-Schmelztemperatur erwärmten Halbzeugs vermieden.

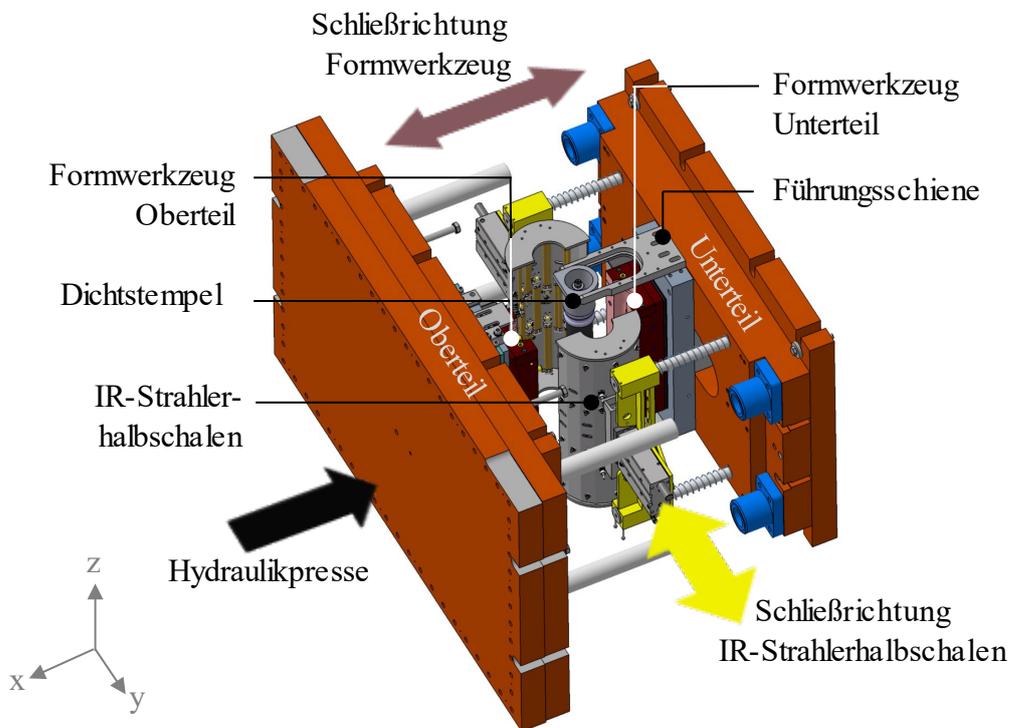


Abb. 5-11: Aufbau der Versuchsanlage nach [87]

Der Umformdruck (p_u) wird über eine Stickstoffflasche bereitgestellt, zunächst via Druckregelventil gedrosselt und anschließend über den unteren Dichtstempel (siehe Abschnitt 4.1.2.2) in den Blasschlauch eingeleitet. Durch das Druckregelventil ist der systemtechnisch maximal mögliche Umformdruck auf 50 bar begrenzt. Die Führungsschiene (siehe Abb. 5-11) positioniert das Halbzeug während der Erwärmung in vertikaler Position und ermöglicht beim Schließvorgang des Formwerkzeugs eine Verfahrbewegung in Richtung Unterteil (x-Richtung).

5.2.2.2 Umformeinheit

In Abhängigkeit von den vier Hohlprofilbauteilen (siehe Abschnitt 5.1.2) besitzen die Formwerkzeuge eine unterschiedliche Werkzeugkavität. Den stets identischen Grundaufbau der zweiteiligen Formwerkzeuge aus Aluminium illustriert Abb. 5-12. Für die Temperierung der Formwerkzeuge ist jede der beiden Formwerkzeughälften mit jeweils vier Heizpatronen bestückt (Details siehe Anhang, Tab. A-11). Zur Steuerung und Überwachung der Werkzeugtemperatur (vergleiche Abschnitt 5.2.2.3) sind jeweils zwei Temperatursensoren verbaut. Bei geschlossenem Formwerkzeug stellt eine Nut-Feder-Verbindung (siehe Abb. 5-12) eine formschlüssige Verbindung zwischen Formwerkzeug und Dichtstempel sicher. Dies verhindert bei der Umformdruckbeaufschlagung (p_u) eine Verschiebung der Dichtstempel in z-Richtung.

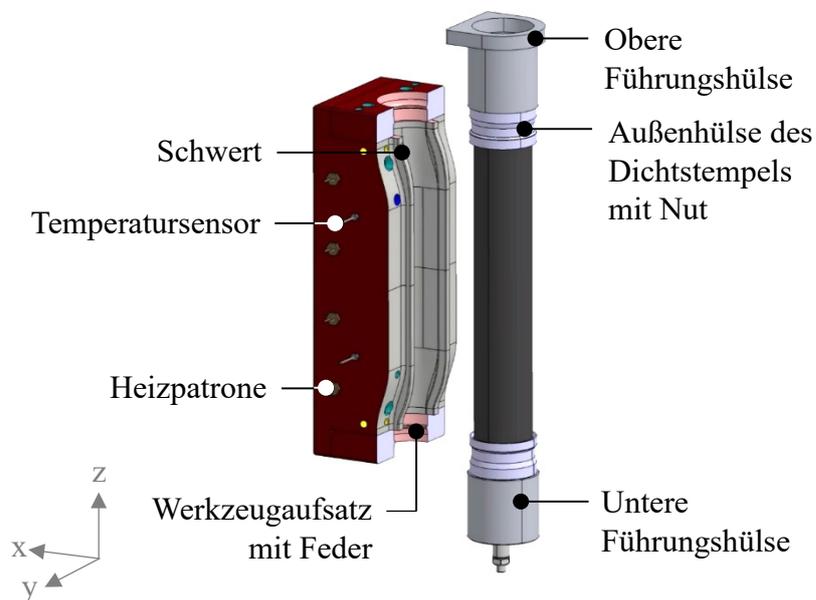


Abb. 5-12: Aufbau der Umformeinheit

Die obere Führungshülse bildet die Schnittstelle zur Führungsschiene (vergleiche Abb. 5-11). Um ein Verkippen des Halbzeugs während des Schließvorgangs zu vermeiden, ist eine untere Führungshülse ebenfalls mit einer Führungsschiene verbunden. Beide Führungshülsen werden mit den Dichtstempeln nach dem Abdichtvorgang verschraubt. Abb. 5-13 zeigt mit Fokus auf die Tauchkante die konstruktive Umsetzung des in Abschnitt 4.3.1 konzeptionierten Formwerkzeugs. Für eine frühzeitig geschlossene Werkzeugkavität taucht das Schwert des Oberteils in die Tasche des Unterteils ein.

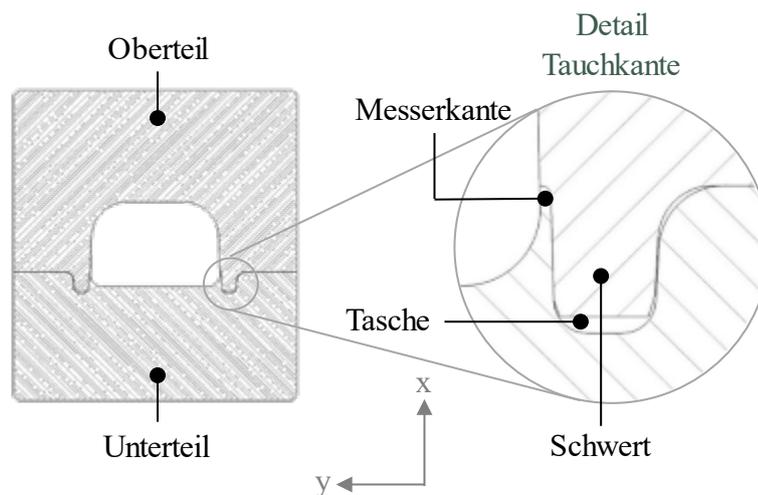


Abb. 5-13: Konstruktive Umsetzung des Tauchkante

Bei Aluminiumwerkzeugen ist im Unterteil zwischen Werkzeugkavität und Tasche fertigungsbedingt eine Mindestwandstärke von 1,0 mm vorzusehen. Daraus resultiert die in Abb. 5-13 ersichtliche Messerkante. Baucht das Halbzeug während des Schließvorgangs im Bereich der Messerkante aus, kann es zur Ausbildung eines Quetschgrats kommen. Dieser fällt, verglichen mit Abquetschwerkzeugen (siehe Abschnitt 4.3.1.2), jedoch deutlich geringer aus. Bei zukünftigen Serienanwendungen kann der Quetschgrat durch die Verwendung hochfester Werkzeugwerkstoffe (geringere Mindestwandstärke) weiter verringert werden.

5.2.2.3 Anlagenregelung und Messwerterfassung

Die zentrale Regelung und Bedienung der Versuchsanlage sowie die Messwerterfassung erfolgte über eine SPS-basierte Anlagenregelung mit Touchpanel (siehe Abb. 5-14). Nähere Informationen zu Aktuatoren, Sensoren und Software der Versuchsanlage sind dem Anhang (siehe Tab. A-11 und Tab. A-12) zu entnehmen. Für den Erwärmungsvorgang des Halbzeugs werden die maximale Oberflächentemperatur des Halbzeugs (T_0) und die Erwärmungsdauer (t_{IR}) vorgegeben.

Die sechs Pyrometer der beiden Strahlerhalbschalen (siehe Abschnitt 4.2.2) messen die Oberflächentemperatur des Halbzeugs. Unter Berücksichtigung dieser Oberflächentemperatur passt die Anlagenregelung die Strahlerleistung in jeder der sechs Zonen individuell an und hält so die Oberflächentemperatur konstant. Nach Ablauf der eingangs definierten Erwärmungsdauer werden die IR-Strahlerhalbschalen über Pneumatikzylinder geöffnet (siehe Abb. 5-11). Die Temperierung des Formwerkzeugs wird mithilfe zweier Temperatursensoren (ein Sensor je Formwerkzeughälfte), acht Heizpatronen und einer separaten Steuerung bewerkstelligt (siehe Abb. 5-14). Die verbleibenden zwei Temperatursensoren speisen die Werkzeugtemperatur zur Messwerterfassung in die Anlagenregelung ein.

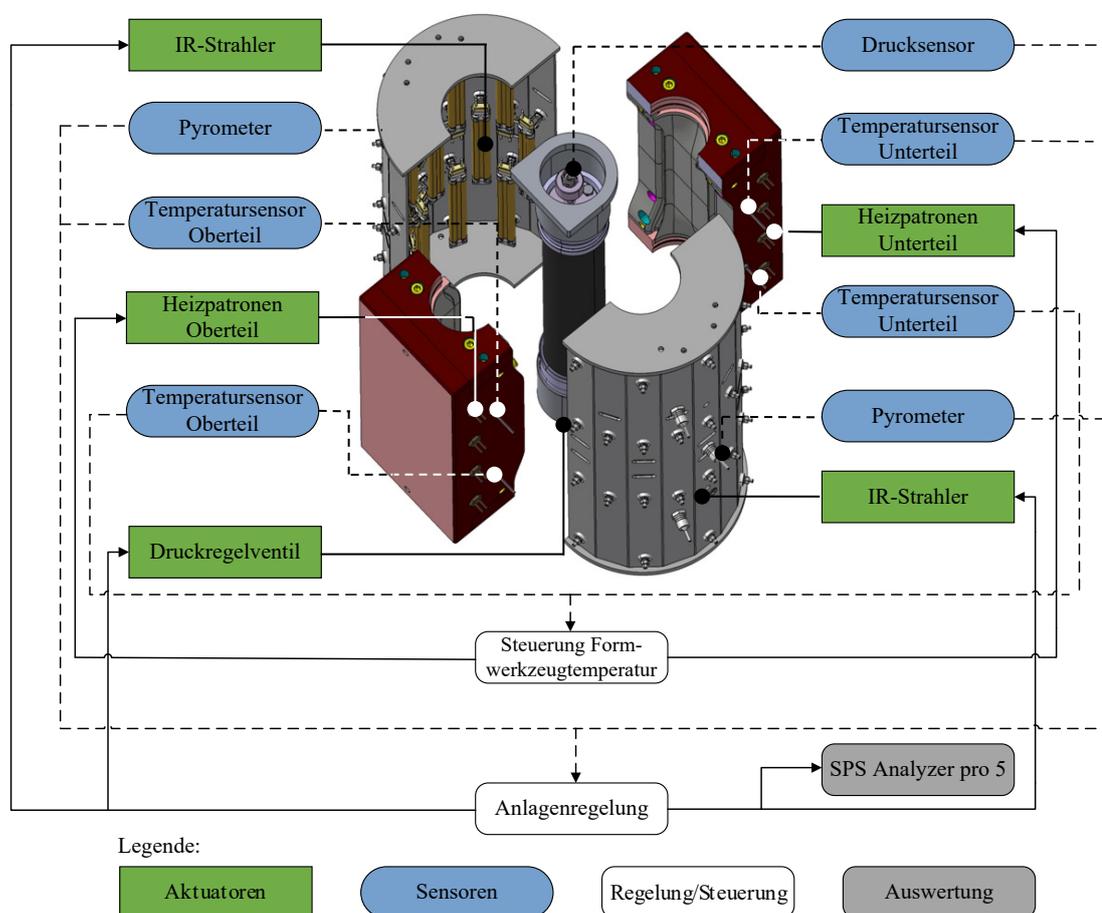


Abb. 5-14: Schematische Darstellung der Anlagensteuerung und Messwerterfassung nach [70]

Der Umformdruck (p_u) und die Dauer der Druckbeaufschlagung (t_u) werden nach Vorgabe an der Anlagenregelung über das Druckregelventil geregelt. Sind die Formwerkzeuge vollständig geschlossen, wird die Umformdruckbeaufschlagung über einen Taster manuell gestartet.

Der im Blasschlauch vorherrschende Druck wird gemäß Abb. 5-14 zusätzlich über einen Drucksensor erfasst. Für die Prozessparameteranalyse und Auswertung werden die von der Anlagenregelung verarbeiteten Signaldaten mithilfe der Software „SPS Analyzer pro 5“ aufgezeichnet.

5.2.3 Versuchsplanung

Zur systematischen Planung und Eingrenzung der Versuche wurde für die experimentellen Untersuchungen zur Bauteilherstellung das in Abb. 5-15 ersichtliche Ursache-Wirkungs-Modell nach [154] erarbeitet.

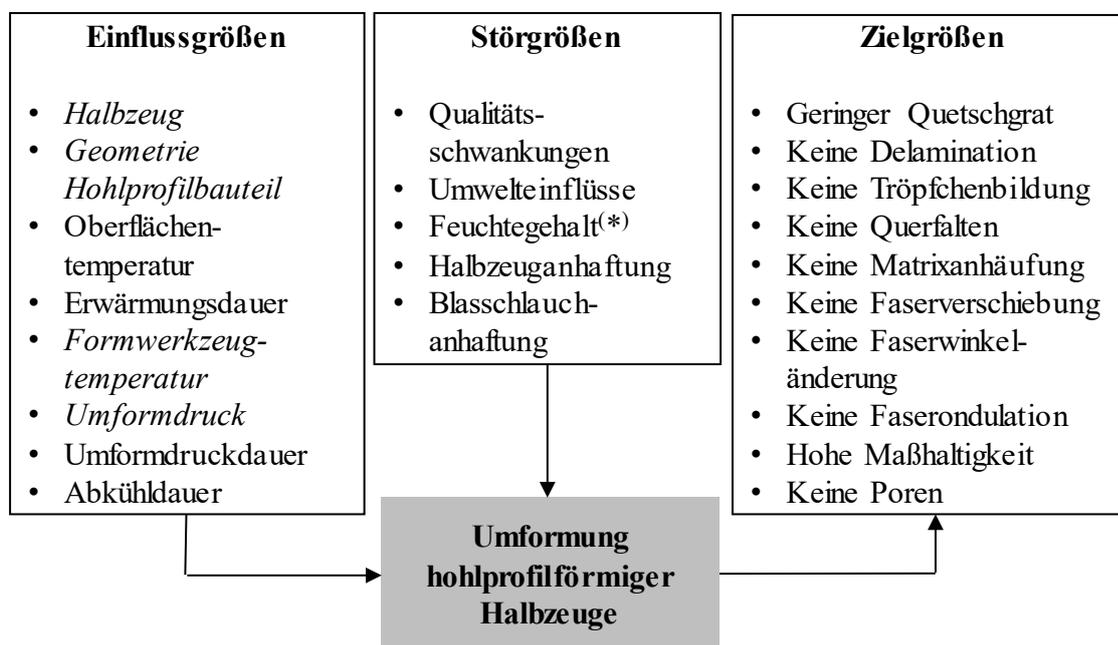


Abb. 5-15: Ursache-Wirkungs-Modell für die Umformung hohlprofilförmiger Halbzeuge
 Kursiv gedruckte Einflussgrößen werden bei den experimentellen Untersuchungen variiert.
 (*) Relevant aufgrund des hygroskopischen Matrixpolymers PA6.

Die definierten Zielgrößen leiten sich aus den Qualitätsanforderungen an das Hohlprofilbauteil ab. Delaminationen, Querfalten, Matrixanhäufungen, Faserverschiebungen, Faserwinkeländerungen, Faserondulationen und Poren wirken sich negativ auf die mechanischen Eigenschaften des Halbzeugs aus. Der Quetschgrat konnte aufgrund der Formwerkzeuge nicht vollständig vermieden werden (siehe Abschnitt 5.2.2.2). Die Tröpfchenbildung beeinträchtigt im Wesentlichen die Oberflächenqualität der Hohlprofilbauteile. Eine hohe Maßhaltigkeit ist für den späteren Verbau des Hohlprofilbauteils in der Fahrzeugkarosserie von Bedeutung. Die Hohlprofilbauteile wurden mithilfe der in Abschnitt 5.2.5 definierten Prüfverfahren hinsichtlich der Zielgrößen untersucht.

Die Qualitätsschwankungen der Halbzeuge (siehe Abschnitt 5.2.1.1) führen im Ursache-Wirkungs-Modell, ebenso wie Umwelteinflüsse, zu nicht beeinflussbaren Störgrößen. Der Feuchtegehalt der Halbzeuge konnte durch eine Lagerung bei hoher Temperatur und geringer Luftfeuchtigkeit reduziert werden (siehe Abschnitt 5.2.4). Dadurch wird beim Erwärmungsvorgang ein schlagartiges Verdampfen des im Matrixpolymer gebundenen Wassers und damit die Gefahr der Porenbildung reduziert [155]. Die Verwendung eines Trennmittels reduziert Halbzeuganhaftungen an der Werkzeugkavität. Talkum verhindert eine Anhaftung des Blasschlauchs am Hohlprofilbauteil (siehe Abschnitt 5.2.1.2).

Die Einflussgrößen auf die Umformung hohlprofilförmiger Halbzeuge sind in Abb. 5-15 links dargestellt. Die drei unterschiedlichen Halbzeuge sowie die Geometrie der vier Hohlprofilbauteile wurden bereits in den Abschnitten 5.1.2 und 5.2.1.1 festgelegt. Der Erwärmungsvorgang wird maßgeblich von der Oberflächentemperatur des Halbzeugs (T_O), der Erwärmungsdauer (t_{IR}) und der maximalen Leistung der IR-Strahler (P_{IR}) beeinflusst. Zur Bestimmung dieser Einflussgrößen wurden umfangreiche Voruntersuchungen durchgeführt. Für das rasche Erreichen der Matrix-Schmelztemperatur auf der Halbzeuginnenseite ist eine gute Wärmeleitfähigkeit des Halbzeugs in Dickenrichtung und eine möglichst hohe Oberflächentemperatur erforderlich. Dabei darf jedoch die Zersetzungstemperatur des Matrixpolymers von 320 °C nicht überschritten werden (siehe Abschnitt 5.2.1.1). Da während des Erwärmungsvorgangs Regelabweichungen auftreten, wurde eine Oberflächentemperatur von $T_O = 300$ °C festgelegt [148]. In Abb. 5-16 wird ersichtlich, dass die leicht überschwingende Oberflächentemperatur stets unterhalb der Zersetzungstemperatur liegt (Mittelwert der Pyrometer in den Zonen 1 bis 6, siehe Abschnitt 5.2.2.3). Um ein zu starkes Überschwingen der Oberflächentemperatur während der Aufheizphase zu unterbinden, wurde die maximale IR-Strahlerleistung auf 19,7 kW begrenzt [70]. Dies entspricht einer Drosselung auf 70 % der maximal möglichen IR-Strahlerleistung (siehe Abschnitt 5.2.2.1). Der Verlauf der relativen IR-Strahlerleistung über die Zeit ist in Abb. 5-16 dargestellt. Zur Bestimmung der erforderlichen Erwärmungsdauer (t_{IR}) wurde die Halbzeuginnenfläche mit zwei Temperatursensoren versehen (technische Details siehe Anhang, Tab. A-1).

Der Temperaturverlauf in Abb. 5-16 zeigt, dass bei einer Oberflächentemperatur von 300 °C und einer relativen IR-Strahlerleistung von 70 % nach 35 Sekunden die Matrix-Schmelztemperatur auf der Halbzeuginnenseite (T_I) erreicht wird. Durch die hohe Oberflächentemperatur des Halbzeugs steigt die Temperatur auf der Halbzeuginnenseite nach Beendigung der Erwärmung weiterhin leicht an. Nach dem Schließvorgang des Formwerkzeugs (Dauer: 9 Sekunden) wird der Blasschlauch gemäß Abb. 5-16 mit Umformdruck beaufschlagt. Zu diesem Zeitpunkt beträgt die Temperatur auf der Halbzeuginnenseite 225 °C. Sie liegt damit leicht über der ermittelten Schmelztemperatur für PA6-CF $\pm 75^\circ$ von 221,3 °C (siehe Tab. 5-7).

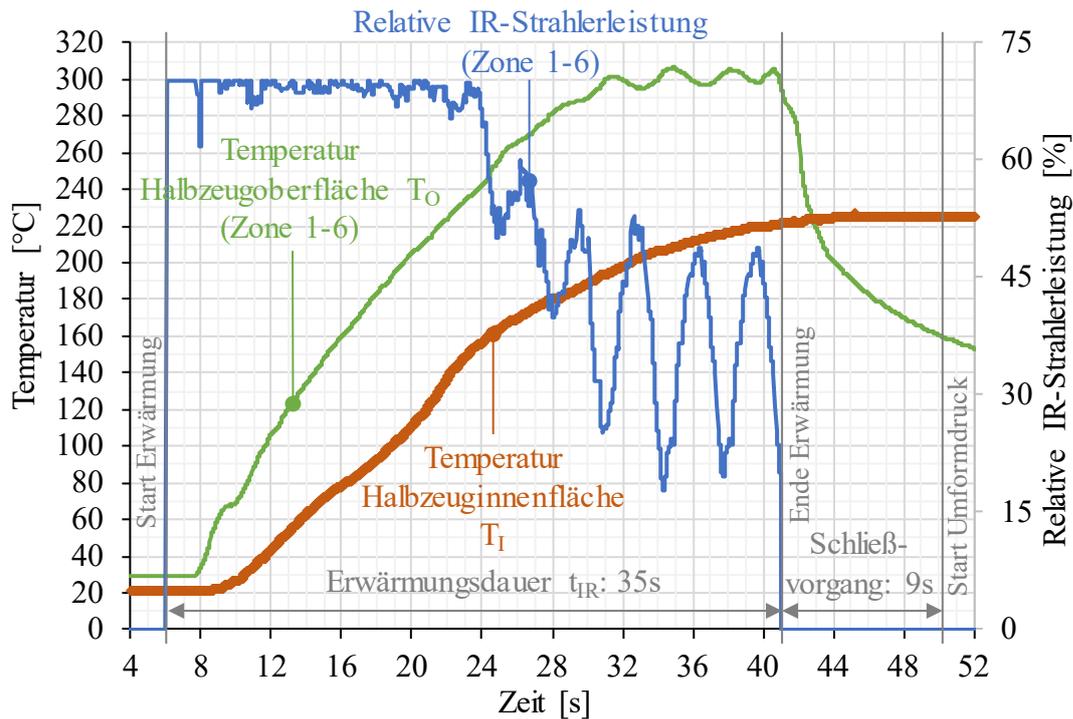


Abb. 5-16: Experimentelle Bestimmung der Erwärmungsdauer
 Halbzeug: PA6-CF $\pm 75^\circ$, T_O : 300°C , P_{IR} : $19,7\text{ kW}$.

Die Veränderung der Formwerkzeugtemperatur (T_{WZ}) zwischen 60 und 120°C zeigte beim Hohlprofilbauteil WZ 13.6 keinen nennenswerten Einfluss auf die Bauteilqualität [70]. Formwerkzeugtemperaturen über 120°C beeinflussten hingegen in Vorversuchen die Qualität des Hohlprofilbauteils WZ 10.3 positiv [149]. Bei Formwerkzeugtemperaturen über 150°C trat trotz Trennmittel eine Halbzeuganhaftung und in weiterer Folge eine starke Verunreinigung der Werkzeugkavität auf [149]. Für detaillierte Untersuchungen zum Einfluss der Formwerkzeugtemperatur wurden drei Temperaturstufen – 120 , 135 und 150°C – festgelegt (siehe auch Tab. 5-10).

Die Höhe des Umformdrucks (p_u) sowie die Dauer der Druckbeaufschlagung (t_u) stellen zwei weitere Einflussgrößen dar (siehe Abb. 5-15). Aufgrund der Anlagentechnik ist der maximale Umformdruck auf 50 bar begrenzt (siehe Abschnitt 5.2.2.1). In Voruntersuchungen wies das Hohlprofilbauteil WZ 13.6 mit steigendem Umformdruck eine verbesserte Bauteilqualität auf [70]. Um diesen Einfluss in Abhängigkeit von Hohlprofilbauteil und Halbzeug näher zu untersuchen, wurde ein minimaler Umformdruck von 20 bar , ein mittlerer Umformdruck von 35 bar und ein maximaler Umformdruck von 50 bar festgelegt. Abb. 5-17 illustriert den Aufbau der Umformdrücke im Blasschlauch.

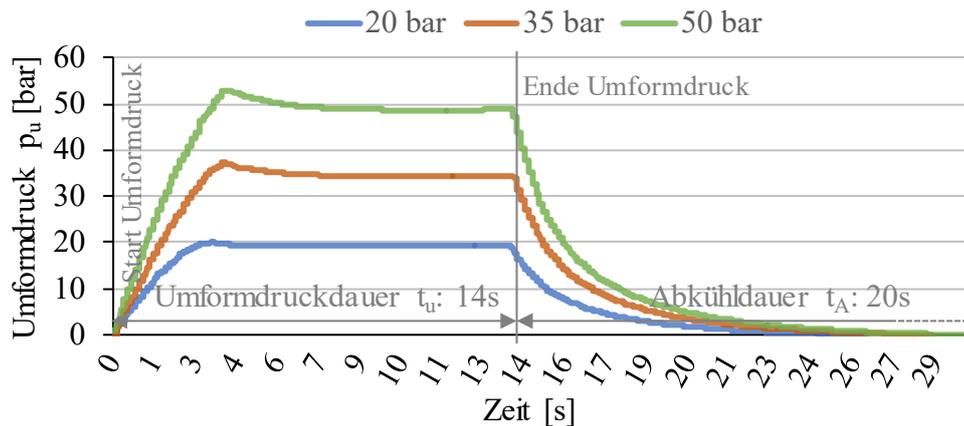


Abb. 5-17: Experimentelle Bestimmung der Umformdruckdauer
Werkzeugschließzeit: 34 Sekunden.

Wie lange der Umformdruck mindestens aufrechterhalten werden muss, um eine vollständige Drapierung des Halbzeugs in der Werkzeugkavität sicherzustellen, wurde ebenfalls anhand von experimentellen Voruntersuchungen ermittelt. Bei minimaler Formwerkzeugtemperatur (T_{WZ} : 120 °C) und minimalem Umformdruck (p_u : 20 bar) fand eine vollständige Umformung des Hohlprofilbauteils WZ 10.3 erstmalig nach 14 Sekunden statt [149]. Eine längere Umformdruckdauer zeigte keinen Einfluss auf die Bauteilqualität. Abb. 5-17 verdeutlicht, dass der voreingestellte Umformdruck spätestens nach 3,6 Sekunden (p_u : 50 bar) im Blasschlauch vorliegt. Daraus resultiert eine effektive Umformdruckdauer von ca. 10 Sekunden. Für die Abkühlung des Hohlprofilbauteils blieb das Formwerkzeug nach Beendigung des Umformdrucks weitere 20 Sekunden geschlossen (= Abkühldauer t_A). Der Umformdruck im Blasschlauch reduziert sich bis dahin auf Atmosphärendruck (siehe Abb. 5-17).

Die aus den Vorversuchen und der Versuchsplanung resultierenden Prozessparameter zur Umformung hohlprofilförmiger Halbzeuge sind in Tab. 5-10 zusammengefasst (siehe Abschnitt 5.2.4). Zur Untersuchung der Einflussgrößen Halbzeug, Hohlprofilbauteil, Formwerkzeugtemperatur und Umformdruck waren unter Verwendung eines vollfaktoriellen Versuchsplans insgesamt 270 Umformversuche erforderlich (drei Wiederholungen je Parameterkombination).

In Tab. 5-9 ist die Versuchsanzahl den drei Halbzeugen (PA6-CF $\pm 75^\circ$, PA6-GF $\pm 75^\circ$, PA6-GF $\pm 45^\circ$) und Hohlprofilbauteilen zugeordnet. Das Halbzeug PA6-GF $\pm 45^\circ$ wurde aufgrund der begrenzten Verfügbarkeit lediglich in Kombination mit WZ 25.5 und WZ 35.8 herangezogen.

Tab. 5-9: Anzahl der Versuche in Abhängigkeit von Material und Hohlprofilbauteil

Halbzeug	WZ 10.3	WZ 13.6	WZ 25.5	WZ 35.8	Σ Versuche
PA6-CF $\pm 75^\circ$	27	27	27	27	108
PA6-GF $\pm 75^\circ$	27	27	27	27	108
PA6-GF $\pm 45^\circ$	-	-	27	27	54

5.2.4 Versuchsdurchführung

Vor der Versuchsdurchführung wurden die hohlprofilförmigen Halbzeuge zunächst fünf Tage bei einer konstanten Temperatur von 80 °C gelagert. Der Feuchtegehalt reduzierte sich dadurch von 1,5 auf 0,17 % (PA6 Matrixpolymer) [148]. Vor jedem Umformversuch wurde die auf Formwerkzeugtemperatur (siehe T_{WZ} in Tab. 5-10) erwärmte Werkzeugkavität mit Trennmittel versehen. Aufgrund des Trennmittels konnte eine Anhaftung des Halbzeugs an der aus kostengründen nicht polierten Oberfläche der Werkzeugkavität vermieden werden. Nach dem manuellen Einbringen des Blaschlauchs (siehe Abschnitt 5.2.1.2) ins Halbzeuginnere wurden die beiden Halbzeugenden mithilfe der Dichtstempel und der Dichtstempel-Verspannvorrichtung abgedichtet (siehe Abschnitt 4.1.2.2).

Tab. 5-10: Umformparameter und Halbzeuge in Abhängigkeit vom Hohlprofilbauteil

Geometrie des Hohlprofilbauteils	Halbzeug	p_u [bar]	T_{WZ} [°C]	T_O [°C]	t_{IR} [s]	t_u [s]	t_A [s]
WZ 10.3	PA6-CF $\pm 75^\circ$	20	120	300	35	14	20
	PA6-GF $\pm 75^\circ$	35	135				
	PA6-GF $\pm 75^\circ$	50	150				
WZ 13.6	PA6-CF $\pm 75^\circ$	20	120	300	35	14	20
	PA6-GF $\pm 75^\circ$	35	135				
	PA6-GF $\pm 75^\circ$	50	150				
WZ 25.5	PA6-CF $\pm 75^\circ$	20	120	300	35	14	20
	PA6-GF $\pm 75^\circ$	35	135				
	PA6-GF $\pm 45^\circ$	50	150				
WZ 35.8	PA6-CF $\pm 75^\circ$	20	120	300	35	14	20
	PA6-GF $\pm 75^\circ$	35	135				
	PA6-GF $\pm 45^\circ$	50	150				

Anschließend wurde das abgedichtete Halbzeug in der Führungsschiene der Versuchsanlage platziert (siehe Abschnitt 5.2.2.1) und über die Anlagenregelung der Erwärmungsvorgang mit den in Tab. 5-10 beschriebenen Eckdaten (T_O , t_{IR} , P_{IR}) gestartet. Nach Ablauf der Erwärmungsdauer (t_{IR}) öffneten sich automatisch die beiden IR-Strahlerhalbschalen, und über die Hydraulikpresse wurde der Schließvorgang des Formwerkzeugs gestartet. Bei geschlossenem Formwerkzeug wurde die Beaufschlagung des Blasschlauchs mit dem jeweiligen Umformdruck (siehe p_u in Tab. 5-10) manuell gestartet. Die Umformdruckdauer (t_u) wurde über alle Versuche hinweg konstant gehalten. Zur manuellen Entnahme des Hohlprofilbauteils inklusive Dichtstempel wurde das Formwerkzeug nach Ablauf der ebenfalls stets konstanten Abkühlzeit (t_A) wieder geöffnet (Werkzeugschließzeit: 34 Sekunden). Abschließend erfolgte die Demontage der beiden Dichtstempel und die Entfernung des Blasschlauchs aus dem Hohlprofilbauteil.

5.2.5 Prüfverfahren

Die Hohlprofilbauteile wurden zunächst einer Sichtprüfung unterzogen, bei der anhand eines Fehlerbildkatalogs eine Bauteilbewertung stattfand (siehe Abschnitt 5.2.5.1). Auf Basis der Sichtprüfung wurden 40 Hohlprofilbauteile dreigeteilt, um den Bauteilquerschnitt sowohl einer erneuten Sichtprüfung als auch einer Schnittbildprüfung zu unterziehen. Mithilfe der Schnittbildprüfung wurden die Hohlprofilbauteile auf Maßhaltigkeit und Delaminationen geprüft (siehe Abschnitt 5.2.5.2). 12 Hohlprofilbauteile wurden mittels Radiusprüfung hinsichtlich der Maßhaltigkeit der Außenradien und Faserondulationen im Radiusbereich untersucht (siehe Abschnitt 5.2.5.3). An sieben Hohlprofilbauteilen wurden Proben für die Materialographie, und an zwei weiteren Proben für die computertomographische Prüfung entnommen. Dadurch ließen sich Poren, Faserwinkeländerungen, Delaminationen und matrixreiche Bereiche detektieren. Tab. 5-11 zeigt eine Übersicht über die Prüfverfahren auf makro- und mikroskopischer Ebene.

Tab. 5-11: Übersicht über die Prüfverfahren zur Untersuchung der Hohlprofilbauteile

Betrachtungsebene	Prüfmethode	Zielgrößen
Makroskopisch	Sichtprüfung	Quetschgrat, Delamination, Tröpfchenbildung, Querfalten, Faserverschiebung, Faserondulation, Matrixanhäufung
Makroskopisch	Schnittbildprüfung	Maßhaltigkeit, Delamination
Makroskopisch	Radienprüfung	Maßhaltigkeit, Faserondulation
Mikroskopisch	CT-Prüfung	Faserwinkeländerung, Delamination
Mikroskopisch	Materialografie	Poren, Delamination, matrixreiche Bereiche

5.2.5.1 Sichtprüfung

Die Sichtprüfung ermöglicht eine makroskopische Bewertung der Hohlprofilbauteile mithilfe eines Fehlerbildkatalogs. Der Fehlerbildkatalog basiert auf umfangreichen Voruntersuchungen anhand derer charakteristische Fehlerbilder der Hohlprofilbauteile identifiziert und kategorisiert wurden [70, 87, 149]. Die Fehlerbilder treten an der Oberfläche, der Innenfläche oder im Querschnitt des Hohlprofilbauteils auf (siehe Beispielbilder im Anhang, Abschnitt c). Jedes Hohlprofilbauteil wurde von drei Personen unabhängig voneinander einer Sichtprüfung unterzogen, wobei jedes Fehlerbild die Bewertung hinsichtlich dreier Kategorien (keine, geringe oder ausgeprägte Fehlerausbildung) vorsah. Für die Übertragung der Bewertung in eine Auswertungsmatrix wurden die Kategorien in Fehlerpunkte (keine = 1, gering = 2, ausgeprägt = 3) überführt. In Abb. 5-18 wird der Ablauf der Sichtprüfung und der Erscheinungsort des jeweiligen Fehlerbildes ersichtlich.

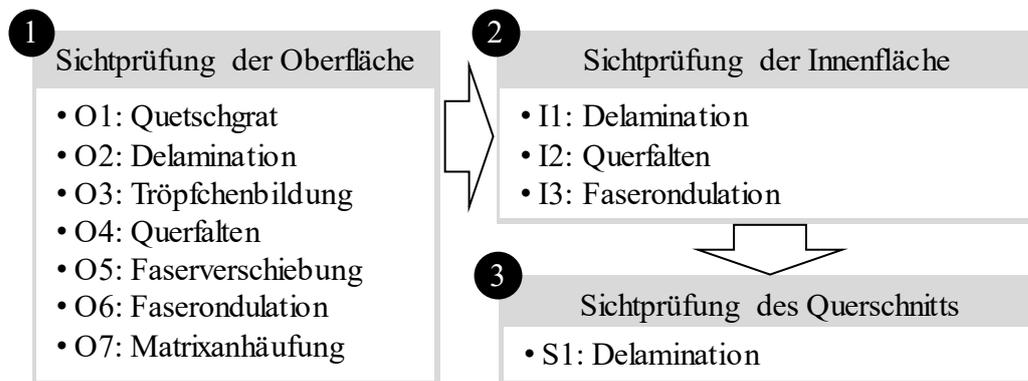


Abb. 5-18: Ablauf der Sichtprüfung anhand des Fehlerbildkatalogs nach [149]

5.2.5.2 Schnittbildprüfung

Für die optische Prüfung der Schnittbilder wurden die Querschnitte von 40 Hohlprofilbauteilen zunächst mit einem Kamerasystem ab fotografiert. Zur Reduktion des Messrauschens wurden pro Querschnitt fünf Aufnahmen erstellt. Die Bildverarbeitungssoftware „XG VisionEditor“ ermöglichte die Analyse der Schnittbilder hinsichtlich charakteristischer Bauteilabmaße. Zudem dienten die Schnittbilder zur Prüfung des Hohlprofilbauteils auf Delaminationen. Details zum Kamerasystem sowie zur Bildverarbeitungssoftware sind Tab. A-9 im Anhang zu entnehmen.

5.2.5.3 Radienprüfung

Die Außenradien der Hohlprofilbauteile wurden mit einem Laser-Profilsensor auf ihre Maßhaltigkeit geprüft. Darüber hinaus ließen sich mithilfe des Laser-Profilsensors Faserondulationen im Radiusbereich feststellen.

Die zur Radienprüfung aufgebaute Prüfvorrichtung geht aus Abb. 5-19 hervor (technische Details siehe Anhang, Tab. A-10). Über die beiden Linearachsen kann der Laser-Profilsensor während des Messvorgangs manuell verfahren werden. Dies ermöglicht, im Gegensatz zu den anderen Prüfverfahren (siehe Tab. 5-11), die Prüfung der Maßhaltigkeit über die Länge des Hohlprofilbauteils hinweg (z-Richtung).

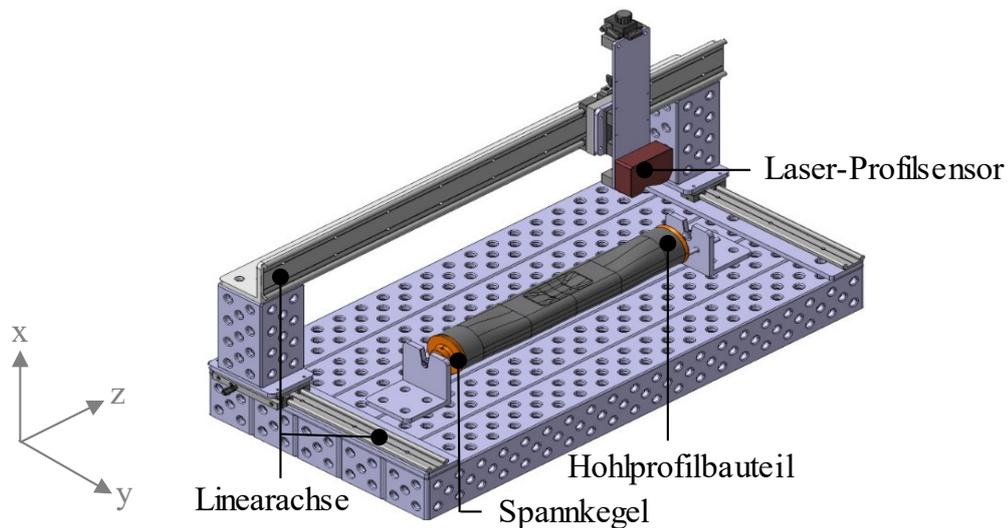


Abb. 5-19: Aufbau der Radien-Prüfvorrichtung

5.3 Ergebnisse und Diskussion

In den folgenden Abschnitten werden die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen zur Umformung hohlprofilförmiger Halbzeuge vorgestellt und diskutiert. Abschnitt 5.3.1 befasst sich zunächst mit dem Einfluss des Komplexitätsgrades auf das Hohlprofilbauteil. Der Einfluss des Halbzeugs auf das Hohlprofilbauteil wird anschließend in Abschnitt 5.3.2 betrachtet. Abschnitt 5.3.3 beleuchtet den Einfluss des Lageraufbaus auf die Eigenschaften des Hohlprofilbauteils.

5.3.1 Einfluss des Komplexitätsgrades auf das Hohlprofilbauteil

In den folgenden Abschnitten 5.3.1.1 bis 5.3.1.4 werden die Ergebnisse der Prüfverfahren für alle vier Hohlprofilbauteile analysiert. Inwiefern die Wahl des Komplexitätsgrades und die Variation der Umformparameter (Formwerkzeugtemperatur T_{wz} , Umformdruck p_u) die Ergebnisse der Sichtprüfung beeinflussen, zeigt Abb. 5-20.

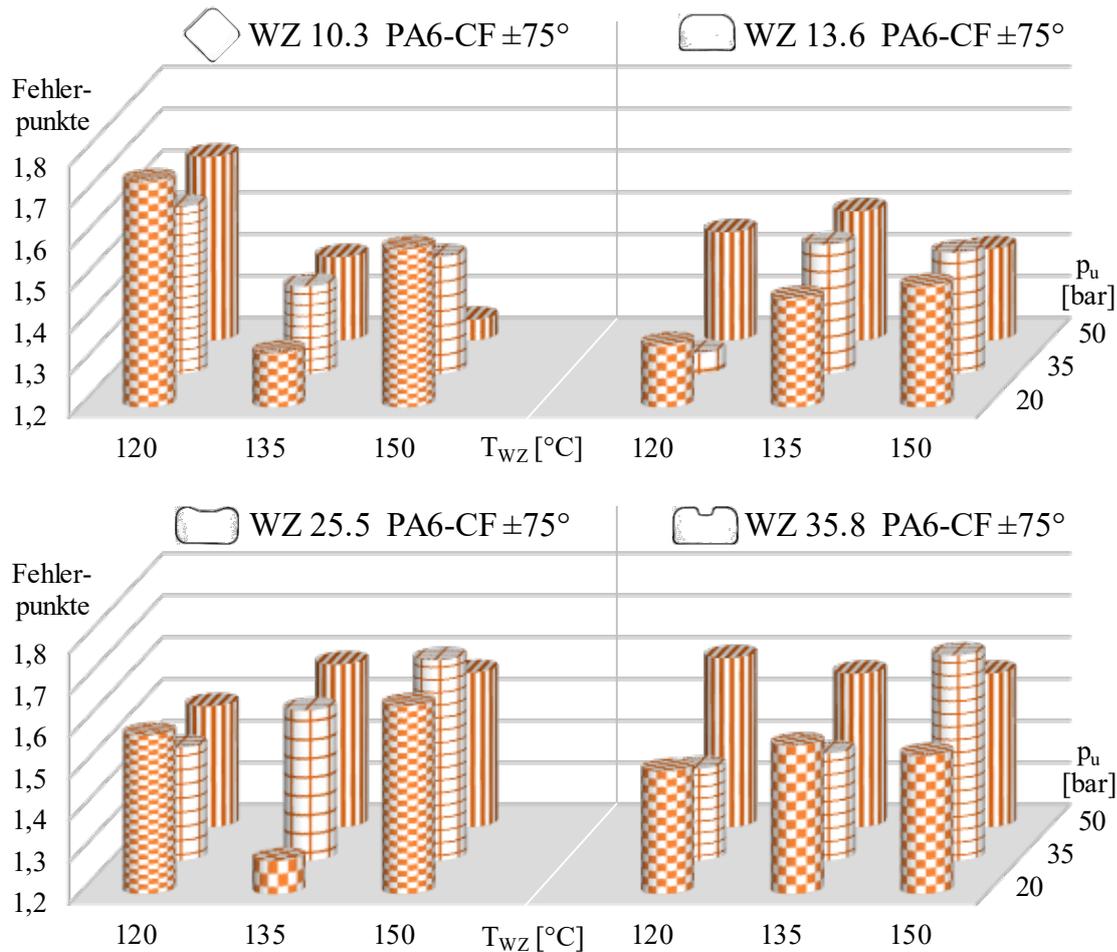


Abb. 5-20: Einfluss des Komplexitätsgrades auf die Hohlprofilbauteile bei Sichtprüfung
($n = 27$ je Hohlprofilbauteil, Mittelwerte der Fehlerpunkte)

5.3.1.1 Hohlprofilbauteil WZ 10.3

Aus der Auswertung der Sichtprüfung wird ersichtlich, dass sich die Fehlerbilder der Hohlprofilbauteile WZ 10.3 mit zunehmender Formwerkzeugtemperatur (T_{WZ}) und steigendem Umformdruck (p_u) deutlich verringern (siehe Abb. 5-20 links oben). Die besten Umformergebnisse wurden bei einer Formwerkzeugtemperatur von 150 °C und einem Umformdruck von 50 bar erzielt (1,25 Fehlerpunkte). Lediglich vereinzelt traten dabei Querfalten an der Innenfläche der Hohlprofilbauteile auf (siehe Anhang c). Durch die verfahrensbedingt erforderliche Trennung des Formwerkzeugs in der Diagonalen des quadratischen Querschnitts (siehe Abschnitt 5.1.2.1) kommt es gemäß Abb. 5-21 beim Schließvorgang frühzeitig zu einem Kontakt des Halbzeugs mit der Werkzeugkavität. Die hohe Formwerkzeugtemperatur verhindert ein starkes Abkühlen des Halbzeugs im Kontaktbereich. Durch den hohen Umformdruck wird das Halbzeug vollständig in die Radien der Werkzeugkavität drapiert (siehe Abb. 5-21).

Während der Umformung der hohlprofilförmigen Halbzeuge werden – analog zur Hydro-Umformung von metallischen Halbzeugen [95] – zuletzt die Bauteilradien vollständig ausgeformt.

