

IVW - Schriftenreihe Band 63

Institut für Verbundwerkstoffe GmbH - Kaiserslautern

Marcel M. Sommer

Eigenschaftserweiterung von
langfaserverstärkten thermoplastischen
Fließpresshalbzeugen

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <<http://dnb.ddb.de>> abrufbar.

Bibliographic information published by Die Deutsche Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data is available in the Internet at <<http://dnb.ddb.de>>.

Herausgeber: Institut für Verbundwerkstoffe GmbH
Prof. Dr.-Ing. Alois K. Schlarb
Erwin-Schrödinger-Straße
TU Kaiserslautern, Gebäude 58
67663 Kaiserslautern
<http://www.ivw.uni-kl.de>

Verlag: Institut für Verbundwerkstoffe GmbH

Druck: Technische Universität Kaiserslautern
ZBT – Abteilung Foto-Repro-Druck

D 386

© Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, Kaiserslautern 2006

Alle Rechte vorbehalten, auch das des auszugsweisen Nachdrucks, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe (Photographie, Mikroskopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und das der Übersetzung.

Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.

ISSN 1615-021X
ISBN 3-934930-59-X

Eigenschaftserweiterung von langfaserverstärkten thermoplastischen Fließpresshalbzeugen

Vom Fachbereich für
Maschinenbau und Verfahrenstechnik der
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Dipl.-Wirtsch.-Ing. Marcel M. Sommer

aus Gießen

Tag der mündlichen Prüfung: 17. Februar 2006

Vorsitzender:	Prof. Dr.-Ing. R. Renz
Referent:	Prof. Dr.-Ing. P. Mitschang
Koreferent:	Prof. Dr.-Ing. W. Brockmann

D 386

Vorwort

Diese Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter der Institut für Verbundwerkstoffe GmbH (IVW) innerhalb der Abteilung Verarbeitungstechnik Gruppe Presstechnik in der Zeit von 2001 bis Mitte 2005.

In erster Linie danke ich meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Mitschang, für den gewährten Freiraum und die zielführende Fachdiskussion zur Erstellung dieser Arbeit. Der besondere Dank gilt Herrn em. Prof. Dr.-Ing. Manfred Neitzel für die entgegengebrachte Zuversicht und lehrende Erfahrungsteilung. Herrn Prof. Dr.-Ing. Rainer Renz danke ich für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission und für die Übernahme des Koreferates bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Walter Brockmann. Auch den Herren Prof. Dr.-Ing. Alois K. Schlarb und Dr.-Ing. Ralf Schledjewski sei an dieser Stelle für die gute Zusammenarbeit gedankt.

Ein Teil der Arbeit wurde aus Mitteln der Stiftung Innovation für Rheinland-Pfalz (Projekt-Nr. 8312-386261/ 402) finanziert, wofür ich danke. Ebenso haben die kostenlosen Materialbeistellungen verschiedener Unternehmen, im Besonderen der Fact GmbH (Kaiserslautern) und Ticona GmbH (Kelsterbach) sowie auch die industriellen Forschungsaufträge diese Arbeit ermöglicht. Das überaus kollegiale Umfeld innerhalb des Institutes hat das Arbeiten erleichtert und durch das gegenseitige Interesse an den Arbeitsgebieten wurde die inhaltliche Auseinandersetzung gefördert. Dafür sei abteilungsübergreifend allen Kollegen dennoch besonders Dr.-Ing. Jürgen Breitel, Robert Lahr, Luisa Medina, Dr.-Ing. Patrick Rosso, Sebastian Schmeer, Dr.-Ing. Martin Schlottermüller, Jens Schlimbach und Rudi Velthuis gedankt.

Die zur Erstellung dieser Arbeit erforderlichen Versuchsdurchführungen und Materialprüfungen waren nur mit der unermüdlichen Unterstützung von Michael Päßler und Erhard Natter in diesem Umfang möglich. Sie sind gerade im Arbeitsgebiet der Presstechnik auch als kritische Gesprächspartner besonders wertvoll.

Die wissenschaftlichen Hilfskräfte, besonders Mirko Weigand und Gereon Mering, sowie die Studien- und Diplomarbeiter haben durch ihre Arbeitsleistung zur Erstellung dieser Arbeit beigetragen.

Durch die permanente Unterstützung meiner Eltern Ulla und Frank sowie den moralischen Rückhalt auch der Freunde ist all dies erst möglich geworden.

Basel, im März 2006

Marcel M. Sommer

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abstract	IV
Verzeichnis verwendeter Formelzeichen	VI
Abkürzungsverzeichnis	VIII
1 Einleitung	1
1.1 Zielsetzung dieser Arbeit.....	2
1.2 Aufbau der Arbeit	2
2 Fließpresshalbzeuge und -verfahren – Stand der Technik	5
2.1 Aufbau und Herstellung von Fließpresshalbzeugen.....	8
2.1.1 Duroplastische FKV-Halbzeuge	8
2.1.2 Thermoplastische FKV-Halbzeuge.....	11
2.2 Einordnung und Spannungsfelder der Pressverfahren.....	19
2.2.1 Fließpressen im Vergleich zu anderen Pressverfahren - wichtige Prozessgrößen	20
2.2.2 SWOT-Analyse für die FKV-Presstechnik.....	24
2.2.3 Quality Function Deployment –Methode	27
2.2.4 Fazit und Definition der Entwicklungsthemen	30
3 Eigenschaftserweiterung durch halogenfreie Flammhemmung bei LFT ...	32
3.1 Flammhemmung von Thermoplasten.....	33
3.1.1 Halogenhaltige Flammschutzmittel	36
3.1.2 Phosphorverbindungen	37
3.1.3 Hydroxide	38
3.1.4 Antimonoxide (Antimontrioxid, Antimonpentoxid (SbX ₃))	39
3.1.5 Organische Stickstoffverbindungen (z.B. Melamincyanurat).....	40
3.1.6 Zinksulfid	40
3.1.7 Expandierender Graphit	41
3.1.8 Zusammenfassende Übersicht und Flammschutzmittelauswahl zum Einsatz in PP-LFT	41

3.2	<i>Prozessaufbau und LFT-Verarbeitung</i>	43
3.2.1	Masterbatchherstellung	43
3.2.2	LFT-Pressmassen-Aufbereitung	44
3.2.3	Eingesetzte Anlagentechnik	47
3.2.4	LFT-Materialkombinationen und Verarbeitungsparameter	48
3.3	<i>Materialcharakterisierung von LFT-Compounds</i>	51
3.3.1	Bestimmung der Pressarbeit	51
3.3.2	Bestimmung des Brennverhaltens	54
3.3.3	Prüfergebnisse der Materialkombinationen in ausgewählten Brand- tests	59
3.3.4	Mechanische Charakterisierung	63
3.4	<i>Rheologische Untersuchungen und Besonderheiten</i>	64
3.5	<i>Röntgenuntersuchungen zur Faserorientierung</i>	69
3.6	<i>Zusammenfassung zur flammhemmenden Ausrüstung von LFT</i>	77
4	Eigenschaftserweiterung durch verarbeitungstechnische Änderung bei der LFT-Fließpressverarbeitung	79
4.1	<i>Einfaches und doppeltes Pressen</i>	80
4.1.1	Eingesetzte Werkstoffe und Verarbeitungsbedingungen	83
4.1.2	Vorbereitung der Probekörper und Durchführung der Versuche	84
4.2	<i>Prüfergebnisse der Materialkombinationen</i>	87
4.2.1	„Doppelt Pressen“ von reinem Polypropylen	87
4.2.2	„Doppelt Pressen“ von glasfasermattenverstärktem Thermo- plast (GMT)	88
4.2.3	„Doppelt Pressen“ von glasfaserverstärktem LFT	90
4.3	<i>Kombination unterschiedlicher Materialien im „Doppelt Pressen“</i>	97
4.3.1	Mechanische Charakteristik	98
4.3.2	Brennbarkeit	99
4.4	<i>Untersuchungen zu adhäsiven Einflüssen an der Laminatgrenze</i>	101
4.5	<i>Vergleich der Prüfergebnisse mit den Berechnungen der Laminattheorie</i>	105
4.6	<i>Zwischenfazit und potenzieller Nutzen für die Serienfertigung</i>	109
5	Betriebswirtschaftliche Analyse über die Wertschöpfungskette der Eigenschaftserweiterung	111

5.1	<i>Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der Prozesskette Flammhemmung</i>	<i>115</i>
5.2	<i>Wirtschaftlichkeitsbetrachtung des „Doppelt Pressen“-Prozesses</i>	<i>117</i>
6	Zusammenfassung.....	119
7	Literatur.....	121
8	Anhang.....	133

Abstract

Long fiber reinforced plastics with thermoplastic resin were steadily growing with an ongoing success over many industries mainly automotive. Even during economically difficult periods, they increased their output and their market share.

In addition to flow compression molding, semi-finished LFRT in form of granules were introduced to new processes like injection molding.

This work covers two major topics to enlarge the performance of LFRTs. Firstly, it shows a material development, which leads to flame retarded LFRT. Secondly, it presents a new process method to improve especially dynamic mechanical properties by laminating two compression molded sheets with no additional equipment.

One major restriction for further applications is represented by flammability of thermoplastics. This thesis gains for a new potential. Encountering future legislative restrictions a combination of halogen-free flame retardant and LFRT based on polypropylene has been developed. Test results match the requirements in accordance to flammability test UL 94 V0 (2.6 mm). Furthermore the mechanical properties achieved a similar performance as standard-LFRTs. The polymer flow in compression molding provokes a fiber orientation parallel to the direction of the flow front development. A x-ray analysis in combination with a fiber orientation analysis show, that rheology has a strong influence on the flow front development, fiber orientation and compression work needed.

One advantage of flow compression molding is the free option in placing the polymer melts in the cavity. The common mold design with male and female mold without slides allows changing part thickness by different polymer melt volumes charged in the cavity. This allows to proceed the compression molding process twice without demolding the first part. On a flat panel, the process of laminating two sheets by compression molding is demonstrated. A first panel gets over molded by a second polymer melt. This laminate provides a better performance than a singular molded panel of the same thickness.

The higher substrate's temperature the better is the adhesion of the first to the second layer. Additionally, the best adhesion is achieved in the area of the second polymer melt cavity placement. Furthermore an optimum in mechanical properties can be obtained utilizing the same resin for the first and the second layer. A more advanced

material is shown with the combination of a standard-LFRT layer and a flame retarded layer.

Calculations show, that the flame retardancy of LFRT on polypropylene can be economically advantageous in comparison to the utilization of higher flame resistant polymer for large parts. Nevertheless for each specific geometry as well as for certain mechanical demands an evaluation on the best material to fit has to be carried out.

This work shows economically reasonable options either to improve the mechanical performance and to enlarge materials properties by flame retardancy or to combine both.

Verzeichnis verwendeter Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Bedeutung
A	[mm]	Probenlänge
A_t	[€]	Investitionsausgabe
C'	[MPa]	Steifigkeitsmatrix
C_{ij}	[MPa]	Komponenten der Matrix
C		Verschiedene Konstanten
<i>E-Modul</i>	[MPa]	Elastizitätsmodul
E_{11}, E_{22}	[MPa]	E-Modul längs bzw. quer zur Faserorientierung
E_F, E_M	[MPa]	E-Modul der Faser bzw. der Matrix
E_t	[€]	Einzahlungsüberschüsse
F	[N]	Kraft
F_i	[kN]	Istkraft
FIGRA	[W/S]	Maximum der Energiefreisetzung/ Zeit bis Erreichen des Maximums
F	[mm]	Fügeflächenlänge:
F_s	[kN]	Sollkraft
G	[MPa]	Schubmodul
h	[mm]	Pressspalt
\dot{h}	[mm/s]	Schließgeschwindigkeit
K	[mm]	Kerbbreite
K	[€]	Gesamtkosten
K_f	[€]	Fixkosten
k_v	[€]	Variable Stückkosten
KW	[€]	Kapitalwert
L1	[mm]	Schichtdicke Laminat 1 Zugscherprobe
L2	[mm]	Schichtdicke Laminat 2 Zugscherprobe
L/D-Verhältnis	1	Quotient aus Schneckenlänge zu -durchmesser
LG	[mm]	Probendicke Zugscherprobe
LOI	[%]	Limiting Oxygen Index, Sauerstoffkonzentration in einem Sauerstoff-Stickstoff-Gemisch
MFI	[g/10min ⁻¹]	Melt-Flow-Index
MVR	[cm ³ /10min ⁻¹]	Melt-Volume-Rate
P	[kW]	Leistung
q	[%]	Zinssatz
r	[mm]	Kreisschreibendurchmesser
\dot{r}	[mm/s]	Ausbreitungsgeschwindigkeit
s	[mm]	Weggröße
S'	[MPa]	Nachgiebigkeitsmatrix
SMOGRA	[m ² /s ²]	Maximum der Rauchdichteentwicklung/ Zeit bis Erreichen des Maximums
t	[s]	Zeit
T	[Jahre]	Gesamtzeit - Zinsberechnung
T	[MPa]	Transformationsmatrix
T_g	[°C]	Glasübergangstemperatur
T_m	[°C]	Schmelztemperatur

THR	[MJ]	Freigesetzte Energie in den 10 min nach Start der Beflammung
TSP	[m ²]	Freigesetzte Rauchmenge in den 10 min nach Start der Beflammung
V	[mm ³]	Volumen
v _i	[mm/s]	Ist-Geschwindigkeit
v _s	[mm/s]	Soll-Geschwindigkeit
W	[kJ]	Pressarbeit
x	[Stück]	Menge
Δ		Differenzoperator
ϑ _s	[°C]	Matrixschmelztemperatur
η	[Pas]	Viskosität
ϑ _w	[°C]	Werkzeugtemperatur
v ^M	[1]	Querkontraktion
π	[1]	Kreiszahl
φ	[%]	Faservolumengehalt
σ	[MPa]	Spannung

Abkürzungsverzeichnis

Abk.	Bedeutung
Abk.	Abkürzung
Afa	Absetzung für Abnutzung - Abschreibung
Al(OH) ₃	Aluminiumhydroxid
BMC	Bulk Molding Compound
bzw.	beziehungsweise
Cl	Chlor
CO ₂	Kohlendioxid
D-LFT	Direkt-LFT
DIN	Deutsches Institut für Normung
DMC	Dough Molding Compound
DP	Duroplast
DP-FKV	duroplastische(r) Faser-Kunststoff-Verbund(e)
ECE	Economic Commission for Europe
etc.	Et cetera
FKV	Faser-Kunststoff-Verbund(e)
FMVSS	Federal Motor Vehicle Safety Standard
FR	Flammhemmend ausgerüstet (flame retarded)
FR-GF-PP	Flammhemmend ausgerüstetes glasfaserverstärktes Polypropylen
FSM	Flammschutzmittel
GF-PP	Glasfaserverstärktes Polypropylen
GMC	Granulated Moulding Compounds
GMT	Glasmattenverstärkter Thermoplast
ggf.	gegebenenfalls
Gew.-%	Gewichtsprozent
H ₂ O	Wasser
HoQ	House of Quality
ICE	International Electrotechnical Commission
ISO	International Organization for Standardization
IT	Informationstechnologie
KTL	Kationische Tauchlackierung
L/D-Verhältnis	Quotient aus Schneckenlänge zu -durchmesser
LCM	Liquid Composite Molding
LE	Low Emission
FIBORAS	Faserorientierungsanalyseprogramm
LFRT	Long fiber reinforced thermoplastics
LFT	Langfaserverstärkte(r) Thermoplast(e)
Mg(OH) ₂	Magnesiumhydroxid
MDF-Platten	Mitteldichte Faserplatten
N ₂	Stickstoff
NH ₃	Ammoniak
O ₂	Sauerstoff
P	Phosphor
p.a.	per annum; pro Jahr
PA	Polyamid
PBT	Polybutylenterephthalat
PC	Polycarbonat
PE	Polyethylen

PEEK	Polyetheretherketon
PEI	Polyetherimid
PES	Polyethersulfon
PET	Polyethylenterephthalat
PKW	Personenkraftwagen
PMC	Pelletized Moulding Compounds
POM	Polyoxymethylen
PP	Polypropylen
PPE	Polyphenylether
PP-GF30	Polypropylen, zu 30 Gew.-% glasfaserverstärkt
PPS	Polyphenylensulfid
PS	Polystyrol
PSU	Polysulfon
PTFE	Polytetrafluorethylen
PVC	Polyvinylchlorid
PVDF	Polyphenylfluorid
QFD	Quality Function Deployment
ROI	Return on Investment
RT	Raumtemperatur
RTM	Resin Transfer Molding
SBI-Test	Single Burning Item Test
SbX ₃	Antimonpentoxid
SMC	Sheet Molding Compound
SCRIMP	Patentiertes Harzinjektionsverfahren
Stabw	Standardabweichung
SWOT	Strength, Weakness, Opportunities and Threats entspricht Chancen, Risiken, Stärken und Schwächen-Analyse
TP	Thermoplast
TP-FKV	thermoplastische(r) Faser-Kunststoff-Verbund(e)
UD	unidirektional
UIC	Union internationale des chemins de fer
UP	Ungesättigte Polyester
UL	Underwriters' Laboratories Inc.
UTAC	Union Technique de l'automobile du motorcycle & du cycle
VARTM	Vacuum assisted resin transfer molding - Harzinjektionsverfahrensvariante
ZnS	Zinksulfid

1 Einleitung

Pressverfahren zählen zu den etablierten Verarbeitungstechniken zur Herstellung von Bauteilen aus Faser-Kunststoff-Verbunden (FKV). Die weite Verbreitung ist auf die hohe Wirtschaftlichkeit dieses Verfahrens und der Prozesskette insgesamt zurückzuführen, weshalb gerade der Industriebereich „Automotive“ dieses Verfahren intensiv nutzt, da technische Anforderungen hierdurch gut umgesetzt werden. Das Fließpressverfahren weist den höchsten Effizienzgrad auf, da die Halbzeugaufbereitung, Transformation und die Urformgebung im einem Pressprozessschritt in Verbindung mit sehr kurzen Zykluszeiten zeitnah aufeinander abfolgen. Es schließen sich lediglich Nachbearbeitungs-, Montage- oder Oberflächenveredelungsschritte an. Das Umformen bzw. Thermoformen, basierend auf dem Einsatz von so genannten Organoblechen, erlaubt eine belastungsgerechte Einstellung der Faserorientierung. Diesem technologischen Vorteil gegenüber dem Fließpressverfahren, der unter Zuhilfenahme der Tailored-Blanks-Technologie mit lokalen Verstärkungen und Aufdickungen erweitert wird, steht der wirtschaftliche Nachteil aufgrund höherer Halbzeugkosten entgegen. Doch gerade die kurzen Zykluszeiten der Thermoplastverarbeitung stellen die wirtschaftliche Grundlage der weiteren Verbreitung dar, und so überwinden fließgepresste thermoplastische FKV (TP-FKV) den Nachteil diskontinuierlicher Faserverstärkung und anisotroper Faserorientierung aufgrund der Vorzugsrichtung in Fließrichtung.

Im Rahmen dieser Arbeit werden ausschließlich Untersuchungen mit Thermoplasten vorgestellt. Obwohl TP-FKV im Vergleich zu den duroplastischen FKV (DP-FKV) hinsichtlich des Absatzes nur eine untergeordnete Rolle spielen, zeichnen sie sich durch Recyclingfähigkeit, nahezu unbegrenzte Lagerfähigkeit und Schweißbarkeit aus. Diese Eigenschaften gewinnen bei sich verschärfenden legislativen Rahmenbedingungen zunehmend an Bedeutung. Hinsichtlich Steifigkeit und Festigkeit sind TP, insbesondere die Massen- oder Standardwerkstoffe, den Duroplasten (DP) unterlegen [1].

Bei etablierten Verarbeitungsverfahren kann Konkurrenzfähigkeit zu anderen Verfahren entweder durch zusätzlich realisierbare, angepasste Produkteigenschaften oder durch Effizienzsteigerung erreicht werden. Doch auch diese zusätzlichen oder veränderten Eigenschaften müssen über die Nutzungsdauer einen monetären Nutzen bieten, um vom Markt angenommen zu werden. Hierzu bestehen vielfältige Möglichkeiten zur Zielerreichung, wie z.B. neue Produkteigenschaften durch Additivierung,

kostengünstigere Fertigungsprozesse durch Zusammenführen von Prozessschritten und Ausschussreduzierung mittels automatisierter Fertigungssteuerung und IT-unterstütztem Qualitätsmanagement [2].

Langfaserverstärkte Thermoplaste können potenzielle Märkte und interessante Anwendungsgebiete, wie Innenausstattungen von Fahrzeugen, Strukturteile im Bauwesen, Gehäuse u.ä. von Elektrogeräten, erschließen, sobald sie die hohen Brandschutzauflagen einhalten. Die am Markt verfügbaren LFT erfüllen diese Anforderungen derzeit nicht. Eine (halogenfreie) flammhemmende Ausrüstung der Matrix stellt für viele Thermoplaste eine wirtschaftlich nicht zu überwindende Hürde dar und ist für DP seit langem keine entwicklungstechnologische Herausforderung mehr [3]. Diese Additivierung von Thermoplasten im schmelzflüssigen Zustand kann sich aufgrund des verlängerten Prozesses für TP-FKV wirtschaftlich und technisch nachteilig auswirken.

In den Grundeigenschaften sind (LFT) insbesondere auf Matrixbasis von Polypropylen (PP) seit langem Forschungs- und Untersuchungsobjekt. Entsprechend liegen umfassend Ergebnisse vor. Prozessseitig zielen die Untersuchungen bei sonst gleichartigen Eigenschaften auf eine Kostenreduzierung ab, oder sie versuchen, verschiedene Materialien oder Wertschöpfungsstufen zu integrieren, um ein erweitertes Eigenschaftsspektrum zu bieten, wie z.B. Festigkeit, Steifigkeit oder Zähigkeit [4].

1.1 Zielsetzung dieser Arbeit

Die vorliegende Arbeit soll einen Beitrag leisten, den langfaserverstärkten Thermoplasten auf der Matrixbasis Polypropylen als Werkstoff technisch und wirtschaftlich effizienter einsetzbar zu machen. In der Analyse des üblichen Eigenschaftsspektrums werden die Defizite aufgezeigt und hieraus zusätzlich erstrebenswerte Funktionen für den Werkstoff LFT-PP abgeleitet, welche sich dabei gegenseitig unterstützen sollen. Im Verlauf der Arbeit werden die Umsetzung der Ziele vorgestellt und abschließend die Einzelergebnisse in der Kombination dargestellt. Die Ergebnisse sollen der FKV-Bauteilherstellung im Fließpressverfahren künftig neue Absatzchancen eröffnen.

1.2 Aufbau der Arbeit

Mit dieser Arbeit werden zwei Wege zur Zielerreichung einer flammhemmenden Ausrüstung von FKV-Bauteilen aufgezeigt. Einerseits wird mittels Compoundierung die flammhemmende Ausrüstung von LFT beschrieben. Andererseits bietet eine verfahren-

renstechnische Änderung verbesserte mechanische Eigenschaften und durch einen Schichtaufbau des FKV zugleich eine flammhemmende Ausrüstung.

Zunächst werden das Fließpressverfahren und die dabei eingesetzten Werkstoffe auf ihre bekannten Eigenschaften hin analysiert und eingeordnet. Die Analyse zeigt im Ergebnis ein Stärken- und Schwächenprofil der derzeit eingesetzten Werkstoffe und leitet daraus Chancen und Risiken für die Zukunft ab. Eine Weiterentwicklung kann nur über die Erreichung von Vorteilen in der Prozesskette oder in der Nutzungsdauer erzielt werden. Mit dieser Arbeit werden zwei Wege aufgezeigt, die zudem auch kombinierbar sind.

So ist dies einerseits die flammhemmende Ausrüstung von LFT, basierend auf einer werkstofflichen Veränderung durch Additivierung und Compoundierung. Die Herausforderung liegt dabei in der Einbringung einer halogenfreien Flammhemmung für den bereits unter normalen Umgebungsbedingungen gut brennbaren Matrixwerkstoff Polypropylen. Die Halogenfreiheit wurde als zu integrierendes Ziel definiert, um einen Konflikt mit der sich zunehmend verschärfenden Umweltgesetzgebung zu vermeiden, die zum Teil in der für LFT bedeutenden Automobilindustrie bereits umgesetzt wurde [5]. Hierzu werden die üblichen Additive hinsichtlich der Einsetzbarkeit im Anwendungsgebiet kategorisiert und auf die Verarbeitungsfähigkeit unter der Zielrestriktion vergleichbarer mechanischer Eigenschaften untersucht und entwickelt.

Andererseits wird mit einer verfahrenstechnischen Ablaufänderung im Fließpressprozess eine definierte Faserorientierung sowie eine lastfallabhängige Steigerung von Festigkeit und Energieaufnahmevermögen erreicht. Dabei ist der Pressarbeitschritt zweifach durchzuführen, doch im Hinblick auf einen geschlossen, wertstofflichen Kreislauf wird dargestellt, wie diese Veränderung sowohl ökologisch als auch ökonomisch und auch technisch sinnvoll ist.

In der Folge werden diese Eigenschaftserweiterungen erstmals miteinander kombiniert. Dabei wird ein Laminataufbau gewählt, der einerseits mit einer flammhemmenden Schicht und andererseits mit einer Faserverstärkung ausgerüstet ist.

Schließlich werden die vorgeschlagenen technischen Lösungen ökonomisch analysiert. Diese Analyse ist hauptorientiert prozessorientiert und schließt auch das Potenzial zur Integration in ein typisches Fließpressbauteil ein. Es erfolgt ein kostenkalkulatorisches Benchmark, das die Entwicklungsergebnisse zu den derzeit marktüblichen Lösungen abgrenzt und zu Grenzkosten betriebswirtschaftlich ins Verhältnis stellt.

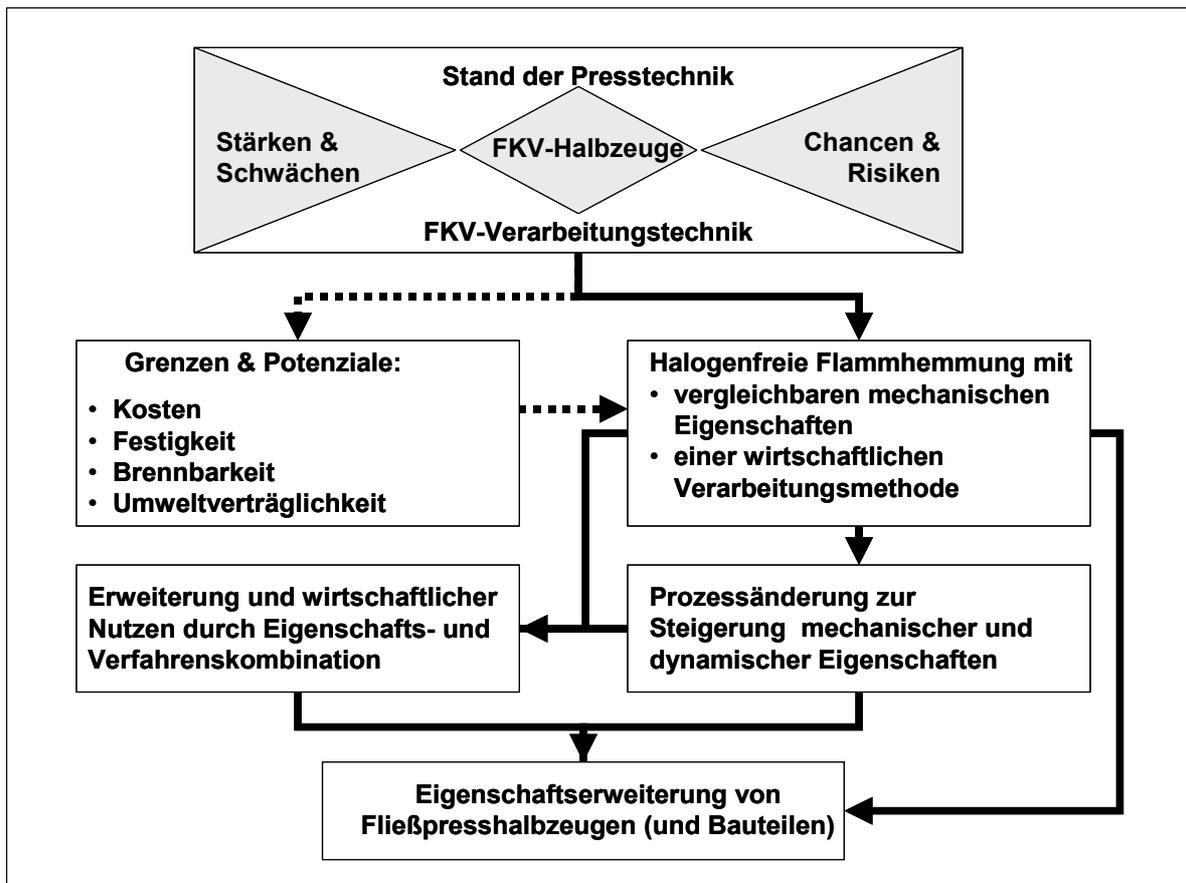


Bild 1.1: Vorstellung von Aufbau und Zielsetzung der Arbeit

2 Fließpresshalbzeuge und -verfahren – Stand der Technik

Die Presstechnik ist eine vielseitig einsetzbare Transformationsprozesstechnik zur Herstellung von Bauteilen aus faserverstärkten Kunststoffen, auch Composites genannt. Das Zusammenführen der wesentlichen Komponenten (Faser und Matrix) vom Rohstoff in Verbindung mit dem (Weiter-) Verarbeitungsprozess hin zur Herstellung eines Faser-Kunststoff-Verbund-Bauteils stellt Bild 2.1 dar.

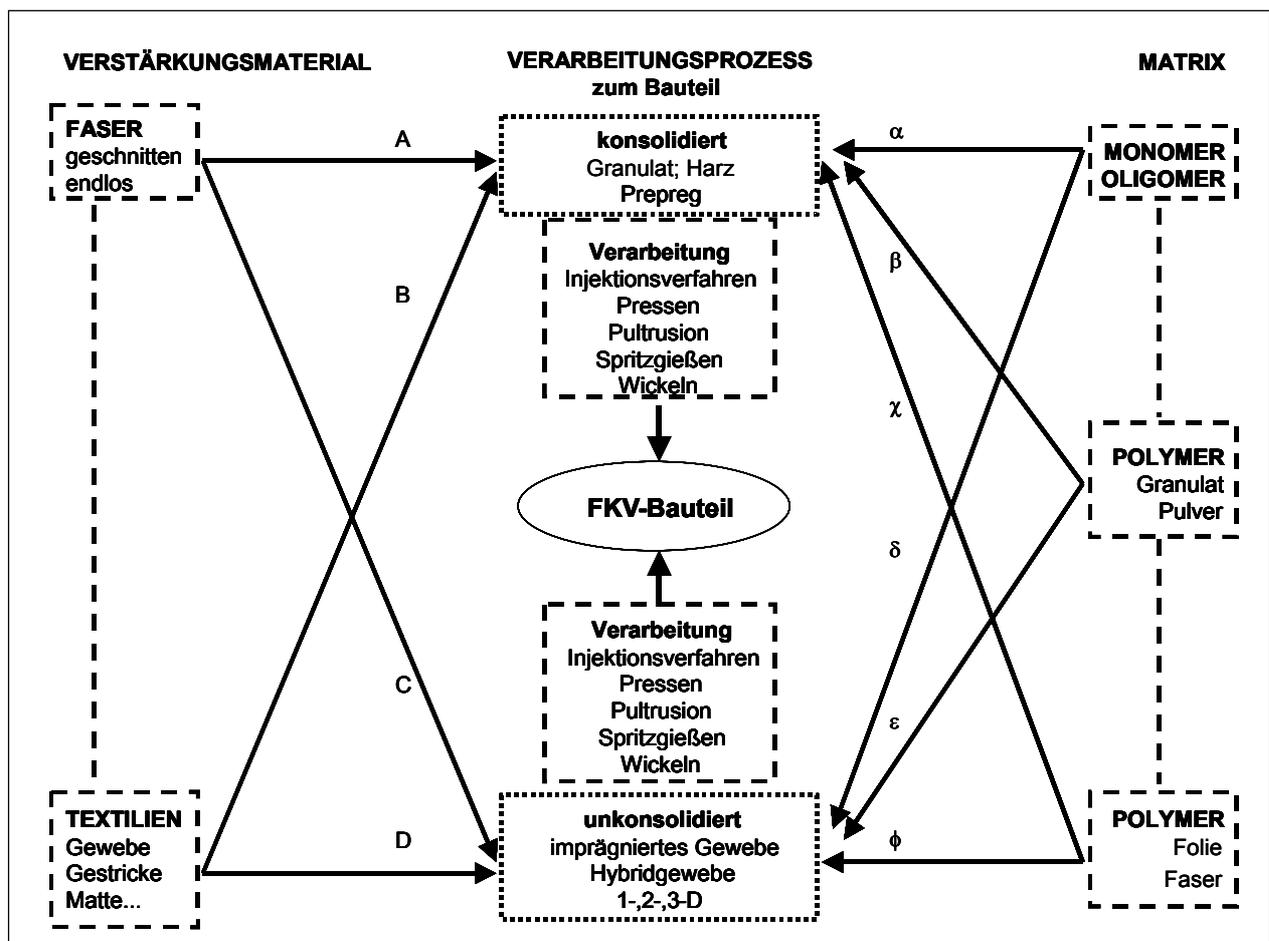


Bild 2.1: Komponenten von Faser-Kunststoff-Verbunden und deren Verarbeitungsprozesse [6]

Diese Übersicht besitzt Gültigkeit für die verfügbaren Verbundsysteme und deren Verarbeitungstechniken; sowohl für duroplastische als auch thermoplastische Verbundwerkstoffe [7]. Die presstechnische Verarbeitung stellt innerhalb der vorgestellten Vielfalt nur eine Variante zur Herstellung von FKV dar. Der stetig steigende Wettbewerbs- und Kostendruck führt zu Weiterentwicklungen.

Aus kostengünstigen Rohstoffen werden mittels teilweise komplizierter und aufwendiger Fertigungsanlagen direkt - unter Umgehung traditioneller Halbzeug-

fertigungsstufen - FKV-Bauteile gefertigt. Als Beispiel ist das Fertigungsverfahren des Fließpressens von Bauteilen mit GMT zu nennen, das teilweise durch die Verarbeitung mit LFT-Stäbchengranulat oder auch durch das Direkt-LFT-Verfahren substituiert wurde [8, 9, 10, 11]. In Verbindung mit Bild 2.1 liefert die Tab. 2.1 eine Übersicht, die Auskunft über die Kombinationen zur Herstellung von FKV gibt.

Tab. 2.1: Möglichkeiten zur Herstellung von Faser-Kunststoff-Verbunden [6]

Kombinationen für Faser-Matrix-Verbunde					
1) Verfahren; 2) Halbzeug; 3) Endprozess					
	A	B		C	D
α	1) Nassimprägnierung; RTM, Faserspritzen; Handlaminiern 2) Duroplastisches Prepreg 3) Fließpressen, Autoklaventechnik, Heiß- und Kalthärtung	1) Nassimprägnierung; RTM, Handlaminiern, Preform-LCM 2) Duroplastisches Prepreg 3) Heißpressen, Autoklaventechnik Heiß- und Kalthärtung	δ	1) Kontinuierliches „Prepreg“ 2) Duroplastisches Prepreg, SMC 3) Kalthärtung, Wickeln, Autoklaventechnik, Fließpresstechnik	1) Textiltechnische Strukturen, Filamentbündelimpregnierung 2) Duroplastisches Prepreg, UD-SMC 3) Heißpressen, Kalthärtung, Wickeln, Autoklaventechnik
β	1) Papiermacherverfahren, Pulverimprägnierung, Schmelzimprägnierung, Doppelbandpressen 2) Stäbchengranulat, Bänderchen, GMT 3) Spritzgießen, Fließpressen, Extrusion, Wickeln	1) Pulverimprägnierung, Schmelzimprägnierung 2) Organoblech-Vorstufe; 3) Doppelbandpressen, Thermoformen	ε	1) Roving und Polymer; 2) Direktverfahren, D-LFT 3) Fließpressen, Spritzgießen, Wickeln	1) Pulverstreuung; 2) Mattenhalbzeug 3) Doppelbandpressen, Thermoformen
χ	1) Hybridfaserablegen, -gewebe (Preforming); 2) Thermoplastische Preform, Matte 3) Thermoformen, Wickeln, Autoklaventechnik, Tapelegen	1) Doppelbandpressen, -gewebe (Preforming); 2) Organoblech 3) Thermoformen, Autoklaventechnik	ϕ	1) textiltechnische Strukturen, Hybridgewebe 2) Hybridmatte, -vlies, -gewebe 3) Pressen, Thermoformen, Autoklaventechnik	1) Textiltechnische Strukturen, Hybrid-Filamentbündel, -gewebe (Preforming) 2) Thermoplastische Preform, Matte 3) Thermoformen, Wickeln, Autoklaventechnik, Tapelegen

Die Vielseitigkeit, sowohl bei der Herstellung als auch in der Verwendung von FKV-Bauteilen, bildet die Grundlage des Markterfolges, der sich in den Produktionszahlen widerspiegelt. Bis zum Jahr 2001 entwickelte sich die Produktionsmenge für DP- und TP-FKV mit einer Steigerung von bis zu 10 % jährlich. Jedoch war auch die FKV-Industrie mit ihren Absatzgebieten von den Ereignissen in 2001 und der damit einhergehenden wirtschaftlichen Verunsicherung betroffen.

Bild 2.2 zeigt die Entwicklung der Gesamtproduktionsmengen, die bis zum Jahr 2000 nahezu linear anwuchsen (Liniendarstellung), in den beiden Folgejahren stagnierten,

dann wieder wuchsen und die im Jahr 2005 mit 1,084 Mio. Tonnen ein neues Maximum erreicht haben. Die Anteile der jeweiligen Produktions- bzw. Verarbeitungsverfahren zeigen bei dieser Skalierung zunächst keine signifikante Veränderung (Säulendarstellung). Ausnahmen vom allgemeinen Trend bilden die Kategorien Pressen/RTM und GMT/LFT. Diese sind über die beiden schwächeren letzten Jahre hinweg weiter gewachsen und erreichten ein neues Allzeit-Maximum. Gegenüber dem Jahr 1999 konnte im Jahr 2003 Pressen/RTM seinen Anteil auf 10 % verdoppeln und die Kategorie GMT/LFT immerhin noch den Anteil an der Gesamtmenge um die Hälfte auf 5,5 % vergrößern. Diese Veränderung lässt sich mit Blick auf die Absatzgebiete begründen. Zu fast gleich großen Anteilen stellen das Bauwesen (34 %) und das Transportwesen (33 %) die größten Verbraucher dar, gefolgt von der Sport- und Freizeitindustrie (18 %) und dem Elektrobereich (11 %) [12, 13]. Im Straßenfahrzeugbau werden zunehmend die Anforderungen der Altautoverordnung umgesetzt, die bis zum Jahr 2015 eine 85 prozentige werkstoffliche Verwertung fordert, indem vermehrt thermoplastische Werkstoffe (GMT/LFT) eingesetzt werden [14].

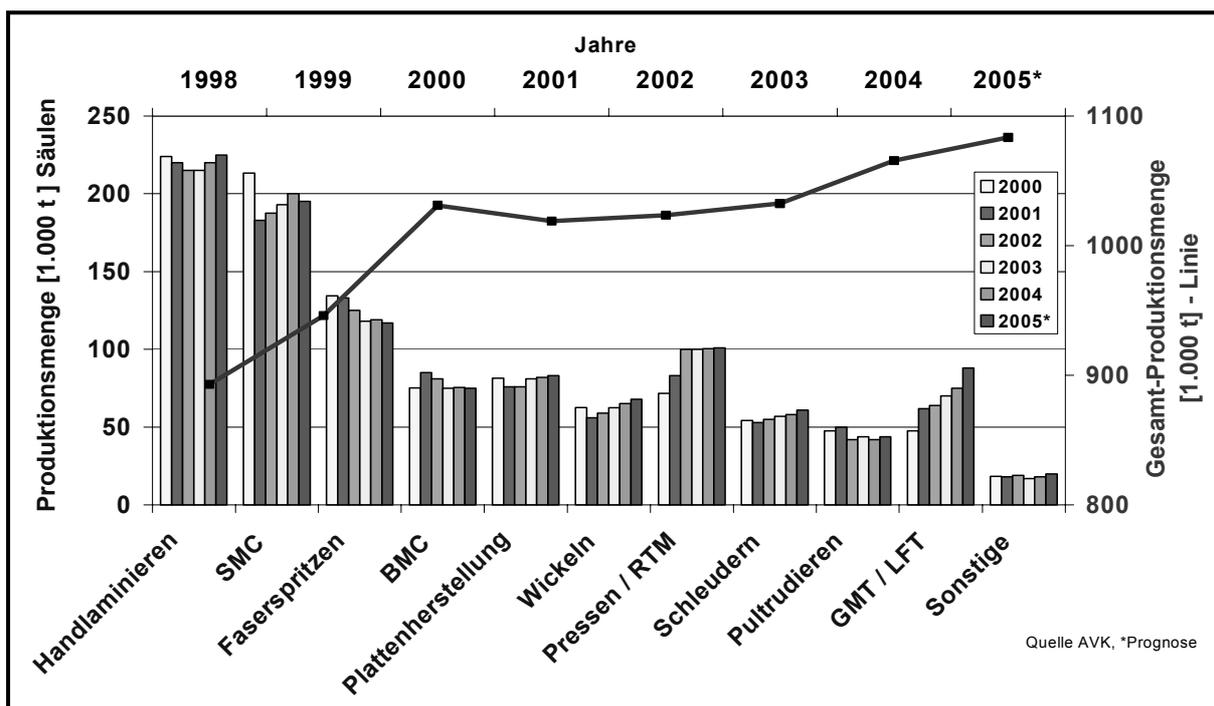


Bild 2.2: Entwicklung der Gesamt-FKV-Produktionsmenge (Linie) und der Anteil der verschiedenen Verfahren daran (Säulen) [15, 16, 17, 18]

Es dominieren derzeit noch immer duroplastische Matrices den FKV-Markt, die wiederum auch das Verarbeitungsverfahren bestimmen. So werden zu mehr als der Hälfte duroplastische Matrices in den Verfahren Handlaminieren (21 %), SMC (19 %), Faserspritzen (12 %) und BMC (7 %) verarbeitet. Die sich verschärfende

Umweltgesetzgebung begründet auch die Verschiebung von Anteilen der offenen Verfahren hin zu geschlossenen und automatisierten Verfahren (RTM).

Die Preformtechnik zur Herstellung textiler Verstärkungsstrukturen sowie die verbesserte Prozesssteuerung bzw. -kontrolle haben zu einer Effizienzsteigerung geführt, so dass nun mehrere tausend Bauteile im Mehrschichtbetrieb pro Werkzeug und Jahr in RTM-Verfahren hergestellt werden können [19, 20]. Zählt man die einzelnen Verfahrensanteile zusammen, die unter Verwendung der Presstechnik Bauteile herstellen, so ergibt sich ein Anteil von fast 40 %. Dieser hohe Anteil unterstreicht die Bedeutung von presstechnischen Verarbeitungsverfahren.

2.1 Aufbau und Herstellung von Fließpresshalbzeugen

Im Fließpressverfahren werden derzeit noch am häufigsten vorimprägnierte Halbzeuge eingesetzt, sofern es sich beim späteren Verarbeitungsverfahren nicht um ein sogenanntes Direktverfahren handelt [21, 22]. Als Matrix werden im Fließpressverfahren sowohl duroplastische als auch thermoplastische Kunststoffe eingesetzt.

2.1.1 Duroplastische FKV-Halbzeuge

Fließpresshalbzeuge mit duroplastischer Matrix sind meist vorimprägnierte, flächige Halbzeuge und werden seit ca. 1960 eingesetzt. Den Ausgangspunkt bildete die Fa. Boeing. Sie verwendete unidirektional verstärkte duroplastische Harze für die Herstellung von Strukturteilen in Flugzeugen. Diese neue Werkstoffgruppe hat sich in der Folgezeit sehr schnell durchgesetzt und dominiert auch heute noch beim Einsatz von Faserverbundwerkstoffen in der Luft- und Raumfahrt. Für die in der Luft- und Raumfahrt kleineren Stückzahlen sind diese Halbzeuge vorteilhaft. Sie stehen als Rollenwarenhalbzeug zur Verfügung und müssen entsprechend geometrisch konfektioniert und auf einen Werkzeugträger appliziert werden. Hierzu gibt es bereits seit längerer Zeit Anlagen zum automatisierten Lagenaufbau dieser bereits konfektionierten Prepregs [23, 24, 25]. Unter Zuhilfenahme dieser Anlagen ist die Einstellung definierter Faserorientierungen möglich [26]. Die Halbzeuge besitzen in Abhängigkeit vom späteren Verarbeitungsverfahren üblicherweise eine Breite von bis 600 mm. Der hohe Faservolumengehalt, der meist bei 60 % eingestellt wird, und die kontinuierliche Verstärkung behindern beim heißhärtenden Verpressen eine makroskopische Fließbewegung der Masse bei der Aushärtung im Autoklaven. Deshalb ist eine Darstellung komplexer Geometrien mit filigraner Rippenstruktur kaum möglich.

Erst mit der Entwicklung der Harzinfusionsverfahren oder Vakuumtechnik werden die Vorteile der einstellbaren, unidirektionalen Verstärkung, des hohen Fasergehaltes und die Darstellung komplexer Geometrien mit duroplastischer Matrix erreicht. Dabei werden in der Faserorientierung eingestellte, trockene textile Strukturen (Preforms) hauptsächlich im RTM-Verfahren (Resin-Transfer-Moulding-Verfahren) zu FKV-Bauteilen verarbeitet. Die Harzinfusionsverfahren erscheinen für Bauteile im Bereich des Maschinen- und Fahrzeugbaus bezüglich Komplexität, Größe und Stückzahlen bei mittleren Serien (bis zu 50.000 Einheiten pro Jahr) für das gebotene Leistungsspektrum wirtschaftlich vorteilhaft [27, 28]. Die Harzinfusionsverfahren werden derzeit in verschiedene Untervarianten gegliedert, die auf verschiedene Identifizierungs- und Patentierungsargumente zurückzuführen sind, wie z.B. RTM, VARTM, SCRIMP [29]. Allen Verfahren ist gemeinsam, dass sie noch erhebliches Entwicklungspotenzial im Bereich neuartiger Injektionstechnologien, Werkzeugtechnologien, Preformtechnologien und Matrixsystemen bieten [30]. Dominiert werden die RTM-Verfahren durch die Verwendung von duroplastischen Matrixwerkstoffen, dennoch wird auch zunehmend der Einsatz von thermoplastischen Kunststoffen für dieses Verfahren untersucht [31, 32]. Unabhängig von der Art des Matrixwerkstoffes werden in der Serie ungefüllte Harzsysteme eingesetzt. Aufgrund der Filterwirkung der Verstärkungsstruktur sind diese Harzsysteme nicht mit Füllstoffen ausgerüstet.