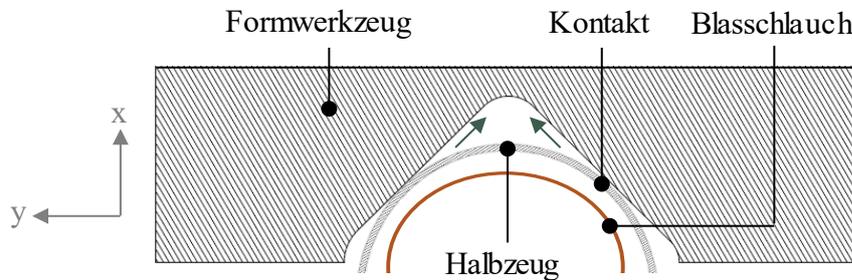


Abb. 5-21: Drapierung des Halbzeugs in die Werkzeugkavität zur Ausformung der Bauteilradien

Oberteil des zweiteiligen Formwerkzeugs zum Hohlprofilbauteil 10.3

Bei zu geringer Formwerkzeugtemperatur und/oder zu geringem Umformdruck traten infolge unvollständig ausgeformter Bauteilradien Faserondulationen an der Oberfläche und Innenfläche der Hohlprofilbauteile auf (siehe Fehlerbilder in Anhang c). In Abb. 5-22 ist die Häufigkeit dieses Fehlerbildes für sämtliche Hohlprofilbauteile dargestellt. Die Darstellung beinhaltet die Fehlerausprägung der Hohlprofilbauteile aus den Halbzeugen PA6-CF $\pm 75^\circ$ und PA6-GF $\pm 75^\circ$. Da das Halbzeug PA6-GF $\pm 45^\circ$ lediglich für die Hohlprofilbauteile WZ 25.5 und WZ 35.8 verwendet wurde (siehe Abschnitt 5.2.3), ist dieses in Abb. 5-22 und den weiteren Abbildungen dieser Art nicht berücksichtigt. Die Fehlerhäufigkeit resultiert aus der dreifachen Einzelbewertung sämtlicher Hohlprofilbauteile (siehe Abschnitt 5.2.5.1). Aufgrund des definierten Punktesystems kann die Fehlerbewertung bestenfalls den Wert eins annehmen.

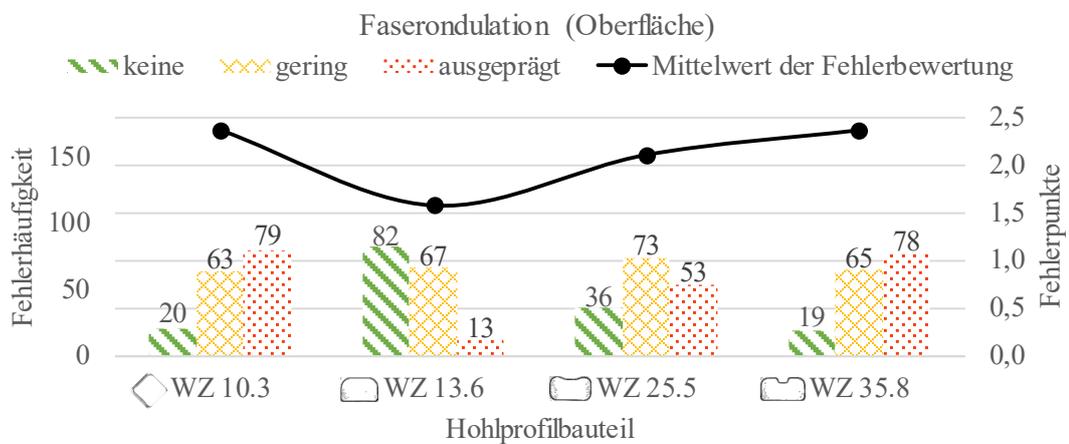


Abb. 5-22: Faserondulation an der Oberfläche der Hohlprofilbauteile bei Sichtprüfung
 (Halbzeuge: PA6-CF $\pm 75^\circ$ und PA6-GF $\pm 75^\circ$, n = 27 je Hohlprofilbauteil)

Die Fehlerhäufigkeit in Abb. 5-22 verdeutlicht, dass aufgrund der langen Drapierwege (siehe Abb. 5-21) das Fehlerbild der Faserondulation insbesondere bei Hohlprofilbauteil WZ 10.3 auftritt. Bei den Hohlprofilbauteilen WZ 13.6 und WZ 25.5 fällt die ausgeprägte Faserondulation deutlich geringer aus. Auf die Faserondulation des Hohlprofilbauteils WZ 35.8 wird in Abschnitt 5.3.1.4 näher eingegangen.

Die Faserondulation zeigt sich auch bei einer makroskopischen Untersuchung der Bauteilradien gemäß Abschnitt 5.2.5.3. In Abb. 5-23 ist der 16 mm Radius zweier Hohlprofilbauteile gegenübergestellt. Die Ergebnisse der Radiusprüfung (siehe Abb. 5-23 links) korrespondieren mit den Erkenntnissen aus der Sichtprüfung (vergleiche Abb. 5-20). Demnach reicht eine Formwerkzeugtemperatur von 120 °C und ein Umformdruck von 20 bar nicht aus, um den Radius vollständig auszuformen.

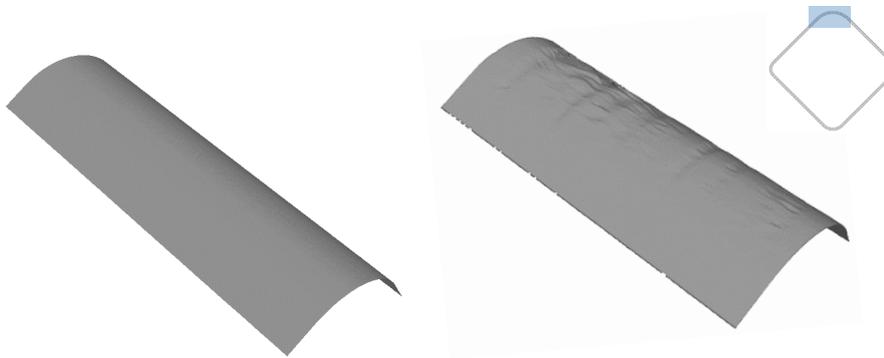


Abb. 5-23: Radienprüfung des Hohlprofilbauteils WZ 10.3 (PA6-CF $\pm 75^\circ$, Radius 16 mm)
Links: $T_{WZ} = 150 \text{ }^\circ\text{C}$, $p_u = 50 \text{ bar}$. Rechts: $T_{WZ} = 120 \text{ }^\circ\text{C}$, $p_u = 20 \text{ bar}$. Oberflächenprofil des Realbauteils.

Über die Länge des Hohlprofilbauteils WZ 10.3 hinweg wurden vier der acht Bauteilradien vermessen. Die Faserondulation spiegelt sich bei der Radiusprüfung durch eine erhöhte Schwankung der Messwerte wider (siehe Tab. 5-12 rechts). Bei vollständiger Ausformung der Radien weichen die Messwerte maximal 0,09 mm (Mittelwert) vom Sollwert ab (siehe Abschnitt 5.1.2.1).

Tab. 5-12: Radienprüfung des Hohlprofilbauteils WZ 10.3 (PA6-CF $\pm 75^\circ$)

Radius	Messwerte [mm]							
	$T_{WZ} = 150 \text{ }^\circ\text{C}$; $p_u = 50 \text{ bar}$				$T_{WZ} = 120 \text{ }^\circ\text{C}$; $p_u = 20 \text{ bar}$			
Radius (Sollwert)	9,00	10,00	16,00	18,00	9,00	10,00	16,00	18,00
Radius (min.)	8,98	9,99	15,98	17,97	9,07	9,93	15,55	17,87
Radius (max.)	9,10	10,10	16,11	18,13	9,08	11,06	16,56	19,32
Radius (Mittelw.)	9,02	10,00	16,09	18,03	9,07	10,07	15,92	18,10

Die mikroskopische Untersuchung zweier Hohlprofilbauteile (WZ 10.3) zeigt den Einfluss des Umformdrucks auf die Laminatqualität. Beide Hohlprofilbauteile weisen anhand der Sichtprüfung die identische Fehlerbewertung auf, unterscheiden sich jedoch im Umformdruck. In Abb. 5-24 zeigen die Schlibilder bei beiden Hohlprofilbauteilen einen homogenen Verlauf des Lagenaufbaus im Radiusbereich. Bei einem Umformdruck von 50 bar fallen die Fehlstellen (Poren) im Halbzeug jedoch deutlich geringer aus (siehe Abb. 5-24 links).

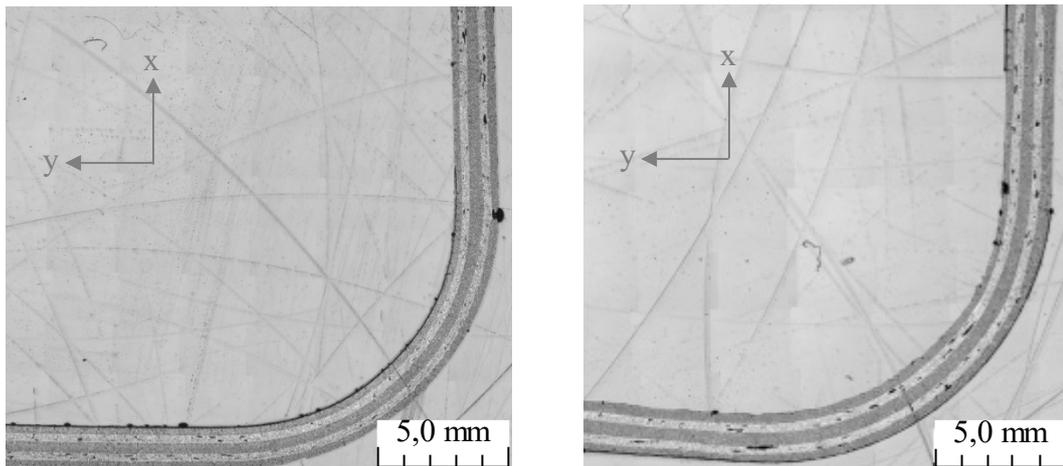


Abb. 5-24: Schlibilder des Hohlprofilbauteils WZ 10.3 (PA6-CF $\pm 75^\circ$, Radius 16 mm)
Links: $T_{WZ} = 135^\circ\text{C}$, $p_u = 50$ bar. Rechts: $T_{WZ} = 135^\circ\text{C}$, $p_u = 20$ bar.

5.3.1.2 Hohlprofilbauteil WZ 13.6

Für das Hohlprofilbauteil WZ 13.6 lässt sich auf Basis der Sichtprüfung kein eindeutiger Einfluss der Formwerkzeugtemperatur und des Umformdrucks feststellen (siehe Abb. 5-20 rechts oben). Durch die konstruktive Gestaltung des Formwerkzeugs muss das Halbzeug bei der Ausformung der Bauteilradien – verglichen mit dem Hohlprofilbauteil WZ 10.3 – geringere Drapierwege zurücklegen. Geringere Formwerkzeugtemperaturen und Umformdrücke zur vollständigen Ausformung der Radien sind die Folge. Die besten Umformergebnisse wurden gemäß Abb. 5-20 bei einer Formwerkzeugtemperatur von 120°C und einem Umformdruck von 35 bar erzielt (1,25 Fehlerpunkte). Die Hohlprofilbauteile wiesen neben den Fehlerbildern Faserondulation (siehe Abb. 5-22) und Querfalten hauptsächlich eine Tröpfchenbildung an der Oberfläche auf. Die Häufigkeit dieses Fehlerbildes ist für sämtliche Hohlprofilbauteile in Abb. 5-25 dargestellt.

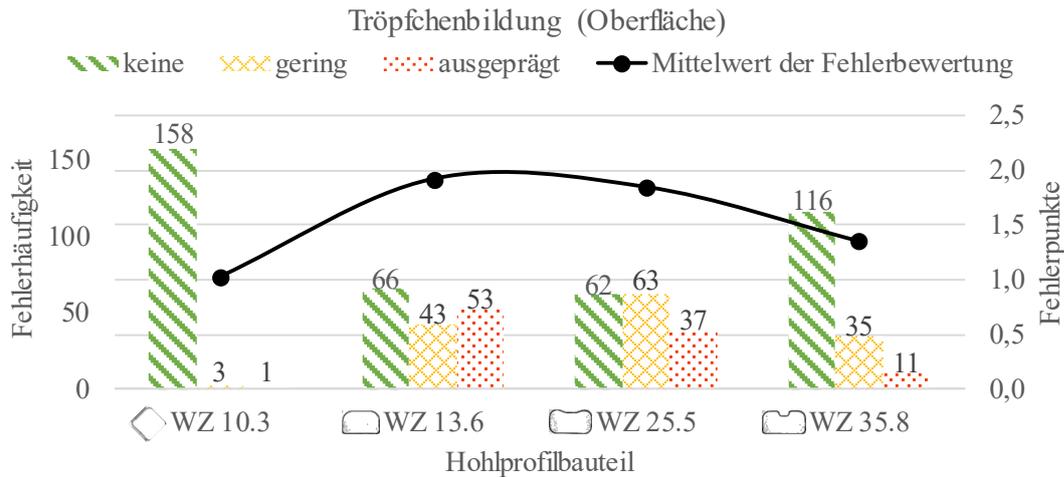


Abb. 5-25: Tröpfchenbildung an der Oberfläche der Hohlprofilbauteile bei Sichtprüfung
(Halbzeuge: PA6-CF $\pm 75^\circ$ und PA6-GF $\pm 75^\circ$, $n = 27$ je Hohlprofilbauteil)

Als Tröpfchenbildung werden kleine, kreisförmige Anhäufungen der Matrix bezeichnet. Diese treten vorwiegend in den Übergangsbereichen auf (siehe Abschnitt 5.1.2.2). Im Bereich der Fehlstelle ist keine exakte Geometrieabbildung des Hohlprofilbauteils gegeben. Nach [48] resultieren die Tröpfchen aus einer Erstarrung der Matrix an der Bauteiloberfläche. Das niedrigviskose, auf Schmelztemperatur erwärmte Matrixpolymer wird bei der Umformdruckbeaufschlagung stellenweise nach außen gedrückt. Liegt das Halbzeug im Übergangsbereich nicht vollständig an der Werkzeugkavität an, kommt es zur Tröpfchenbildung. Die Tröpfchenbildung am Hohlprofilbauteil WZ 25.5 wird in Abschnitt 5.3.1.3 beschrieben.

Mithilfe der Schnittbild- und Radienprüfung (siehe Abschnitte 5.2.5.2 und 5.2.5.3) wurde der Einfluss von Formwerkzeugtemperatur und Umformdruck auf die Maßhaltigkeit des Hohlprofilbauteils WZ 13.6 untersucht. Die Höhe sowie die Breite (Aufgrund der Entformungsschräge lediglich der Maximalwert) des Querschnitts wurden durch die Schnittbildprüfung ermittelt. Die Radiusprüfung diente zur Vermessung zweier Radien (22,9 mm und 7 mm). Im Gegensatz zur Sichtprüfung zeigt sich dabei, dass aus einer hohen Formwerkzeugtemperatur und einem hohen Umformdruck eine verbesserte Maßhaltigkeit resultiert (vergleiche Abb. 5-26 und Abb. 5-27). Im Bereich der Werkzeuggrenzebene (horizontale Maßlinie) ist bei beiden Schnittbildern der durch das Formwerkzeug hervorgerufene Quetschgrat erkennbar (siehe Abschnitt 5.2.2.2).

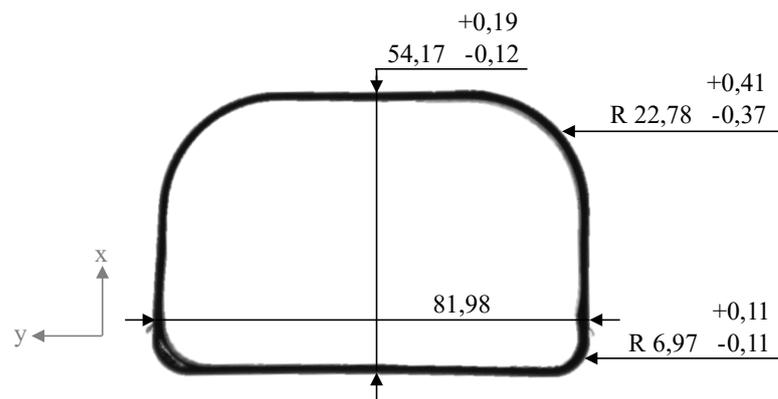


Abb. 5-26: Schnittbild- und Radienprüfung des Hohlprofilbauteils WZ 13.6 (PA6-CF $\pm 75^\circ$)
 $T_{wz} = 120 \text{ }^\circ\text{C}$, $p_u = 20 \text{ bar}$. Schnittbild des Realbauteils.

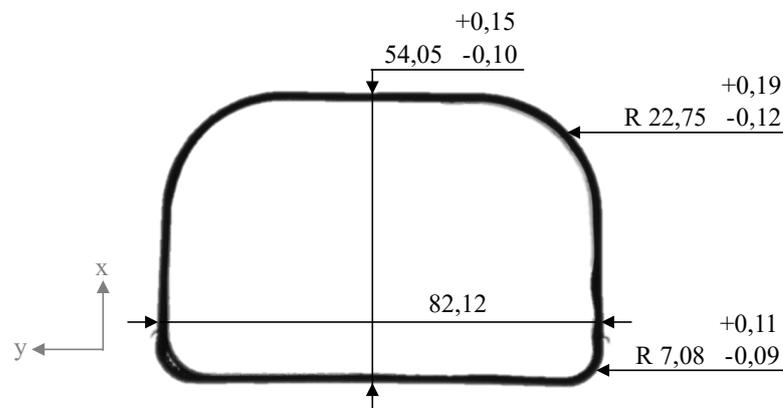


Abb. 5-27: Schnittbild- und Radienprüfung des Hohlprofilbauteils WZ 13.6 (PA6-CF $\pm 75^\circ$)
 $T_{wz} = 150 \text{ }^\circ\text{C}$, $p_u = 50 \text{ bar}$. Schnittbild des Realbauteils.

Aus den beiden Schnittbildern (siehe Abb. 5-26 und Abb. 5-27) wird ersichtlich, dass das Hohlprofilbauteil im Bereich des 7 mm Radius Delaminationen aufweist. Dies unterstreicht die Häufigkeit dieses Fehlerbildes in Abb. 5-28. Bei diesem Hohlprofilbauteil (WZ 13.6) treten Delaminationen im Querschnitt in ausgeprägter oder geringer Form sowohl bei PA6-CF $\pm 75^\circ$ als auch bei PA6-GF $\pm 75^\circ$ auf. Für eine fertigungsgerechte Gestaltung zukünftiger Hohlprofilbauteile ist daher ein größerer Außenradius vorzusehen.

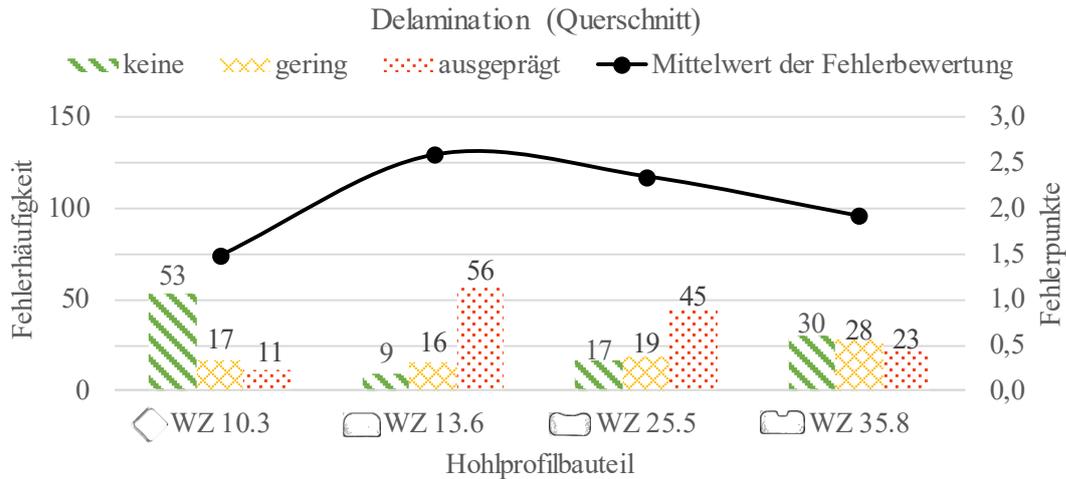


Abb. 5-28: Delamination im Querschnitt der Hohlprofilbauteile bei Sichtprüfung
(Halbzeuge: PA6-CF $\pm 75^\circ$ und PA6-GF $\pm 75^\circ$, $n = 27$ je Hohlprofilbauteil)

5.3.1.3 Hohlprofilbauteil WZ 25.5

Aus der Auswertung der in Abb. 5-20 dargestellten Sichtprüfung für das Hohlprofilbauteil WZ 25.5 wird ersichtlich, dass aus einer Formwerkzeugtemperatur von 135°C und einem Umformdruck von 20 bar die besten Umformergebnisse resultierten (1,28 Fehlerpunkte). Aufgrund der großen Außenradien dieses Hohlprofilbauteils ist bereits ein Umformdruck von 20 bar für eine vollständige Geometrieabbildung ausreichend (siehe auch Abb. 5-32 links).

Dies bestätigt die in Abb. 5-29 ersichtliche mikroskopische Untersuchung des Hohlprofilbauteils im Übergangsbereich der Sicke (siehe Abschnitt 5.1.2.3). Es zeigt sich ein homogener Verlauf des Lagenaufbaus bei gleichmäßiger Dicke der Einzellagen. Der matrixreiche Bereich im Sickenboden ist auf eine Ondulation (z-Richtung) der äußeren 0° -Lagen zurückzuführen.

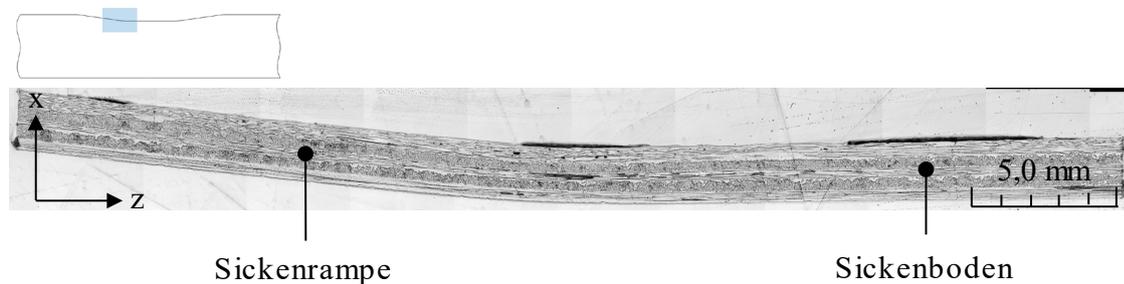


Abb. 5-29: Schliffbild des Hohlprofilbauteils WZ 25.5 (PA6-CF $\pm 75^\circ$, Sicke)
 $T_{WZ} = 135^\circ\text{C}$, $p_u = 20$ bar.

Aus der computertomographischen Untersuchung des Sickenbodens geht hervor, dass sich die Faserwinkel des Halbzeugs durch die Umformung nicht verändern. In Abb. 5-30 ist der Lagenaufbau des Halbzeugs (siehe Abschnitt 5.2.1.1) dem Lagenaufbau des Hohlprofilbauteils gegenübergestellt. Sowohl die 0° -Lagen als auch die $\pm 75^\circ$ -Lagen sind demnach vor und nach der Umformung identisch. Der in Abschnitt 4.3.1.1 thematisierte Zusammenhang zwischen Umfangs-, Längen- und Faserwinkeländerung ist somit nachgewiesen.

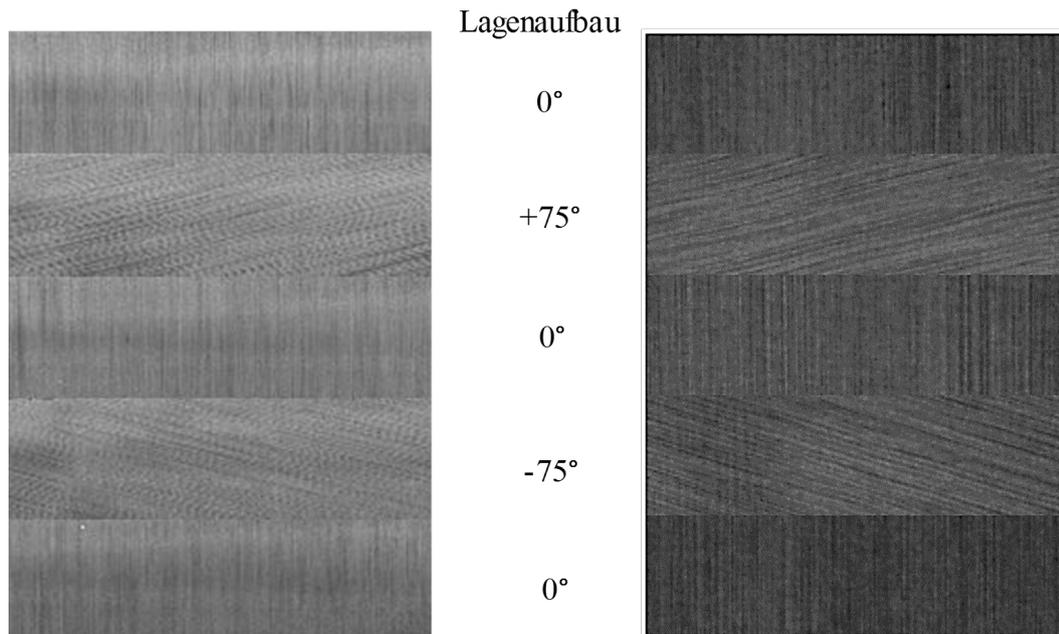


Abb. 5-30: CT-Bilder zum Vergleich der Faserwinkel (PA6-CF $\pm 75^\circ$)

Links: Hohlprofilförmiges Halbzeug. Rechts: Sickenboden Hohlprofilbauteil WZ 25.5.

Zu hohe Werkzeugtemperaturen ($T_{WZ} = 150^\circ\text{C}$) führten insbesondere auf der Innenfläche der Hohlprofilbauteile zu Delaminationen des Halbzeuges. Dies spiegelt sich in den Fehlerpunkten der Sichtprüfung wider (siehe Abb. 5-20). Ein Vergleich mit den weiteren Hohlprofilbauteilen zeigt, dass Delaminationen auf der Innenfläche bei diesem Komplexitätsgrad am häufigsten auftreten (siehe Abb. 5-31). Zu hohe Formwerkzeugtemperaturen führen bei steigendem Komplexitätsgrad zu erhöhten thermischen Eigenspannungen. Daraus resultieren ein Verzug des Hohlprofilbauteils und zum Teil deutliche Delaminationen im Radiusbereich (siehe Abb. 5-32 rechts).

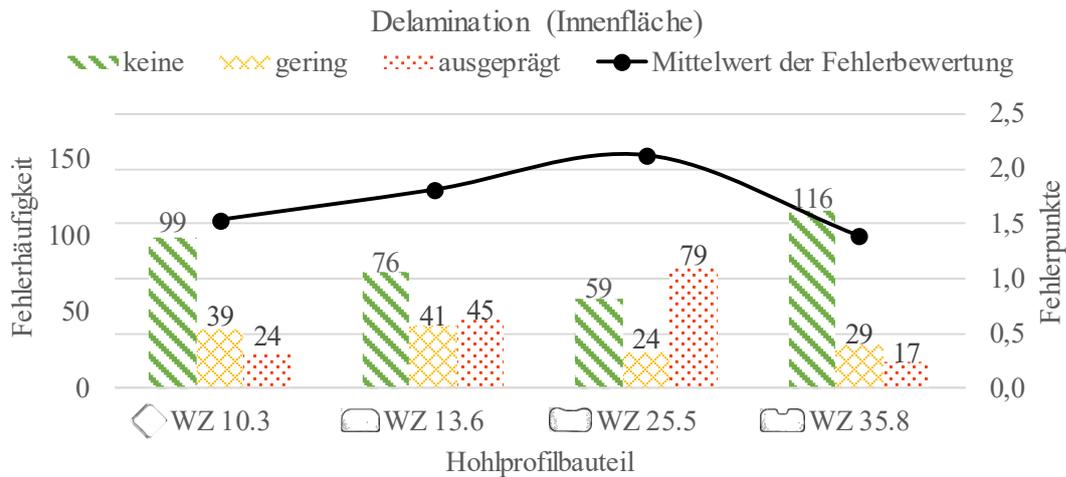


Abb. 5-31: Delamination an der Innenfläche der Hohlprofilbauteile bei Sichtprüfung
 (Halbzeuge: PA6-CF $\pm 75^\circ$ und PA6-GF $\pm 75^\circ$, $n = 27$ je Hohlprofilbauteil)

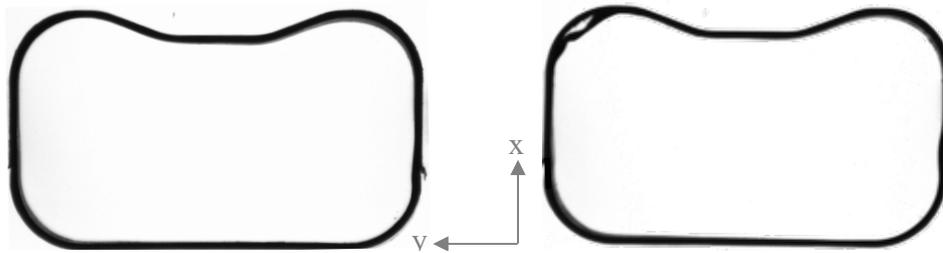


Abb. 5-32: Schnittbilder der Hohlprofilbauteile WZ 25.5 (PA6-CF $\pm 75^\circ$)
 Links: $T_{WZ} = 135^\circ\text{C}$, $p_u = 20$ bar. Rechts: $T_{WZ} = 150^\circ\text{C}$, $p_u = 20$ bar. Schnittbilder des Realbauteils

Aus einer zu geringen Formwerkzeugtemperatur ($T_{WZ} = 120^\circ\text{C}$) resultierte eine unvollständige Geometrieabbildung, die insbesondere im Übergangsbereich vom Rechteckquerschnitt zur Sickenrampe auftrat. Der Faserlaufängenunterschied ist in diesem Bereich am größten. Da das Halbzeug nicht vollständig an der Werkzeugkavität anliegt, bilden sich die in Abb. 5-33 ersichtlichen Tröpfchen (siehe Abschnitt 5.3.1.2).

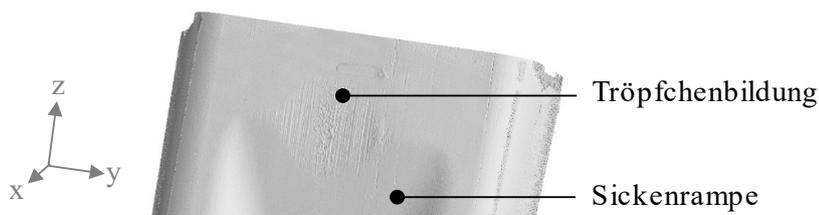


Abb. 5-33: Tröpfchenbildung an der Oberfläche des Hohlprofilbauteils WZ 25.5 (PA6-CF $\pm 75^\circ$)
 $T_{WZ} = 120^\circ\text{C}$, $p_u = 20$ bar. CT-Prüfung des Realbauteils.

5.3.1.4 Hohlprofilbauteil WZ 35.8

Verglichen mit den anderen Hohlprofilbauteilen weist WZ 25.8 bei der Sichtprüfung die höchsten Fehlerpunkte auf (minimale Fehlerpunkte: 1,42; vergleiche Abb. 5-20). Dies liegt insbesondere an drei Fehlerbildern (siehe Anhang c), die im Folgenden näher erläutert werden.

Bei sämtlichen Hohlprofilbauteilen konnte trotz variierender Umformparameter der äußere 5,6 mm Radius der Nut (siehe Abschnitt 5.1.2.4) nicht vollständig ausgeformt werden. Die Folge sind Faserondulationen im Radiusbereich, die sich nicht nur bei der Sicht- sondern auch bei der Radiusprüfung zeigen. Während des Schließvorgangs werden durch das Formwerkzeug zunächst die inneren Radien der Nut ausgeformt (siehe Radien 2 und 3 in Abb. 5-34). Die in Tab. 5-13 ersichtlichen Messwerte zeigen, dass die inneren Radien über die gesamte Länge der Nut vollständig ausgeformt werden. Für die äußeren Radien zeigt sich hingegen eine deutliche Abweichung vom Sollwert.

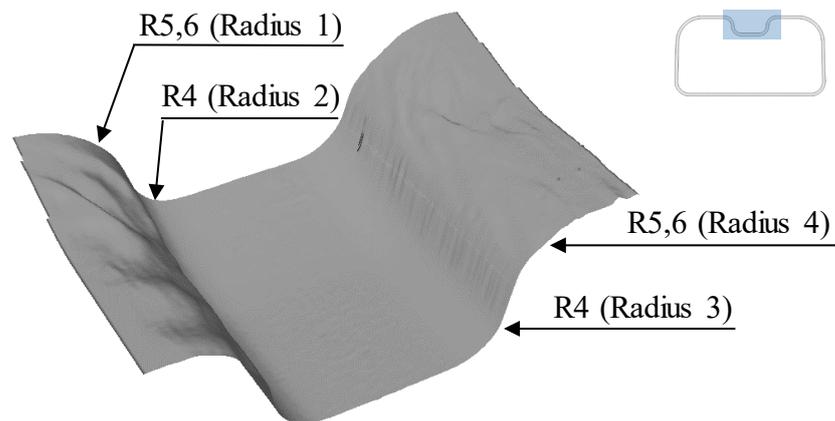


Abb. 5-34: Radienprüfung des Hohlprofilbauteils WZ 35.8 (PA6-CF $\pm 75^\circ$, Nut)
 $T_{WZ} = 120^\circ\text{C}$, $p_u = 35\text{ bar}$. Oberflächenprofil des Realbauteils.

Tab. 5-13: Radienprüfung des Hohlprofilbauteils WZ 35.8
 (PA6-CF $\pm 75^\circ$, $T_{WZ} = 120^\circ\text{C}$, $p_u = 35\text{ bar}$)

Radius	Messwerte [mm]			
	Radius 1	Radius 2	Radius 3	Radius 4
Radius (Sollwert)	5,60	4,00	4,00	5,60
Radius (min.)	4,91	3,73	3,8	5,27
Radius (max.)	8,47	4,06	4,56	6,72
Radius (Mittelw.)	6,71	3,92	4,21	5,80

Weitet sich der Blasschlauch bei der Umformdruckbeaufschlagung, liegt er gemäß Abb. 5-35 zunächst im Bereich der Nut und an den Flanken des Hohlprofilbauteils an [48]. Zuletzt drapiert der Blasschlauch das Halbzeug in die beiden äußeren Radien der Nut und verdrängt dabei auch das Matrixpolymer in diesen Bereich. Die Folge ist der in Abb. 5-35 ersichtliche lokale Anstieg der Wandstärke (b_H) an den beiden äußeren Radien der Nut.

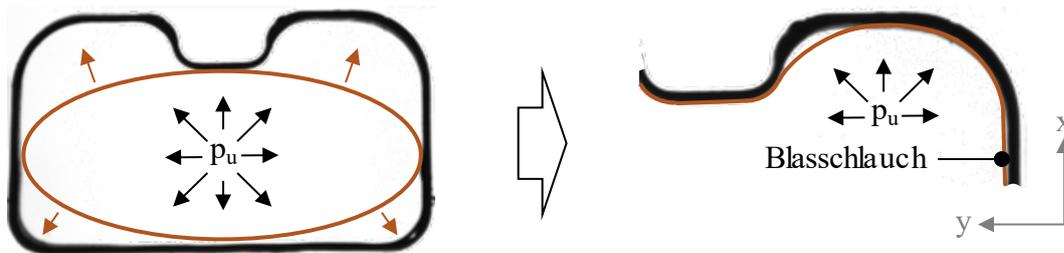


Abb. 5-35: Schnittbild des Hohlprofilbauteils WZ 35.8 (PA6-CF $\pm 75^\circ$)

Links: Beginn der Umformdruckbeaufschlagung. Rechts: Geweiteter Blasschlauch im Bereich der Nut (Detail). $T_{WZ} = 120^\circ\text{C}$, $p_u = 35\text{ bar}$. Schematische Darstellung.

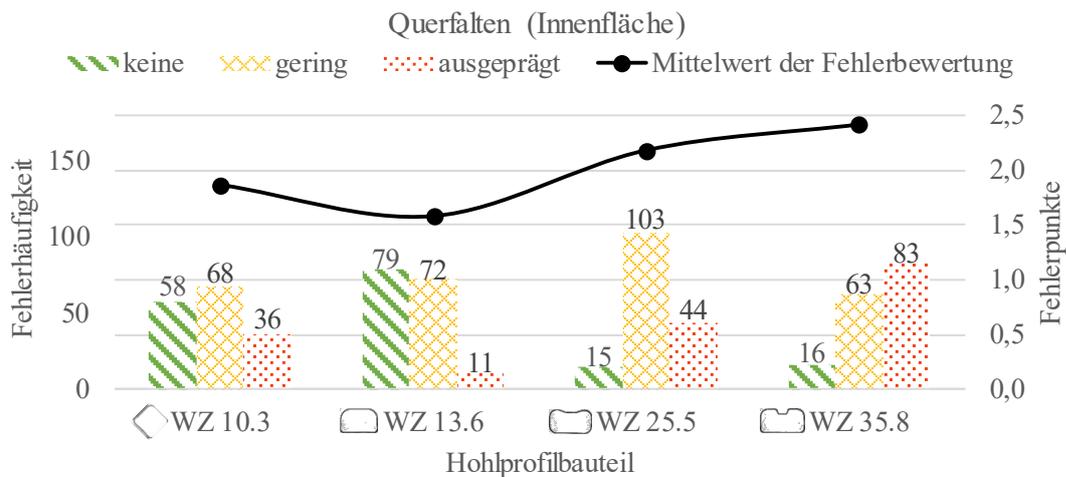


Abb. 5-36: Querfalten an der Innenfläche der Hohlprofilbauteile bei Sichtprüfung (Halbzeuge: PA6-CF $\pm 75^\circ$ und PA6-GF $\pm 75^\circ$, $n = 27$ je Hohlprofilbauteil)

Neben der Faserondulation wiesen die Hohlprofilbauteile bei der Sichtprüfung vermehrt Querfalten auf. Wie Abb. 5-36 zeigt, sind diese besonders deutlich auf der Innenfläche detektierbar. Als Querfalten werden Ondulationen der Fasern aus der Bauteilebene heraus bezeichnet, die senkrecht zur Bauteillängsrichtung (z-Richtung) auftreten. Die Fehlerhäufigkeit – insbesondere in ausgeprägter Form – nimmt gegenüber dem Hohlprofilbauteil WZ 25.5 stark zu. Dies ist auf den Anstieg des Faserlaufängenunterschieds zurückzuführen.

Das Hohlprofilbauteil WZ 35.8 weist einen Faserlauf­längen­unter­schied von 1,29 % auf (siehe Abschnitt 5.1.2.4); WZ 25.5 einen Faserlauf­längen­unter­schied von lediglich 0,71 % (siehe Abschnitt 5.1.2.3). Durch den hohen Faserlauf­längen­unter­schied werden insbesondere die 0°-Lagen in den Bauteilbereichen mit geringer Faserlauf­länge gestaucht und es bilden sich Quer­falten aus. Nach [155] sind die aus der Stauchung resultierenden Druckspannungen für die Faltenbildung verantwortlich.

Als drittes Fehlerbild wurden bei den Hohlprofilbauteilen Delaminationen auf der Bauteiloberfläche festgestellt. Abb. 5-37 illustriert, dass die Zahl der Delaminationen mit steigendem Komplexitätsgrad zunimmt. Dies ist auf den ebenfalls ansteigenden Faserlauf­längen­unter­chied zurückzuführen. Im Übergangsbereich des Hohlprofilbauteils lösen sich vereinzelt in der Nut (wo der höchste Faserlauf­längen­unter­chied auftritt) die obersten 0°-Fasern des Halbzeugs. Die 0°-Fasern folgen in diesen Bereichen nicht der konkaven Nutgeometrie.

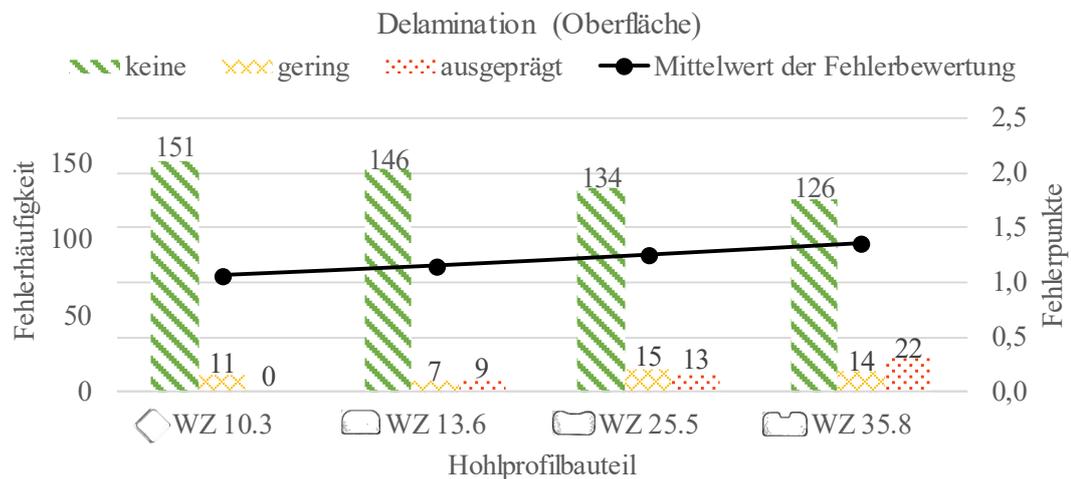


Abb. 5-37: Delamination an der Oberfläche der Hohlprofilbauteile bei Sichtprüfung
(Halbzeuge: PA6-CF $\pm 75^\circ$ und PA6-GF $\pm 75^\circ$, n = 27 je Hohlprofilbauteil)

In Anbetracht der Fehlerhäufigkeit sowohl bei PA6-CF $\pm 75^\circ$ als auch bei PA6-GF $\pm 75^\circ$ Hohlprofilbauteilen ist für eine fertigungsgerechte Bauteilgestaltung zukünftig ein Faserlauf­längen­unter­chied von unter 1,29 % sowie ein vergrößerter Außenradius im Nutbereich vorzusehen.

5.3.2 Einfluss des Halbzeugs auf das Hohlprofilbauteil

Nach einer detaillierteren Betrachtung des Halbzeugs PA6-CF $\pm 75^\circ$ im vorherigen Abschnitt stehen in den folgenden Abschnitten 5.3.2.1 bis 5.3.2.4 die Hohlprofilbauteile aus PA6-GF $\pm 75^\circ$ im Fokus. Aufbauend auf den Erkenntnissen aus Abschnitt 5.3.1 werden erneut die Ergebnisse der Prüfverfahren analysiert. Die Ergebnisse der Sichtprüfung für die Hohlprofilbauteile aus PA6-GF $\pm 75^\circ$ zeigt Abb. 5-38.

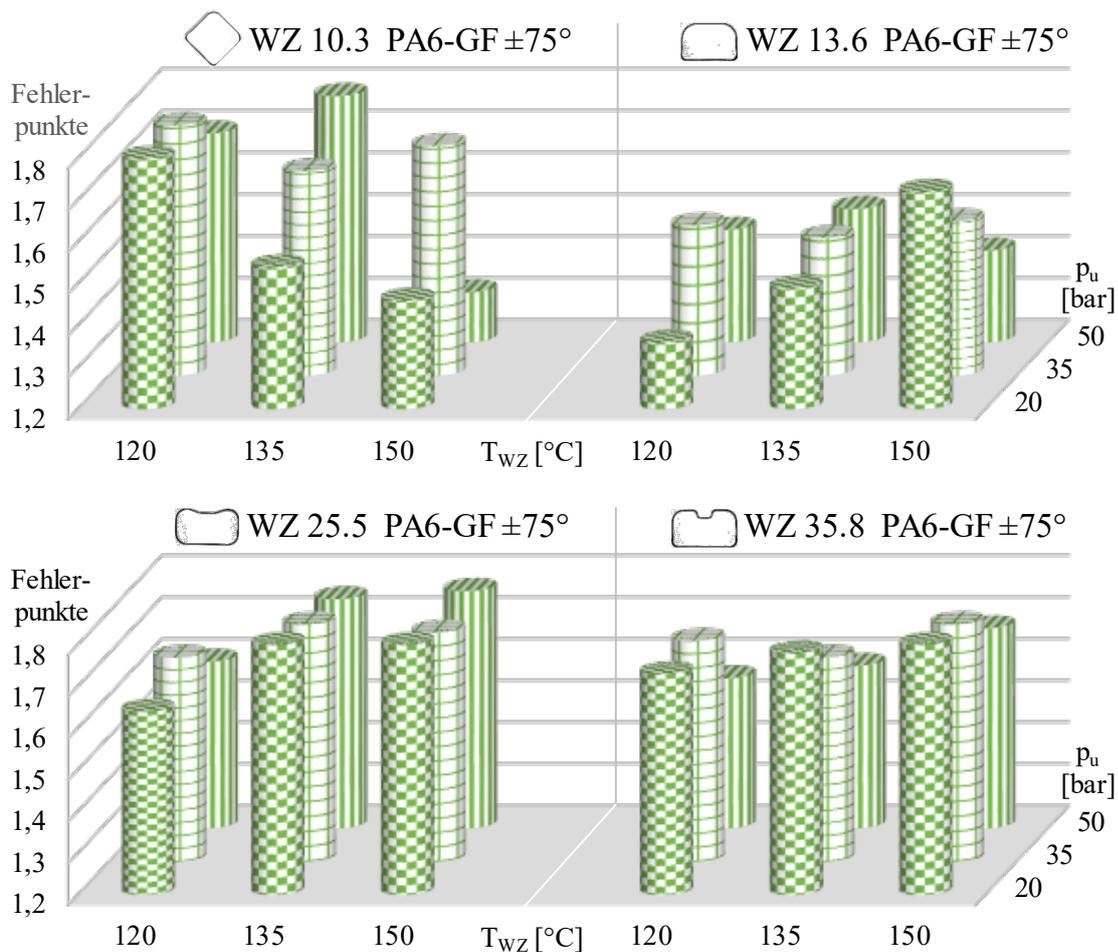


Abb. 5-38: Einfluss des Halbzeugs auf die Hohlprofilbauteile bei Sichtprüfung
($n = 27$ je Hohlprofilbauteil, Mittelwerte der Fehlerpunkte)

5.3.2.1 Hohlprofilbauteil WZ 10.3

Eine hohe Formwerkzeugtemperatur ($T_{WZ} = 150^\circ\text{C}$) in Kombination mit einem hohen Umformdruck ($p_u = 50$ bar) führte bei der Umformung des Halbzeugs PA6-GF $\pm 75^\circ$ zum Hohlprofilbauteil WZ 10.3 zum besten Sichtprüfungsergebnis (siehe Abb. 5-38).

Bei zur geringer Formwerkzeugtemperatur und/oder zu geringem Umformdruck traten analog zu Hohlprofilbauteilen aus PA6-CF $\pm 75^\circ$ Faserondulationen an der Oberfläche und Innenfläche auf (siehe Abschnitt 5.3.1.1). Die anhand der Sichtprüfung detektierten Faserondulationen zeigen sich auch bei der Radienprüfung der Hohlprofilbauteile. In Abb. 5-39 ist exemplarisch der 16 mm Radius zweier Bauteile gegenübergestellt, die bei der Sichtprüfung wenige (siehe Abb. 5-39 links) bzw. viele Fehlerpunkte (siehe Abb. 5-39 rechts) aufwiesen.

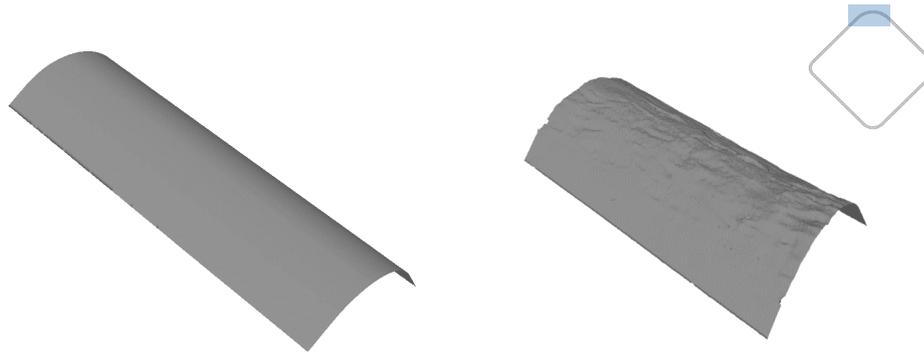


Abb. 5-39: Radienprüfung des Hohlprofilbauteils WZ 10.3 (PA6-GF $\pm 75^\circ$, Radius 16 mm)
Links: $T_{WZ} = 150^\circ\text{C}$, $p_u = 50\text{ bar}$. Rechts: $T_{WZ} = 120^\circ\text{C}$, $p_u = 20\text{ bar}$. Oberflächenprofil des Realbauteils.

Vier der acht Bauteilradien wurden über die Länge des Hohlprofilbauteils hinweg vermessen (siehe Tab. 5-14). Bei 150°C Formwerkzeugtemperatur und 50 bar Umformdruck weichen die Messwerte aufgrund einer vollständigen Ausformung der Bauteilradien nur minimal vom Sollwert ab (siehe Abschnitt 5.1.2.1). Verglichen mit Hohlprofilbauteilen aus PA6-CF $\pm 75^\circ$ sind nur geringfügige Unterschiede bei den Mittelwerten feststellbar (siehe Tab. 5-12). Die deutliche Schwankung der Messwerte bei geringer Formwerkzeugtemperatur und geringem Umformdruck weist auf die Faserondulation hin (siehe Tab. 5-14 rechts).

Tab. 5-14: Radienprüfung des Hohlprofilbauteils WZ 10.3 (PA6-GF $\pm 75^\circ$)

Radius	Messwerte [mm]							
	$T_{WZ} = 150^\circ\text{C}; p_u = 50\text{ bar}$				$T_{WZ} = 120^\circ\text{C}; p_u = 20\text{ bar}$			
Radius (Sollwert)	9,00	10,00	16,00	18,00	9,00	10,00	16,00	18,00
Radius (min.)	8,95	9,98	15,98	17,94	9,11	9,96	15,24	17,72
Radius (max.)	9,08	10,02	16,10	18,05	10,61	11,55	17,05	19,32
Radius (Mittelw.)	9,02	10,00	16,04	18,02	9,83	10,69	16,56	18,20

Neben der Faserondulation traten beim Hohlprofilbauteil WZ 10.3 aus PA6-GF $\pm 75^\circ$ vermehrt Matrixanhäufungen auf (siehe Abb. 5-40). Bei diesem Fehlerbild zeichnen sich auf der Oberfläche des Hohlprofilbauteils matrixreiche Bereiche ab. Die Matrixanhäufungen treten im Radiusbereich in einem Abstand von ca. 60 mm auf. Zudem ist ein Winkel von ca. 75° zur Bauteillängsachse detektierbar (siehe Fehlerbildkatalog, Anhang c). Das Fehlerbild tritt – in Kombination mit der Faserondulation – ausschließlich bei der Umformung von PA6-GF Halbzeugen auf.

Ursache für eine Matrixanhäufung sind Fertigungsschwankungen bei der Halbzeugfertigung. Beim Wickeln der $\pm 75^\circ$ -Lagen im PAZ-Verfahren kommt es stellenweise zu einer Überlappung der 60 mm breiten und 0,3 mm dicken PA6-GF Tapes (siehe Anhang, Abb. A-2). Die lokale Überlappung der Tapes spiegelt sich nach der Halbzeugumformung in einer Matrixanhäufung wider. Da die PA6-CF Tapes lediglich eine Dicke von 0,13 mm aufweisen (siehe Anhang, Abb. A-1), führt eine mögliche Überlappung der Tapes im Herstellungsverfahren zu geringeren Halbzeugschwankungen. [87]

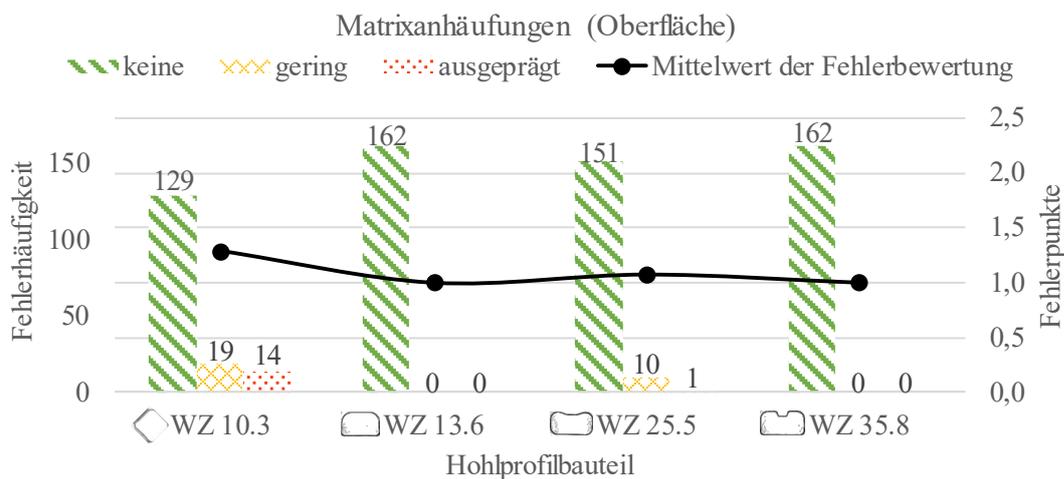


Abb. 5-40: Matrixanhäufungen an der Oberfläche der Hohlprofilbauteile bei Sichtprüfung
(Halbzeuge: PA6-CF $\pm 75^\circ$ und PA6-GF $\pm 75^\circ$, n = 27 je Hohlprofilbauteil)

Ergänzend zur Sicht- und Radienprüfung wurde ein Hohlprofilbauteil einer computertomographischen Prüfung unterzogen. Die CT-Bilder der Einzellagen sind in Abb. 5-41 gegenübergestellt. Aus der vergleichenden Betrachtung von Halbzeug und Hohlprofilbauteil geht hervor, dass die Faserwinkel des Halbzeugs (siehe Abschnitt 5.2.1.1) trotz der Umformung stets konstant bleiben.

Die Abhängigkeit der Faserwinkeländerung von der Umfangs- und Längenänderung ist damit sowohl für unterschiedliche Komplexitätsgrade bzw. Hohlprofilbauteile als auch für verschiedene Halbzeuge nachgewiesen (siehe Abschnitt 5.3.1.3).

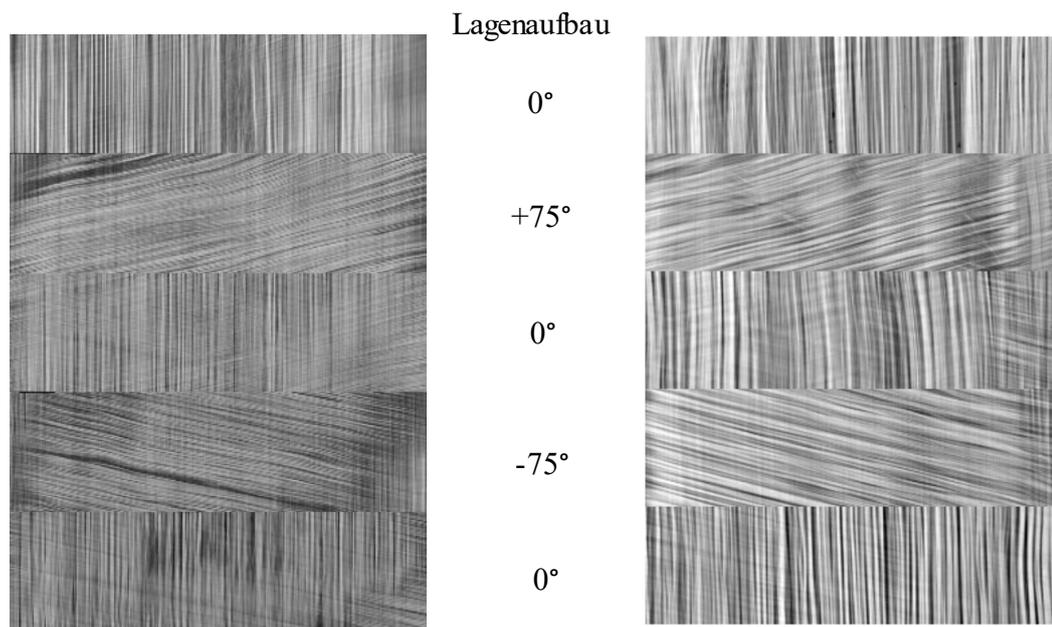


Abb. 5-41: CT-Bilder zum Vergleich der Faserwinkel (PA6-GF $\pm 75^\circ$)
 Links: Hohlprofilförmiges Halbzeug. Rechts: Hohlprofilbauteil WZ 10.3.

5.3.2.2 Hohlprofilbauteil WZ 13.6

Die Sichtprüfung weist für das Hohlprofilbauteil WZ 13.6 bei annähernd identischen Fehlerpunkten eine optimale Formwerkzeugtemperatur von $120\text{ }^\circ\text{C}$ und einen idealen Umformdruck von 20 bar aus (siehe Abb. 5-38 rechts oben). Aufgrund der verglichen mit Hohlprofilbauteil WZ 10.3, kürzeren Drapierwege ist bereits bei niedrigerem Umformdruck bzw. geringerer Formwerkzeugtemperatur eine vollständige Ausformung der Radien möglich. Anhand der Schnittbildprüfung wird hingegen deutlich, dass aus einer hohen Formwerkzeugtemperatur ($T_{WZ} = 150\text{ }^\circ\text{C}$) und einem hohen Umformdruck ($p_u = 50\text{ bar}$) eine verbesserte Maßhaltigkeit resultiert. Diese Erkenntnis deckt sich mit den in Abschnitt 5.3.1.2 durchgeführten Untersuchungen für PA6-CF $\pm 75^\circ$ (siehe Abb. 5-26 und Abb. 5-27).

Hohlprofilbauteile aus PA6-GF $\pm 75^\circ$ weisen im Mittelwert vergleichsweise hohe Fehlerpunkte auf (siehe Abb. 5-20 und Abb. 5-38). Dies ist auf das Fehlerbild der Faserverschiebung zurückzuführen. Dabei kommt es zu einer Verschiebung der äußeren 0° -Lagen bei einer frühzeitigen Anhaftung des Halbzeugs am Formwerkzeug. Berührt das Halbzeug während des Schließvorgangs die deutlich kälteren Flanken der Werkzeugkavität und haftet an diesen an, tritt beim weiteren Umformen eine Relativbewegung zwischen Halbzeug und Formwerkzeug auf. Dies führt wiederum zu einer Faserverschiebung. Insbesondere die Durchmesserchwankungen des PA6-GF $\pm 75^\circ$ Halbzeugs (siehe Abschnitt 5.2.1.1) führen zu einer frühzeitigen Anhaftung, da mit steigendem Außendurchmesser der Abstand zu den Flanken der Werkzeugkavität sinkt.

Durch die Dicke der Einzellagen (0,3 mm; siehe Anhang, Abb. A-2) wird die Faserverschiebung bei Hohlprofilbauteilen aus PA6-GF $\pm 75^\circ$ zudem deutlich sichtbarer als bei PA6-CF $\pm 75^\circ$ (Einzellage: 0,13 mm; siehe Anhang, Abb. A-1). Die Häufigkeit dieses Fehlerbildes ist für sämtliche Hohlprofilbauteile in Abb. 5-42 dargestellt.

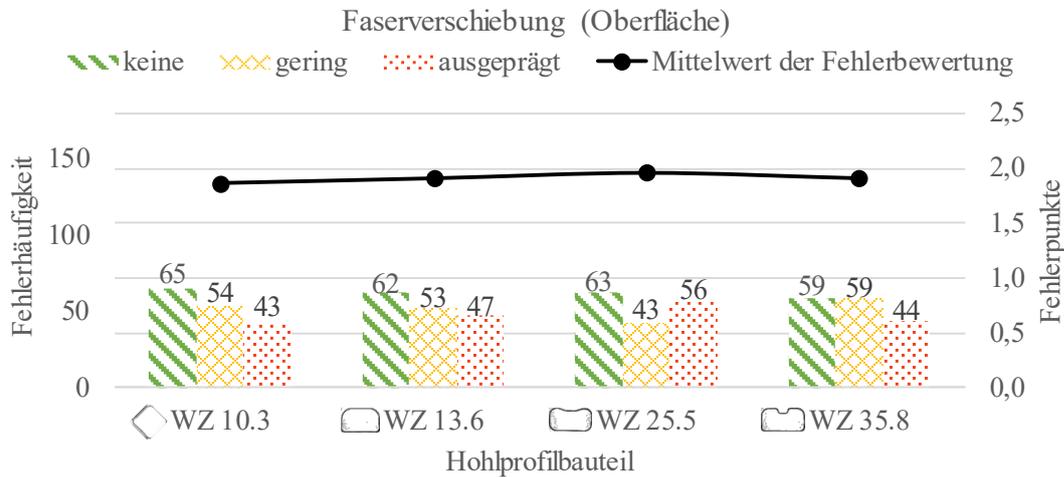


Abb. 5-42: Faserverschiebungen an der Oberfläche der Hohlprofilbauteile bei Sichtprüfung (Halbzeuge: PA6-CF $\pm 75^\circ$ und PA6-GF $\pm 75^\circ$, n = 27 je Hohlprofilbauteil)

Der geringere Faservolumengehalt der PA6-GF $\pm 75^\circ$ Halbzeuge (siehe Tab. 5-7) führt beim Hohlprofilbauteil WZ 10.3 zu einer verstärkten Tröpfchenbildung im Übergangsbereich. Verglichen mit PA6-CF $\pm 75^\circ$ wird bei der Umformung stellenweise mehr Matrixpolymer nach außen gedrückt (siehe Abschnitt 5.3.1.2).

5.3.2.3 Hohlprofilbauteil WZ 25.5

Die in Abb. 5-38 dargestellten Ergebnisse der Sichtprüfung zeigen, dass für die Umformung der Halbzeuge zum Hohlprofilbauteil WZ 25.5 eine niedrige Formwerkzeugtemperatur ($T_{WZ} = 120 \text{ }^\circ\text{C}$) geeignet ist. Ein hoher Umformdruck ($p_u = 50 \text{ bar}$) sorgt für die erforderliche Maßhaltigkeit der Bauteile (1,60 Fehlerpunkte, siehe Abb. 5-38). Bei optimalen Umformparametern weist das PA6-CF $\pm 75^\circ$ Hohlprofilbauteil lediglich 1,28 Fehlerpunkte im Mittelwert auf (siehe Abb. 5-20). Die Fehlerpunkte sind im Wesentlichen auf zwei Fehlerbilder zurückzuführen: zum einen die bei PA6-GF $\pm 75^\circ$ zunehmen auftretende Faserverschiebung (siehe Abb. 5-42 bzw. Abschnitt 5.3.2.2), zum anderen auf die Faserondulation an der Ober- und Innenfläche des Hohlprofilbauteils. Letztere wird auch durch die Faserondulation (siehe Abb. 5-9) und die inhomogenere Laminatqualität (siehe Abb. 5-8) des PA6-CF $\pm 75^\circ$ Halbzeugs hervorgerufen.

Im Gegensatz zu den beiden ersten Hohlprofilbauteilen WZ 10.3 und WZ 13.6 führen zu hohe Formwerkzeugtemperaturen zu einem Verzug der Hohlprofilbauteile. Der Bauteilverzug ist gemäß [155] immer eigenspannungsbedingt.

Zu solchen Eigenspannungen kommt es, wenn das Matrixpolymer des Halbzeugs teilweise bereits erstarrt, die Fasern längs ihrer Achse jedoch noch gedehnt sind [155]. Hervorgerufen durch die Sicke liegt nach der Umformung bei dieser Querschnittsgeometrie, verglichen mit WZ 10.3 und WZ 13.6, ein unsymmetrischerer Lagenaufbau vor. Dies führt zum Bauteilverzug. Abb. 5-43 zeigt dies beispielhaft anhand eines Schnittbildes. Zudem führt die Volumenveränderung des teilkristallinen Matrixpolymers beim Abkühlvorgang zu Eigenspannungen [155]. Durch den geringen Faservolumengehalt des PA6-CF $\pm 75^\circ$ Halbzeugs (34,7 %, siehe Abschnitt 5.2.1.1) tritt ein Verzug bereits bei Formwerkzeugtemperaturen von über 120 °C verstärkt auf. Bei Hohlprofilbauteilen aus PA6-CF $\pm 75^\circ$ (FVG: 45,6 %) ist dieser Verzugseffekt erst bei einer Formwerkzeugtemperatur von 150 °C feststellbar (siehe Abschnitt 5.3.1.3).



Abb. 5-43: Schnittbild des Hohlprofilbauteils WZ 25.5 (PA6-GF $\pm 75^\circ$)

$T_{WZ} = 150 \text{ °C}$, $p_u = 35 \text{ bar}$. Bauteilverzug aufgrund zu hoher Formwerkzeugtemperatur. Schnittbild des Realbauteils.

5.3.2.4 Hohlprofilbauteil WZ 35.8

Eine geringe Formwerkzeugtemperatur in Kombination mit einem hohen Umformdruck führt aufgrund der Bauteilkomplexität auch bei diesem Hohlprofilbauteil zu den besten Umformergebnissen (1,42 Fehlerpunkte; siehe Abb. 5-38). Das Ergebnis der Sichtprüfung ist für PA6-GF $\pm 75^\circ$ annähernd identisch mit dem in Abb. 5-20 dargestellten Ergebnis für PA6-CF $\pm 75^\circ$ (minimale Fehlerpunkte: 1,42). Damit einher gehen auch die gleichen drei Fehlerbilder der Hohlprofilbauteile (siehe Abschnitt 5.3.1.4). Der 5,6 mm Radius der Nut konnte nicht vollständig ausgeformt werden, die Hohlprofilbauteile wiesen Querfalten (Innenfläche) und Delaminationen (Oberfläche) auf.

Von Faserlaufängenunterschieden und Außenradien (Nut) dieser Größenordnung ist daher zukünftig abzusehen.

5.3.3 Einfluss des Lagenaufbaus auf das Hohlprofilbauteil

Die Ergebnisse zum Einfluss des Lagenaufbaus bzw. Faserwinkels auf das Hohlprofilbauteil und die Umformparameter bilden den Abschluss von Abschnitt 5.3. Das Hohlprofilbauteil WZ 35.8 wird in diesem Abschnitt nicht betrachtet, da die beiden vorhergehenden Untersuchungen sowohl für PA6-CF $\pm 75^\circ$ als auch für PA6-GF $\pm 75^\circ$ bereits einen zu hohen Faserlaufängenunterschied und zu geringe Außenradien im Nutbereich feststellten (siehe Abschnitt 5.3.1.4 und 5.3.2.4). Folglich werden die Hohlprofilbauteile WZ 25.5 aus den Halbzeugen PA6-GF $\pm 75^\circ$ und PA6-GF $\pm 45^\circ$ gegenübergestellt. Die Ergebnisse der Sichtprüfung sind Abb. 5-44 dargestellt.

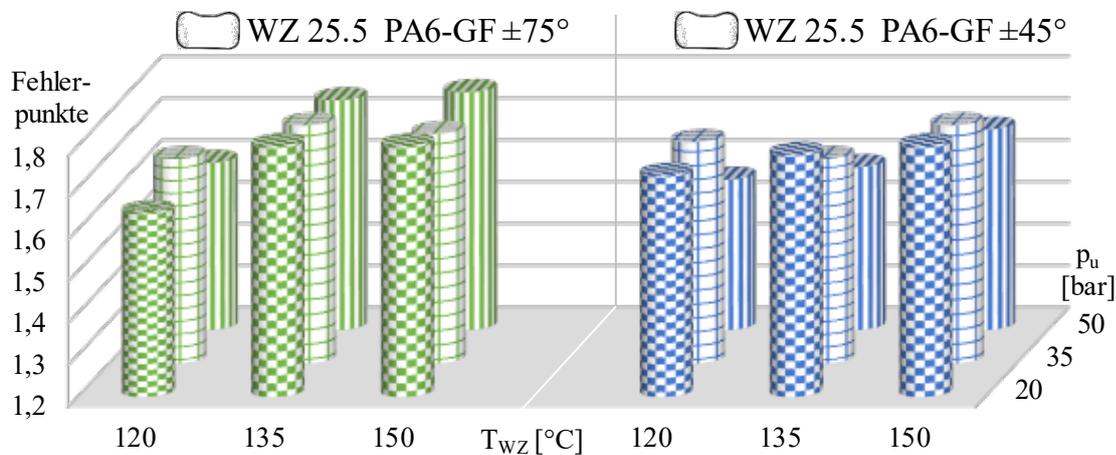


Abb. 5-44: Einfluss des Lagenaufbaus auf die Hohlprofilbauteile bei Sichtprüfung (n = 27 je Hohlprofilbauteil, Mittelwerte der Fehlerpunkte)

Aus Abb. 5-44 wird ersichtlich, dass die Variation des Lagenaufbaus kaum Auswirkungen auf die Sichtprüfungsergebnisse zeigt. Analog zum PA6-GF $\pm 75^\circ$ sind für Hohlprofilbauteile aus dem Halbzeug PA6-GF $\pm 45^\circ$ insbesondere eine niedrige Formwerkzeugtemperatur ($T_{WZ} = 120^\circ\text{C}$) und ein hoher Umformdruck ($p_u = 50$ bar) geeignet (siehe Abschnitt 5.3.2.3). Das seltener auftretende Fehlerbild der Faserverschiebung führt bei PA6-GF $\pm 45^\circ$ gegenüber PA6-GF $\pm 75^\circ$ zu minimal geringeren Fehlerpunkten (1,56 Fehlerpunkte).

Die in Abb. 5-45 ersichtliche mikroskopische Untersuchung der Sicke zeigt einen gleichmäßigen Wandstärkenverlauf und eine gute Geometrieabbildung, jedoch einen lokal inhomogenen Lagenaufbau. Die matrixreichen Bereiche zwischen den Einzellagen resultieren nicht aus der Umformung, sondern aus bereits im Halbzeug vorhandenen Fehlstellen (siehe Abschnitt 5.2.1.1). Die dunklen Bereiche am Rand sowie in der Mitte des Hohlprofilbauteils weisen nicht auf Fehlstellen hin. Sie sind der Probenpräparation parallel zu den 0° -Lagen des Halbzeugs geschuldet.



Abb. 5-45: Schliffbild des Hohlprofilbauteils WZ 25.5 (PA6-GF $\pm 45^\circ$, Sicke)
 $T_{WZ} = 120 \text{ }^\circ\text{C}$, $p_u = 50 \text{ bar}$.

5.4 Bewertung der Halbzeugumformung

Die umgesetzte Prozesstechnik ermöglicht unter Berücksichtigung einer fertigungsgerechten Produkt- und Prozessgestaltung die fehlerfreie Halbzeugumformung zur Herstellung von Hohlprofilbauteilen. Die Qualität der Hohlprofilbauteile wird im Wesentlichen von den drei Faktoren Bauteilgeometrie, Umformparameter und Halbzeug bestimmt.

Die experimentellen Untersuchungen zeigten einen deutlichen Einfluss der Halbzeugqualität auf die Eigenschaften der Hohlprofilbauteile. Bereits im Halbzeug vorhandene Fehlstellen (z. B. matrixreiche Bereiche, Faserondulationen etc.) oder schwankende Abmaße (z. B. Durchmesser, Wandstärke etc.) führen nach der Umformung zum Hohlprofilbauteil zu einer steigenden Anzahl an unterschiedlichen Fehlerbildern.

Die langen Drapierwege erforderten für die Herstellung bzw. zur Ausformung der Bauteilradien des Hohlprofilbauteils WZ 10.3 eine hohe Formwerkzeugtemperatur ($T_{WZ} = 150 \text{ }^\circ\text{C}$) sowie einen hohen Umformdruck ($p_u = 50 \text{ bar}$). Dies galt gleichermaßen für die Halbzeuge PA6-CF $\pm 75^\circ$ sowie PA6-GF $\pm 75^\circ$. Ein hoher Umformdruck wirkte sich zudem positiv auf die Laminatqualität (Poren) aus. Für die Herstellung des Hohlprofilbauteils WZ 13.6 erwiesen sich die gleichen Umformparameter als geeignet. Entscheidend dafür war die gesteigerte Maßhaltigkeit der Hohlprofilbauteile bei hohem Umformdruck und hoher Formwerkzeugtemperatur. Da der minimale Außenradius des Hohlprofilbauteils ($R = 7 \text{ mm}$) nicht fehlerfrei dargestellt werden konnte, ist bei der Bauteilgestaltung zukünftig ein Außenradius von mindestens 9 mm zu definieren (die gleiche Wandstärke des Hohlprofilbauteils vorausgesetzt).

Die optimalen Umformparameter für das Hohlprofilbauteil WZ 25.25 wichen von den beiden vorhergehenden Bauteilen ab. Der Lagenaufbau des Halbzeugs ist aufgrund des Kreisquerschnitts zunächst symmetrisch. Die steigende Bauteilkomplexität führt zu einer – bezogen auf die Mittelebene – zunehmenden Asymmetrie des Hohlprofilbauteils. Damit einher geht ein asymmetrischer Lagenaufbau nach der Halbzeugumformung, der wiederum zu einem verstärkten Verzug des Bauteils bei hohen Formwerkzeugtemperaturen führen kann.

Für das Halbzeug PA6-CF $\pm 75^\circ$ erwiesen sich 135°C Formwerkzeugtemperatur und 20 bar Umformdruck als geeignet. Zur Herstellung des Hohlprofilbauteils aus dem Halbzeug PA6-GF $\pm 75^\circ$ war hingegen eine geringe Formwerkzeugtemperatur ($T_{\text{WZ}} = 120^\circ\text{C}$) in Kombination mit dem maximalen Umformdruck erforderlich ($p_u = 50$ bar). Der geringere Faservolumengehalt der PA6-GF $\pm 75^\circ$ und PA6-GF $\pm 45^\circ$ Halbzeuge gegenüber PA6-CF $\pm 75^\circ$ führt bei höheren Formwerkzeugtemperaturen zu steigenden thermischen Eigenspannungen und damit zu einem Verzug des Bauteils.

Die zum Umformen eines PA6-GF $\pm 45^\circ$ Halbzeugs erforderlichen Umformparameter sind identisch mit den für ein PA6-GF $\pm 75^\circ$ Halbzeug ermittelten Werten. Bei einer Formwerkzeugtemperatur von $T_{\text{WZ}} = 120^\circ\text{C}$ und einem Umformdruck von $p_u = 50$ bar fand trotz des veränderten Lagenaufbaus die optimale Halbzeugumformung zum Hohlprofilbauteil WZ 25.5 statt.

Das Hohlprofilbauteil WZ 35.8 war mit sämtlichen Halbzeugen (PA6-CF $\pm 75^\circ$, PA6-GF $\pm 75^\circ$, PA6-GF $\pm 45^\circ$) aufgrund seiner geometrischen Gestaltung umformtechnisch nicht darstellbar. Der hohe Faserlängenunterschied (1,29 %), die hohe relative Höhenänderung (28,65 %) und die kleinen Außenradien im Nutbereich (5,6 mm) sind ursächlich für die fehlerhafte Halbzeugumformung.

Die computertomographischen Untersuchungen zweier Hohlprofilbauteile (WZ 10.3 und WZ 25.5) zeigten, dass sich der Lagenaufbau bzw. der Faserwinkel der Einzellagen durch die Halbzeugumformung nicht verändert. Die zukünftige simulative Berechnung des Hohlprofilbauteils ist demnach bereits auf Basis des zu definierenden Halbzeug-Lagenaufbaus möglich.

Nach der experimentellen Betrachtung der ersten drei Prozessschritte untersucht das sechste Kapitel dieser Arbeit die Funktionalisierung der Hohlprofilbauteile mithilfe des entwickelten Krafteinleitungselements.

6 Experimentelle Untersuchungen zur Funktionalisierung von Hohlprofilbauteilen

Das in Abschnitt 4.4.2 vorgestellte zweiteilige Krafteinleitungselement ist der Ausgangspunkt für die experimentellen Untersuchungen zum fünften Prozessschritt des FuHo-Verfahrens (siehe Abb. 3-2). Weitere Möglichkeiten zur Funktionalisierung beleuchtet Abschnitt 7.1.3. Analog zu Abschnitt 5.2 werden in Abschnitt 6.1 zunächst die Rahmenbedingungen zur Durchführung der experimentellen Untersuchungen vorgestellt. Die Ergebnisse der Untersuchungen und deren Interpretation sind dem Abschnitt 6.2 zu entnehmen. Abschließend findet eine Bewertung und Zusammenfassung der Ergebnisse in Abschnitt 6.3 statt.

6.1 Ultraschallschweißen von Kugelverbindungselementen

Das zweiteilige Krafteinleitungselement (siehe Abb. 6-1) besteht gemäß Abschnitt 4.4.2 bzw. Abb. 4-15 aus einem Kugelverbindungselement sowie einem Clipelement. Im Wesentlichen wird die Krafteinleitung durch die Geometrie- und Materialwahl des Clipelements definiert. Die Funktionsfähigkeit des Krafteinleitungselements – z. B. die maximale Krafteinleitung und die Demontage – ist jedoch nur gegeben, wenn sich das Clipelement zerstörungsfrei vom Kugelverbindungselement löst, ohne dieses vom Hohlprofilbauteil abzutrennen (siehe Abb. 6-1 links). Die Abziehungskraft (F_A) des Clipelements muss demnach kleiner als die Bruchkraft der Schweißverbindung sein. Andernfalls kommt es gemäß Abb. 6-1 rechts zum unerwünschten Versagen der Schweißverbindung oder des Kugelverbindungselements. Im Fokus der experimentellen Untersuchungen stehen daher die charakteristischen mechanischen Eigenschaften der Schweißverbindung zwischen Kugelverbindungselement und endlosfaserverstärktem thermoplastischem Kunststoff.

Die beim Ultraschallschweißen des Kugelverbindungselements verwendeten Versuchsmaterialien, der Versuchsaufbau, die Versuchsplanung, die Versuchsdurchführung und die Prüfverfahren werden in den Abschnitten 6.1.1 bis 6.1.5 vorgestellt.

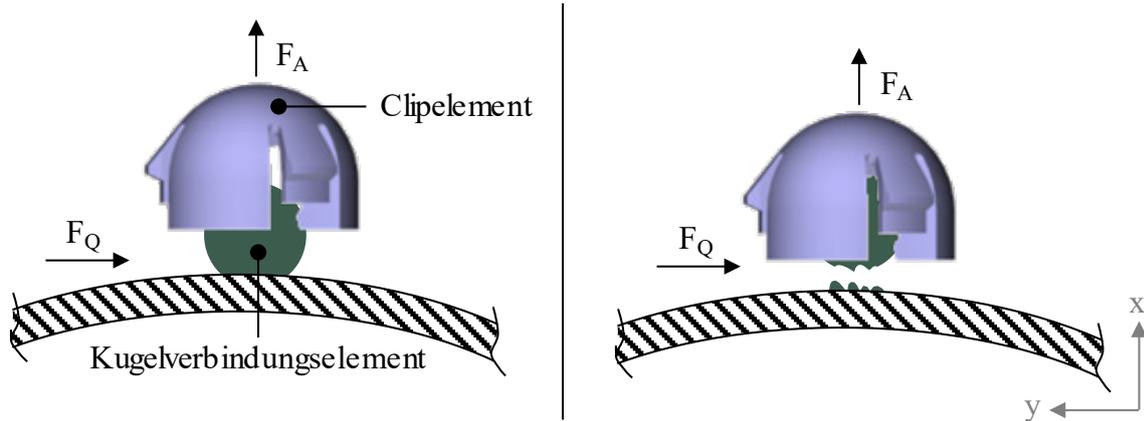


Abb. 6-1: Versagensverhalten des Kräfteinleitungselements

Links: Versagen des Clipelements. Rechts: Versagen des Kugelverbindungselements.

F_A = Abziehkraft Clipelement, F_Q = Querkraft.

6.1.1 Versuchsmaterial

Zur Abstraktion der Hohlprofilbauteile wurden für die experimentellen Untersuchungen überwiegend plattenförmige, vorimprägnierte Halbzeuge (Organobleche) mit quasiisotropem Lagenaufbau verwendet (siehe Abschnitt 6.1.1.1). Zur Validierung der damit erzielten Ergebnisse wurde für Schweißversuche zusätzlich ein hohlprofilförmiges Halbzeug herangezogen (siehe Abschnitt 6.1.1.2 bzw. 5.2.1.1).

6.1.1.1 Plattenförmige Halbzeuge

Bei der Auswahl der plattenförmigen Halbzeuge lag das Hauptaugenmerk auf der gleichbleibenden Faserart, Laminatdicke und dem identischen Gewebetyp. Der Lagenaufbau ist quasiisotrop. Aus Tab. 6-1 wird ersichtlich, dass bei variierendem Matrixwerkstoff zudem der Faservolumengehalt (FVG) annähernd konstant bleibt. Dies ermöglicht eine gezielte Betrachtung des Matrixeinflusses auf die mechanischen Eigenschaften des Kugelverbindungselements. Der Einfluss der Faserart kann durch die vergleichende Betrachtung von PA6-GF und PA6-CF untersucht werden. Die teilkristallinen Matrixpolymere repräsentieren nach [156] je einen Vertreter aus den Bereichen Standard-Thermoplaste (PP), technische Thermoplaste (PA6) und Hochleistungs-Thermoplaste (PPA). [138]

Tab. 6-1: Kennwerte der plattenförmigen Halbzeuge [138]

Bezeichnung	Matrix	Faser	Gewebetyp	FVG [%]	Laminatdicke [mm]
PP-GF	PP	E-Glas	Köperbindung 2/2	47	2
PA6-GF	PA6	E-Glas	Köperbindung 2/2	47	2
PA6-CF	PA6	HT-Kohlenstoff	Köperbindung 2/2	50	2
PPA-GF	PPA	E-Glas	Köperbindung 2/2	47	2

6.1.1.2 Hohlprofilförmiges Halbzeug

Für Schweißversuche an einem hohlprofilförmigen Halbzeug wurde das Material PA6-GF $\pm 45^\circ$ ausgewählt. Dieses wurde bereits bei den experimentellen Untersuchungen zur Umformung verwendet. Die charakteristischen Materialeigenschaften dieses Halbzeugs sind Abschnitt 5.2.1.1 sowie Tab. 5-7 zu entnehmen.

6.1.1.3 Kugelverbindungselement

Optimale Schweißeigenschaften zwischen den Halbzeugen und Kugelverbindungselementen werden durch die Verwendung artgleicher Materialien sichergestellt. Die Auswahl der Kugelmaterialien erfolgte daher nach den zuvor in den Abschnitten 6.1.1.1 und 6.1.1.2 festgelegten Matrixpolymeren. Die Kugelverbindungselemente aus den PP, teilkristallinen Thermoplasten PA6 und PPA wurden im Spritzgießverfahren hergestellt. Der Durchmesser sämtlicher Kugelverbindungselemente entsprach 6,35 mm bzw. $\frac{1}{4}$ Zoll (siehe Abschnitt 4.4.2). [138]

6.1.2 Versuchsaufbau

Die Ultraschallschweißanlage bestand aus den drei Komponenten Standschweißpresse, 35 kHz Generator und Steuerung (Details siehe Anhang, Tab. A-13). Gemäß der in Abschnitt 4.4.2 beschriebenen Prozesstechnik wurde eine 35 kHz Titansonotrode mit kugelkalottenförmiger Aussparung und axialer Vakuumbohrung an den Ultraschallwandler (Konverter) angeflanscht [137]. Auf ein Transformationsstück (Booster) zwischen Sonotrode und Ultraschallwandler wurde aufgrund der geringen Amplituden verzichtet. Der Radius der kugelkalottenförmigen Aussparung entsprach mit 3,175 mm dem halben Durchmesser des Kugelverbindungselements (siehe Abschnitt 6.1.1.3). Für die Aufnahme der Kugelverbindungselemente wurde die an der Sonotrodenseite auslaufende Vakuumbohrung mit einem Vakuumerzeuger gekoppelt. [138]

Über Kniehebelspanner wurden die plattenförmigen Halbzeuge während des Schweißvorgangs auf dem Amboss der Ultraschallschweißanlage fixiert. Bei den hohlprofilförmigen Halbzeugen erfolgte das Aufschießen der Kugelverbindungselemente ohne Stützsystem bei lediglich einseitiger Zugänglichkeit (siehe Abschnitt 3.2.1.5).

Das Halbzeug wurde dazu an den beiden Halbzeugenden über zwei Spannkegel fixiert, die eine Axialkraft auf das Halbzeug ausübten und es dadurch positionssicher verspannten.

6.1.3 Versuchsplanung

Zur Versuchsplanung wurde für das Ultraschallschweißen der Kugelverbindungselemente zunächst ein Ursache-Wirkungs-Modell nach [154] erstellt (siehe Abb. 6-2). Die geometrischen Zielgrößen für das Kugelverbindungselement leiteten sich aus der Funktionserfüllung ab.

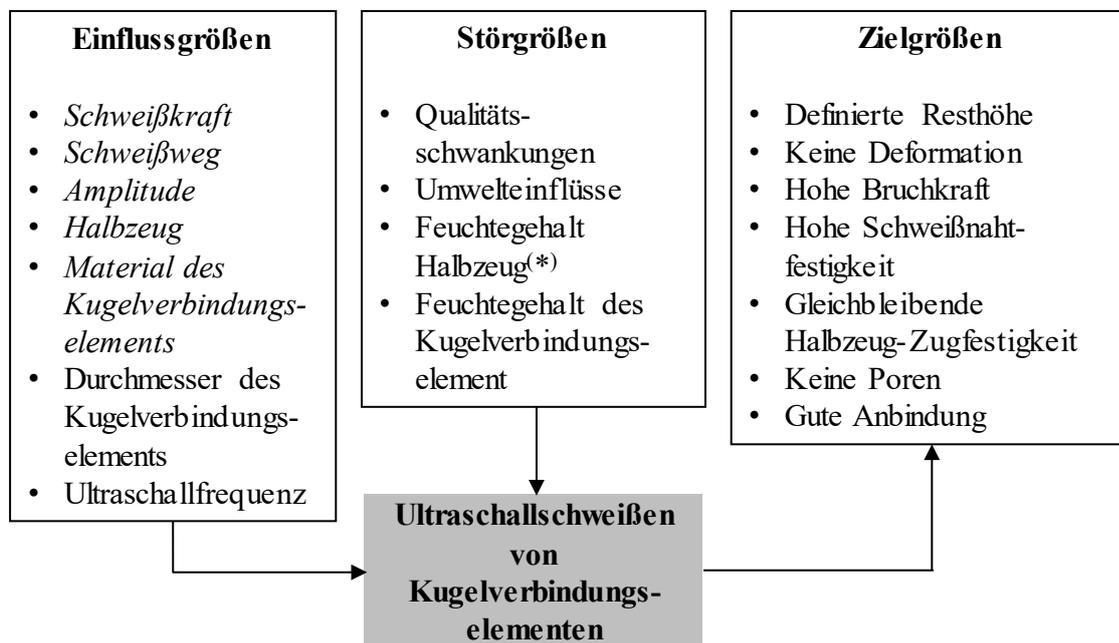


Abb. 6-2: Ursache-Wirkungs-Modell beim Ultraschallschweißen von Kugelverbindungselementen [157]

Kursiv gedruckte Einflussgrößen werden bei den experimentellen Untersuchungen variiert.
 (*) Nicht relevant für das nicht hygroskopische Matrixpolymer PP.

Die Resthöhe des Kugelverbindungselements nach dem Schweißprozess von $5,7 \pm 0,2$ mm ist für ein formschlüssiges Verrasten des Clielements sicherzustellen (siehe Abschnitt 4.4.2). Eine Deformation des Krafteinleitungselements im Zuge des Schweißprozesses könnte ebenfalls das formschlüssige Verrasten des Clielements verhindern. Die Zielgrößen Bruchkraft, Schweißnahtfestigkeit und Zugfestigkeit der Halbzeuge wurden im Zuge der experimentellen Untersuchungen ermittelt. Für die Funktionserfüllung des Krafteinleitungselements muss die Bruchkraft höher als die Abzugskraft des Clielements sein (siehe Abb. 6-1).

Voraussetzung für eine hohe Bruchkraft ist die homogene Anbindung der Kugelverbindungselemente an die unterschiedlichen Halbzeuge und die Vermeidung von Poren im Fügebereich (siehe Zielgrößen in Abb. 6-2).

Als nicht beeinflussbare Störgrößen gelten Qualitätsschwankungen beim platten- bzw. hohlprofilförmigen Halbzeug und beim Kugelverbindungselement (siehe Abb. 6-2). Außerdem können Umwelteinflüsse die Zielgrößen negativ beeinflussen. Die Störgröße Feuchtegehalt konnte hingegen durch eine gezielte Lagerung der Halbzeuge und Kugelverbindungselemente beeinflusst werden (siehe Abschnitt 6.1.4).

Die Einflussgrößen auf den Ultraschallschweißprozess sind in Abb. 6-2 links dargestellt. Für die Fügeaufgabe ist die Generatorleistung bei einer Ultraschallfrequenz von 35 kHz ausreichend (siehe Abschnitt 6.1.2). Durch die kompakte Bauform des Schwingensystems bei 35 kHz ist eine gute Zugänglichkeit zur Schweißstelle sichergestellt.

Auch das für eine mögliche Nacharbeit erforderliche Handschweißgerät fällt bei dieser Ultraschallfrequenz dementsprechend kompakt aus. Die Einflussgrößen Halbzeug, Material und Durchmesser des Kugelverbindungselements wurden bereits in den Abschnitten 6.1.1.1 bis 6.1.1.3 festgelegt. Zur Untersuchung der verbleibenden Einflussgrößen wurden mit sämtlichen Materialkombinationen umfangreiche Vorversuche durchgeführt und dabei sowohl Amplitude als auch Schweißkraft verändert. Darüber hinaus wurden der zeit- und energiegesteuerte Schweißmodus miteinander verglichen. Bei einer zu hohen Schweißkraft kam es anstatt zum vollständigen Aufschmelzen der Fügezone lediglich zu einer plastischen Verformung des Kugelverbindungselements. Abb. 6-3 links zeigt eine solche Fehlschweißung anhand eines PP-Kugelverbindungselements (Amplitude: 50 %, Schweißkraft: 200 N, Schweißweg: 0,5 mm).



Abb. 6-3: Fehlschweißungen bei Variation der Prozessparameter [138]

Links: Zu hohe Schweißkraft. Mitte: Zu hohe Schweißenergie und Amplitude.
Rechts: Zu hohe Schweißkraft und Amplitude.

Eine Kombination aus zu hoher Schweißenergie und zu hoher Amplitude führte zu einem Aufschmelzen des Kugelverbindungselements in der kugelkalottenförmigen Aufnahme der Sonotrode (Amplitude: 100 %, Schweißenergie: 25 Ws, Schweißkraft: 94 N).

Infolgedessen wurde das Kugelverbindungselement deformiert und die Sonotrodenkontur zeichnete sich auf der Oberfläche ab (siehe Abb. 6-3 Mitte). Die in Abb. 6-2 definierten geometrischen Zielgrößen wurden dadurch überschritten. Insbesondere bei PPA-Kugelverbindungselementen kam es durch das Spröbruchverhalten des Kunststoffes bei zu hoher Amplitude und Schweißkraft gemäß Abb. 6-3 rechts zu einem Bruch des Kugelverbindungselements (Amplitude: 80 %, Schweißenergie: 15 Ws, Schweißkraft: 88 N). [138]

Die aus den Vorversuchen resultierenden Prozessparameter für das Ultraschallschweißen der Kugelverbindungselemente stellen in Bezug auf den zur Charakterisierung herangezogenen Kopfzugversuch das Optimum dar. Die gewählten Prozessparameter sind in Abschnitt 6.1.4 der Tab. 6-2 zu entnehmen.

Zur Ermittlung der charakteristischen mechanischen Kenngrößen der Kugelverbindungselemente anhand der in Abschnitt 6.1.5 definierten Prüfmethode waren über sämtliche Materialkombinationen hinweg insgesamt 268 Ultraschallschweißungen erforderlich.

6.1.4 Versuchsdurchführung

Die Schweißversuche wurden mit der in Abschnitt 6.1.2 beschriebenen Ultraschallschweißanlage durchgeführt. Zur Reduktion der beeinflussbaren Störgrößen (siehe Abb. 6-2) wurden die Probekörper und Kugelverbindungselemente fünf Tage bei einer konstanten Temperatur von 40 °C im Trockenschrank gelagert (Details siehe Anhang, Tab. A-14). Die Zuführung der Kugelverbindungselemente zur kugelkalottenförmigen Aufnahme der Sonotrode erfolgte manuell. Die verwendeten Schweißparameter in Abhängigkeit vom Halbzeug und Kugelverbindungselement sind Tab. 6-2 zu entnehmen. Die Triggerzeit wurde mit 0,5 Sekunden über alle Versuche hinweg ebenso konstant gehalten wie die Haltezeit nach dem Schweißvorgang (1 Sekunde). Die Steuerung des Schweißvorgangs über den relativen Schweißweg sorgte für eine Kugelresthöhe nach dem Schweißprozess von $5,7 \pm 0,2$ mm. Daraus resultierte eine Schweißzeit von durchschnittlich 0,5 Sekunden. [138]

Tab. 6-2: Schweißparameter in Abhängigkeit von Halbzeug und Kugelverbindungselement

Halbzeug	Kugelverb.	Amplitude [%]	Rel. Schweißweg [mm]	Schweißkraft [N]
PP-GF	PP	50	0,5	70
PA6-GF	PA6	50	0,5	76
PA6-CF	PA6	70	0,5	78
PPA-GF	PPA	80	0,5	76
PA6-GF $\pm 45^\circ$	PA6	50	0,5	76

6.1.5 Prüfverfahren

Um eine mögliche Deformation des Kugelverbindungselements zu detektieren, wurde nach dem Aufschweißen zunächst eine Sichtprüfung durchgeführt. Anhand des Kopfzugversuchs wurde das Krafteinleitungselement hinsichtlich seiner charakteristischen mechanischen Eigenschaften getestet (siehe Abschnitt 6.1.5.1).

Nach der zerstörenden Prüfung wurde die Anhaftung des Kugelverbindungselements am Halbzeug erneut anhand einer Sichtprüfung der Schweißfläche festgestellt. Eine mögliche Auswirkung des Elements auf die Lamineigenschaften eines Strukturbauteils wurde mithilfe von Vergleichsprobekörpern im Zug- und Ringzugversuch validiert (siehe Abschnitt 6.1.5.2 und 6.1.5.3). Inwiefern eine Klimawechselbelastung die charakteristischen Eigenschaften der Schweißverbindung beeinflusst, wurde mit vergleichenden Kopfzugversuchen ermittelt (siehe Abschnitt 6.1.5.4). Bei den profil- und plattenförmigen Halbzeugen wurde je Materialkombination ein Probekörper für die Materialographie und die computertomographische Prüfung entnommen. Dadurch ließen sich eventuelle Poren im Bereich der Schweißzone detektieren und die Anhaftung bewerten. Tab. 6-3 zeigt eine Übersicht über die Prüfverfahren auf makro- und mikroskopischer Ebene.