Neben der Prepregtechnologie und dem Preform-RTM-Verfahren, das über die letzten Jahre hinweg an Bedeutung gewonnen hat, stellen die fließfähigen Duroplastprepregs, wie z. B. Bulk Moulding Compound (BMC) oder das flächige Halbzeug Sheet Molding Compound (SMC), eine bedeutendere Werkstoffklasse dar. Um komplexe Geometrien darzustellen, sind diese fließfähigen, kavitätsfüllenden Halbzeuge vorteilhaft, die zu einem geringen Anteil auch mit unidirektionalen Verstärkungsstrukturen ausgerüstet werden. Dennoch bieten sie ein niedrigeres Leistungsniveau als Prepregs. Es zeigt sich, dass hinsichtlich des Anforderungsprofils ein entsprechend leistungsfähiger Werkstoff wirtschaftlich zur Bauteilherstellung bereitgestellt werden sollte, um z.B. Metall zu substituieren.

Mit dem erstmaligen Einsatz von SMC während der 70er Jahre des letzten Jahrhunderts für den Renault 5 wurde dem Ziel des Leichtbaus im Automobilbereich Rechnung getragen. Dieser Werkstoff SMC stellt heute die bedeutendste Werkstoffgruppe im Automotive-Bereich dar (Bild 2.3) und ist insgesamt im Transportwesen weit verbreitet [33].



Bild 2.3: SMC-Applikationen im Automobilbereich gestern und heute (links: Renault 5 (Baureihe Jahr 1976 (Rundum SMC-Bepunktung (Stoßfänger aus SMC bereits 1972)), rechts: Mercedes-Benz SMC-Heckklappenbepunktung lackiert des CL 203) [34]

Mit dem Einsatz als Verkleidungsteil können die Rohbauteile mit der Karosserie durch die teilweise bis zu 200°C aufweisenden Lackierstraßen online mit lackiert werden [35]. Im Nutzfahrzeugbereich, der noch nicht die derart strengen PKW-Oberflächenanforderungen stellt, werden die SMC-Rohbauteile mit einer speziellen, elektrisch leitfähigen Grundierung ausgerüstet, um die Lackierung mittels KTL zu applizieren. Zudem bietet der glasfaserverstärkte Werkstoff SMC den Vorteil der Radiowellen-transparenz, wodurch mit der steigenden Anzahl an Antennen und deren Verban-nung aus dem Sichtbereich nicht nur der Leichtbauforderung Rechnung getragen wird [36, 37]. Neben dem Straßenfahrzeugbau stellt der Schienenfahrzeugbau ein bedeutendes Absatzgebiet für diesen Werkstoff dar. Aufgrund der Fließfähigkeit des Werkstoffs, bei gleichzeitiger Anpassungsfähigkeit der Rezeptur an das Einsatz-gebiet, können hoch komplexe, durch Verrippungen verstärkte und in verschiedenen Farben oder auch flammhemmend ausgerüstete Bauteile hergestellt werden. Zusätz-lich kann die spezielle Rezeptur mit unterschiedlichen Verstärkungsstrukturen kom-biniert und der Faseranteil variiert werden [38, 39]. Eine Übersicht und Beschreibung an fließfähigen duroplastischen Formmassen gibt Tab. 2.2.

Tab. 2.2: Fließfähige duroplastische Formmassen [40]

Bezeichnung	Kurzzeichen	Beschreibung
Bulk Moulding Compound	BMC	feuchte, teigartige faserige Form-massen; chemisch verdickt
Dough Moulding Compound	DMC	feuchte, teigige, spritzgussfähige Formmassen ohne chemische Eindickung
Granulated Moulding Compounds (oder auch Pelletized Moulding Compounds)	GMC (oder PMC)	trockene, granulatförmige Formmas-sen
Sheet Moulding Compound	SMC	feuchte, vorimprägnierte, faserver-stärkte Harzmatten

Bei glasfaserverstärktem SMC werden üblicherweise ungesättigte Polyesterharze als Matrixwerkstoff eingesetzt, doch mit der Verwendung von Kohlenstofffasern in dieser

Werkstoffgruppe kommen Epoxydharze wegen der besseren Performance der Matrix zum Einsatz, um das Leistungsspektrum insgesamt zu verbessern. Eine erste Kleinserienanwendung konnte mit Strukturbauteilen aus „Advanced SMC“ für den McLaren Mercedes Typ SLR im Jahr 2004 erzielt werden [41]. Mit Bezug auf ein Datenblatt eines anderen Herstellers ist festzustellen, dass durch die Verwendung von Kohlenstoffschnittfasern bereits die vierfache Steifigkeit gegenüber Standard-(glasfaserverstärktem-) SMC erreicht werden kann (Zug-E-Modul: 40 GPa) [42]. Darüber hinaus finden gerade für Fließpressmassen neben Vinylesterharzen auch Phenol-, Harnstoff- und Melamin-Formaldehydharztypen Verwendung.

2.1.2 Thermoplastische FKV-Halbzeuge

Seit etwa 1980 haben sich zunächst flächige vorimprägnierte Halbzeuge auf der Basis thermoplastischer Kunststoffe (glasmattenverstärkte Thermoplaste) und später Halbzeuge in Granulatform etabliert. Dabei haben Matrixwerkstoffe bei mengenmäßiger Betrachtung in der Reihenfolge zunehmend PET, PBT, PA und PP die größte Bedeutung. Der bereits vielfach angeführte Einsatzbereich des Straßenfahrzeugbaus wird von PP in verschiedenen Halbzeugformen dominiert. Gerade in diesem Bereich wird zunehmend das Recycling als das wichtigste Entscheidungskriterium angeführt, welches durch die europäische Altautoverordnung begründet ist [14]. Dass thermoplastische Verbundwerkstoffe duroplastische Werkstoffe in manchen Anwendungsgebieten wie z. B. Front-End-Trägern auch bei höheren Stückzahlen noch nicht komplett abgelöst haben, kann am Beispiel des Peugeot 206 gezeigt werden [43, 44]. Die bedeutenden Thermoplast-Halbzeugformen für (Fließ-) Pressverfahren werden im Folgenden vorgestellt.

2.1.2.1 Glasmattenverstärkte Thermoplaste (GMT)

Glasmattenverstärkte Thermoplaste (GMT) stellen heute Standardhalbzeuge zur Herstellung von thermoplastischen, faserverstärkten Bauteilen dar und werden bei Markt Betrachtungen in die Kategorie der LFT integriert. Zu Beginn der 90er Jahre des letzten Jahrhunderts befand sich diese Halbzeuggruppe noch in der Wachstumsphase mit Absatzsteigerungen von bis zu 40 % p.a.. Hingegen steht sie heute in der Reife- bzw. Sättigungsphase. Mit dem Erreichen der Reifephase fand auch eine Konzentration auf der Anbieterseite statt, die in Europa nunmehr nur noch 3 von ursprünglichen 7 Herstellern zählt.

Zur Herstellung von GMT-Halbzeugen haben sich zwei Methoden durchgesetzt: einerseits die Schmelzeimprägnierung und andererseits das Nassverfahren in An-

lehnung an das Papiermacherverfahren. Als thermoplastische Matrix hat sich Polypropylen (PP) mit einer niedrigen Schmelzviskosität und der Zielsetzung, eine wirtschaftliche Imprägnierung zu ermöglichen, umfassend durchgesetzt. Dennoch sind auch GMT auf Basis anderer thermoplastischer Matrices, etwa Polyamid (PA 6) geeignet, kommen aber aus Kostengründen meist nicht in Frage. Die Verarbeitungstemperatur des eingesetzten PP liegt zwischen 200 und 220 °C mit einer Viskosität von 100-200 Pas bei einer Schergeschwindigkeit von 100 s^{-1} .

Das Papiermacherverfahren ist an den namengebenden Nassvliesherstellungsprozess angelehnt. Eine wässrige Suspension, bestehend aus Schnitffasern und Thermoplastpulver, wird auf ein Sieb aufgebracht. Es schließen sich die Trocknung und Konsolidierung an. Die Faserstruktur dieses GMT besitzt keine Vorzugsrichtung und der Zusammenhalt der Einzelfasern ist geringer als der eines Nadelvlieses, was zu einer besseren Fließfähigkeit führt, da die vernadelten Fasermatten die Fließfähigkeit behindern [45].

Beim Schmelzeimprägnierverfahren werden chemisch oder mechanisch gebundene Fasermatten mit Polymerschmelze mittels einer Doppelbandpresse getränkt. Imprägnierung und Konsolidierung erfolgen in einer Einheit. Durchgesetzt hat sich eine Verfahrensvariante, bei der zwei Glasfasermatten mit Schmelze aus dem Kern und von den Decklagen her getränkt werden. Die Schmelze im Kern wird in der Regel von einem Extruder geliefert, während die Decklagen als dünne Folien zugeführt werden (Bild 2.4). Grundsätzlich sind zusätzlich die Herstellvarianten denkbar, die auch bei der Prepreg-Herstellung zum Einsatz kommen, wie z.B. Pulver-Imprägnierung oder auch Lösemittelimprägnierung, doch haben sich diese für die GMT-Fertigung nicht durchgesetzt.

Halbzeuge beider Methoden werden in einer Doppelbandpresse unter Druck und Temperatur zu einem flächigen Halbzeug konsolidiert. Imprägnierung und Konsolidierung laufen in nachgeschalteten Aggregaten ab. Die in der Regel eingesetzten Faserlängen liegen zwischen 12 mm und 25 mm. Meist müssen mehrere Vlies-schichten zu einem Halbzeug konsolidiert werden. Mit beiden Verfahren werden Halbzeuge mit Dicken von 2 bis 4 mm hergestellt. Es besteht dabei die Möglichkeit, durch einfaches Abziehen des Rovings von der Spule und Ablegen vor der Zuführung in die Doppelbandpresse, eine unidirektionale Verstärkung einzubringen, indem Glasfaserrovings ungeschnitten in die Glasfasermatte eingearbeitet werden. Zusätzliches Vernadeln bewirkt ein Aufspleißen des Rovings in Einzelfilamente. Eine

UD-Verstärkung hat eine begrenzte Fließfähigkeit des Verbunds, besonders quer zur Verstärkungsrichtung, zur Folge [46].

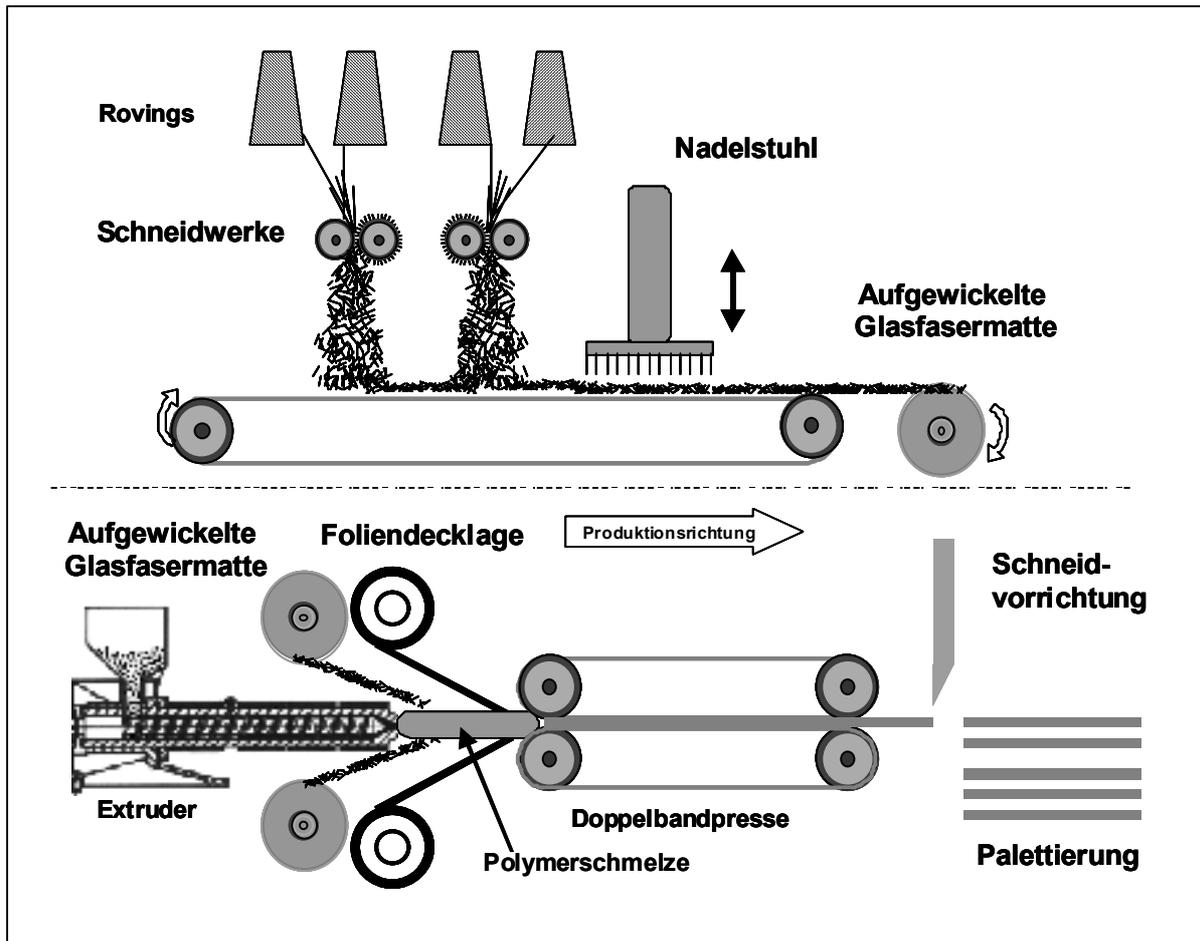


Bild 2.4: Herstellprozess von GMT (oben: Vernadelungsprozess, unten: Imprägnierprozess aus: [47])

Die GMT-Mengen entwickeln sich noch immer mit Wachstumsraten, die dem durchschnittlichen Marktwachstum entsprechen [48]. Dieses Wachstum beruht auf der Weiterentwicklung von Matrixwerkstoffen und Variantenbildung der Materialgruppe, wozu insbesondere die Varianten mit Naturfaserverstärkung zählen. Diese Maßnahmen und die konsequente Verfolgung und Umsetzung definierter Entwicklungsziele führen zur Steigerung des Absatzes von GMT [49]. Jedoch kann ein Modell- und Halbzeugformwechsel in einer absatzstarken Applikation zu einer signifikanten Verschiebung der Anteile führen. Aus dem Wettbewerb der LFT-Varianten lassen sich folgende für den FKV-Markt insgesamt gültige Entwicklungsziele ableiten:

- Verbesserung der Wirtschaftlichkeit der Herstellungsverfahren,
- Verbesserung der Fließfähigkeit bei gleichwertigen mechanischen Eigenschaften,
- Reduktion der Streuung der mechanischen Eigenschaften durch Verbesserung der Halbzeughomogenität,

- Definition einheitlicher Prüfmethoden und Präsentation des Eigenschaftsprofils in Datenbankform.

Als nachteilig wirkt sich aus, dass eine Anpassung des Fasergehalts für den Verarbeiter nur in Zusammenarbeit mit dem Halbzeughersteller erfolgen kann. Noch immer finden GMT-Bauteile hauptsächlich Eingang in die Automobilindustrie. So bildete der Einsatz als Front-End-Montageträger (Bild 2.5) eine typische Anwendung für diesen Werkstoff. Diese Anwendung zeigt gerade, wie groß die Konkurrenz und die Vielfalt an Herstellungsmöglichkeiten sind. Das Verfahren des Fließpressens steht im Wettbewerb zu dem des Spritzgießens. Im Spritzgießprozess ist es heute möglich, langfaserverstärkte Thermoplastgranulate mit einer Ausgangsfaserlänge von bis zu 25 mm zu verarbeiten und im Bauteil Faserlängen von durchschnittlich noch 12 mm zu erreichen [50].

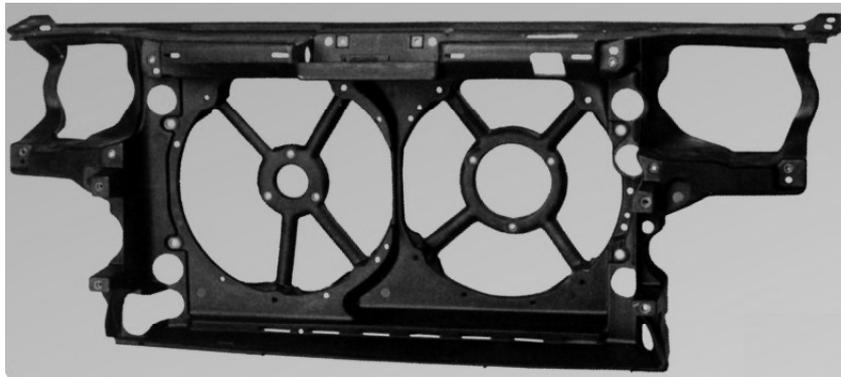


Bild 2.5: Front-End-Montageträger aus GMT

So besitzt die jüngste Generation des Golf (A5-Plattform) einen spritzgegossenen Montageträger. Darüber hinaus steht der Werkstoff GMT mit anderen Halbzeugformen (z.B. Direkt-LFT und SMC) für diese spezielle Applikation im Wettbewerb und wird heute meist für großflächige Bauteile und Verkleidungselemente wie Unterbodenverkleidungen eingesetzt.

2.1.2.2 Langfaserverstärkte Thermoplaste (LFT) - Stäbchengranulat

In den letzten Jahren wurden neben GMT weitere Herstellungsverfahren mit dem Ziel der Verbesserung der Wirtschaftlichkeit und der Optimierung der Fließfähigkeit entwickelt. Diese Verfahren liefern im Ergebnis langfaserverstärkte Thermoplaste in Stäbchengranulatform, die als Schüttgut verfügbar sind und entsprechend die Handhabbarkeit erleichtern. Die Pellet-Halbzeugherstellung erfolgt industriell mittels zweier Verfahren. Als erstes Unternehmen entwickelte die Hoechst AG in Anlehnung an den Pultrusionsprozess ein patentiertes Verfahren zur Herstellung vollständig imprägnierter Faserbündel. Das Verfahren erlaubt die Herstellung von Stäbchengranulat

der Länge 10 mm bis 50 mm. Die Fasern sind zudem über den runden Querschnitt in der Matrix verteilt, so dass die Matrix die Einzelfilamente benetzt [51].

Die verschiedenen Granulatformen sind in Bild 2.6 dargestellt. Sie zeigen die unterschiedlichen Möglichkeiten der Herstellung faserverstärkter Thermoplastgranulate in Form von Kurzfasern, thermoplastummanteltes Faserbündelagglomerat und Langfaserverthermoplast mit dispergierten und imprägnierten Fasern.

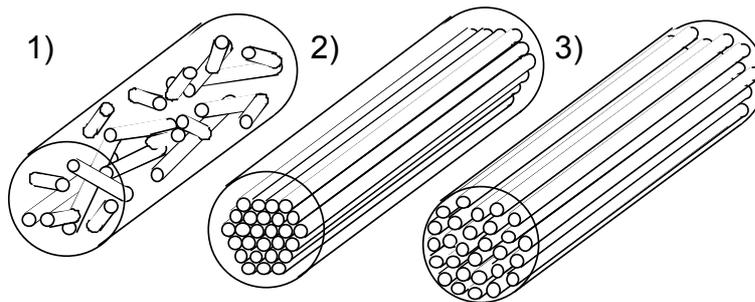


Bild 2.6: Granulatsysteme faserverstärkter Thermoplaste: 1) Kurzfasergrenulat mit dispergierten, benetzten Fasern. 2) Langfasergrenulat mit agglomerierten, unbenetzten Fasern. 3) Langfasergrenulat mit dispergierten und benetzten Fasern, v.l.n.r.

Beim kontinuierlichen Pultrusionsverfahren zur Herstellung langfaserverstärkter Thermoplaste werden vorbehandelte Rovings durch ein Kunststoffschmelzebad mit Haftvermittlerzusätzen geleitet. Anschließend werden sie durch eine Querstromdüse gezogen und mit Thermoplastmatrix imprägniert. Es schließen sich die Kühlstufe und die Granulierstufe an, bei der das Thermoplastband zu Stäbchengranulaten der Standardlängen von 10 bis 25 mm konfektioniert wird (Bild 2.7).

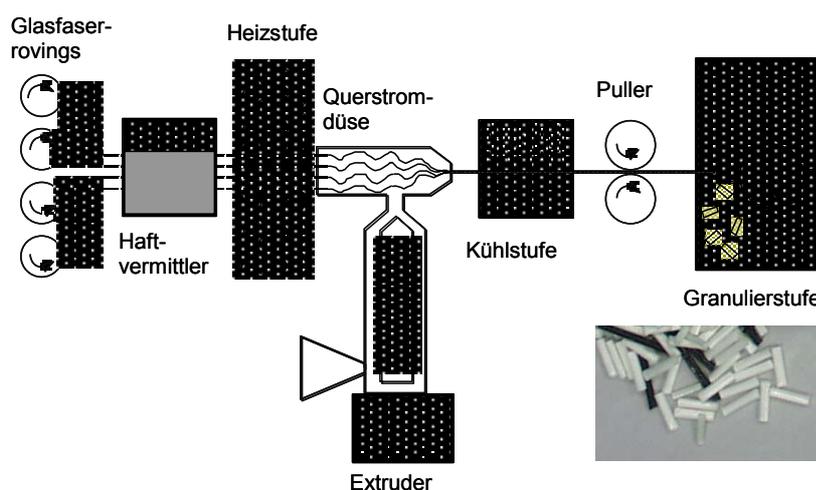


Bild 2.7: Schematische Darstellung einer Pultrusionsanlage zur Herstellung von LFT

Um die Filamente zu vereinzeln und eine bessere Benetzung mit Schmelze zu erreichen, werden versetzt angeordnete Umlenkungen in der Düse eingesetzt. Heute ist

die wirtschaftliche Herstellung mit Matrixviskositätswerten bis zu 1.500 Pas und Fasergewichtsanteilen bis zu 80 % möglich [52].

In einem weiteren Verfahren erfolgt die Imprägnierung der Faserrovings in einer beheizten Bearbeitungszelle über ein umlaufendes Imprägnierrad [53], bei dem durch den porösen Materialaufbau Kunststoffschmelze von der Mitte nach außen fließt und die anliegenden Faserbündel imprägniert [54].

Mit der von LUTZ [55] vorgestellten Imprägnierung wird der schmelzflüssige Matrixwerkstoff durch die Drehachse der Rolle unter Druck zugeführt und durchdringt das beheizte Imprägnierrad. Die Rolle kann angetrieben oder nur mitlaufend ausgeführt werden, so dass aufgrund von Scherung und Umschlingungswinkel die Faserbündel- imprägnierung erfolgt (Bild 2.8). Jedoch werden von dem Faserbündel- imprägnierverfahren besondere Anforderungen an das Polymer gestellt. So soll der MFI $>18 \text{ g} \cdot 10 \text{ min}^{-1}$ sein, die maximale, im Polymer dispergierte Partikelgröße, sollte sich zwischen $63 \mu\text{m}$ bis $140 \mu\text{m}$ je nach Porengröße des Imprägnierads bewegen. Die Imprägnierdauer kann durch den Umschlingungswinkel und durch den Porenkreisdurchmesser verlängert werden. Das poröse Imprägnierrad erfordert hohe Schergeschwindigkeiten der Matrix, was zur Reduzierung der Viskosität führt und gleichzeitig die Imprägnierung der Fasern begünstigt. Weitere Vorteile sind geringere Drücke, Fadenspannung und einfache Faseranteileinstellung.

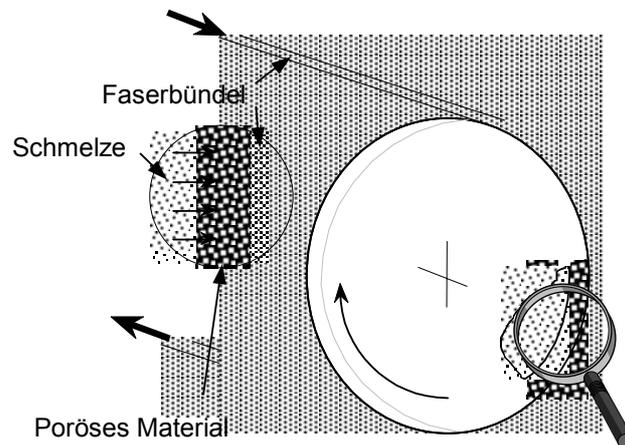


Bild 2.8: Faserbündel-Imprägnierung mittels Imprägnierrad [aus: 55]

Das Verfahren mit Imprägnierrad hat gezeigt, dass es für die Faserimprägnierung mit verschiedensten Matrices (PP, PA, PBT) geeignet ist. Die Fa. Fact GmbH in Kaiserslautern hat die industrielle Umsetzung mit einer Ausbringungsmenge von nun mehr

als 10.000 t pro Jahr vollzogen. Doch ist dieses Verfahren industriell auf die Herstellung von Halbzeug (Stäbchengranulat) ausgelegt.

Ferner gab es erste Versuche, die einzelnen Komponenten des Verbunds – Glasfasern und Polypropylen-Granulat - in einer Einschneckenplastifiziereinheit aufzubereiten und weiter zu verarbeiten, was zur späteren Entwicklung des Direkt-LFT-Prozesses führte [56, 57, 58].

2.1.2.3 Direktverfahren zur Herstellung von LFT

Im Bereich der presstechnischen Verarbeitung zielen jüngste Entwicklungen entweder auf die Kostenreduzierung (Direkt-LFT) auf der Halbzeugseite oder die Eigenschaftserweiterung (mittels lokaler Verstärkung) ab. Beim D-LFT-Pressverfahren zum Herstellen von thermoplastischen Bauteilen erfolgt die Compoundierung des Kunststoffes über eine Extruderkombination mit zwei Doppelschneckenextrudern [59]. Der erste Standard-Zweischneckenextruder dient zum Aufschmelzen und Compoundieren des Kunststoffes, der zweite, speziell für dieses Verfahren konzipierte Zweischneckenextruder zieht die Rovingstränge ein und bewirkt das Zusammenbringen und Dispergieren des Kunststoffes und der Glasfasern [60, 61]. Dieses Verfahren wurde auch hinsichtlich der lokalen Verstärkungsmöglichkeit durch die Verwendung eines weiteren Halbzeugs (Hybridgewebe, z.B. Twintex[®], als Organoblech konsolidiert) untersucht. Ziel ist, eine Steigerung des Eigenschaftsprofils wie bei UD-verstärktem GMT zu erzielen. Dabei wird das Organoblech, bestehend aus Thermoplast- und Glasfasern, über die Schmelztemperatur des Thermoplasten erwärmt und mit dem D-LFT-Plastifikat im Werkzeug verpresst. Bei dieser Kombination werden somit die Ziele der lokalen Verstärkung und der Imprägnierung in einem Schritt erreicht. Die Imprägnierung erfolgt jedoch nicht eindeutig durch das Plastifikat [21]. Der Vorteil des D-LFT-Verfahrens ergibt sich kostenseitig durch die Umgehung von Halbzeugherstellungsschritten, was für das Direktverfahren charakteristisch ist (Bild 2.9).

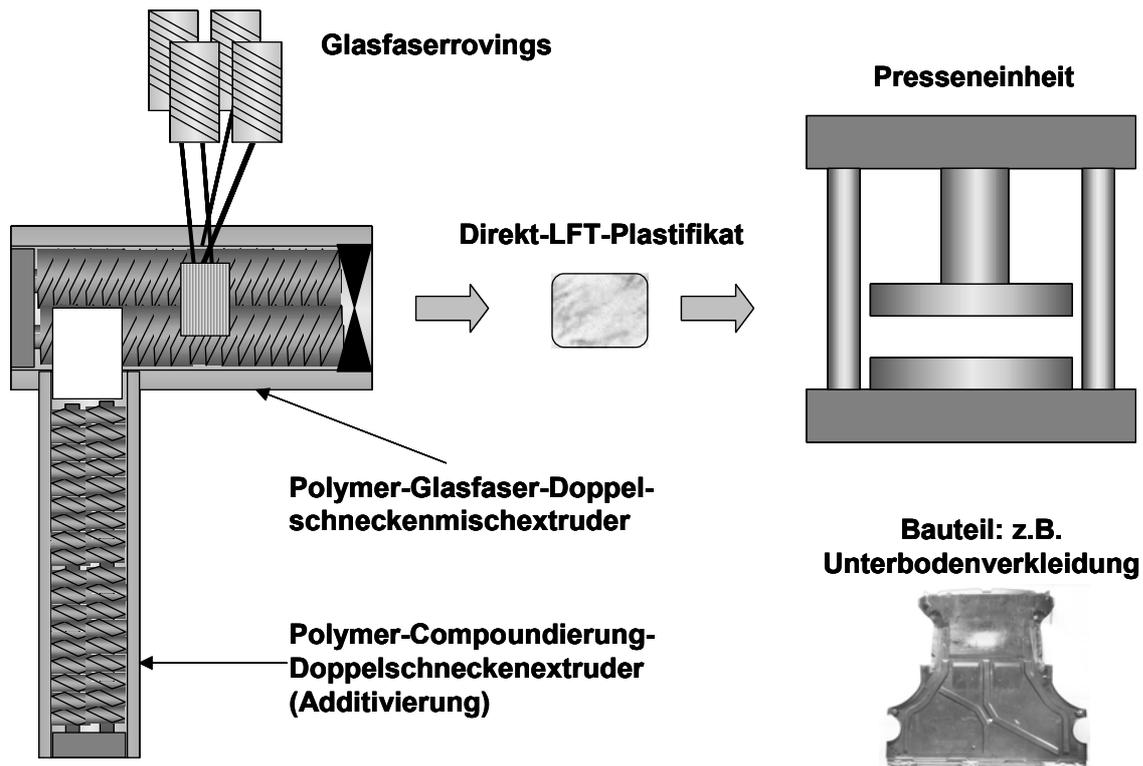


Bild 2.9: Anlagenkonfiguration und Verfahrensschema zu Direkt-LFT [62]

2.1.2.4 Vergleich ausgewählter, thermoplastischer FKV und Fazit

Ein direkter Vergleich von Kennwerten gleichartiger Werkstoffe, wie z. B. von glasfaserverstärktem PP, ausgehend von unterschiedlichen Halbzeugtypen, ist nur selten zu finden. Als Gründe sind dabei unterschiedliche Verarbeitungsbedingungen anzuführen, die die Eigenschaften stark beeinflussen können. Zwar bilden bei derartigen Vergleichen Matrixtypen und Fasern eine Basis, die sich trotzdem in Aufbau (Homo- oder Co-Polymer), Schmelzviskosität, Faserschichte und Aufbereitung voneinander unterscheiden. Doch ist bei allen kommerziellen Darstellungen anzunehmen, dass jeweils für den Werkstoff günstige Kombinationen und Verarbeitungsbedingungen zur Erzielung eines Eigenschaftsoptimums gewählt wurden. Eine Analyse verschiedener Quellen zeigt, dass Kennwerte sich je nach Halbzeugform unterschiedlich darstellen, insbesondere die für die Konstruktion wichtigen Zugeigenschaften gleichartiger Werkstoffkombinationen. In der Reihenfolge von Kennwerten ist LFT-Stäbchengranulat dem GMT und dieses wiederum dem Direkt-LFT leicht überlegen. Einen wesentlichen Einfluss nehmen darauf die Aufbereitung, die Verarbeitung und die Entnahme der Probekörper [63, 64, 65, 66].

2.2 Einordnung und Spannungsfelder der Pressverfahren

Im Folgenden wird nun die presstechnische Weiterverarbeitung näher vorgestellt und nach Halbzeugarten unterschieden. Mit einer Betrachtung der Gesamtprozesskette bis zum Bauteil, einschließlich der presstechnischen Formgebung, können die vom Halbzeug bestimmten Eigenschaftsunterschiede dargestellt und bewertet werden.

Die Halbzeugarten, deren Herstellung und Halbzeugformen, die für das Fließpressen von besonderer Bedeutung sind, sowie deren Anwendungsgebiete, wurden mit Kapitel 2.1 vorgestellt. Dem Prozessschritt „Pressen/ Formgebung“ sind weitere Prozessglieder vor- und auch nachgeschaltet. Bild 2.10 stellt die Prozessglieder und Verarbeitungsstufen vor, die auch bei einer umfassenden Lebenszyklusanalyse betrachtet werden. Zur Bewertung eines Herstellungsverfahrens sind stofflich und energetisch sowohl die Eingangsgrößen als auch die Ausgangsgrößen und damit in zunehmenden Maße die Abfälle (Produkte aus Herstellung und Nutzung) einzurechnen.

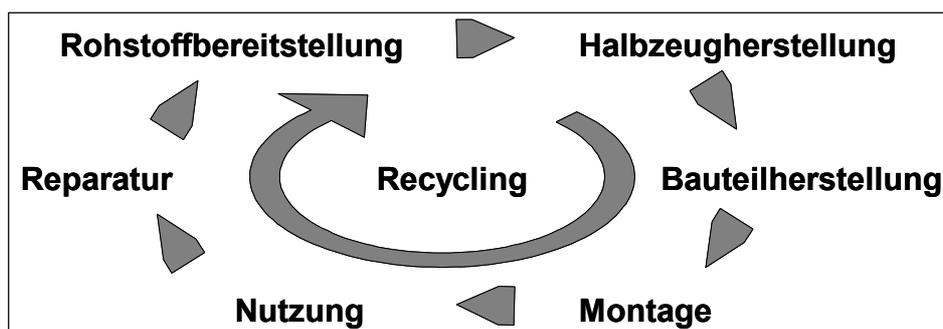


Bild 2.10: Bestandteile des Lebenszyklusprozesses von FKV-Bauteilen

Diese Analysen sind sehr umfangreich und werden mit einem Kennwert, dem sogenannten „Global Warming Potential“ (GWP) verglichen, der über eine reine Kostenanalyse hinaus geht, da sich der Ressourcenverbrauch nicht in den Marktpreisen widerspiegelt. Dass FKV eine interessante und umweltschonende Alternative darstellen, zeigt sich am Vergleich des Werkstoffes SMC mit den traditionellen Werkstoffen Stahl und Aluminium [67]. Eine pauschale Aussage ist nicht möglich, da eine Analyse fallweise je nach Anwendungsbeispiel unabhängig durchzuführen ist. Dabei fließen auch die Anforderungen aus dem Lastenheft mit ein, so dass die Bauteilperformance dem Verbrauch an Energie und anderen Ressourcen sowie den Emissionen (Luft, Wasser, Abfall) und dem Flächenbedarf gegenübergestellt wird.

Auf Basis der Darstellung von [67] werden in Tab. 2.3 die jeweiligen Vor- bzw. die Nachteile von Thermoplasten jenen duroplastischer FKV gegenübergestellt.

Tab. 2.3: Vorteile thermoplastischer und duroplastischer FKV

TP-FKV (z.B. LFT)	DP-FKV (z.B. SMC)
Rein physikalische Aufbereitung	Irreversible, temperaturstabilere Vernetzungsreaktion
Schweißbarkeit und Prägung möglich	Harte, glatte kratzfeste Oberflächen
Hohe Schlagzähigkeit	Höhere Steifigkeit
Keine Reaktionsprodukte, Aushärte- oder Temperzeiten	Sprödes Versagen
Granulieren zur direkten Wiederverwendung ausreichend	Hoher Füllstoffanteil möglich
Stoffschlüssiges Fügen	Gute Lackier- und Kleberapplizierung
Kurze Zykluszeiten	Niedrige Viskosität
Lagerstabilität, Korrosionsbeständigkeit	

Bei Berücksichtigung der Recyclingfähigkeit können bei einem gegebenen Anforderungsprofil, das beide Werkstoffgruppen erfüllen, Thermoplaste den Duroplasten hinsichtlich des GWP überlegen sein. Insbesondere die Styrolemissionen (UP-Harzen) werden zunehmend als Problemfeld identifiziert und über die Produktionsstufe hinaus als kritisches Element angesehen. So werden für SMC spezielle Rezepturen mit dem Zusatz „LE“ (Low-Emission) angeboten, die einen geringeren Anteil an Styrol aufweisen. Da mit der Aushärtung im Werkzeug eine 100 %-ige Polymerisation nicht gewährleistet werden kann, werden zusätzlich zur LE-Rezeptur neuerdings spezielle Lackierungen als Dampfsperre eingesetzt, um ein späteres „Ausgasen“ des Produktes auszuschließen. Das langfristige strategische Ziel dabei ist das No-Emission-Automobil, das keine organischen Verbindungen in der Nutzungsphase emittiert. Die End-of-Life-Verordnung schreibt eine zu 85% stoffliche Verwertung des Automobils am Ende der Nutzungsphase vor [68]. Diese Verordnung umfasst das Spannungsfeld, in dem presstechnische Werkstoffe bzw. Bauteile zu beurteilen sind und zeigt den Vorteil thermoplastischer FKV im stofflichen Recycling.

2.2.1 Fließpressen im Vergleich zu anderen Pressverfahren - wichtige Prozessgrößen

Pressverfahren (Umformen und Fließpressen) stellen unabhängig von dem zu verarbeitenden Werkstoff - deshalb auch nicht nur für Kunststoffe - die am weitesten verbreiteten Verarbeitungsverfahren dar. Pressverfahren sind gerade zur Herstellung von FKV-Bauteilen in großen Stückzahlen geeignet. Die Reproduzierbarkeit ist in engen Toleranzen gut möglich, die Fertigung weitgehend automatisierbar. Die Taktzeiten sind gering, was die Vorzüge im Rahmen einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

verdeutlicht. Die Verfahren können einerseits nach dem Pressvorgang und andererseits nach der Länge des Fließweges differenziert werden (Bild 2.11).

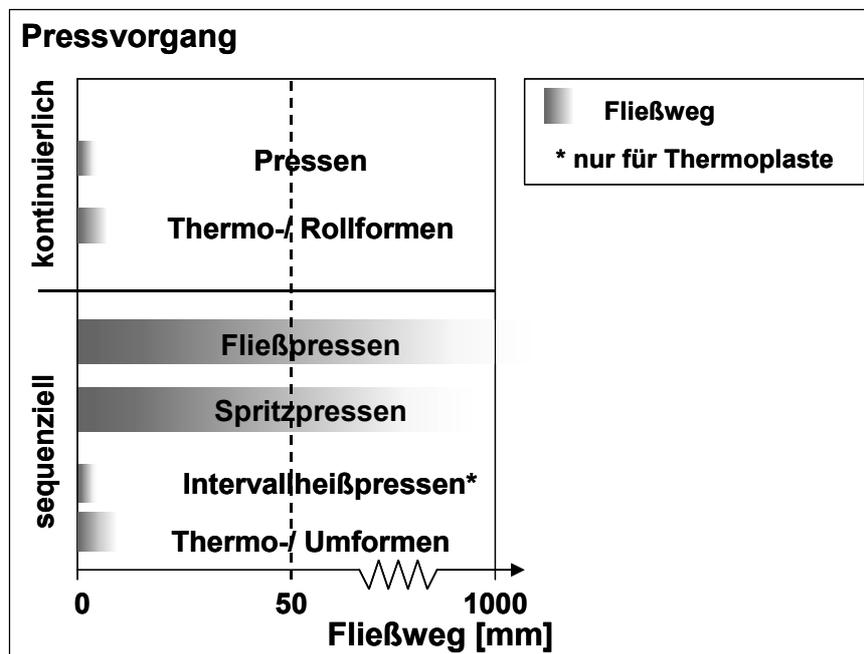


Bild 2.11: Pressverfahren im Vergleich

Die Art des Pressvorgangs bestimmt auch die Einsetzbarkeit des Halbzeuges, wobei die mit Kapitel 2.1 vorgestellten Halbzeuge im Fließpressverfahren verarbeitet werden.

Die kontinuierlichen Verfahren wurden bei WÖGINGER [69] näher untersucht, bewertet und weiterentwickelt. Die kontinuierlichen Pressverfahren werden oftmals den diskontinuierlichen Verfahren vorgelagert, um die Halbzeuge bereitzustellen, wie sie z.B. für die GMT-Verarbeitung erforderlich sind. Kontinuierliche Pressverfahren sind aufgrund der Prozesskonfiguration besser dazu geeignet, Bauteile mit kontinuierlicher Verstärkungsstruktur herzustellen, da die Verstärkung parallel zur Produktionsrichtung verläuft. Für Halbzeuge, die den formgebenden Schritt im Anschluss an die Doppelbandpresse durchlaufen, werden thermoplastische Matrixsysteme eingesetzt. Mit der Doppelbandpresse werden die Komponenten verdichtet und die Verstärkungsstruktur mit der Matrix imprägniert. Um die zugeführte Verstärkungsstruktur zu erhalten, werden nur kurze Fließwege (meist in Dickenrichtung) angestrebt. Diese Halbzeuge werden als Organobleche bezeichnet und in einem sich später anschließenden Thermoformprozess zu Bauteilen weiterverarbeitet. Das größte Anwendungsgebiet für Doppelbandpressen stellt die Herstellung von MDF-Platten aus Holzfaserformstoff da, wobei meist Phenolharz als Matrix zum Einsatz kommt [70].

Aus dieser Vielzahl an möglichen Pressverfahren stellt das Fließpressverfahren die wichtigste Verarbeitungstechnik dar. Dies wird insbesondere durch die Menge an eingesetzten Halbzeugen gemäß Bild 2.2 herausgestellt, die fast ein Drittel der gesamten FKV-Produktionsmenge ausmachen.

Für die fließpresstechnische Verarbeitung stellt die Tab. 2.4 bedeutende Parameter in Abhängigkeit vom Matrixsystem vor.

Tab. 2.4: Matrixspezifische Verarbeitungseinstellungen im Fließpressverfahren

Verarbeitungsparameter	Thermoplaste	Duroplaste
Halbzeugvorbereitung	GMT: zuschneiden, aufheizen LFT, D-LFT: aufheizen, automatische Portionierung	SMC: Zuschneiden BMC, DMC: automatische Portionierung
Halbzeugtemperatur vor Kavitätsbestückung	> Matrixschmelztemperatur ϑ_S	Raumtemperatur
Werkzeugkonstruktion	i.d.R. Tauchkantenwerkzeug, Schieberintegration möglich	i.d.R. Tauchkantenwerkzeug, Schieberintegration möglich
Werkzeugtemperatur ϑ_W	< ϑ_S der Matrix (50-80 °C)	$\vartheta_W \geq$ Reaktionstemperatur der Harzpaste (ca. 140 – 160 °C)
Zuschnittgröße und -positionierung	30 – 80 % der projizierten Fläche, dabei mittig	30 – 70 % der projizierten Fläche, dabei meist mittig
Schließgeschwindigkeit	5 – 50 mm*s ⁻¹	5 – 10 mm*s ⁻¹
Presskraft/ Werkzeuginnendruck	GMT: 15 - 25 MPa, LFT: 2,5 – 10 MPa	SMC: 2 – 15 MPa
Fließverhalten	aus der Mitte des Plastifikates	von der Werkzeugwand
Zykluszeit (Optimum)	f (Kristallisationsgrad, (teilkristalline TP), Bauteildicke, Werkzeugtemperatur)	f (Härtezeit, Reaktivität, Bauteildicke, Werkzeugtemperatur)

Für die Verarbeitung thermoplastischer Fließpressmassen ergeben sich besondere Herausforderungen, die sich in der Bauteilqualität niederschlagen. Dabei ist die Oberflächenqualität als besonderes Merkmal anzuführen. Der Glanzgrad des Einlegebereichs ist deutlich schlechter als der des Fließbereichs und bereits mit bloßem Auge zu identifizieren. Die Werkzeugtemperatur beträgt in der Regel zwischen 25 und 75 °C, die somit deutlich unter der Kristallitschmelztemperatur von z. B. Polypropylen liegt. Es erfolgt sofort nach dem Ablegen des Plastifikats eine schnelle Abkühlung der Matrix an der Kavitätswand, aufgrund der thermischen Eigenschaften der Verbundkomponenten. Dies führt zur Abzeichnung des Einlegebereichs am Bauteil. Die Wärmeleitfähigkeit von PP beträgt ca. 0,2 W/mK, diejenige von Glasfaserbündeln, die nicht mit einer Matrix imprägniert sind ca. 0,04 W/mK, aufgrund der umgebenden Luft. Der Werkstoff Glas besitzt als Wärmeleitfähigkeit die Größe 0,7 W/mK, wodurch die schnelle Abkühlung des Bauteils bzw. eine rasche Aufheizung des

Halbzeugs im Umluftofen erklärt werden kann [71, 72, 73]. Je größer der Temperaturgradient zwischen Plastifikat und Werkzeug, umso stärker ist die Abzeichnung des Einlegebereichs, die bei glatten Werkzeugoberflächen verstärkt auftritt (Bild 2.12). Daher werden heute keine glatten Werkzeugoberflächen für Bauteile vorgesehen, die später im Sichtbereich liegen (z. B. im Fahrzeugbau). Höhere Werkzeugtemperaturen reduzieren eine stärkere Abzeichnung des Einlegebereichs an der Werkzeugoberfläche und begünstigen das Fließen sowie das Ausfüllen von Rippenstrukturen und letztlich auch die aufzuwendende Pressarbeit.

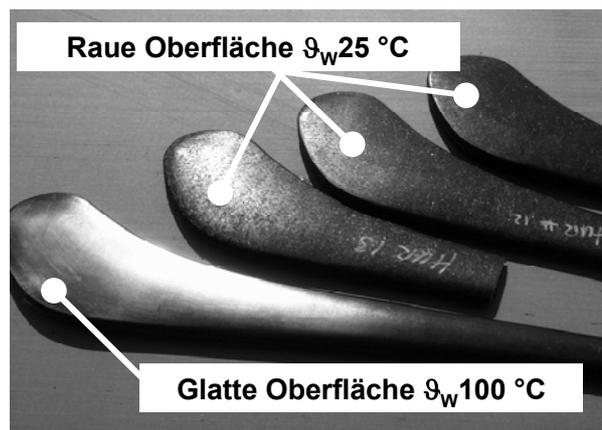


Bild 2.12: Oberflächenqualitäten in Abhängigkeit zur Werkzeugtemperatur [74]

Die Analyse von Verarbeitungsprozessgrößen und deren Veränderungen (z. B. Pressspalt, Parallelität, Pressarbeit) erlaubt eine indirekte Beurteilung der Bauteilqualität. Dies zeigt sich insbesondere bei dem Parameter Pressspalt und in Verbindung mit der Analyse der Parallelhaltezyylinderpositionen kann eine indirekte Messung von Bauteildicke, Ebenheit und Parallelität erfolgen. Mittels der Verarbeitungsparameter (Tab. 2.5) können auch die Eingangsgrößen, besonders die werkstoffseitigen, überwacht werden. So stellt die Analyse der Pressarbeit ein Beurteilungsmaß zum Fließverhalten des eingesetzten Werkstoffs dar. Diese Formgebungsarbeit wird auch bei anderen Verarbeitungstechnologien, wie z. B. dem Spritzgießen, zur indirekt Beurteilung des Fließverhaltens her. Sofern jedoch kein standardisiertes Verfahren, wie es die Kapillarrheometrie darstellt, angewendet wird, bleibt diese Qualitätsanalyse während des Verarbeitungsprozesses formteilgebunden (werkzeug- und maschinenabhängig) [75]. Um Prozessgrößenveränderungen auf Werkstoffveränderungen zurückzuführen, ist die Kenntnis des Fließverhaltens der Pressmassen erforderlich und stellt einen wichtigen Bestandteil der Untersuchungen im Produktentwicklungsprozess dar. Zudem stellt die Fließfähigkeit eine Eingangsgröße zur Ermittlung des Presskraftbedarfs dar.

Tab. 2.5: Verarbeitungsparameter, Qualitätsmerkmale und mögliche Abweichungsursache bei der Pressverarbeitung

Verarbeitungsparameter	Qualitätsmerkmal	Mögliche Abweichungsursachen
Pressspalt	Bauteildicke	Werkstofffließfähigkeit, Werkzeug-/ Temperatureinstellungen, Abkühlverhalten, Schließeinstellungen (Kraft, Geschwindigkeit), Einlegeposition
Parallelhaltezylinderposition	Formteilgeometrie (Ebenheit, Parallelität, Formfüllung)	
Pressarbeit	Formfüllung	

Weitere Veränderungen bei Verarbeitungsparameter können die Bauteilqualität verbessern, Abweichungen anderer Prozessgrößen ausgleichen oder in der Auswirkung unterstützen. So reduziert eine gesteigerte Werkzeugtemperatur die Abkühlgeschwindigkeit des Plastifikats in der Kavität und kann trotz geringerer Schließgeschwindigkeit zu einer gewünschten Bauteilqualität führen.

Die Pressarbeit hängt hauptsächlich von der Fließfähigkeit des faserverstärkten Compounds ab. Hierzu wurde an der Institut für Verbundwerkstoffe GmbH ein Pressrheometer entwickelt, das ein bidirektionales und somit praxisnahes Strömungsbild auswertet (Bild 2.13) [47]. Weiterhin müssen im Gegensatz zu einem Rheometer in Verbindung mit einem Tauchkantenwerkzeug keine Störeinflüsse durch die Tauchkanten berücksichtigt werden.

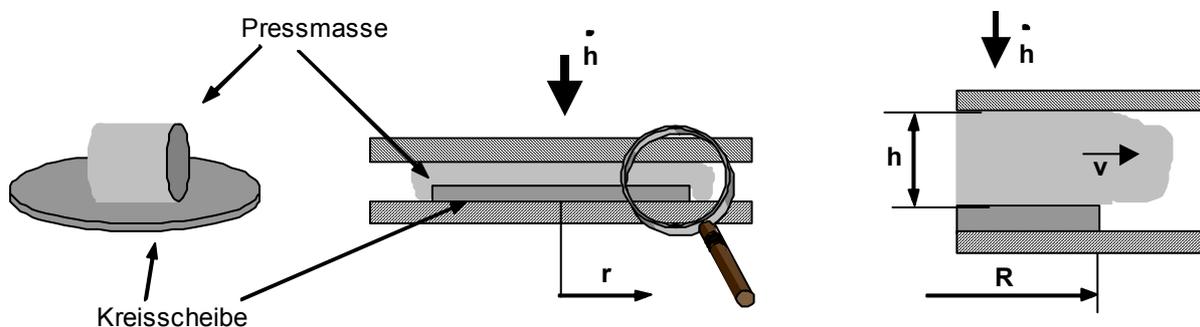


Bild 2.13: Versuchsaufbau zur Bestimmung der Viskosität

Dieser Versuchsaufbau wurde für die rheologischen Untersuchungen gewählt, wie später in Kap. 3.4 vorgestellt wird.

2.2.2 SWOT-Analyse für die FKV-Prestechnik

Die Abkürzung SWOT steht für Strength, Weakness, Opportunities und Threats und umschreibt die Untersuchung der Stärken und Schwächen bzw. der Chancen und Risiken eines Produkts oder auch Verfahrens. Diese Begriffspaare stehen sowohl für die Untersuchung der Eigenschaften als auch für die des Umfelds und ist in Unter-

nehmen in der dem Bereich Marketing zuzuordnen. Beide Untersuchungsbereiche sollten gleichzeitig und regelmäßig durchgeführt werden, um Veränderungen rechtzeitig aufzudecken und Produkteigenschaften anzupassen [76].

Die Untersuchung der Stärken und Schwächen stellt eine interne Prüfung der Leistungsfähigkeit dar. Die Untersuchung kann anhand einer Checkliste durchgeführt werden, die aus Expertenbefragungen, Marktinformationen, auch Fachbüchern sowie den Eigenschaftsübersichten von Produktbroschüren zusammengestellt wurde (Tab. 2.6). Sie orientiert sich weiterhin an der Charakterisierungsliste zum Eigenschaftsvergleich von Kunststoffen [40]. Ziel ist dabei, sich auf attraktive Marktchancen einzustellen, indem den Attributen entsprechende Ausprägungen zugeordnet werden. Diese Liste integriert zudem die jeweiligen Vorteile (ebenfalls Attribute) duroplastischer und thermoplastischer FKV (Tab. 2.3). Die Attribute variieren in ihrer Bedeutung, woraus sich eine Rangfolge ergibt, die bei der Darstellung gemäß der Tab. 2.6 berücksichtigt ist. Ausprägung und Bedeutung können subjektiv festgelegt werden, doch in diesem Fall wurde die Bewertung anhand der Marktinformationen und im Hinblick auf den Einsatz im Automobilbereich durchgeführt.

Tab. 2.6: Checkliste zur Stärken- bzw. Schwächenanalyse thermoplastischer FKV

Nr.	Attribut	Nr.	Attribut	Nr.	Attribut
1	Emissionen	10	Härte	19	Dichte
2	Schadstoffe beim Recycling	11	Flammhemmung	20	Chemische Beständigkeit
3	Schadstoffe bei der Herstellung	12	Einstellbare Faserorientierung	21	Zähigkeit
4	Schadstoffe bei der Nutzung	13	Warm-/Formbeständigkeit	22	Schweißbarkeit
5	Durchgangswiderstand	14	Wechselbeanspruchung	23	Fügefähigkeit
6	Viskosität	15	Festigkeit	24	Formbarkeit
7	Einfallstellen/ Schrupf	16	Steifigkeit	25	Kosten/kg
8	Wasseraufnahme	17	Lackierfähigkeit	26	Recyclingfähigkeit
9	Kriechen	18	Oberflächengüte		

Aus der vergleichenden Darstellung von Ausprägung (gering und stark) sowie der Bedeutung (gering und wichtig) ergeben sich demnach vier Kombinationen, die zu einem entsprechenden Portfolio mit vier Feldern führen. Aus den vier Kombinationen lassen sich dann entsprechend die durchzuführenden Aktivitäten (Bild 2.14, links) ableiten:

- A) Anstrengungen verstärken
- B) Gute Leistung fortsetzen
- C) Verbesserung nicht erforderlich

D) Vorsicht bei übertriebenen Einsatz

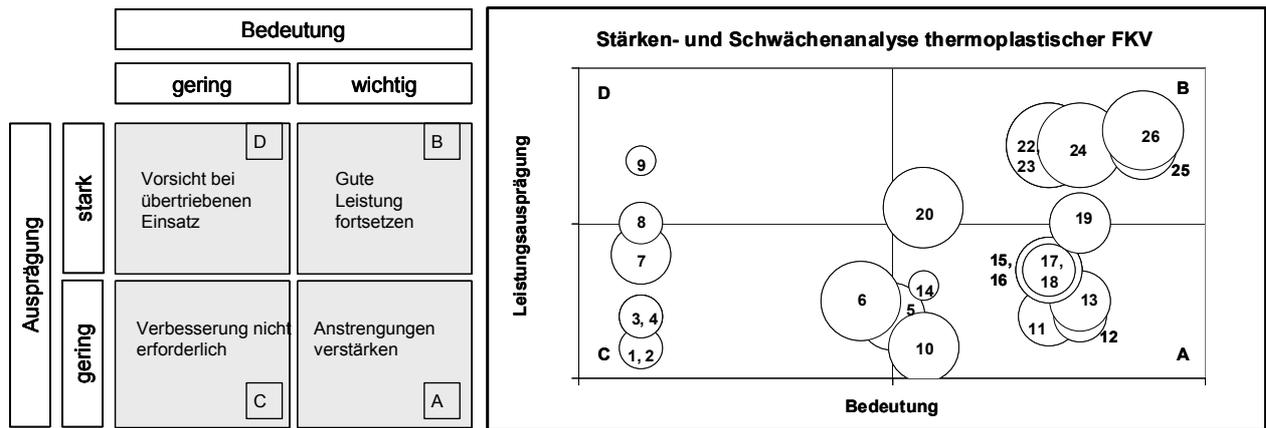


Bild 2.14: Aus Stärken- & Schwächenanalyse abgeleitete Handlungsanweisungen und Eigenschaftsportfolio

Die möglichen Materialeigenschaften (Attribute gemäß der Checkliste) wurden bewertet (Anhang, Tab. 8.1) und ergeben entsprechend das Eigenschaftsportfolio für thermoplastische FKV gemäß Bild 2.14, rechts. Der Kreisdurchmesser einer Eigenschaft repräsentiert die Möglichkeit zur Anpassung. So wäre eine Verringerung der Wasseraufnahme (Nr. 8) von PA oder auch des Kriechens (Nr. 9) zwar wünschenswert, doch sind diese grundlegenden Materialeigenschaften im FKV kaum veränderlich, weshalb sie mit kleinen Kreisdurchmessern dargestellt sind. Die Attribute Nr. 10 bis Nr. 19 sollten verbessert oder auch kombiniert werden, um Marktattraktivität von thermoplastischen FKV zu steigern. Diese Einschätzung ist oftmals Hauptbestandteil von Entwicklungsvorhaben, mit dem Ziel z.B. die bereits hohe spezifische Festigkeit weiter zu steigern, um Leichtbaupotenziale zu erschließen.

Die Analyse von Chancen und Risiken hilft, die Marktattraktivität eigener Produkte richtig einzuschätzen, kann aber nicht auf die einzelnen Eigenschaften bezogen werden. Eine Portfolio-Darstellung der Chancen und Risiken für FKV-Werkstoffe anhand der Eigenschaften ist somit nur partiell möglich. Die Bewertung der Chancen und Risiken bzw. Gefahren bezieht sich auf das Umfeld, das sich in vier Felder gliedert, mit großer bzw. geringer Bedeutung und großer bzw. geringer Eintrittswahrscheinlichkeit. Klassisch werden als externe negative Einflüsse legislative Einschränkungen oder gar Verbote angeführt. Ziel ist es einerseits, rechtzeitig Gegenmaßnahmen auch entwicklungsseitig einzuleiten, die den Fortbestand bzw. Neuentwicklung einer Produktgruppe gewährleisten und gesetzliche Vorgaben berücksichtigen (z. B. Verwendungsverbot von Halogenen in Kunststoffen). Die größte Bedrohung besteht in der ausbleibenden Verfügbarkeit eines Rohstoffes. Andererseits kann sich für FKV aus einer Verknappung oder Verteuerung von konkurrierenden Werkstoffen bereits zusätzliches Absatzpotenzial realisieren (z. B. bei Verteuerung von Metallen).

Entwicklungen, abseits der Werkstoff- oder Halbzeugseite, aber nachgeschalteter Prozessschritte, z. B. der Lackiertechnologie hin zu niedrigeren Prozesstemperaturen, könnten den Markt revolutionieren, ist aber keine Fragestellung dieser Arbeit, die werkstoffseitig den Schwerpunkt setzt. Im Ergebnis müssen auch für das Fließpressverfahren Produkteigenschaften entwickelt werden, die langfristig den größten Kundennutzen bieten und aufrechterhalten.

Weder die reine Innensicht mit der Bewertung der Stärken und Schwächen, noch die ausschließliche externe Betrachtung von Chancen und Risiken führen im Ergebnis zu Entwicklungsprojekten. Diese Analyseformen, intern wie extern, sind im Ergebnis aufeinander abzustimmen, um hieraus die geeigneten Entwicklungsthemen abzuleiten. Doch zeigt sich, dass aus der Kombination künftiger Verbote und bestimmter noch nicht kombinierter Eigenschaften sich Entwicklungsthemen für FKV-Werkstoffe definieren lassen. Damit eine angestrebte Verbesserung möglichst genau definiert werden kann, ist es empfehlenswert, vorab ein Benchmark durchzuführen. Mit dem Benchmark werden Eckwerte ermittelt, an denen die Entwicklungsergebnisse gemessen bzw. verglichen werden. Die Eckwerte stellen Maximalwerte dar und sollten zudem nicht singular betrachtet werden. Um entwicklungsseitig das Ist-Profil mit einem möglichen Maßstab zu vergleichen und die Entwicklungsziele zu definieren, hilft die Verwendung der Methode des „Quality Function Deployment“ (QFD-Methode). Sie wird nachfolgend vorgestellt und wird die voranstehenden Ergebnisse, besonders der Stärken und Schwächenanalyse, bestätigen.

2.2.3 Quality Function Deployment –Methode

Die „Quality Function Deployment (QFD)“ Methode unterstützt bei der systematischen Entwicklung von Produkten. Eine Marktanalyse stellt die Ist-Situation des Eigenschaftsspektrums im Verhältnis zu konkurrierenden Produkten dar. Aus dieser Analyse werden zu verbessernde Merkmale abgeleitet und auch gegenseitige Abhängigkeiten (Korrelationen) dargestellt. Dabei werden die Anforderungen von Kunden, respektive die des Markts, ermittelt und gleichzeitig die Attribute der künftigen Produkteigenschaften definiert. Das Ergebnis zeigt lediglich die Zielwerte auf, ohne eine Festlegung zur Umsetzung zu geben. Die QFD-Methode ermöglicht es, die Ergebnisse in der Darstellung des House-of-Quality zusammen darzustellen. Entsprechend Bild 2.15 können die Entwicklungsziele mit den Anforderungen und ggf. auch mit Merkmalen dargestellt werden, wie ein gewünschtes Entwicklungsziel zu erreichen ist. Dabei stellt das Feld „Was“ die Kunden-/ Marktanforderungen (Ergebnisse der Marktanalyse) dar. Diese Anforderungen werden mit der Ist-Situation in Bezie-

hung gesetzt (Feld „Wie“) und mit den konkurrierenden Materialien verglichen (Feld „Warum“). Dies entspricht der Stärken und Schwächen-Analyse. Oftmals wird empfohlen, für die Kategorisierung der eigenen Leistungsfähigkeit, der Einschätzung der Kundensicht und die Darstellung gegenüber dem Wettbewerber „neutrale“ Analysten im Rahmen der Marktforschung zu engagieren. Der finanzielle Aufwand hierfür kann immens sein und wurde hier nicht gewählt. Daraus werden die Zielvorgaben (Feld „Wieviel“) abgeleitet. Trotz der umfangreichen Analysen und Kategorisierungen ist es mit dem „House of Quality“ möglich, den Kundenwunsch/ die Marktanforderungen in einem Bild darzustellen [77].

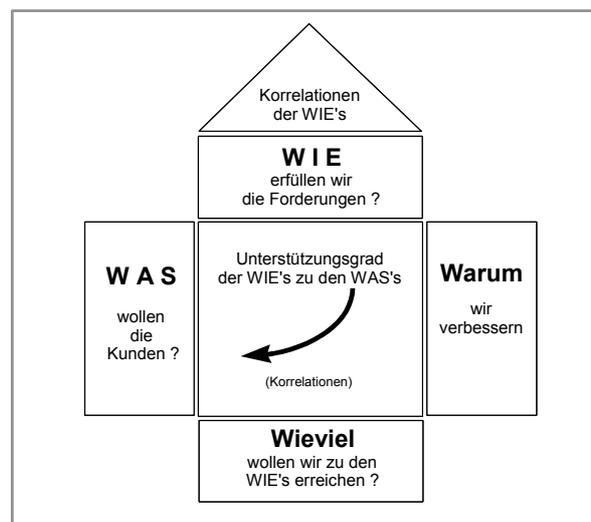


Bild 2.15: House-of-Quality als ein Ergebnis der QFD-Methode [aus: 78]

Die Anwendungsgebiete der QFD-Methode beschränken sich nicht nur auf die Aufdeckung des Kundenwunschs und der Beschreibung zur Umsetzung, sondern zielen auch konkret auf Verbesserungen und Neuentwicklungen von Dienstleistungen, Produkten bzw. (Herstellungs-) Prozessen ab. Mit dem technischen Fortschritt ist zur Weiterentwicklung auch diese Prozedur periodisch durchzuführen, da Veränderungen auf der Anlagenseite zu Produktverbesserungen führen können.

Zur Weiterentwicklung des Fließpressverfahrens von langfaserverstärkten Thermoplasten wurde dieses Verfahren angewandt (Bild 2.16). Dazu wurde die Bewertung nach der Methode des „House of Quality“ (HoQ) durchgeführt, um Entwicklungspotenziale aufzudecken. Marktanalyse und Bewertungen von Produkten sowie der Markterfolg im Bereich Automobil/ Transport für semistrukturale Bauteile zeigen somit, was Kunden wünschen (linke Spalte „Kundenanforderungen“). An vorderster Stelle stehen dabei die Kosten und mechanischen Eigenschaften, bezogen auf die Performance.

gleich drei mögliche LFT-Halbzeuge auf Basis von PP, PA und PEEK in die Bewertung integriert. Die wichtigsten Merkmale des Fließpressverfahrens sind dabei, wie bereits in vielen grundlegenden Arbeiten für FKV dargestellt wurde, Fragestellungen der Verstärkungsstruktur und der Imprägnierung [6, 79].

Betrachtet man die konkurrierenden Verfahren (rechte Spalte), bei denen LFT eingesetzt werden, gibt die rechte Spalte einen Vergleich zur Umsetzungsmöglichkeit der Verfahren Spritzguß (X), Fließpressen (F) und Thermoformen (O) wider. So sind hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften die Verfahren mit kontinuierlicher oder Lang-Faserverstärkung vorteilhaft, und das Spritzgießen als Verfahren im Nachteil. Für Massenanwendungen, die unter besonders hohem Wettbewerbs- und Kostendruck stehen, dem wichtigsten Entscheidungskriterium gemäß der Anforderungsliste, bilden Matrizes auf Basis von Standardthermoplasten die günstigsten Korrelationen mit Spektrum der FKV-Charakteristik [80].

Das sogenannte „Dach“, die dreieckige Spitze des HoQ, beschreibt die gegenseitige Beeinflussung der einzelnen Fließpresscharakteristika. Einerseits besteht eine günstige Beeinflussungsmöglichkeit von Automatisierung und Montage (+), auf der anderen Seite eine ungünstige Beeinflussungsmöglichkeit der Compoundierung der Matrix und der Verstärkungsstruktur (-).

Neben den Kosten und den mechanischen Anforderungen werden Eigenschaften wie Energiebilanz, Viskosität, Flammhemmung sowie das Recycling besonders durch die Charakteristik von FKV bestimmt. Die hierfür wichtigsten Kriterien gemäß dem „House-of-Quality“ stellen die Verstärkungsstruktur (einschließlich der Faserart), die Compoundier- bzw. Imprägnierfähigkeit, Additivierung, Faserlänge, -orientierung und die graduelle Einstellung der Eigenschaften dar. Aus diesem Kriterienkatalog können verschiedene Handlungsmaßnahmen abgeleitet werden, die als Einzelmaßnahme oder auch in Kombination als Entwicklungsaufgabe definiert werden, um Kundenanforderungen besser zu bedienen.

2.2.4 Fazit und Definition der Entwicklungsthemen

Die vorgestellte Analysemethodik bietet als Ergebnis einen Vergleich des Fließpressens mit anderen Pressverfahren. Die SWOT-Analyse zeigt unter anderem neben der Chancen- und Risikyanalyse eine detaillierte Stärken- und Schwächenanalyse der werkstofflichen Eigenschaften und das Entwicklungspotenzial auf. Gleichzeitig werden extern und prozessseitig einige Chancen und Risiken benannt, die bei der Materialauswahl Berücksichtigung finden müssen. Das Quality Function Deployment

bietet mit dem „House of Quality“ die Möglichkeit zur Qualitätsbeurteilung und integriert die vorgestellten Analysen.

Es bietet mittels eines einfachen Bewertungsschemas die Möglichkeit, Entwicklungspotenziale von Produkten und Verfahren abzuleiten.

Mit Blick auf das Verarbeitungsverfahren sollten die Anforderungen stärker umgesetzt werden, die derzeit nicht durch das Fließpressverfahren erfüllt werden. Dies sind neben den Kosten in erster Linie mechanische Eigenschaften wie z.B. Festigkeit, Steifigkeit oder auch Viskosität und einstellbare Faserorientierung. Als weitere wichtige Kundenanforderung der Darstellung des HoQ ergibt sich als Einzelmaßnahme die flammhemmende Ausrüstung. Weitere starke Anforderungscluster bilden Themengebiete des Fügens bzw. der Verbindungstechnik, Recycling sowie die Oberflächengestaltung (Lackierung).

Der Einfluss des Fließpressens auf die Verstärkungsstruktur (Faserlänge, -orientierung) und die Compoundier-/ Imprägnierfähigkeit des Verbunds, ist aus Kundensicht ebenfalls bedeutend. Die einstellbare Faserorientierung ist eng mit den Anforderungen an mechanische Eigenschaften verbunden. In weiteren Kapiteln dieser Arbeit werden diese Themen behandelt und Verbesserungsmöglichkeiten aufgezeigt. Dies ist einerseits die halogenfreie und umweltschonende flammhemmende Ausrüstung im Bereich der Halbzeugentwicklung. Andererseits wird eine Verfahrensänderung vorgestellt, mit der die Faserorientierung und somit mechanische Eigenschaften im Ergebnis verbessert werden. Abschließend wird eine Kombination der singulären Entwicklungsergebnisse erfolgen. Der hohe Kostendruck findet Berücksichtigung, indem der kostengünstige Standardthermoplast Polypropylen die Basis bildet. Aufgrund der rheologischen Eigenschaften von PP erscheint somit die Compoundierung und spätere Imprägnierung der Verstärkungsfasern zur Herstellung von FKV aus LFT mit erweiterten Eigenschaften leichter umsetzbar.

3 Eigenschaftserweiterung durch halogenfreie Flammhemmung bei LFT

Die bedeutende Einschränkung eines erweiterten Einsatzes von Thermoplasten besteht in der im Vergleich zu duroplastischen Werkstoffen nicht gegebenen Warmformbeständigkeit und Flammhemmung. LFT ersetzen zunehmend metallische Werkstoffe und kommen dabei als Strukturbauteile zum Einsatz, die besonderen Sicherheitsanforderungen unterliegen (Front-End-Träger Golf A5). Gerade diese Anwendung von LFT als Konstruktionswerkstoff für Front-End-Träger zeigt die Entwicklung (Golf A3: GMT-Front-End, Mini 2: LFT-Front-End (Fließpressverfahren), Golf A5: LFT-Front-End (Spritzgussverfahren)). Zwar werden im Straßenfahrzeugbau bei derartig großflächigen Strukturbauteilanwendungen noch keine flammhemmend ausgerüsteten Thermoplaste eingesetzt, doch mit zunehmend steigenden Anforderungen zum Schutz von Personen und materiellen Werten rückt die Frage der Flammhemmung zunehmend in den Mittelpunkt des Interesses. Die Anforderungen an Bauteile und Fahrzeuge sind erfahrungs- und ereignisorientiert („Elch-Test“, Mont-Blanc-Tunnel) und werden evolutionsstufig mit einem Modellwechsel realisiert.

Den sogenannten Massenkunststoffen, zu denen auch PP gezählt werden kann, bleibt der Einsatz bei kritischen Struktur- und Verkleidungsbauteilen trotz guten mechanischen Eigenschaftsspektrums in Verbindung mit Faserverstärkung aufgrund unzureichender Flammhemmung verwehrt. Die Überwindung dieser negativen Eigenschaft kann zu einem größeren Absatz von LFT führen, indem der flammhemmend ausgerüstete Werkstoff nun in neue Applikationsfelder vordringen kann. Die Herausforderung wird durch die Vorgabe einer halogenfreien Flammhemmung gesteigert, da diese Additive in größeren Mengen eingebracht werden müssen, um ein vergleichbares Beflammungsergebnis wie mit Halogenen zu erzielen.

Das später vorgestellte Entwicklungsergebnis möchte für LFT nicht nur die halogenfreie Flammhemmung als zusätzliche Eigenschaft vorstellen, sondern potenziellen Anwendern die Möglichkeit bieten, mit diesem Werkstoff neue Märkte zu eröffnen und in bisher nicht beachtete Anwendungsgebiete vorzudringen. Eine Möglichkeit stellt dabei die rechtzeitige Bereitstellung von Werkstoffen dar, die künftige legislative Rahmenbedingungen (z.B. 2000/53/EG-Altautoverordnung) berücksichtigen. Es wird zunehmend stärker erforderlich, Reinstoffe oder eindeutige Kombinationswerkstoffe zu verwenden und Halogene zu vermeiden [55]. Um bis 2015 einerseits die Verwertungsquote von 95 % und andererseits die Recyclingquote von 85 % zu erreichen,

werden thermoplastische Werkstoffe im Fahrzeugbau weiter an Bedeutung gewinnen. Zunehmend werden in Europa gesundheitlich bedenkliche Stoffe aus Produkten aller Lebensbereiche verbannt. Hierzu sind neben Blei und Cadmium auch Halogene zu zählen, wodurch die Forderung und Nachfrage nach wirksamen halogenfreien Flammenschutzmitteln in Thermoplasten auch außerhalb der Automobilindustrie deutlich wird.

3.1 Flammhemmung von Thermoplasten

Zur Flammhemmung kann eine Vielzahl an Additiven in Kunststoffe eingebracht werden. Aus Kostengründen sind dies oft halogenierte, organische Werkstoffe, doch werden diese Stoffe hinsichtlich ihres Umwelt- und Gesundheitseinflusses kritisch betrachtet, und der Einsatz stößt bei Verarbeitern, Anwendern und auch beim Gesetzgeber zunehmend auf Widerstand. Einen Ausweg kann der Einsatz von inhärent flammhemmenden Thermoplasten bieten, wie Polyetheretherketon (PEEK), Polyetherimid (PEI), Polyphenylsulfid (PPS), Polysulfone (PSU), Polyethersulfon (PES) und Polyphenylflurid (PVDF), welche als flammwidrig bezeichnet und durchaus in dieser Wirkung durch Additivierung noch verstärkt werden können. Diese Werkstoffe sind in einem weiten Anwendungsgebiet (Automobil, Luftfahrt, Medizintechnik, Elektro- und Chemische Industrie) verbreitet. Aufgrund der hohen Rohstoffkosten erfolgt die Verwendung nur in kritischen Bauteilen (z.B. elektrische Steckverbindungen, Motorraumabdeckungen, Bremssysteme) oder in solchen mit geringem Gewichtsanteil. Die üblicherweise eingesetzte Verarbeitungstechnik ist das Spritzgießverfahren. Doch werden diese Werkstoffe nicht als Granulat mit Langfaserverstärkung angeboten, sondern als flächige Halbzeuge mit kontinuierlicher Verstärkungsstruktur zur Weiterverarbeitung im Thermoformprozess. Wegen des daraus resultierenden Material- und Verarbeitungskostenanstieg können sie nicht in Massenanwendungen eingesetzt werden. Um die Brennbarkeit verschiedener Werkstoffe zueinander darzustellen, hilft das nicht anwendungsspezifische Kriterium des Limiting-Oxygen-Index (LOI). Er beschreibt die minimal notwendige Sauerstoffkonzentration in einem N_2O_2 -Gemisch, um das Brennen aufrecht zu erhalten [81]. Bild 3.1 zeigt für eine Auswahl bedeutender technischer Thermoplaste den LOI-Wert. Unter Zuhilfenahme von Flammenschutzmitteln kann der LOI-Wert gesteigert werden. Ab einem Wert größer als 30 werden Polymere als inhärent flammwidrig bezeichnet.

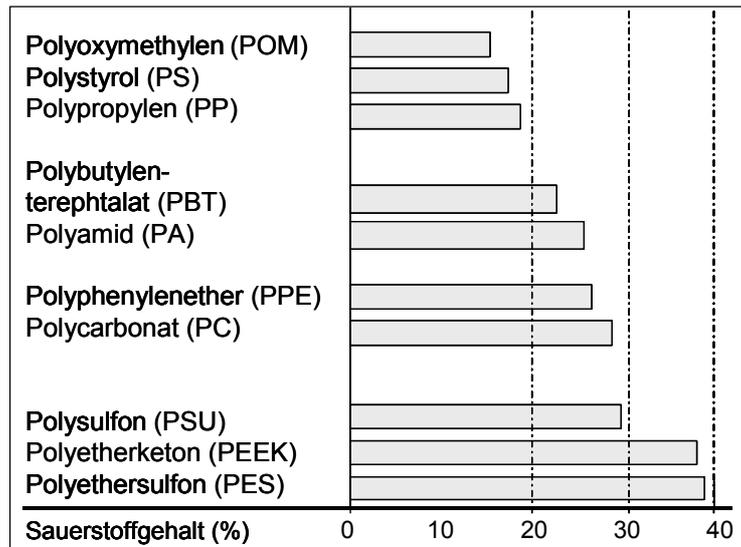


Bild 3.1: LOI-Werte für eine Auswahl wichtiger technischer Thermoplaste

Für große Serien oder Bauteile mit hohem Kostendruck, bei denen technische Thermoplaste (PBT, PA) und den Standardthermoplast PP eingesetzt werden, kann eine flammhemmende Ausrüstung des Werkstoffs durch Compoundieren erreicht werden und wirtschaftlich vorteilhaft sein [82].

Die Brennbarkeit der Faser-Kunststoff-Verbunde wird durch die Verstärkungsstruktur erleichtert. Die Verstärkungsstruktur, nicht brennbare Glasfaser, ist ein guter Wärmeleiter und begünstigt das Aufschmelzen der sie umgebenden Matrix, so dass diese Gegebenheit als „Dochteffekt“ bezeichnet wird. Um die brandschutztechnischen Anforderungen zu erfüllen, werden bei duroplastischen Harzen oftmals Harnstoff- und Melaminharze wegen des höheren Stickstoffgehalts eingesetzt. Aus dem gleichen Grund kann die Compoundierung von Thermoplasten mit diesen (halogenfreien) Werkstoffen als Additive erfolgen [83].

Flammschutzmittel (FSM) unterscheidet man in die beiden Kategorien organische und anorganische FSM, aber auch in ihrer Wirkungsweise, die auf chemischen Weg den Verbrennungsprozess hemmen oder mittels physikalischer Effekte (Kühlung, Schutzschicht, Verdünnung) wirken und so vor dem Eintritt in den Verbrennungskreislauf wirken. Die Wirkungsweise chemischer FSM ist effizienter als die physikalischer FSM [83, 84]. Chemische FSM entfalten ihre Wirkung während des Verbrennungskreislaufs in den Zuständen Gasphase und Feststoffphase. In der Gasphase wird der stattfindende Radikalmechanismus der Verbrennung unterbrochen und somit die Zufuhr brennbarer Gase. In der festen Phase kann das FSM einerseits die Polymerketten aufbrechen, so dass das Polymer fließt und die Flamme abreißt. Andererseits kann das FSM das Ausbilden einer Kohleschicht an der Oberfläche bewir-

ken (dehydratisierende Wirkung). Flammenschutzmittel können in reaktive und copolymeradditive Wirkungsweisen oder auch Kombinationen aus beiden unterschieden werden. Reaktive Flammenschutzmittel werden als Komponenten chemisch in das Polymermolekül eingebunden, womit die Flüchtigkeit unterdrückt wird. Die Einarbeitung von additiven Systemen erfolgt bei thermoplastischen Systemen nach der Polymerisation. Es ist dabei auf die Verträglichkeit zu achten. Durch den Einsatz oligomerer und polymerer Flammenschutzmittel, die eine höhere molekulare Masse besitzen, ist eine permanente Brandschutzausrüstung möglich. Die Einflussnahme der Flammenschutzmittelzusätze hängt auch vom Werkstoff ab, der als Matrix verwendet wird. Es ist dabei festzustellen, dass das Brennverhalten von Kunststoffen ein kompliziertes Phänomen ist, welches hauptsächlich von der chemischen Struktur des Polymers und einigen physikalischen Faktoren abhängt. Die Brennbarkeit ist besonders stark, wenn das Grundpolymer de-polymerisiert (thermo-oxidativer Abbau) und somit brennbare Monomere oder andere brennbare Produkte entstehen. Das Einbringen von nicht-brennbaren Elementen wie Cl, N, Si und P in die Polymerkette verringert die Brennbarkeit. Bei einigen Polymeren ist festzustellen, dass sie nicht brennbar sind, sofern die Polymerkette nur aus Kohlenstoff und einem nicht brennbaren Element besteht (z.B. PTFE, PVC). Bei diesen Kunststoffen erlischt die Flamme sofort, nachdem sie aus der Zündquelle genommen werden [84]. Die Wirkungsweise von FSM im Verbrennungskreislauf wird mit Bild 3.2 dargestellt.

Bild 3.2: Flammenschutzmittel und ihre Wirkung im Verbrennungskreislauf [83, 85, 86]

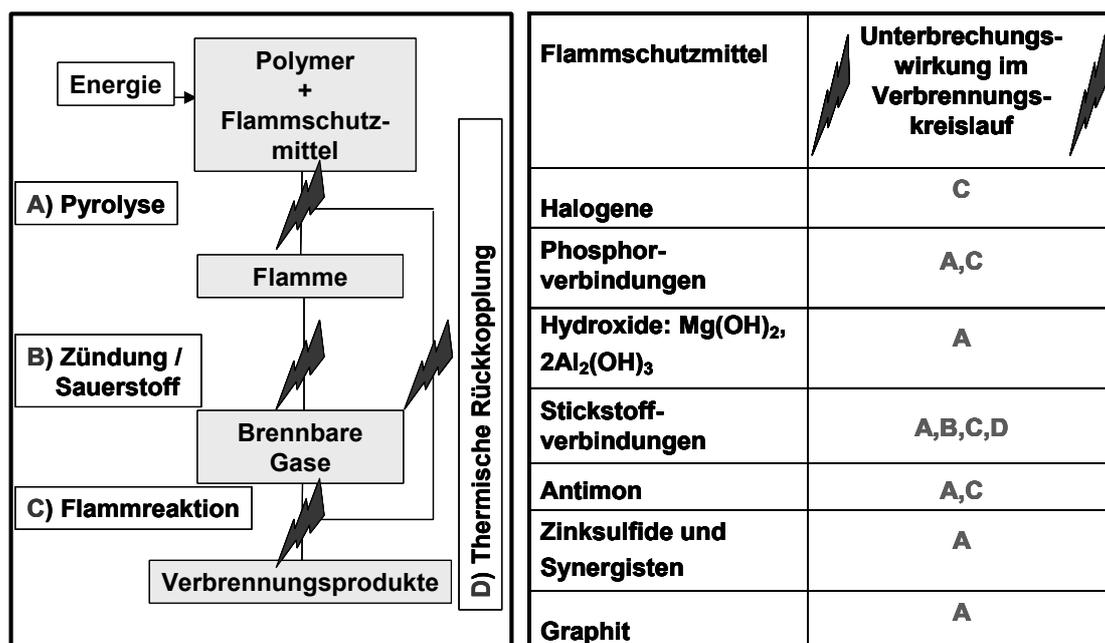


Bild 3.2 stellt das Brennverhalten von Kunststoffen schematisch dar. Im Verbrennungskreislauf schmelzen Thermoplaste unter Einwirkung einer externen Wärmequelle zunächst auf. Mit steigender Temperatur zersetzen sich diese, und es entstehen brennbare Gase und Anteile an verkohlten Substanzen, die sich an der Oberfläche des Substrates ablagern. Für das Weiterbrennen ist die Zone der Zersetzung von Bedeutung und die Anwesenheit von Sauerstoff erforderlich, damit sich die brennbaren Gase entzünden können und eine offene Flamme entsteht.

Durch die Entstehung von Gasen und deren Verbrennung wird wiederum neue thermische Energie frei, die zur weiteren Zersetzung der Polymere (Pyrolyse) führen, wodurch der Verbrennungskreislauf geschlossen wird (Thermisches Feedback). Demnach müssen Flammenschutzmittel mindestens an einer Stelle den Verbrennungskreislauf unterbrechen, um entweder das Zünden, die Flammenausbreitung oder die Wärmeabgabe zu verhindern. Gemäß Bild 3.2 werden die Flammenschutzmittel in ihrer Wirkungsweise nachfolgend vorgestellt.

3.1.1 Halogenhaltige Flammenschutzmittel

Beim Verbrennen von Thermoplasten entstehen durch Pyrolyse freie Radikale. Dabei kommt es in der Flamme zu einer Radikalkettenreaktion mit Sauerstoff, die zu weiterer Bildung und Zersetzung des Kunststoffes führt. Halogene bilden die 17. Gruppe des Periodensystems der Elemente, die aus den fünf Elementen Fluor (F), Chlor (Cl), Brom (Br), Jod (I) und Astat (At) bestehen. Sie werden auch als Salzbildner bezeichnet, weil ihre Metallverbindungen den Charakter von Salzen haben. Ihre Wirksamkeit nimmt in der Reihenfolge $F \ll Cl < Br < I$ zu.

Jod- bzw. fluorhaltige Verbindungen werden selten als FSM eingesetzt. Sie greifen nicht zum richtigen Zeitpunkt in den Verbrennungsprozess ein, weil Fluor einerseits stark an den Kohlenstoff gebunden ist und nicht in der Gasphase wirkt und zum anderen Jod derart leicht an den Kohlenstoff gebunden ist, dass eine geringe Energiezufuhr ausreicht Jod freizusetzen. Zudem setzt Jod andere Eigenschaften herab, wie die Lichtbeständigkeit [87].

Als Vorteile sind zu nennen, dass sie universell einsetzbar sind und keine Anforderungen an die Polymere bestehen. Nachteilig wirkt sich aus, dass bei der Verbrennung korrosive Gase entstehen und eine starke Rauchbildung entwickelt wird. Sowohl beim Brand als auch während des Recyclings können Dioxine oder Furane entstehen, was besonders für bromierte Diphenylether zutrifft. Die Verwendung von ha-

logenhaltigen FSM führt insgesamt zu geringeren physikalischen Eigenschaften. Einen Ausweg bietet hier die Verwendung halogenfreier FSM [83].

3.1.2 Phosphorverbindungen

Als Flammenschutzmittel wird Phosphor in einer reinen Form und in organischen Verbindungen eingesetzt. Obwohl dieser Werkstoff seit vielen Jahren ein bekanntes FSM darstellt, ist die Wirkungsweise im Verbrennungskreislauf von Phosphor und seinen Verbindungen jedoch noch nicht einheitlich geklärt. Es wird davon ausgegangen, dass Phosphor hauptsächlich in der festen Phase reagiert. Er wirkt mit der Polymerschmelze und erleichtert die Zersetzung der Polymere. Es entsteht Phosphorsäure, die mit der Polymerschmelze reagiert, so dass Wasser gebildet wird, was zu einer Verkohlung führt. In der Gasphase bilden sich Phosphoroxidverbindungen, die H- und OH-Radikale abfangen und somit die Flamme zum Erlöschen bringen.

Die organischen Phosphorverbindungen bieten die Möglichkeit, einen effektiven Flammenschutz von technischen Kunststoffen ohne halogenhaltige Substanzen einzurichten. Es stehen hierfür effiziente Herstellungsverfahren zur Verfügung, um das FSM in die Matrix einzubinden. Eine Auswahl an organischen Phosphorverbindungen stellt das Bild 3.3 vor.

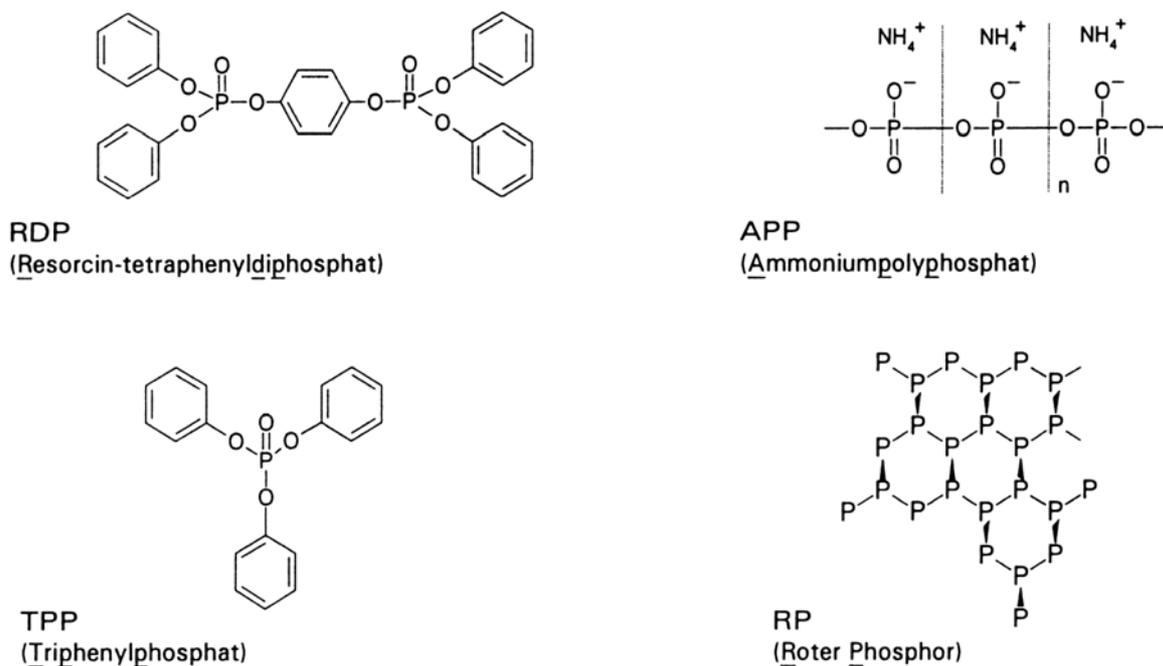


Bild 3.3: Auswahl an organischen Phosphorverbindungen [aus: 88]

Phosphorverbindungen sind als toxikologisch unbedenklich einzustufende FSM anzusehen. Die organischen Phosphorverbindungen haben kaum Einfluss auf die

Lichtempfindlichkeit oder Oberflächenversprödung. Die Wirksamkeit dieses Flamm-
schutzmittels wird durch den Dochteffekt der Glasfasern kaum eingeschränkt. Die
Schäumungsreaktion setzt bei einer Temperatur oberhalb von 300 °C in Verbindung
mit einer Zündquelle ein. Dieser Schaum bildet eine Dicke von 2-3 mm aus und be-
wirkt eine Trennung von der Flamme.

Diese Kombinationen können zudem auch in PP- oder PE-Systemen angewandt
werden, wobei in Abhängigkeit vom Schutzgrad der Oberfläche eine Mindestmenge
an Flammenschutzmittel erforderlich ist.

Bei der Bewertung dieser FSM sind als Vorteile folgende anzuführen:

- sehr geringe Rauchgasdichten,
- geringe Korrosivität der Rauchgase,
- geringere Wärmefreisetzung im Brandfall als bei halogenhaltigen FSM,
- geringere Ausbreitungsgeschwindigkeit als bei halogenhaltigen FSM,
- sehr gute Lichtstabilität.

Als nachteilig ist bei diesen (halogenfreien) Kombinationsflammschutzmitteln anzu-
merken, dass die Anpassung an Brandschutzanforderungen kaum möglich ist, wes-
halb eine ausreichend flammhemmende Dosierung oft zu einer Überdimensionierung
führt. Gerade bei den Synergisten werden die Flammenschutzmittel teilweise einzeln
und nicht in Kombination angesprochen, was in der Wirkung zu einer Ergänzung
führt [88]. Dieses Flammenschutzmittel ist zur halogenfreien Flammhemmung von PP-
LFT aussichtsreich, doch aufgrund schwieriger Dosierung und gleichzeitig hoher
Kosten und Wirksamkeit, erscheint eine Verwendung nur als Synergistbestandteil
technisch und wirtschaftlich sinnvoll.

3.1.3 Hydroxide

Die Funktionsweise von Hydroxiden basiert im Vergleich zu anderen Flammschutz-
mitteln auf einem rein physikalischen Vorgang.

Die FlammSchutzwirkung von Aluminium- und Magnesiumhydroxid entwickelt sich
aus der endothermen Zersetzung in ein Oxid und Wasserdampf. Die flammhemmen-
de Reaktion ist bei den beiden Hydroxiden identisch. Durch die Abspaltung von
Wasserdampf wird dem System Energie entzogen, so dass die Polymerschmelze
abkühlt. Zudem bewirkt der Wasserdampf eine Verdünnung der brennbaren Gase,
d.h. der Inertstoffgehalt der Gasphase wird gesteigert. Die Starttemperatur der bei-
den Flammschutzmittel ist dabei unterschiedlich. Während bei Aluminiumhydroxid

bereits ab 200 °C die Reaktion $(2 \text{ Al} (\text{OH})_3 \rightarrow \text{Al}_2 \text{ O}_3 + 3 \text{ H}_2\text{O})$ startet, entwickelt Magnesiumhydroxid ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) erst ab ca. 340 °C die wasserabspaltende Reaktion. Die niedrige Starttemperatur von Aluminiumhydroxid schließt es zur Verwendung bei vielen Thermoplasten aus, da deren Verarbeitungstemperatur vielfach höher liegt. Bei der Bewertung von $\text{Mg}(\text{OH})_2$ sind als Vorteile anzuführen, dass im Brandfall keine toxischen Gase durch das Flammenschutzmittel entstehen, sondern lediglich Wasser. Zudem verfügt ein Compound mit $\text{Mg}(\text{OH})_2$ über isolatorische Eigenschaften, und es entstehen im Brandfall nur geringe Rauchgasdichten. Als nachteilig ist anzuführen, dass für eine effiziente Flammenschutzwirkung ein Füllstoffgehalt von 50 Gewichtsprozent (Gew.-%) erforderlich ist, was zu einer Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften führt. Dieser hohe Füllstoffanteil - bezogen auf das Polymer können es bei PP-LFT bis zu 65 Gew.-% sein - verlängert den Compoundierschritt, da eine homogene Dispergierung des vergleichsweise kostengünstigen $\text{Mg}(\text{OH})_2$ angestrebt wird. Auch dieses Flammenschutzmittel erscheint aussichtsreich für PP-LFT, doch kann der hohe Füllstoffanteil sich auf die mechanischen Eigenschaften nachteilig auswirken.