Tab. 6-3: Übersicht über die Prüfverfahren zur Bewertung der Kugelverbindungselemente

Betrachtungsebene	Prüfmethode	Zielgrößen
Makroskopisch	Sichtprüfung	Deformation, Anbindung
Makroskopisch	Kopfzugversuch	Bruchkraft, Schweißnahtfestigkeit
Makroskopisch	Zugversuch	Zugfestigkeit des Halbzeugs
Mikroskopisch	Computertomographie	Poren, Anbindung
Mikroskopisch	Materialographie	Poren, Anbindung

6.1.5.1 Kopfzugversuch

Beim Kopfzugversuch erfolgte eine quasistatische Belastung des Kugelverbindungselements senkrecht zur Schweißebene. Der Aufbau der Kopfzug-Prüfvorrichtung zur Durchführung der Versuche ist in Abb. 6-4 dargestellt. Eine zweiteilige kugelförmige Aufnahme am Kopfzugwerkzeug ermöglicht das formschlüssige Umfassen des Kugelverbindungselements. Über eine axial verschiebliche Hülse kann die Kugelaufnahme geöffnet oder geschlossen werden. Zur Fixierung der plattenförmigen Halbzeuge dient eine Halteplatte. Die Kopfzugversuche wurden an einer Universalprüfmaschine bei Normklima durchgeführt (Details siehe Anhang, Tab. A-15). Querkräfte wurden dank eines Kardangelenks zwischen dem Kopfzugwerkzeug und der Traverse der Prüfmaschine vermieden.

Bei der Versuchsdurchführung wurden sowohl der Traversenweg als auch die Zugkraft aufgezeichnet. Die quasistatische Prüfgeschwindigkeit betrug konstant 2 mm/min bis zum Versagen der Schweißverbindung. Pro Halbzeug wurden jeweils 30 Kugelverbindungselemente aufgeschweißt und anschließend dem Kopfzugversuch unterzogen. [138]

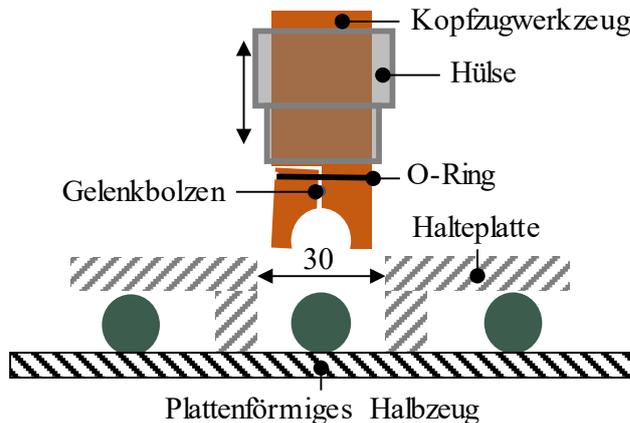


Abb. 6-4: Schematische Darstellung der Kopfzug-Prüfvorrichtung [138]
Maß in mm.

6.1.5.2 Zugversuch

Der Einfluss des Kugelverbindungselements auf die Zugeigenschaften der plattenförmigen Halbzeuge wurde mithilfe des Zugversuches nach DIN EN ISO 527-4/2/2 [158] bestimmt. Aus jedem plattenförmigen Halbzeug wurden Prüfkörper vom Typ 2 (250 x 25 mm) herausgetrennt und mit aufgeklebten Aufleimern versehen. Auf die nach [158] wahlweise möglichen Zentrierlöcher wurde verzichtet. Analog zum Kopfzugversuch betrug die quasistatische Prüfgeschwindigkeit unter Normklima bis zum Versagen der Prüfkörper konstant 2 mm/min. Zur Referenzwertgenerierung wurden bei jedem plattenförmigen Halbzeug zehn Prüfkörper ohne Element geprüft. Bei zehn Prüfkörpern je Halbzeug wurde zunächst ein Kugelverbindungselement im Zentrum jedes Prüfkörpers aufgeschweißt. Anschließend wurden diese Prüfkörper ebenfalls dem Zugversuch unterzogen. Details zur verwendeten Materialprüfmaschine sind Tab. A-8 im Anhang zu entnehmen. [138]

6.1.5.3 Ringzugversuch

Inwiefern das Kugelverbindungselement die Zugeigenschaften des hohlprofilförmigen Halbzeugs beeinflusst, wurde anhand des vergleichenden Ringzugversuchs ermittelt. Dazu wurden aus dem Halbzeug zunächst zehn Prüfkörper für den Ringzugversuch entnommen und zur Referenzwertgenerierung fünf Prüfkörper ohne Kugelverbindungselement in Anlehnung an die ASTM D2290-12 [150] geprüft (siehe Abschnitt 5.2.1.1).

Die verbleibenden Prüfkörper wurden nach dem Aufschweißen der Kugelverbindungselemente ebenfalls dem Ringzugversuch in Anlehnung an ASTM D2290-12 [150] unterzogen.

6.1.5.4 Klimawechselbelastung

Um den Einfluss einer Dauerbelastung unter klimatischen Bedingungen zu untersuchen, durchliefen alle plattenförmigen Halbzeuge bei konstanter Scher- und Kopfzugbelastung des Kugelverbindungselements einen zehntägigen Klimawechseltest. Beim gewählten Testzyklus erfolgt eine tägliche Temperaturschwankung zwischen 23 °C (2 Stunden), 80 °C (15 Stunden) und -30 °C (1 Stunde). Gleichzeitig schwankt die relative Feuchte in der Umweltsimulationskammer (Details siehe Anhang, Tab. A-16) zwischen 15 und 60 %. Nach dem Aufschweißen der Kugelverbindungselemente wurden die plattenförmigen Halbzeuge auf einer würfelförmigen Prüfvorrichtung aus Aluminiumprofilen befestigt. Zwei Prüfkörper je Halbzeug waren dabei kopfüber angeordnet, sodass fünf Kugelverbindungselemente nach unten ragten. Über formschlüssig umfassende Klemmvorrichtungen war jedes Kugelverbindungselement mit einer Gewichtslast von 2,5 kg (24,525 N) belastet. Die Gewichtslast simulierte mögliche Komponenten, die mithilfe des zweiteiligen Krafterleitungselements befestigt werden könnten. Zwei weitere Prüfkörper je Halbzeug wurden vertikal an der Prüfvorrichtung befestigt, um fünf Kugelverbindungselemente während des Klimawechseltests einer konstanten Querkraftbelastung (F_Q , siehe Abb. 6-1) zu unterziehen. Da die Querkraftbelastung als Lastfall für das Krafterleitungselement eine untergeordnete Rolle spielt, waren die Klemmvorrichtungen lediglich mit einer Gewichtslast von 1 kg (9,81 N) belastet. Pro Halbzeug durchliefen zudem zehn Kugelverbindungselemente den Klimawechseltest unbelastet. Nach der Klimawechselbelastung wurden diese Kugelverbindungselemente im Kopfzugversuch geprüft (siehe Abschnitt 6.1.5.1). [138]

6.2 Ergebnisse und Diskussion

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen vorgestellt und analysiert. Für die Konstruktion und Auslegung zukünftiger Bauteile ist neben den mechanischen Eigenschaften des Krafterleitungselements vor allem eine mögliche Beeinflussung des Halbzeugs durch das Kugelverbindungselement von Bedeutung. Daher stehen in Abschnitt 6.2.1 zunächst die Auswirkungen des Kugelverbindungselements auf die Zugeigenschaften der platten- und hohlprofilförmigen Halbzeuge im Fokus. Abschnitt 6.2.2 befasst sich anschließend mit dem Einfluss des Halbzeugs auf die mechanischen Eigenschaften des Kugelverbindungselements. Die Auswirkungen einer Dauerbelastung und wechselnden Klimabedingungen auf die mechanischen Eigenschaften des Kugelverbindungselements werden abschließend in Abschnitt 6.2.3 beleuchtet.

6.2.1 Einfluss des Kugelverbindungselements auf die Zugeigenschaften der Halbzeuge

Für die plattenförmigen Halbzeuge sind die im Zugversuch ermittelten Zugfestigkeiten mit und ohne Kugelverbindungselement in Abb. 6-5 gegenübergestellt. Aus einem Vergleich der Zugfestigkeiten wird ersichtlich, dass das Aufschießen des Krafteinleitungselements zu keiner Beeinträchtigung der Zugfestigkeiten führt. Die Schwankung der Mittelwerte bewegt sich innerhalb des angegebenen Konfidenzintervalls. Eine Schwächung der plattenförmigen Halbzeuge ist nicht feststellbar. Keiner der Prüfkörper mit Kugelverbindungselement versagte im Schweißbereich. [138]

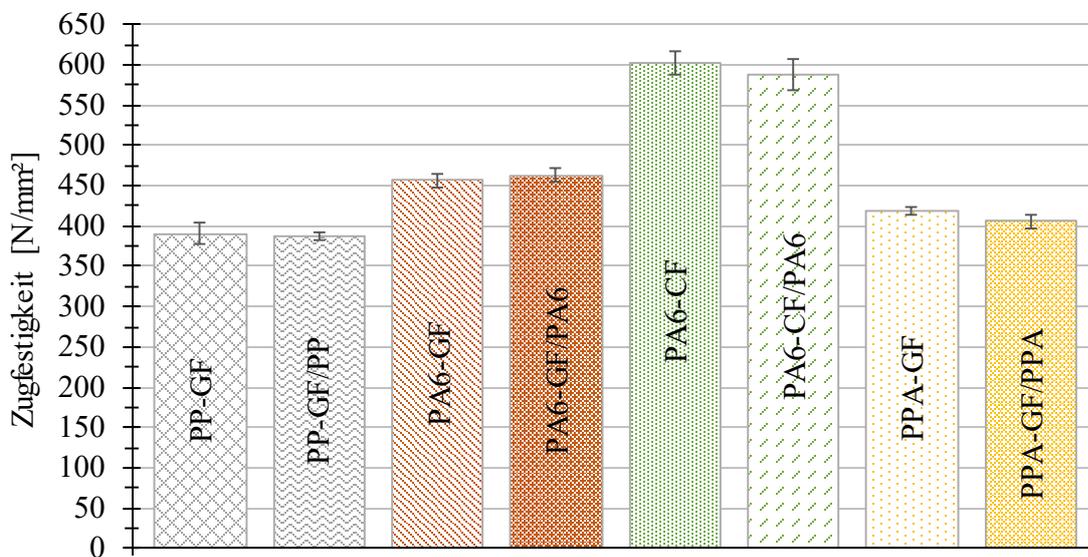


Abb. 6-5: Einfluss des Kugelverbindungselements auf die Zugeigenschaften der plattenförmigen Halbzeuge [138]

(n = 10 je Halbzeug mit und ohne Kugelverbindungselement, Mittelwerte inkl. Konfidenzintervall, Konfidenzniveau: 95 %)

Ein Vergleich der Zugfestigkeiten beim hohlprofilförmigen Halbzeug zeigt ein ähnliches Ergebnis. In Abb. 6-6 sind die Zugfestigkeiten des Halbzeugs PA6-GF $\pm 45^\circ$ ohne und mit aufgeschweißtem Kugelverbindungselement dargestellt. Die leichte Abweichung der Mittelwerte ist auf fertigungsbedingte Qualitätsschwankungen bei der Halbzeugherstellung zurückzuführen (siehe Abschnitt 5.2.1.1). Eine Schwächung des hohlprofilförmigen Halbzeugs im Ringzugversuch ist nicht detektierbar.

Sowohl beim platten- als auch beim hohlprofilförmigen Halbzeug zeigt sich wie erwartet kein signifikanter Einfluss des Kugelverbindungselements auf die Zugfestigkeiten der Halbzeuge. Nach dieser Absicherung konzentrieren sich die beiden folgenden Abschnitte auf die mechanischen Kennwerte des Kugelverbindungselements.

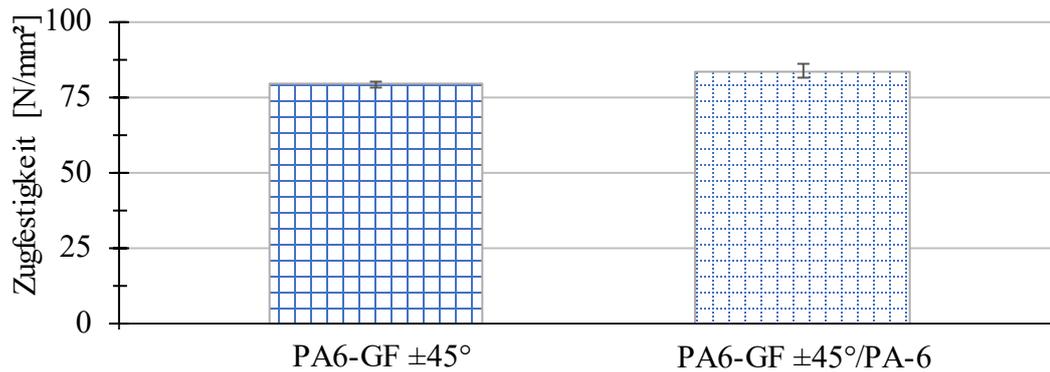


Abb. 6-6: Einfluss des Kugelverbindungselements auf die Zugfestigkeit des profilförmigen Halbzeugs PA6-GF ±45° im Ringzugversuch
(n = 5 mit und ohne Kugelverbindungselement, Mittelwerte inkl. Konfidenzintervall, Konfidenzniveau: 95 %)

6.2.2 Einfluss des Halbzeugs auf das Kugelverbindungselement

Inwiefern die Wahl des Halbzeugs und damit einhergehend die Wahl des Kugelverbindungselements die mechanischen Eigenschaften des aufgeschweißten Elements beeinflusst, illustriert Abb. 6-7. Die Bruchkraft im Kopfzugversuch ist demnach vom verwendeten Matrixpolymer, dem Kugelverbindungselement (PP, PA6, PPA) und der Faserart (GF, CF) abhängig. [138]

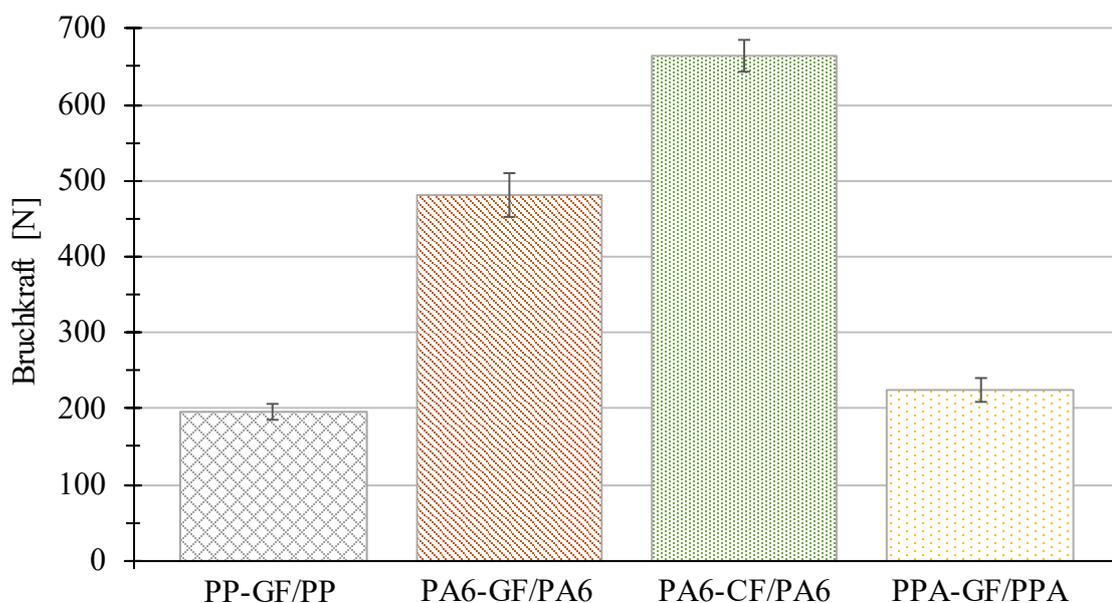


Abb. 6-7: Einfluss des Halbzeugs auf die Bruchkraft im Kopfzugversuch [138]
(n = 30 je Halbzeug, Mittelwerte inkl. Konfidenzintervall, Konfidenzniveau: 95 %)

Während die Schweißverbindung zwischen dem PP-GF-Halbzeug und dem PP-Kugelverbindungselement lediglich eine gemittelte Bruchkraft von 196,7 N erreicht, liegt diese bei einem PA6-CF/PA6 Halbzeug bei durchschnittlich 663,7 N. Bei identischem Matrixpolymer, aber unterschiedlicher Faserart besitzt die Schweißverbindung PA6-GF/PA6 hingegen lediglich eine Bruchkraft von 481,5 N. Mit 225,0 N liegt die Bruchkraft der Schweißverbindung PPA-GF/PPA zwischen den beiden Matrixwerkstoffen PP und PA6. Die prozentuale Standardabweichung der Bruchkraft schwankt zwischen 8,7 % (PA6-CF/PA6) und 18,5 % (PPA-GF/PPA). [138]

Streubreiten von bis zu 20 % lassen sich in wissenschaftlichen Untersuchungen zum Ultraschallschweißen und in praktischen Anwendungen wiederfinden [159].

Die in Abb. 6-8 dargestellte Schweißnahtfestigkeit in Abhängigkeit vom Halbzeug resultiert aus der Bruchkraft in Relation zur kreisförmigen Schweißfläche der Schweißverbindung. Der Durchmesser der Schweißflächen beträgt über sämtliche Schweißungen hinweg durchschnittlich 4,3 mm. Dies stimmt mit dem rechnerisch ermittelbaren Schweißflächendurchmesser von 4,32 mm bei einer Resthöhe des Kugelverbindungselements von 5,5 mm überein ($5,7 \pm 0,2$ mm gemäß Abschnitt 4.4.2). Die durchschnittliche Schweißnahtfestigkeit für PA6-CF/PA6 ($45,1 \text{ N/mm}^2$) und PA6-GF/PA6 ($32,7 \text{ N/mm}^2$) liegt deutlich oberhalb der Literaturangaben [159]. Die Materialpaarung PP-GF/PP weist eine Schweißnahtfestigkeit von $10,3 \text{ N/mm}^2$ auf. PPA-GF/PPA hingegen erreicht eine Festigkeit von durchschnittlich $16,7 \text{ N/mm}^2$. Beide Durchschnittswerte kongruieren mit den in [159] publizierten Daten. [138]

Abb. 6-9 visualisiert für jede Materialpaarung einen Vergleich der Kraft-Weg-Diagramme im Kopfzugversuch. Dabei wird das Verhalten der jeweiligen Schweißverbindung und der plattenförmigen Halbzeuge unter quasistatischer Belastung deutlich. Die in Abb. 6-9 gezeigten Kraft-Weg-Verläufe stellen den ermittelten Maximalwert der jeweiligen Versuchsreihe dar. Die geringen Bruchkräfte der PPA-GF/PPA-Schweißverbindungen sind unter anderem auf das in Abb. 6-9 ersichtliche Spröbruchverhalten des Kunststoffes zurückzuführen (ca. 3 % Bruchdehnung [160]). Die PA6-Schweißverbindungen weisen hingegen ein deutlich duktileres Versagen auf (ca. 5 % Bruchdehnung [161]). Dies spiegelt sich unter anderem in – verglichen mit PPA-GF/PPA – höheren Bruchkräften wider (siehe Abb. 6-7). [138]

Neben der Bruchdehnung ist unterschiedliche Steifigkeit der plattenförmigen Halbzeuge für die variierenden Kraft-Weg-Verläufe verantwortlich, da es im Zuge des Kopfzugversuchs zu einer minimalen Durchbiegung des Prüfkörpers kommen kann (siehe 30 mm Öffnung der Halteplatte in Abschnitt 6.1.5.1).

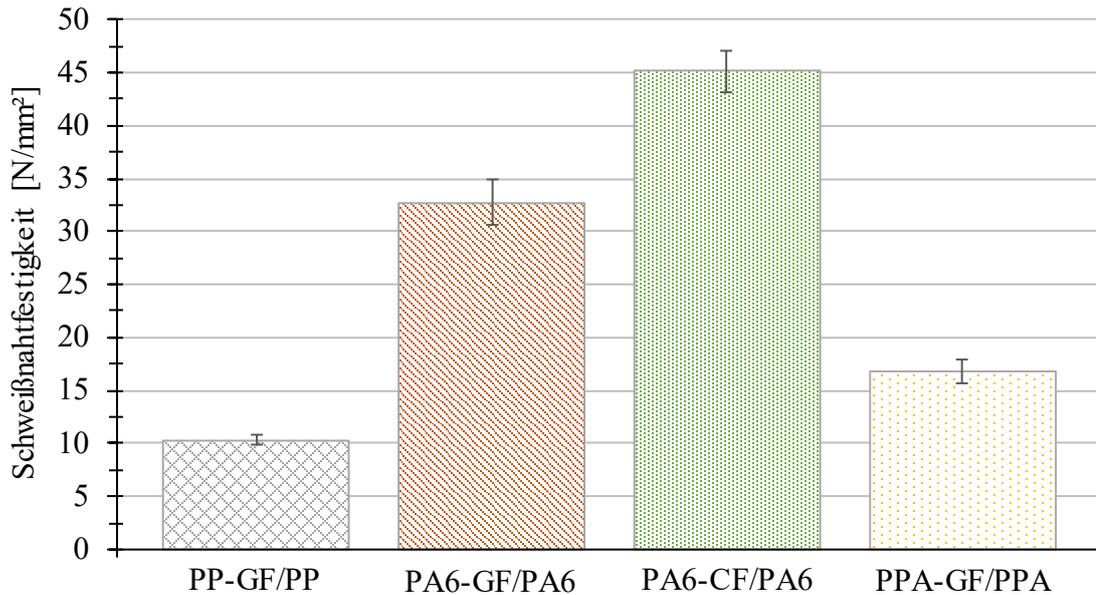


Abb. 6-8: Einfluss des Halbzeugs auf die Schweißnahtfestigkeit im Kopfzugversuch [138] (n = 30 je Halbzeug, Mittelwerte inkl. Konfidenzintervall, Konfidenzniveau: 95 %)

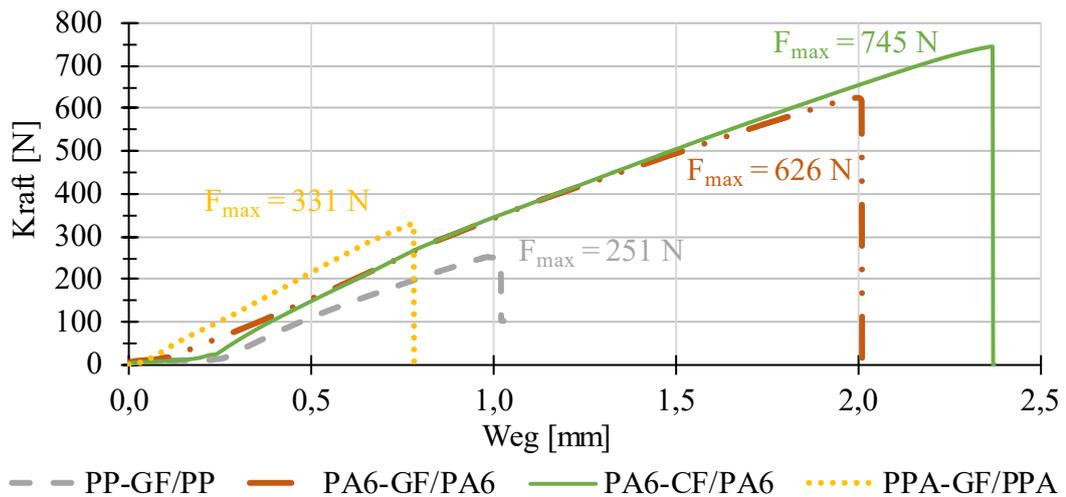


Abb. 6-9: Exemplarisches Kraft-Weg-Diagramm der Kopfzugversuche [138]

Für die Materialpaarungen mit der niedrigsten bzw. höchsten Bruchkraft sowie für das hohlprofilförmige Halbzeug werden in den Abschnitten 6.2.2.1 bis 6.2.2.3 Auszüge aus den makro- und mikroskopischen Untersuchungen des Schweißbereichs vorgestellt und analysiert.

6.2.2.1 Materialpaarung PP-GF/PP

Eine Sichtprüfung nach dem Kopfzugversuch zeigt beim PP-Kugelverbindungselement die Anhaftung von Faserresten des PP-GF-Halbzeugs (siehe Abb. 6-10 links). Am Halbzeug weist die Schweißfläche wiederum Rückstände des grün eingefärbten Kugelverbindungselements auf (siehe Abb. 6-10 rechts). Die gute Anbindung des Kugelverbindungselements führt bei einer Belastung senkrecht zur Faserrichtung zu einem Versagen der Faser-Matrix-Grenzfläche (engl. Interface). Aufgeklebte metallische Krafteinleitungselemente (Onserts) zeigen nach [74, 79] unter Kopfzugbelastung ebenfalls ein Deckschichtversagen des Faserverbundwerkstoffs. Ferner tritt ein laut [79] festgestelltes Versagen der obersten Matrixschicht beim Kugelverbindungselement hingegen nicht auf. Beim Aufschiessen des Kugelverbindungselements wird das Matrixpolymer beim Überschreiten der Schmelztemperatur teilweise zum Schweißbrand hin verdrängt (siehe schwarzer Schweißwulst in Abb. 6-10 links). Dieser Effekt ist auch beim Ultraschallschweißen von Hybridverbindungen feststellbar [162]. Aus der Verdrängung der obersten Matrixschicht resultiert eine Anhaftung des Kugelverbindungselements auf den Fasern des Halbzeugs (siehe auch Abb. 6-12). Bei plattenförmigen Halbzeugen ist dieser Effekt in Abhängigkeit von der Schweißposition unterschiedlich stark ausgeprägt. Dies kann mit der Ondulation der Gewebelagen begründet werden. [138]

Bedingt durch den gelegeartigen Lagenaufbau der hohlprofilförmigen Halbzeuge tritt die Verdrängung der obersten Matrixschicht an sämtlichen Schweißpositionen gleichermaßen auf.

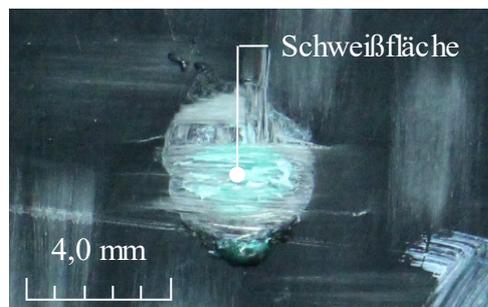
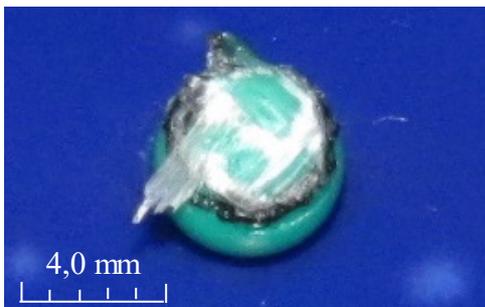


Abb. 6-10: Sichtprüfung der Schweißverbindung PP-GF/PP nach dem Kopfzugversuch [138]
Links: Kugelverbindungselement. Rechts: Schweißfläche Halbzeug.

Abb. 6-11 zeigt die computertomographische Prüfung der Schweißverbindung PP-GF/PP (Daten zum Computertomographen siehe Anhang, Tab. A-5). Die drei Schnitte zeigen eine homogene Anbindung des Kugelverbindungselements. Der Schweißbereich weist keinerlei Poren auf. Eine Beschädigung oder Veränderung (z. B. der Faserwinkel) des plattenförmigen Halbzeugs durch das Aufschiessen des Kugelverbindungselements ist nicht feststellbar. [138]

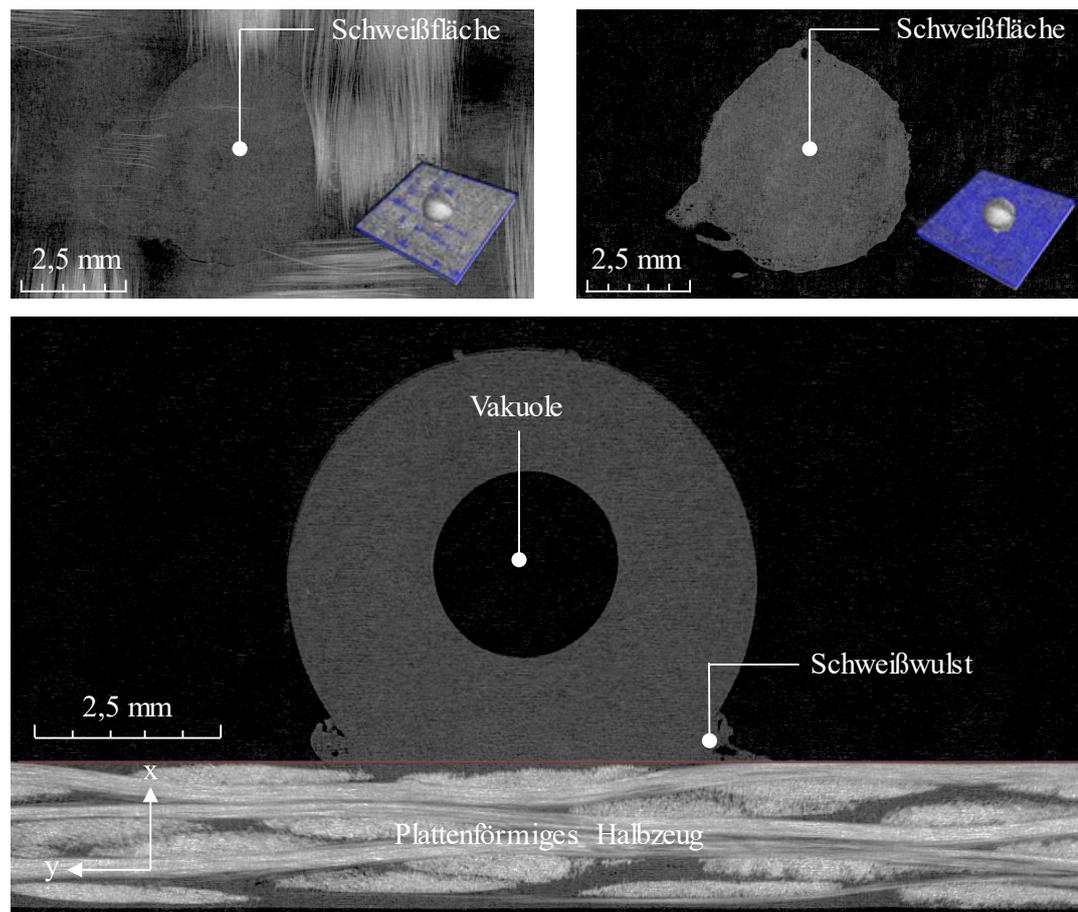


Abb. 6-11: CT-Bild der Schweißverbindung PP-GF/PP [138]

Oben links: Horizontalschnitt Halbzeug. Oben rechts: Horizontalschnitt Schweißfläche.
Unten: Vertikalschnitt Kugelverbindungselement (Mitte).

Bei der Herstellung des Kugelverbindungselements entsteht verfahrensbedingt eine Vakuole, die im Vertikalschnitt ersichtlich ist (siehe Abb. 6-11 unten) [138]. Vakuolen entstehen im Spritzgießverfahren durch die Schwindung des Kunststoffes beim Abkühlen im Spritzgießwerkzeug [163]. Der Kunststoff erstarrt nach dem Einspritzen zunächst an der Werkzeugkavität und schwindet beim Abkühlen von außen nach innen. Da es sich beim Spritzgießen des Kugelverbindungselements um eine geometrisch bedingte Dickstelle handelt, bildet sich in der Mitte des Elements die Vakuole.

Der nicht lasttragende Schweißwulst ist im Gegensatz zu herkömmlichen Ultraschallschweißungen etwas stärker ausgeprägt (siehe Abb. 6-11 und Abb. 6-12). Dies resultiert aus dem flächenmäßig stark ansteigenden Energierichtungsgeber beim Aufschießen des Kugelverbindungselements (siehe Abb. 4-17). Während des Schweißvorgangs werden der Kunststoff des Kugelverbindungselements und die oberste Matrixschicht des Halbzeugs zum Schweißrand hin verdrängt. [138]

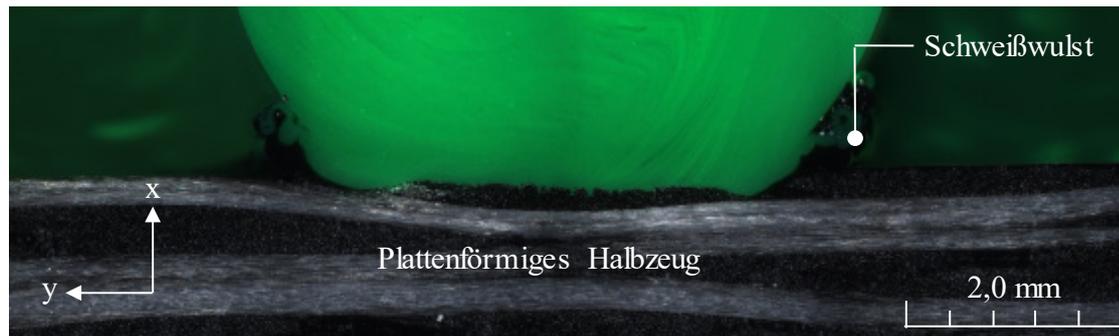


Abb. 6-12: Schliffbild der Schweißverbindung PP-GF/PP

6.2.2.2 Materialpaarung PA6-CF/PA6

Die Ergebnisse der Sichtprüfung nach dem Kopfzugversuch sind für die Schweißverbindung PA6-CF/PA6 kongruent zu den PP-GF/PP-Untersuchungen. Am PA6-Kugelverbindungselement anhaftende Kohlenstofffasern lassen auf ein teilweises Versagen der Faser-Matrix-Grenzfläche schließen (siehe Abb. 6-13 links). Durch die Verdrängung der obersten Matrixschicht haftet das Kugelverbindungselement auf der Gewebedecklage des plattenförmigen Halbzeugs an (siehe Abb. 6-14). Die unterschiedliche Bruchkräfte im Kopfzugversuch bei PA6-GF und PA6-CF basieren auf den verschiedenen Faser-Matrix-Grenzflächenfestigkeiten der plattenförmigen Halbzeuge. Dies wiederum kann an der Faserart, der verwendeten Schlichte und/oder an den unterschiedlichen Flächengewichten der Gewebe liegen. [138]

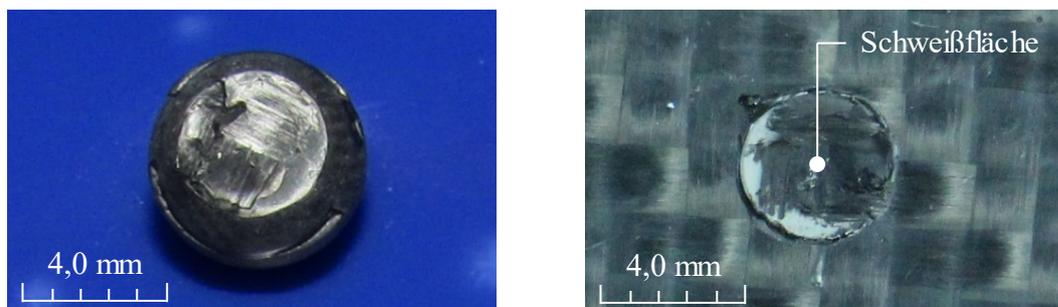


Abb. 6-13: Sichtprüfung der Schweißverbindung PA6-CF/PA6 nach dem Kopfzugversuch [138]
Links: Kugelverbindungselement. Rechts: Schweißfläche Halbzeug.



Abb. 6-14: Schliffbild der Schweißverbindung PA6-CF/PA6

Abb. 6-15 und Abb. 6-16 zeigen Auszüge aus der CT-Prüfung der Schweißverbindung PA6-CF/PA6. Aus den beiden Horizontalschnitten wird eine homogene Anbindung des Kugelverbindungselements ersichtlich. Im Schweißbereich sind keine Poren detektierbar. Da zu hohe Wassergehalte im Kunststoff, nach [140], zu porösen Schweißnähten führen können, wurde diese Störgröße durch die gezielte Lagerung im Trockenschrank vermieden (siehe Abschnitt 6.1.4). Die Poren und Blasen im Randbereich sind dem nichttragenden Schweißwulst zuzuordnen. Im Vertikalschnitt durch das plattenförmige Halbzeug zeigen sich in den oberen Gewebelagen kleinere Lunker (siehe Abb. 6-16). Diese betreffen jedoch nicht den Schweißbereich und sind auf die Halbzeugherstellung zurückzuführen. Der Schweißwulst ist am Rand der Schweißfläche am Halbzeug sowie im Horizontal- und Vertikalschnitt erkennbar (siehe Abb. 6-13, Abb. 6-14 und Abb. 6-15). Die Vakuole des Kugelverbindungselements fällt im Gegensatz zum Kugelverbindungselement aus PP kleiner aus. [138]

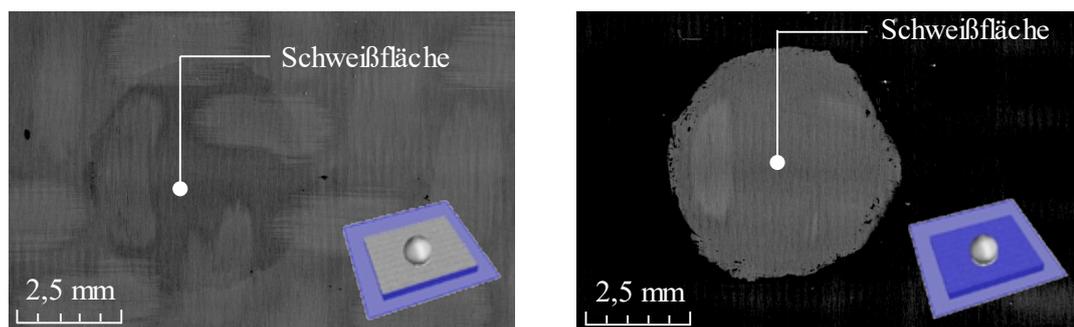


Abb. 6-15: CT-Bild der Schweißverbindung PA6-CF/PA6 [138]

Links: Horizontalschnitt Halbzeug. Rechts: Horizontalschnitt Schweißfläche.

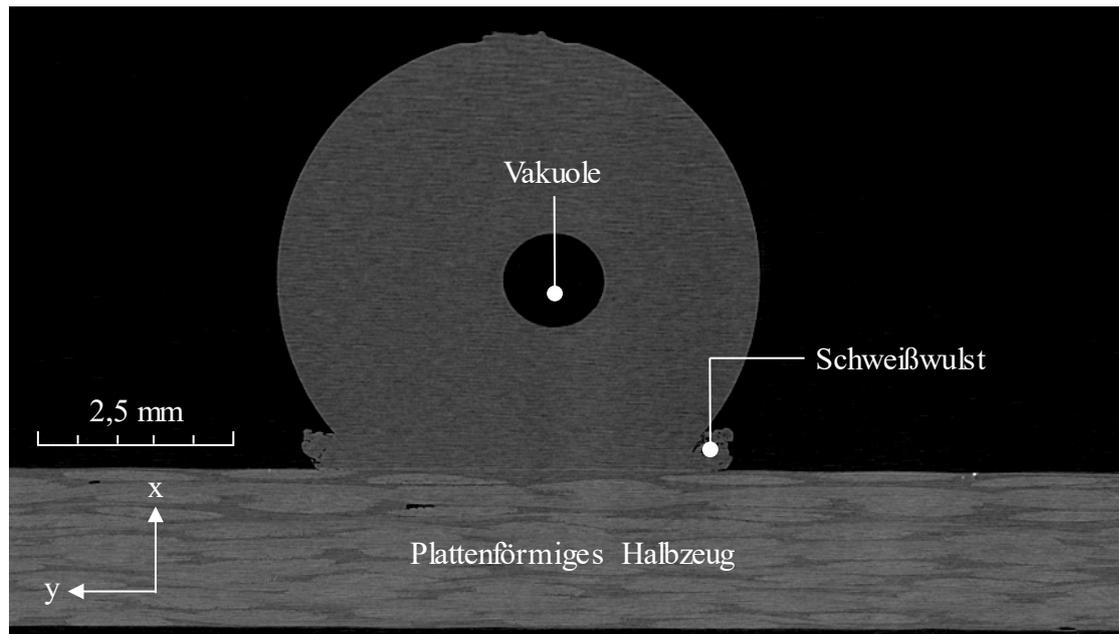


Abb. 6-16: CT-Bild der Schweißverbindung PA6-CF/PA6 [138]
Vertikalschnitt Kugelverbindungselement (Mitte).

6.2.2.3 Materialpaarung PA6-GF $\pm 45^\circ$ /PA6

Beim Aufschießen des Kugelverbindungselements auf das hohlprofilförmige Halbzeug PA6-GF $\pm 45^\circ$ (siehe Abschnitt 5.2.1.1) zeigen sich bei einer mikroskopischen Analyse des Schweißbereichs keine Unterschiede zu den vorhergehenden Untersuchungen. Aus Abb. 6-17 geht eine homogene Anbindung des Kugelverbindungselements hervor. Analog zu plattenförmigen Halbzeugen kommt es beim Aufschießen zu einer Anhaftung des Kugelverbindungselements auf den Decklagen (0° -Lagen) des Halbzeugs und zu einem Versagen der Faser-Matrix-Grenzfläche im Kopfzugversuch.



Abb. 6-17: Schliffbild der Schweißverbindung PA6-GF $\pm 45^\circ$ /PA6

6.2.3 Einfluss der Klimawechselbelastung auf das Kugelverbindungselement

Die Bruchkräfte der Materialpaarungen im Kopfzugversuch vor und nach dem Klimawechseltest (KWT) sind in Abb. 6-18 gegenübergestellt. Nach zehntägiger Klimawechselbelastung fällt die Bruchkraft der Schweißverbindung PP-GF/PP um 20,6 % (Mittelwert) ab. Der Eigenschaftsabfall ist vorwiegend auf die für diesen Kunststoff hohe Temperaturbelastung zurückzuführen. Aufgrund der nicht hygroskopischen Charakteristik des Materials spielt die Feuchtbeanspruchung während des Tests eine untergeordnete Rolle. Beim hygroskopischen PA6 führt die Kombination aus Feuchteaufnahme und Temperaturbelastung zu einer Reduktion der Bruchkräfte um 13,6 bzw. 10,9 % (Mittelwert). Diesen materialspezifischen Eigenschaftsabfall der Kugelverbindungselemente unter quasistatischer Zugbelastung gilt es bei der Auslegung potentieller Anwendungsfälle zu berücksichtigen, um ein Versagen des Kraft-einleitungselements zu vermeiden (siehe Abb. 6-1). [138]

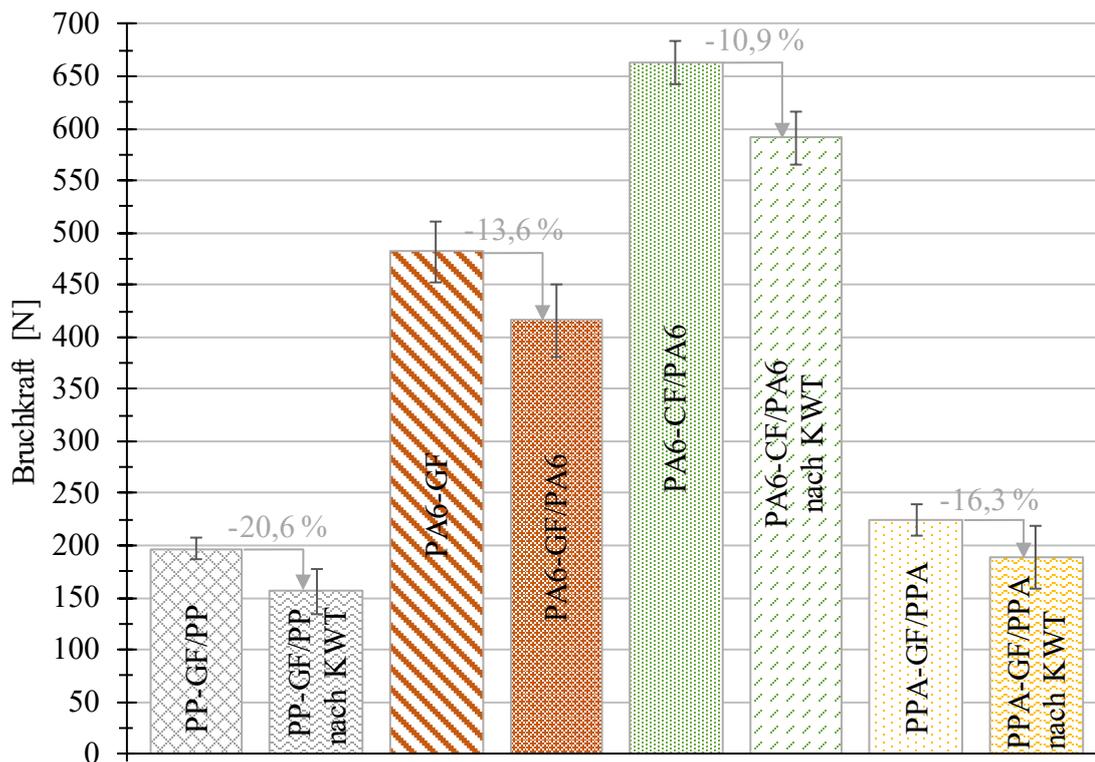


Abb. 6-18: Vergleich der Bruchkraft im Kopfzugversuch vor und nach dem Klimawechseltest (KWT) [138]

(n = 30 je Halbzeug vor dem KWT, n = 10 je Halbzeug nach dem KWT, Mittelwerte inkl. Konfidenzintervall, Konfidenzniveau: 95 %)

Der statischen Kopfzug- und Querkraftbelastung während des Klimawechseltests hielten sämtliche Kugelverbindungselemente der Materialkombinationen PA6-GF/PA6, PA6-CF/PA6 sowie PPA-GF/PPA stand. Lediglich bei der Kopfzugbelastung der PP-GF/PP-Prüfkörper kam es nach drei Tagen Testzyklus zum Abfall zweier Gewichte. Dies ist jedoch auf eine Fehlbelastung während des Versuchs zurückzuführen. [138]

Da die Anbindung von Komponenten am Hohlprofilbauteil zu deren exakten Positionierung in der Regel über mehrere Krafteinleitungselemente realisiert wird, sind mit dem entwickelten Krafteinleitungselement auch Anwendungsfälle umsetzbar, bei denen das Komponentengewicht die getestete Belastung von 2,5 kg übersteigt.

6.3 Bewertung des Kugelverbindungselements

Aufgrund der kunststoff- und halbzeugspezifischen Eigenschaften variieren die Schweißnahtfestigkeiten und Bruchkräfte in Abhängigkeit von Halbzeug und Kugelverbindungselement. Die höchsten Bruchkräfte und Schweißnahtfestigkeiten im Kopfzugversuch erzielte die Materialpaarung PA6-CF/PA6. Die geringsten mechanischen Kennwerte wurden bei der Materialpaarung PP-GF/PP festgestellt.

Das Aufschweißen des Kugelverbindungselements führte zu keiner lokalen Schwächung der Halbzeuge. Dies wies eine vergleichende Betrachtung der Zugfestigkeiten mit und ohne Kugelverbindungselement sowohl für platten- als auch für hohlprofilförmige Halbzeuge nach.

Beim Aufschweißen des Kugelverbindungselements wurde die oberste Matrixschicht zum Rand der Schweißfläche hin verdrängt. In weiterer Folge kam es zu einer Anhaftung des Kugelverbindungselements auf den Decklagen der Halbzeuge. Der Bruch der Schweißverbindungen im Kopfzugversuch resultierte daher primär aus einem Deckschichtversagen der Halbzeuge. Dieses wird bei einer Belastung senkrecht zur Faserrichtung durch ein Versagen der Faser-Matrix-Grenzfläche hervorgerufen.