3.1.4 Antimonoxide (Antimontrioxid, Antimonpentoxid (SbX_3))

Antimonoxide gehören zu der Gruppe der Synergisten, die nur in Verbindung mit halogenhaltigen Komponenten wirksam als Flammenschutzmittel in der Gasphase wirken, denn sie entwickeln selbst nur eingeschränkt eine flammhemmende Wirkung.

Bei der Bewertung von Antimonoxiden können als Vorteile angeführt werden, dass

- die endotherme Reaktion einen Kühleffekt bewirkt,
- die Dichte von SbX_3 größer ist als die Dichte von O_2 , weil der Sauerstoff aus der Verbrennung verdrängt wird,
- Wasserstoffradikale in der Gasphase abgefangen werden,
- eine niedrige Toxizität der Reaktionsprodukte vorliegt.

Dennoch sind auch Nachteile zu nennen:

- Antimonoxide sind bei zu hoher Dosierung karzinogen,
- eine halogenhaltige Komponente ist dennoch meist erforderlich,
- es können korrosive Rauchgase entstehen.

Aufgrund der Erforderlichkeit von Halogenen ist diese Gruppe zur Herstellung von halogenfrei flammhemmend ausgerüstetem PP-LFT ungeeignet.

3.1.5 Organische Stickstoffverbindungen (z.B. Melamincyanurat)

Zu der Gruppe der organischen Stickstoffverbindungen ist besonders Melamincyanurat zu zählen. Ähnlich wie bei rotem Phosphor ist die Wirkungsweise noch nicht vollständig geklärt, da es sich um einen komplexen Mechanismus handelt. Es wirkt sowohl in der Fest- wie in der Gasphase, so dass im Brandfall eine Reaktion in der Form des Schäumens eintritt und die Bildung brennbarer Gase unterbricht oder das Polymer erst gar nicht entzündet, sondern durch Wegfließen dem Verbrennungssystem Wärme entzieht. Die Produkte der Zersetzungsreaktion des Flammenschutzmittels (NH_3 , H_2O und CO_2) kühlen die Brandgase ab. Bei der Beurteilung von Melamincyanurat sind neben der erst gar nicht einsetzenden Verbrennung des Polymers weitere folgende Vorteile anzuführen:

- sehr effizient und benötigt daher nur geringe Mengen,
- kein brennendes Abtropfen,
- vielseitige Einfärbungen möglich.

Dieses Flammenschutzmittel ist trotz der Effizienz kostenintensiv und wird als Synergistbestandteil in die Untersuchungen zu halogenfrei flammhemmend ausgerüstetem PP-LFT mit aufgenommen.

3.1.6 Zinksulfid

Zinksulfid wirkt in der festen Phase und bildet eine nichtbrennbare Kohlenstoffschicht aus. Dies bewirkt ein Verlöschen der Flamme und eine Verringerung der Rauchgase. Weiterhin geht eine Verbesserung der Thermostabilität und der Alterungsbeständigkeit damit einher. Zudem kann Zinksulfid als Flammenschutzmittel leicht mit dem Matrixwerkstoff compoundingiert werden und besitzt gute Trockenschmiereigenschaften bei der Aufbereitung des Kunststoffes. Daneben kann Zinksulfid als Synergist zusammen mit Antimonoxid und Melamincyanurat eingesetzt werden, wodurch auf den Einsatz halogen- und antimontrioxidhaltiger FSM erst recht verzichtet werden kann. In diesem Fall kann es auch für (glas-) faserverstärkte Polyamide eingesetzt werden, da es als Masterbatch (mit Additiven ausgerüstetes Polymer) für die Glasfaserverstärkung herangezogen werden kann [89]. Die Faserverstärkung senkt jedoch die Flammhemmung wiederum stark herab [90]. Es ist deshalb als Flammenschutzmittel für PP-LFT kaum aussichtsreich.

3.1.7 Expandierender Graphit

Expandierender Graphit, natürlicher Rohstoff und anorganisches FSM, wird derart hergestellt, dass er zunächst mehrfach gemahlen und danach gereinigt wird. Im Anschluss erfolgt eine Behandlung mit starken Säuren oder Oxidationsmitteln, so dass wasserunlösliche Salze entstehen, die im Brandfall zur Expansion des Graphits führen. Die Expansion hängt von den eingesetzten Säuren ab, die ein Verarbeitungstemperaturfenster von 140 °C bis 200 °C zulassen. Das Expansionsvolumen erreicht einen Wert des bis zu 300-fachen ursprünglichen Volumens, was von der eingesetzten Korngröße abhängt. Das Farbspektrum bewegt sich von grau-silbern bis schwarz [91]. Neuere Entwicklungen für expandierenden Graphit als Flamschutzmittel lassen im Ergebnis eine Verarbeitung bei höheren Temperaturen zu. Die flammhemmende Wirkung startet erst ab 300 °C, wodurch die Verwendung in Polypropylen möglich wird [92]. Als sehr nachteilig wirken sich der hohe Füllstoffanteil aus, der für eine flammhemmende Ausrüstung erforderlich ist, und auch die hohen Kosten für den temperaturstabileren Graphit.

3.1.8 Zusammenfassende Übersicht und Flamschutzmittelauswahl zum Einsatz in PP-LFT

Die vorgestellten Flamschutzmittel können hinsichtlich ihrer Wirksamkeit, der einzusetzenden Menge und der Umweltverträglichkeit, wie in Bild 3.4 dargestellt, zu einem Portfolio zusammengefasst werden.

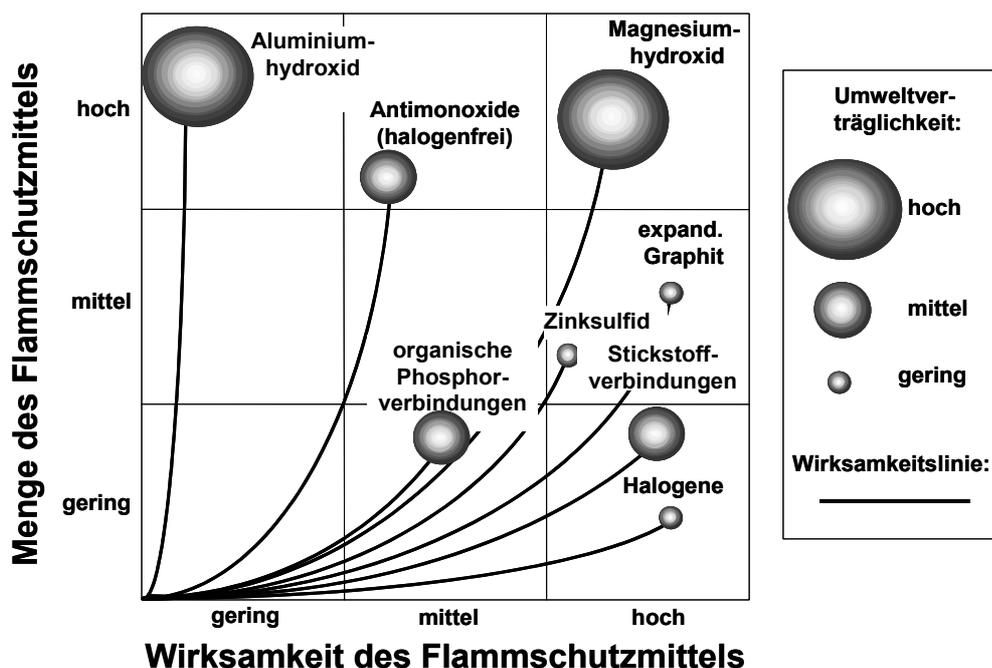


Bild 3.4: Portfoliobewertung verfügbarer Flamschutzadditive für Thermoplaste

Diese Darstellung stellt eine singuläre und allgemeine Betrachtungsweise dar, Synergieeffekte aus der Kombination verschiedener Flammenschutzadditive kommen in dem Portfolio nicht zum Tragen. Je nach Matrixtyp und Anwendungsgebiet werden unterschiedliche Flammenschutzmittel eingesetzt. Unter Berücksichtigung der Vor- und Nachteile und der Portfolio-Kriterien wurde für die flammhemmende Ausrüstung von PP-LFT die Auswahl gemäß des zusammenfassenden Vergleichs der Tab. 3.1 getroffen.

Tab. 3.1: Zusammenfassender Vergleich und Auswahl der Flammenschutzmittel für PP-LFT

Anforderungskriterien	Mengeneffizienz	Kosteneffizienz	Umweltverträglichkeit	Besonderes Handling	Bes. Schutzmaßnahmen	Verfügbarkeit	Verwendung in PP-LFT
Flammenschutzmittel							
Halogene	++	++	--	+	--	0	-
Phosphorverbindungen	0	0	+	++	-	0	+
Antimonoxide	--	-	-	+	--	0	-
Stickstoffverbindungen	+	0	+	0	0	0	+
Zinksulfid	0	-	0	-	0	0	-
Magnesiumhydroxid	--	+	++	0	+	+	+
Expandierender Graphit	-	-	-	+	+	-	-

Das unumstößliche Kriterium von Additiven zur Verwendung als Flammenschutzmittel in dieser Arbeit ist die Halogenfreiheit und die damit verbundene Umweltverträglichkeit (z. B. Berücksichtigung der Säurebehandlung von Graphit). Weiterhin schränken erforderliche Schutzmaßnahmen (Berücksichtigung der Brennbarkeit von Phosphor) deren Verwendung für diese Arbeit ein. In Verbindung mit der Kosteneffizienz fiel die Wahl auf Phosphor-, Stickstoffverbindungen und Magnesiumhydroxid. Diese halogenfreien Flammenschutzmittel und weitere Additive wurden compoundiert, mechanisch charakterisiert und Brennbarkeitstests unterzogen. Gleichzeitig wurden marktübliche Compounds in die Untersuchungsreihe mit aufgenommen, um mögliche Mengeneffekte auf Herstellerseite zu nutzen. So wurden Harnstoffcompounds, Magnesiumhydroxid und Phosphor-Stickstoff-Synergisten (Exolit 751TP[®], Hersteller: Fa. Clariant GmbH) als Additive in glasfaserverstärktes PP eingebracht und charakterisiert. Expandierender Graphit wurde nicht in diese Arbeit aufgenommen, da die Verarbei-

tungstemperaturen von glasfaserverstärktem PP nur eine entsprechend kostenintensive Spezialtype dieses Flammenschutzmittels zugelassen hätten.

Eine im Prinzip ähnliche Untersuchungsreihe für PP-LFT wurde mit der Arbeit von SCHARTEL [93] vorgestellt. Die Untersuchungen werden dort vorwiegend mit expandierendem Graphit und auch mit Exolit® 751TP durchgeführt. Allerdings liegt der Untersuchungsschwerpunkt auf der Degradation des Polymers und der Wärmeentwicklung. In dieser Untersuchung wurden jedoch ausschließlich naturfaserverstärkte Compounds auf PP-Basis eingesetzt.

3.2 Prozessaufbau und LFT-Verarbeitung

Für die presstechnische Verarbeitung von flammhemmend ausgerüsteten langglasfaserverstärkten Thermoplasten muss die Mischung der drei Komponenten (Thermoplast, Glasfaser und Flammenschutzmittel) vor dem eigentlichen formgebenden Pressprozess erfolgen. Allen später beschriebenen Verfahrensvarianten der Fließpressverarbeitung ist gemeinsam, dass zunächst die Additivierung bzw. die Compoundierung der Matrix mit Flammenschutzmittel erfolgt, d.h. die Herstellung eines Masterbatches. Dieses Masterbatch wird anschließend mit einer Faserverstärkung ausgerüstet, um ein Fließpressplastifikat bereit zu stellen.

Im Hinblick auf eine gute Dispergierung des Flammenschutzmittels in der Matrix erfolgte die Masterbatchherstellung separat von den anderen Prozessschritten, auch mit dem Ziel es wiederum allen Verfahrensvarianten grundsätzlich zuführen zu können.

3.2.1 Masterbatchherstellung

Die Herstellung des Masterbatches erfolgte mittels eines PC-gesteuerten Doppelschneckenextruders (Hersteller: Fa. Brabender OHG, maximaler Austrag 11 kg/Std.) und einer Kombination von Dosiereinheiten für Pulver und Granulat (Hersteller: Fa. Color Exakt GmbH, Type PF 1200 und SM 1100 D).

Bereits während der Herstellung des Masterbatches ist der Einfluss der Fließfähigkeit des Polymers, z.B. auf die Ausbringungsmenge festzustellen. Das Fließverhalten faserverstärkter Compounds wird in Kapitel 3.4 beschrieben. Ein entscheidendes Kriterium bei der Auswahl des Matrixwerkstoffs ist die Dispergierfähigkeit des einzubringenden Flammenschutzmittels. Daher wurden zur Untersuchung der Fließfähigkeit des Gesamtsystems PP-Typen gewählt, die einen im MFI (Melt Flow Index [$\text{g} \cdot 10 \text{ min}^{-1}$]) unterschiedlichen Wert aufweisen. Der MFI-Wert stellt eine für gleiche, ohne dichteändernde Füllstoffe ausgerüstete Matrizes geeignete Vergleichsgröße

dar. Bei der Herstellung der Masterbatches auf Basis unterschiedlicher Flamm-
schutzmittel hinsichtlich Typ und mittlerer Korngröße, steigt das auftretende Dreh-
moment des Doppelschneckenextruders als Maß der Viskosität unter gleichen Tem-
peraturbedingungen, gleicher Ausbringungsmenge bei kleinerer Teilchengröße und
zunehmendem Teilchenanteil stark an (Bild 3.5).

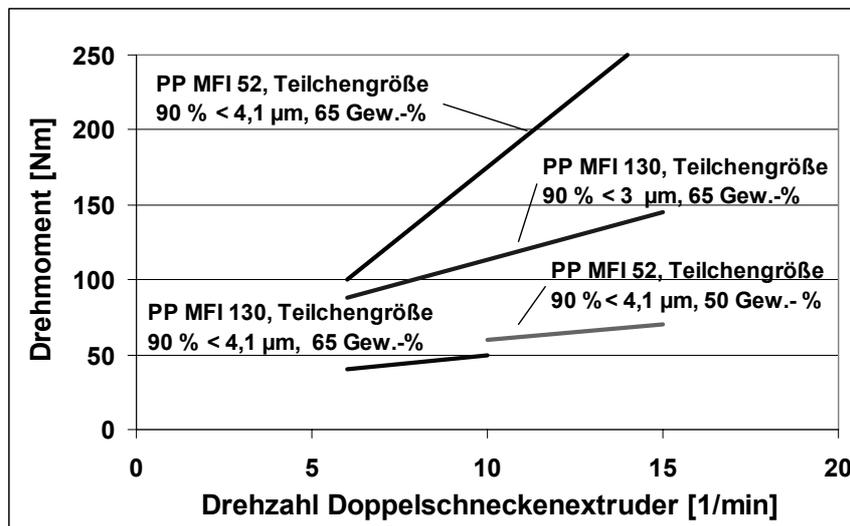


Bild 3.5: Fließfähigkeit repräsentiert durch Drehmoment verschiedener Masterbatches während des Compoundiervorgangs in Abhängigkeit von der Drehzahl

Es ist festzustellen, dass mit größerem MFI-Wert sich die Dispergierung des Additivs in PP verbessert. Eine geringe Teilchengröße vergrößert die Oberfläche und so die Fläche zur inneren Reibung. Im Kapitel 3.4 der rheologischen Untersuchung erfolgt ein Vergleich der Masterbatches auf Basis der MVR-Werte (Melt-Volume-Rate [$\text{cm}^3 \cdot 10 \text{ min}^{-1}$]), denn diese Größe bietet einen von der Dichte unabhängigen Vergleich der Fließfähigkeit. Die Kennwerte MFI und MVR werden auf der Basis der Prüfvorrichtung nach DIN EN ISO 1133 unter je nach Thermoplast unterschiedlichen Bedingungen bestimmt. Diese Bedingungen richten sich hauptsächlich an dem Schmelzpunkt der Thermoplaste aus.

3.2.2 LFT-Pressmassen-Aufbereitung

Bild 3.6 stellt die verschiedenen Varianten zum Herstellen des Plastifikats (Pressmasse) vor. Es sind dabei grundsätzlich zwei Plastifiziervarianten zu unterscheiden, die entweder als Einschnecken- oder Zweischneckenplastifizierprozess bezeichnet werden. Entsprechend kann die Einmischung des Flamm-
schutzmittels innerhalb der dargestellten Prozesskette an zwei Stellen des Prozesses erfolgen, entweder an der Stelle der Imprägniereinheit der Faserbündel, wie zur Herstellung von Stäbchengranulat üblich, oder an der Stelle der Pastifiziereinheit.

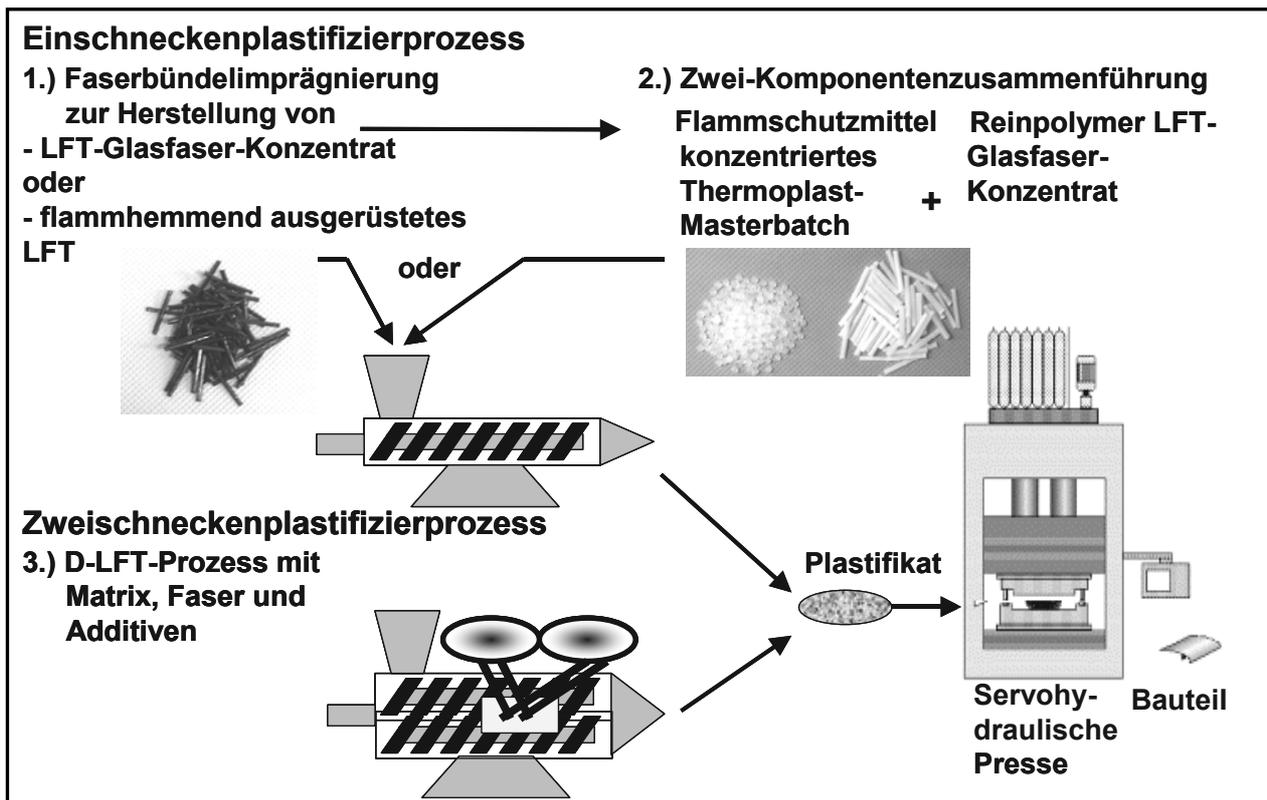


Bild 3.6: Fertigungsvarianten zur Herstellung von flammhemmend ausgerüsteten, faserverstärkten Fließpresshalbzeugen und -bauteilen

Aus diesen beiden Grundtypen (Einschnecken- und Zweischneckenplastifizierprozess) zur Herstellung eines Plastifikats ergeben sich drei Möglichkeiten zur Integration des Flammschutzmittels zur Herstellung flammhemmend ausgerüsteter Bauteile:

1. An der Stelle zur Herstellung von Stäbchengranulat, z.B. mit dem Faserbündelimpregnierverfahren und der Imprägniereinheit mit „Imprägnierad“ (Bild 2.8), kann das flammhemmend ausgerüstete Masterbatch (nur mit Additiven ausgerüsteter Matrixwerkstoff) zur Imprägnierung der Fasern eingesetzt werden. Jedoch werden von dem Faserbündelimpregnierverfahren besondere Anforderungen an das Polymer gestellt ($\text{MFI} > 18 \text{ g} \cdot 10 \text{ min}^{-1}$; maximale, dispergierte Partikelgröße von $140 \mu\text{m}$ im Polymer, aufgrund der Porengröße des Imprägnierades) [55]. Das derart hergestellte flammhemmend ausgerüstete Stäbchengranulat kann anschließend wie bei der zweiten Variante im Einschneckenplastifizierprozess weiterverarbeitet werden.
2. Bei dieser Variante der Zwei-Komponentenzusammenführung wird zunächst ein Masterbatch, ein mit FSM-Additiven hoch konzentriertes, ausgerüstetes Polymer, compoundiert. Dieses flammhemmend ausgerüstete Masterbatch wird zusammen mit einem an Glasfasern hoch konzentrierten Stäbchen-

granulat dem Einschneckenplastifizierprozess zugeführt, homogenisiert und zu einer Pressmasse plastifiziert.

3. Die dritte, anlagenintensive Variante stellt den Direkt-LFT-Prozess dar, wobei die Compoundierung des Kunststoffes über eine Extruderkombination mit zwei Doppelschneckenextrudern erfolgt. Der erste Standard-Zweischneckenextruder dient zum Aufschmelzen und Compoundieren des Kunststoffes. Der zweite, speziell für dieses Verfahren konzipierte Zweischneckenextruder zieht die Rovingstränge ein und bewirkt das Zusammenbringen und Dispergieren des Kunststoffes und der Glasfasern.

Bei der Bewertung der Verfahren ist festzustellen, dass die zweite Variante sich kritischer darstellt als die anderen, weil hierbei in einem Schritt die Homogenisierung der Komponenten Flammenschutzmittel und Glasfaserbündel erfolgen soll. Eine erforderliche Mischleistung hängt von der Schneckengeometrie (L/D-Verhältnis) ab, kann jedoch durch entsprechenden Staudruck kompensiert werden. Eine Steigerung des Staudrucks kann die Faserlängenverteilung der Glasfasern negativ beeinflussen und auch die Homogenisierung behindern.

Die Varianten 1 und 3 werden hinsichtlich der zu erreichenden Produktqualitäten als nahezu gleichwertig eingestuft [21]. Mit einer Maschinenausstattung gemäß Variante 3 ist es möglich, die thermoplastische Matrix, Flammenschutzmittel und Fasern zu einer Pressmasse aufzubereiten, ohne die Matrix zweimal über Schmelztemperatur zu erwärmen. Die Verfahrensvariante 3 stellt trotz relativ hoher Investitionskosten das für hohe Ausbringungsmengen und den damit verbundenen geringeren Stückkosten das rationellste und kostengünstigste Verfahren dar.

Für die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit wurde aufgrund der vorhandenen Gerätetechnik gemäß Variante 2 verfahren. Der Einsatz von Fließ- und Dispergierhilfen brachte bei der Compoundierung nicht den gewünschten Erfolg, um mit den Masterbatches FSM-LFT-Stäbchengranulat im Faserbündelprägnierverfahren herzustellen, da das Imprägnierad aufgrund der Faserschutzmittel verstopfte. Die Verfahrensvariante 2 mit der Feingliederung der Verarbeitungsschritte ermöglicht gerade für das Compoundieren eine genaue Dosierung sowie Kontrolle der Mischungsverhältnisse und somit einen effizienten Materialverbrauch.

3.2.3 Eingesetzte Anlagentechnik

Mit der Festlegung auf die Verfahrensvariante 2 wurden zur Durchführung ein Horizontalplastifizierer (Hersteller: Kannegiesser Kunststofftechnik GmbH) und eine parallelgeregelt Bauteilpresse (Typ: Dieffenbacher PHP 800/650) verwendet.

Der Schneckendurchmesser des Plastifizierers beträgt 150 mm und das L/D-Verhältnis beträgt 26. Der Plastifizierer verfügt über sechs Heizzonen, die bis auf eine Temperatur von 320 °C eingestellt werden können. Das Austragsvolumen kann auf maximal 1,3 dm³ eingestellt werden. Der Systemdruck und auch der Staudruck beträgt maximal 120 bar. Die Drehzahl der Schnecke kann zwischen 10 und 60 min⁻¹ variiert werden. Am Kopf des Plastifizierers können Düsenkopfgeometrien variiert werden, so dass Plastifikate mit 80 mm und mit 30 mm Durchmesser hergestellt werden können.

Das servohydraulische Parallelhaltesystem der Presse verhindert das Abkippen des Pressenstößels, so dass definierte Fließbedingungen vorliegen und auch großflächige Teile mit gleichmäßiger, sehr geringer Wanddicke (von ca. 2 mm) hergestellt werden können. Die maximale Presskraft beträgt 8.000 kN und kann bis zu einer Presskraft von 6.500 kN parallelgeregelt werden. Je nach Pressgeschwindigkeit beträgt die Parallelitätsabweichung weniger als 0,02 mm. Hohe Schließ- und Öffnungsgeschwindigkeiten von maximal 800 mm/s, kombiniert mit einer Druckaufbauzeit von weniger als 0,5 s, verbessern die Reproduzierbarkeit der Verarbeitung und ermöglichen eine Zykluszeit von nur 35 s. Die Anlagentechnik ist in Bild 3.7 dargestellt. Sie ist mit einem Messwerterfassungssystem ausgestattet, das sämtliche relevanten Maschinen- und Prozessparameter mit einer Frequenz von 100 Hz aufzeichnet und anschließend mit einem Analyseprogramm tabellarisch sowie graphisch in beliebiger Form darstellen kann.

Erfasst werden dabei folgende Parameter:

- Prozesszeit,
- Sollkraft,
- die von der Parallelhaltung erzeugte Gegenkraft,
- die resultierende auf das Material wirkende Kraft,
- die einzelne Gegenkraft eines Pressenstößels zur Parallelhaltung,
- Soll- und Istgeschwindigkeit des Oberwerkzeugs,
- Phase des Pressenprogramms (weg- oder kraftgeregelt),
- Position des Oberwerkzeugs bezogen auf den Referenzpunkt des Leerhubs,

- 6 Kanäle zum Aufzeichnen der Werkzeuginnendruck,
- 2 Kanäle zum Aufzeichnen der Werkzeugtemperatur,

Position der einzelnen Parallelhaltezyylinder bezogen auf deren Referenzpunkt.

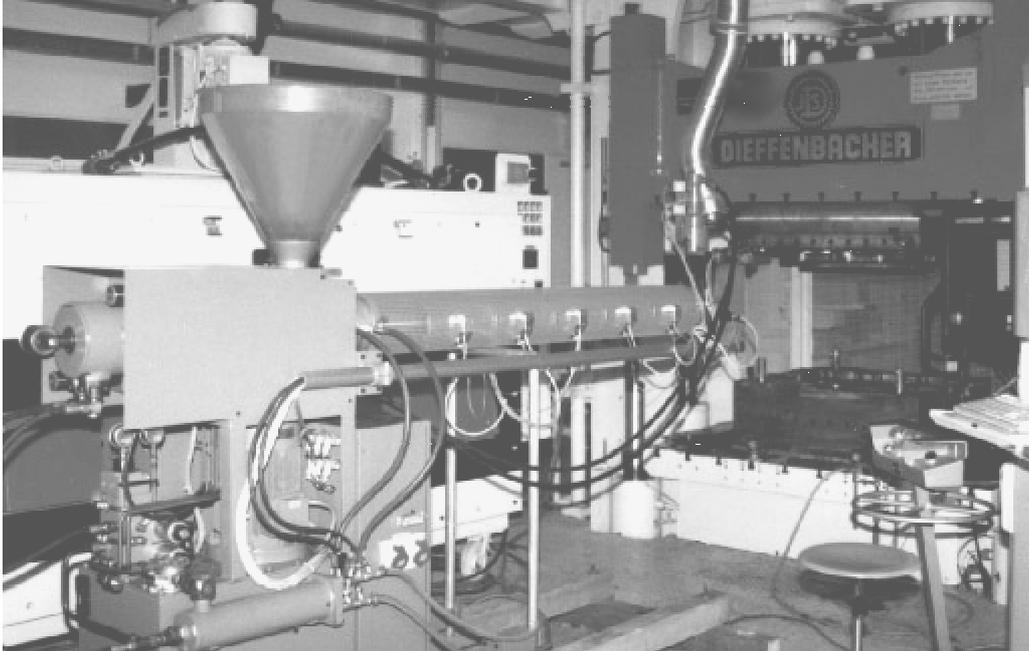


Bild 3.7: Einschneckenhorizontalplastifizierer und parallelgeregelte Bauteilpresse am IVW zur Versuchsdurchführung

Um den Presskraftaufwand zur Herstellung der verpressten Materialien zu vergleichen, werden Platten hergestellt und daraus zusätzlich Probekörper zur mechanischen Charakterisierung entnommen. Die Platten werden mittels eines beheizten Werkzeugs hergestellt. Die quadratische Kavität besitzt eine Kantenlänge von 546 mm und wird über Tauchkanten abgedichtet.

3.2.4 LFT-Materialkombinationen und Verarbeitungsparameter

Nach der wie in Kapitel 3.2.1 beschriebenen Herstellung des Masterbatches, wird dieses gemäß der Verfahrensvariante 2 des Kapitels 3.2.2 zusammen mit einem Glasfaserstäbchengranulat im Einschneckenplastifizierer zu einer Pressmasse aufbereitet. Das Stäbchengranulat, üblicherweise mit einem Fasergewichtanteil von 60 Prozent, leistet den Beitrag für die Faserverstärkung im Bauteil. Zur Untersuchung wurden die mit Tab. 3.1 vorgestellten und ausgewählten Flammschutzmittel herangezogen. Diese wurden gemäß der Tab. 3.2 entweder in Eigenfertigung compoundiert oder auch zugekauft. Diese Masterbatches mit Magnesiumhydroxid, Melamin-cyanurat und Phosphor-Stickstoff-Synergisten wurden zusammen mit glasfaser-verstärktem Stäbchengranulat zu Prüfplatten für anschließende Untersuchungen verarbeitet. Eine Übersicht der eingesetzten Materialkombinationen liefert Tab. 3.2.

Tab. 3.2: Übersicht eingesetzter Materialkombinationen

Material	Pressenmassen mit Masterbatches der Eigenfertigung Abkürzung mit Gewichtsanteilen [Gewichtsprozent]	PP	GF	Mg(OH) ₂	P-N-Synergist	M-Synergist	Ca-CO ₃
		Angaben in Gewichtsprozent					
A	PP [100]	100					
B	PP [50]-Mg(OH) ₂ [50]	50		50			
C	PP [70]-GF [30]	70	30				
D	PP [45]-Mg(OH) ₂ [25]-GF [30]	45	30	25			
E	PP [40]-GF [60]	40	60				
F	PP [47]-P/N-Syn. [23]-GF [30]	47	30		23		
	Pressenmassen mit zugekauften Compounds/ Masterbatches Abkürzung mit Gewichtsanteilen [Gewichtsprozent]						
G	PP [60]-M-Syn. [40]	60				40	
H	PP [58]- Mg(OH) ₂ +CaCO ₃ [27]-GF [15]	58	15	20			7

Die zu verarbeitenden Materialkombinationen werden dem Einschneckenplastifizierer chargenweise gravimetrisch zudosiert. Der eingesetzte Einschneckenplastifizierer besitzt eine ausreichende Homogenisierungsfähigkeit. Die Homogenisierung kann bei nicht gefärbtem Werkstoff, wie er zum Einsatz kam, mit einem ersten Eindruck optisch beurteilt werden. Inhomogenitäten zeigen in der mechanischen Charakterisierung geringe Kennwerte. Ansonsten können derartige Schwachstellen zerstörungsfrei zu 100 Prozent mittels der Röntgenanalyse und der Ultraschallanalyse produktionsnah aufgedeckt werden. Agglomerationen führen zu einer Dichteänderung, die sich auch an der Bauteiloberfläche abzeichnen. In der Serienfertigung erfolgt dann die Entscheidung, ob ein Gut- oder Ausschussteil vorliegt, anhand von Grenzmustern.

Zielsetzung dieser Arbeit ist es, ein flammhemmendes LFT mit PP als Matrixbasis bereitzustellen. In nachgeordneter Folge sollten vergleichbare mechanische Kennwerte erzielt werden. Diese Ergebnisse der mechanischen Charakterisierung werden in Kapitel 3.3.4 vorgestellt. Aus der Literatur ist bekannt, dass das Einbringen von Füllstoffen und pulverförmigen Additiven zu einer Versteifung bei gleichzeitiger Versprödung und Reduzierung der Festigkeit führt [94, 95].

Bei der Aufbereitung der jeweils hochgefüllten Halbzeuge (Glasfaserkonzentrat und Flammschutzmittelkonzentrat) ist es zur ausreichenden Homogenisierung erforderlich, den Staudruck auf 40 bar zu steigern. Um eine homogene Temperaturverteilung

zu erzielen, wurde eine im Vergleich zu industrieller Anwendung mit 3,5 min hohe Plastifizierzykluszeit gewählt. Sie stellt hier im Vergleich zum Presszyklus den Engpass dar, da dieser nur ca. 120 s beträgt.

Einen Überblick zu den gewählten Verarbeitungsparametern bei der Herstellung von flammhemmend ausgerüsteten Platten gibt Tab. 3.3.

Tab. 3.3: Plastifizier- und Pressparameter

Prozessparameter des Einschneckenplastifizierers		
Parameter	Wert	Einheit
Schneckendrehzahl	10	min ⁻¹
Staudruck	20 - 40	bar
Temperatureinstellung	185 - 195	°C
Zykluszeit	3,5	min
Schmelztemperatur	ca. 220	°C

Prozessparameter der Kunststoffpresse		
Geschwindigkeit	Ab Pressspalt	Einheit
800 mm/s	>>50 mm	
80 mm/s	50	mm
50 mm/s	40	mm
30 mm/s	20	mm
15 mm/s	10	mm
Krafteinstellungen		
Umschaltkraft	5500	kN
Maximalkraft	6000	kN
Resultierender Werkzeuginnendruck	201	bar
Weitere Einstellungen		
Presszyklus	1,5	min
Werkzeugtemperatur	ca. 60	°C
Werkzeugkavität	546 x 546	mm ²

Mit diesen Einstellungen wurden Prüfplatten hergestellt, aus denen Probekörper für Brennbarkeitstest und zur mechanischen Charakterisierung entnommen wurden. Die Plattendicke sollte bei einem konstanten Austragshub des Plastifizierers konstant sein, doch aufgrund unterschiedlicher Fasergehalte lassen sich die zylindrischen Plastifikate nicht gleichartig kompaktieren. In Verbindung mit verschiedenen Fließfähigkeiten der Matrix besitzen die ausgestoßenen Plastifikate einen unterschiedlichen Porengehalt. Der hohe Werkzeuginnendruck in Verbindung mit dem Fließen reduziert den Porengehalt. Das Plastifikat wurde einseitig in der Kavität positioniert und deckt ca. 20 % der Kavität ab, wodurch lange Fließwege und ein Ausrichten der Faserverstärkung in Fließrichtung erzielt werden (Bild 3.8).

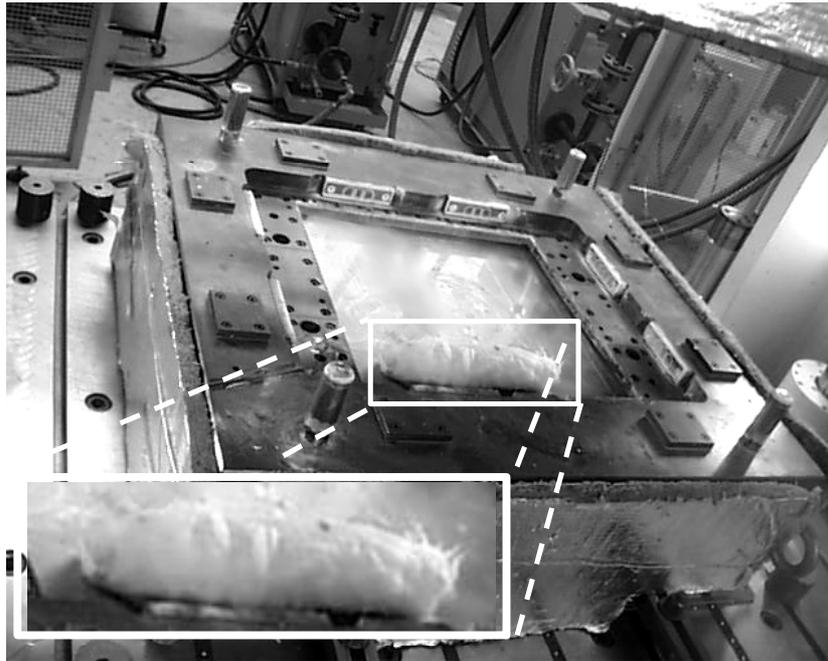


Bild 3.8: Plastifikatpositionierung im Werkzeug mit dem Ziel langer Fließwege

3.3 Materialcharakterisierung von LFT-Compounds

In den vorangestellten Kapiteln wurden die Möglichkeiten zur Einstellung der Prozessparameter dargestellt. Neben den anlagenseitigen Variablen gibt es zudem die werkstoffseitigen Einstellungsmöglichkeiten, die sich gegenseitig verstärken oder in der Ausprägung aufheben können. Als Beispiel sei die Temperaturführung des Polymers in Kombination mit Fließhilfsmitteln angeführt, die nur in einem engen Temperaturfenster wirksam werden. Änderungen der Fließfähigkeit können bei der Analyse der Pressdaten festgestellt werden. Die Pressdatenanalyse mit der Bestimmung der Pressarbeit wird als Ergänzung zur Brennbarkeitsprüfung und der mechanischen Charakterisierung angesehen und im Folgenden dargestellt. Der Viskositätsverlauf für die verarbeiteten Materialien wird mittels eines besonderen Aufbaus der Presse bestimmt und in Kapitel 3.4 dargestellt.

3.3.1 Bestimmung der Pressarbeit

Die eingesetzte institutseigene Presse besitzt eine entsprechende Sensorik, um Analysen von Pressdaten durchzuführen. Die Datensätze wurden im Anschluss an die Versuche nach einer Konvertierung mittels des Tabellenkalkulationsprogramms Microsoft Excel[®] ausgewertet. Bild 3.9 und Bild 3.10 zeigen die Auswertung wichtiger Pressdaten eines Pressvorgangs, der auf den mit Tab. 3.3 vorgestellten Verarbeitungsparametern der Presseneinheit basiert.

Kurze Verarbeitungszyklen werden durch die schnelle Wärmeübertragung von dem Plastifikat (Bauteil) in das Werkzeug erzielt, weshalb der interessante Bereich der Pressdatenanalyse durch die ersten 5 s dargestellt wird. Mit der Abkühlung des Materials nimmt gleichzeitig die Formbarkeit ab, während Presskraft und Pressarbeit steigen. Die dargestellten Pressdaten zeigen bei Ausschnittsvergrößerungen sowohl für Soll- (vs) und Istgeschwindigkeit (v_i) gemäß Bild 3.9 als Soll- (F_s) und Istkraft (F_i) gemäß Bild 3.10 eine gute Übereinstimmung, was für eine dem Leistungsvermögen der Presse günstige Vorgabe spricht. Das Schließgeschwindigkeitsprofil ist eine Funktion des Pressspalts.

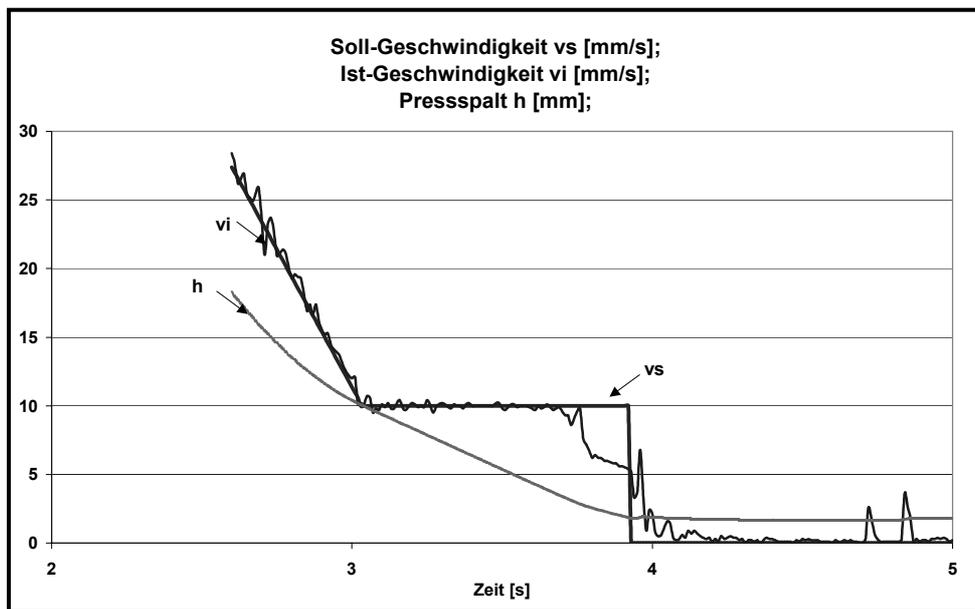


Bild 3.9: Soll- (v_s), Istgeschwindigkeits- und Pressspaltverlauf (v_i)

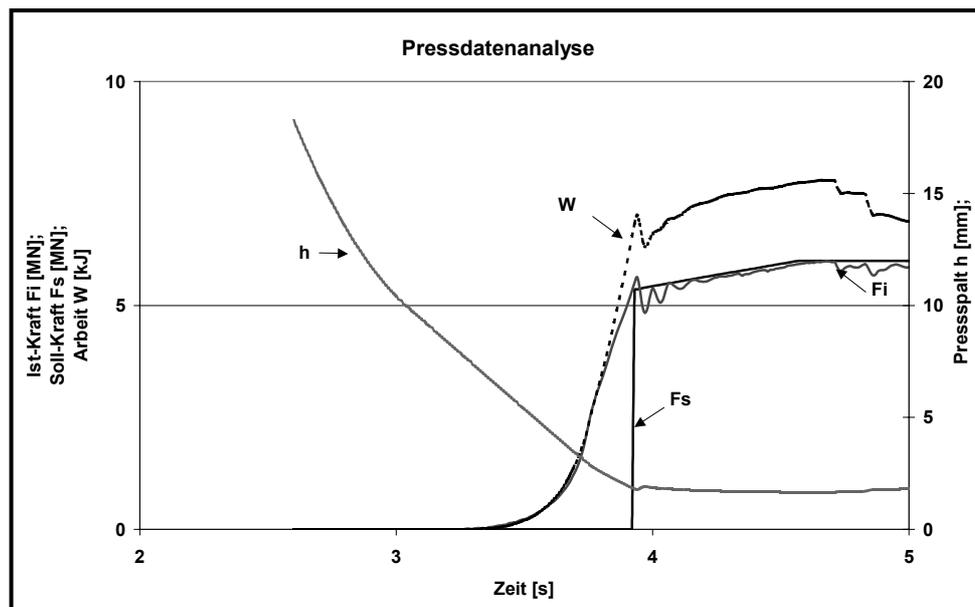


Bild 3.10: Soll- (F_s), Istkraft- (F_i), Pressarbeit und Pressspaltverlauf

Die Pressarbeit W ist eine wichtige Ergebnisgröße der Analyse. Die Arbeit ist definiert als:

$$\Delta W = |F| \cdot |\Delta s| \cdot \cos(F, s) \quad \text{Gleichung 3.1}$$

mit W = Arbeit, F = Kraft, s = Weg.

Sofern Weg und Kraft die gleiche Richtung aufweisen, gilt: $\cos(F, s) = 1$.

Die erforderliche Gesamtarbeit wird durch die nachstehende Gleichung beschrieben:

$$W_{12} = \int_{s_1}^{s_2} dW = \int_{s_1}^{s_2} F ds \quad \text{Gleichung 3.2}$$

Die aufzuwendende Presskraft und Pressarbeit hängt somit von der Fließfähigkeit des Plastifikats ab. Für den Verarbeiter ist die Fließfähigkeit des Materials von größter Bedeutung, da sie für eine gegebene Bauteilgröße den Presskraftbedarf zur Füllung der Kavität festlegt. Im Rahmen der Verarbeitung der gewählten Materialkombinationen gemäß der Tab. 3.2 wurden die jeweils geleistete Pressarbeit ermittelt (Bild 3.11). Die Darstellung der Pressarbeiten zeigt, dass mit steigendem Füllstoffgehalt (auch Additivgehalt) oder Fasergehalt die zur Füllung der Kavität erforderliche Pressarbeit ebenfalls ansteigt. Der Minimalwert wurde für das reine, ungefüllte PP (Material A; MVR 52) und der Maximalwert das zu 60 Gewichtsprozent mit Glasfasern gefüllte PP (Material E) ermittelt. Beide Werkstoffe besitzen den gleichen Matrixtyp wie auch Material C, das zu 30 Gewichtsprozent mit Glasfasern verstärkt ist und zwischen den beiden Materialien A und E liegt. Eine direkte, quantitative Linearität ist nicht feststellbar. Bei den anderen Mischungen zeigt sich ein Einfluss der Fließfähigkeit der jeweiligen Grundmatrix. So besteht Material F aus einer Matrix mit einer Melt-Volume-Rate (MVR) von 126 und Material D aus einer Mischung zu gleichen Teilen von Material B (MVR der Matrix: 6) und Material E.

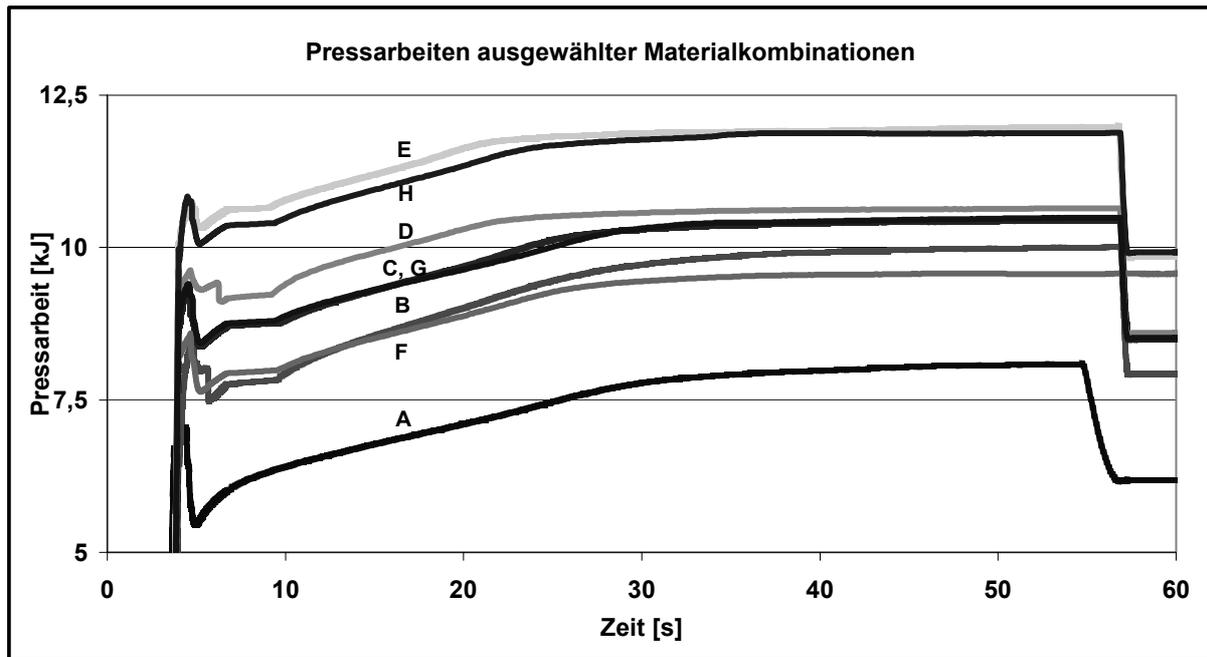


Bild 3.11: Pressdatenanalyse – Pressarbeiten verschiedener Materialkombinationen im Rahmen der flammhemmenden Ausrüstung von GF-PP

Die Ermittlung der Pressarbeit gibt einen ersten Hinweis zum Fließverhalten der Materialien. Beim Verpressen der Plastifikate treten Scherspannungen auf, während bei der Ermittlung des MVR nur Druckspannungen aufgebracht werden. Teilchenanzahl und -größe haben einen Einfluss auf das Fließverhalten, weshalb rheologische Untersuchungen des strukturviskosen Verhaltens durchgeführt werden (Kapitel 3.4).

Eine Faserverstärkung führt im Brandtest zu einem „Dochteffekt“. Der Begriff „Dochteffekt“ ergibt sich aus der vergleichbaren Branderscheinung des Dochts in einer Kerze wie Glasfasern in Polymermatrix [96]. Zunächst wurden mit Material G und H zugekaufte Masterbatches untersucht. Deren Flammenschutzmittelgehalt ist an nicht faserverstärkten Matrices ausgerichtet. Mit der Zielausrichtung der Flammhemmung in Verbindung mit Faserverstärkung erfolgt eine Compoundierung von Masterbatches mit höheren Anteilen an FSM als bei unverstärkten Materialien [83]. Wie sich die flammhemmende Ausrüstung sich auf das Brennverhalten auswirkt und welche Methoden zur Untersuchung herangezogen werden, zeigt das folgende Kapitel.

3.3.2 Bestimmung des Brennverhaltens

Zur Charakterisierung des Brennverhaltens kann aus einer Vielzahl an Standards und Prüfvorschriften ein geeigneter Test gewählt werden. Diese führen im Ergebnis entweder zu einer eher allgemeinen Beschreibung des Brennverhaltens oder zu einem anwendungsspezifischen Ergebnis. Im Kapitel 2 wurde dargestellt, dass die presstechnische Verarbeitung von faserverstärkten Kunststoffen eine herausragende

Stellung einnimmt und dies über das gesamte Spektrum von Anwendungsgebieten der FKV. Deshalb werden nachstehend wichtige Untersuchungsnormen zur Brennbarkeit der für FKV und LFT bedeutenden Anwendungsgebiete wie Bauwesen, Transport (Schiene und Straße) sowie Elektrotechnik vorgestellt. Der Luftfahrtbereich stellt kein bedeutendes Anwendungsgebiet für Fließpressbauteile dar.

3.3.2.1 Standards zur Brennbarkeitsuntersuchung

Bei allen Vorgaben ist zu unterscheiden, ob es sich hierbei um nationale oder europäisch gemeinschaftliche Vorgaben handelt, die voneinander abweichen können. Grundsätzlich gilt, dass EU-Recht nationales Recht bricht. Dementsprechend können Normen in ein Ranking gestellt werden (ISO>EN>DIN). Unabhängig vom Anwendungsgebiet verfolgen die Prüfungen das Ziel, die Realität abzubilden. Wichtige Untersuchungskriterien, gerade auch im Hinblick auf die Gefährdung von Leben, sind Rauchgas- und Energiefreisetzung, sekundäres Brennen durch Abtropfen und die Flammenausbreitung. Als Bemerkung sei hier noch angeführt, dass je nach zu Grunde liegender Prüfvorschrift die Prüfkosten eintausend Euro je Prüfung übersteigen können.

- Bauwesen

Das Bauwesen bietet ein hohes Absatzpotential für LFT, doch sind zuvor verschiedene Brandtests durchzuführen, um für den Bauwerkstoff einhergehend mit Bauteilprüfungen eine Freigabe zu erzielen.

Untersucht wird, wie die eingesetzten Materialien und Produkte sich im Brandfall verhalten und ob bei Baugruppen eine Wechselwirkung erfolgt. Wichtige Kriterien stellen dabei die sich entwickelnde Rauchgasdichte und die Toxizität der Brandgase und Rückstände dar. International hat sich der Single-Burning-Item-(SBI)-Test durchgesetzt, der auf nationaler Ebene Kriterien des Standards DIN 4102 integriert und somit ablöst.

Für das Bauwesen gibt es ca. 40 nationale und mehr als 20 ISO-Prüfmethoden, deren Ergebnisse kaum vergleichbar sind. Innerhalb der europäischen Union wurde die EG-Baurichtlinie 89-106 eingeführt, deren Umsetzung in Deutschland mit dem Bauproduktegesetz erfolgte.

- Anwendungsbereich Straßenfahrzeugbau

Der Bereich des Straßenfahrzeugbaus ist für LFT ein bedeutendes Anwendungsgebiet. Für diesen Bereich sind vielfältige nationale und internationale Vorschriften relevant. Als allgemeine Vorschriften für Fahrzeuge und Bauteile sind §30 StVZO sowie

verschiedene ECE- bzw. FMVSS-Vorschriften zu nennen. Weiterhin gelten für die eingesetzten Materialien folgende Vorschriften DIN 53438, DIN 75200, 95/28 EG, ISO 3795, UTAC 18-502/1, UTAC 18-502/2, FMVSS 302 (Tab. 3.4, Tab. 3.5). Eine europaweite Standardisierung scheint auch in diesem Anwendungsgebiet wie beim Schienenfahrzeugbau nicht in Sicht, was bereits durch die große Anzahl der unterschiedlichen Normen dokumentiert wird. Allen Vorschriften ist gemeinsam, dass sie nur für Fahrzeuge des öffentlichen und gewerblichen Personenverkehrs gelten.

Die Vorschrift Richtlinie 95/28 EG ist seit 24.10.99 fakultativ anzuwenden und zielt auf die Einführung von Prüfzertifikaten zur Unterstützung eines einheitlichen Typgenehmigungsverfahrens ab.

Das Genehmigungsverfahren gliedert sich wie folgt in:

- Systemgenehmigung für Fahrzeugtypen (nur Fahrzeughersteller) und
- Einzelgenehmigung für Bauteile und Werkstoffe (auch Zulieferer).

Jeder genehmigte Fahrzeugtyp bzw. Bauteiltyp erhält eine Genehmigungsnummer. Jedes genehmigte Bauteil erhält zusätzlich ein Genehmigungszeichen, das auch im eingebauten Zustand sichtbar sein muss. Der Genehmigungsinhaber ist zur reihenweise gleichen Anfertigung von Teilen verpflichtet und soll geeignete Nachweise erbringen. Dies hat zur Folge, dass ohne Prüfnachweis und Genehmigung kein Teil mehr als System, z.B. in einen Bus, eingebaut werden darf. Damit ist auch ein zeitlicher und finanzieller Aufwand für das Genehmigungsverfahren zu erbringen. Komplexe Problemstellungen bei Einsatz und Verarbeitung der Materialien (z.B. Kleben) bedingen erweiterte Prüfumfänge, die ohne zusätzliche qualitätssichernde Maßnahmen nicht zu erreichen sein werden [97].

Eine durchgeführte Umfrage im Zusammenhang mit dieser Arbeit bei Kraftomnibusherstellern bestätigte die Normenvielfalt und die damit verbundenen Schwierigkeiten. Für kleine und mittelständische Unternehmen ist somit herauszustellen, dass im Fall der Belieferung eines Omnibusherstellers ein großer Aufwand für die Bauteilfreigabe erforderlich ist. Zudem ergab die Umfrage, dass sich Automobilhersteller in der Hauptsache den Prüfungen gemäß DIN 53438, DIN 75200 und neuerdings mit der Vorschrift 95/28 EG begnügen.

Im Rahmen der Arbeit stellt die Prüfung gemäß DIN 53438 (Verhalten beim Beflammen mit einem Brenner) eine im Prüfaufbau und bei der Versuchsdurchführung einfache Bestimmung der Brennbarkeit eines Werkstoffs oder Bauteils dar. Zwar kann DIN 75200 als Erweiterung der DIN 53438 angesehen werden, doch handelt es sich

um einen standardisierten Prüfbau mit sehr eingrenzenden Prüfbedingungen. Bei der Prüfung gemäß DIN 75200 wird ein sogenannter kleiner Brennkasten gemäß DIN 50050 eingesetzt.

- Anwendungsbereich Schienenfahrzeugbau

Der Anwendungsbereich Schienenfahrzeugbau ist ein für Fließpressbauteil, besonders mit duroplastischer Matrix, von großer Bedeutung. Dieser Bereich ist von einer noch größeren Normenvielfalt und ebenso schwierigen Vergleichbarkeit geprägt. Im Folgenden werden auch ausländische allerdings europäische Normen vorgestellt, da es noch keine einheitliche Vorgabe, vergleichbar der 95/28 EG-Vorschrift, gibt.

Bei der Prüfung von Bauteilen des Schienenfahrzeugbaus steht die Simulation eines realen Brands im Labormaßstab im Vordergrund. Ein Brand kann vielfältige Ursachen haben. Es sind erstens technische durch Funkenentstehung, durch mechanische Reibung, Undichtigkeiten in der Nähe heißer Triebwerksteile und elektrische Defekte. Zweitens entstehen Brände in Schienenfahrzeugen durch Unachtsamkeit, Vandalismus, wie z.B. Brände von Papierabfällen, Schmutz und Fett.

Man kann Schienenfahrzeuge nach ihrem Einsatzzweck (Tunnelverkehr, Nahverkehr), nach Anfahrtmöglichkeiten der Rettungsdienste, nach ihrer Bauart (Doppelstockwagen, Schlafwagen etc.) und nach den Fluchtmöglichkeiten unterscheiden. Entsprechend werden andere Normen angewandt.

Darüber hinaus werden jedoch in den meisten Ländern der EU weitere Brandtests gefordert (Tab. 3.4).

Tab. 3.4: Übersicht an Standards zur Flammprüfung in Schienenfahrzeugen

Staat	Standard (Teil, Abschnitt)	Probekörper und Bewertungskriterium	Werkstoffe und Prüfklassen Prüfmittel
Deutschland	DIN 5510 (Vorbeugender Brandschutz in Schienenfahrzeugen im Oberflächenverkehr (Teil 1), unterirdischen Verkehr (Teile 2,3) und Verkehr mit eingeschränktem Sicherheitsraum (Teil 4)).	Probekörper (190 x 500 x d mm), 3 min beflammt Bewertung des Tests anhand der zerstörten Länge und Nachbrenndauer	<ul style="list-style-type: none"> • Ebene oder profilmörmige Bauteile, Beschichtungen (S1 bis S5 - Rauch- und Tropfbarkeitsklassen) • Bodenbeläge (SF1 bis SF3) • Sitze (P-a, P-b), • Rauchentwicklung (SR1, SR2) • Abfallen / Abtropfen von Material (ST1, ST2) <u>Prüfmittel:</u> DB-Brandschacht (DIN 54837)
Frankreich	Norm F 16-101 („Comportement au feu; Choix des matériaux“). <ul style="list-style-type: none"> • Überwiegend unterirdisch (Teil A1) • Nahverkehr, Schlafwagen (Teil A2) 	Werkstoffe in zwei Kategorien mit einer Dicke von mehr als 5 mm oder von weniger als 5 mm. Durchführung erfolgt indem eine unter 45° befestigte Probe von unten mit einem 500 W-	<ul style="list-style-type: none"> • Entflammbarkeit i • Flammenausbreitung s • max. Flammenhöhe h • Brennbarkeit c • Brandklassen: M0 (beste), M1, M2, M3 <u>Prüfmittel:</u>

	• Fernverkehr, wenige Tunnel (Teil B)	Strahler beaufschlagt wird	Französischer Brandschacht: Epiradiateur (Norm NF P 92-501)
Großbritannien	BS (Britisch Standard) 6853 (Fire Precautions in the Design and Construction of Railway Passenger Rolling) teilt die Fahrzeuge in die Klassen I mit erhöhten Anforderungen und II für die restlichen Fahrzeuge.	Wandverkleidungen, Fußbodenbeläge, Schaumkunststoffe nach BS 476 Teil 6 und BS 476 Teil 7, Sitze nach BS 6852 Messung erreichter Abgastemperaturen Dauer: bis zu 20 min	Mittels einer definierten Zündquelle, Fußböden gem. ASTM E 648 und Kunststoffe: BS 2782 (Ermittlung des Sauerstoffindex LOI) ISO 4589-3 (Ermittlung des Temperaturindex) <u>Prüfmittel:</u> Britischer Brennerkasten (BS 476 Part 6)

Die Herausforderung beim Bestehen der Prüfungen im Brennerkasten oder Brandschacht besteht in der Beflammung bei vertikaler Einspannung der Probe.

- Anwendungsbereich Elektrotechnik

Der Bereich der Elektrotechnik zeigt sich bezüglich der Normenvielfalt ebenso umfangreich wie die anderen vorgestellten Bereiche. Viele Standards beziehen sich auf einzelne Produkte, wie etwa die Prüfung von Kabeln. Sie können sowohl bei der Verwendung im Bauwesen als auch bei Unterhaltungselektronik zum Tragen kommen. Die Prüfung von Kabeln erfolgt mittels des DIN-Röhren-Ofens gemäß ISO/TR 9122-4. Hauptuntersuchungskriterium ist die Funktionserhaltung im Brandfall. Bei der Durchführung werden zudem die Kriterien Korrosivität der Brandgase und die elektrische Leitfähigkeit der gelösten Brandgase. Untersuchungen der Zersetzungsgase durch chemische Analytik und standardisierte biologische Screening-Tests führen zu gut reproduzierbaren Ergebnissen, deren Durchführung gemäß DIN 53436 erfolgt. Trotz der vielen nationalen Prüfvorschriften erscheint eine übergreifende internationale Harmonisierung am ehesten möglich. Die aus den USA stammende Norm UL 94 hat sich international als gängige Beurteilung zur Brennbarkeit von polymeren Werkstoffen durchgesetzt.

3.3.2.2 Fazit zu Standards der Brennbarkeitsuntersuchung

Die vorgestellten Standards zeigen, dass die Vorschriften auf die Anforderungen im jeweiligen Anwendungsgebiet ausgerichtet wurden. Eine Vergleichbarkeit der Standards untereinander oder gar eine Übertragbarkeit der Ergebnisse ist oftmals nicht gegeben (Tab. 2.1). Tendenzen lassen sich lediglich mit dem Ergebnis aus einem Anwendungsgebiet darlegen, weshalb Materialfreigaben über verschiedene Anwendungsgebiete immense Kosten verursachen können. Eine EU-weite Harmonisierung der Prüfstandards, zumindest in ausgewählten Anwendungsgebieten, scheint kurzfristig nicht erreichbar. Deshalb wurden für diese Arbeit die Standards DIN 53438

und UL 94 zur Untersuchung der Brennbarkeit zu Grunde gelegt. Die Ergebnisse werden im nachfolgenden Kapitel vorgestellt werden.

Tab. 3.5: Übersicht ausgewählter Standards bedeutender FKV-Anwendungsgebiete [98, 99, 100, 101]

Standard	Ziel	Prüfkriterien	Vorteil + / Nachteil -
Bereich Bauwesen			
SBI-Test (DIN EN 13823)	Ermittlung der Brennbarkeit, Entflammbarkeit bzw. Brandlast	Entflammbarkeit Ergebnisdarstellung mittel 6 Klassen; zusätzlich Energiefreisetzung, Rauchgasdichte	+ realitätsnahe Prüfung +/- großer Prüfraum (2 m*2,4m*2,4m) - eingeschränkte Reproduzierbarkeit - sehr kostenintensiv - nicht für alle Bauprodukte (Bodenbeläge ausgenommen)
Bereich Straßenfahrzeugbau			
Richtlinie 95/28/EG (Anwendung Omnibus)	Brennverhalten von Innenausstattungswerkstoffen	Brennbarkeit, Brenngeschwindigkeit, Brenndauer	+ Flachstabgeometrie - auf andere Anwendungsgebiet nicht übertragbar - nur fakultativ anzuwenden
DIN 53438	Verhalten beim Beflammen mit einem Brenner	Brenngeschwindigkeit	+ einfache Probengeometrie + universelle Anwendbarkeit (Rohstoff/ Bauteil) +/- keine zusätzlichen Untersuchungsergebnisse
Bereich Schienenfahrzeugbau			
		wird von nationalen Vorschriften dominiert gemäß Tab. 3.4	+ liefern sehr detaillierte Ergebnisse +/- Werkstoff -und Bauteilprüfung - kein länderübergreifender Vergleich
Bereich Elektrotechnik			
UL 94	Brennbarkeit, Flammenausbreitung, Wiederentzündung	Brennbarkeit, Brenngeschwindigkeit, Brenndauer	+ Feingliederung der Prüfergebnisse + einfacher Prüfaufbau

3.3.3 Prüfergebnisse der Materialkombinationen in ausgewählten Brandtests

- Standard: Beflammung mit einem Brenner - DIN 53438

Die Probekörper besitzen dabei die Abmessungen von 190 mm Länge und 90 mm Breite und für die Beurteilung des Brennverhaltens eine Messmarke im Abstand von 150 mm zu der bei der Prüfung unten befindlichen Kante. Der Probekörper wird senkrecht eingespannt. Eine Prüfbeurteilung erfolgt nach 20 s ab dem Start der Beflammung mit definiertem Brenngas (Tab. 3.6). Der Probekörper wird 15 s mit dem Brenner beflammt, der anschließend zur Seite geschoben wird. Ermittelt wird insgesamt die Brennzeit, die mit dem Beginn der Beflammung mit dem Brenner startet

und entweder durch das Erlöschen der Flamme am Probekörper oder durch das Erreichen der Messmarke endet. Besonderheiten (z.B. Rauch, Abtropfen (Bild 3.12), beidseitiges Brennen), die bei der Prüfung auftreten, sind zu protokollieren. Die Beurteilung und die Klassifizierung der geprüften Probekörper erfolgt gemäß Tab. 3.6.

Tab. 3.6 Beurteilungskategorien gemäß DIN 53438 Teil 2

Beurteilung	Klasse
Die Messmarke wird von der Flammenspitze des brennenden Probekörpers nicht erreicht (Probekörper erlischt von selbst).	K1
Die Flammenspitze des brennenden Probekörpers erreicht die Messmarke in 20 oder mehr Sekunden.	K2
Die Flammenspitze erreicht die Messmarke in weniger als 20 Sekunden.	K3

Die deutsche Norm unterscheidet weiterhin zwischen Flächen- und Kantenbeflammung. Die Prüfung kann wie in Bild 3.12 als Kantenbeflammung (Kategorie K) oder auch als Flächenbeflammung (Kategorie F) durchgeführt werden. Die Flächenbeflammung kann als eine vereinfachte Variante angesehen werden. Die auftretende Energiedichte der Flamme erreicht erst bei der Kantenbeflammung ein Maximum.

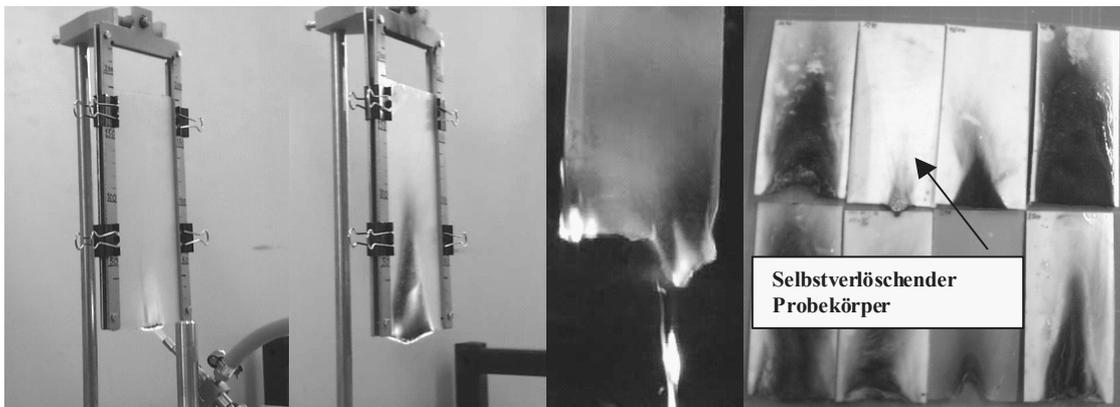


Bild 3.12 Beflammung von Probekörpern gem. DIN 53438 (Teil 2) (v.l.n.r.: Start Beflammung, Flammenausbreitung, brennend tropfende Probe, Gruppe von Probekörpern mit unterschiedlicher Brennbarkeit nach Beflammung)

- Standard: Underwriters' Laboratories Inc. (UL 94) – hier „vertical burn“

Der Aufbau des Prüfstands in Anlehnung an den international anerkannten Standard UL 94 kann durch Änderung von Probengeometrie und Prüfprozedur der Prüfung DIN 53438 erfolgen. Dabei muss zum Bestehen der Prüfung in der Kategorie VO der Probekörper wiederholt 10 s beflammt werden und innerhalb von 10 s von selbst verlöschen, ohne zu tropfen.

Die zusätzliche Herausforderung an den Probekörper besteht darin, dass dieser mindestens zweimal die gleiche Prozedur durchlaufen muss. Die Einstufung der Prüfergebnisse erfolgt gemäß Tab. 3.7.

Tab. 3.7 Beurteilungskategorien gemäß UL 94 („vertical burn“)

Beurteilung	UL 94 V0	UL 94 V1	UL 94 V2	UL 94 V-
Brenndauer nach der 1. Beflammung je Probekörper	≤ 10 s	≤ 30 s	≤ 30 s	> 30 s
Brenndauer der Beflammung aller 5 Probekörper (Prüfsatz)	≤ 50 s	≤ 250 s	≤ 250 s	> 250 s
Brenndauer nach der 2. Beflammung je Probekörper	≤ 10 s	≤ 60 s	≤ 60 s	> 60 s
Unter Probekörper liegende Watte wird entzündet	Nein	Nein	Ja	Ja
Flammenspitze oder Glut erreicht die Einspannung	Nein	Nein	Nein	Ja

Der Standard UL 94 unterscheidet ähnlich wie DIN 53438 grundsätzlich zwei Varianten der Prüfprozedur, nämlich einerseits eine vertikale Beflammung und andererseits eine horizontale Beflammung. Die Horizontalbeflammung stellt die niedrigste Stufe (HB) dar. Die Vertikalbeflammung kann als Flächenbeflammung (Kategorien: 5VA, 5VB) oder Kantenbeflammung (Kategorien: V0, V1, V2, V-) durchgeführt werden.

Es wurden die Materialkombinationen untersucht, die in Tab. 3.2 vorgestellt wurden. Mit den Untersuchungen, zunächst gemäß DIN 53438, wurden die Ziele verfolgt, erstens ein quantitatives, der Bewertungsskala entsprechendes Ergebnis und zweitens einen qualitativen Vergleich der eingesetzten Materialien untereinander zu erhalten.

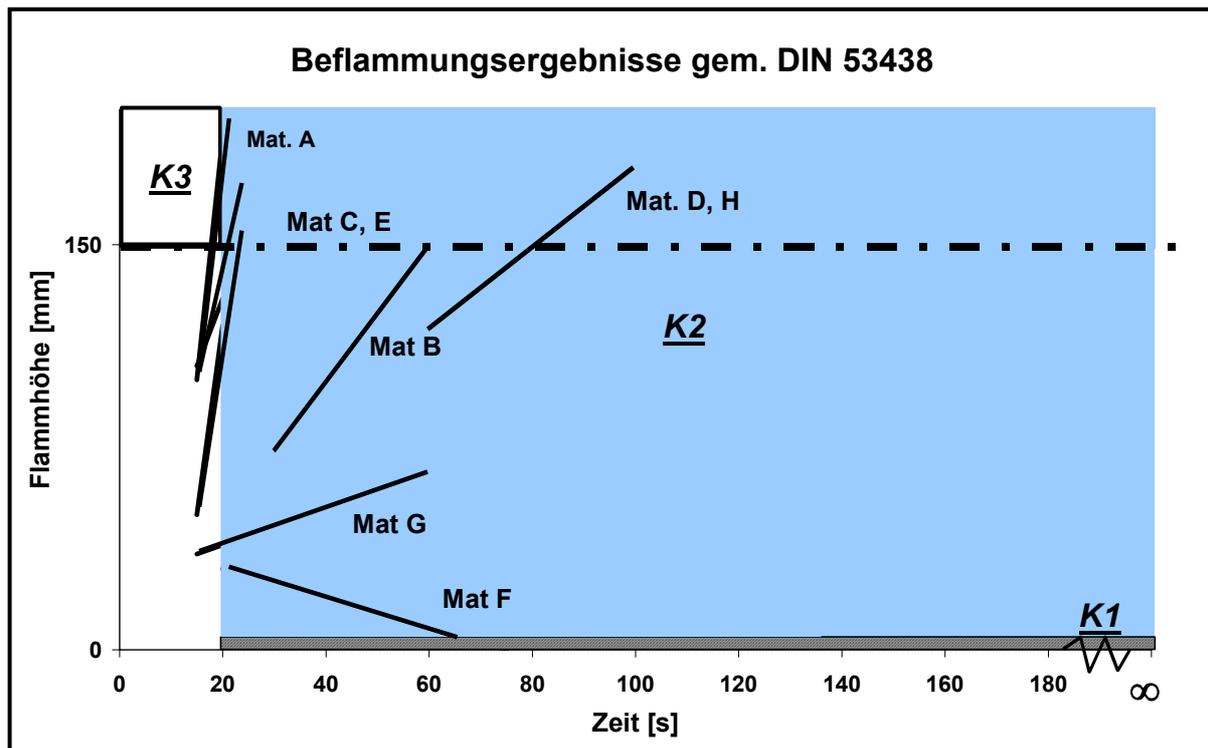


Bild 3.13: Beflammungsergebnisse gemäß DIN 53438

Bild 3.13 zeigt, dass Materialien A, C und E bereits in der Einwirkzeit (nach der Beflammungsdauer von 15 s), vor dem ersten Messzeitpunkt (20 s) die Messmarke von 150 mm erreichen. Die flammhemmende Ausrüstung von D, G und H war erreicht in der Bewertung nur die Kategorie K 2. Dabei zeigt die Graphik, dass eine Faserverstärkung zur Herabsetzung der Flammhemmung führt.

Nur die Materialkombination F bestand die Anforderungen Kategorie K1 und darüber hinaus auch den Test in Anlehnung an UL 94 in der Kategorie V0 (Bild 3.14)

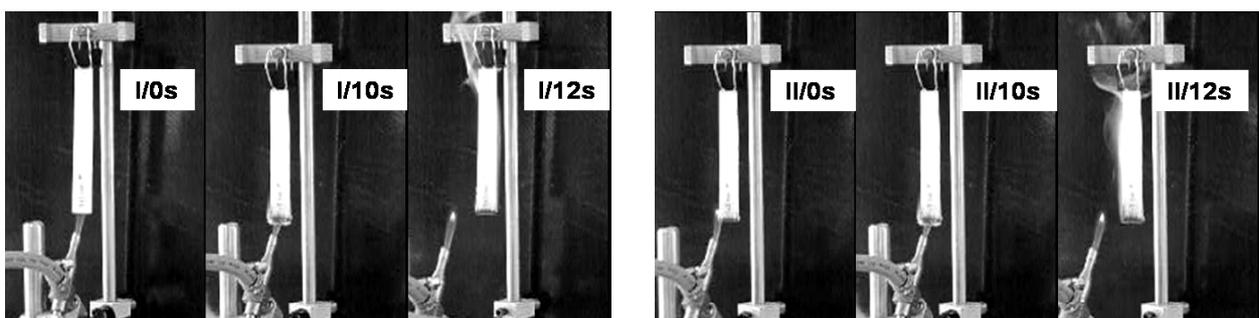


Bild 3.14 Beflammung des Materials F in Anlehnung an UL 94 („vertical burn“) mit dem Ergebnis V0 (links: 1. Beflammung; rechts: 2. Beflammung)

Bild 3.14 zeigt Prüfungsablauf am Probekörper des Materials F mit der erstmaligen Beflammung, dem Verlöschen und der sofort anschließenden nochmaligen Beflammung und dem zweiten Erlöschen der Flamme.

3.3.4 Mechanische Charakterisierung

In erster Linie wurde mit der Entwicklung das Ziel einer halogenfreien Flammhemmung für langglasfaserverstärktes Polypropylen verfolgt. In der Weiterentwicklung kann der Einsatz und die anstrebte Substitution durch vergleichbare mechanische Eigenschaften begünstigt werden. Das Material F erreicht wie es Bild 3.15 darstellt mit der flammhemmenden Ausrüstung vergleichbare Zug- und Biegeeigenschaften.

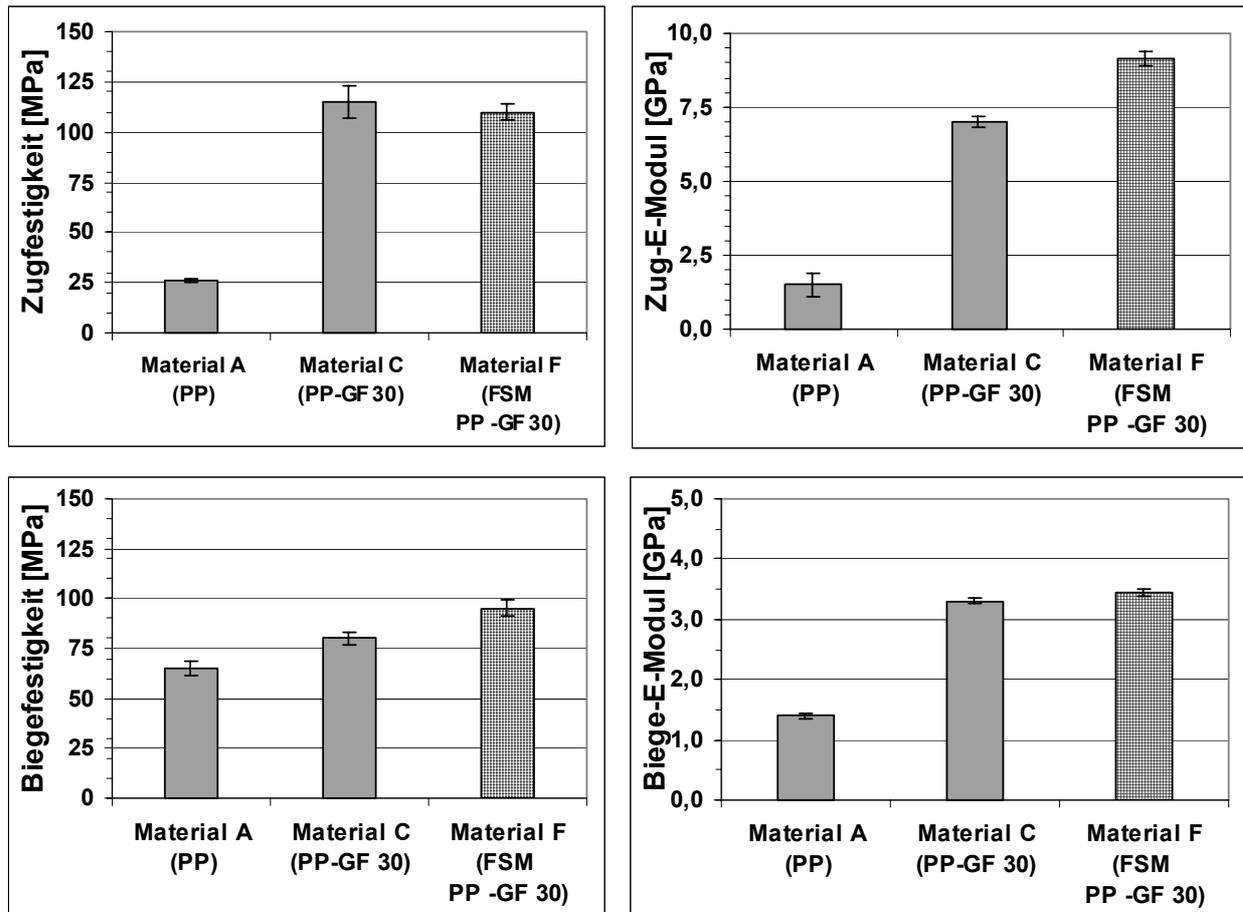


Bild 3.15: Vergleich mechanischer Kennwerte der Materialkombination F mit den Ausgangsmaterialien

Vergleichbare mechanische Eigenschaften in Kombination mit der flammhemmenden Ausrüstung unterstützen das Ziel der einfachen Substitution. Sie wirken sich demnach nicht nachteilig auf das Bauteilgewicht aus, so dass keine Neudimensionierung erfolgen muss. Die Betrachtung der Wirtschaftlichkeit erfolgt mit Kapitel 5.1. Diese Abbildung zeigt zudem, dass die Ausrüstung mit dem flammhemmenden Additiv zu einer Steifigkeitssteigerung führt, wie sie sonst auch bei anderen Füllstoffen charakteristisch ist [72]. Es ist dabei festzustellen, dass die Bruchdehnung um 10 bis 15 % aufgrund der Flammschutzadditive abfällt. Die Bruchdehnung ist für den Einsatz des

Werkstoffs als Strukturbauteile wichtig. Hier kommt es auf Maßhaltigkeit an; gleichzeitig ist ein frühes Erkennen möglichen Versagens wünschenswert. Die Anforderung an die Maßhaltigkeit ist erstrangig. Darüber hinaus leistet der Fasergehalt den entscheidenden Beitrag zu Steifigkeit und Festigkeit.

3.4 Rheologische Untersuchungen und Besonderheiten

Im vorgehenden Kapitel wurde der Einfluss der Matrixtype gefüllt und ungefüllt auf die mechanischen Eigenschaften vorgestellt. Dies hat seine Ursache sowohl in der unterschiedlichen mechanischen Charakteristik des Rohstoffs und nimmt Einfluss auf die rheologischen Eigenschaften. Die Fließfähigkeit kann weiterhin die Neigung zur Ausbildung von Vorzugsorientierungen während des Fließprozesses fördern.

JOHANNABER/ MICHAELI zeigen mit [75], dass der MFI bzw. MVR trotz des strukturviskosen Verhaltens bereits einen Hinweis auf die Fließfähigkeit gibt. Doch gerade wegen des nicht Newton'schen Verhaltens sind der Aufbau und die Untersuchung mittels eines Rheometers aus Vergleichsgründen vorzuziehen. Gemäß dem mit Bild 2.13 vorgestellten Versuchsaufbau wurden die hergestellten Masterbatches rheologisch untersucht.

Die Analyse erfolgt unter Ausnutzung der maschinenseitig bereitgestellten und aufgezeichneten Daten. Der von EDELMANN mit [47] vorgestellte Versuchsaufbau mit dem auf 170°C erwärmten Kreisscheibenwerkzeug erfüllt die Anforderungen zur quasi-isothermen Fließfähigkeitsuntersuchung der Pressmasse, deren Temperatur zwischen 220 und 240 °C liegt. Dieser Versuchsaufbau erfordert dennoch Korrekturen an den bereitgestellten Daten, da mit dem heißen Werkzeug sich auch die Presse aufheizt, was, bedingt durch ihre thermische Ausdehnung, die Analyse verändern würde. Weiterhin bewirken die applizierten Kräfte eine Dehnung des Pressenrahmens, die ebenfalls korrektiv vom Pressspalt abgezogen werden muss. Die Berechnung der Viskosität erfolgt gemäß Gleichung 3.3, die der zugehörigen Schergeschwindigkeit gemäß Gleichung 3.4 aufgrund des mit Bild 2.13 vorgestellten Versuchsaufbaus.

$$\eta = \frac{2F h^3}{3\dot{h} \pi R^4} \quad \text{Gleichung 3.3}$$

$$\dot{\gamma} = \frac{2 * \dot{h} * R}{h^2} \quad \text{Gleichung 3.4}$$

Die Viskositätsverläufe einiger mit Tab. Tab. 3.2 vorgestellter Materialien wurden untersucht. Die Ergebnisse sind mit Bild 3.16 und Bild 3.17 dargestellt. Mit der in Kapitel 3.2.3 vorgestellten Anlagentechnik sind zur Bestimmung einer Viskositätskurve ca. 1,0 dm³ Pressmasse erforderlich. Die ermittelten Viskositätskurven zeigen im Vergleich mehrerer Versuche nur Abweichungen, die mit der Zunahme der Pressenelastizität erklärt werden können, die auf die Erwärmung der Presseneinheit zurückzuführen ist [47].

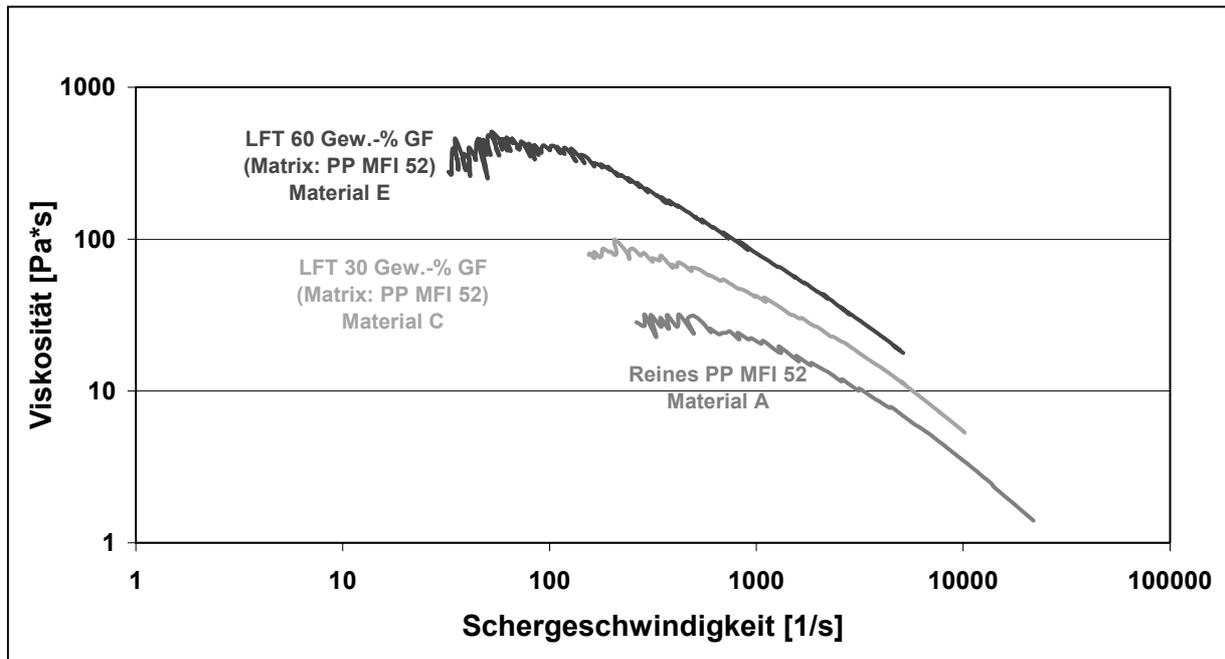


Bild 3.16: Viskositätsverläufe des faserverstärkten Polypropylen im Vergleich zur reinen Matrix

Bild 3.16 zeigt Pressenmassen mit unterschiedlichem Fasergewichtsanteil bei identischer Matrixtype. Die hohe Fließfähigkeit des reinen Matrixmaterials (Material A) erschwert die Auswertung derart, dass diese Viskosität erst mit geringer Restspaltgröße gemessen werden kann. Mit steigendem Fasergehalt wird eine steigende Viskosität gemessen, die bei Verdopplung des Fasergewichtsanteils zu einer Verdopplung der Viskosität führt. Bild 3.17 zeigt den Einfluss von Füllstoffen (Flammenschutzmitteln) auf die Fließfähigkeit der Pressmasse ohne Faserverstärkung. Die Betrachtung der beiden Viskositätskurven der unverstärkten und ungefüllten PP Typen zeigt unter Berücksichtigung des MVR (gemäß DIN ISO 1133) von 57 und 17 einen plausiblen Abstand zueinander. Entsprechend der aufgewandten Pressarbeit gemäß Bild 3.11 gliedern sich das Material G und das Masterbatch zu Material H entsprechend ein. In Verbindung mit der Aussage von Bild 3.16 stellt sich die gleiche Hierarchie der Materialien wie bei der Pressarbeit ein und erlaubt den Schluss einer gegenseitigen Abhängigkeit von Pressarbeit und Fließfähigkeit.

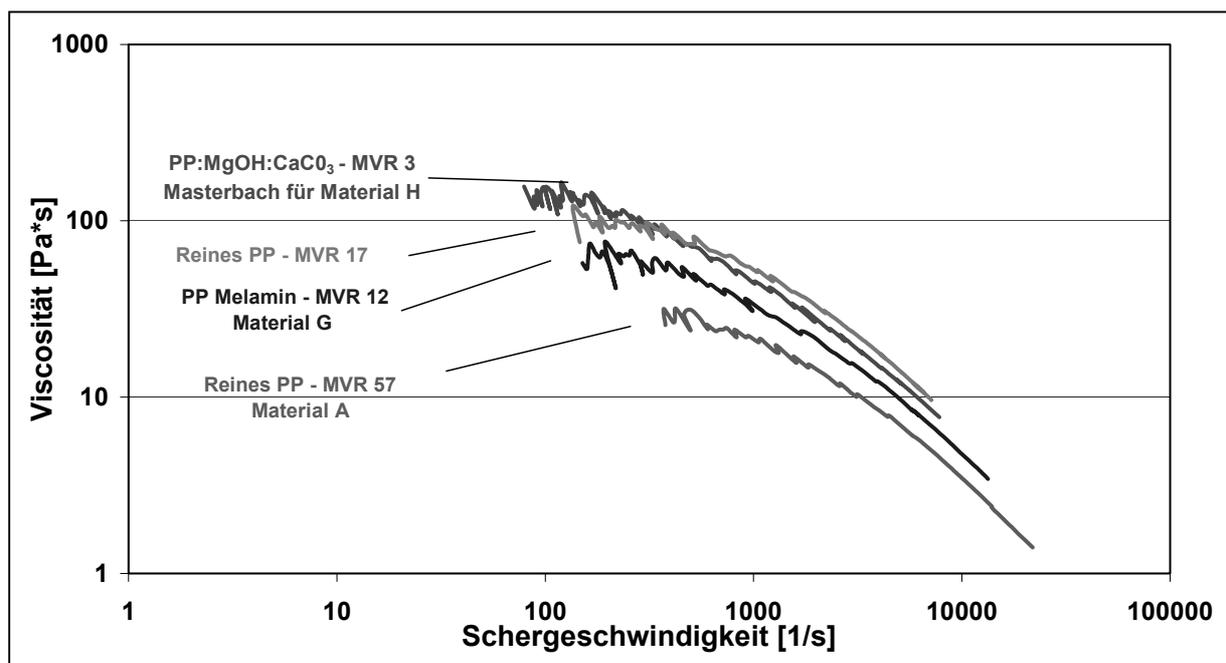


Bild 3.17: Viskositätsverläufe der flammhemmend ausgerüsteten Compounds auf Basis von PP als Matrixwerkstoff

Neben den zur Darstellung erforderlichen Parametern Viskosität und Schergeschwindigkeit erscheinen auch die realen Strömungsgeschwindigkeiten der Matrix interessant. Dabei wird zu verschiedenen Zeitpunkten die Geschwindigkeit der Polymermasse betrachtet, die bei der Viskositätsbestimmung über die Kreisscheibenkantenüberströmung vorherrscht. Ausgehend von dem Aufbau gemäß Bild 3.18 wird mit Bild 3.19 nur der über der Kreisscheibe liegende Materialzylinder betrachtet so-

wie eine infinitesimal kleine Zylinderhülle, deren Radius größer als der der Kreisscheibe ist.