Die zyklische Temperatur- und Feuchtebelastung der Schweißverbindungen durch den Klimawechseltest führte – je nach Halbzeug bzw. Kugelverbindungselement – zu einer Abnahme der Bruchkräfte um 10 bis 20 %. Die Kugelverbindungselemente hielten der während des Klimawechseltests aufgetragenen Kopfzug- (2,5 kg) und Querkraftbelastung (1 kg) stand.

Die kurzen Schweißzeiten, die einfache prozesstechnische Handhabung und die guten mechanischen Eigenschaften ermöglichen dem Kugelverbindungselement ein weites Anwendungsspektrum. In Kombination mit individuell gestaltbaren Clipselementen, die je nach Anwendungsfall hinsichtlich Geometrie und/oder Material adaptierbar sind, kann eine flexible und kostengünstige Funktionalisierung von Hohlprofilbauteilen erfolgen.

Im Automobilbau eignet sich das Krafteinleitungselement zur Befestigung von Montagekomponenten an der Fahrzeugkarosserie. Dies ermöglicht beispielsweise die Anbindung von Kabelbäumen, Blenden, Schallschutzisolierungen oder Steuergeräten am funktionalisierten Hohlprofilbauteil. Für hochbelastete Krafteinleitungspunkte mit einer überlagerten Beanspruchung aus Zug-, Druck- und Querkräften sowie Momenten (z. B. Gurtsystem, Sitzschiene, Kindersitzbefestigung etc.) ist das Krafteinleitungselement hingegen nicht geeignet.

Die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen zur Herstellung eines Hohlprofilbauteils (siehe Kapitel 5) sowie zu dessen Funktionalisierung dienen im nachfolgenden Kapitel 7 als Grundlage für die Ableitung der Regeln zur Bauteil- und Prozessgestaltung.

7 Ableitung von Regeln zur Bauteil-, Prozess- und Produktionsgestaltung

Um im Entwicklungsprozess des Hohlprofilbauteils bereits frühzeitig eine Beurteilung hinsichtlich der Herstellbarkeit zu ermöglichen, befasst sich dieses Kapitel mit den Richtlinien zur optimalen Bauteil- und Prozessgestaltung für das FuHo-Verfahren. Diese basieren auf den experimentellen Untersuchungen zur Umformung sowie Funktionalisierung (siehe Kapitel 5 und 6). Der erste Abschnitt widmet sich den Rahmenbedingungen zur Konstruktion funktionalisierter Hohlprofilbauteile. Abschnitt 7.2 beschreibt die Regeln zur fertigungs- und prozessgerechten Gestaltung von Formwerkzeug und Blasschlauch. Die beim FuHo-Verfahren zu beachtenden Prozessparameter und eine Produktionszelle zur Fertigung funktionalisierter Hohlprofilbauteile bilden den Abschluss (siehe Abschnitt 7.3).

7.1 Konstruktion funktionalisierter Hohlprofilbauteile

In Abschnitt 7.1.1 werden zunächst die wichtigsten Richtlinien für eine werkstoff- und fertigungsgerechte Konstruktion des Hohlprofilbauteils aufgezeigt. Darüber hinaus zeigt dieser Abschnitt Möglichkeiten zur Gestaltung von Hohlprofilbauteilen mit variabler Bauteilwandstärke (siehe Abschnitt 7.1.2). Abschnitt 7.1.3 beschreibt sowohl die Richtlinien für eine Bauteilfunktionalisierung auf Basis des Krafteinleitungselements als auch alternative Funktionalisierungsmöglichkeiten.

7.1.1 Konstruktion des Hohlprofilbauteils

Aus den Ergebnissen zur Umformung hohlprofilförmiger Halbzeuge (siehe Abschnitt 5.3) lassen sich die im Folgenden aufgeführten Richtlinien ableiten.

Umfangsgleichheit

Wird für die Umformung ein Halbzeug aus endlosfaserverstärktem thermoplastischem Kunststoff herangezogen, bei dem mindestens eine Faserlage in axialer Richtung verläuft, so muss der Umfang des herzustellenden Hohlprofilbauteils über die gesamte Länge hinweg stets dem Halbzeugumfang entsprechen (siehe Formel 7-1). Eine Umfangsweitung würde durch die damit einhergehende Verringerung der Halbzeuglänge bzw. Stauchung der Fasern zu Falten, Ondulationen und Delaminationen im Hohlprofilbauteil führen (siehe Abschnitt 4.3.1.1).

$$D_H = D_B \quad (7-1)$$

D_H = Außendurchmesser des Halbzeugs; D_B = Außendurchmesser des Hohlprofilbauteils

Umfangsweitungen sind beispielsweise mit den bereits beschriebenen Verfahren Innendruckumformen segmentierter Faser-Thermoplast-Kreisrohre [48] oder Bladder-Inflation-Moulding [61–63] möglich (siehe Abschnitt 2.2.2.5). Gegenüber dem entwickelten FuHo-Verfahren gehen damit gemäß Abschnitt 3.2.2 jedoch diverse Nachteile einher.

Bauteilradien

Bei den fertigungsgerechten Bauteilradien des Hohlprofilbauteils ist zwischen einer konvexen und einer konkaven Bauteilgeometrie zu unterscheiden:

- Im Falle einer Halbzeugumformung zur konvexen Bauteilgeometrie muss der Außenradius (R_a) mindestens das 5fache der Halbzeugwandstärke (b_H) betragen (siehe Abb. 7-1). Bei einer Wandstärke von beispielsweise 1,6 mm resultiert daraus ein minimaler Außenradius von 8 mm.
- Für eine konkave Bauteilgeometrie hat der Innenradius (R_i) mindestens die 2,5fache Halbzeugwandstärke (b_H) aufzuweisen (siehe Abb. 7-1). Dies entspricht einem Radius von 4 mm bei einer Wandstärke des Halbzeugs von 1,6 mm.

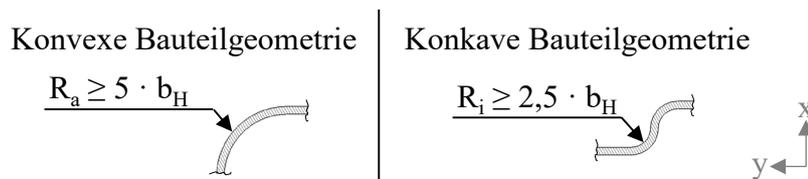


Abb. 7-1: Radiengestaltung bei konkaver und konvexer Geometrie des Hohlprofilbauteils
Richtwerte auf Basis der experimentellen Untersuchungen.

Faserlauflängenunterschied

Zur Vermeidung von Querfalten und Delaminationen sollte das Hohlprofilbauteil einen Faserlauflängenunterschied von maximal 0,71 % aufweisen. Mithilfe der Formel 7-2 kann der Faserlauflängenunterschied für die fertigungsgerechte Bauteilkonstruktion in einer ersten Annäherung berechnet werden (siehe auch Abschnitt 4.3.1.1).

$$\frac{l_{Fmax} - l_{\ddot{U}}}{l_{\ddot{U}}} * 100 \% \leq 0,71\% \quad (7-2)$$

l_F = Faserlaufängenunterschied; l_{Fmax} = maximale Faserlaufänge im Übergangsbereich; $l_{\ddot{U}}$ = Übergangslänge

Materialeinsatzquote

Beim Materialverschnitt kann grundsätzlich zwischen drei konstruktiven Szenarien unterschieden werden:

- Ist (beispielsweise aus Bauraumgründen) lediglich eine lokale Halbzeugumformung erforderlich, so entsteht kein Materialverschnitt (siehe Abb. 7-2 links). Die Querschnittsgeometrie des Halbzeugs entspricht in weiten Teilen bereits der Zielgeometrie des Hohlprofilbauteils.
- Für einen geringen Materialverschnitt wird nach der Halbzeugumformung nur der Abdichtbereich entfernt (siehe Abb. 7-2 Mitte). Der Endquerschnitt des Hohlprofilbauteils und die Querschnittsgeometrie des Halbzeugs sind somit ident.
- Muss für die Geometrie des Hohlprofilbauteils im Anschluss an die Halbzeugumformung sowohl der Abdicht- als auch der Übergangsbereich entfernt werden, so ist der Materialverschnitt am größten (siehe Abb. 7-2 rechts). Die Materialeinsatzquote wird dann im Wesentlichen durch die Übergangslänge ($l_{\ddot{U}}$) definiert (vergleiche Abschnitt 4.3.1).

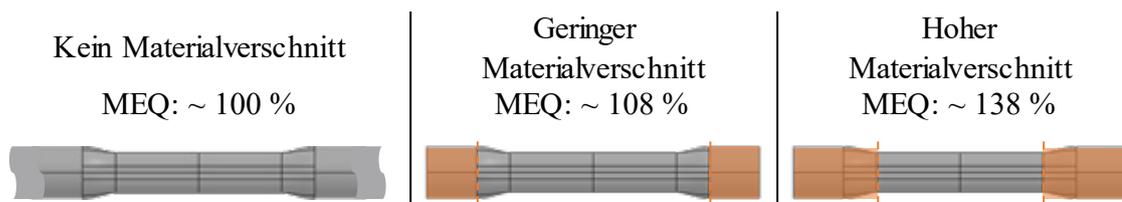


Abb. 7-2: Materialeinsatzquote in Abhängigkeit des Materialverschnitts

Oranger Bereich: Materialverschnitt. Die Angaben zur Materialeinsatzquote (MEQ) stellen eine beispielhafte Abschätzung dar (Länge Hohlprofilbauteil: 1000 mm, Länge Abdichtbereich: 40 mm, Übergangslänge: 100 mm).

Die richtige Wahl des Halbzeugs (z. B. Querschnittsgeometrie, Abmaße) und die Fokussierung der Bauteilkonstruktion auf eine minimale Materialeinsatzquote tragen durch die Vermeidung von Halbzeug- bzw. Materialverschnitt entscheidend zur Kostenreduktion bei. Ein minimaler Abdichtbereich trägt ebenfalls zur Kostensenkung bei (siehe Dichtstempel in Abschnitt 4.1.2.2.).

Entformungsschrägen

Entformungsschrägen von mindestens $1,5^\circ$ an den Bauteilflanken halten die Reibungskräfte zwischen Hohlprofilbauteil und Werkzeugkavität gering und ermöglichen dadurch ein prozesssicheres Entformen. Während der Halbzeugumformung folgt aus der Druckbeaufschlagung des Blasschlauchs eine homogene Druckverteilung. Nicht berücksichtigt werden muss daher der beim Thermoformen von flächigen Halbzeugen auftretende Abfall des Formwerkzeug-Schließdrucks im Bereich der Entformungsschrägen.

Anrisslinien

Für die der Halbzeugumformung nachgelagerten Prozessschritte (z. B. Endbearbeitung, Funktionalisierung, Fügen etc.) wird empfohlen, am Hohlprofilbauteil Anrisslinien konstruktiv zu berücksichtigen. Die Anrisslinien sind 0,2 mm tief und 0,2 mm breit auszuführen. Anrisslinien für die Endbearbeitung sollten um 0,5 mm in den Verschnittbereich versetzt werden. Aufgrund der Inhomogenität des Halbzeugs kann die bauteilspezifische Ausprägung der Anrisslinien variieren. [164]

7.1.2 Lokale Verstärkung des Hohlprofilbauteils

Die Erweiterung des konzeptionierten FuHo-Verfahrens um einen weiteren Prozessschritt ermöglicht die Variation der Wandstärke, der Faserart sowie des Lagenaufbaus über die Länge des Hohlprofilbauteils hinweg. Kernelement der lokalen Hohlprofilverstärkung (LHV) ist ein hohlprofilförmiges Sekundärhalbzeug aus endlosfaserverstärktem thermoplastischem Kunststoff (siehe Abb. 7-3). Das Sekundärhalbzeug wird entweder in das Primärhalbzeug eingeführt oder auf das Primärhalbzeug aufgeschoben (siehe Abb. 7-3), wobei die Querschnittsgeometrie beider Halbzeuge identisch ist. Wird das Sekundärhalbzeug aufgeschoben und das Primärhalbzeug weist beispielsweise einen Kreisquerschnitt auf, so entspricht der Innendurchmesser des Sekundärhalbzeugs dem Außendurchmesser des Halbzeugs. Anschließend wird der Blasschlauch ins Halbzeuginnere eingebracht und die beiden Enden des Primärhalbzeugs werden abgedichtet. Eine arealspezifische Regelung der Infraroterwärmung ermöglicht trotz der lokalen Wandstärkenunterschiede eine weitestgehend homogene Erwärmung (siehe Abschnitt 4.2.2). Für die Umformung weist die Werkzeugkavität des Formwerkzeugs eine lokale Aussparung auf, deren Tiefe der Wandstärke des Sekundärhalbzeugs entspricht. Durch die Erwärmung der beiden Halbzeuge auf die Matrix-Schmelztemperatur und die anschließende Konsolidierung bei der Halbzeugumformung (Umformdruckbeaufschlagung) wird eine stoffschlüssige Verbindung sichergestellt. Voraussetzung dafür ist die Verwendung von artgleichen bzw. artverwandten Matrixpolymeren bei Sekundär- und Primärhalbzeug. [141]

Dank der lokalen Hohlprofilverstärkung ergeben sich bei der Bauteilkonstruktion folgende Optionen:

- Erhöhung der Bauteilwandstärke in Bereichen mit hoher Bauteilbelastung (z. B. Krafteinleitung, Knotenpunkte etc.)
- Variation der Faserart zur Kostenoptimierung (z. B. Primärhalbzeug: Glasfaser, Sekundärhalbzeug: Kohlenstofffaser)
- Belastungsgerechte Variation des Lagenaufbaus
- Belastungs- und gewichtsoptimierte Strukturbionik beim Sekundärhalbzeug
- Baukasten zur modularen Gestaltung von Hohlprofilbauteilen (z. B. gleichbleibende Grundgeometrie des Hohlprofilbauteils und Verwendung eines Sekundärhalbzeugs in Abhängigkeit vom Fahrzeugderivat)

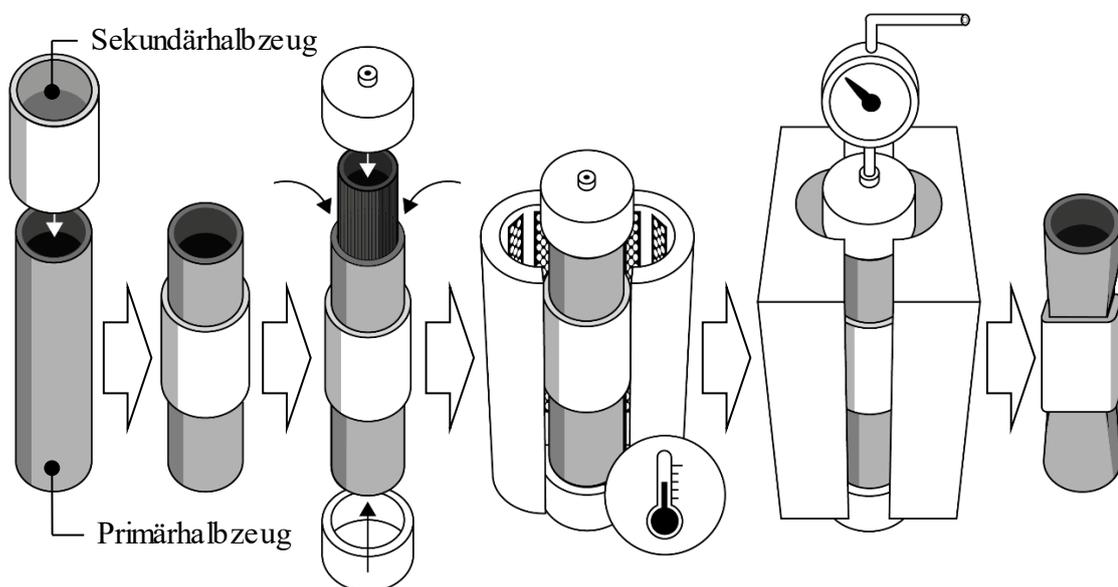


Abb. 7-3: Schematische Darstellung des erweiterten FuHo-Verfahrens zur Herstellung von Hohlprofilbauteilen mit lokaler Verstärkung nach [141]

Mithilfe experimenteller Grundsatzuntersuchungen wurde das Geometriemerkmal der lokalen Hohlprofilverstärkung (siehe Abschnitt 5.1.1) und dessen prozesstechnische Machbarkeit nachgewiesen. Abb. 7-4 zeigt das dafür konstruierte Hohlprofilbauteil WZ 09.7. Die Breite des rechteckigen Querschnitts beträgt 80,00 mm, seine Höhe 59,70 mm. Aus der Übergangslänge von 50 mm resultiert ein Faserlaufängenunterschied von 0,51 %. Das Hohlprofilbauteil weist primär einen Außenradius von 20,00 mm auf. Im Bereich der lokalen Verstärkung wird der Außenradius des Hohlprofilbauteils durch die Wandstärke des Sekundärhalbzeugs bestimmt.

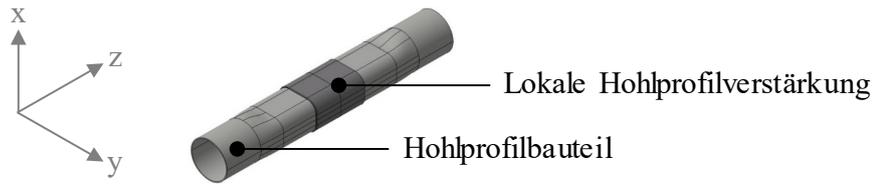


Abb. 7-4: Hohlprofilbauteil WZ 09.7

Die Sekundärhalbzeuge (Lagenaufbau: $\pm 45^\circ$, Innendurchmesser: 78 mm, Wandstärke: ca. 1,2 mm, Länge: 100 mm) wurden im Automated-Fiber-Placement-Verfahren hergestellt. Für eine optimale, stoffschlüssige Verbindung zwischen Primär- und Sekundärhalbzeug kam für beide Halbzeuge das gleiche PA6-CF bzw. PA6-GF Tape zum Einsatz (Datenblatt siehe Anhang, Abb. A-1 und Abb. A-2). Das Primärhalbzeug basiert auf den bereits in Kapitel 5 verwendeten hohlprofilförmigen Halbzeugen aus PA6-CF und PA6-GF (Details siehe Abschnitt 5.2.1.1). In Abb. 7-5 ist exemplarisch ein Hohlprofilbauteil mit lokaler Verstärkung dargestellt.

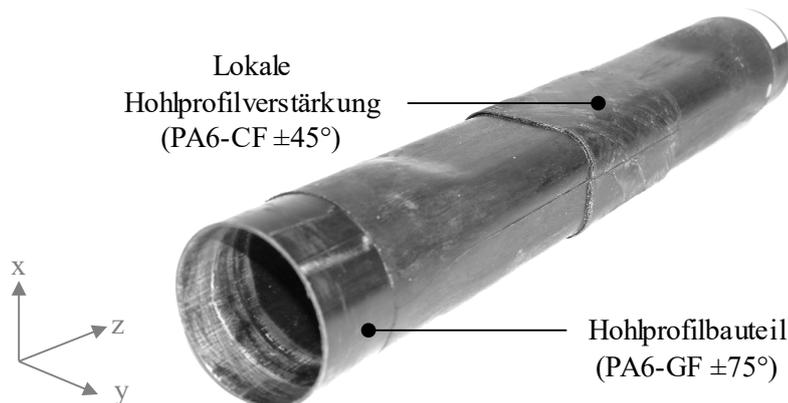


Abb. 7-5: Hohlprofilbauteil WZ 09.7 mit lokaler Hohlprofilverstärkung
 p_U : 50 bar, T_{WZ} = 135 °C, T_O : 300 °C, t_{IR} = 40 s, t_U = 14 s, t_A = 20 s.

7.1.3 Funktionalisierung des Hohlprofilbauteils

Zu Beginn werden die Richtlinien für das im Rahmen dieser Arbeit erarbeitete Kräfteinleitungselement aufgezeigt. Abschnitt 7.1.3.2 widmet sich anschließend weiteren Möglichkeiten zur Bauteilfunktionalisierung.

7.1.3.1 Kräfteinleitungselement

Folgende konstruktiven Richtlinien sind für das zweiteilige Kräfteinleitungselement – bestehend aus Kugelverbindungselement sowie Clipselement (siehe Abschnitt 4.4.2) – und das zu funktionalisierende Hohlprofilbauteil zu beachten.

Hohlprofilbauteil

Zum Ultraschallschweißen des Kugelverbindungselements muss das Hohlprofilbauteil eine plane Fügefläche aufweisen. Der Durchmesser der Fügefläche sollte mindestens dem Durchmesser des Kugelverbindungselements entsprechen. Für eine verbesserte Positioniergenauigkeit wird eine Fügefläche mit Anrisslinien bzw. Anrisskreuz empfohlen (siehe Anrisslinien in Abschnitt 7.1.1).

Kugelverbindungselement

Zur Sicherstellung einer optimalen Grenzflächenhaftung sollte das Material des Kugelverbindungselements artgleich oder zumindest artverwandt mit dem Matrixpolymer des Hohlprofilbauteils sein. Um ein formschlüssiges Verrasten des Clipselements reproduzierbar sicherzustellen, ist folgendes Verhältnis (Ω_K) einzuhalten:

$$\Omega_K = \frac{D_K}{h_K} = 1,114 \quad (7-3)$$

Ω_K = Durchmesser-Höhenverhältnis; D_K = Durchmesser des Kugelverbindungselements; h_K = Resthöhe des Kugelverbindungselements nach dem Schweißprozess

Der Toleranzwert für die Resthöhe des Kugelverbindungselements nach dem Schweißprozess ist in Abhängigkeit vom Durchmesser des Kugelverbindungselements festzulegen. Bei einem Durchmesser (D_K) von 6,35 mm ist beispielsweise eine Resthöhe (h_K) von $5,7 \pm 0,2$ mm einzuhalten.

Die kreisförmige Schweiß- bzw. Fügefläche lässt sich näherungsweise wie folgt berechnen:

$$A_K = \frac{\pi \cdot D_K^2}{4} - \pi \cdot \left(h_K - \frac{D_K}{2} \right)^2 \quad (7-4)$$

A_K = Fügefläche; D_K = Durchmesser des Kugelverbindungselements;
 h_K = Resthöhe des Kugelverbindungselements nach dem Schweißprozess

Mit der rechnerisch ermittelbaren Schweißfläche und der experimentell zu bestimmenden Schweißnahtfestigkeit lässt sich die Bruchkraft des Krafteinleitungselements im Kopfzugversuch berechnen. Für die Funktionsfähigkeit des Krafteinleitungselements muss die Abziehkraft des Clipselements kleiner als die ermittelte Bruchkraft sein. Kugelverbindungselemente mit einem Durchmesser von über 20 mm werden aufgrund des damit einhergehenden Bauraumbedarfs und des Gewichts als nicht sinnvoll erachtet. Für eine ausreichend große Schweißfläche bzw. Bruchkraft sollte der minimale Durchmesser des Kugelverbindungselements 5 mm nicht unterschreiten.

Clipelement

Entscheidend für die Charakteristika des Clipelements sind die konstruktive Gestaltung der formschlüssigen Rastelemente (Schnappverbindung) und die Materialauswahl. Durch den modularen Aufbau des zweiteiligen Krafteinleitungselements kann die Materialauswahl – thermoplastischer Kunststoff, Elastomer oder Metall – unabhängig vom Kugelverbindungselement erfolgen.

Clipelemente aus Elastomeren ermöglichen durch die Dämpfungswirkung des Materials eine gute Schwingungsentkoppelung zwischen Clip- und Kugelverbindungselement bzw. Hohlprofilbauteil. Das elastische Materialverhalten führt jedoch zu einer geringen Abziehkraft (siehe Abschnitte 4.4.2 und 6.1). Thermoplastische Kunststoffe eignen sich zur kostengünstigen Herstellung von Clipelementen im Spritzgießverfahren. Bei der Materialauswahl sind die zulässige Dehnung, der Belastungsfall sowie die Abhängigkeit der Werkstoffeigenschaften von Zeit und Temperatur (Relaxation und Retardation) zu beachten [76].

Aus der Konstruktion resultiert die Kontaktart zwischen Clip- und Kugelverbindungselement, wobei sich gemäß Abb. 7-6 zwischen einem linienförmigen, punktförmigen und flächigen Kontakt unterscheiden lässt. Diese zuletzt genannte Kontaktart entsteht bei einer Kugelschnappverbindung (= Kugelgelenkverbindung, siehe Abb. 7-6 rechts), deren konstruktive Optimierung hinsichtlich der Montage- und Abziehkraft in [165] beschrieben wird. Für alle Verrastungsformen gleichermaßen gilt, dass beim Setzen des Clipelements die Rastelemente elastisch verformt bzw. ausgelenkt werden müssen, um die Äquatorebene des Kugelverbindungselements zu „überdrücken“ (siehe Abb. 4-15).

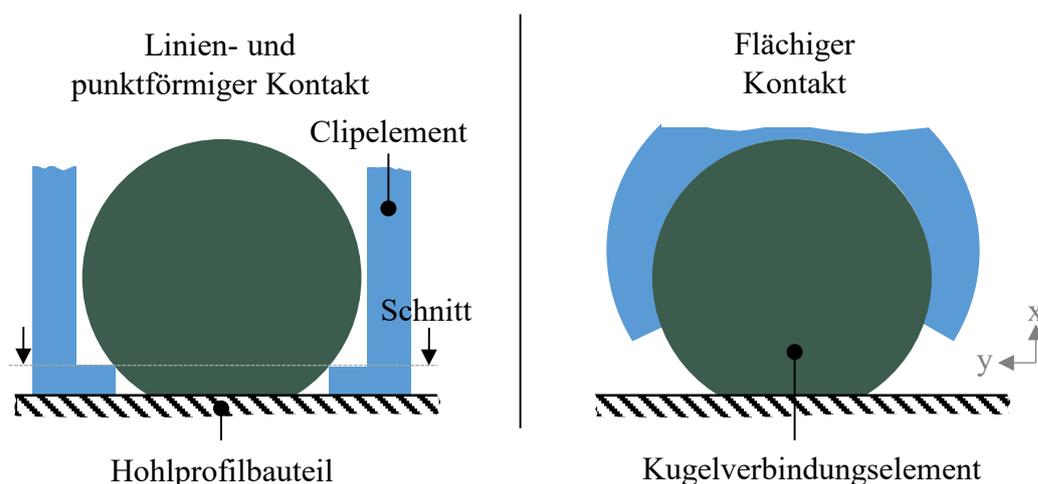


Abb. 7-6: Einteilung der Schnappverbindungen zwischen Clip- und Kugelverbindungselement anhand der Kontaktart

Links: Linien- und punktförmiger Kontakt. Rechts: Flächiger Kontakt.

Die in Abb. 7-6 links schematisch dargestellte linien- und punktförmige Kontaktart lässt sich wiederum in drei Konstruktionsklassen kategorisieren. Eine Ringschnappverbindung zeichnet sich durch ein umlaufendes, ringförmiges Rastelement aus [76]. Sie weist somit den maximalen Formschluss auf (siehe Abb. 7-7 links). Um bei einem Clipelement mit Ringschnappverbindung zu hohe Montagekräfte, insbesondere beim manuellen Setzen, zu vermeiden, stehen als Material lediglich Kunststoffe mit einer hohen Elastizität oder Elastomere zur Auswahl.

Verglichen mit der Ringschnappverbindung verfügt die geschlitzte Ringschnappverbindung über einen geringeren Formschluss (siehe Abb. 7-7 Mitte). Durch die segmentartigen Rastelemente ist eine hohe geometrische Steifigkeit und eine hohe Materialsteifigkeit (E-Modul) bei gleichzeitig geringer Montagekraft konstruktiv realisierbar. Das Clipelement kann in Kunststoff oder in einem metallischen Werkstoff ausgeführt werden. In Abb. 4-15 und Abb. 6-1 ist die konstruktive Umsetzung eines solchen Clipelements beispielhaft dargestellt.

Wird das Krafteinleitungselement zur Befestigung von Montagekomponenten herangezogen, so sind für eine exakte räumliche Positionierung mindestens 2 bis 3 Krafteinleitungselemente erforderlich. Zur Kompensation möglicher Fertigungstoleranzen sollte dabei mindestens eine Schnappverbindung einen Toleranzausgleich ermöglichen. Daraus leitet sich jedoch ein lediglich punktueller Kontakt zwischen Clip- und Kugelverbindungselement ab, der zu geringen Abziehkräften führt (siehe Abb. 7-7 rechts).

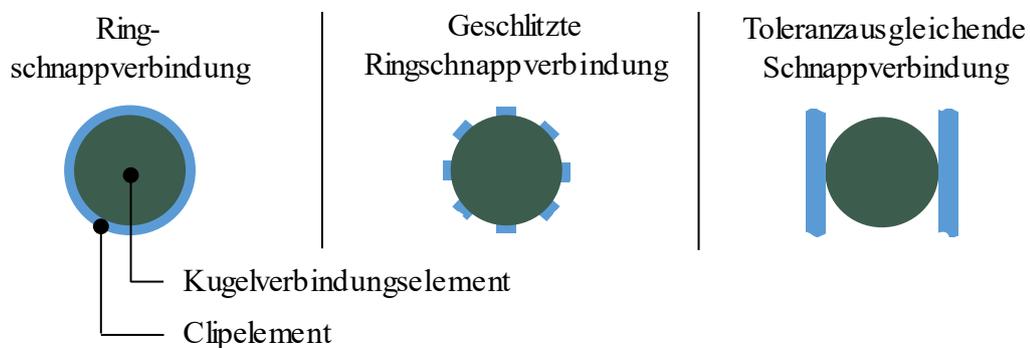


Abb. 7-7: Schnappverbindungen mit linien- und punktförmigem Kontakt
Schematische Schnittdarstellung gemäß Abb. 7-6.

Analytische Formeln und Berechnungsprogramme ermöglichen eine Abschätzung der Montage- und Abziehkraft für Ring- und Kugelschnappverbindungen [76, 166, 167]. Eine genaue Vorhersage der Beanspruchung sowie der Montage- und Abziehkraft ist, insbesondere bei der geschlitzten Ringschnappverbindung, nur numerisch (FEM) möglich [76].

7.1.3.2 Weitere Funktionalisierungsmöglichkeiten

Die nachstehend aufgeführten Verfahrensansätze zielen auf eine Integration der Bauteilfunktionalisierung in das bereits konzeptionierte FuHo-Verfahren ab (siehe Abschnitt 3.2). Dadurch kann sowohl beim One-Shot-Onsert als auch beim One-Shot-Spritzgießen ein zusätzlicher Prozessschritt vermieden werden.

One-Shot-Onsert

Für die Aufbringung eines thermoplastischen oder metallischen Onserts sind, ausgehend vom bestehenden FuHo-Verfahren, vor der Umformung folgende Anpassungen erforderlich [168]:

- Einlegen des Onserts in die dafür entsprechend vorgesehene Aussparung im Formwerkzeug bzw. in der Werkzeugkavität (siehe Abb. 7-8 links). Bei einem Onsert aus Metall ist eine Oberflächenvorbehandlung (Oberflächenstrukturierung) der Fügefläche vorzunehmen. Für ein Onsert aus thermoplastischem Kunststoff ist dies nicht erforderlich.
- Thermoplastisches Onsert: Erwärmung der Fügefläche auf Schmelztemperatur (z. B. mittels Infrarot Erwärmung, siehe Abschnitt 4.2.1).
Metallisches Onsert: optionale Erwärmung der Fügefläche, beispielsweise mittels Infrarot- oder Induktionserwärmung (siehe Abschnitt 4.2.1).

Beim Umformen wird das Halbzeug in die Werkzeugkavität drapiert. Gleichzeitig findet dadurch die Anbindung des zuvor in die Werkzeugkavität eingelegten Onserts statt. Aus der Oberflächenvorbehandlung resultiert bei metallischen Onserts eine formschlüssige Verbindung zwischen Krafteinleitungselement und Hohlprofilbauteil. Konstruktiv ist die unterschiedliche Wärmeausdehnung von Metall und Halbzeug sowie die Korrosionsgefahr bei einem Halbzeug mit Kohlenstofffasern einzubeziehen. Onserts aus thermoplastischem Kunststoff sind nach der Umformung stoffschlüssig mit dem Hohlprofilbauteil verbunden bzw. verschweißt. Voraussetzung dafür ist ein Onsert aus einem (mit dem Halbzeug) artgleichen oder zumindest artverwandten Polymer.

One-Shot-Spritzgießen

Auf Basis des FuHo-Verfahrens findet beim One-Shot-Spritzgießen die Funktionalisierung unmittelbar nach der vollständigen Drapierung des Halbzeugs in die Werkzeugkavität statt (siehe Abb. 7-8 rechts). Ein Kollabieren des Halbzeugs bzw. Hohlprofilbauteils infolge des Einspritzdrucks wird durch die Umformdruckbeaufschlagung des Blasschlauchs vermieden [68, 169]. Dazu kann der im Blasschlauch vorherrschende Umform- bzw. Stützdruck (nach der Halbzeugumformung) für die Phase des Anspritzens erhöht werden. Das bei einem partikelbasierten Stützsystem (z. B. Sand) erforderliche Befüllen und Entleeren des Hohlprofilbauteils entfällt beim One-Shot-Spritzgießen (siehe Abschnitt 2.3) [71, 72].

Ferner wird durch den Entfall eines partikelbasierten Stützsystems die Verunreinigung des Hohlprofilbauteils vermieden. Zur Struktur- und Funktionsintegration des Hohlprofilbauteils mittels One-Shot-Spritzgießen sind konstruktiv folgende Randbedingungen zu beachten:

- Für die optimale Grenzflächenhaftung muss das thermoplastische Spritzgussgranulat artgleich oder zumindest artverwandt mit dem Matrixpolymer des Hohlprofilbauteils sein. Dadurch wird auch ein ähnliches Belastungs- und Versagenserhalten der Materialien bei der Klimawechselbelastung sichergestellt.
- Um einen Verzug des Hohlprofilbauteils zu vermeiden, sollte der Ausdehnungskoeffizient des Spritzgussgranulats möglichst identisch mit jenem des Halbzeugs sein. Dies ist durch eine Faserverstärkung der Spritzgusskomponente möglich, wobei der Fasergehalt 40 Masseprozent nicht überschreiten sollte, da dies die Verarbeitbarkeit und Schlagzähigkeit negativ beeinflusst [164]. Des Weiteren wird ein Bauteilverzug durch das Unterlassen großflächiger Anspritzbereiche umgangen.
- Eine Umsäumungskontur analog dem „SpriForm“-Verfahren ist nicht möglich, da beide Enden des Hohlprofilbauteils über die Dichtstempel abgedichtet sind und die Endbearbeitung erst im nachgelagerten Prozessschritt stattfindet (siehe Abschnitt 3.2.1). Zudem ist eine Umsäumungskontur nur bei einem beidseitigen Formwerkzeug möglich.
- Grundlegende Konstruktionsregeln für das Spritzgießverfahren (z. B. Rippenwandstärke, Wandstärkensprünge, Entformungsschräge etc.) sind unter anderem folgendem Schrifttum [170–172] zu entnehmen.

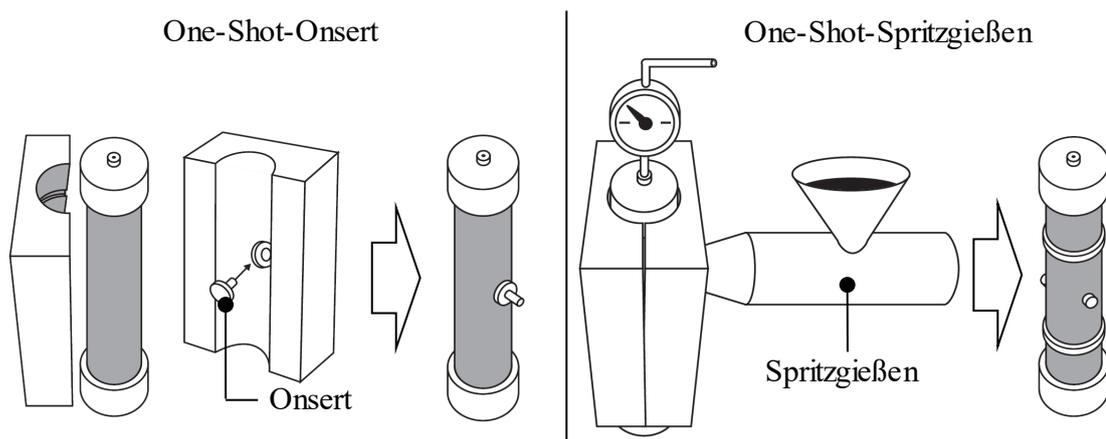


Abb. 7-8: Schematische Darstellung des erweiterten FuHo-Verfahrens zur One-Shot-Funktionalisierung von Hohlprofilbauteilen nach [168, 169]
Links: One-Shot-Onsert. Rechts: One-Shot-Spritzgießen.

7.2 Formwerkzeug und Blasschlauch

Die in Abschnitt 7.1 beschriebene Konstruktion des Hohlprofilbauteils steht in engem Zusammenhang mit dem Formwerkzeug. Abschnitt 7.2.1 befasst sich daher mit den konstruktiven Randbedingungen des Formwerkzeugs. Neben dem Formwerkzeug spielt der Blasschlauch eine entscheidende Rolle bei der Halbzeugumformung. Dessen Charakteristika werden in Abschnitt 7.2.2 betrachtet.

7.2.1 Formwerkzeug

Aus den experimentellen Untersuchungen und Ergebnissen zur Umformung hohlprofilförmiger Halbzeuge sind für das Formwerkzeug folgende Richtlinien ableitbar.

Breite der Werkzeugkavität

Im Falle eines zweiteiligen Formwerkzeugs muss die Breite der Werkzeugkavität in der Werkzeugtrennebene mindestens der Breite des Halbzeugs entsprechen (vergleiche Abb. 7-9). Bei einem hohlprofilförmigen Halbzeug mit Kreisquerschnitt bedarf es also einer Breite, die mindestens dem Außendurchmesser (D_H) entspricht. Andernfalls wäre eine Quetschung des Halbzeugs zwischen den beiden Formwerkzeughälften unvermeidlich.

Tauchkante

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein zweiteiliges Formwerkzeug konzeptioniert, welches die Vorteile eines Abquetsch- und eines Tauchkantenwerkzeugs miteinander kombiniert (siehe Abschnitt 4.3.1). Dank dieses Formwerkzeugs wird zum einen die Umfangsgleichheit des Hohlprofilbauteils sichergestellt (siehe Abschnitt 7.1.1) und zum anderen der Quetschgrat weitestgehend ausgeschlossen [133]. Letzterer wird durch eine Tauchkante vermieden, wobei das Schwert des Oberteils gemäß Abb. 7-9 in die Tasche des Unterteils eintaucht, um die Werkzeugkavität frühzeitig zu schließen. Die rasche Abnutzung der konstruktiv entstehenden Messerkante ist zu vermeiden, indem das Formwerkzeug, zumindest in diesem Bereich, in gehärtetem Stahl ausgeführt wird. Der in Abb. 7-9 ersichtliche Spalt zwischen Messerkante und Tasche wird vor allem von der Genauigkeit der verwendeten Schließenheit bestimmt. Er ist auf ein Minimum zu reduzieren, da andernfalls das in diesem Bereich ausbauchende Halbzeug während des Schließvorgangs in den Spalt eingezogen wird.

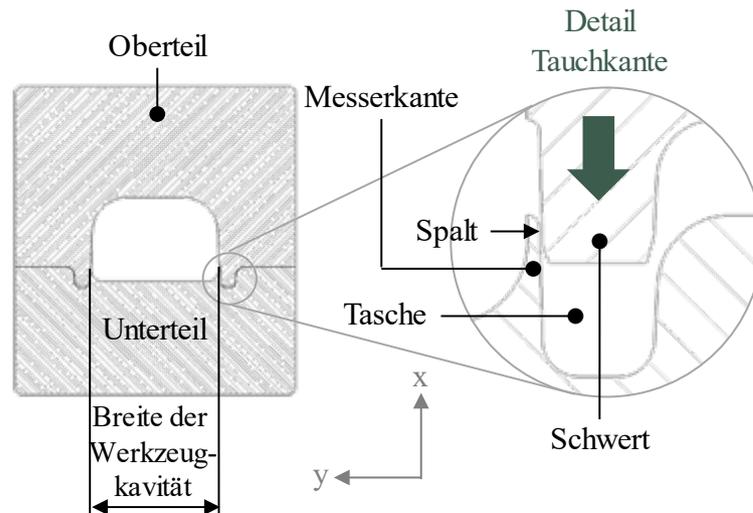


Abb. 7-9: Breite der Werkzeugkavität und Tauchkante eines zweiteiligen Formwerkzeugs

Werkstoff und Temperierung

Zweckmäßigerweise wird das Formwerkzeug aus härtbarem Stahl hergestellt. Die hohe Wärmeleitfähigkeit des metallischen Werkstoffs erlaubt eine präzise Temperierung des Formwerkzeugs und ermöglicht eine rasche Wärmeabfuhr aus dem umgeformten Halbzeug [173]. Ober- und Unterteil des Formwerkzeugs müssen mit einem Fluid variotherm temperiert werden, um bei geringer Durchlaufzeit reproduzierbar hohe Aufheiz- und Abkühlraten zu gewährleisten [155]. Zur Erzielung glatter Bauteiloberflächen und eine verbesserte Entformbarkeit kann die Werkzeugkavität poliert werden [174].

Mehrteiligkeit

In Abhängigkeit von der Bauteilkonstruktion ist der Einsatz eines mehrteiligen Formwerkzeugs erforderlich. Dies ist insbesondere bei Hohlprofilbauteilen mit Hinterschneidungen der Fall, die den Einsatz von Schiebern bedingen. Erfordern die konstruktiven Rahmenbedingungen ein Hohlprofilbauteil, dessen Breite nicht mindestens der Halbzeugbreite entspricht, so kann die Breite der Werkzeugkavität (in der Werkzeugtrennebene) mit einem mehrteiligen Formwerkzeug reduziert werden. Die Bewegung der Schieber kann mechanisch, hydraulisch oder pneumatisch erfolgen. Für die Dimensionierung sind die Schieberfläche und der Umformdruck (= Auftreibkraft) entscheidend [175]. Mit der erhöhten Komplexität des Formwerkzeugs gehen gegenüber einem zweiteiligen Formwerkzeug, steigenden Herstellkosten einher (z. B. für Schieber und Temperierung).

7.2.2 Blasschlauch

Im Hinblick auf den Blasschlauch sind für eine Halbzeugumformung folgende Randbedingungen von Belang.

Abmessung

Bezogen auf die Querschnittsgeometrie des Halbzeugs kann der Blasschlauch grundsätzlich drei verschiedene Abmessungen aufweisen [176]: Untermaß, exaktes Maß oder Übermaß. Für das FuHo-Verfahren erwiesen sich insbesondere Blasschläuche mit Untermaß als geeignet (siehe Abschnitt 4.1.2.1). Anderenfalls wird dem Halbzeug während des Erwärmungsvorgangs durch den anliegenden Blasschlauch Wärme entzogen. Darüber hinaus erleichtert das Untermaß das Einbringen des Blasschlauchs in das Halbzeug und die Entformung aus dem Hohlprofilbauteil. Durch die nachträgliche Entformung des Blasschlauchs kann dieser wiederverwendet werden (siehe auch Abschnitte Werkstoff und Wandstärke). Zudem wird zusätzliches Bauteilgewicht vermieden. Der Blasschlauch muss aufgrund des Untermaßes ein hochelastisches Verhalten aufweisen, da anderenfalls bei der Druckbeaufschlagung keine Halbzeugumformung möglich ist.

Werkstoff

Aus der Prozesstechnik resultieren hohe Dehnungsanforderungen (Untermaß) an den Blasschlauch, weshalb als Werkstoff Elastomere einzusetzen sind. Darüber hinaus muss der Blasschlauch eine Temperaturbeständigkeit aufweisen, die mindestens der Matrix-Schmelztemperatur des Halbzeugs entspricht. Für eine Wiederverwendbarkeit des (Mehrweg-)Blasschlauchs ist eine hohe Robustheit erforderlich. Daher werden für eine Großserienanwendung Blasschläuche aus Silikon empfohlen, die mit konstantem Querschnitt und gleichbleibender Wandstärke als extrudiertes Halbzeug zu beziehen sind. Für die Prototypen- und Kleinserienfertigung eignen sich vulkanisierte, aus Elastomerfolien hergestellte Blasschläuche. [176]

Querschnittsgeometrie

Die Querschnittsgeometrie des Blasschlauchs wird im Wesentlichen von der Querschnittsgeometrie des Halbzeugs bestimmt. Weist der Querschnitt des Halbzeugs ein gleichmäßiges Verhältnis von Höhe zu Breite auf (z. B. Kreisquerschnitt, quadratischer Querschnitt etc.), darf gemäß Abb. 7-10 ein Blasschlauch mit Kreisquerschnitt verwendet werden. Bei einem Querschnitt mit hohem Seitenverhältnis (z. B. flacher Rechtecksquerschnitt) kann hingegen kein Blasschlauch mit Kreisquerschnitt zur Anwendung kommen, da dieser bei der Druckbeaufschlagung zu hohen Dehnungen ausgesetzt wäre. In diesem Fall ist der Blasschlauch mit Untermaß an die Querschnittsgeometrie des Halbzeugs zu adaptieren (siehe Abb. 7-10 rechts).

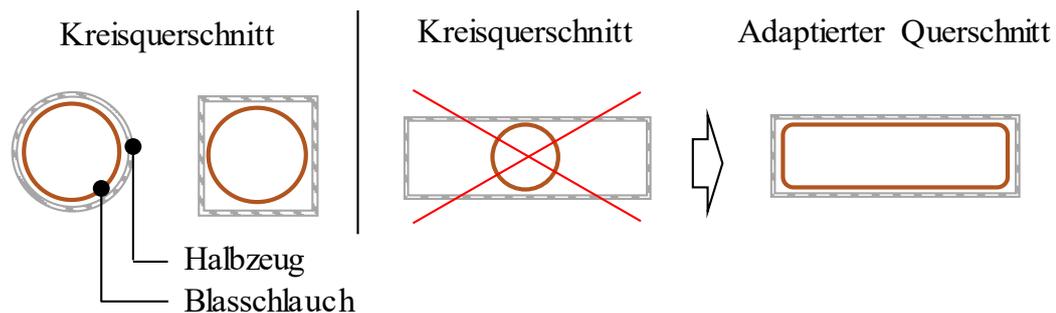


Abb. 7-10: Querschnittsgeometrie des Blasschlauchs in Abhängigkeit vom Halbzeug.

Wandstärke

Folgende drei Kriterien sind nach einer Werkstoff- und Querschnittsauswahl bei der Festlegung der Wandstärke zu beachten:

- Die Dehnung bei maximalem Umformdruck darf nicht zum Bersten führen.
- Der minimale Außen- (R_a) und Innenradius (R_i) des Hohlprofilbauteils muss ausformbar sein.
- Wandstärken unter 1,5 mm sind aufgrund der Robustheitsanforderungen (Mehrweg-Blasschlauch) zu vermeiden.

Variierende Elastizität

Lokal variierenden Elastizitätseigenschaften ermöglichen bei der Umformdruckbeaufschlagung das Dehnungsverhalten des Blasschlauchs gezielt zu beeinflussen. Abb. 7-11 zeigt schematisch einen solchen Blasschlauch mit unterschiedlicher Elastizität (z. B. E1 bis E3) in der Längsrichtung. In weiterer Folge ließe sich dadurch die Drapierung des Halbzeugs gezielt steuern. Entgegen dem herkömmlichen Umformverhalten (Blasschlauch mit konstanten Elastizitätseigenschaften) wäre eine bauteilspezifische Ausformung von Bauteilradien und Geometriemerkmale (z. B. Nut) bereits zu Beginn der Halbzeugumformung möglich. Daraus resultieren wiederum geringere Drapierwege und gleichmäßigere Wandstärkenverläufe (siehe Abschnitte 5.3.1.1 und 5.3.1.4). Verglichen mit einem handelsüblichen Blasschlauch ist durch das komplexere Herstellungsverfahren mit Mehrkosten zu rechnen.

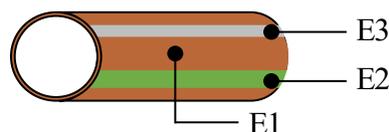


Abb. 7-11: Schematische Darstellung eines Blasschlauchs mit lokal unterschiedlichen Elastizitätseigenschaften (z. B. E1 bis E3)

7.3 Prozess- und Produktionsgestaltung

Nachdem sich die beiden vorhergehenden Abschnitte mit der werkstoff- und fertigungsgerechten Gestaltung von Hohlprofilbauteil, Formwerkzeug und Blasschlauch befassten, widmet sich dieser Abschnitt zunächst den Prozessparametern des FuHo-Verfahrens (siehe Abschnitt 7.3.1). Den Abschluss von Kapitel 7 bildet mit Abschnitt 7.3.2 das Konzept einer automatisierten Produktionszelle zur Fertigung funktionalisierter Hohlprofilbauteile.

7.3.1 Prozessparameter

Der Aufbau dieses Abschnitts orientiert sich mit Abdichtung, Erwärmung, Umformung und Funktionalisierung an den Prozessschritten des FuHo-Verfahrens (siehe Abschnitte 7.3.1.1 bis 7.3.1.4). Im Sinne der Allgemeingültigkeit sind die im Folgenden aufgeführten Richtlinien zur Festlegung der Prozessparameter teilweise rein qualitativ.

7.3.1.1 Abdichtung

Den experimentellen Untersuchungen zufolge wird die fluiddichte Abdichtung der Halbzeugenden im Wesentlichen durch den Prozessparameter *Verspannkraft der Dichtstempel* (F_V) definiert (siehe Abschnitt 4.1.2.2).

Zu geringe Verspannkraften führen bei der Umformdruckbeaufschlagung zum Entweichen des gasförmigen Fluids. Überhöhte Vorspannkraften bergen die Gefahr eines Balgversagens. Die maximale Verspannkraft wird maßgeblich vom Werkstoff und der Geometrie des Balgs bestimmt. Die Geometrie des Balgs wiederum folgt aus der Querschnittsgeometrie des Halbzeugs. Abb. 7-12 illustriert den annähernd linearen Zusammenhang zwischen Verspannkraft (F_V) und Radialkraft (F_R) für einen Balg aus EPDM und ein Halbzeug mit Kreisquerschnitt [114]. Durch die auftretende Radialkraft wird der Blasschlauch geweitet und fluiddicht an den Dichtstempel gekoppelt. Bei einem Umformdruck von 20 bar ist eine Verspannkraft von 2600 N für eine Fluiddichtigkeit ausreichend. Über ein Druckregelventil kann der während der Umformdruckdauer (t_U), auftretende Druckabfall von maximal 2 % kompensiert werden. Umformdrücke von 50 bar erfordern beim konzeptionierten Dichtstempelkonzept eine Verspannkraft von 3200 N. Verspannkraften über 3500 N führen im Dauerbetrieb zum Versagen des Balgs (siehe Abb. 7-12). Ein steigender Umformdruck geht demnach auch mit einem Anstieg des Prozessparameters Verspannkraft einher.

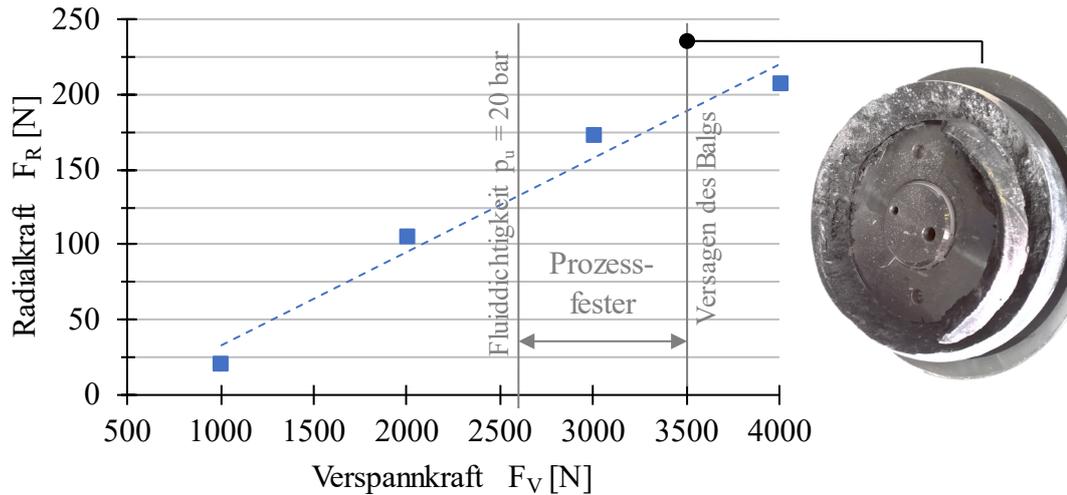


Abb. 7-12: Radialkraft des Balgs in Abhängigkeit von der Verspannkraft bei einem Halbzeug mit Kreisquerschnitt nach [114].

Balg-Ø: 66 mm (EPDM), Messpunkte: Mittelwert dreier radial (Ø 74,8 mm, 120°) angeordneter Kraftmessdosen, $n = 5$ je Messpunkt, Radialkraftmessung ohne Blasschlauch.

7.3.1.2 Erwärmung

Der einseitigen Erwärmung des Halbzeugs auf die matrixspezifische Umform- bzw. Schmelztemperatur kommt beim FuHo-Verfahren eine Schlüsselrolle zu. Dieser Prozessschritt hat, insbesondere bei zunehmenden Wandstärken des Halbzeugs, entscheidende Auswirkungen auf die Durchlaufzeit des FuHo-Verfahrens.

Eine Bestimmung des Prozessparameters *Erwärmungsdauer* (t_{TR}) – also jener Zeit, die zur Erreichung der Matrix-Schmelztemperatur auf der Halbzeuginnenseite (T_1) vonnöten ist – kann nur mittels praktischer Versuche oder numerischer Simulation erfolgen. Zwar existieren Modelle zum Aufheizverhalten von endlosfaserverstärkten thermoplastischen Kunststoffen bei Infrarot Erwärmung, diese vereinfachen jedoch zahlreiche Randbedingungen [124, 177–180]. Insbesondere die Verlustwärmeströme durch Konvektion, die variable Temperaturleitfähigkeit während der Erwärmungsdauer, Sekundärstrahlungseffekte und die Vorgänge an der Halbzeugoberfläche beeinflussen das Ergebnis [54]. Erschwerend kommt hinzu, dass bei einer Fokussierung auf eine konstante Oberflächentemperatur des Halbzeugs (T_0) die Strahlerleistung aufgrund der Regelung sowohl in den einzelnen Zonen als auch über die Erwärmungsdauer hinweg variiert (siehe Abschnitt 5.2.3).

Die maximal mögliche (Ziel-)Oberflächentemperatur (T_0) leitet sich aus der Zersetzungstemperatur des Matrixpolymers ab. In Kombination mit experimentellen Grundsatzuntersuchungen zum Erwärmungsverhalten lässt sich der vom Halbzeug absorbierte Wärmestrom wie folgt berechnen [124]:

$$\dot{q}_H = \frac{\lambda_H \cdot (T_O - T_B) \cdot \sqrt{\pi}}{2 \cdot \sqrt{\alpha_H \cdot t_{IR}}} \quad (7-5)$$

\dot{q}_H = Wärmestrom; T_O = Oberflächentemperatur des Halbzeugs; T_B = Oberflächentemperatur zur Beginn des Erwärmungsvorgangs; λ_H = Wärmeleitfähigkeit des Halbzeugs in Wandstärkenrichtung; α_H = Temperaturleitfähigkeit des Halbzeugs in Wandstärkenrichtung; t_{IR} = Erwärmungsdauer

Die Wärmeleitfähigkeit des Halbzeugs ist für unterschiedliche Temperaturniveaus im Labor zu bestimmen. Anschließend sind die entsprechenden Temperaturleitfähigkeiten analytisch berechenbar (siehe Abschnitt 5.2.1.1). Ist der Wärmestrom (\dot{q}_H) bekannt, kann nach [124] die Innenflächentemperatur des Halbzeugs (T_I) am Ende des Erwärmungsvorgangs mittels Gleichung 7-6 eruiert werden:

$$T_I = T_B - \frac{2 \cdot \dot{q}_o \cdot \sqrt{\alpha_H \cdot t_{IR}}}{\lambda_H} \cdot \left(z \cdot \operatorname{erfc}(z) - \frac{e^{-z^2}}{\sqrt{\pi}} \right) \quad (7-6)$$

mit

$$z = \frac{b_H}{2 \cdot \sqrt{\alpha_H \cdot t_{IR}}} \quad (7-7)$$

T_I = Innenflächentemperatur des Halbzeugs; $\operatorname{erfc}(z)$ = komplementäre Fehlerfunktion; b_H = Wandstärke des Halbzeugs

Setzt man Gleichung 7-5 in Gleichung 7-6 ein, so ergibt sich folgende Formel zur Berechnung der Innenflächentemperatur des Halbzeugs [124]:

$$T_I = T_B - (T_O - T_B) \cdot \sqrt{\pi} \cdot \left(z \cdot \operatorname{erfc}(z) - \frac{e^{-z^2}}{\sqrt{\pi}} \right) \quad (7-8)$$

Aufgrund der oben genannten Vereinfachungen weichen die mithilfe der Gleichungen 7-5 bis 7-8 berechneten Werte um 10 bis 20 % von den realen Messwerten ab [148]. Genauere Vorhersagen zu den Prozessparametern beim Erwärmungsvorgang sind mittels numerischer Strömungsmechanik (CFD) möglich. Abb. 7-13 zeigt beispielhaft die simulativ errechnete Oberflächentemperatur des Halbzeugs (rechts) und die freie Konvektion der Luft (links) beim Erwärmungsvorgang. Im Umfeld des hohlprofilförmigen Halbzeugs zeigt sich eine geringe freie Konvektion. Dies deutet darauf hin, dass bei der Konzeptionierung der Anlagentechnik dieser Effekt dank konstruktiver und regelungstechnischer Maßnahmen weitestgehend unterbunden werden kann (vgl. Abschnitte 4.2.2 und 5.2.2.1).

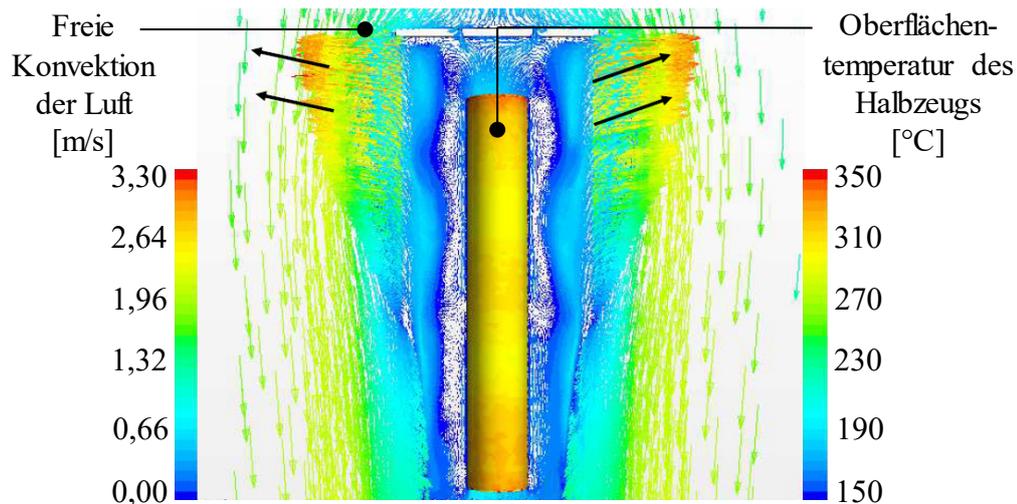


Abb. 7-13: CFD-Simulation der Infraroterwärmung nach [126]

Halbzeug: PA6-CF $\pm 75^\circ$, λ_H und α_H siehe Abschnitt 5.2.1.1, Oberflächenreflektivität: 5 %, $t_{IR} = 45$ Sekunden, Strahlertyp und Anordnung gemäß Abschnitt 4.2.2 und 5.2.2.1, Atmosphärendruck, Umgebungstemperatur: 25 °C.

7.3.1.3 Umformung

Für eine erste grundlegende Auslegung des FuHo-Verfahrens sind bei der Halbzeugumformung die Prozessparameter *Umformdruck*, *Formwerkzeugtemperatur*, *Abkühlrate* und *Schließgeschwindigkeit* hervorzuheben. Eine Optimierung dieser Parameter hat die Sicherstellung der erforderlichen Bauteilqualität und die Reduktion der Durchlaufzeit zum Ziel.

Umformdruck und Formwerkzeugtemperatur

Zur Bestimmung des optimalen Umformdrucks und der geeigneten Formwerkzeugtemperatur wurden im Rahmen dieser Arbeit zahlreiche experimentelle Untersuchungen durchgeführt (siehe Abschnitte 5.2 und 5.3). Abb. 7-14 verdeutlicht den Einfluss der Prozessparameter auf die Bauteilqualität (Zielgrößen gemäß Abb. 5-15) in Abhängigkeit vom Hohlprofilbauteil bzw. Komplexitätsgrad (siehe Abschnitt 5.1). Sind das Material des hohlprofilförmigen Halbzeugs und die Geometrie des Hohlprofilbauteils festgelegt, so kann anhand der Graphik eine erste Einschätzung von Umformdruck und Formwerkzeugtemperatur erfolgen.

Unabhängig von der Faserart erfordert der Komplexitätsgrad K1x (WZ 10.3 und WZ 13.6) gemäß Abb. 7-14 einen Umformdruck (p_u) von 50 bar und eine Formwerkzeugtemperatur (T_{WZ}) von 150 °C. Mit steigendem Komplexitätsgrad (K2x bzw. WZ 25.5) sinkt die benötigte Formwerkzeugtemperatur in Abhängigkeit von der Faserart auf 120 respektive 135 °C.

Für PA6-GF $\pm 75^\circ$ und PA6-GF $\pm 45^\circ$ bleibt der Umformdruck unbeeinflusst von Lagenaufbau bzw. Faserwinkel maximal ($p_u = 50$ bar). Bei Hohlprofilbauteilen aus PA6-CF $\pm 75^\circ$ ist hingegen ein Umformdruck von 20 bar zur Bauteilherstellung ausreichend (siehe Abb. 7-14).

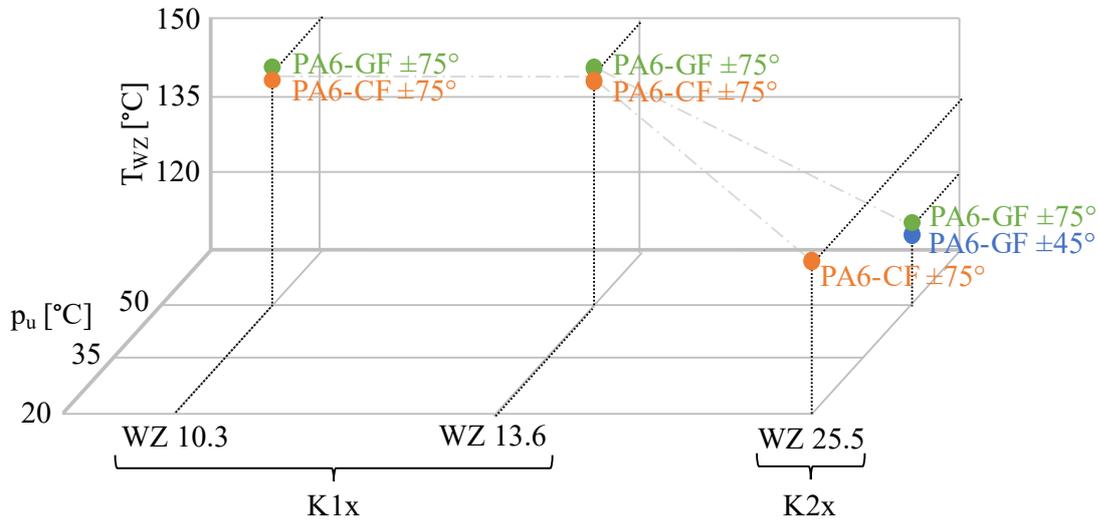


Abb. 7-14: Umformdruck und Formwerkzeugtemperatur bei der Halbzeugumformung in Abhängigkeit vom Komplexitätsgrad

Allgemein ist der festgelegte Umformdruck so schnell wie möglich aufzubauen, um das Halbzeug vollständig in die Werkzeugkavität zu drapieren und die Bauteilradien auszuformen. Andernfalls kühlt das Halbzeug zu stark ab. Der Umformdruck ist grundsätzlich so hoch wie prozesstechnisch nötig und so niedrig wie möglich zu wählen. Hohe Umformdrücke führen in Kombination mit großen Hohlprofilbauteilen (projizierte Fläche) zu steigenden Schließkräften und damit zu einem erhöhten Investbedarf bei der Anlagentechnik (siehe Abschnitt 3.1).

Abkühlrate

Die Abkühlrate hat einen entscheidenden Einfluss auf die Kristallinität eines teilkristallinen Matrixpolymers (z. B. PA6, PP, PPA etc.) und damit einhergehend auf den Bauteilverzug des Hohlprofilbauteils. Analog zum Erwärmungsvorgang wirkt sich die Abkühlgeschwindigkeit auch auf die Durchlaufzeit des FuHo-Verfahrens aus. Eine langsame Abkühlrate führt zu einem hohen Kristallisationsgrad, der wiederum eine steigende Schwindung des Matrixpolymers nach sich zieht. Findet die Abkühlung des Hohlprofilbauteils zu schnell statt, sinkt zwar der Kristallisationsgrad, aber es kann zu ungewünschten Nachkristallisationseffekten und somit Nachschwindungen kommen [181]. Gleichmäßige Abkühlraten sind durch ein variothermes Formwerkzeug (siehe Abschnitt 7.2.1) sicherzustellen.

Nach Möglichkeit ist zusätzlich auch eine Temperierung des gasförmigen Fluids vorzusehen. Unterschiedliche Abkühlraten durch das Formwerkzeug an der Oberfläche und dem Blasschlauch bzw. dem Druckmedium an der Innenfläche des Hohlprofilbauteils können ebenfalls zum Verzug führen [155]. Die thermische Simulation des Abkühlvorgangs für ein temperiertes Formwerkzeug in Kombination mit einem Blasschlauch wird unter anderem in [53, 119] beschrieben. Das Schaubild 7-14 verdeutlicht die Komplexität dieses Abkühlvorgangs. Sämtliche Temperaturen sowie die Wärme- und Temperaturleitfähigkeit des Hohlprofilbauteils verändern sich während des Abkühlvorgangs, also in Abhängigkeit von Umformdruck- (t_U) und Abkühldauer (t_A). Zu Beginn der Umformdruckbeaufschlagung findet beim Einströmen des Druckmediums (Temperatur T_D) in den Blasschlauch eine verhältnismäßig hohe Wärmeübertragung durch erzwungene Konvektion statt [182].

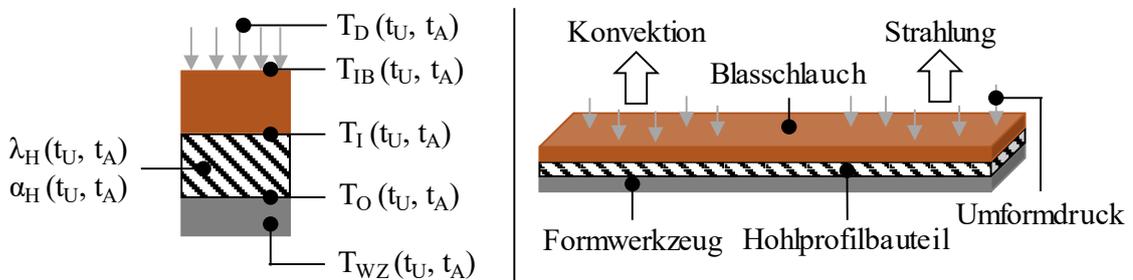


Abb. 7-15: Schematischer Aufbau eines Modells zur Simulation der Abkühlrate

Rechts: Temperaturen und Materialkennwerte in Abhängigkeit von Umformdruck- und Abkühldauer. Links: Modell für die Abkühlsimulation nach [53].

Schließgeschwindigkeit

Zuletzt werden die Auswirkungen der Schließgeschwindigkeit auf die Umformung betrachtet. Durch einen langsamen Schließvorgang kühlt das zuvor auf Matrix-Schmelztemperatur erwärmte Halbzeug (siehe Abschnitt 7.3.1.2) stark ab. Ursächlich dafür sind die Konvektion und der Kontakt des Halbzeugs mit der Werkzeugkavität während des Schließvorgangs. Es kommt zum frühzeitigen Erstarren des Halbzeugs bzw. Matrixpolymers und in weiterer Folge zu einer eingeschränkten Umformung [173]. Fehlerhafte Hohlprofilbauteile sind das Resultat. Bei der Wahl der Anlagentechnik ist daher auf eine hohe Schließgeschwindigkeit zu achten, da diese oftmals den limitierenden Faktor darstellt.

7.3.1.4 Funktionalisierung

Betrachtet werden jene Prozessparameter des Ultraschallschweißens, die den experimentellen Untersuchungen zufolge einen wesentlichen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften des Kugelverbindungselements haben (siehe Abschnitt 6.1.3).

Abschnitt 7.3.1.4 befasst sich daher mit den Prozessparametern *Amplitude*, *Schweißkraft* und *Schweißmodus*. Vorweg wird die grundsätzliche Schweißbarkeit der Thermoplaste adressiert, wobei dafür gemäß [183] zwischen amorphen und teilkristallinen Thermoplasten unterschieden wird.

- **Amorphe Thermoplaste:**
Der hohe Schub- und E-Modul in Kombination mit einem niedrigen mechanischen Verlustfaktor bis zur Glasübergangstemperatur (T_G) haben eine hohe Schalleitfähigkeit und somit gute Schweiß Eigenschaften zur Folge. Amorphe, zähfließende Thermoplaste erfordern einen erhöhten Energiebedarf beim Schweißprozess [76, 140].
- **Teilkristalline Thermoplaste:**
Für das Ultraschallschweißen sind teilkristalline Thermoplaste grundsätzlich weniger geeignet, da ein stärkerer Abfall der Schubmodulkurve bis zum Schmelzpunkt in Verbindung mit einem Anstieg des mechanischen Verlustfaktors auftritt. Dies bewirkt eine höhere Dämpfung der Schallwellen, woraus ein erhöhter Energiebedarf und längere Schweißzeiten resultieren. [76, 140] Aufgrund der hohen Dämpfung sollte die Schweißenergie möglichst in der Nähe der Schweißfläche eingebracht werden. Beim Ultraschallschweißen des Krafteinleitungselements ist dies der Fall (siehe Abschnitt 4.4.2).

Amplitude

Die Amplitude ist ein wichtiger Schweißparameter, denn sie beeinflusst die Energiebilanz bei der Schwingungsumwandlung im Konverter. Sowohl die Ultraschallfrequenz als auch die Art des Thermoplasts haben Auswirkung auf die Amplitude. Experimentelle Untersuchungen in Kapitel 6 haben gezeigt, dass für die Fügung dank der kleinen Schweißfläche (auch bei steigendem D_K) die Leistung eines Generators mit 35 kHz oder 40 kHz ausreichend ist. Bezogen auf eine Ultraschallfrequenz von 20 kHz haben sich beim Schweißen von amorphen Thermoplasten materialabhängige Amplituden im Bereich von 15 bis 40 μm etabliert [140]. Bei höheren Ultraschallfrequenzen sind die Amplituden um etwa ein Drittel geringer [140]. Amorphe Thermoplaste erfordern niedrige, teilkristalline Thermoplaste vergleichsweise hohe Amplituden zur Steigerung der Schweißnahtfestigkeit [159].

Schweißkraft

In der Praxis sind Schweißkräfte zwischen 100 bis 1000 N üblich [159]. Beim Ultraschallschweißen des Kugelverbindungselements sind aufgrund der kompakten Bauform des Elements deutlich geringere Schweißkräfte obligat. Beispielsweise erfordern Kugelverbindungselemente mit einem Durchmesser (D_K) von 6,35 mm eine Schweißkraft zwischen 70 und 78 N (siehe Abschnitt 6.1.4).

Die material- und durchmesserspezifische Schweißkraft ist in Vorversuchen festzulegen. Während des Schweißprozesses und bis zum Ablauf der Haltezeit (ca. 1 Sekunde) wird die Schweißkraft aufrechterhalten.

Schweißmodus

Empfohlen wird eine Steuerung des Fügevorgangs über folgenden Schweißmodus: relativer Schweißweg. Dieser Schweißmodus stellt eine reproduzierbare Resthöhe des Kugelverbindungselements (h_K) und in weiterer Folge die Einhaltung des in Abschnitt 7.1.3.1 definierten Durchmesser-Höhenverhältnisses (Ω_K) sicher. Der relative Schweißweg lässt sich bei einem zuvor festgelegten Durchmesser des Kugelverbindungselements (D_K) und mit Gleichung 7-3 aus Abschnitt 7.1.3.1 wie folgt berechnen:

$$s_K = D_K - h_K \quad (7-9)$$

s_K = Relativer Schweißweg; D_K = Durchmesser des Kugelverbindungselements;
 h_K = Resthöhe des Kugelverbindungselements nach dem Schweißprozess

Die Schweißenergie und die Schweißzeit ergeben sich aus der Vorgabe von Schweißweg (siehe Gleichung 7-7), Amplitude und Schweißkraft. Je höher die spezifische Wärmekapazität des Thermoplasts ist, desto mehr Schweißenergie ist vonnöten [140].

7.3.2 Produktionszelle

Der letzte Abschnitt fasst gemäß des definierten Vorgehens (siehe Tab. 3-1) die Ergebnisse der maßgebenden Module und der experimentellen Untersuchungen (siehe Kapitel 5 und 6) zur Konzeptionierung einer großserientauglichen Produktionszelle für das FuHo-Verfahren zusammen. Darüber hinaus werden auf der umgesetzten Prozesstechnik (siehe Kapitel 4) aufbauende, seriennahe Automatisierungslösungen berücksichtigt. Zur systematischen Analyse der fünf Prozessschritte des FuHo-Verfahrens wurde zunächst eine Ablaufplanung in Anlehnung an [184] erstellt. Die Ablaufplanung beinhaltet unter anderem das Erarbeiten des (Montage-)Vorranggraphen, die Bestimmung der Vorgabezeit und die Aufbereitung des Vorranggraphen [184].

Aufgrund der zahlreichen Teilverrichtungen wurde der Vorranggraph auf zwei unterschiedlichen Detaillierungsebenen angefertigt. Ebene 1 beschreibt zunächst die Prozessschritte inklusive der erforderlichen Prüfvorgänge (siehe Anhang, Abb. A-3 und Abb. A-4). Auf der Detaillierungsebene 2 sind die Teilverrichtungen inklusive der jeweiligen Vorgabezeiten erläutert. Diese sind im Anhang den Abb. A-5 bis Abb. A-9 zu entnehmen. Auf Basis der Ablaufplanung wurde anschließend das in Abb. 7-16 ersichtliche Layout einer automatisierten Produktionszelle erstellt.

Dieser Produktionszelle liegt folgender Prozessablauf zugrunde:

Eingangs werden die zu verarbeitenden Halbzeuge zur Qualitätskontrolle (siehe QK 1 in Abb. 7-16) einer optischen Prüfung unterzogen und für in Ordnung (i.O.) oder nicht in Ordnung (n.i.O.) befunden. Dies ermöglicht z. B. die Detektion von etwaigen Transportschäden oder Chargenschwankungen.

An der Vormontageanlage (siehe VMA in Abb. 7-16) entnimmt ein Werker einen Blasschlauch aus dem Blasschlauch-Puffer (BP) und drapiert diesen über einen dafür vorgesehenen Dorn. Roboter 1 greift ein i.O. Halbzeug aus dem entsprechenden Puffer und stülpt dieses über den zuvor mit einem Blasschlauch versehenen Dorn. Anschließend nimmt er wieder seine Ausgangsposition ein. Der vom Drehteller (D3) mit einem Dichtstempel bestückte Roboter 2 verfährt zum Dorn und dichtet das erste Halbzeugende ab. Die aufgebrachte Verspannkraft wird arretiert. Das einseitig abgedichtete Halbzeug wird inklusive Blasschlauch von Roboter 2 zum Umluftofen befördert und dort auf einem Transportdorn abgesetzt. Roboter 2 fährt anschließend ebenfalls in seine Ausgangsposition.

Halbzeug, Blasschlauch und Dichtstempel durchlaufen auf dem Transportdorn einen der beiden Umluftöfen. Das Halbzeug wird dabei auf eine matrixspezifische Grundtemperatur erwärmt. Dadurch verkürzt sich, insbesondere bei hohen Wandstärken, die Erwärmungsdauer bei der Infraroterwärmung. Eine thermisch-oxidative Materialschädigung aufgrund einer zu langen Verweildauer unter Temperatur und Sauerstoff ist durch eine entsprechende Auslegung der Umluftheizung zu vermeiden.

Am Ende des Umluftofens entnimmt Roboter 4 über den bereits angebrachten Dichtstempel das Halbzeug vom Transportdorn und bringt dieses zur Abdichtungsanlage (siehe Abb. 7-16). Parallel dazu entnimmt Roboter 3 einen Dichtstempel aus dem Reservoir (D1) und positioniert diesen in der Abdichtungsanlage. Das Halbzeug wird nun mittels Roboter 4 auf den Dichtstempel gesetzt. Unmittelbar danach wird der zweite Dichtstempel mittels Roboter 3 verspannt und arretiert. Zuletzt löst Roboter 3 die Kupplung zum Dichtstempel und fährt in seine ursprüngliche Position zurück.

Das Halbzeug ist nun auf Grundtemperatur erwärmt und sowohl auf der Halbzeuginnenfläche (Blasschlauch) als auch an den beiden Halbzeugenden (Dichtstempel) abgedichtet. Roboter 5 greift das Halbzeug über einen der beiden Dichtstempel, um es zur Erwärmungsanlage zu befördern. Dort wird das Halbzeug entsprechend positioniert; Roboter 5 löst die Kupplung und fährt an seinen Ausgangspunkt retour.

In der Erwärmungsanlage werden die IR-Strahlerhalbschalen geschlossen und das Halbzeug wird gemäß Abschnitt 7.3.1.2 auf die Matrix-Schmelztemperatur erhitzt.

Im Anschluss an den Erwärmungsvorgang dockt Roboter 6 über die dafür vorgesehene Kupplung am oberen Dichtstempel an, um das auf Schmelztemperatur erwärmte Halbzeug zu der in Abb. 7-16 ersichtlichen Umformanlage zu befördern. Dort angekommen schließt sich das temperierte Formwerkzeug und die Umformdruckbeaufschlagung startet.

Nach Ablauf der Umformdruck- und Abkühldauer (siehe Abschnitt 7.3.1.3) öffnet sich das Formwerkzeug und Roboter 7 entnimmt über den oberen Dichtstempel das Hohlprofilbauteil (Kupplung). An der Blasschlauch-Entnahmeanlage (BEA) dockt zusätzlich Roboter 8 an den unteren Dichtstempel an. Zeitgleich wird an beiden Dichtstempeln die Verspannkraft abgebaut. Der obere Dichtstempel bleibt mit einer leichten Verspannkraft beaufschlagt. Somit ist der noch expandierte Balg des Dichtstempels weiterhin an den Blasschlauch gekoppelt. Dank dieser Koppelung kann der Blasschlauch über eine Verfahrbewegung von Roboter 7 entfernt werden. Der Mehrfach-Blasschlauch wird zur Wiederverwendung in der Blasschlauch-Wanne (BSW) abgelegt. Beide Roboter entkoppeln die Dichtstempel am Dichtstempel-Drehteller (D2) und fahren in ihre Ausgangsposition zurück. Die abgelegten Dichtstempel und Blasschläuche werden zu den jeweiligen Anlagenpositionen befördert.

Roboter 9 entnimmt das Hohlprofilbauteil aus der BEA und legt dieses in einem der beiden Hohlprofilbauteil-Puffer (HPP 1 und HPP 2) der Qualitätskontrolle (QK 2) ab. Über die beiden (mobilen) Puffer ist die QK 2 vom Umformprozess entkoppelt. Unterschiedliche Durchlaufzeiten, Störungen oder Bauteilausschüsse in der Qualitätskontrolle können dadurch leichter kompensiert werden. Dies trifft gleichermaßen auf die noch folgenden Prozessschritte zu. Mittels Laser-Profilsensoren und/oder Kamerasystemen kann im Zuge der Qualitätskontrolle die Maßhaltigkeit und das Vorhandensein charakteristischer Umformfehler überprüft werden. Hohlprofilbauteile, die n.i.O. sind, werden – wie auch bei den noch folgenden Prozessschritten – nachgearbeitet oder, falls dies nicht möglich ist, dem Recycling zugeführt (HPP 1/2 n.i.O.).

In den Endbearbeitungszentren der Produktionszelle (Abb. 7-16) findet die Finalisierung der Bauteilgeometrie statt. Roboter 10 greift sich ein Hohlprofilbauteil aus dem i.O. Puffer und beliefert in alternierender Reihenfolge eines der beiden Endbearbeitungszentren. Nach dem Einlegen und automatisierten Fixieren der Hohlprofile startet beispielsweise die Fräs-, Laser- oder Wasserstrahlbearbeitung. Die Durchlaufzeit dieses Prozessschrittes hängt vom Bearbeitungsverfahren, der entsprechenden Vorschubgeschwindigkeit und der zu bearbeitenden Länge (Bauteilkontur) ab. Dementsprechend kann die Anzahl der Endbearbeitungszentren variieren. Mit Abschluss des Bearbeitungsvorgangs entnimmt Roboter 10 das Hohlprofil für die Übergabe an einen der beiden Hohlprofilbauteil-Puffer (HPP 1 und HPP 2).

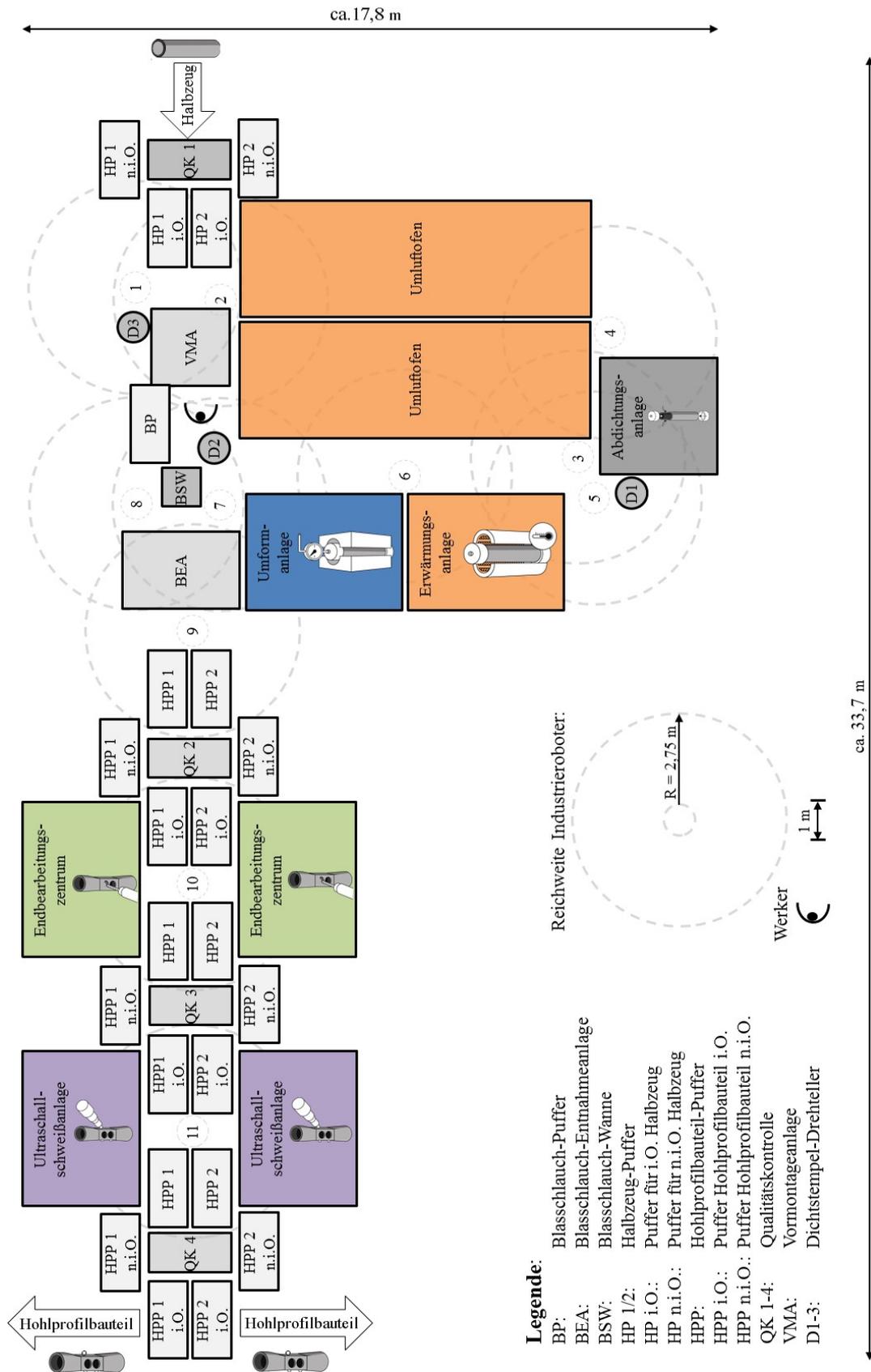


Abb. 7-16: Layout einer automatisierten Produktionszelle für das FuHo-Verfahren

Der anschließenden Qualitätskontrolle (QK 3) obliegt die Detektion möglicher Bearbeitungsfehler zur Differenzierung zwischen i.O. und n.i.O. Hohlprofilbauteilen.

Im fünften und letzten Prozessschritt des FuHo-Verfahrens findet in den Ultraschallschweißanlagen die Funktionalisierung des Hohlprofilbauteils statt (siehe Abb. 7-16). (Handling-)Roboter 11 bestückt dazu abwechselnd eine der beiden Ultraschallschweißanlagen mit Hohlprofilbauteilen aus dem entsprechenden Puffer (HPP 1/2 i.O.). Konstruktiv können die Ultraschallanlagen als Brücken-, Kassetten-, Schiebetisch-, Drehtellermaschinen oder Roboteranlagen ausgeführt werden [185–187]. Wird letztere mit einem Schweißkopf inklusive automatisierter Zuführeinheit für das Kugelverbindungselement ausgestattet, eignet sich die Ultraschallschweißanlage speziell für die positionsflexible Aufbringung der Krafeinleitungselemente.

Über die Zwischenablage im Hohlprofilbauteil-Puffer (HPP 1/2) wird das funktionalisierte und endbearbeitete Hohlprofilbauteil an die finale Qualitätskontrolle (QK 4) überstellt (siehe Abb. 7-16 unten). Hohlprofilbauteile, die für in Ordnung befunden werden, verlassen damit die Produktionszelle. Sie werden den nachgelagerten Produktionsprozessen zugeführt (z. B. Karosseriebau etc.).

Die detailliertere Planung der Produktionszelle für das FuHo-Verfahren kann nach Festlegung eines zu fertigenden Hohlprofilbauteils erfolgen. Aus Kenngrößen wie den Halbzeugeigenschaften (Querschnittsgeometrie, Faser, Matrix, Wandstärke etc.), der Größe des Hohlprofilbauteils, der Bauteilkontur und dem Funktionalisierungsumfang leiten sich Produktionskennzahlen (z. B. Durchlaufzeit) ab. Durch weitere Anpassungen an die räumlichen Gegebenheiten entsteht auf Basis des erarbeiteten Layouts ein Grob- und Feinlayout [184]. Dabei können auch weitere Szenarien, wie etwa die Expansion der Produktionszelle bzw. Umformanlage für weitere Funktionalisierungsmöglichkeiten (z. B. One-Shot-Onsert, One-Shot-Spritzgießen, siehe Abschnitt 7.1.3.2), berücksichtigt werden.

8 Zusammenfassung

Im Rahmen der Arbeit wurde ein neuartiges Verfahren zur Herstellung funktionalisierter Hohlprofilbauteile (FuHo-Verfahren) konzeptioniert, das die Vorzüge von kontinuierlich hergestellten Hohlprofilen bzw. Halbzeugen (hohes Produktionsvolumen) mit dem Vorteil von diskontinuierlichen Herstellungsverfahren (geometrische Bauteilkomplexität) vereint. Auf Basis eines vorimprägnierten und konsolidierten Halbzeugs mit konstanter Querschnittsgeometrie wird im FuHo-Verfahren in lediglich fünf Prozessschritten (Abdichtung, Erwärmung, Umformung, Endbearbeitung und Funktionalisierung) ein funktionalisiertes Hohlprofilbauteil hergestellt. Bei der Umformung des Halbzeugs zur Steigerung der geometrischen Komplexität sind Durchlaufzeiten von weniger als 90 Sekunden möglich, da die Imprägnierung der Fasern bereits im Zuge der kontinuierlichen Halbzeugherstellung stattfindet. Zudem ermöglicht das FuHo-Verfahren die Herstellung von Hohlprofilbauteilen mit variabler Querschnitts- und konkaver Bauteilgeometrie. Durch das endkonturnahe Herstellungsverfahren sind Materialeinsatzquoten von unter 108 % erreichbar. Für die Funktionalisierung des Hohlprofilbauteils im FuHo-Verfahren wurde ein zweiteiliges Krafteinleitungselement erarbeitet, das sich durch seine Leichtigkeit, Kostengünstigkeit, Modularität und Reparaturfähigkeit auszeichnet.

Zur funktions- und prozesstechnischen Umsetzung des FuHo-Verfahrens wurden für die einzelnen Prozessschritte systematisch Anlagenkomponenten technisch umgesetzt. Hierbei ermöglichen neuartige Dichtstempel in Kombination mit einem in das Halbzeug eingebrachten Blasschlauch eine Abdichtung des Halbzeugs. Für die Infraroterwärmung des Halbzeugs auf Umformtemperatur kommen spezielle Strahlerhalbschalen mit Zonenregelung zum Einsatz. Ein eigens konzeptioniertes Formwerkzeug vereint bei der Umformung die wesentlichen Vorteile bestehender Abquetsch- und Tauchkantenwerkzeuge. Dank des Formwerkzeugs und der Druckbeaufschlagung des Blasschlauchs mit einem gasförmigen Fluid wird das Halbzeug zum Hohlprofilbauteil umgeformt, um die geometrische Komplexität in Form einer Querschnittsveränderung zu steigern. Da sich nach ersten Voruntersuchungen die frästechnische Endbearbeitung nicht von jener für flächige Halbzeuge unterschied, wurde dieser Prozessschritt nicht weiter betrachtet. Mithilfe des Krafteinleitungselements – bestehend aus Kugelverbindungselement und Clipselement – findet im fünften und letzten Prozessschritt des FuHo-Verfahrens die Funktionalisierung der Hohlprofilbauteile statt.

Die experimentellen Untersuchungen befassten sich zunächst insbesondere mit der Umformung des Halbzeugs zum Hohlprofilbauteil sowie den damit vorweg unumgänglichen Prozessschritten Abdichtung und Erwärmung. Zur geometrischen Gestaltung der Hohlprofilbauteile wurden zunächst vier Komplexitätsgrade definiert (K1x bis K4x). Daraufhin deckten die festgelegten Hohlprofilbauteile aufgrund ihrer Geometriemerkmale drei der vier Komplexitätsgrade ab. Unter Verwendung von Halbzeugen aus endlosfaserverstärktem thermoplastischem Polyamid 6 (PA6) fanden die Untersuchungen statt, da diese Halbzeuge aufgrund ihres ausgewogenen Kosten-Nutzen-Verhältnisses besonders für die automobilen Großserie geeignet sind. Mit kohlenstofffaserverstärkten Halbzeugen für hochperformante und glasfaserverstärkten Halbzeugen für kostenoptimierte Hohlprofilbauteile kamen zwei Faserarten zur Anwendung. Des Weiteren wurden beim zuletzt genannten Halbzeug unterschiedliche Lagenaufbauten getestet. Im Zuge der Versuchsreihen waren somit die Art des Halbzeugs (PA6-CF $\pm 75^\circ$, PA6-GF $\pm 75^\circ$, PA6-GF $\pm 45^\circ$), die Temperatur des Formwerkzeugs (120, 135 und 150 °C), der Umformdruck (20, 35 und 50 bar) und der geometrische Komplexitätsgrad des Hohlprofilbauteils (K1x, K2x, K3x) veränderlich. Dem Komplexitätsgrad K1x sind Hohlprofilbauteile mit kleinen Außenradien zugeordnet. Charakteristisch für den Komplexitätsgrad K2x ist die konkave Bauteilgeometrie in Form einer Sicke oder Nut. Hohlprofilbauteile mit dem Komplexitätsgrad K3x zeichnen sich durch die konstruktive Umsetzung der vorherigen Komplexitätsgrade in Kombination mit einem hohen Faserlaufängenunterschied aus. Nach der Versuchsdurchführung wurden die Hohlprofilbauteile umfangreichen Untersuchungen auf makro- und mikroskopischer Ebene unterzogen.

Unabhängig von der Faserart zeigt die Analyse beim Komplexitätsgrad K1x einen hohen Druck- und Temperaturbedarf (50 bar, 150 °C). Bei steigendem Komplexitätsgrad sank aufgrund der Verzuggefahr die ideale Formwerkzeugtemperatur in Abhängigkeit der Faserart. Unbeeinflusst vom Lagenaufbau blieb der optimale Umformdruck für PA6-GF maximal (50 bar). Minimale Umformdrücke (20 bar) waren beim Komplexitätsgrad K2x zur Bauteilherstellung auf Basis des Halbzeugs PA6-CF $\pm 75^\circ$ ausreichend. Der Komplexitätsgrad K3x war mit sämtlichen Halbzeugen aufgrund des hohen Faserlaufängenunterschieds, der hohen relativen Höhenänderung und der kleinen Außenradien des Hohlprofilbauteils nicht fehlerfrei darstellbar. Allgemein verdeutlichten die experimentellen Untersuchungen den Einfluss der Halbzeugqualität auf die Eigenschaften der Hohlprofilbauteile. Bereits im Halbzeug vorhandene Fehlstellen und/oder schwankende Abmaße führen nach der Umformung zu einer steigenden Anzahl an Fehlerbildern beim Hohlprofilbauteil.

Mit der Prozesstechnik ist unter Berücksichtigung der ermittelten Prozessparameter und Verfahrensgrenzen eine fehlerfreie Umformung möglich. Im Wesentlichen wird die Qualität der Hohlprofilbauteile von den drei Faktoren Bauteilgeometrie, Umformparameter und Halbzeug bestimmt.