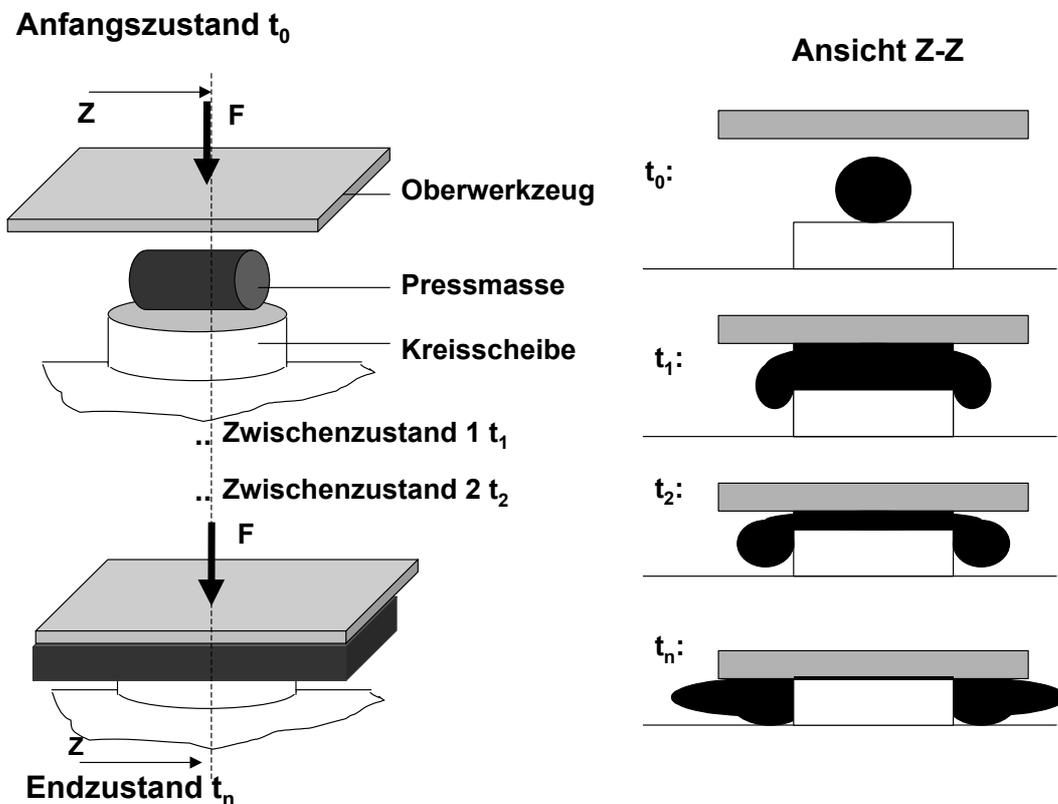


Bild 3.18: Aufbau für die Viskositätsbestimmung

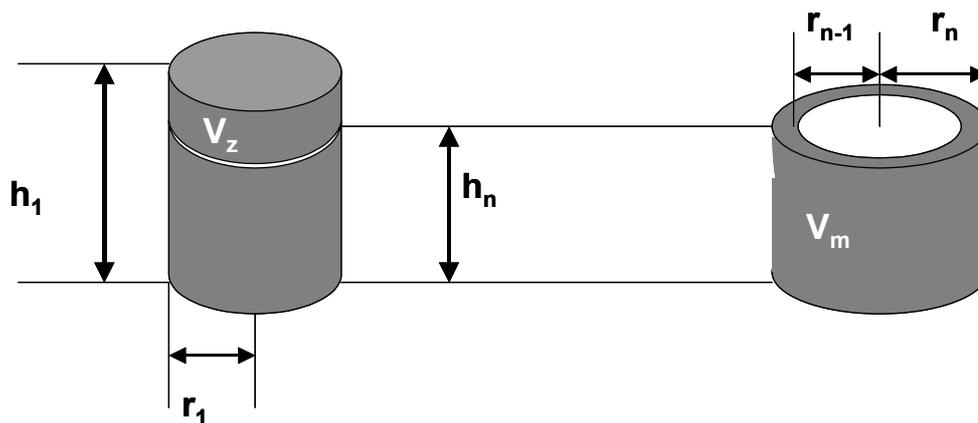


Bild 3.19: Modell zur Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit

Zum Zeitpunkt t_0 ist das Plastifikat auf der Kreisscheibe positioniert und füllt die theoretische Zylindersäule über der Kreisscheibe bis zum Oberwerkzeug nicht aus, jedoch ab dem Zeitpunkt t_1 . Der Zylinder besitzt dann die Höhe h_1 und den Radius r_1 . Mit dem Fortschritt der Viskositätsmessung verringert sich der Pressspalt auf die Höhe h_n . Untersuchungen zeigen, dass die Pressmassenfließfront aus der Mitte des

Plastifikates heraus bedient wird und im Randbereich einen parabelartigen Querschnitt zeigt. Sobald der Kreisscheibenrand überströmt ist, abstrahiert das Modell die Umwandlung der Volumenänderung (V_z) als Verschiebung in einen Zylindermantel (V_m) gemäß Gleichung 3.5.

$$V_z = V_m \quad \text{Gleichung 3.5}$$

Die Gleichung 3.6 beschreibt die Volumenverhältnisse von V_z und V_m im Detail.

$$V_z = \pi * r_1^2 * (h_{n-1} - h_n) = \pi * h_n * (r_n^2 - r_{n-1}^2) = V_m \quad \text{Gleichung 3.6}$$

Das Wachstum des Radius r_n hängt im Besonderen auch von dem ursprünglichen Zylinderradius (Kreisscheibenradius) und der Zylinderhöhendifferenz ($h_{n-1}-h_n$) (Schließgeschwindigkeit) im Vergleich der Zeit n und $n-1$ ab. Dieses Verhältnis beschreibt Gleichung 3.7 und zeigt, dass das Wachstum stärker vom Kreisscheibendurchmesser als von der Höhendifferenz pro Zeiteinheit abhängt.

$$r_n = \sqrt{\frac{r_1^2 * (h_{n-1} - h_n) + (r_{n-1}^2 * h_n)}{h_n}} \quad \text{Gleichung 3.7}$$

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Pressmassenfließfrontspitze beschreibt Gleichung 3.8.

$$\frac{r_n - r_{n-1}}{t_n - t_{n-1}} = \dot{r} \quad \text{Gleichung 3.8}$$

Im Rahmen der Viskositätsuntersuchungen wurde eine Kreisscheibe mit dem Radius (r_1) von 172 mm eingesetzt. Den Einfluss des Kreisscheibendurchmessers und der Schließgeschwindigkeit der Presse beschreibt Bild 3.20.

Neben der eingesetzten Kreisscheibe mit 172 mm wurden die Fließfrontspitzengeschwindigkeiten sowohl für den halben als auch für den doppelten Kreisscheibendurchmesser berechnet. Zusätzlich auch die für eine doppelte Schließgeschwindigkeit, was insgesamt zu sechs Verläufen der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Fließfront führt (Bild 3.20).

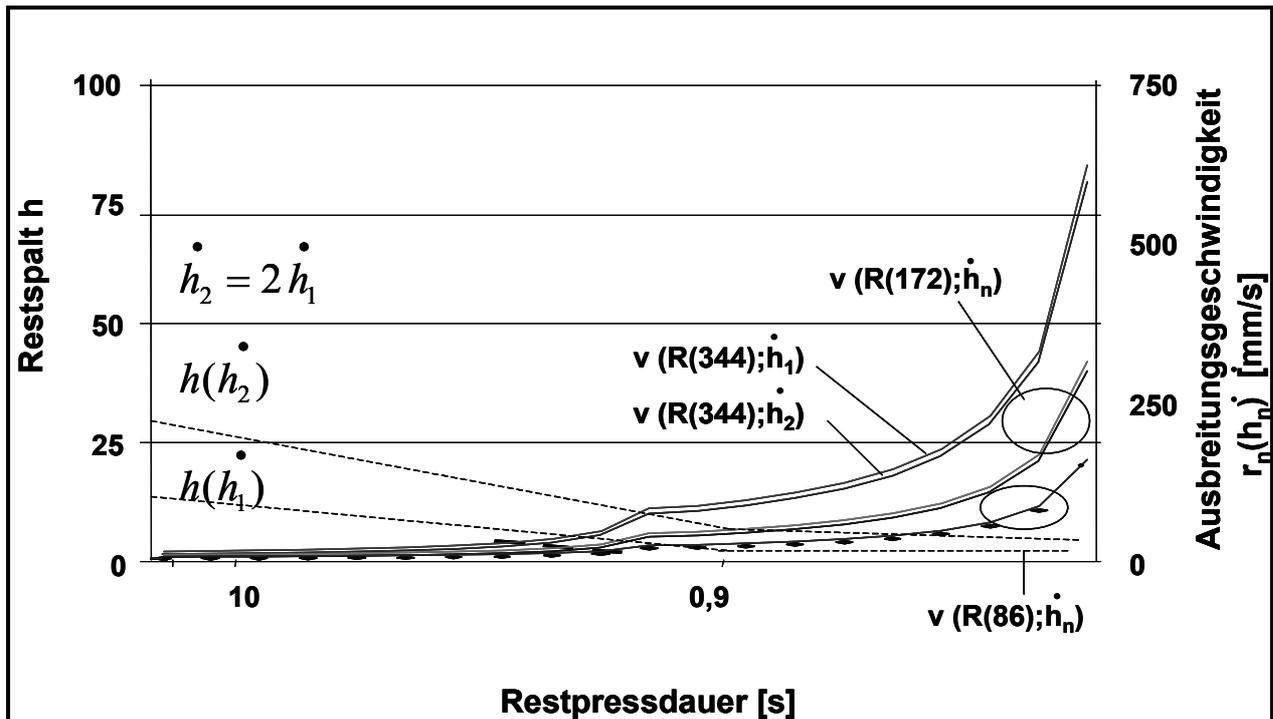


Bild 3.20: Entwicklung der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Fließfront

Die Verwendung eines großen Kreisscheibendurchmessers reduziert den Einfluss möglicher Materialinhomogenitäten und Störgrößen wie Lunker oder Faseraggregationen auf die Ermittlung der Viskositätskurven. Derartige Störgrößen reduzieren die Viskosität. Eine gesteigerte Schließgeschwindigkeit wirkt sich nicht auf die Viskositätsmessung aus [47Fehler! Textmarke nicht definiert.], jedoch auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Fließfront. Bei gleicher Abtastrate wird durch Reduzierung der Schließgeschwindigkeit gleichzeitig die Messdatenmenge vergrößert und damit eine verbesserte Messgenauigkeit erreicht.

3.5 Röntgenuntersuchungen zur Faserorientierung

Die hergestellten Masterbatches und Compounds wurden allesamt derart in der Kavität positioniert, dass ein unidirektionaler Fließvorgang entstand. EDELMANN [47] hat bereits dargestellt, dass sich bei einer Kantenlänge von ca. 540 mm einer quadratischen Kavität eine besonders starke Vorzugorientierung in Fließrichtung in der Plattenmitte ausprägt. Mit dem Auftreffen der Fließpressmasse an einer Kante oder Werkzeugbegrenzung erfolgt eine Orientierung der Verstärkungsstruktur parallel zur Begrenzung.

Ziel der nachstehend beschriebenen Untersuchung ist es, mögliche Behinderungen der Faserorientierung durch einen gesteigerten Füllstoffgehalt darzustellen, die aus der Verwendung von Flammenschutzmitteln resultieren. Hierzu wurde die quadratische Kavität einseitig mit einem Plastifikat aus dem Einschneckenplastifizierer belegt, wie

es Bild 3.8 zeigt. Diese Art der Kavitätsbelegung bewirkt, dass sich über eine größere Länge, ca. zwei Drittel der Kantenlänge, außerhalb des Einlegebereichs eine Vorzugsorientierung einstellt. Die anisotrope Faserorientierung führt zu einem Verzug der aus der Kavität entformten, ursprünglich ebenen Platte. Dieser Verzug wird durch die Abkühlung bzw. das Schrumpfen der Matrix verstärkt. Füllstoffe werden zur Reduzierung des Schrumpfs auch bei Thermoplasten eingesetzt und behindern gleichzeitig die Fließfähigkeit [72, 102]. Nachstehend wird vorgestellt, wie dieser Effekt sich auch auf die Faserorientierung auswirkt.

Plastifikate mit einem besonders hohen Faseranteil zeichnen sich auch durch eine hohe Viskosität aus (Bild 3.16). Damit die Kavität überhaupt mit dem zur Verfügung stehenden Presskraftpotenzial gefüllt wird, werden diese Plastifikate in der Kavitätsmitte eingelegt und verpresst. Bei der Untersuchung der Faserorientierung wird diese reduzierte Fließweglänge berücksichtigt.

Von ausgewählten Prüfplatten wurden Probekörperstreifen zur Röntgenanalyse entnommen. Zur Vergleichbarkeit der Proben in Bezug auf die Pressarbeit wurden die Proben so ausgewählt, dass sowohl der Einlegebereich als auch der Fließbereich dargestellt wird. Tab. 3.8 liefert eine Beschreibung der geröntgten Probekörper. Dabei stellt das weit verbreitete Material C, zu 30 Gewichtsprozent glasfaserverstärktes PP, gemäß Tab. 3.2 das Referenzmaterial dar.

Gemäß Kap. 3.4 wurde gezeigt, dass mit einer steigenden Fließfähigkeit auch die erforderliche Pressarbeit zum Ausfüllen der Kavität zunimmt. Die Tab. 3.8 enthält mit der Darstellung der Pressarbeit die Basisdaten zur Beurteilung der Auswirkung von Fließfähigkeit auf die Faserorientierung. Diese Vergleichswerte werden nun zu der Veränderung von Faserorientierungen in Bezug gesetzt.

Tab. 3.8: Probekörperbeschreibung in Erweiterung zu Tab. 3.2

Bezeichnung Probenstreifen (bez. Tab. 3.2)	Beschreibung	Faser- gehalt [Gew.-%]	Aufge- wendete Press- arbeit [kJ]
P 40 (Material C)	Material C (PP-GF 30, Matrix MFI 50)	30	10,45
P 28	GF-PP (Matrix MFI 20) mit Melaminesynergist (20 Gew.-%)	15	12,99
P 32	PP (Matrix MFI 20) zu 58 Gew.-% mit Mischung aus $Mg(OH)_2$ + $CaCO_3$ zu 27 Gew.-% mit 15 Gew.-% Glas- faserverstärkung	15	12,15
P 56 (Material E)	GF-PP (Matrix MFI 50) mit 60 Gew.-% Glasfaserver- stärkung	60	11,98
P 43 (Material G und Material C, je 50 %)	GF-PP (Matrix MFI 50) mit Melaminesynergist (20 Gew.-%)	15	11,88
P 53 (Material H und Material E, je 50 %)	PP (Matrix MFI 50) zu 58 Gew.-% mit Mischung aus $Mg(OH)_2$ + $CaCO_3$ zu 27 Gew.-% mit 30 Gew.-% Glas- faserverstärkung	30	11,12
P 51 Teil A (Material G und Material E, je 50 %)	GF-PP (Matrix MFI 50) mit Melaminesynergist (20 Gew.-%)	30	10,64
P 51 Teil B (Material G und Material E, je 50 %)	GF-PP (Matrix MFI 50) mit Melaminesynergist (20 Gew.-%)	30	10,64
P 46 (Material H)	PP (Matrix MFI 50) zu 58 Gew.-% mit Mischung aus $Mg(OH)_2$ + $CaCO_3$ zu 27 Gew.-% mit 15 Gew.-% Glas- faserverstärkung	15	9,89

Die Probenstreifen wurden Röntgenstrahlung ausgesetzt, wodurch sich die vorhandene Faserorientierung sich auf dem Röntgenfilm abbildet. Bild 3.21 zeigt die Probekörperstreifen, die der Faserorientierungsanalyse unterzogen wurden. Der linke, beschriftete und durch vertikale Linien segmentierte Bereich stellt den Einlegebereich dar und grenzt so den Fließbereich ab. Für die spätere Analyse der Faserorientierung stellt die Fließrichtung die Winkelklasse 0° dar. Die maximal eingesetzte Faserlänge betrug konstant 25 mm aufgrund des verwendeten Stäbchengranulats; dementsprechend sind die ausgewählten Untersuchungsbereiche dimensioniert.

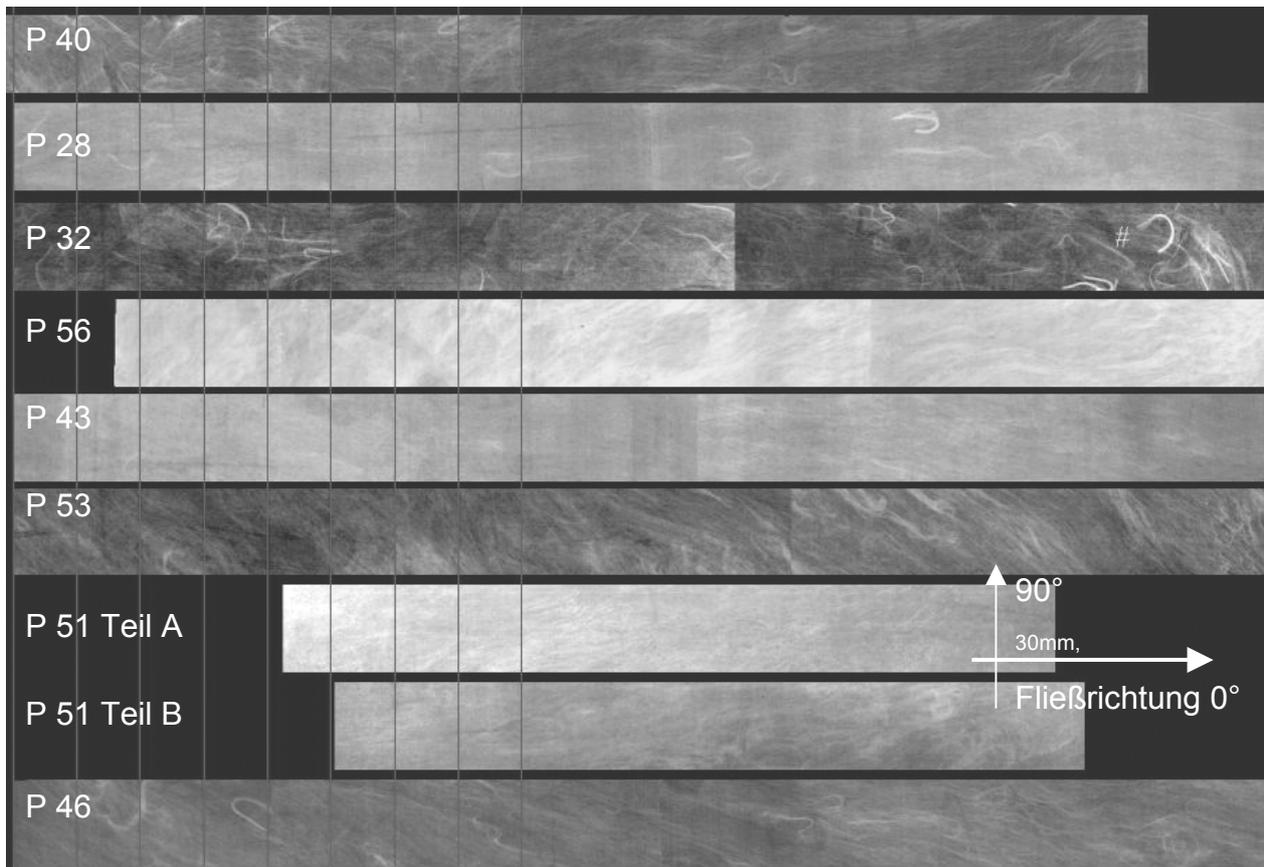


Bild 3.21: Röntgenbilder ausgewählter Prüfplatten mit unterschiedlicher Schmelzviskosität

Bild 3.21 zeigt einzelne Untersuchungsstreifen mit vertikalen Farb- bzw. Bildunterbrechungen. Dies liegt an einer entsprechenden Trennung des Probekörpers, da der Röntgenfilm eine maximale Kantenlänge von 297 mm aufweist. Probe P 51 wurde mittig in die Kavität zum Verpressen eingelegt, so dass sie für diese Untersuchung in zwei Teilen dargestellt wird. Die Grenze des Einlegebereichs wurde an der Prüfplatte optisch aufgrund der rauen Oberfläche festgelegt, die durch das schnellere Einfrieren der aus dem Plastifikat herausstehenden Glasfasern beim Einlegen in die Kavität verursacht wird. Dieser Bereich variiert bei der Transferzeit um ein oder zwei Sekunden, da die Abfolge von Plastifikatausstoß aus dem Plastifizierer, Positionierung in Kavität und Schließen der Presse, manuell verrichtet wurde. Zudem können unterschiedliche Glasfaser- und Additivanteile das Abkühlverhalten beeinflussen, so dass, verursacht durch die veränderliche Viskosität, nicht an jeder übereinanderliegenden Stelle eine gleiche Faserorientierungsverteilung im Einlegebereich zu erwarten ist. STARKE hat in seiner Arbeit [103] dargestellt, dass mit einer gesteigerten Glasfaserkonzentration deren Ausrichtung behindert wird, sofern sie sich berühren oder auch nur überlagern. Speziell die Einflussfaktoren auf die Faserorientierung im Plastifikat, wie unterschiedliche Plastifikatgeometrie und Halbzeugaufbereitung (Staudruck,

Drehzahl), die sich auch im Einlegebereich variabel einstellen, wurden von EDELMANN [47] vorgestellt.

Zur Bestimmung der Faserorientierung wurde das an der Institut für Verbundwerkstoffe GmbH entwickelte Analyseprogramm FIBORAS eingesetzt. Die Probestreifen wurden über die komplette Breite des Bildes (Bild 3.21) in 22 Untersuchungssegmente unterteilt, wovon acht Segmente den vorgestellten Einlegebereich untergliedern. Das Analyseergebnis stellt die Anteile der Faserorientierung in 10°-Clustern dar, wobei die „- 90°“- Gruppe identisch der Gruppe „+ 90°“ ist.

Bei einer isotropen Faserverteilung müsste jede Gruppe mit einer Häufigkeit von 5,5 % vertreten sein. Doch bereits mit der Aufbereitung des Halbzeugs zum Plastifikat ergibt sich eine Vorzugsrichtung, die auch durch die Schneckengeometrie hervorgerufen wird. Beim Vergleich verschiedener Untersuchungstreifen, unter Berücksichtigung der Produktionsrichtung im dritten Segment des Einlegebereichs, ist diese Vorzugsrichtung zu erkennen.

Die größte anisotrope Ausrichtung im Einlegebereich zeigt gemäß Bild 3.22 das Plastifikat mit dem geringsten Anteilen an Füllstoffen (Fasern, Additiven) Probestreifen P 40 im Prüfsegment 3.

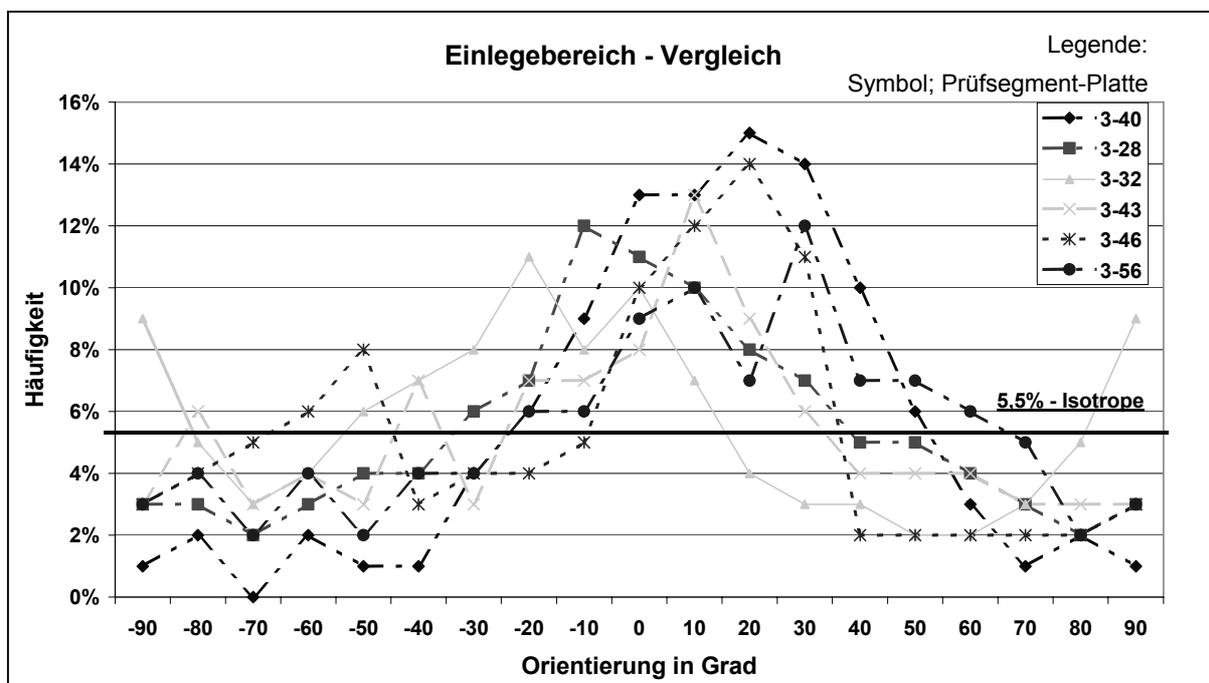


Bild 3.22: Faserorientierungsverteilung im Einlegebereich unterschiedlicher Fließpressmaterialien

Die Untersuchungen zur Faserorientierung entlang des Fließwegs zeigen gemäß Bild 3.23 und Bild 3.24, dass Fasergehalt und Matrixviskosität unterschiedlichen Einfluss auf die Orientierung der Fasern nehmen. Die Matrixviskosität kann durch den Einsatz von flammhemmenden Füllstoffen wesentlich gesteigert werden (Vergleich Material A und G in Bild 3.17). Diese behindert gleichzeitig die Ausrichtung der Fasern, was im Vergleich der Probenstreifen in Bild 3.24 zu einer späteren eindeutigen Ausrichtung bei Probenstreifen P 53 führt. Es kann zudem die Beziehung zwischen Pressarbeit, Fließfähigkeit und Faserorientierung derart hergestellt werden, dass bei geringerer Fließfähigkeit eine gesteigerte Pressarbeit zur Ausfüllung der Kavität erforderlich ist (Bild 3.16). Eine gesteigerte Fließfähigkeit führt zu einer entlang des Fließwegs früheren Ausrichtung der Fasern in Fließrichtung, was mit Bild 3.23 durch den Probenstreifen P 40 dargestellt wird.

Eine Viskositätserrhöhung kann sowohl durch einen gesteigerten Füllstoff- als auch Faseranteil hervorgerufen werden (Kapitel 3.4). Beides behindert eindeutig die Ausrichtung der Fasern in Fließrichtung im Vergleich zu einem leichter fließenden Material bei gleicher Fließweglänge, wie es jeweils in den beiden nachstehenden Bildern 3.24 und 3.25 dargestellt ist. Hier bildet sich die Vorzugsrichtung, als Graphikspitze herausgestellt, erst ab Messpunkt 10 erkennbar aus.

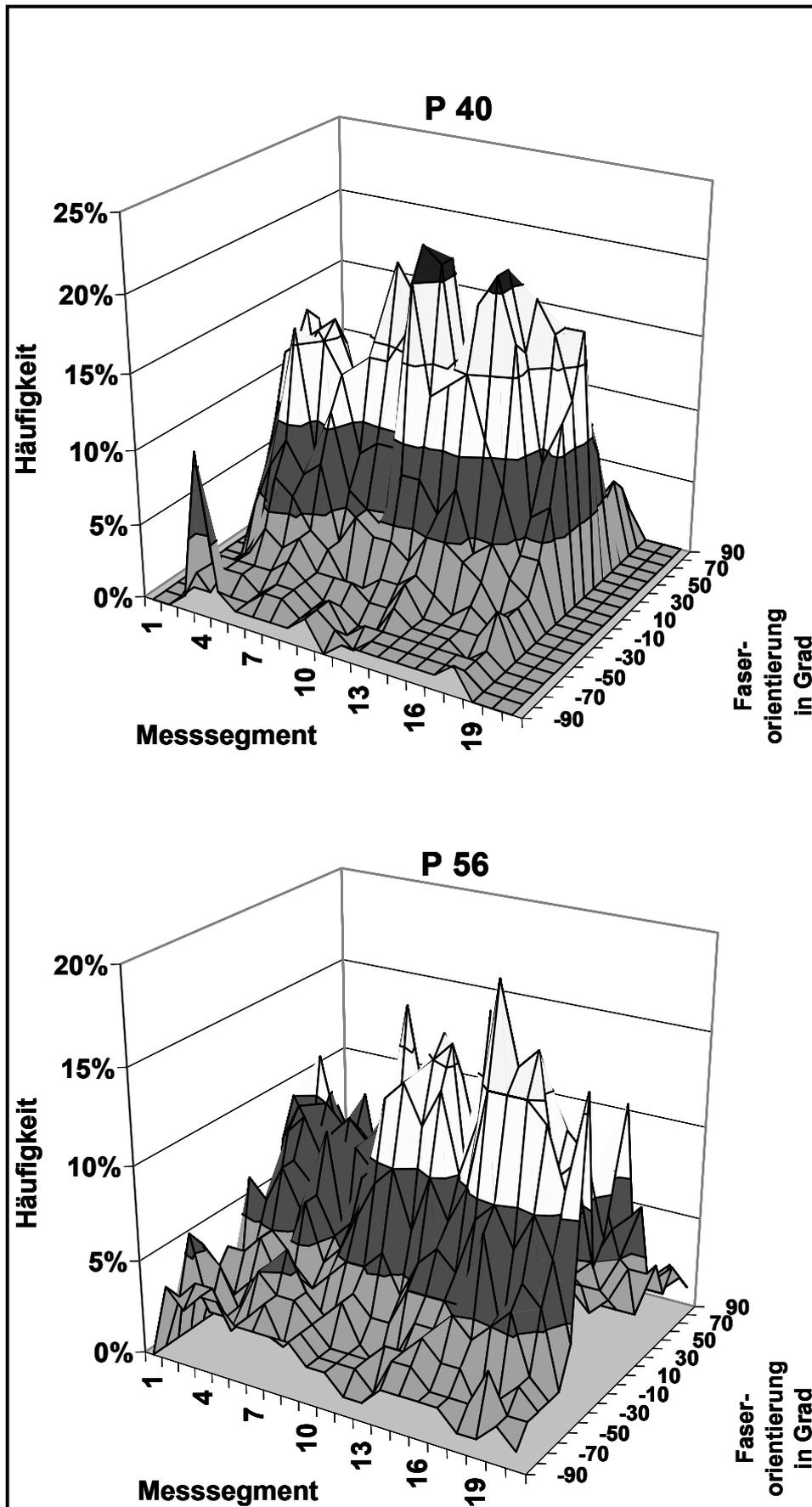


Bild 3.23: Faserorientierung entlang des Fließwegs

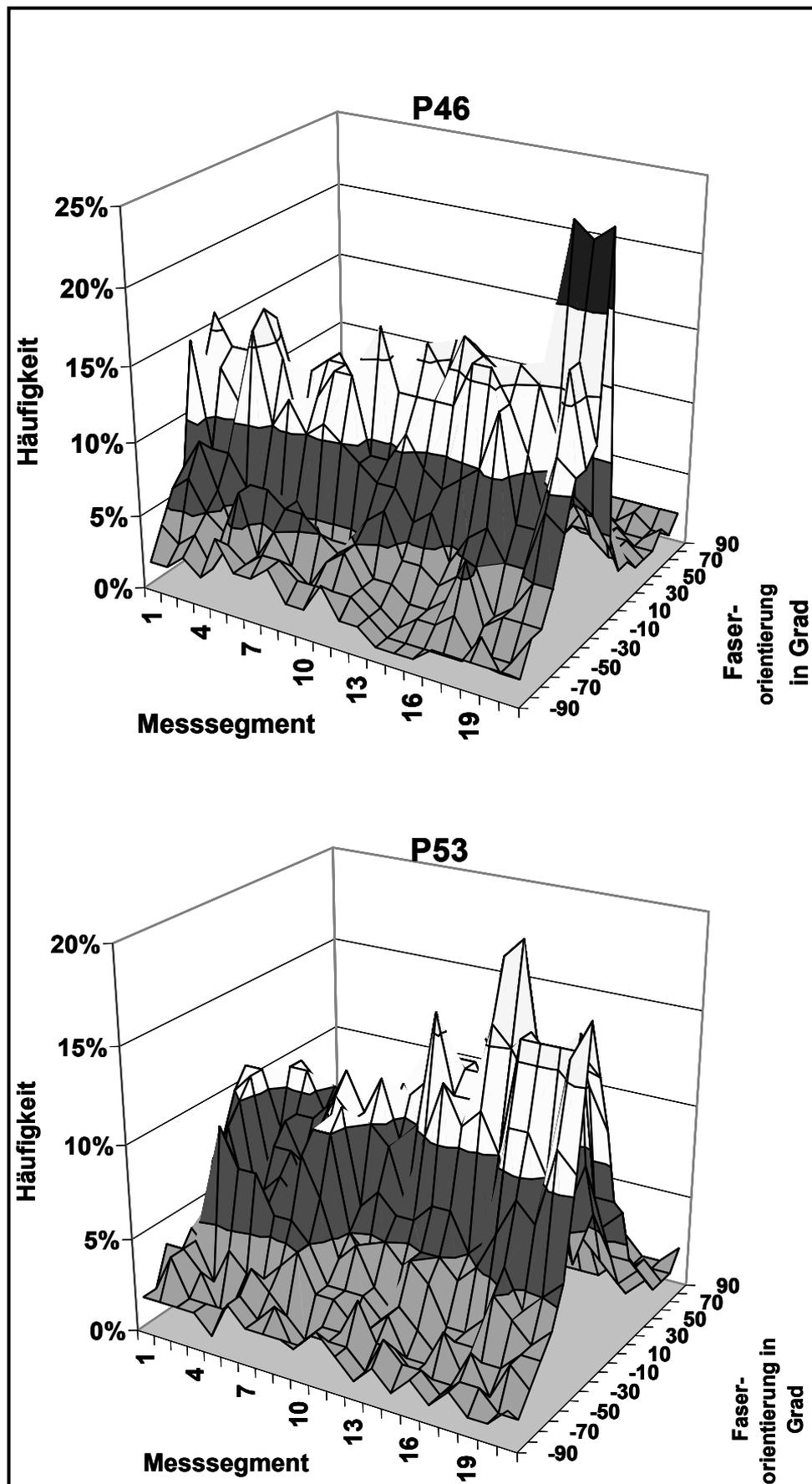


Bild 3.24: Faserorientierung entlang des Fließwegs

3.6 Zusammenfassung zur flammhemmenden Ausrüstung von LFT

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen deutlich, dass eine halogenfreie flammhemmende Ausrüstung ohne besonders hohe Einbußen bei den mechanischen Kennwerten von glasfaserverstärktem Polypropylen möglich ist.

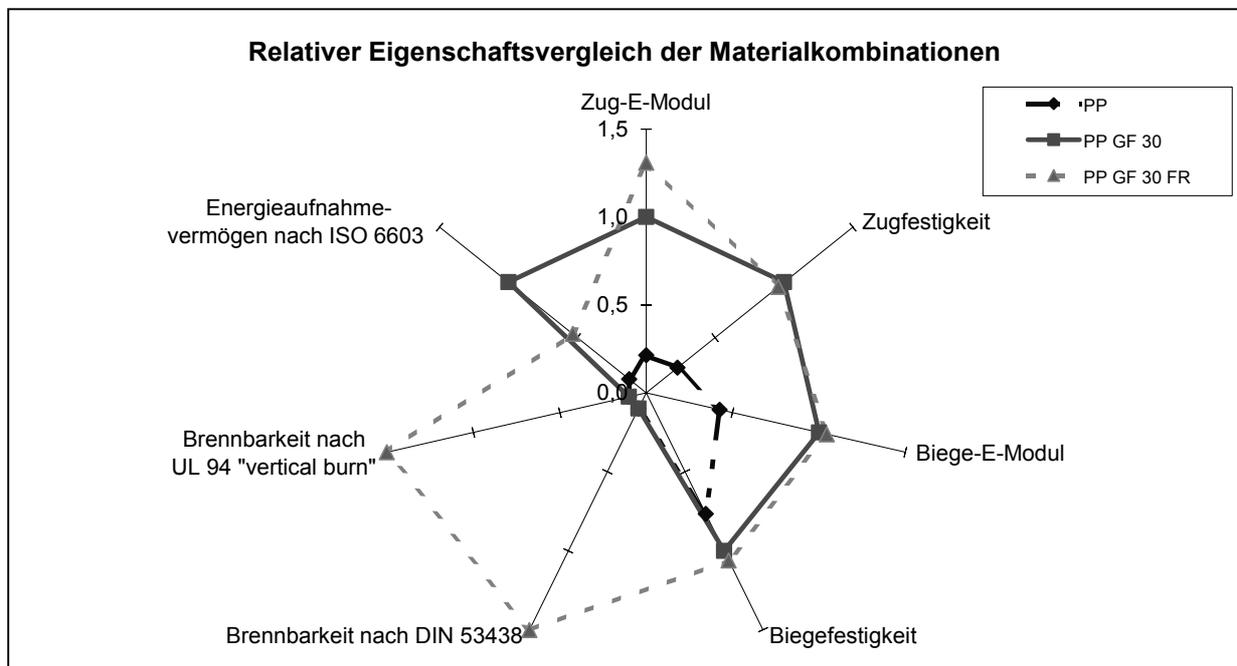


Bild 3.25: Eigenschaftsvergleich von reinem Polypropylen mit GF-PP und FR-GF-PP mit Flammhemmung

Bild 3.25 zeigt diesen Vergleich qualitativ und Tab. 3.9 zeigt die dazugehörige Wertetabelle.

Tab. 3.9: Quantitativer Eigenschaftsvergleich von reinem Polypropylen mit GF-PP und FR-GF-PP mit Flammhemmung

	PP	PP GF 30	PP GF 30 FR
Zug-E-Modul [GPa]	1,5	7	9,15
Zugfestigkeit [MPa]	26	115	110
Biege-E-Modul [GPa]	1,4	3,3	3,45
Biegefestigkeit [MPa]	65	85	90
Energieaufnahmevermögen nach ISO 6603 [kJ/m]	1,3	10,5	5,6
Brennbarkeit nach DIN 53438	K 3	K 3	K 1
Brennbarkeit nach UL 94 "vertical burn"	--	--	VO

Hinsichtlich der Verarbeitungsfähigkeit ist festzustellen, dass mit flammhemmend ausgerüstetem, glasfaserverstärktem Polypropylen hergestellte Bauteile mit den glei-

chen Werkzeugen und Anlagen hergestellt werden können wie nicht flammhemmend ausgerüstete Fließpresshalbzeuge. Die Fließfähigkeit muss bei einer einzustellenden Faserorientierung Berücksichtigung finden, da auch funktionale Füllstoffe die Fließfähigkeit behindern können.

4 Eigenschaftserweiterung durch verarbeitungstechnische Änderung bei der LFT-Fließpressverarbeitung

Mit Kapitel 2.2 wurde ermittelt, dass eine einstellbare Faserorientierung das Fließpressverfahren gemäß den Marktanforderungen attraktiver gestalten würde. Die belastungsorientierte Einstellung der Faserorientierung verbessert die mechanischen Eigenschaften. Üblicherweise werden zur Steigerung mechanischer Eigenschaften verschiedene Materialien zu Verbundwerkstoffen kombiniert und entsprechend verarbeitet. LFT stellen bereits derartige Verbundwerkstoffe dar. Zur weiteren Steigerung ihrer Eigenschaften werden sie mit metallischen Werkstoffen im Schichtaufbau kombiniert. In dieser Form werden sie als hybride Strukturen bezeichnet.

Gemäß Kapitel 2.1.2 ist die Entwicklung halbzeugseitig ausgehend von GMT über LFT-Stäbchengranulat hin zum Direkt-LFT verlaufen. Verarbeitungsseitig entwickelte sich die Prozesstechnik vom Pressverfahren hin zum Spritzgießverfahren, bei dem in der Endstufe die für das Bauteil vorgesehene Metallverstärkung in das Werkzeug eingelegt wird, um im Spritzgießverfahren ein hybrides Bauteil herzustellen. Dies zeigt sich in den Anwendungen vom Stoßfängerquerträger hin zum metallverstärkten, hybriden Front-End-Träger (Ford-Focus). Dabei wurden die Metallbleche mit z.B. glasfaserverstärktem Polyamid 6 hinterspritzt, bei dem die Kunststoffschmelze die Durchbrüche und Öffnungen des umgeformten Metallbauteils durchströmt, was zumindest zu einer formschlüssigen Verbindung führt. Die Ausbildung eines kreuzverrippten Hutprofils führt zu einer Steigerung der Biegesteifigkeit um bis zu 400 %. Diese Steifigkeitssteigerung und die Möglichkeit im Spritzgießverfahren zusätzlich Verbindungselemente wie z. B. Rasthaken zu integrieren und Hinterschneidungen in einem Arbeitsschritt zu realisieren, haben auch LFT-Anwendungen im Automotive-Bereich begünstigt, zumal eine weitere Gewichtsreduzierung im Vergleich zu GMT erzielt wurde [104, 105, 106]. Die jüngste Entwicklung stellt das Verkleben des LFT-PP-Composites mit der Metallverstärkung dar (VW Polo A05).

Die Kombinationen aus Fließpresshalbzeugen mit thermoplastischer Matrix und lokaler Verstärkung wurden bereits untersucht. Die lokale Verstärkung war jeweils nicht eine sortenreine, trockene, textile Struktur, sondern Hybridgarne bestehend aus Matrix- und Glasfasern. Diese wurden anwendungsabhängig vorgeformt, indem sie auf Schmelztemperatur der Matrix erhitzt und zu Organoblechen konsolidiert wurden. Im folgenden Verarbeitungsschritt werden diese Organobleche nochmals über die Schmelztemperatur erwärmt und hinterpresst. Die Imprägnierung der Fasern der zu-

vor konsolidierten Preform erfolgt nicht durch den Fließpresswerkstoff, sondern durch die Hybridfasern [107, 108, 109, 110].

Sowohl in [107] als auch in [21] werden Verfahrensabläufe zum Verpressen von nicht konsolidierter Preform aus Hybridfasern (Twintex[®]) und Fließpresswerkstoff beschrieben, wobei die Komponenten zusammen über Schmelztemperatur erhitzt wurden. Die Faserverschiebungen, hervorgerufen durch die Strömungsvorgänge, resultierend aus dem Fließpressvorgang, können mittels Röntgenanalyse sichtbar gemacht werden. Dabei ist eine eindeutige Zuordnung des Matrixursprungs zur Imprägnierung der Preform entweder aus der Fließpressmasse oder den Commingled Yarns (Misch- oder Hybridfaserbündel) bisher nicht belegt.

Mittels eines speziellen Werkzeugkonzepts ist es bei [111] möglich, dass die Preform in z-Richtung vom Fließpresswerkstoff durchflossen und somit in das Gewebe eine weitere Faserrichtung eingebracht wird. Die verarbeitungstechnischen Begrenzungen verfügbarer Presskraft zur Ausfüllung der Kavität werden durch gesteigerte Fasergehalte oder den Laminataufbau (Preformpositionierung in der Mitte von GMT) schneller ausgeschöpft, weil derartige Halbzeuge eine geringere Fließfähigkeit aufweisen [112].

Neben den Kombinationen von FKV mit Metall und der Kombination LFT mit Organoblechen kann auch mittels Sandwichstruktur aus LFT mit Schaumkern eine Steigerung der spezifischen mechanischen Bauteileigenschaften erreicht werden.

Diese Art des Leichtbaus ermöglicht den verbesserten Fußgängerschutz im Automobilbereich sowie die kostengünstige Fertigung von Sandwich-Sportschlägern [113]. Der Sandwichaufbau kann allerdings die Reparaturfähigkeit eines Bauteils signifikant einschränken. Dieser Aufbau wirkt sich Recyclingfall (End-of-Life-Vehicle (ELV), EU-Direktive) wegen der zu erfüllenden Verwertungsquoten kostensteigernd aus [14, 114]. Einen Ausweg zeigt die nachfolgend beschriebene Verfahrensänderung zur Bauteilherstellung auf, die auf einer Duplizierung des eigentlichen Pressvorgangs beruht. Dabei werden Pressmassen zweimal definiert in die Kavität eingelegt und verpresst, ohne dass zwischen dem ersten und zweiten Pressvorgang das Bauteil entnommen wird.

4.1 Einfaches und doppeltes Pressen

In der Einleitung zu diesem Kapitel wurden die Möglichkeiten des Überpressens/ -spritzens von textilen Strukturen, Organoblechen und Metallen vorgestellt. In Erwei-

terung dieser Technologien wird nachfolgend der Weg des fließgepressten Schichtverbundwerkstoffes verfolgt.

Ziel sind weniger dekorative Oberflächen, sondern verbesserte mechanische Eigenschaften, bei gleichzeitig geringerer Anisotropie des Verbundes. Im Fließpressverfahren wird eine Verbesserung üblicherweise mit einer Änderung der Bestandteile (Matrix- bzw. Fasertyp) oder durch Variation der jeweiligen Anteile erreicht. Das neue Verfahren bei der Verarbeitung von LFT-Pressmassen zeichnet sich dadurch aus, dass nach dem ersten Pressvorgang das hergestellte Bauteil nicht entnommen sondern nochmals überpresst wird. Diese Kombination wird im Folgenden „Doppelt Pressen“ genannt. Beim „Doppelt Pressen“ wird ein Substrat mit dem gleichen Werkstoff im Fließpressverfahren nochmals überpresst, ohne dass die Fügepartner speziell über Schmelztemperatur erwärmt werden.

Überpressen gleichen Materials ist aus der Organoblechherstellung mittels einer kontinuierlich arbeitenden Doppelbandpresse bekannt [115]. Die am IVW entwickelte Tailored-Blank-Technologie (maßgeschneiderte Halbzeuge und Bauteile aus Organoblechen) basiert auf dem diskontinuierlichen Pressprozess des Thermoformens mit entsprechend sehr kleinen Fließwegen (Bild 2.11). Dabei werden unterschiedliche Verbunde gleicher Matrix miteinander verpresst, wodurch eine Steigerung bei der Bauteildicke erreicht wird oder eine Änderung der Faserorientierung durch die Fügepartner. Dies führt zu einer Verbesserung der Bauteileigenschaften durch lokale Aufdickung und geänderte Faserorientierung bzw. -anteile, doch im Gegensatz zu anderen Verfahren ohne den Nachteil von Oberflächendefekten, wie z. B. Einfallstellen [116].