Nach der Bauteilherstellung stand die Funktionalisierung des Hohlprofilbauteils im Fokus der experimentellen Untersuchungen. Betrachtet wurde dabei insbesondere die Anbindung des Kugelverbindungselements am Hohlprofilbauteil. Zur Abstraktion der Hohlprofilbauteile wurden überwiegend plattenförmige, vorimprägnierte Halbzeuge mit quasiisotropem Lagenaufbau und den Matrixpolymeren PP, PA6 sowie PPA verwendet. Die verwendeten Kugelverbindungselemente bestanden aus artgleichem Thermoplast. Voraussetzung für das stoffschlüssige Fügen mittels Ultraschall war die Realisierung einer speziellen Sonotrode mit kugelkalottenförmiger Aussparung und axialer Vakuumbohrung zur Aufnahme des Kugelverbindungselements.

Eine vergleichende Betrachtung der Zugfestigkeiten mit und ohne Kugelverbindungselement wies nach, dass durch das Aufschweißen des Kugelverbindungselements die mechanischen Eigenschaften des Halbzeugs nicht beeinflusst werden. Bei Belastung des Kugelverbindungselements senkrecht zur Schweißfläche (Kopfzugversuch) kristallisierte sich ein Versagen der Halbzeug-Deckschicht respektive der Faser-Matrix-Grenzfläche heraus. Zyklische Temperatur- und Feuchtebelastungen der Schweißverbindungen durch den Klimawechseltest führten zu einer erwarteten Abnahme der Bruchkräfte um 10 bis 20 %. Trotz des Kraftabfalls war die Bruchkraft der Schweißverbindung stets kleiner als die Abzugskraft des Clipments. Eine zerstörungsfreie Demontage ist somit gewährleistet. Aufgrund der ermittelten mechanischen Eigenschaften ist das Krafteinleitungselement zur Fixierung von Montagekomponenten am Hohlprofilbauteil geeignet.

Auf Basis der experimentellen Untersuchungen liefert die vorliegende Arbeit einen Beitrag zur werkstoff- sowie fertigungsgerechten Bauteil- und Prozessgestaltung. Unter dem Aspekt der Halbzeugumformung wurden die Richtlinien für die Bauteilkonstruktion abgeleitet. Bei den konstruktiven Richtlinien zum Krafteinleitungselement standen die zahlreichen Gestaltungsmöglichkeiten von Clip- und Kugelverbindungselement im Mittelpunkt. Um bei der Bauteilkonstruktion zukünftig auch Hohlprofilbauteile mit variierender Wandstärke verwirklichen zu können, wurde das FuHo-Verfahren mit der lokalen Hohlprofilverstärkung (LHV) entscheidend weiterentwickelt. Darüber hinaus zeigten die Szenarien One-Shot-Onsert und One-Shot-Spritzgießen zwei weitere Möglichkeiten zur Funktionalisierung des Hohlprofilbauteils auf. Hinsichtlich der Prozessgestaltung wurden die maßgeblich prozessbeeinflussenden Parameter Abdichtung, Erwärmung, Umformung und Funktionalisierung genauer betrachtet.

Die Übertragung des FuHo-Verfahrens auf eine großserientaugliche Anlagentechnik stellte eine der verbleibenden Herausforderungen dar. Zur Konzeptionierung einer Produktionszelle wurden sämtliche Prozessschritte des FuHo-Verfahrens systematisch mithilfe der Ablaufplanung analysiert. Daraus resultierte unter Berücksichtigung weiterer Automatisierungsmöglichkeiten ein Layout der Produktionszelle. Dies gibt einen ersten Ausblick auf die zukünftige Herstellung funktionalisierter Hohlprofilbauteile aus endlosfaserverstärktem thermoplastischem Kunststoff.

Abschließend illustriert Abb. 8-1 das Anwendungsspektrum der mittels FuHo-Verfahren hergestellten Hohlprofilbauteile im Automobilbau. Die experimentellen Untersuchungen und die daraus konkludierten Richtlinien zur Bauteil- und Prozessgestaltung bilden die Grundlage für die dargestellten potentiellen Zielbauteile einer Fahrzeugkarosserie. In erster Linie eignet sich das konzeptionierte FuHo-Verfahren zur Herstellung von Hohlprofilbauteilen, die bei weitestgehend konstanter Querschnittsgeometrie eine lokale Querschnittsänderung erfordern.

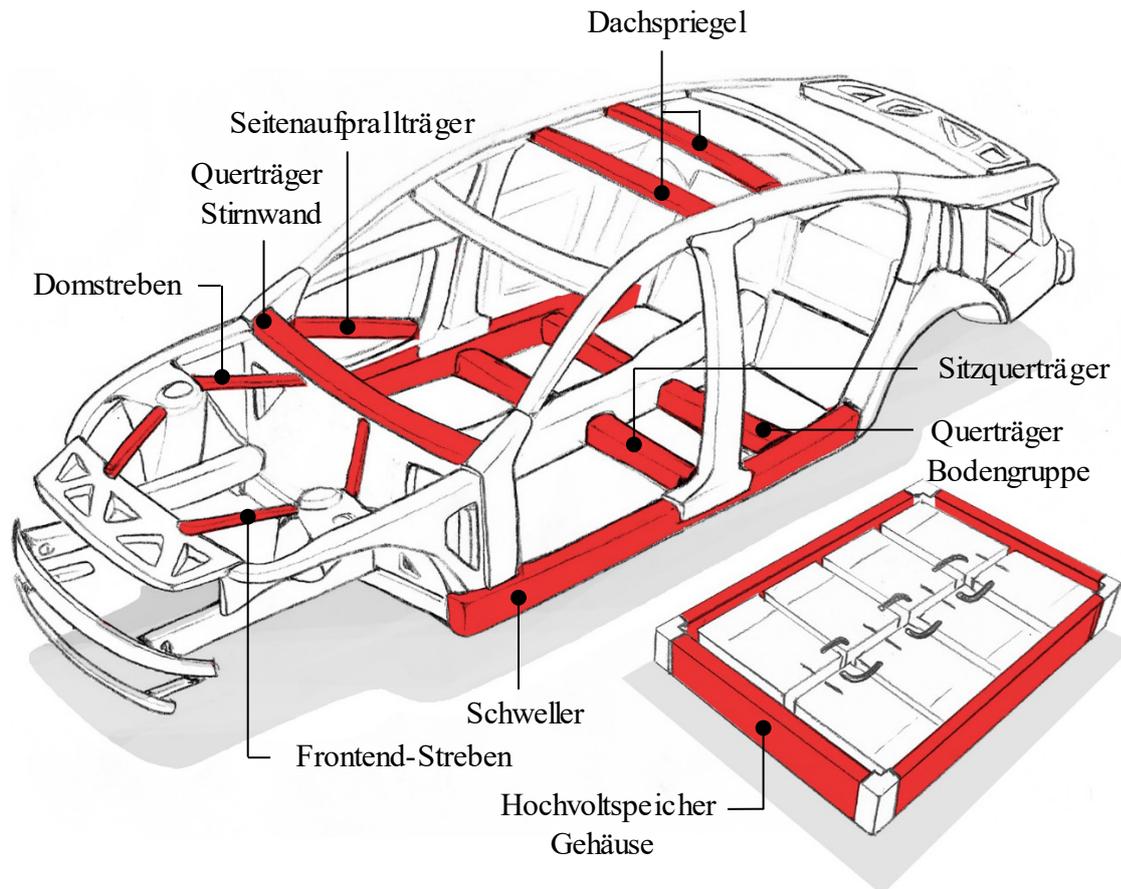


Abb. 8-1: Potentielle Zielbauteile für das FuHo-Verfahren am Beispiel einer Fahrzeugkarosserie

9 Ausblick

Im Zuge dieser Arbeit wurde das FuHo-Verfahren zur Herstellung funktionalisierter Hohlprofilbauteile konzeptioniert und anhand von experimentellen Grundsatzuntersuchungen dessen technische Machbarkeit nachgewiesen. Daraus leitet sich ausblickend weiterer Forschungsbedarf ab, der im Folgenden nach den Prozessschritten des FuHo-Verfahrens gegliedert ist.

- **Hohlprofilförmiges Halbzeug:**
Ausgehend von den bisherigen Betrachtungen sind die Auswirkungen von variierenden Wandstärken, veränderten Lagenaufbauten und unterschiedlichen Querschnittsgeometrien (z. B. rechteckig, dreieckig etc.) auf die Prozesstechnik zu untersuchen. Weitere Kombinationsmöglichkeiten resultieren aus einer Überlagerung dieser Halbzeuge mit dem Verfahren der lokalen Hohlprofilverstärkung (LHV). Darüber hinaus sind Halbzeuge mit einer Wandstärkenvariation in Umfangsrichtung denkbar.
- **Abdichtung:**
Gegenstand weiterer Untersuchungen sollte die Verkürzung des Abdichtbereichs zur Minimierung der Materialeinsatzquote im Falle einer Endbearbeitung sein. Zudem sind bei einer veränderten Querschnittsgeometrie des Halbzeugs die Auswirkungen auf Balg und Blasschauch zu betrachten.
- **Erwärmung:**
Da mit zunehmender Halbzeugwandstärke die einseitige Infraroterwärmung zu einer stark ansteigenden Erwärmungsdauer führt, sollte die kombinierte Umflucht- und Infraroterwärmung genauer untersucht werden. Für ein verbessertes Prozessverständnis wäre die simulative Abbildung dieses Erwärmungsvorgangs zuträglich.
- **Umformung:**
Empfohlen wird die Betrachtung eines variotherm temperierten Formwerkzeugs zur Steigerung der Aufheiz- und Abkühlraten. Von Interesse ist zudem, ob in Kombination mit einem temperierten, gasförmigen Fluid die Abkühlrate weiter verbessert und der Verzug des Hohlprofilbauteils minimiert werden kann. Weiters sind die Auswirkungen eines veränderlichen Halbzeugs (z. B. Querschnittsgeometrie, Wandstärke etc.) auf das Umformverhalten und die Prozessparameter zu prüfen. Aufbauend auf den Grundsatzuntersuchungen zur lokalen Hohlprofilverstärkung sind für ein verbessertes Prozessverständnis unterschiedlichste Kombinationen aus Primär- und Sekundärhalbzeugen zu erforschen.

Zur Bewertung der unterschiedlichsten Bauteilkonzepte ist analog zur Erwärmung die Implementierung einer Umform- bzw. Drapiersimulation anzustreben.

- **Endbearbeitung:**
Neben der Fräsbearbeitung des Hohlprofilbauteils wären weitere Verfahren, beispielsweise die Laser- oder Wasserstrahlbearbeitung, hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit untersuchbar.
- **Funktionalisierung:**
Die experimentellen Untersuchungen haben das hohe Potential des entwickelten Krafteinleitungselements nachgewiesen. Eine Erhöhung der Schweißfläche würde die Erweiterung des Anwendungsspektrums ermöglichen. In Verbindung mit einer Weiterentwicklung der Clipelemente kann dies zu einer Steigerung der maximalen Krafteinleitung führen. Für das One-Shot-Onsert und One-Shot-Spritzgießen ist der Nachweis zu erbringen, inwiefern diese Verfahren prozesstechnisch realisierbar sind. Ferner stellt das nachträgliche Ausschäumen des Hohlprofilbauteils, beispielsweise zur Verbesserung der Crasheigenschaften, eine weitere Möglichkeit zur Bauteilfunktionalisierung dar.

Literaturverzeichnis

- [1] H. E. Friedrich, *Leichtbau in der Fahrzeugtechnik*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2013.
- [2] E. Witten, T. Kraus, and M. Kühnel, *Composites-Marktbericht 2016: Marktentwicklungen, Trends, Ausblicke und Herausforderungen*. [Online] Available: http://www.avk-tv.de/files/20161128_marktbericht_2016deutsch.pdf.
- [3] M. Schemme “Langfaserverstärkte Thermoplaste: Status und Perspektiven”, 22. Nationales SAMPE Symposium, Fürth, Feb. 2 2016.
- [4] ElringKlinger AG, *ElringKlinger erhält Großserienauftrag für ein globales Leichtbau-Projekt: Lieferung von Türmodul-Trägern aus Organoblechen*. Dettingen, 2016.
- [5] M. Emonts and H. Janssen “Neue Technologien der Faserverbundtechnik: Potenzielle zukünftige Anwendungen für hochdynamische Vorschubsysteme”, WZL Forum, Aachen, Dec. 13 2011.
- [6] R. Dittmann, *Hochwertige Verwertung faserverstärkter Thermoplaste*. Aachen: Forschungsges. Kraftfahrwesen, 1998.
- [7] K. Barst “Verarbeitung von langfaserverstärkten Thermoplasten im direkten Plastifizier-/Pressverfahren” Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Aachen, 2001.
- [8] M. Fleischhauer, *Untersuchung der Einsatzmöglichkeit von thermoplastischen Faserverbundwerkstoffen für hoch belastete Strukturbauteile in der Fahrzeugtechnik*. Aachen: Shaker, 2008.
- [9] J. Brandt and Richter H. “Hochleistungsverbundwerkstoffe mit thermoplastischer Matrix”, *Kunststoffe*, no. 77, pp. 40–44, 1987.
- [10] K. Drechsler and E. Ladstätter “Composites Materials and Structure-Property Relationship”, Skriptum zur Vorlesung, Garching bei München, 2015.
- [11] C. Brecher, A. Kermer-Meyer, M. Dubratz, and e. al “Thermoplastische Organobleche für die Großserie”, *Automobiltechnische Zeitschrift : ATZ*, vol. 112, no. Spezialausgabe: Karosserie und Bleche, pp. 28–32, 2010.
- [12] Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung, Ed., *Effiziente Prozesse für die Serienfertigung von endlosfaserverstärkten Thermoplast-Bauteilen*, Mar. 2015.

- [13] J. Shury, *Teijin's Pilot Plant Begins Operations*. [Online] Available: <http://www.compositestoday.com/2012/12/teijins-pilot-plant-begins-operations/>. Accessed on: Oct. 11 2015.
- [14] M. Flemming, G. Ziegmann, and S. Roth, *Faserverbundbauweisen: Fasern und Matrices*. Berlin, Heidelberg: Springer, 1995.
- [15] T. Beiß "Aufheizstrategien für thermoplastische FVK" in *Fachtagung Thermoplastische Faserverbundkunststoffe*, München: Hanser, 2014, pp. 155–164.
- [16] C. Stefanziosa and N. Sutter, "Verfahren zum Reparieren oder Verstärken eines Hohlprofilabschnittes eines Kunststoffprofils", Patent DE201410200130, Jan. 8 2014.
- [17] M. Kaden and W. Dudenhouse "Verlängerung der Nutzungsphase von Faserverbundstrukturen: Reparaturkonzepte" (German), *Lightweight Design*, vol. 8, no. 04, pp. 26–31, 2015.
- [18] H.-J. Bargel and G. Schulze, *Werkstoffkunde*, 11th ed. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012.
- [19] H. Schürmann, *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden*, 2nd ed. Berlin, Heidelberg: Springer, 2007.
- [20] H.-P. Zepf, Ed., *Faserverbundwerkstoffe mit thermoplastischer Matrix: Hochleistungswerkstoffe für rationelle Verarbeitung ; mit 27 Tabellen und 107 Literaturstellen*. Renningen-Malmsheim: expert-Verl, 1997.
- [21] A. Birkert, S. Haage, and M. Straub, *Umformtechnische Herstellung komplexer Karosserieteile: Auslegung von Ziehanlagen*. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2013.
- [22] M. Dubratz, *Laserunterstütztes Tape Placement Verfahren für die Herstellung dreidimensionaler Strukturkomponenten aus endlosfaserverstärkten thermoplastischen Prepregs*, 1st ed. Aachen: Apprimus, 2015.
- [23] J. Faber "Zur Bauweise von Faser-Thermoplast-Profilen: Beulproblematik, Funktionsintegration, Kosten", 21. Nationales SAMPE Symposium, Darmstadt, Feb. 12 2015.
- [24] G. Akovali, *Handbook of Composite Fabrication*. Shropshire: Smithers Rapra Press, 2001.
- [25] S.T. Peters, Ed., *Handbook of Composites*. Boston, MA, s.l.: Springer US, 1998.
- [26] M. Neitzel, P. Mitschang, and U. Breuer, Eds., *Handbuch Verbundwerkstoffe: Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung*, 2nd ed. München: Hanser, 2014.

- [27] BMW M GmbH, *Intelligenter Leichtbau.: Maßnahmen zur Reduzierung des Gewichts in allen relevanten Bereichen*. [Online] Available: https://www.m-power.com/_open/s/closedroom.jsp?id=3009&lang=de. Accessed on: Jun. 01 2016.
- [28] Audi AG, *Audi Space Frame*. [Online] Available: <http://www.audi-technology-portal.de/de/karosserie/aluminiumkarosserien/audi-space-frame-asf/>. Accessed on: May 28 2016.
- [29] L.-E. Elend, C. Haverkamp, and F. Venier “Multimaterial construction of vehicles with alternative drive systems”, Insight Edition, Landshut, Nov. 20 2013.
- [30] M. Ahlers and K. Sammer “New BMW 7 Series - Carbon Core”, EuroCarBody, Bad Nauheim, Oct. 21 2015.
- [31] B. Dressler “The Lightweight Design of the BMW i3”, Insight Edition, Landshut, Nov. 20 2013.
- [32] F. Dirschmid, T. Wolff, and T. Weiss “The BMW i8”, EuroCarBody, Bad Nauheim, Oct. 12 2014.
- [33] C. Howe, W. Rostek, J. Böke, and M. Maciej “FVK- Metall- Hybridstrukturen unter Berücksichtigung großserientauglicher Fertigungsprozesse”, FAT-Forum, Frankfurt, Dec. 9 2008.
- [34] F. Michalak, M. Höfer, and M. Ebner “Body-in-white of the new S-Class”, EuroCarBody, Bad Nauheim, Oct. 22 2013.
- [35] M. Derks “CFK-Technologien im Automobilbau”, DLR Wissenschaftstag, Braunschweig, Oct. 11 2007.
- [36] B. Stolte and H. Börger “Vom UD-Tape zum Bauteil: Eine durchgehende, halbzeugbasierte industrielle TAC-Prozesskette für die Großserie” in *Fachtagung Thermoplastische Faserverbundkunststoffe*, München: Hanser, 2014, pp. 35–41.
- [37] J. Coulton, S. Ringenbach, and J. Richeton “Vorderer Stoßfängerquerträger aus faserverstärktem Kunststoff, hergestellt in reaktiver thermoplastischer Pultrusion”, 6. ATZ-Fachtagung, Stuttgart, 2015.
- [38] J. Krollmann, J.-M. Opelka, M. Nohr, and B. Pipkorn “Formadaptiver Seitenaufprallträger aus faserverstärktem Kunststoff”, *Lightweight Design*, vol. 9, no. 01, pp. 12–17, 2016.
- [39] M. Steinrücken, B. Öhmke, F. Welsch, and J. Hillmann “Der neue Golf V - Die Karosserie”, VDI - Entwicklungen im Karosseriebau, Hamburg, May. 4 2004.
- [40] E. Winter, Ed., *Gabler Wirtschaftslexikon*, 18th ed. Wiesbaden: Gabler, 2014.

- [41] AVK - Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe, Ed., *Handbuch Faserverbundkunststoffe*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2009.
- [42] D. W. Jürss, *Thermoplastpultrusion - Strangziehen von endlosfaserverstärkten Profilen mit thermoplastischem Matrixwerkstoff*, 1st ed. Aachen: Verlag der Augustinus-Buchhandlung, 1995.
- [43] E. Reese, "Flechtpultrusion eines thermoplastischen FVK-Hohlprofils mit optimierter Faserführung", Patent DE1020110818420A1, Apr. 21 2011.
- [44] K. Drechsler, C. Ebel, and S. Zaremba "Production Technologies for Composite Parts", Skriptum zur Vorlesung, Garching bei München, 2014.
- [45] H. Schürmann and S. Wenzel "Neue, rationelle Fertigungsverfahren zur Herstellung von endlosfaserverstärkten, rohrförmigen Bauteilen mit thermoplastischer Matrix", AVK-Tagung, Baden-Baden, 10.1997.
- [46] S. Scholl, *Zur kontinuierlichen Herstellung prismatischer Leichtbauprofile aus Faser-Kunststoff-Verbunden mit thermoplastischer Matrix*. Aachen: Shaker, 2010.
- [47] S. Scholl "Kontinuierliche Herstellung prismatischer Leichtbauprofile aus FKV mit thermoplastischer Matrix", SAMPE, Feb. 19 2015.
- [48] C. Schmidt, *Zum Innendruckumformen von Faser-Thermoplast-Kreisrohren*. Aachen: Shaker, 2015.
- [49] D. Veit, B. Wulfhorst, and T. Gries, *Textile Fertigungsverfahren: Eine Einführung*, 2nd ed. München: Hanser, 2014.
- [50] J. U. Rosenbaum, *Fertigung von faserverstärkten Kunststoffbauteilen unter Einsatz der Flechttechnik*. Köln: Verlag TÜV Rheinland, 1991.
- [51] C. Garthaus, D. Barfuss, B. Witschel, and M. Gude "Tape braiding: High-performance fibre-reinforced thermoplastic profile structures", *JEC Composites Magazine*, no. 96, pp. 62–64, 2015.
- [52] M. Ehleben, *Herstellung von endlosfaserverstärkten Rohren mit thermoplastischer Matrix im Schleuderverfahren*. Aachen: Shaker, 2002.
- [53] J. B. Strohhäcker, *Herstellungsmethode für thermoplastische faserverstärkte Hohlkörperstrukturen*. Aachen: Mainz, 2012.
- [54] F. H. Henninger "Beitrag zur Entwicklung neuartiger Fertigungsverfahren zur Herstellung von Bauteilen aus kontinuierlich faserverstärkten Thermoplasten" Dissertation, Fachbereich für Maschinenbau und Verfahrenstechnik, Technische Universität Kaiserslautern, Kaiserslautern, 2005.
- [55] M. Junge, *Gleitziehbiegen endlosfaserverstärkter Thermoplaste*. Herzogenrath: Shaker, 2015.

- [56] M. Wacker “Schweißverfahren für Faserkunststoffverbunde”, IKV-Fachtagung Fügen von Kunststoffen, Aachen, Apr. 27 2010.
- [57] D. Drummer, T. Müller, L. Hoffmann, and N. Müller “Hohlkörperverbundstrukturen im Minutentakt”, *Kunststoffe*, no. 03, pp. 110–114, 2011.
- [58] Projektträger Jülich “Herstellung von hybriden Leichtbau-Verbundrohren mit integrierten Funktionselementen durch Fluidinjektionstechnik "FIT-Hybrid": Schlussbericht ; Verbundprojekt”, TIB - Technische Informationsbibliothek Universitätsbibliothek Hannover, 2011.
- [59] D. Drummer, C. Gröschel, and A. Seefried “Organobleche durch Gasdruck direkt Umformen”, *Kunststoffe*, no. 12, pp. 70–74, 2013.
- [60] C. Gröschel and D. Drummer “Integrative Herstellung von Hochleistungsfaserverbundstrukturen durch Umformung mit Gasdruck” in *Fachtagung Thermoplastische Faserverbundkunststoffe*, München: Hanser, 2013, pp. 93–104.
- [61] A.C. Long, Ed., *Design and manufacture of textile composites*. Cambridge, Boca Raton: Woodhead, 2005.
- [62] M. Wakeman, P. Vuilliomenet, and J.-A. Manson “Isothermal and non-isothermal bladder inflation moulding of thermoplastic composite pressure vessels: A process/cost study” in *Proceedings of the SAMPE Europe 24th International Technical Conference*, 2003.
- [63] U. Lehmann and W. Michaeli “Herstellung von endlosfaserverstärkten thermoplastischen Hohlkörpern im Schlauchblasverfahren”, AVK-Tagung, Baden-Baden, Oct. 15 1997.
- [64] M. Krahl “Innovative Werkzeug- und Fertigungstechnologien für hybride Thermoplast-Leichtbaustrukturen”, 1. Symposium Lightweight Solutions, Hannover, Nov. 27 2013.
- [65] S. Wenzel, *Verfahren zur Herstellung endlosfaserverstärkter Rohre mit thermoplastischer Matrix und Analyse von Eigenspannungen*. Aachen: Shaker, 2000.
- [66] A. Höhme, *Zur rationellen Herstellung dickwandiger, endlosfaserverstärkter Thermoplast-Hohlstrukturen*. Aachen: Shaker, 2015.
- [67] H. Börger and U. Schwarz, "Verfahren zur Herstellung eines Formkörpers", Patent DE102006017771A1, Apr. 15 2006.
- [68] E. Reese, "Verfahren zum Herstellen eines Strukturbauteils aus einem faserverstärktem Kunststoff", Patent DE1020120818804A1, Sep. 22 2012.

- [69] A. Büttner, *Automatisiertes Umformen von thermoplastischen Faserverbundrohren*. [Online] Available: <http://www.afpt.de/wilkommen/new/afpt-entwickelt-biegeprozess-fuer-faserverbundrohre/>. Accessed on: Jun. 05 2016.
- [70] T. Zimmermann “Innendruckumformen von endlosfaserverstärkten thermoplastischen Hohlprofilen” Masterarbeit, Lehrstuhl für Carbon Composites, Technische Universität München, Garching bei München, 2016.
- [71] T. Kirsten, *Komplexe Faserverbund-Profile für die Großserie*. Dresden, 2015.
- [72] A. Liebsch *et al.* “Batterieträger in Hybridbauweise: Kombination aus thermoplastischem Faserverbund und Aluminium ersetzt Stahlbauteil”, *Kunststoffe*, vol. 105, no. 09, pp. 126–129, 2015.
- [73] W. Siebenpfeiffer, Ed., *Leichtbau-Technologien im Automobilbau: Werkstoffe - Fertigung - Konzepte*. Wiesbaden: Springer, 2014.
- [74] C. Hopmann *et al.* “Vergleich der Eigenschaften von Onserts und Inserts für die Grobserienfertigung von FVK-Strukturbauteilen”, *Journal of Plastics Technology*, vol. 09, no. 04, pp. 179–206, 2013.
- [75] M. Ehleben “Neue Verfahren zur Herstellung thermoplastischer Faserverbundbauteile für die automobilen Serienfertigung”, 2. Fachtagung Thermopre, Chemnitz, Sep. 17 2014.
- [76] G. W. Ehrenstein, *Handbuch Kunststoff-Verbindungstechnik*. München: Hanser, 2004.
- [77] J. Schäfer, T. Martens, and T. Gries “Konzeptentwicklung für die Integration von Krafeinleitungselementen”, *Lightweight Design*, vol. 8, no. 03, pp. 54–59, 2015.
- [78] REHAU AG + Co, *REHAU fasziniert in Genf an Bord des neuen Rinspeed „Etos“*. [Online] Available: <https://www.rehau.com/de-de/rinspeed-genfer-autosalon/1597204>. Accessed on: Jun. 05 2016.
- [79] G. Meschut and F. Augenthaler “Hybridfügen von Mischbaustrukturen aus faserverstärkten Kunststoffen mit metallischen Halbzeugen”, Universität Paderborn, Paderborn, Schlussbericht, 2015. Accessed on: Apr. 22 2016.
- [80] C. Garthaus, B. Witschel, D. Barfuss, A. Rohkamm, and M. Gude “Funktionalisierte Faser-Thermoplast-Profilstrukturen”, *Lightweight Design*, vol. 09, no. 01, pp. 40–45, 2016.
- [81] M. Gude, W. Hufenbach, C. Garthaus, B. Witschel, and F. Lenz, "Verfahren zur Herstellung von Lasteinleitungs Flanschen an faserverstärkten Hohlprofilen mit thermoplastischer Matrix", Patent DE201410004157, Mar. 17 2014.

- [82] *Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte*, VDI 2221, 1993.
- [83] K. G. Durst, *Beitrag zur systematischen Bewertung der Eignung anisotroper Faserverbundwerkstoffe im Fahrzeugbau*, 1st ed. Göttingen: Cuvillier, 2008.
- [84] P. Furrer, M. Hintermann, and M. Niedermeider “Werkstoff- und Bauweisenkonzepte für kosteneffiziente Hybridstrukturen” in *VDI-Berichte*, vol. 1653, *Fahrzeugkonzepte für das 2. Jahrhundert Automobiltechnik*, VDI-Gesellschaft, Ed., Düsseldorf: VDI-Verlag, 2001, pp. 505–530.
- [85] B. Künne, *Einführung in die Maschinenelemente: Gestaltung - Berechnung - Konstruktion*. Wiesbaden: Springer, 2001.
- [86] R. A. Schöldgen, *Inline-Imprägnieren und Hochtemperatur-Diaphragma-Umformen endlosfaserverstärkter Thermoplaste*. Aachen: Mainz, 2013.
- [87] C. Stefaniosa, E. Ladstätter, K. Drechsler, and T. Zimmermann “New production process for manufacturing continuous fiber-reinforced thermoplastic hollow profile components” in *Proceedings of the 17th European Conference on Composite Materials*, 2016.
- [88] K. Friedrich, M. Hou, and J. Krebs “Thermoforming of continuous-fibre thermoplastic composite sheets” in *Composite materials series*, vol. 11, *Composite sheet forming*, D. Bhattacharyya, Ed., Amsterdam, New York: Elsevier, 1997, pp. 91–162.
- [89] A. M. Murtagh and P. J. Mallon “Characterisation of shearing and frictional behaviour during sheet forming Characterisation of shearing and frictional behaviour during sheet forming” in *Composite materials series*, vol. 11, *Composite sheet forming*, D. Bhattacharyya, Ed., Amsterdam, New York: Elsevier, 1997, pp. 163–216.
- [90] T. Matsuo “Fiber Arrangement Structures of Thermoplastic Composites from the View Point of Formability and Mechanical Properties” in *Proceedings of the 4th International Symposium for Textile Composites*, 1998, p. 1.
- [91] J. Ozaki, K. Manabe, and J. Oda “Bending Process of Textile Thermoplastic Composites Tube” in *Proceedings of the 4th International Symposium for Textile Composites*, 1998, p. 27.
- [92] G. Bechtold, *Pultrusion von geflochtenen und axial verstärkten Thermoplast-Halbzeugen und deren zerstörungsfreie Porengehaltsbestimmung*. Kaiserslautern: IVW, 2000.

- [93] T. Keiling “Ermittlung des Umformverhaltens von Gewebeprepreps in Abhängigkeit von Verstärkungstyp und Matrixsystem mit Hilfe eines geeigneten rheologischen Materialmodells” Dissertation, Institut für Bauweisen- und Konstruktionsforschung, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Stuttgart, 2006.
- [94] R. Scherer, K. Friedrich, and M. Vötter, *Charakterisierung des Zwischenlagenabgleitens beim Thermoformen von kontinuierlich faserverstärkten Polypropylen-Laminaten*. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1993.
- [95] R. Neugebauer, Ed., *Hydro-Umformung*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2007.
- [96] L. Tälker and U. Hesselmann, *Für das Laserschneiden spricht die Produktivität: FVK-Konturbearbeitung*. [Online] Available: <http://www.maschinenmarkt.vogel.de/fuer-das-laserschneiden-spricht-die-produktivitaet-a-373132/>. Accessed on: Jan. 08 2016.
- [97] U. Krismann, *Laser- und Wasserstrahlschneiden endlosfaserverstärkter Thermoplaste*. München: Hanser, 1994.
- [98] P. Jaeschke, M. Kern, U. Stute, D. Kracht, and H. Haferkamp “Laser processing of continuous carbon fiber reinforced polyphenylene sulphide organic sheets- correlation of process parameters and reduction in static tensile strength properties”, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, vol. 27, no. 3, pp. 324–337, 2014.
- [99] S. Bluemel, P. Jaeschke, O. Suttman, and L. Overmeyer “Comparative Study of Achievable Quality Cutting Carbon Fibre Reinforced Thermoplastics Using Continuous Wave and Pulsed Laser Sources”, *Physics Procedia*, vol. 56, pp. 1143–1152, 2014.
- [100] S. Royo Pérez *et al.* “Laser cutting an the influence on the mechanical properties of long fibre reinforced CF-PPS and CF-PEI” in *Proceedings of the 17th European Conference on Composite Materials*, 2016.
- [101] V. Krishnaraj, R. Zitoune, and J. P. Davim, *Drilling of polymer-matrix composites*. Heidelberg, New York: Springer, 2013.
- [102] W. Feng, F.M. Hu, L.H. Yuan, Y. Zhou, and Y.Y. Zhou “Radiation crosslinking of polyamide 610”, *Radiation Physics and Chemistry*, vol. 63, no. 3-6, pp. 493–496, 2002.
- [103] D. Drummer, A. Seefried, and M. Fuchs “Strahlen öffnen dritte Foliendimension”, *Kunststoffe*, no. 11, pp. 55–59, 2010.
- [104] Ferdinand Stückerjürgen GmbH & Co. KG “Versuchsergebnisse”, Rietberg-Varensell, Dec. 2015.

- [105] E. Doege and B.-A. Behrens, *Handbuch Umformtechnik: Grundlagen, Technologien, Maschinen*, 2nd ed. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010.
- [106] M. Thielen, K. Hartwig, and P. Gust, *Blasformen: Von Kunststoffhohlkörpern*. München: Hanser, 2006.
- [107] A.-M. Collombin, "Maschine für das Blasformen von Verpackung aus bi-orientiertem PET sowie angewandtes Blasformverfahren", Patent 4117010, May. 24 1991.
- [108] S. Hesse, *Grundlagen der Handhabungstechnik*, 3rd ed. München: Hanser, 2013.
- [109] S. Hesse, *Greifertechnik: Effektoren für Roboter und Automaten*. München: Hanser, 2011.
- [110] W. Ziegler "Handhabungs- und Montagetechnik", Skriptum zur Vorlesung, Düsseldorf, 2008.
- [111] Giuseppe Roncadelle Maffei, "Expansions-Fingergreifer", DE, Patent DE200710017662, 2007.
- [112] U. Lindemann "Methoden der Produktentwicklung: Vorgehensmodelle - Grundprinzipien - Methoden", Lehrstuhl für Produktentwicklung, Technische Universität München, Garching bei München, 2009.
- [113] B. Boehm "A Spiral Model of Software Development and Enhancement", 1988.
- [114] C. Hierl "Ermittlung eines geeigneten Dichtstempelkonzeptes für die Innendruckbeaufschlagung von Hohlprofilen aus endlosfaserverstärktem thermoplastischem Kunststoff" Masterarbeit, Lehrstuhl für Carbon Composites, Technische Universität München, Garching bei München, 2015.
- [115] C. Stefanziosa and C. Hierl, "Dichtstempel zum stirnseitigen Abdichten eines Hohlprofils", Patent DE102016209072A1, May. 25 2016.
- [116] Gimatic S.r.l. "Innengreifer mit Aufwärtshub: Produktkatalog" [Online] Available: <http://www.gimatic.com/Gimatic/ProductsFiles/Catalogs/de/mfd-mfu.pdf>. Accessed on: Jul. 20 2015.
- [117] R. Lahr, *Partielles Thermoformen endlosfaserverstärkter Thermoplaste*. Kaiserslautern: IVW, 2007.
- [118] S. Stitz and W. Keller, *Spritzgießtechnik: Verarbeitung - Maschine - Peripherie*, 12th ed. München: Hanser, 2004.
- [119] C. G. Pohl, *Umformen endlosfaserverstärkter, thermoplastischer Kunststoffe durch Differenzdruck bei nicht-isothermer Prozeßführung*. Aachen: Mainz, 2000.

- [120] F. Schmidt “Fertigungs- und Maschinenkonzept zur kontinuierlichen Herstellung endloser faserverstärkter Thermoplastrohre” Dissertation, Produktionstechnologie, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Aachen, 2005.
- [121] T. Koslowski “Innovatives Aufheizverfahren für CFK-Organobleche”, AVK-Tagung, Düsseldorf, Oct. 6 2014.
- [122] T. Müller, *Methodik zur Entwicklung von Hybridstrukturen auf Basis faserverstärkter Thermoplaste*. Erlangen: LKT, 2011.
- [123] L. Gaab “Optimierung der Heizprozesse von CFK- und GFK-Strukturen mit Infrarot-Strahlung” in *Leichtbau-Technologien im Automobilbau: Werkstoffe - Fertigung - Konzepte*, W. Siebenpfeiffer, Ed., Wiesbaden: Springer, 2014, pp. 23–28.
- [124] F. Brinken “Untersuchungen zur Wärmeübertragung beim Thermoformen von Thermoplasten” Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Aachen, 1979.
- [125] P. v. Böckh and T. Wetzel, *Wärmeübertragung: Grundlagen und Praxis*, 5th ed. Berlin, Heidelberg: Springer, 2014.
- [126] L. Gaab and O. Weiss “Ray Tracing Analyse”, 2015.
- [127] S. Scholl “Das Profil-Armierungs-Ziehen: Ein kostengünstiges Verfahren zur Herstellung von hochbelastbaren, endlosfaserverstärkten Profilen mit thermoplastischer Matrix”, 11. Nationales SAMPE Symposium, Darmstadt, Mar. 3 2005.
- [128] C. Schmidt “Herstellung komplexer Hohlprofile durch Innendruckumformung von Faser-Thermoplast-Kreisrohren”, 21. Nationales SAMPE Symposium, Darmstadt, Feb. 12 2015.
- [129] U. Lehmann, *Herstellung von endlosfaserverstärkten, hohlen Formteilen mit innendruckbeaufschlagten Kernen im Harzinjektionsverfahren*. Aachen: Mainz, 1999.
- [130] P. Eyerer, *Polymer engineering*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008.
- [131] W. Michaeli, *Einführung in die Kunststoffverarbeitung*, 4th ed. München, Wien: Hanser, 1999.
- [132] A. Hermann, K.-H. Ilzhöfer, T. Schuh, and T. Wesse, "Formwerkzeug zur Herstellung eines Bauteils mit einer Membran", Patent DE200225001524, Jun. 19 2001.
- [133] C. Stefaniosa and M. Pernicka, "Umformwerkzeug und Verfahren zum Umformen eines Halbzeugs für ein Faserverbundbauteil", Patent DE102016208686A1, May. 20 2016.

- [134] B. Giddings, "Fastener comprising male and female components", Patent GB20070005644, Mar. 23 2007.
- [135] Böllhoff Verbindungstechnik GmbH, "Steckkupplung mit dreidimensionaler Ausgleichsbewegung in Plattenmonatge", Patent DE200520011420U, Jul. 20 2005.
- [136] J. Niekerk, M. Hammer, and M. Ahlers, "Bauteilverbindung sowie Verfahren zum Verbinden zweier Bauteile", Patent DE201110079483, Jul. 20 2011.
- [137] C. Stefanziosa, "Sonotrode, Verfahren zum Schweißen einer Kugel sowie Bauteilverbindung", Patent 102014216002.2, Aug. 13 2014.
- [138] C. Stefanziosa, E. Ladstätter, and K. Drechsler "Krafteinleitungselement zur Funktionalisierung von thermoplastischen Faserverbundbauteilen", *Journal of Plastics Technology*, vol. 12, no. 5, pp. 383–413, 2016.
- [139] A. Köhler and A. Herrmann "Vom Prototyp zur Serienreife: Schwierige Fügepartner - Kühlsysteme für den Automobilbau", *Kunststoffe*, no. 05, pp. 66–69, 2015.
- [140] Deutscher Verband für Schweißen und Verwandte Verfahren, *Taschenbuch DVS-Merkblätter und -Richtlinien, Fügen von Kunststoffen*, 15th ed. Düsseldorf: DVS Media, 2014.
- [141] C. Stefanziosa, "Verfahren zum Herstellen eines lokal verstärkten Profilbauteils", Patent DE102014217372A1, Sep. 1 2014.
- [142] Ferdinand Stückerjürgen GmbH & Co. KG, *Stükertec Profile: Endlosfaserverstärkte Kunststoffprofile*. [Online] Available: <http://www.stueckerjuergen.com/de/sac/fertigungsverfahren/paz/>. Accessed on: Oct. 10 2016.
- [143] K. Lang, *Zur Erweiterung des Spektrums von Faser-Kunststoff-Verbunden mit thermoplastischer Matrix - Einsatz unidirektional faserverstärkter Halbzeuge in hoch belasteten Strukturbauteilen des Automobil- und Flugzeugbaus*. Aachen: Shaker, 2012.
- [144] *Kunststoffe - Verfahren zur Bestimmung der Dichte von nicht verschäumten Kunststoffen - Teil 1: Eintauchverfahren, Verfahren mit Flüssigkeitspyknometer und Titrationsverfahren (ISO 1183-1:2012)*, DIN EN ISO 1183-1:2013-04, 2013.
- [145] *Thermische Analyse (TA) - Thermogravimetrie (TG) - Grundlagen*, DIN 51006:2005-07, 2005.
- [146] *Kunststoffe - Dynamische Differenz-Thermoanalyse (DSC) - Teil 5: Bestimmung von charakteristischen Reaktionstemperaturen und -zeiten, Reaktionsenthalpie und Umsatz (ISO 11357-5:2013)*, DIN EN ISO 11357-5:2014-07, 2014.

- [147] *Wärmetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung des Wärmedurchlasswiderstandes nach dem Verfahren mit dem Plattengerät und dem Wärmestrommessplatten-Gerät - Produkte mit hohem und mittlerem Wärmedurchlasswiderstand*, DIN EN 12667:2001-05, 2001.
- [148] L. Wiegerling “Infraroterwärmung von endlosfaserverstärkten thermoplastischen Hohlprofilen und deren Auswirkung auf die strukturmechanischen Eigenschaften” Masterarbeit, Lehrstuhl für Leichtbau, Technische Universität München, Garching bei München, 2015.
- [149] F. Peisker “Innendruckumformen von endlosfaserverstärkten thermoplastischen Hohlprofilen” Masterarbeit, Hochschule Anhalt, Anhalt, 2016.
- [150] *Standard Test Method for Apparent Hoop Tensile Strength of Plastic or Reinforced Plastic Pipe*, ASTM D 2290:2012, 2012.
- [151] Y. Youssef and J. Denault “Prediction of Residual Stresses in Continuous Glass Fiber/Polypropylene Composites” in *Design and Manufacturing of Composites*, 2014, pp. 7–14.
- [152] G. Jeronimidis and A.T. Parkyn “Residual-Stresses in Carbon Fiber-Thermoplastic Matrix Laminates” in *Journal of Composite Materials*, pp. 401–415.
- [153] *Gummi - Toleranzen für Fertigteile - Teil 1: Maßtoleranzen (ISO 3302-1:1996)*, DIN ISO 3302-1:1999-10, 1999.
- [154] H. Dreyer and H. J. Malig, *Statistische Versuchsmethodik*, 2nd ed. Birkenau: Gesellschaft für Datenverarbeitung und Systemtechnik mbH, 1993.
- [155] U. Breuer, *Beitrag zur Umformtechnik gewebeverstärkter Thermoplaste*. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1997.
- [156] W. Kaiser, *Kunststoffchemie für Ingenieure: Von der Synthese bis zur Anwendung*, 1st ed. München: Hanser, 2011.
- [157] K. Siebertz, D. van Bebber, and T. Hochkirchen, *Statistische Versuchsplanung: Design of Experiments (DoE)*. Heidelberg: Springer, 2010.
- [158] *Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften - Teil 4: Prüfbedingungen für isotrop und anisotrop faserverstärkte Kunststoffverbundwerkstoffe (ISO 527-4:1997)*, DIN EN ISO 527-4:1997-07, 1997.
- [159] M. Ziegltrum, *Untersuchungen von Ultraschallschweissverbindungen in der Kombination unterschiedlicher Thermoplaste mit einer und mehreren Fügeebenen*. München: Utz, 2001.
- [160] Evonik Industries, *Produktdaten VESTAMID Htplus M1000*. [Online] Available: <http://www.vestamid.com/sites/lists/PP-HP/Documents/VESTAMID-HTplus-M1000-Base-Polymer-EN.pdf>. Accessed on: Oct. 16 2015.

- [161] EMS Chemie, *Produktdaten Grilon: Premium Polyamid*. [Online] Available: http://www.emsgrivory.com/fileadmin/ems-grivory/documents/brochures/Grilon_15-09-2014_de.pdf. Accessed on: Oct. 16 2015.
- [162] F. Balle “Ultraschallschweißen von Metall, C-Faser-Kunststoff (CFK) - Verbunden” Dissertation, Lehrstuhl für Werkstoffkunde, Technische Universität Kaiserslautern, Kaiserslautern, 2009.
- [163] F. Kurr, *Praxishandbuch der Qualitäts- und Schadensanalyse für Kunststoffe*. München: Hanser, 2011.
- [164] BMW Group “Konstruktionsleitfaden”, 2015.
- [165] J. Kunz and D. Lukic “Konstruktive Optimierung von Kugelschnappverbindungen”, *SwissPlastics*, no. 2, https://www.iwk.hsr.ch/uploads/tx_hsrpm/0502_Konstruktive_Optimierung_Kugelschnappverbindungen.pdf, 2005.
- [166] Covestro AG, *FEMSnap Tool*. [Online] Available: <http://www.plastics.covestro.com/Engineering/Tools/FEMSnap-tool.aspx>. Accessed on: Feb. 07 2017.
- [167] J. Kunz and D. Lukic “Realitätsnahe Berechnung von Kugelschnappverbindungen”, *SwissPlastics*, no. 12, https://www.iwk.hsr.ch/uploads/tx_hsrpm/0412_Realitaetsnahe_Berechnung_Kugelschnappverbindungen.pdf, 2004.
- [168] C. Stefanziola, "Verfahren zum Verbinden eines metallischen Bauteils mit einem Hohlprofilbauteil aus (faserverstärktem) thermoplastischen Kunststoff", Patent Aktenzeichen 102017204962.6, Mar. 23 2017.
- [169] C. Stefanziola, "Verfahren zur Funktionalisierung eines Hohlprofilbauteils aus (faserverstärktem) thermoplastischen Kunststoff im Spritzgussverfahren", Patent Aktenzeichen 102017204964.2, Mar. 23 2017.
- [170] G. Erhard, *Konstruieren mit Kunststoffen*, 4th ed. München: Hanser, 2008.
- [171] T. Kies, *10 Grundregeln zur Konstruktion von Kunststoffprodukten*. München: Hanser, 2014.
- [172] E. Baur, S. Brinkmann, T. A. Osswald, E. Schmachtenberg, and H. Saechtling, *Saechtling Kunststoff Taschenbuch*, 30th ed. München: Hanser, 2007.
- [173] U. Berthold “Beitrag zur Thermoformung gewebeverstärkter Thermoplaste mittels elastischer Stempel” Dissertation, Technischen Universität Chemnitz, Chemnitz, 2001.

- [174] L.M.J. Robroek, *The development of rubber forming as a rapid thermoforming technique for continuous fibre reinforced thermoplastic composites: Quality control by process control*. Delft: Delft University Press, 1994.
- [175] H. Pruner and W. Nesch, *Spritzgießwerkzeuge kompakt*. München: Hanser, 2012.
- [176] M. Flemming, G. Ziegmann, and S. Roth, *Faserverbundbauweisen: Fertigungsverfahren mit duroplastischer Matrix*. Berlin, Heidelberg: Springer, 1999.
- [177] F. Stepputat and C. Schmauch “Kunststoffhalbzeuge mit IR-Strahlung erwärmen”, *Kunststoffe*, vol. 80, no. 09, pp. 27–31, 1990.
- [178] J. E. Cunningham, P. F. Monaghan, and M. T. Brogan “Predictions of the temperatur profile within composite sheets during pre-heating”, *Composites: Part A*, vol. 29A, pp. 51–61, 1998.
- [179] P. F. Monaghan and M. T. Brogan “Thermal simulation of quartz tube infrared heaters used in the processing of thermoplastic composites”, *Composites: Part A*, vol. 27A, no. 301-306, 1996.
- [180] G. J. Sweeney, P. F. Monaghan, M. T. Brogan, and S. F. Cassidy “Reduction of infrared heating cycle time in processing of thermoplastic composites using computer modelling”, *Composite Manufacturing*, vol. 6, no. 3-4, pp. 255–262, 1995.
- [181] C. Peters, I. Zuardy, and H. Purol “Hochautomatisierte Prozessketten für die Verarbeitung komplexer Faserverbundbauteile aus drapierfähigen gewebeverstärkten Thermoplast” in *11. Chemnitzer Textiltechnik-Tagung, 2007*, pp. 1–10.
- [182] F. Zink “Erstellung und Evaluierung einer FEM-Simulation des thermischen Verhaltens von faserverstärkten thermoplastischen Kunststoffen im Diaphragma-Umformprozess” Diplomarbeit, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Aachen, 2005.
- [183] H. Domininghaus, P. Elsner, P. Eyerer, and T. Hirth, *Kunststoffe: Eigenschaften und Anwendungen*, 8th ed. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012.
- [184] H.-J. Bullinger, Ed., *Systematische Montageplanung: Handbuch für die Praxis*. München, Wien: Hanser, 1986.
- [185] PPW GmbH, *Sonderanlagen*. [Online] Available: <http://www.ppw-systems.de/pages/deutsche-website/produkte/ultraschall-schweissen/sonderanlagen.php>. Accessed on: Feb. 21 2017.
- [186] Sonotronic Nagl GmbH, *Sondermaschinen*. [Online] Available: <http://www.sonotronic.de/produkte/sondermaschinen>. Accessed on: Feb. 21 2017.