Wie bereits in Kapitel 3.5 dargestellt, führt der Einsatz von LFT im Fließpressprozess zu einer Faserorientierung in Fließrichtung, weil die Kavität nicht zu 100 % wie beim Thermoformprozess belegt wird. Die höchsten mechanischen Eigenschaften werden bei einer Belastung parallel zur Faserrichtung erzielt. Senkrecht zur Faserrichtung werden nur Festigkeiten in der Größenordnung der Matrixfestigkeit erzielt. Lediglich im Einlegebereich des Plastifikats (GMT und LFT-Stäbchengranulat) herrscht eine nahezu gleichmäßige Faserorientierung in allen Richtungen vor [117]. Eine Abweichung von der isotropen Verteilung, eine Vorzugsrichtung, kann durch die Orientierung der Glasfasern bei der Produktion von glasmattenverstärkten Thermoplasten (GMT) und durch die Aufbereitung des Halbzeugs (LFT-Stäbchengranulat-Extrudat) begründet werden. Insofern können Bauteilflächen, die im Fließpressverfahren her-

gestellt sind, gemäß der Bild 4.1 in Einlege- und Fließbereich unterschieden werden [118].

Neben der Faserorientierung unterscheiden sich die Bereiche auch in der Oberflächenbeschaffenheit. Im Einlegebereich kühlen mit dem Einlegen des Plastifikats die Fasern ab und die sie umgebende Matrix friert aufgrund des großen Temperaturgradienten zwischen Werkzeug und Plastifikats sofort ein, so dass eine raue Oberfläche entsteht. Der entscheidende Vorteil des Fließpressverfahrens im Vergleich zum Spritzgießprozess ist die freie Wahl des Einlegebereiches des Plastifikates in der Kavität. Sie können im Gegensatz zu den Anspritzpunkten beim Spritzgießen ohne Werkzeugänderung variiert werden. Die Reproduzierbarkeit der Plastifikatpositionierung wird heutzutage durch automatisierte Handhabungsgeräte gewährleistet.

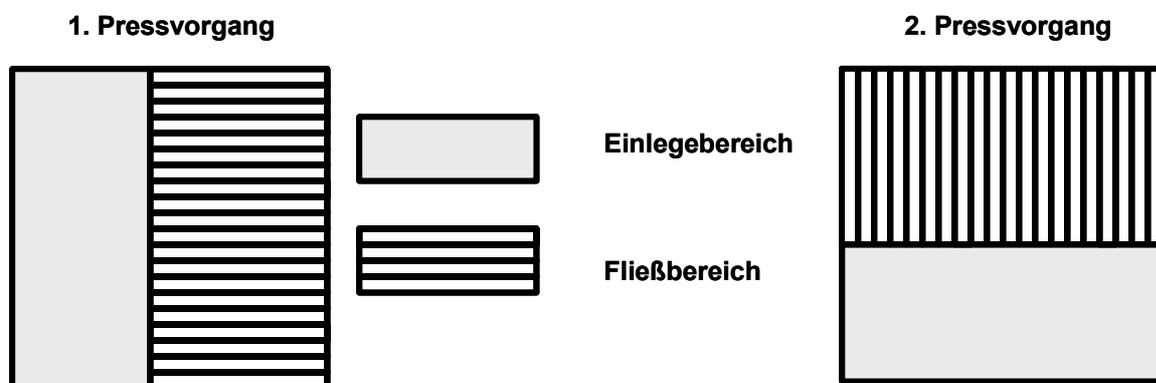


Bild 4.1: Schematische Darstellung von Kavitätsbereichen mit Bezug auf deren Bestückung und Fließrichtung beim ersten und zweiten Pressvorgang

Die Änderung des Einlegebereichs kann auch bei komplexen Geometrien vorgenommen werden, sofern die Presse mit einer Parallelhaltung ausgestattet ist, die ein Abkippen und somit eine Beschädigung des Werkzeugs verhindert.

Der geänderte Verarbeitungsprozess verfolgt die Grundsätze, dass

- das Laminat aus gleich dicken Schichten (1,7 bis 2,3 mm Schichtdicke je Pressvorgang) aufgebaut wird und
- die beiden Schichten zunächst aus gleichartigem Material bestehen.

Durch die Ausnutzung aller Freiheitsgrade der Plastifikatpositionierung werden definiert einstellbare Bauteileigenschaften über die Faserorientierung angestrebt. Dies hat zum Ziel, die Bauteilfestigkeit zu steigern, was ansonsten in einem Presszyklus mit derartigem Werkstoff nur über eine gesteigerte Dicke erreichbar ist. Mit dem „Doppelt Pressen“ (DP) besteht nun die Möglichkeit, außerhalb der Einlegebereiche über die Bauteilfläche hinweg eine 0°/ 90°-Faserorientierung zu erreichen. Hierzu wird die Positionierung des Einlegebereiches der zweiten Pressung um 90° gedreht. Mit Kapitel 3.5 ergab die Analyse der Faserorientierung, dass eine reine 0°-

Faserorientierung nur mit sehr langen Fließwegen erreicht wird. Beim „Doppelt Pressen“ überlagern diese 0°-Orientierungen zu einer 0°/ 90°-Faserorientierung lediglich im Segment 4. Durch die Drehung des Einlegebereiches um 90° können sich bereits 0°/ 90°-Orientierungen im Bereich 3 relativ zueinander ausbilden. Die Bereiche sind in Bild 4.2 dargestellt.

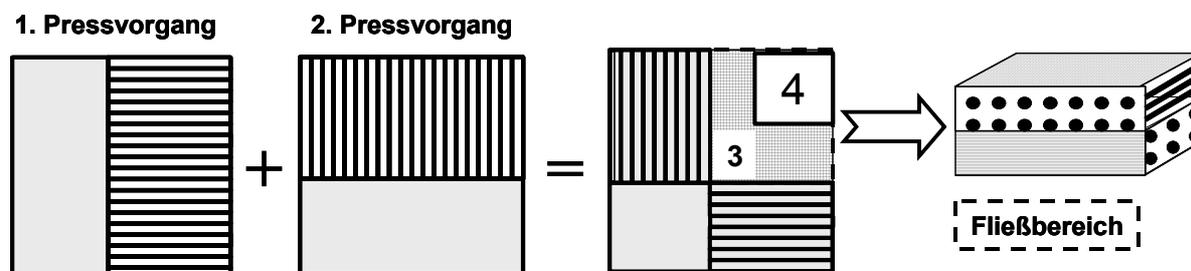


Bild 4.2: Schematische Darstellung des „Doppelt Pressen“ und der resultierenden 0°/90°-Faserorientierung (Bereich 4)

4.1.1 Eingesetzte Werkstoffe und Verarbeitungsbedingungen

Zur Untersuchung wurden unterschiedliche Typen an langfaserverstärkten Thermoplasten herangezogen, wie z. B. LFT-Stäbchengranulat (Granulatlänge 25 mm) mit Glas als Verstärkungsfaser sowie ein glasmattenverstärkter Thermoplast. Alle basieren auf dem Matrixwerkstoff Polypropylen gemäß Tab. 4.1. Zum Vergleich wurde auch der reine Matrixwerkstoff untersucht.

Die aus Kapitel 3.2.3 bekannte Anlagenkonfiguration, bestehend aus Einschneckenplastifiziereinheit und schnell schließender, parallel geregelter Kunststoffpresse, wurde auch für die Verarbeitungsuntersuchungen im Rahmen des "Doppelt Pressen" eingesetzt.

Tab. 4.1: Untersuchte Werkstoffe im „Doppelt Pressen“

Werkstoff Nr.	Bezeichnung	Bezugsquelle
1	PP Homopolymer (MFI: 52)	Hersteller A
2	PP-GF 30 (LFT-Stäbchengranulat, MFI: 20)	Hersteller B
3	PP-GF 30 (LFT-Stäbchengranulat, MFI: 50)	Hersteller B
4	GF-PP (glasmattenverstärkter Thermoplast GMT), GF-Gewichtsanteil: 30 %	Hersteller C

Die Temperaturführung und Staudruck werden in Abhängigkeit von Fasergehalt und Fließfähigkeit derart angepasst, dass sich das Faserbündel des Granulats auflöst und sich die Einzelfasern in der Pressmasse sowie anschließend in der Prüfplatte gleichmäßig verteilen. Die Plastifiziereinstellungen sind mit Tab. 4.2 dargestellt.

Tab. 4.2: Plastifizierereinstellungen

Werkstoff	Temperaturen (Heizzone von Einzug (1) bis Düse(6))							Staudruck [bar]
	1	2	3	4	5	6	Tm	
1	165 °C	170 °C	180 °C	185 °C	185 °C	195 °C	200- 210 °C	20
2, 3	200- 210 °C	205- 220 °C	205- 220 °C	210- 220 °C	210- 220 °C	210- 220 °C	240- 265 °C	40

Die Aufbereitung des Werkstoffs Nr. 4 (GMT) erfolgte im Umluftofen (Hersteller: Reinhardt GmbH, Typ DT/V) unter den üblichen Bedingungen mit einer Temperatur von 220 °C für 7 Minuten, um eine homogene Temperaturverteilung bis in die Mitte des Halbzeugs zu erreichen und das Risiko der Polymerdegradation an der Halbzeugoberfläche zu vermeiden [112].

Die Plastifikatgrößendosierung erfolgte bei GMT gravimetrisch und bei LFT volumetrisch.

Die presstechnische Verarbeitung erfolgte gemäß den mit Tab. 2.1 dargestellten Einstellungen mit einem Tauchkantenwerkzeug in den Kavitätsabmessungen 543*543 mm² (Bild 3.8). Die Werkzeugtemperatur wurde kernseitig auf 57 °C und matrizenständig auf 63 °C für alle gleich eingestellt.

Tab. 4.3: Pressparameter im Doppelt Pressen

Schließprogramm		Kraftprogramm	
Geschwindigkeit [mm/s]	ab Restspalt [mm]	Glasfaserverstärkte LFT	
800	>> 50	Umschaltkraft	5500 kN
80	50	Maximalkraft	6000 kN
50	40	Naturfaserverstärkte LFT	
30	20	Umschaltkraft	3000 kN
10	10	Maximalkraft	3600 kN
8	8	Presszeit	80 s

4.1.2 Vorbereitung der Probekörper und Durchführung der Versuche

Aus den in Tab. 4.1 vorgestellten Materialien wurden Prüfplatten hergestellt und untersucht. Aufgrund der großen thermischen Ausdehnungskoeffizienten, der Fließvorgänge bei der Verarbeitung und der sich einstellenden Fließ-/ Vorzugsrichtung von Materialeigenschaften kommt es bei der Abkühlung der Werkstoffe zum Bauteilverzug. Dieses Verhalten zeigt sich weniger stark ausgeprägt bei Pressungen von unverstärkten Materialien und am stärksten bei der Kombination von unverstärkten und verstärkten Materialien quer zur Faserorientierung. Der Bauteilverzug wird der Faserorientierung als Ursache zugeordnet [119], da eine Vorzugsrichtung in der Mor-

phologie bei PP nicht durch das Pressverfahren entsteht, sondern durch die Abkühlbedingungen [120]. Bei den Prüfungen, die orthogonal zur Plattenebene durchgeführt werden (z.B. Schlagzähigkeitsversuch, Biegeversuch), wurde die Kraftwirkrichtung vermerkt, wie diese im Verhältnis zur Bombierung (konkav oder konvex) eingebracht wurde, sofern sie besonders auffällig war (Bild 4.3).

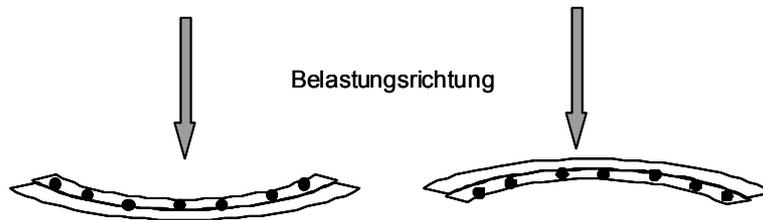


Bild 4.3: Konkaver und konvexer Bauteilverzug sowie Belastungsrichtung

Das Bild 4.4 zeigt darüber hinaus, dass der Verzug in Faserorientierung kleiner ist als quer zu dieser [121]. Der stärker konkav verzogene Bereich der Prüfplatte liegt, wie aus Bild 4.4 ersichtlich, in deren oberen Bereich (y-Achse).

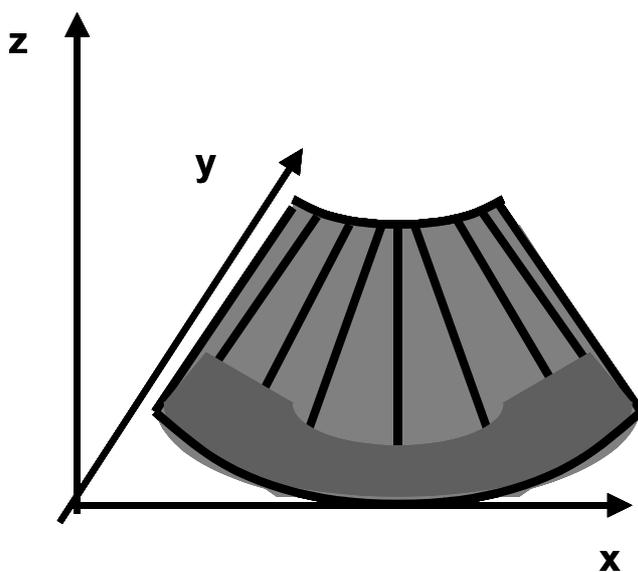


Bild 4.4: Schematische Darstellung (dunkelgrau: Einlegebereich, y: Fließrichtung) und Platte (konkave Ansicht) mit besonders stark ausgeprägtem Verzug

Die Probekörper wurden den gepressten Platten aus den jeweiligen Einlegebereichen und dem gemeinsamen Fließbereich entnommen.

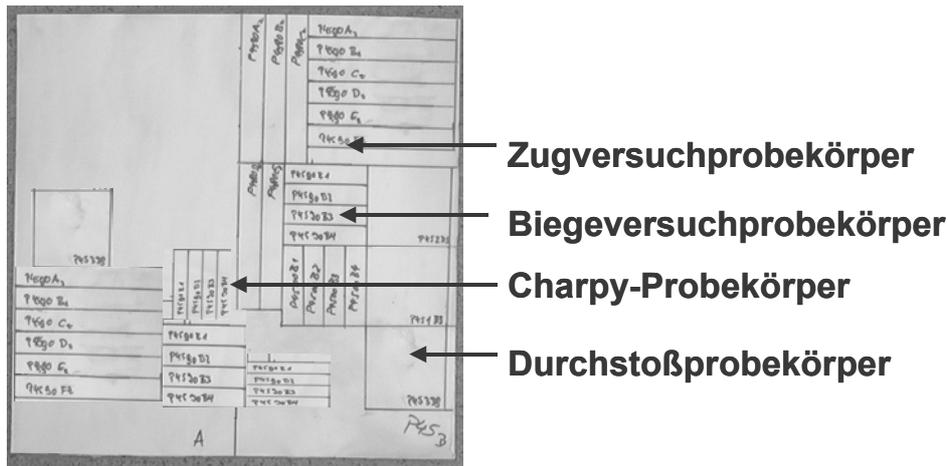


Bild 4.5: Schematische Darstellung zur Probenentnahme

Sie wurden dann in Anlehnung an die in Tab. 4.4 genannten Standards geprüft.

Tab. 4.4: Normengrundlage der mechanischen Charakterisierung

Bezeichnung	Standard Nr.
Bestimmung der Charpy-Schlageigenschaften – Teil 1 Nicht instrumentierte Schlagzähigkeitsprüfung – Probekörper Typ 2 (ISO 179-1/1fU)	DIN EN ISO 179-1
Bestimmung der Zugeigenschaften – Probekörper Typ 2	DIN EN ISO 527-4
Bestimmung des Durchstoßverhaltens von festen Kunststoffen – Teil 2 Instrumentierter Schlagversuch	DIN EN ISO 6603-2
Bestimmung der Biegeeigenschaften	DIN EN ISO 14125

Die Probekörper wurden in Anlehnung an die genannten Standards konfektioniert und wiesen die in Tab. 4.5 dargestellten Dimensionen auf.

Tab. 4.5: Dimensionen der hergestellten Probekörper

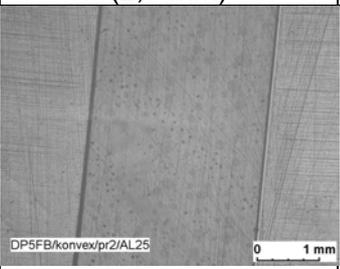
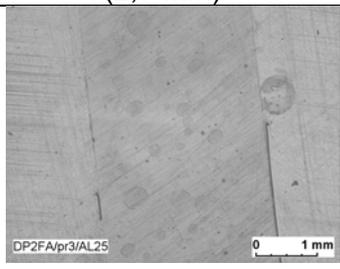
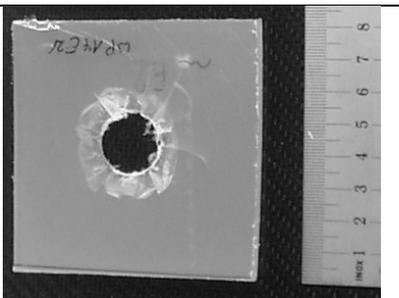
Anlehnbasis - Standard Nr.	L = Probenlänge, b = Breite, h = Höhe (Probendicke)
DIN EN ISO 179-1,	L = 25h; b = 15 mm; Stützweite (Lagerabstand) = 20h Impactenergie: 15 J
DIN EN ISO 527-4,	L ≥ 210 mm, b = 25 mm, freie Länge zwischen der Einspannung = 100 mm, Prüfgeschw. = 10 mm/min, Messlänge zwischen Wegaufnehmern = 60 mm, Vorkraft = 5 N
DIN EN ISO 6603-2,	kreisrunde Einspannung Durchmesser = 40 mm Fallbolzendurchmesser = 20 mm, aufgebrachte Energie ~63 J
DIN EN ISO 14125,	L = 100 mm, b = 25 mm, Lagerabstand = 16h, Prüfgeschw. = 2 mm/min, Vorkraft = 5 N

4.2 Prüfergebnisse der Materialkombinationen

4.2.1 „Doppelt Pressen“ von reinem Polypropylen

Beim „Doppelt Pressen“ zeigt unverstärktes, reines Polypropylen hinsichtlich der quasistatischen Kennwerte keine Verbesserung von Festigkeit oder Steifigkeit. Dies gilt sowohl für die Untersuchungsergebnisse im Zugversuch als auch im Biegeversuch. Unabhängig von der Anzahl der Pressungen liegt die Zugfestigkeit auf dem gleichen Niveau (33 MPa). Der E-Modul liegt bei den untersuchten, doppelt gepressten Proben, bei einer Standardabweichung von maximal 3%, im Mittelwert um ca. 5 % unter dem Wert der einfach gepressten Proben (1,9 GPa, einfach gepresst). Die Veränderungen im Mittelwert liegen im Intervall der Standardabweichung. Des Weiteren war bei diesen Probekörpern kein Bauteilverzug zu erkennen, obwohl die Platte mit der ersten Pressung nahezu Werkzeugtemperatur aufweist und mit schmelzflüssigen PP überpresst wurde. Schlibfbilder der Fügezone zeigen keine Trennung von erster und zweiter Pressung. Jedoch zeigen die Proben des Durchstoßversuchs Delamierungseffekte, die die um 37 % erhöhten Energieaufnahme erklären (Tab. 4.6).

Tab. 4.6: Darstellung des Probekörpers reines Polypropylen

Material	Schlibfbild Fügezone (Probendicke)		Bruchbild Durchstoßversuch
	Einfaches Pressen (2,7 mm)	Doppeltes Pressen (2,7 mm)	
Reines PP (MFI 50)			

Gerade das Schlibfbild des „Doppelt Pressen“ müsste aufgrund des Temperaturunterschiedes zwischen PP-Platte als Substrat und PP-Plastifikat eine deutliche Trennung der Schichten im Fließbereich zeigen, jedoch scheint der Energieeintrag aus dem Plastifikat ausreichend zu sein, um die Fügezone aufzuschmelzen.

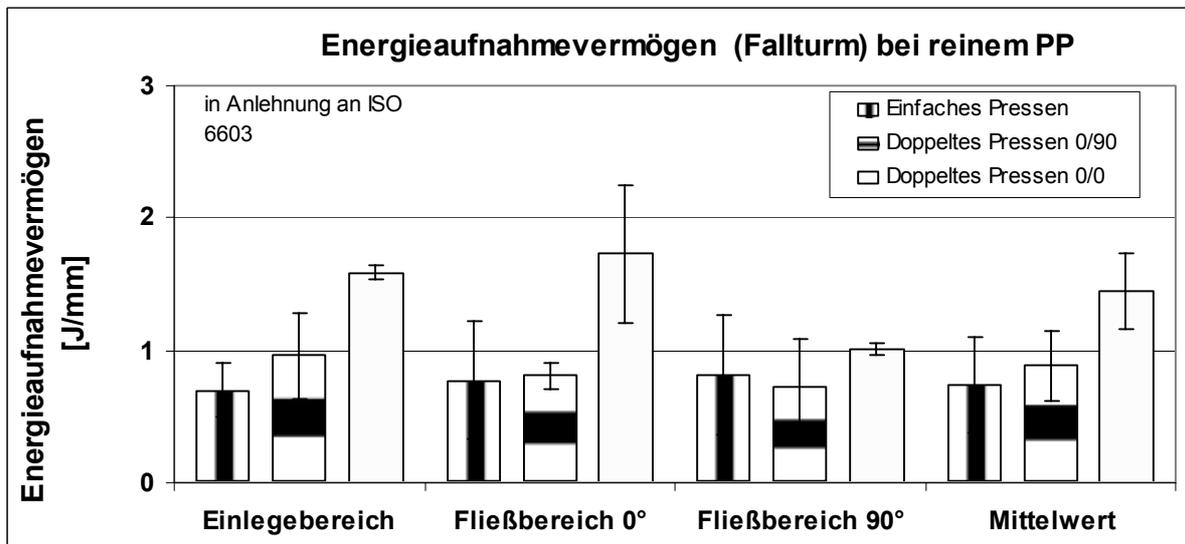


Bild 4.6: Maximales Energieaufnahmevermögen im Durchstoßversuch von reinem PP

Die Ergebnisse zum Energieaufnahmevermögen im Durchstoßversuch zeigen eine Steigerung von 37 %, da der erste Pressvorgang ohne Änderung der Einlegevariante dupliziert wird (0°-0°) (Bild 4.6).

4.2.2 „Doppelt Pressen“ von glasfasermattenverstärktem Thermoplast (GMT)

In die Untersuchungsreihe wurde auch glasmattenverstärkter Thermoplast (GMT) mit aufgenommen. Dieser wurde ebenso wie die anderen Materialien im Fließpressverfahren verarbeitet. Beim „Doppelt Pressen“ zeigte dieser Werkstoff nicht die Verzugsneigung wie LFT in der Halbzeugform Stäbchengranulat, weshalb eine Kategorisierung von konvex und konkav entfällt.

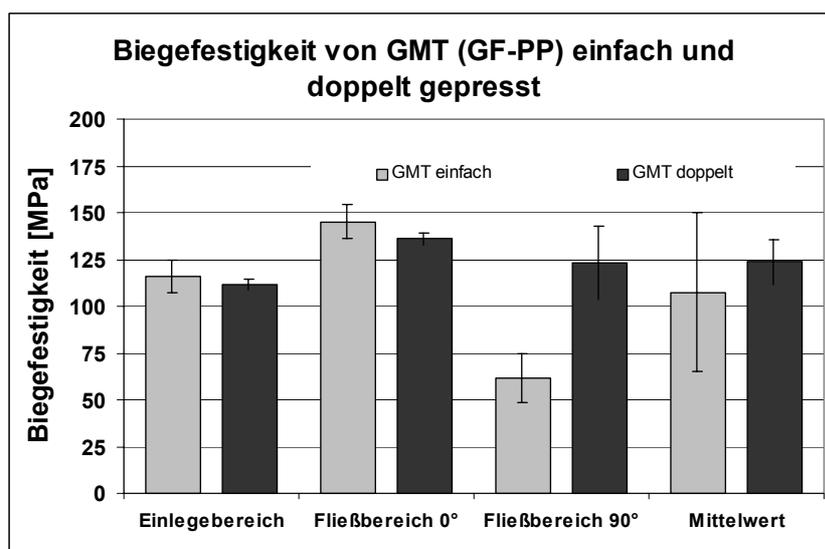


Bild 4.7: Biegefestigkeit von GMT einfach und doppelt gepresst

Wie Bild 4.7 und Bild 4.8 zeigen, erreicht auch dieser Werkstoff doppelt gepresst ein gleichförmiges Festigkeitsniveau über alle Orientierungen hinweg und ist im Vergleich der einfachen Pressung in der 90°-Orientierung deutlich überlegen.

Der Mittelwert in Verbindung mit den geringen Standardabweichungen stellt das gleichförmigere Werkstoffverhalten heraus, das mit dem „Doppelt Pressen“ erzielt werden kann.

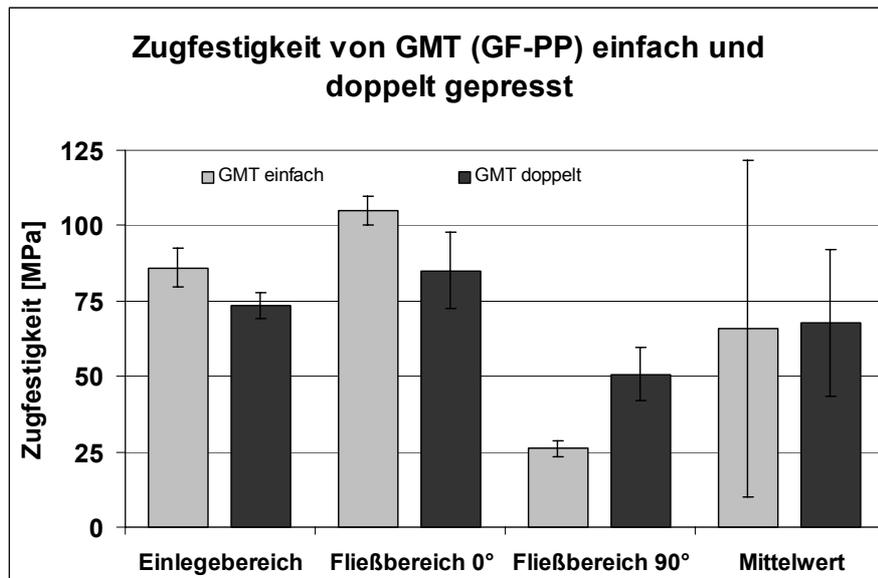


Bild 4.8: Zugfestigkeit von GMT einfach und doppelt gepresst

Besonders hervorzuheben ist, dass mittels „Doppelt Pressen“ das Schlagzähigkeitsvermögen von GMT (Charpy, Bild 4.9) gegenüber den Minimalwerten um 100 % gesteigert werden kann. Die Faserorientierung längs und quer zur Schlagrichtung ist dabei vermerkt. Die Ergebnisse von GMT liegen dabei deutlich unter denen von LFT-Stäbchengranulat und stimmen mit der Literatur überein [122].

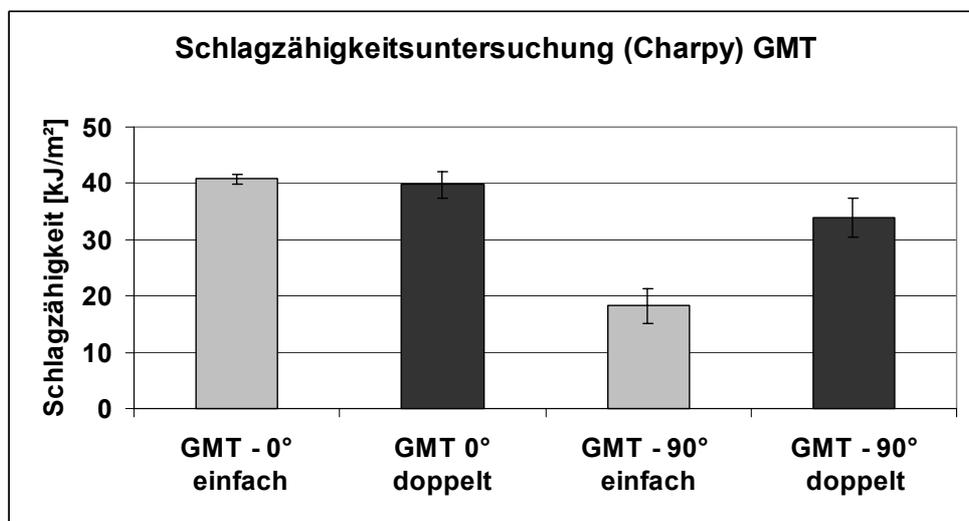


Bild 4.9: Schlagzähigkeitsvermögen von GMT einfach und doppelt gepresst

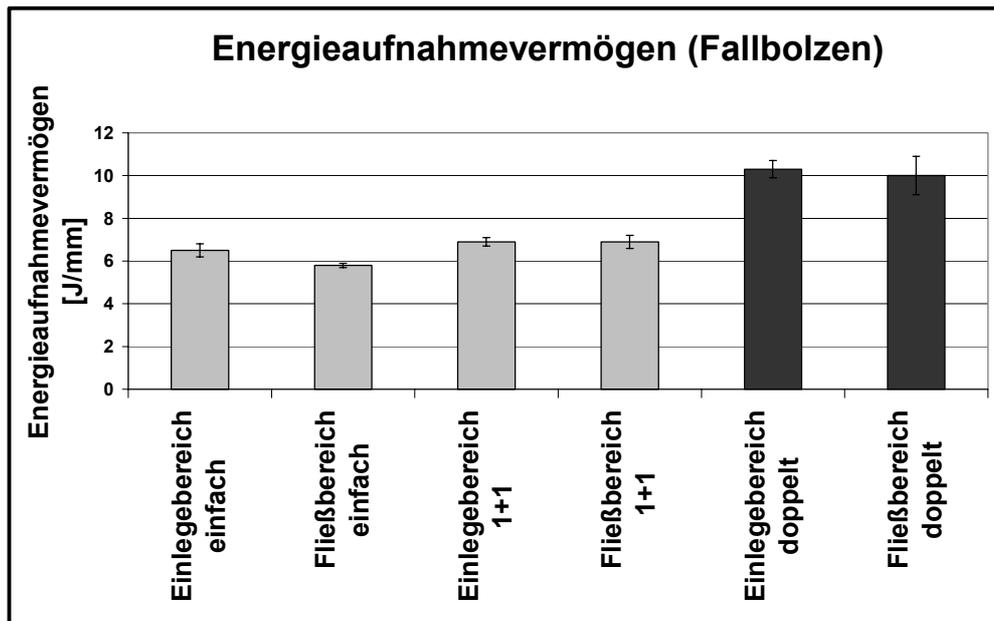


Bild 4.10: Energieaufnahmevermögen (Fallbolzentest) von GMT einfach und doppelt gepresst

Beim Fallbolzentest von GMT werden im Vergleich zu LFT-Stäbchengranulat beim „Doppelt Pressen“ die höchsten Werte erzielt.

Um den Einfluss der Grenzschicht zwischen erster und zweiter Lage darzustellen, wurden zwei einzelne (einfach gepresst) Lagen für den Versuch übereinander eingespannt geprüft. Dabei waren die Probekörperdicken nahezu gleich groß. Die Probekörper der Art „1+1“ liegen beim Energieaufnahmevermögen im Festigkeitsbereich der einfach gepressten Probekörper. Hieraus kann ein Einfluss von adhäsiven Kräften in der Fügezone angenommen werden, weshalb in der Folge nur einfach und doppelt gepresste Bauteile miteinander verglichen werden. Die Untersuchungsergebnisse zu den adhäsiven Kräften werden Kap. 4.3 vorgestellt.

4.2.3 „Doppelt Pressen“ von glasfaserverstärktem LFT

Im Rahmen dieser Untersuchung wurden Stäbchengranulate zweier verschiedener Hersteller und mit unterschiedlicher Fließfähigkeit herangezogen (Tab. 4.1).

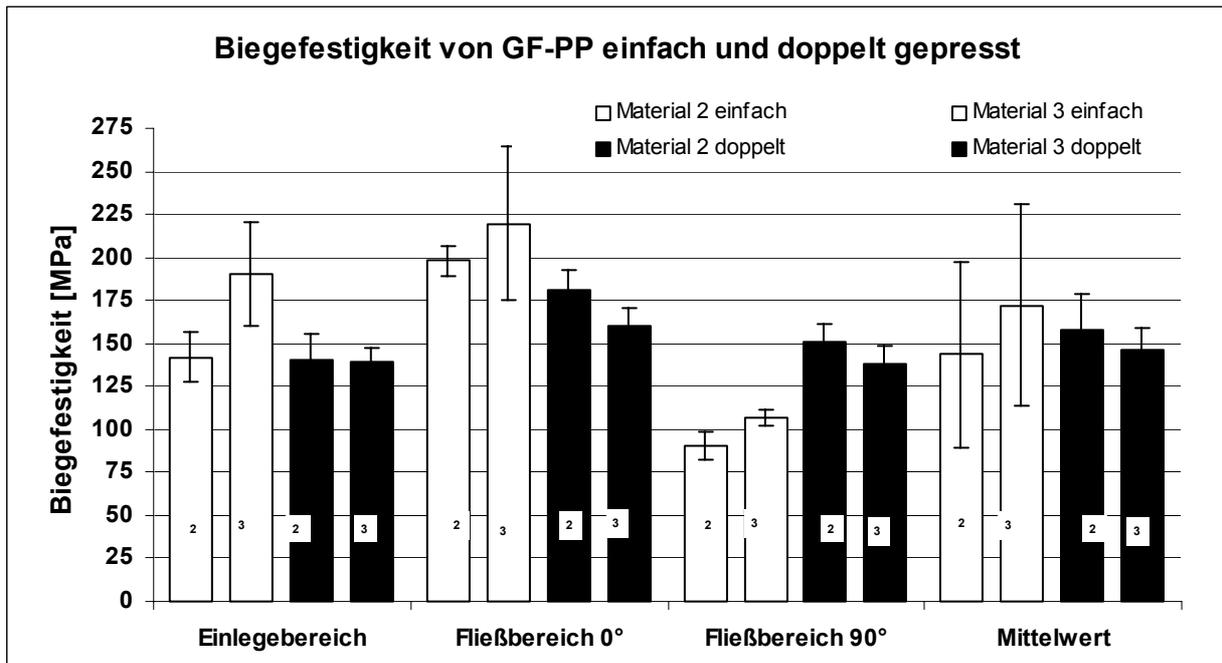


Bild 4.11: Biegefestigkeit von einfach und doppelt gepresstem GF-PP

Ein deutlicher Vorteil durch das „Doppelt Pressen“ im Vergleich zum einfachen Pressen ist hinsichtlich der Biegefestigkeit insgesamt nicht gegeben (Bild 4.11). Nur das Material 2 zeigt beim „Doppelt Pressen“ im Mittel eine Festigkeitssteigerung von 10 % gegenüber dem einfachen Pressen. Diese Steigerung wird im Mittelwert relativiert und liegt nur noch im Streubereich, doch ist die Steigerung im Fließbereich mit 90°-Orientierung um 50% größer. Eine Verringerung der Standardabweichung wird auch mit dieser Werkstoffgruppe beim „Doppelt Pressen“ grundsätzlich erreicht.

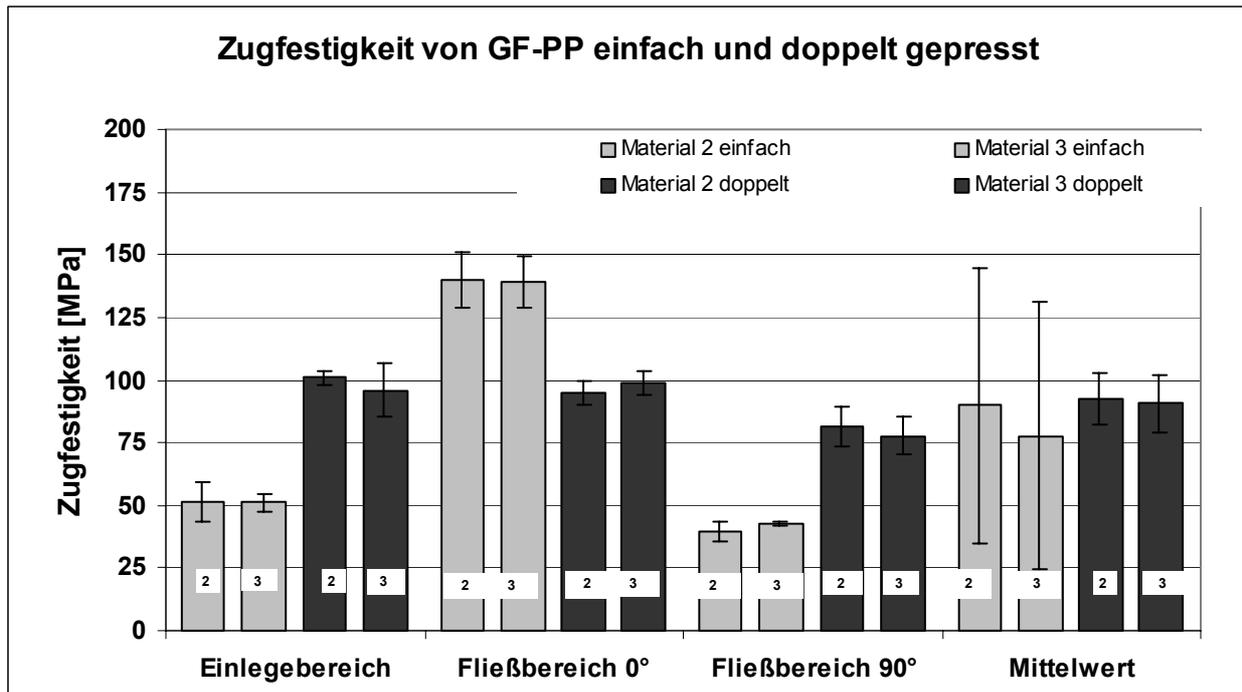


Bild 4.12: Zugfestigkeit von glasfaserverstärktem PP (Halbzeugform: Stäbchengranulat) im einfachen und beim "Doppelt Pressen"

Bild 4.12 zeigt die ermittelten Zugfestigkeitswerte. Auch hier zeigt sich durch die 0°/90°-Orientierung, dass die Maximalwerte der 0°-Orientierung beim einfachen Pressen nicht erreicht werden.

Dagegen wurden die Minimalwerte mit 90°-Orientierung um 50 % gesteigert. Diese Steigerung ist mit dem gleichen Anteil an 0°-Orientierung der Proben „Doppelt Pressen“ zu erklären. Diese Proben „Doppelt Pressen“ haben in der Querschnittsfläche zu jeweils 50% einen Anteil an 0°- und 90°-Orientierung. Gleichzeitig sinkt der Wert der Standardabweichung stark. Für Material 2 wird nur der Mittelwert von 0°- und 90°-Orientierung angegeben. Er erreicht dabei nur knapp den Wert des einfachen Pressens. Für alle Materialien gilt, dass beim einfachen Pressen im Zugversuch mit einer Faserverstärkung senkrecht zur Belastungsrichtung die schlechtesten Eigenschaften gemessen werden, die mit ca. 40 MPa geringfügig über dem Wert der reinen Matrix liegen.

Material 3 zeigt Vorteile im „Doppelt Pressen“. Die Festigkeitswerte können bei Betrachtung der Mittelwerte mit diesem speziellen Werkstoff durch das „Doppelt Pressen“ um ca. 16 % gesteigert werden. Vergleicht man jeweils die verfügbaren Werte der Materialien 2 und 3, so ist Material 3 dem höher viskosen Material 2 leicht überlegen.

Hinsichtlich des Energieaufnahmevermögens zeigen einfach und doppelt gepresste Proben im Einlegebereich keine Veränderungen, die über den Streubereich hinausgehen. Bild 4.13 zeigt das Energieaufnahmevermögen im Fließbereich der LFT-Typen Material 2 und 3, einfach bzw. doppelt gepresst. Dabei zeigen die doppelt gepressten Probekörper ein verbessertes Energieaufnahmevermögen, dies ist auf die $0^\circ/90^\circ$ -Faserorientierung zurückzuführen.

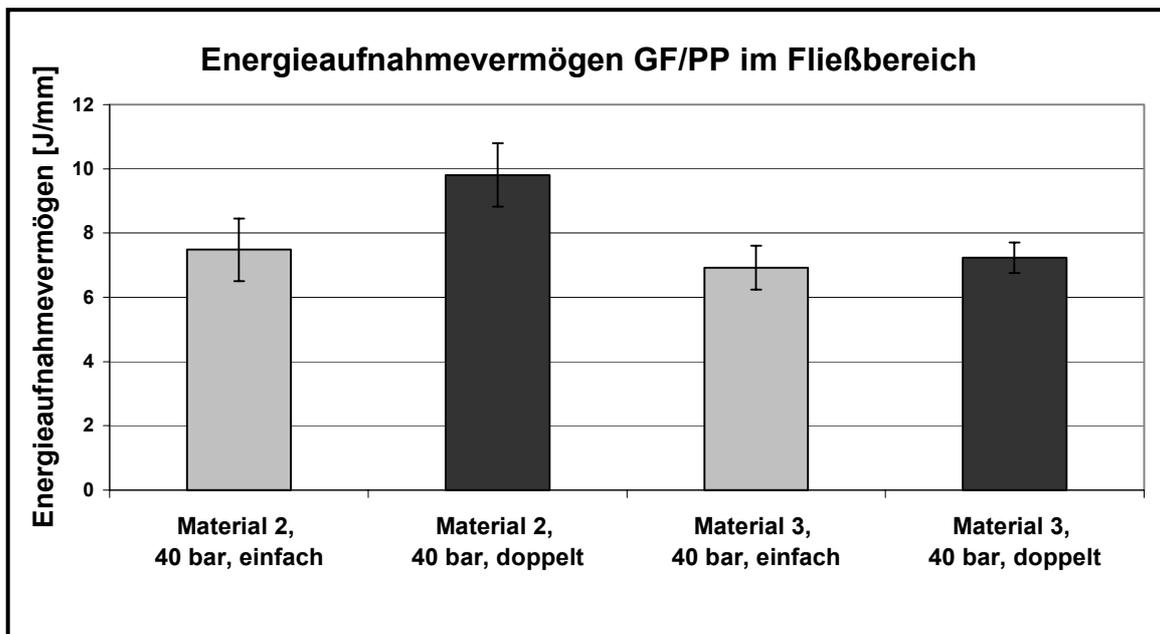


Bild 4.13: Energieaufnahmevermögen von GF-PP einfach und doppelt gepresst im Fließbereich

Bild 4.16 zeigt die mit dem „Doppelt Pressen“ erreichbaren Schlagzähigkeits-ergebnisse. Die Charpy-Probekörper wurden gemäß dem in Bild 4.14 dargestelltem Schema der Prüfplatte entnommen.

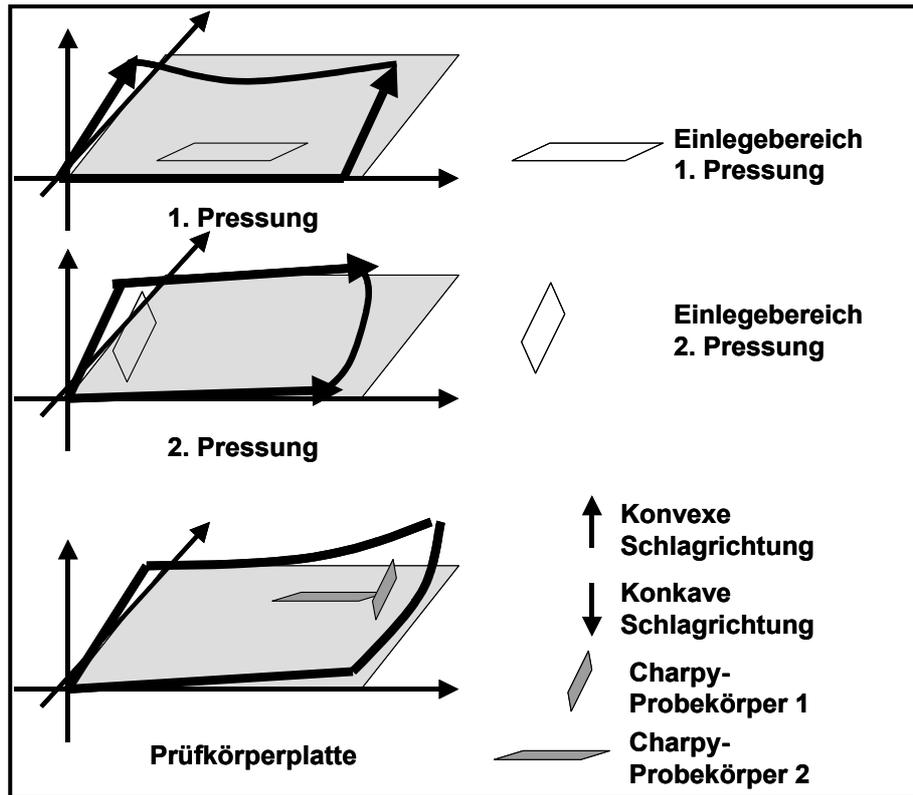


Bild 4.14: Schema der Charpy-Probekörperentnahme

Das Schema bedingt die entsprechende Orientierung bzw. den Verzug der Probekörper. Diese sind detailliert mit Bild 4.15 dargestellt.