-
- [187] Weber Ultrasonic Weld & Cut GmbH, *Sonderanlagen*. [Online] Available: http://www.wuwc.de/wu_wc_de_p-Sonderanlagen.php. Accessed on: Feb. 21 2017.

A Anhang

a Datenblätter

STANDARD PRODUCT VALUES

Celstran® CFR-TP PA6 CF60-01

General Description: Celstran® CFR-TP PA6 CF60-01 is a 60% carbon fiber by weight polyamide 6 (nylon 6) continuous fiber (uni-directional) reinforced thermoplastic composite tape. This material exhibits a high strength-to-weight ratio, excellent toughness and impact resistance. It is well suited for industrial, automotive, and sporting goods applications where strength and toughness are critical as well as ease of processing.

	Property	Value	Unit	Value	Unit
MATERIAL	Polymer	PA6			
	Fiber Type	Carbon			
	Density	0.0523	lb/in ³	1.447	g/cm ³
	Fiber Content	60	% by wt.		
	Fiber Volume	48	% by vol.		
	Tape Thickness*	0.0051	in	0.13	mm
	Tape Width*	10.8	in	275	mm
	Fiber Areal Weight	5.0	oz/yd ²	170	g/m ²

*Alternate tape widths and thicknesses may be available.

	Property	Value	Unit	Value	Unit	Test Method
MECHANICAL	Tensile Strength	281	ksi	1938	MPa	Tape Tensile
	Tensile Modulus	14.2	Msi	98.1	GPa	Tape Tensile
	Elongation at Break	1.76	%	1.76	%	Tape Tensile
	Flexural Strength	153	ksi	1055	MPa	D790
	Flexural Modulus	14.2	Msi	98.1	GPa	D790

* Orientation 0°

	Property	Value	Unit	Value	Unit
THERMAL	Melt Temperature	428	°F	220	°C
	Glass Transition Temperature	135	°F	57	°C

7/29/2014



ENGINEERED MATERIALS

celanese.com/engineered-materials

Contact Information

Americas

8040 Dixie Highway
Florence, KY 41042 USA
Product Information Service
t: +1-800-833-4882 t: +1-859-372-3244
Customer Service
t: +1-800-526-4960 t: +1-859-372-3214
e: info-engineeredmaterials-am@celanese.com

Europe

Am Unisys-Park 1
65843 Sulzbach, Germany
Product Information Service
t: +(00)-800-86427-531
t: +49-(0)-69-45009-1011
e: info-engineeredmaterials-eu@celanese.com

Asia

-4560 Jinke Road, Zhang Jiang Hi Tech Park
Shanghai 201203 PRC
Customer Service
t: +86 21 3861 9266
t: +86 21 3861 9599
e: info-engineeredmaterials-asia@celanese.com

© 2014 Celanese or its affiliates.
All rights reserved.

This publication was printed based on Celanese's present state of knowledge, and Celanese undertakes no obligation to update it. Because conditions of product use are outside Celanese's control, Celanese makes no warranties, express or implied, and assumes no liability in connection with any use of this information. Nothing herein is intended as a license to operate under or a recommendation to infringe any patents.

Celanese® registered C-ball design and all other trademarks identified herein with ®, TM, SM, unless otherwise noted, are trademarks of Celanese or its affiliates.

Abb. A-1: Datenblatt PA6-CF Tape

PRELIMINARY VALUES

Celstran® CFR-TP PA6 GF60-01

General Description: Celstran® CFR-TP PA6 GF60-01 is a 60% E-glass by weight polyamide 6 (nylon 6) continuous fiber (uni-directional) reinforced thermoplastic composite tape. This material exhibits a high strength-to-weight ratio, excellent toughness and impact resistance. It is well suited for industrial, automotive and sporting goods applications where strength, toughness and cost are critical, as well as ease of processing. The material is available in natural and black colors.

	Property	Value	Unit	Value	Unit
MATERIAL	Polymer	PA6			
	Fiber Type	E-glass			
	Density	0.0608	lb/in ³	1.690	g/cm ³
	Fiber Content	60	% by wt.		
	Fiber Volume	39	% by vol.		
	Tape Thickness [*]	0.0118	In	0.30	mm
	Tape Width [*]	12.0	In	305	mm
	Tape Areal Weight	14.9	oz/yd ²	507	g/m ²
	Fiber Areal Weight	8.9	oz/yd ²	304	g/m ²

^{*}Alternate tape widths and thicknesses may be available.

	Property	Value	Unit	Value	Unit	Test Method
MECHANICAL	Tensile Strength	102	ksi	705	MPa	Tape Tensile
	Tensile Modulus	4.37	Msi	30.1	GPa	Tape Tensile
	Elongation at Break	2.42	%	2.42	%	Tape Tensile
	Flexural Strength	111	ksi	765	MPa	D790
	Flexural Modulus	4.74	Msi	32.7	GPa	D790

¹ Orientation 0°

	Property	Value	Unit	Value	Unit
THERMAL	Melt Temperature	428	°F	220	°C
	Glass Transition Temperature	135	°F	57	°C

7/29/2014

**ENGINEERED MATERIALS**

celanese.com/engineered-materials

Contact Information**Americas**

8040 Dixie Highway
Florence, KY 41042 USA

Product Information Service
t: +1-800-833-4882 t: +1-859-372-3244

Customer Service
t: +1-800-526-4960 t: +1-859-372-3214
e: info-engineeredmaterials-am@celanese.com

Europe

Arn Unisys-Park 1
65843 Sulzbach, Germany

Product Information Service
t: +(00)-800-86427-531
t: +49-(0)-69-45009-1011
e: info-engineeredmaterials-eu@celanese.com

Asia

-4560 Jinke Road, Zhang Jiang Hi Tech Park
Shanghai 201203 PRC

Customer Service
t: +86 21 3861 9266
f: +86 21 3861 9599
e: info-engineeredmaterials-asia@celanese.com

© 2014 Celanese or its affiliates.
All rights reserved.

This publication was printed based on Celanese's present state of knowledge, and Celanese undertakes no obligation to update it. Because conditions of product use are outside Celanese's control, Celanese makes no warranties, express or implied, and assumes no liability in connection with any use of this information. Nothing herein is intended as a license to operate under or a recommendation to infringe any patents.

Celanese® registered C-ball design and all other trademarks identified herein with ®, TM, SM, unless otherwise noted, are trademarks of Celanese or its affiliates.

Abb. A-2: Datenblatt PA6-GF Tape

b Versuchs-, Prüf- und Messtechnik

Tab. A-1: Thermoelemente zum Messen der Temperatur auf der Halbzeuginnenfläche

Produkt	Hersteller	Typ
Thermoelement	Omega Engineering GmbH	5SRTC-TT-KI-36-3M

Tab. A-2: DSC-Messzelle zur Halbzeugcharakterisierung

Produkt	Hersteller	Typ
DSC-Messzelle	NETZSCH-Gerätebau GmbH	DSC 204 F1 Phoenix 240-1

Tab. A-3: Thermo-Mikrowaage zur Halbzeugcharakterisierung

Produkt	Hersteller	Typ
Thermo-Mikrowaage	NETZSCH-Gerätebau GmbH	TG 209 F1 Libra TGA 209 F1 D-0180-L

Tab. A-4: Laser Flash Apparatur zur Halbzeugcharakterisierung

Produkt	Hersteller	Typ
Laser Flash Apparatur	NETZSCH-Gerätebau GmbH	LFA 457 MicroFlash

Tab. A-5: Computertomograph zur Halbzeug- und Bauteilcharakterisierung

Produkt	Hersteller	Typ
Computertomograph	General Electric Company	phoenix v tome x m

Tab. A-6: Materialographie zur Halbzeug- und Bauteilcharakterisierung

Produkt	Hersteller	Typ
Mikroskop	Carl Zeiss Light Microscopy	Observer.Z1m
Kamera		AxioCam HRc
Software		AxioVision SE64

Tab. A-7: Karl Fischer Titrator zur Halbzeugcharakterisierung

Produkt	Hersteller	Typ
Karl Fischer Titrator	Mettler-Toledo International Inc.	DL39 Coulometric KF Titrator

Tab. A-8: Prüfmaschine für Zug- und Ringzugversuch

Produkt	Hersteller	Typ
Materialprüfmaschine	Zwick GmbH & Co. KG.	Z250/SN AllroundLine RetroLine testControl II
Software		testXpert V12.2

Tab. A-9: Bildverarbeitungstechnik zur Schnittbildprüfung

Produkt	Hersteller	Typ
Kamera	Keyence	CA-HX500M
Bildverarbeitung		XG-8700LP
Software		XG VisionEditor
Objektiv	Cosmicar/Pentax	G2180

Tab. A-10: Lasertechnik zur Radiusprüfung

Produkt	Hersteller	Typ
Laser-Profilesensor	Keyence	LJ-V7080
Steuergerät		LJ-V7001P
Software		LJ-Observer

Tab. A-11: Aktuatoren der Umformanlage

Produkt	Hersteller	Typ
Heizpatrone	Watlow GmbH	G7C-15185
Steuergerät		Dual Loop Control Box
IR-Strahler	Heraeus Nobelight GmbH	23x11 Bauform B
Steuerung		KPE-11149

Tab. A-12: Messtechnik der Umformanlage

Produkt	Hersteller	Typ
Temperatursensor	Watlow	23-1000194
Pyrometer	LumaSense Technologies GmbH	Imapc IN 520
Drucksensor	Omega	PXM359-140G10V
Software	AUTEM GmbH	SPS Analyser Pro 5

Tab. A-13: Ultraschalltechnik zum Schweißen des Kugelverbindungselements

Produkt	Hersteller	Typ
Standschweißpresse	Telsonic AG	USP750E 35 kHz 1,2 kW
Generator		MAG-W035012-S-R-01
Steuerung		TCS5

Tab. A-14: Trockenschrank zur Lagerung der plattenförmigen Halbzeuge

Produkt	Hersteller	Typ
Trockenschrank	Thermo Fisher Scientific Inc.	Heratherm OMH750

Tab. A-15: Prüfmaschine für den Kopfzugversuch

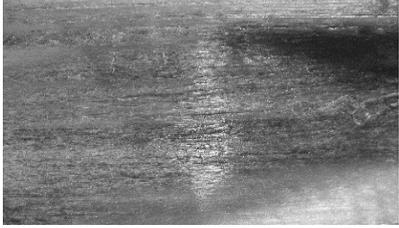
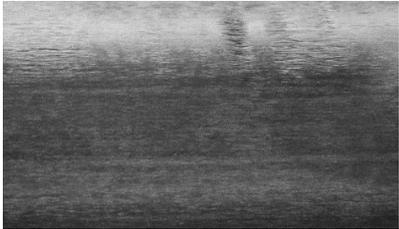
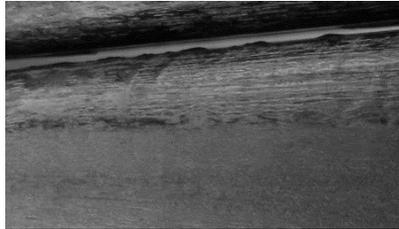
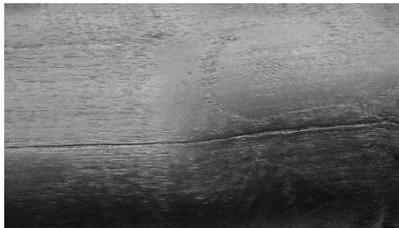
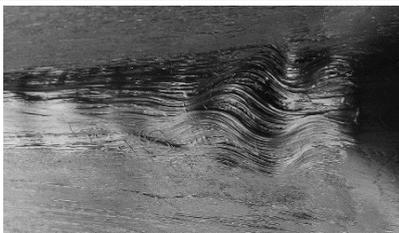
Produkt	Hersteller	Typ
Universalprüfmaschine	Hegewald & Peschke Meß- und Prüftechnik GmbH	Inspekt table BLUE 10kN
Software		LabMaster

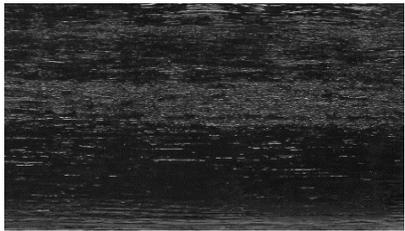
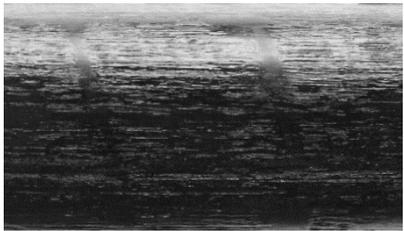
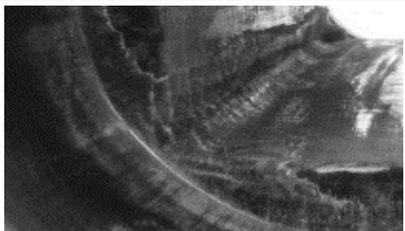
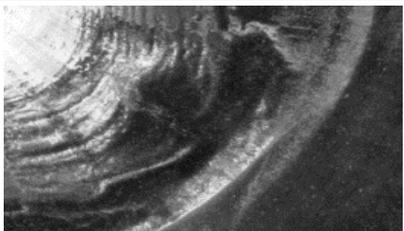
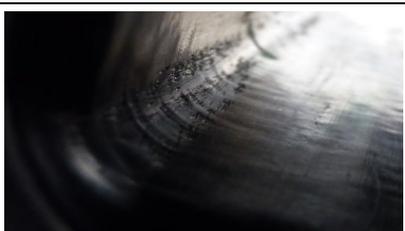
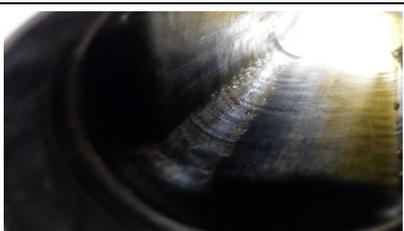
Tab. A-16: Umweltsimulationskammer für die Klimawechselbelastung

Produkt	Hersteller	Typ
Umweltsimulations- kammer	CTS GmbH	CW-40/15

c Fehlerbildkatalog

Tab. A-17: Fehlerbildkatalog nach [149]

Fehler	Gering	Ausgeprägt
O1		
O2		
O3		
O4		
O5		
O6		

Fehler	Gering	Ausgeprägt
O7		
I1		
I2		
I3		
S1		

d Ablaufplanung

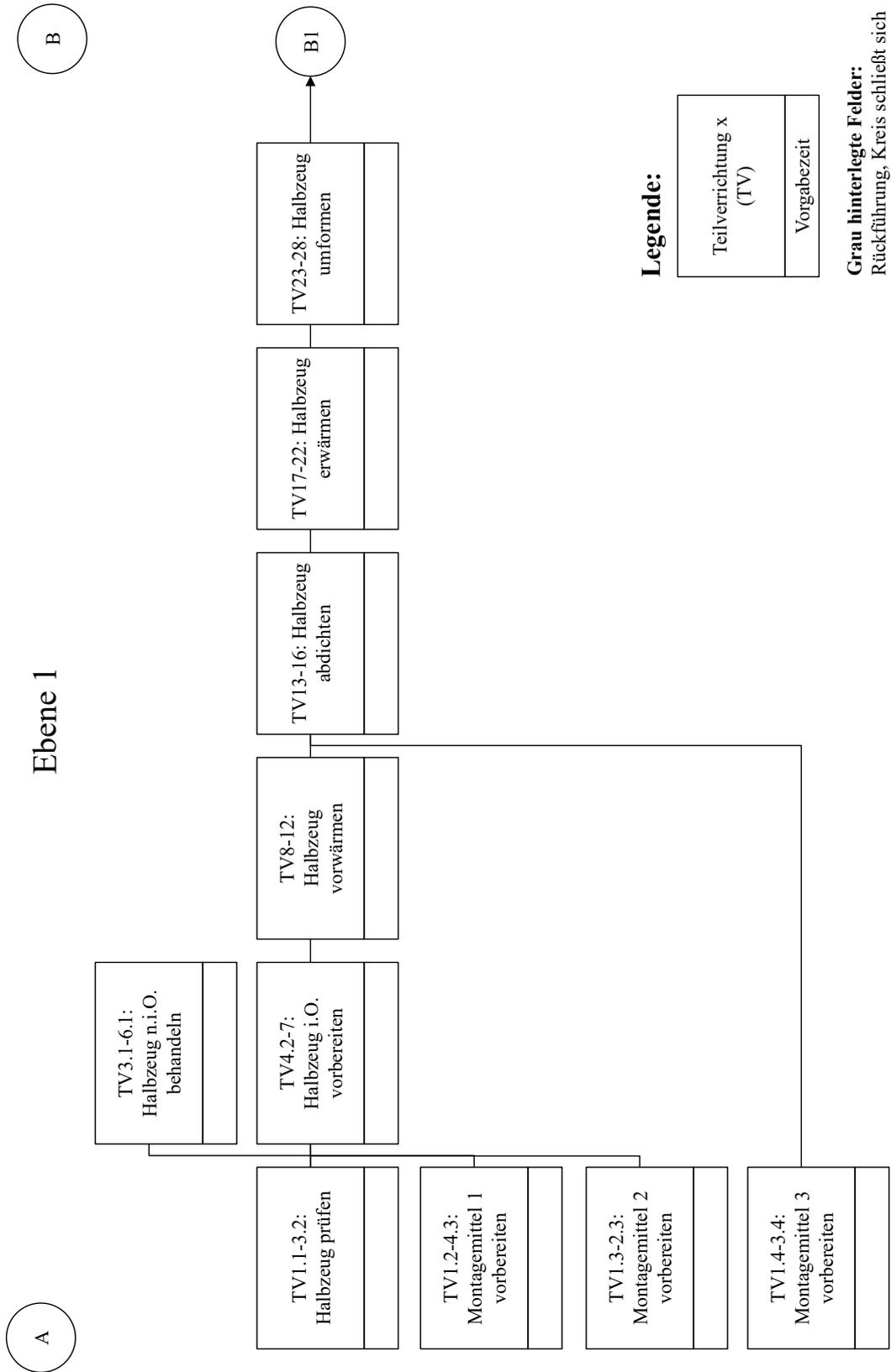


Abb. A-3: Ablaufplanung - Ebene 1 - Teil A

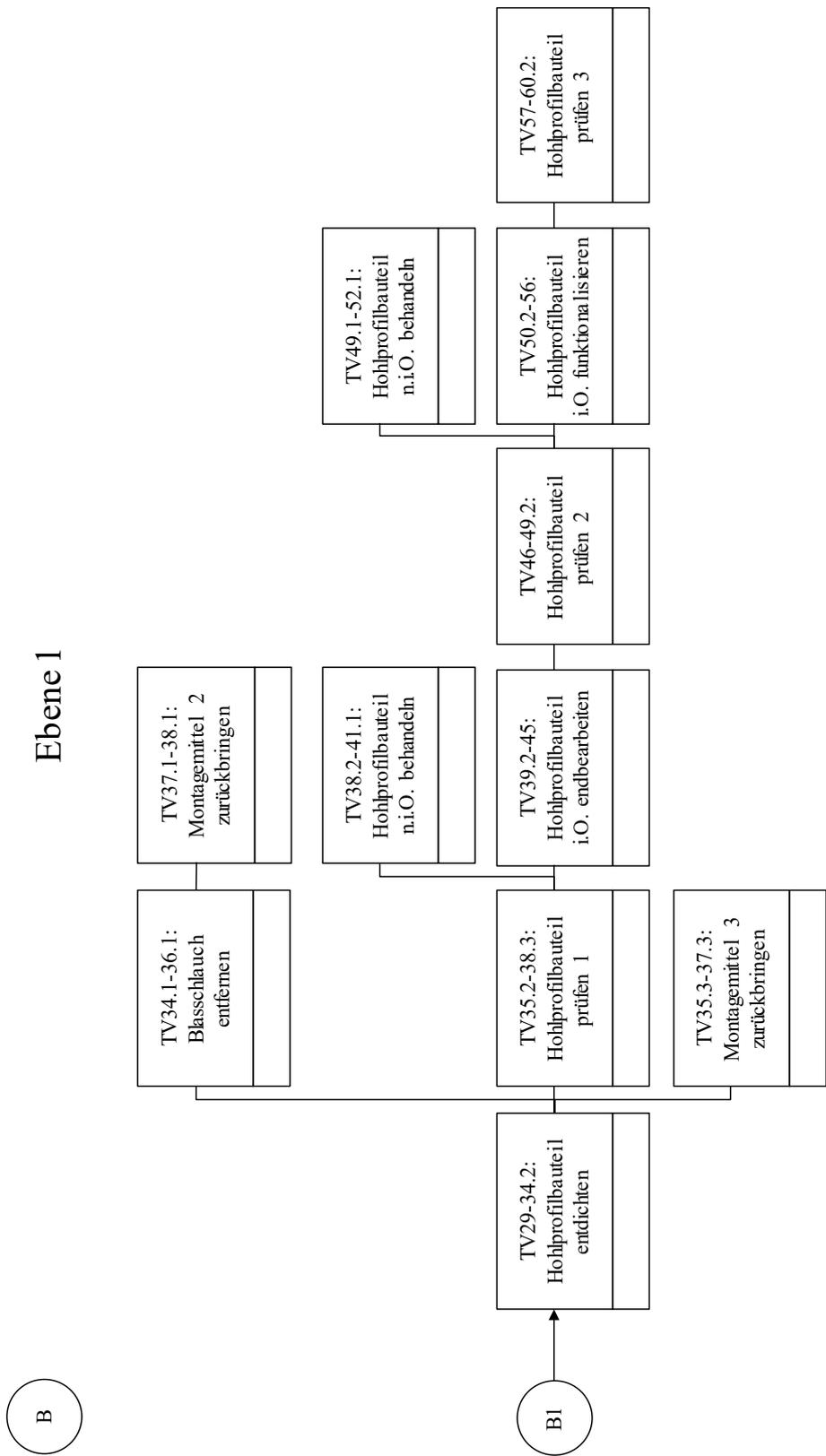


Abb. A-4: Ablaufplanung - Ebene 1 - Teil B

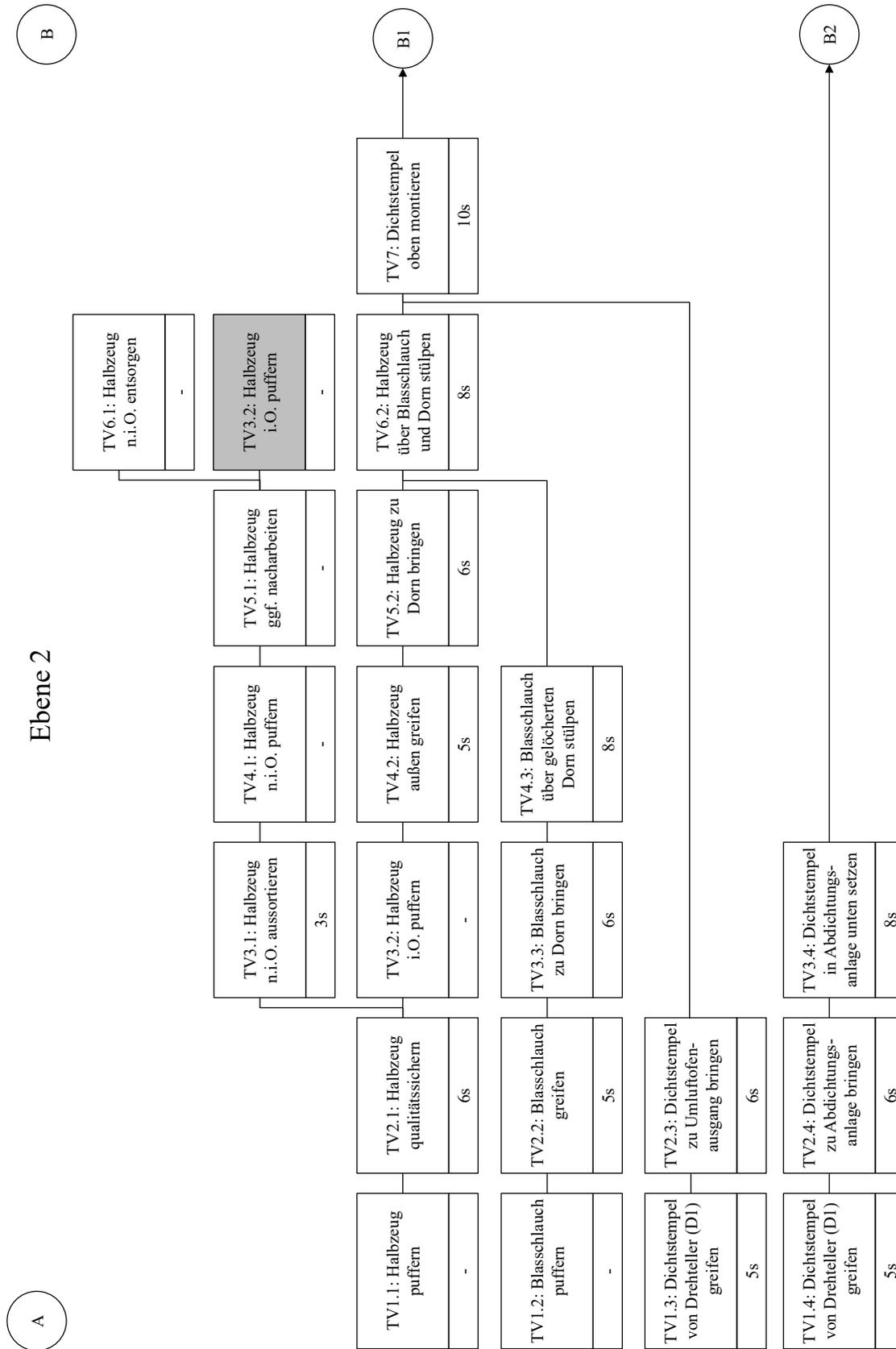


Abb. A-5: Ablaufplanung - Ebene 2 - Teil A

C

Ebene 2

B

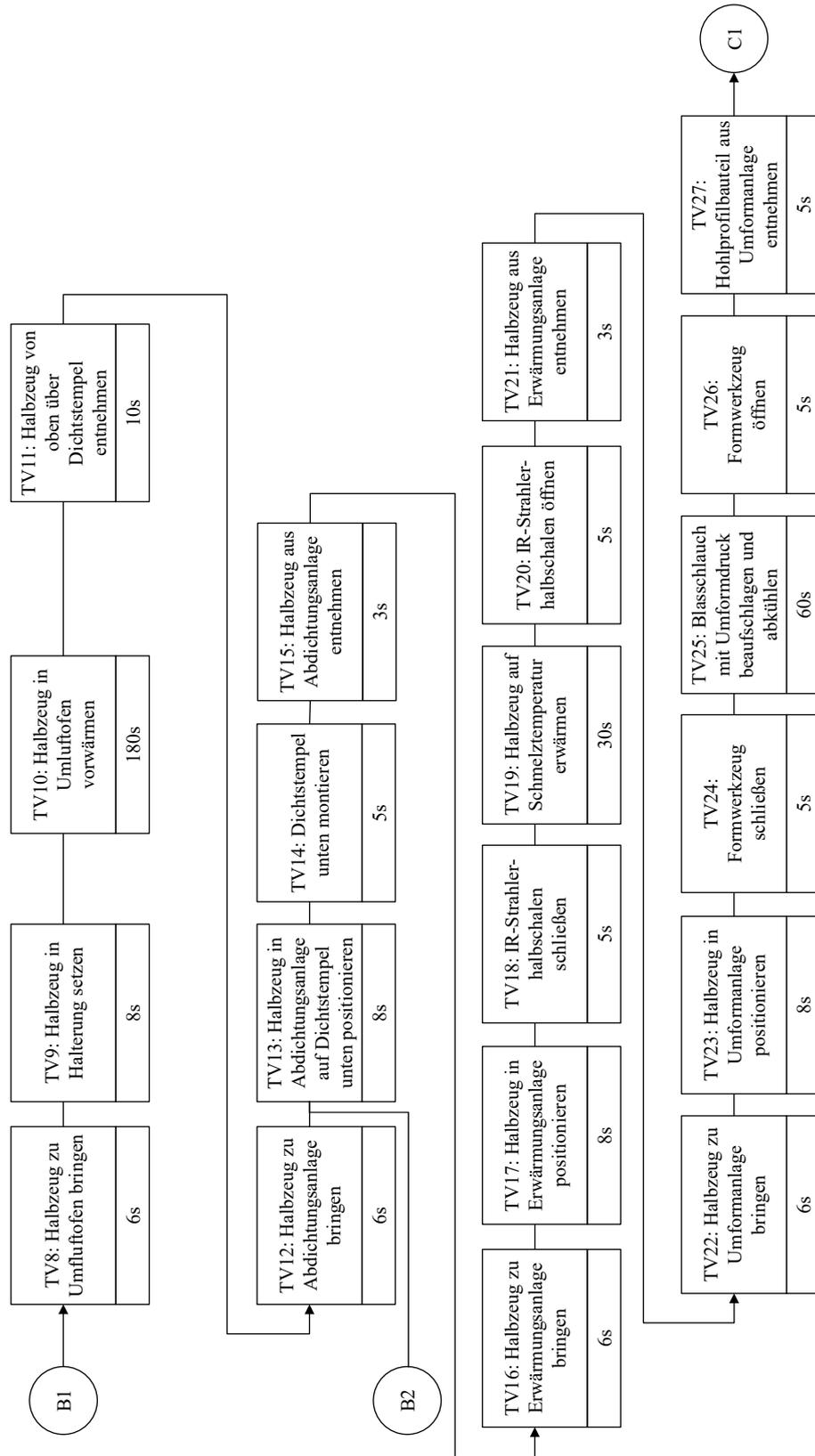


Abb. A-6: Ablaufplanung - Ebene 2 - Teil B

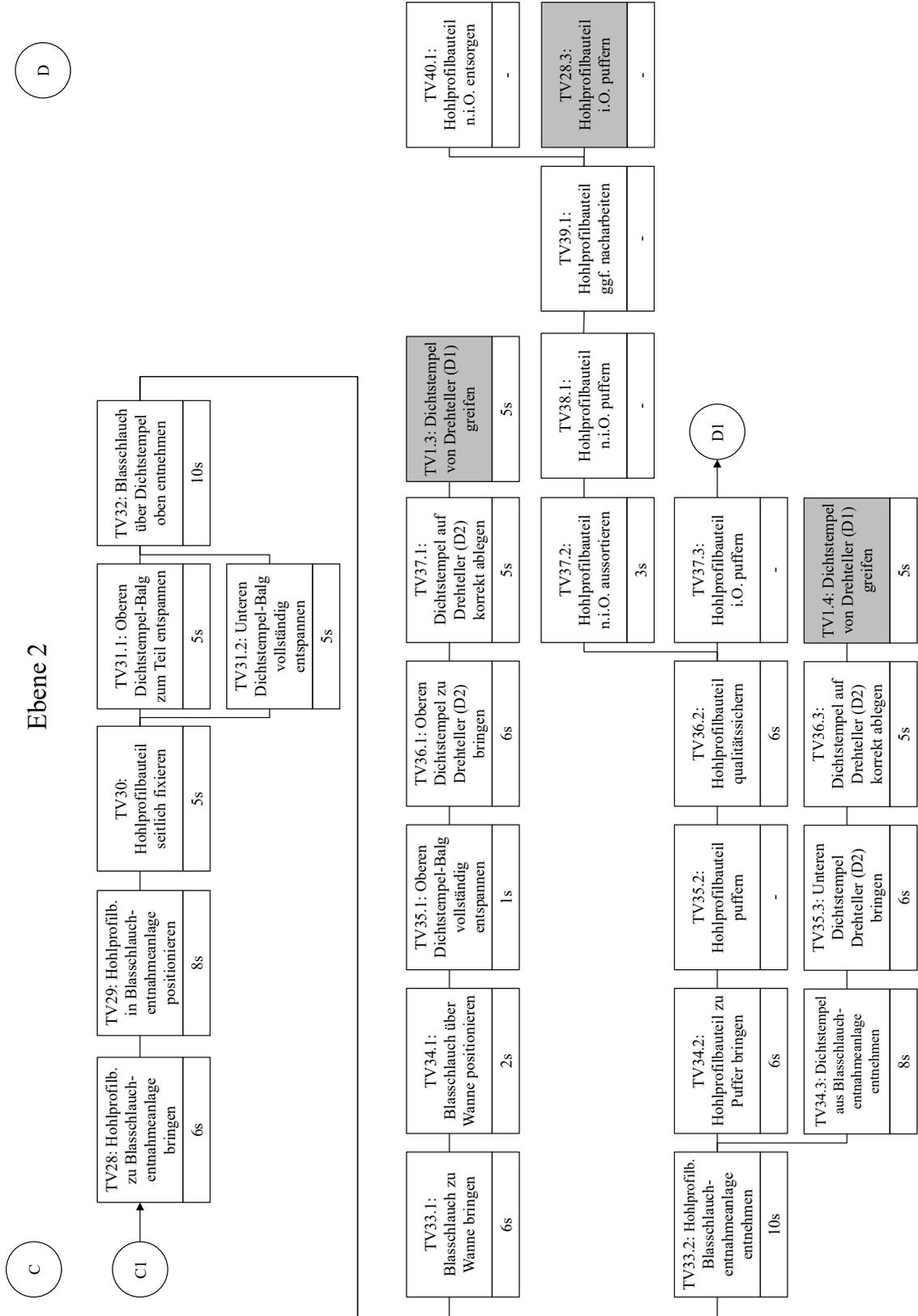


Abb. A-7: Ablaufplanung - Ebene 2 - Teil C

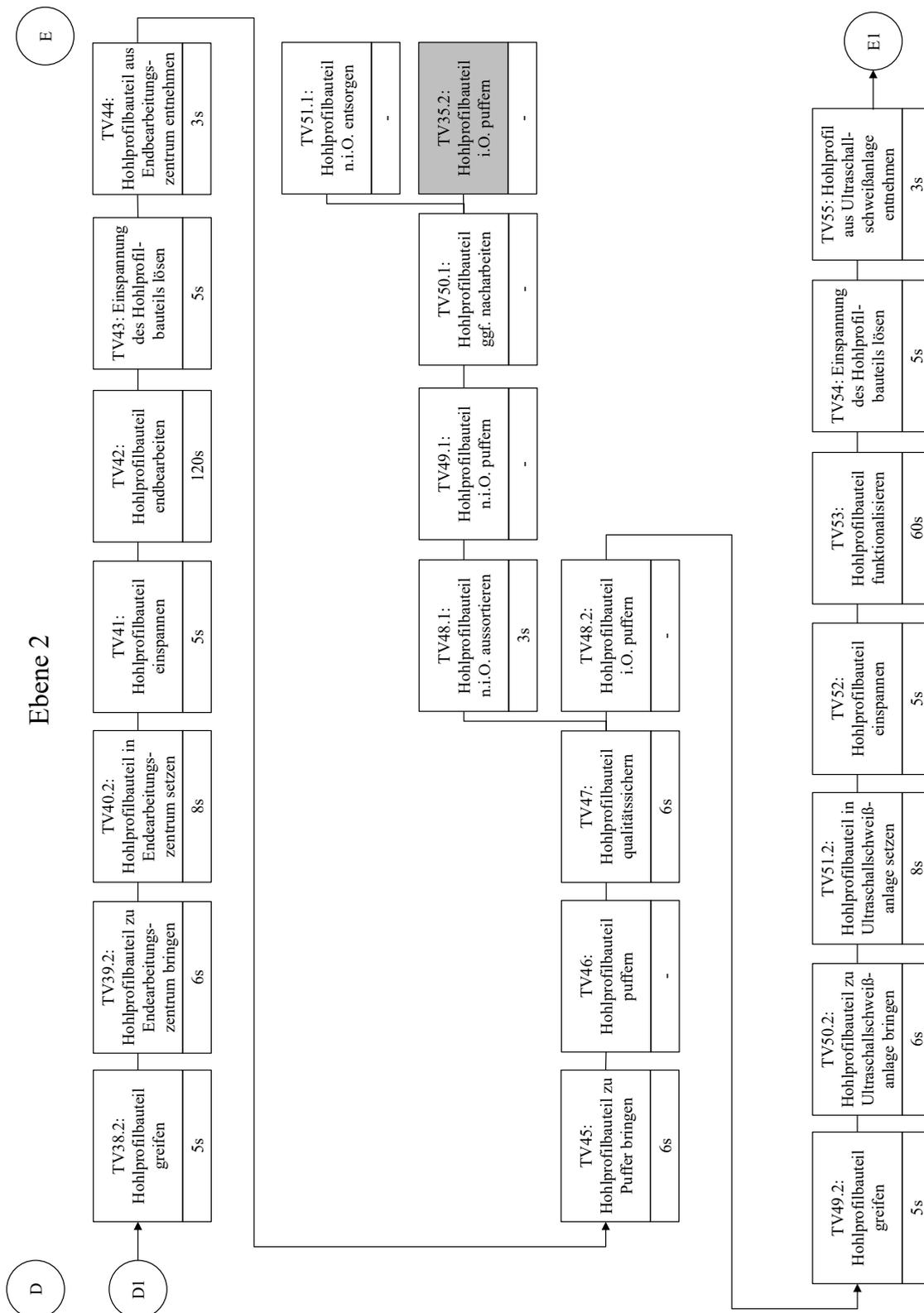


Abb. A-8: Ablaufplanung - Ebene 2 - Teil D

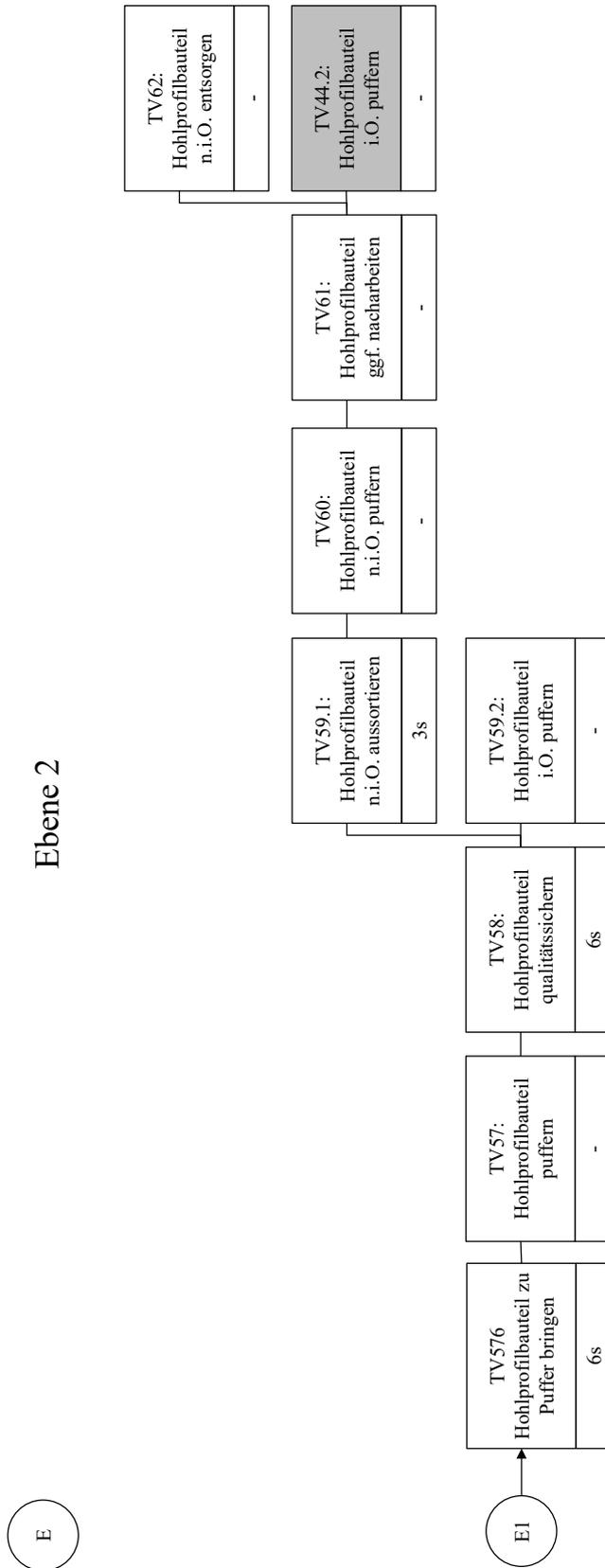


Abb. A-9: Ablaufplanung - Ebene 2 - Teil E

B Veröffentlichungen

Zeitschriftenartikel

- [Z1] C. Stefanziola, E. Ladstätter, and K. Drechsler, “Krafteinleitungselement zur Funktionalisierung von thermoplastischen Faserverbundbauteilen”, *Journal of Plastics Technology*, vol. 12, no. 5, pp. 383–413, 2016.

Konferenzbeiträge

- [K1] C. Stefanziola, E. Ladstätter, K. Drechsler and T. Zimmermann, “New production process for manufacturing continuous fiber-reinforced thermoplastic hollow profile components” in *Proceedings of the 17th European Conference on Composite Materials*, 2016
- [K2] C. Stefanziola, “Joining of an innovative force-application element”, 2nd Joining, Forming and Manufacturing Technologies Conference, GALM, Birmingham, Nov. 2016.

Patentanmeldungen und Patente

- [P1] C. Stefanziola, „Baugruppe aus zwei Faserverbundbauteilen und Verfahren zur Herstellung einer solchen Baugruppe“, Patent DE102013203206A1, Aug. 28 2014
- [P2] C. Stefanziola, „Baugruppe aus zwei Faserverbundbauteilen und Verfahren zu deren Herstellung“, Patent DE102013203207A1, Aug. 28 2014
- [P3] C. Stefanziola, „Baugruppe aus zwei Faserverbundbauteilen sowie Herstellungsverfahren hierzu“, Patent DE102013203208A1, Aug. 28 2014
- [P4] C. Stefanziola and O. Eroglu, „Sonotrode zum Ultraschallschweißen, Ultraschallschweißanlage, Verfahren zum Ultraschallschweißen, sowie Schweißverbindung“, Patent DE102013223166A1, May. 21 2015
- [P5] C. Stefanziola, „Schraubenmutterelement zum Einsetzen in ein Bauteil und Baugruppe“, Patent DE102013224555B4, Jun. 03 2015
- [P6] C. Stefanziola and N. Stutter, „Verfahren zum Reparieren oder Verstärken eines Hohlprofilabschnittes eines Kunststoffprofils“, Patent DE102014200130A1, Jan. 08 2014
- [P7] C. Stefanziola and O. Eroglu, „Verfahren zum Fügen von faserverstärktem Kunststoffmaterial“, Patent DE102014201296A1, Jul. 30 2015
- [P8] C. Stefanziola, M. Hammer und J. Niekerk, „Verfahren zum Herstellen einer Bauteilverbindung“, Patent DE102014216006A1, Feb. 18 2016
- [P9] C. Stefanziola, M. Hammer und J. Niekerk, „Verfahren zum Herstellen einer Bauteilverbindung“, Patent 102014216002.2, Feb. 18 2016

- [P10] C. Stefanziosa, „Sonotrode, Verfahren zum Schweißen einer Kugel sowie Bauteilverbindung“, Patent 102014216002.2, Aug. 13 2014
- [P11] C. Stefanziosa, M. Hammer and J. Niekerk, „Bauteilverbindung und Verfahren zum plastischen Umformen einer Kugel“, Patent DE102014216001A1, Feb. 18 2016
- [P12] C. Stefanziosa, „Verfahren zum Herstellen eines lokal verstärkten Profilbauteils“, Patent DE102014217372A1, Sep. 1 2014
- [P13] C. Stefanziosa, M. Hammer, W. Hahn and J. Niekerk, „Verfahren zum Austauschen eines Abschnitts eines Kunststoffbauteils“, Patent DE102015210869 B3, Aug. 25 2016
- [P14] C. Stefanziosa and M. Pernicka, "Umformwerkzeug und Verfahren zum Umformen eines Halbzeugs für ein Faserverbundbauteil", Patent DE102016208686A1, May. 20 2016.
- [P15] C. Stefanziosa, „Verfahren zum Verbinden eines metallischen Bauteils mit einem Hohlprofilbauteil aus (faserverstärktem) thermoplastischen Kunststoff“, Patent Aktenzeichen 102017204962.6., Mar. 23 2017
- [P16] C. Stefanziosa, „Verfahren zur Funktionalisierung eines Hohlprofilbauteils aus (faserverstärktem) thermoplastischen Kunststoff im Spritzgussverfahren“, Patent Aktenzeichen 102017204964.2, Mar. 23 2017
- [P17] C. Stefanziosa and C. Hierl, "Dichtstempel zum stirnseitigen Abdichten eines Hohlprofils", Patent DE102016209072A1, May. 25 2016.

C Betreute studentische Arbeiten

Im Rahmen der Dissertation wurden die Betreuung der nachfolgend aufgeführten studentischen Arbeiten unterstützt:

- [S1] J. Jung „Strukturauslegung von SMC-Krafteinleitungsstrukturen am Beispiel einer Leichtbau-Domstrebe mit Berücksichtigung von Fertigungsaspekten“, Semesterarbeit in Kooperation mit BMW, Lehrstuhl für Leichtbau, Technische Universität München, Garching bei München, 2014.
- [S2] L. Wiegerling “Infraroterwärmung von endlosfaserverstärkten thermoplastischen Hohlprofilen und deren Auswirkung auf die strukturmechanischen Eigenschaften” Masterarbeit, Lehrstuhl für Leichtbau, Technische Universität München, Garching bei München, 2015 gesperrt bis 2017.
- [S3] C. Hierl “Ermittlung eines geeigneten Dichtstempelkonzeptes für die Innendruckbeaufschlagung von Hohlprofilen aus endlosfaserverstärktem thermoplastischem Kunststoff” Masterarbeit, Lehrstuhl für Carbon Composites, Technische Universität München, Garching bei München, 2015 gesperrt bis 2017.
- [S4] T. Zimmermann “Innendruckumformen von endlosfaserverstärkten thermoplastischen Hohlprofilen” Masterarbeit, Lehrstuhl für Carbon Composites, Technische Universität München, Garching bei München, 2016.
- [S5] F. Peisker “Innendruckumformen von endlosfaserverstärkten thermoplastischen Hohlprofilen” Masterarbeit, Hochschule Anhalt, Anhalt, 2016 gesperrt bis 2021.

Teile des Inhalts folgender Arbeiten haben in die vorliegende Dissertationsschrift Eingang gefunden: [S2], [S3], [S4], [S5]. Die Arbeiten wurden vom Urheber der vorliegenden Abhandlung beauftragt und geleitet.