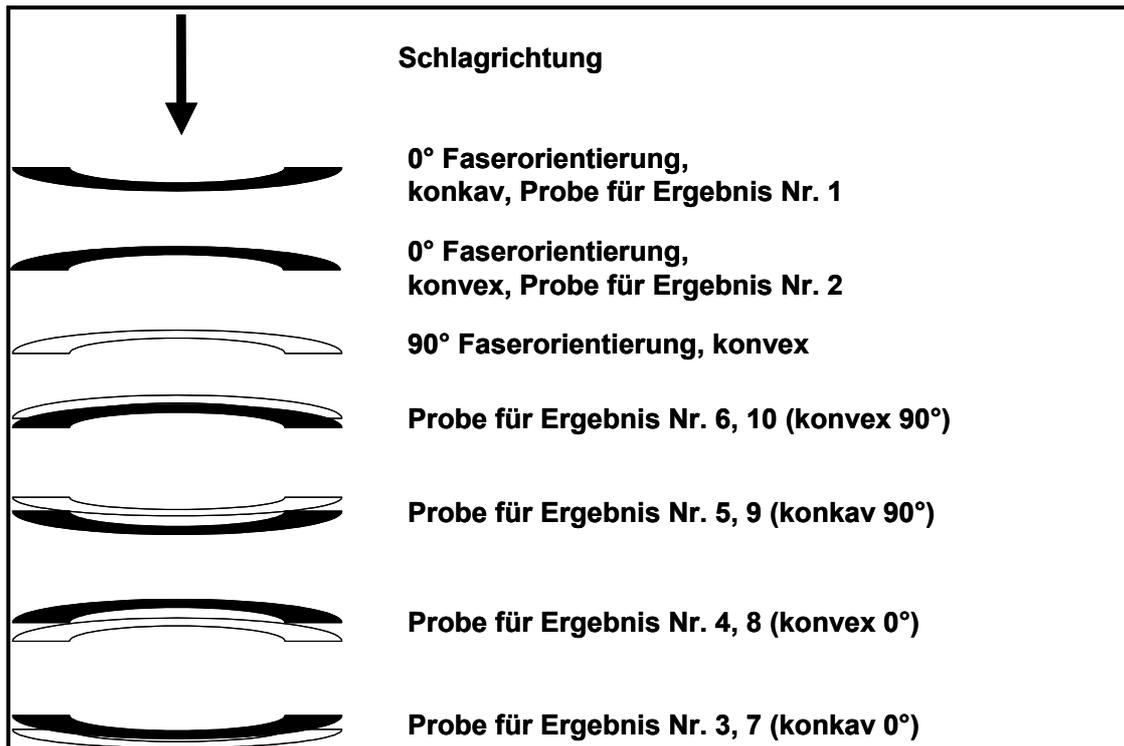


Bild 4.15: Orientierung und Verzug der Charpy-Probekörper gemäß Pressschema (Bild 4.4 und Bild 4.14)

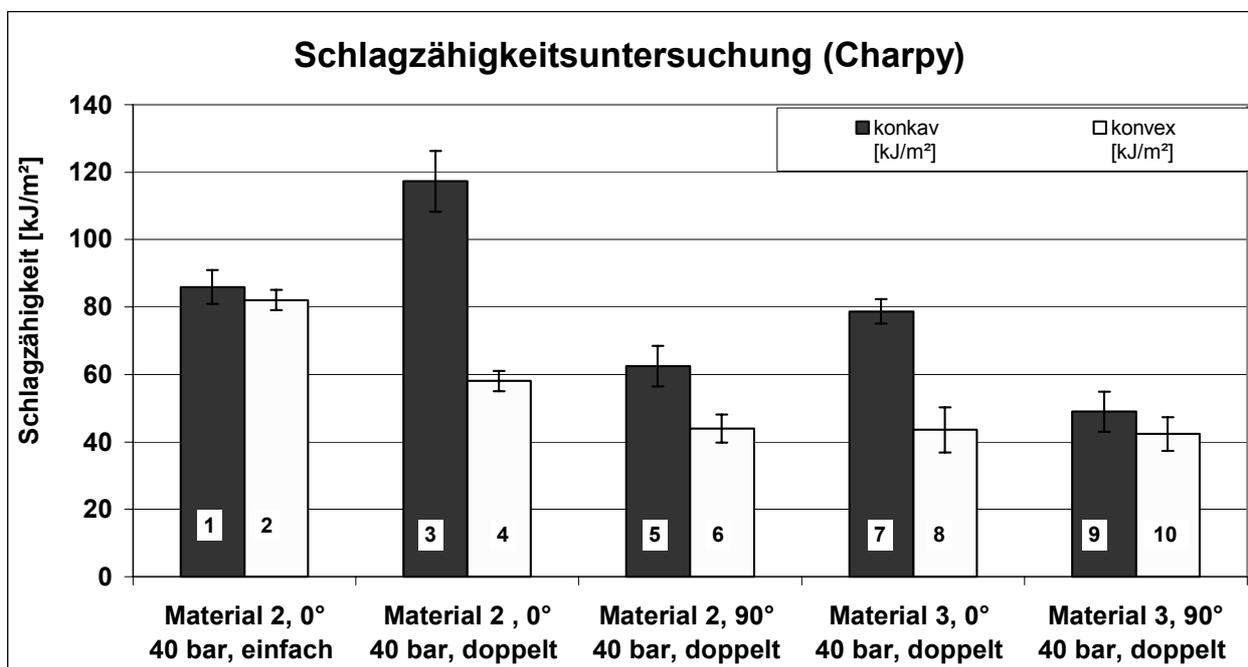


Bild 4.16: Schlagzähigkeitsuntersuchung von einfach und doppelt gepressten GF-PP-Probekörpern der Orientierung 0°/90°

Bei einer 0°/90°-Faserorientierung („Doppelt Pressen“) wird das höchste Niveau mit in 0°-Faserorientierung (konkav) erreicht. Aufgrund der Faserorientierung senkrecht zur

schlagrichtungsinduzierten Krafftflussrichtung auf der schlagabgewandten Seite nimmt die Zähigkeit der Matrix den stärksten Einfluss auf das Ergebnis.

Die größte Steigerung kann mit dem „Doppelt Pressen“ hinsichtlich der Schlagzähigkeit (Bild 4.17) erzielt werden, indem die beiden Pressvorgänge identisch, d.h. in der Ausrichtung $0^\circ/0^\circ$ und Einlegebereich auf Einlegebereich ausgeführt werden. Die Bezeichnung aus „Gradzahl/ Bombierung“ beschreibt die vorliegende Faserorientierung, z. B. „ 0° “ senkrecht zur Schlagrichtung und parallel zur schlagrichtungsinduzierten Krafftflussrichtung.

Eine Bombierung der Probekörper entsteht, wie eingangs dargestellt, beim "Doppelt Pressen". Sie wird durch ein unidirektionales $0^\circ/0^\circ$ -„Doppelt Pressen“ verstärkt. Bei konkaven Proben wurde trotz des weiteren Wegs und Durchschreiten des Energiepotenzialmaximums im Versuch eine Steigerung um mehr als 25 % gegenüber den 0° einfach gepressten Proben gemessen. Im Vergleich mit einer $0^\circ/90^\circ$ -Orientierung ist kein deutlicher Unterschied festzustellen, ebenso zur einfachen Pressung.

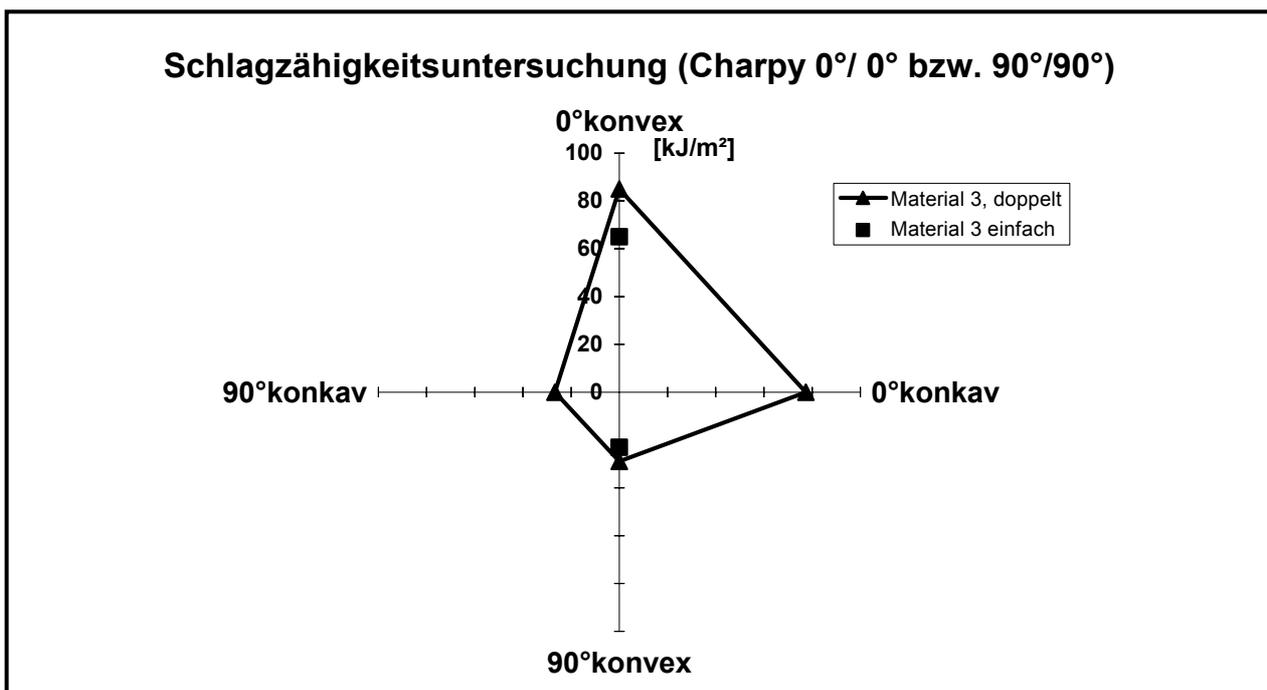
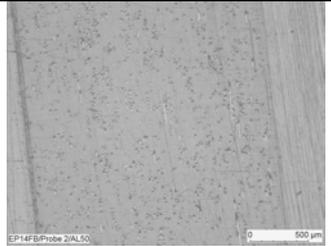
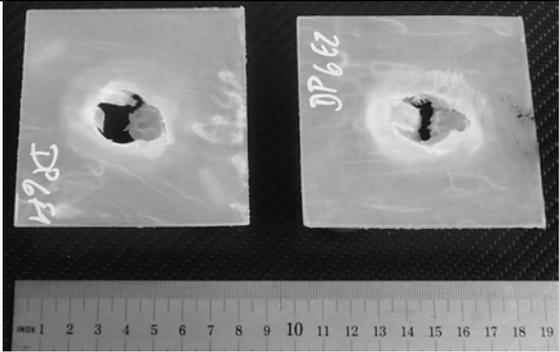
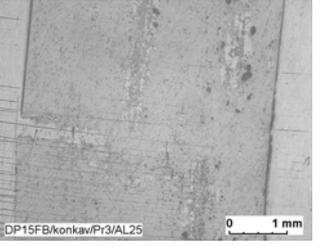
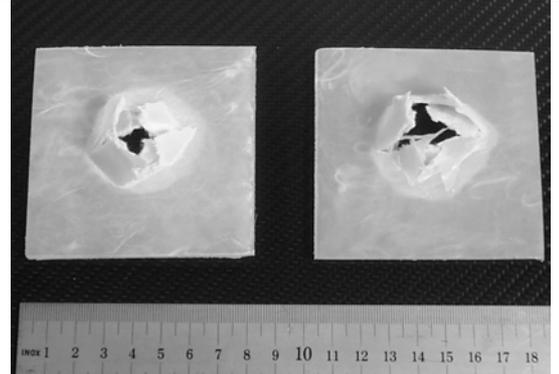


Bild 4.17: Schlagzähigkeitsuntersuchung von Probekörpern des „Doppelt Pressen“ mit gleicher Faserorientierung im Laminataufbau

Zusammenfassend zu den voran vorgestellten Prüfergebnissen Materialien 2 und 3 aus glasfaserverstärktem LFT zeigen die mikroskopischen Schliffbildaufnahmen, keine Trennlinie zwischen erster und zweiter Pressung. Lediglich eine matrixreiche Schicht ist erkennbar (s. Schliffbild einer Biegeprobe doppelt gepresst in Tab. 4.7). Diese harzreiche Schicht bildet den Trennbereich im Durchstoßversuch. Dabei können anhand der Bruchbilder Einlege- und Fließbereiche deutlich unterschieden wer-

den. Während der Fließbereich beim einfachen Pressen grob aufklafft (Riss parallel zur Fließrichtung), zeigt das Rissbild beim „Doppelt Pressen“ eine annähernd sternförmige Ausbildung. Die starken Unterschiede in der Schichtstärke waren zur Kavitätsfüllung erforderlich.

Tab. 4.7: Ergebnisübersicht „Doppelt Pressen von glasfaserverstärktem LFT

Material (Probendicke)	Schliffbild Fügezone (Probendicke)	Bruchbild Durchstoßversuch (links: Fließbereich, rechts Einlegebereich)
	Einfaches Pressen	
Reines PP-GF 30 einfaches Pressen (2,5 - 2,7 mm)		
Reines PP-GF 30 doppeltes Pressen (3,0-4,1 mm)		

4.3 Kombination unterschiedlicher Materialien im „Doppelt Pressen“

Bisher wurde mit den Versuchen zum „Doppelt Pressen“ eine Verbesserung der Ergebnisse mechanischer Eigenschaften angestrebt (Kapitel 4.1.2 bis 4.2.3). Diese Ergebnisse werden zum einen in eine Optimierungsschleife eingebunden, die durch die Verwendung von unverstärktem Polypropylen als eine Laminatschicht auf eine Verbesserung des Leichtbaus abzielt. Zum anderen werden Untersuchungsergebnisse vorgestellt, die eine Funktionserweiterung durch eine flammhemmende Schicht aufzeigen. Die Verarbeitung erfolgte gemäß der in Tab. 3.3 vorgestellten Parameter.

4.3.1 Mechanische Charakteristik

Ausgangspunkt für diese Untersuchungen bilden die Erkenntnisse des Kapitels 4.2 und der Schlussfolgerung, dass mit dem „Doppelt Pressen“ das mechanische Eigenschaftsprofil günstig beeinflusst werden kann. Insbesondere das Energieaufnahmevermögen kann mit dieser Verfahrensänderung verbessert werden. Während bisher die Untersuchungen auf den gleichen Laminatwerkstoffen mit unterschiedlicher Fließ- und Faserorientierung basieren, stellen die nachfolgenden Ergebnisse Untersuchungen an heterogenen Laminatmaterialien vor. Diese werden dabei nicht zu einem neuen Gemisch im Plastifizierer vermischt, sondern gemäß Bild 4.1 doppelt gepresst. Als Werkstoffe wurden die in dieser Arbeit mit Kapitel 3 und der Tab. 3.2 vorgestellten Materialien A, C und G (allesamt auf Polypropylenbasis unverstärkt, glasfaserverstärkt und flammhemmend ausgerüstet) eingesetzt. Zu diesen Materialien wird die Kombination GF-PP mit flammhemmendem PP (FSM-PP) Vergleich gesetzt (Bild 4.18).

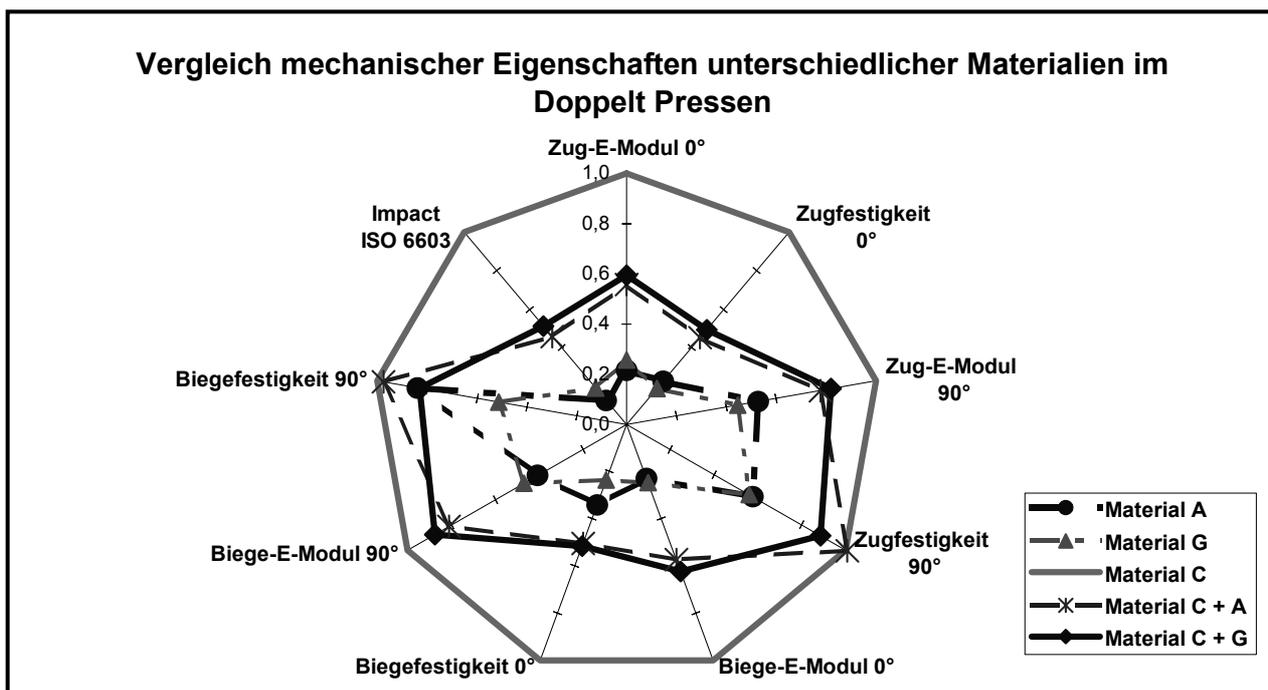


Bild 4.18: Vergleich der mechanischen Eigenschaften unterschiedlicher Materialien im Doppelt Pressen normiert auf GF-PP

Die Darstellung zeigt, dass aus der Kombination von faserverstärkten mit unverstärkten Thermoplasten im „Doppelt Pressen“ bezogen auf den Wert von einschichtigen GF-PP-FKV, keine verbesserte mechanische Eigenschaft erzielt werden kann.

Nur die Kombination aus einer flammhemmenden ausgerüsteten Schicht (Material G) in Verbindung mit einer faserverstärkten Schicht (Material C) reicht bei Biege- und

Zugprüfung der Orientierung 90° mit ihren mechanischen Eigenschaften an die Werte des faserverstärkten Materials (Material C) heran.

4.3.2 Brennbarkeit

Aus der Untersuchungsreihe der flammhemmenden Ausrüstung von Langglasfaser-verstärkten Thermoplasten wurden für das Verfahren des „Doppelt Pressen“ die zugekauften Masterbatches aus Kapitel 3.2 eingesetzt. Sie wurden als unverstärkte Compounds (Material G, Masterbatch Material H gemäß der Tab. 3.2) mit einer in dieser Form guten Flammwidrigkeit eingesetzt. Der ursprünglich vorgestellte Prozess wurde mit der neuen Materialkombination derart verändert, dass zunächst die flammhemmend ausgerüsteten Schichten gepresst und entformt wurden. Nach dem Materialwechsel auf glasfaserverstärktes PP in der Plastifiziereinheit wurde die flammhemmende Schicht, inzwischen auf RT abgekühlt, in die Kavität eingelegt und mit der faserverstärkten PP-Pressmasse überpresst. Dieses kalte Einlegen wirkt sich negativ auf die scheinbare Scherfestigkeit aus (Kapitel 4.4).

Das Bild 4.19 zeigt exemplarisch die Prüfungen einer Kantenbeflammung DIN 53438 (links), UL 94 vertical burn (Mitte) und Flächenbeflammung DIN 53438 (rechts). Sowohl die Kombination GF-PP mit Material G auf Melaminbasis als auch das Masterbatch des Materials H auf Hydroxidbasis zeigen das gleich gute Verhalten im Brandtest.

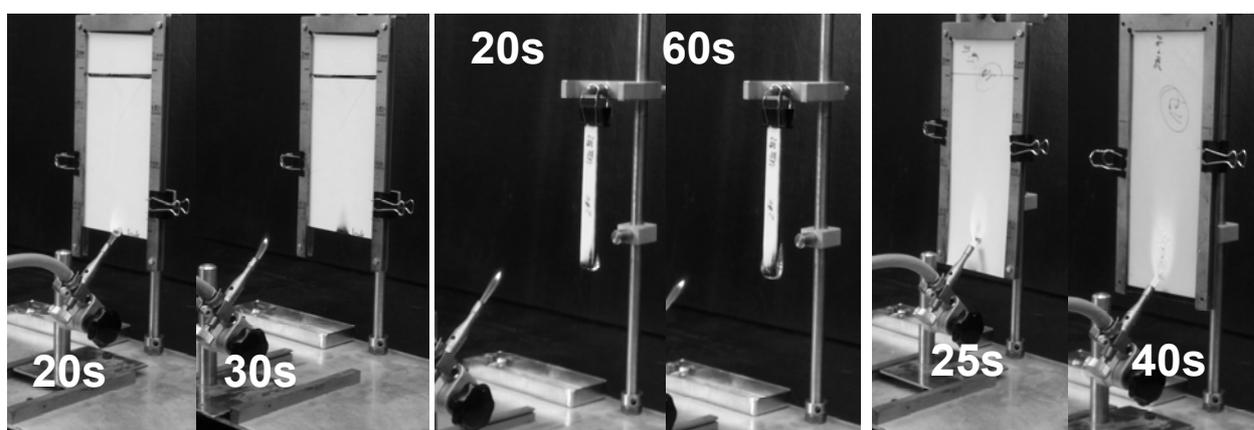


Bild 4.19: Beflammung von flammhemmend ausgerüsteter Laminatschicht mit GF-PP Substrat im Doppelt Pressen (Links: Kantenbeflammung DIN 53438, Mitte: UL 94 vertical burn, Rechts: Flächenbeflammung DIN 53438)

Bei der Kantenbeflammung wurde sowohl die flammhemmend ausgerüstete Schicht der Flamme zu- als auch abgewandt. Ist die Schicht abgewandt und die faserverstärkte Schicht direkt der Flamme ausgesetzt, erfolgt die Flammenausbreitung wesentlich schneller als im anderen Fall. Dabei ist die Flammenausbreitung durch die

flammschützende Schicht auf der Vorderseite behindert, doch auf der Rückseite entwickelt sich, sobald die reine LFT-Schicht entzündet ist, die Flamme kontinuierlich weiter und erlischt nicht mehr von selbst. Im Test des UL 94 vertical burn, entwickelt sich die Flamme noch rasanter, da die „freie“ Oberfläche im Verhältnis zur Flammengröße größer ist als bei der reinen Kantenbeflammung. Eine Flammschutz-Kategorie kann in beiden Fällen nicht erreicht werden.

Als dritte Prüfung wurden die einseitig flammhemmend ausgerüsteten, doppelt gepressten Prüfplatten nach DIN 53438 Teil 3 „Flächenbeflammung“ untersucht. Beim Beflammen der LFT-Schicht wird keine Flammschutzkategorie erreicht. Anders bei der Flächenbeflammung der flammhemmend ausgerüsteten Schicht, die, sobald die Flamme entfernt wird, sofort erlischt und somit die höchste Kategorie der Flammhemmung „F 1“ erreicht. Auf der Rückseite der beflamten Stelle bauscht die LFT-Schicht auf, in der Art wie aus der GMT-Aufbereitung bekannt, ohne zu brennen (Bild 4.20).

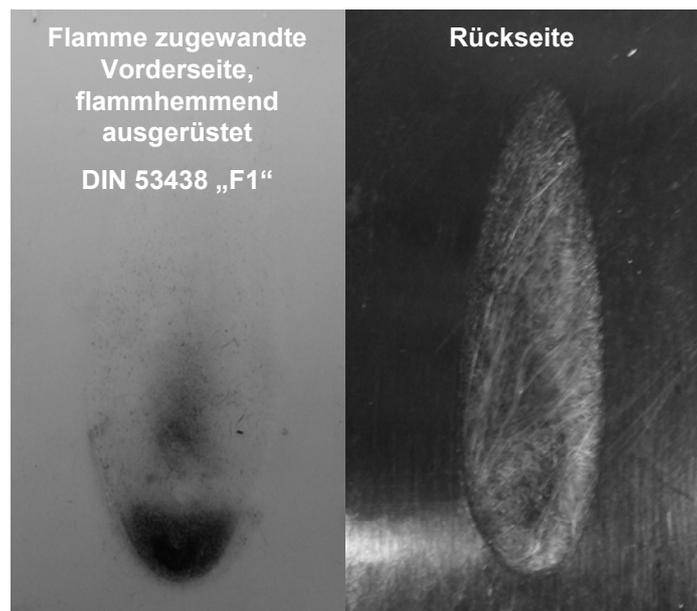


Bild 4.20: Probekörper der höchsten Kategorie der Flammhemmung „F 1“ nach DIN 53438 Teil 3, Material G

Mit diesem Ergebnis konnte das Ziel der Kombination aus „Doppelt Pressen“ teils faserverstärkter LFT und flammhemmend ausgerüstetem PP erreicht werden.

Hinsichtlich der Flammhemmung ist nun im Ergebnis ein Gradientenwerkstoff verfügbar. Trotz der nicht ausreichenden Flammhemmung bei Kantenbeflammung ist eine flammhemmende Beschichtung einer kompletten Seite, die als Fläche einer möglichen Flamme zugewandt ist, im Pressverfahren möglich und erreicht dabei die höchste Prüfkategorie. Gleichzeitig kann die andere Schicht die entsprechenden Las-

ten aufnehmen, wie sie z. B. bei Unterbodenverkleidungen erforderlich sind: Fahrbahnseite mit LFT-Schicht mit guten mechanischen Eigenschaften, Motorraumseite mit flammhemmender Ausrüstung.

4.4 Untersuchungen zu adhäsiven Einflüssen an der Laminatgrenze

Im Rahmen der Versuche zum Doppelt Pressen wurden Untersuchungen zu interlaminaarer Verbundfestigkeit durchgeführt, mit dem Ziel, eine scheinbare Zugscherfestigkeit in Anlehnung an DIN EN 1465 zu ermitteln. Die Versuche wurden gemäß der in Tab. 3.3 vorgestellten Prozessparameter durchgeführt.

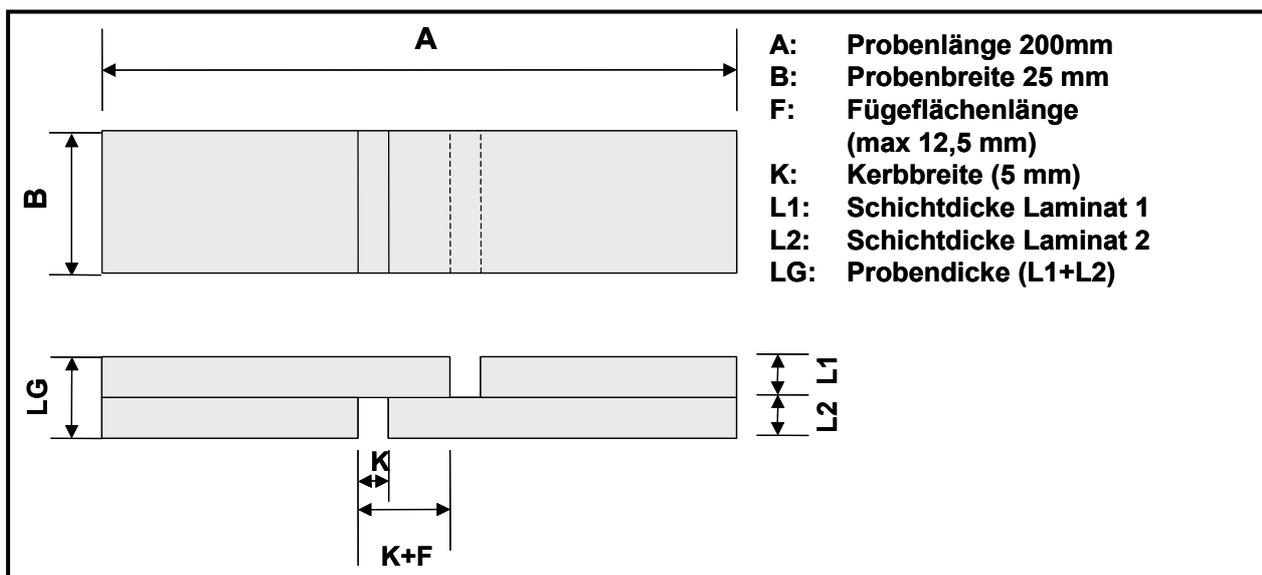


Bild 4.21: Probekörpergeometrie zur Bestimmung der scheinbaren Zugscherfestigkeit

Es wurden sowohl Lamine gleichen Werkstoffaufbaus aus glasfaserverstärktem Polypropylen und Kombinationen mit beispielsweise reinem PP oder auch flammhemmend ausgerüstetem PP (Kapitel 4.3) als eine der beiden Laminatschichten untersucht.

Die Fügezone ($F \cdot B$) weist gemäß Bild 4.21 eine geringere Fläche auf als der Laminatquerschnitt ($L_i \cdot B$). Findet das Versagen in der Fügefläche statt, so sind, wie in diesen Untersuchungen mit GF-PP, die Festigkeitswerte von Füge- und Bruchfläche identisch.

Der Energieeintrag zum Fügen der Laminatschichten erfolgt aus der Schmelze der überpressenden Masse. Die Gefahr von Luftpneinschlüssen ist beim „Doppelt Pressen“ nicht gegeben, da die Fließfront die Luft vor sich herschiebt. Bild 4.22 zeigt die Zugscherfestigkeiten für glasfaserverstärktes Polypropylen auf Basis des Werkstoff Nr. 2

(Tab. 4.1). Dabei werden die untersuchten Fügebereiche Einlegebereich mit „EB“ und Fließbereich mit „FB“ beschrieben.

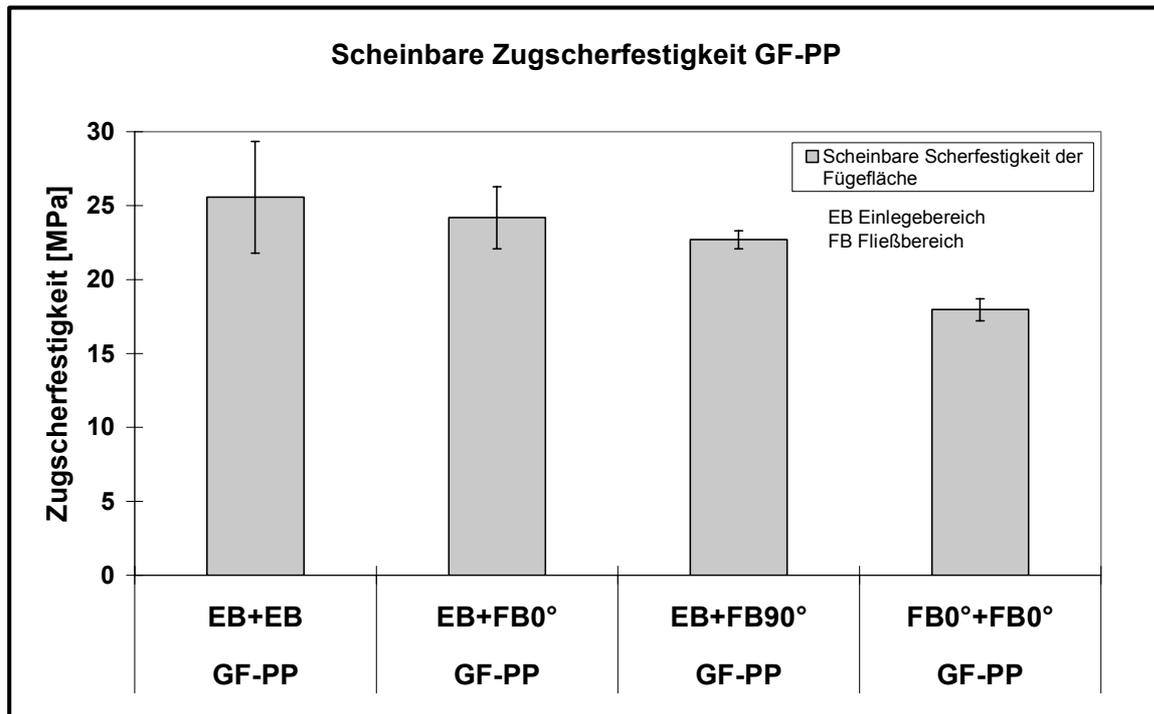


Bild 4.22: Scheinbare (Mindest-) Zugscherfestigkeit für GF-PP doppelt gepresst. Das Versagen der übereinander gepressten Fließbereiche zeigt einen reinen Matrixbruch, da über die Grenzschicht der Fügefläche keine Fasern penetriert sind. Dieser Polymerbruch wird durch das auftretende Moment unterstützt, das zum Schälen führt (Bild 4.23). Die hohe Prüfgeschwindigkeit von 25 mm/min vermeidet viskoelastische Dehnanteile der Matrix. Der doppelt gepresste Einlegebereich weist sehr hohe Festigkeitswerte auf, die aus dem hohen Energieeintrag aus der Positionierung des Plastifikats herrühren (Bild 4.4).

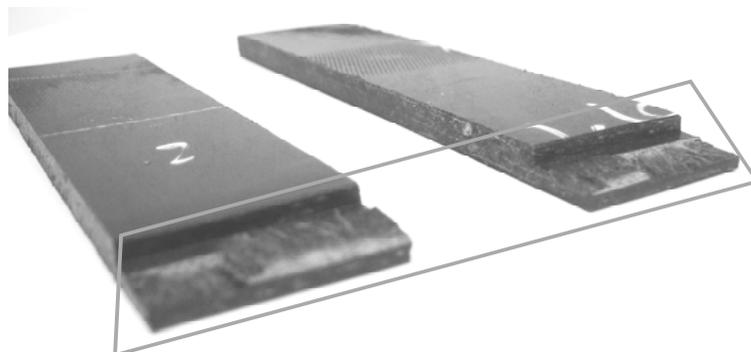


Bild 4.23: Zugscherversuchssprobe mit Matrixbruch quer über Fügefläche (FB 0°/FB 0°)

Diese Werte übersteigen zu einem großen Teil die Untersuchungsergebnisse aus dem Verpressen von LFT-Profilen mit LFT-Pressmassen [110]. Begünstigt wurden

diese Ergebnisse durch das direkte Überpressen nach dem vorangegangenen ersten Presszyklus und einer Bauteiltemperatur \geq Werkzeugtemperatur ($\sim 60^\circ\text{C}$), da keine Entformung und späteres Überpressen nach dem Materialwechsel im Plastifizierer erforderlich wurde. Diese höhere Temperatur der Substratplatte beim unverzüglichen Überpressen begünstigt die Festigkeit der Fügezone ebenso wie eine längere Fügezeit [123].

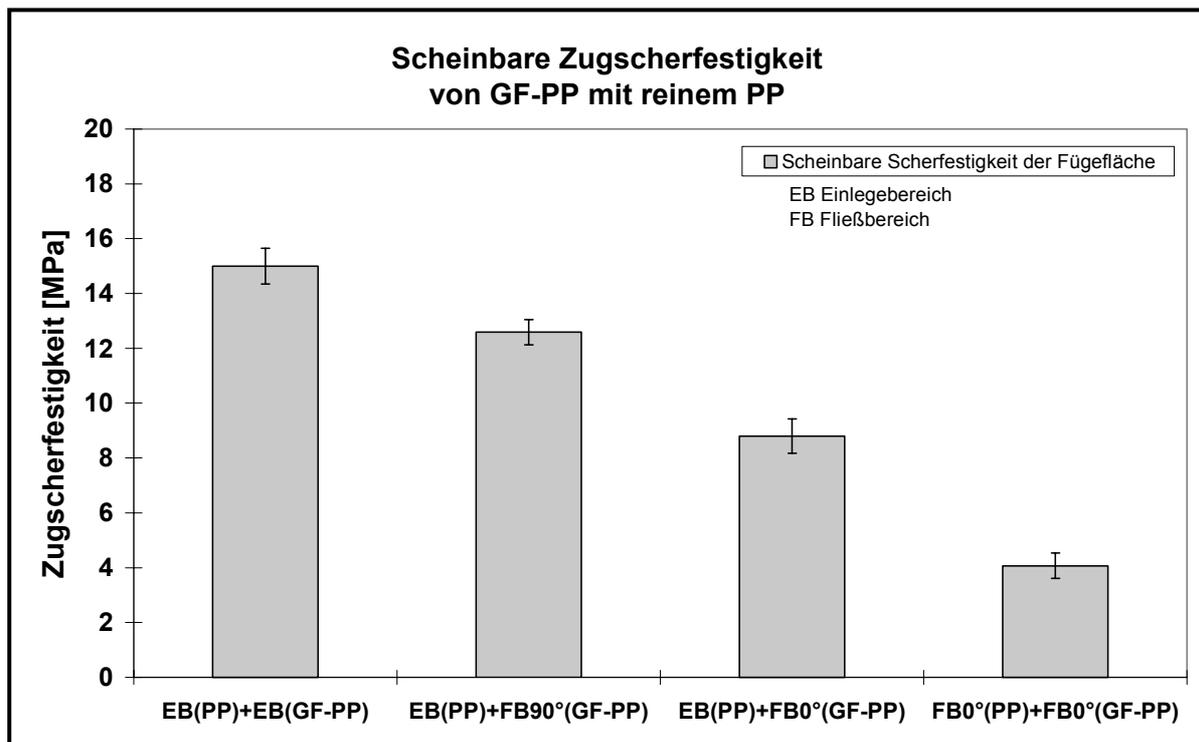


Bild 4.24: Scheinbare Zugscherfestigkeit für GF-PP mit PP doppelt gepresst

Auch die Kombination von reinem PP und glasfaserverstärktem PP zeigt im Einlegebereich mit im Maximum 15 MPa scheinbarer Zugfestigkeit einen mit dem Überpressen von LFT-Profilen vergleichbaren Wert [110].

Der Unterschied in den Ergebnissen (Bild 4.24) und denen aus Kapitel 4.3.1 kann mit dem Unterschied der Matrixtypen erklärt werden. Doch konnte in keinem Versuch eine über die bei 90° -Faserorientierung ermittelte Zugfestigkeit bzw. die Matrixfestigkeit übertroffen werden. Die mikroskopischen Untersuchungen der Schlifffbilder zeigen keinen ineinander verschwimmenden Fügebereich (Tab. 4.6, Tab. 4.7). Gleichzeitig zeigt die rasterelektronenmikroskopische Aufnahme keine Delaminierung oder Linie als Fügezone (Bild 4.25), sondern eine matrixreiche Schicht.

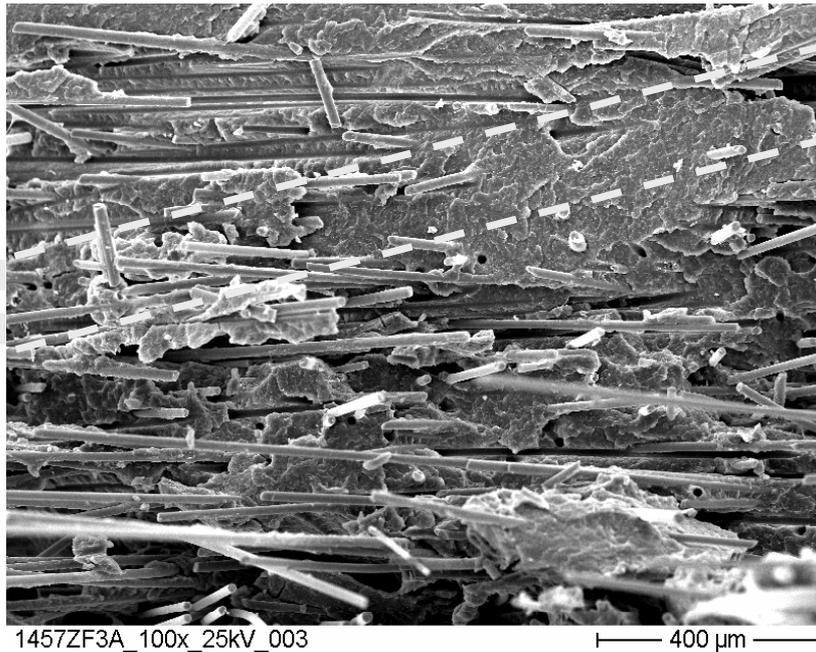


Bild 4.25: Rasterelektronische Aufnahme einer Bruchzone des Fügebereiches aus dem Zugversuch mit matrixreicher Fügezone (---)

Hinsichtlich der Zugscherfestigkeit werden bei der Kombination GF-PP mit flammhemmend ausgerüstetem PP gem. Tab. 3.2 mit Masterbatch für Material G 12,5 bis 15,1 MPa (90° bzw. 0°-Orientierung) erreicht. Hingegen kommt das Masterbatch für Material H nur auf 4 bzw. 8,8 MPa. Diese wesentlich niedrigeren Werte sind auf die nicht aufeinander abgestimmten Matrixtypen der faserverstärkten und flammhemmend ausgerüsteten Schichten zurückzuführen.

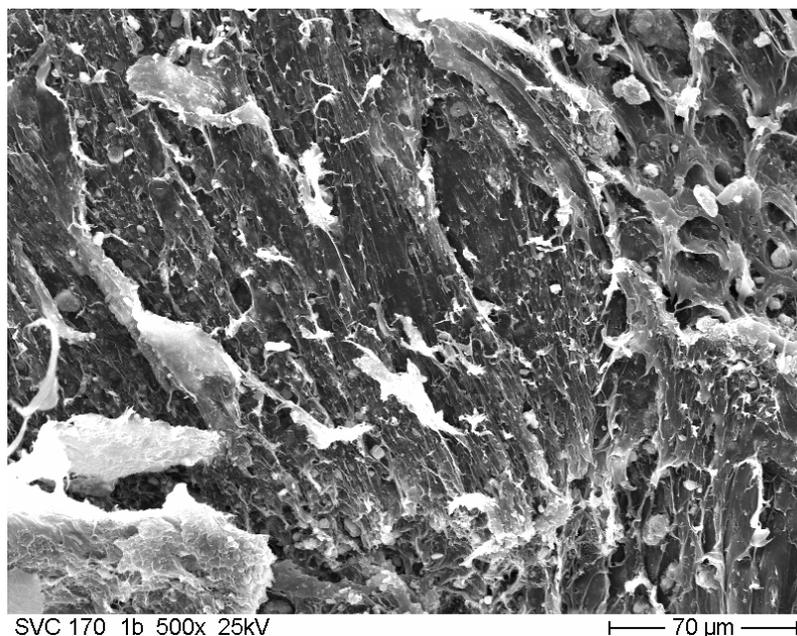


Bild 4.26: REM-Aufnahme einer Zugscher-Bruchfläche im Einlegebereich

Bild 4.26 zeigt repräsentativ eine Zug-Scher-Bruchfläche der Kombination GF-PP mit Material H. Trotz der noch günstigen Orientierung (0°) sind zwar Stellen mit Poly-

merbruchflächen zu erkennen, doch auch im besonderen Maße dunkle Flächen ohne Polymerbruch, dort wo keine Anhaftung an der faserverstärkten Schicht besteht.

Für das „Doppelt Pressen“ ist charakteristisch, dass die überpresste Schicht bereits weit unter Schmelztemperatur abgekühlt ist. Bei amorphen Polymeren, die bei Werkzeugtemperaturen unterhalb der Glasübergangstemperatur verarbeitet werden, besteht erst gar nicht die Chance, dass es zu einer Polymerdiffusion kommt.

Faserverstärktes Polypropylen zeigt eine matrixreiche Schicht im Randbereich, wie sie auch bei Bindenähten ausgeprägt ist, so dass wiederum maximal Matrixfestigkeit in der Bindenaht erreicht wird [124, 125]. Eine gesteigerte Matrixfestigkeit kann mit gesteigerten Verarbeitungstemperaturen (Werkzeug und Pressmasse) erzielt werden. Eine Bindenaht bleibt die Schwachstelle, da keine Faserbrücken über die Füllflächen hinaus gebildet werden .

4.5 Vergleich der Prüfergebnisse mit den Berechnungen der Laminattheorie

In Kapitel 3 wurde die flammhemmende Ausrüstung von LFT vorgestellt, die einen bestimmten technischen Aufwand erfordert. Zu Beginn dieses Kapitels wurde mit dem „Doppelt Pressen“ eine Verfahrensvariante vorgestellt, wie Lamine mit gleichen Materialien (Kap. 4.2) und gleicher Matrix jedoch unterschiedlichen Füll- bzw. Verstärkungsstoffen (Kap. 4.3) hergestellt werden können.

Im Folgenden werden aus den Kennwerten der Komponenten Faser und Matrix und dem Faservolumenanteil benötigte Steifigkeitskenngrößen eines unidirektional endlosfaserverstärkten Werkstoffverbunds mithilfe mikromechanischer Beziehungen ermittelt [126]. Bei isotropem Materialverhalten kann der Schubmodul G durch die Gleichung 4.1 aus Zugelastizitätsmodul E^M und Querkontraktion ν^M berechnet werden.

$$G = \frac{E^M}{2 \cdot (1 + \nu^M)} \quad \text{Gleichung 4.1}$$

Die unterschiedlichen Steifigkeitskennwerte parallel und senkrecht zur Faserrichtung müssen in diesem Fall bei einer Berechnung berücksichtigt werden.

Die einzelnen Kennwerte werden nach den Beziehungen der Gleichung 4.2 bis Gleichung 4.7 ermittelt:

- Elastizitätsmodul parallel zur Faserrichtung E_1 :

$$E_1 = E_1^F \cdot \varphi + E^M \cdot (1 - \varphi) \quad \text{Gleichung 4.2}$$

- Elastizitätsmodul senkrecht zur Faserrichtung E_2, E_3 (konservativ):

$$E_3 = E_2 = \frac{E^M}{1 - (v^M)^2} \cdot \frac{1 + 0,85 \cdot \varphi^2}{(1 - \varphi)^{1,25} + \frac{E^M}{(1 - (v^M)^2) E_2^F} \cdot \varphi} \quad \text{Gleichung 4.3}$$

- Schubmodul G_{13} :

$$G_{13} = G_{12} = G^M \cdot \frac{1}{(1 - \varphi) + \frac{G^M}{G_{13}^F} \cdot \varphi} \quad \text{Gleichung 4.4}$$

- Querkontraktionszahl v_{13} :

$$v_{13} = v_{12} = \varphi \cdot v_{13}^F + (1 - \varphi) \cdot v^M \quad \text{Gleichung 4.5}$$

- Querkontraktionszahl v_{23} :

$$v_{23} = \varphi \cdot v_{13}^F + (1 - \varphi) \cdot v^M \cdot \left[\frac{1 + v^M - v_{13}^F \cdot \frac{E^M}{E_1^F}}{1 - (v^M)^2 + v^M \cdot v_{13}^F \cdot \frac{E^M}{E_1^F}} \right] \quad \text{Gleichung 4.6}$$

- Schubmodul G_{23} (konservative Näherungsbeziehung):

$$G_{23} = \frac{E_2^F}{2 \cdot (1 + v_{23})} \quad \text{Gleichung 4.7}$$

• Transformation der Steifigkeitsmatrix

Die Steifigkeitskennwerte der von 0° abweichenden Lagen können aus Transformationsbeziehungen hergeleitet werden. Ausgehend von der Nachgiebigkeitsmatrix der 0° Lage kann mit Hilfe der Transformationsmatrix die transformierte Nachgiebigkeitsmatrix berechnet werden. Aus den Koeffizienten dieser Matrix können die Steifigkeiten aus dem lokalen faserorientierten Koordinatensystem in das globale Koordinatensystem überführt werden.

Die Berechnung der transformierten Steifigkeiten erfolgt gemäß der nachstehenden Schritte [127]:

- Aufbau der Steifigkeitsmatrix $[C]$:

$$[C'] = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & 0 \\ C_{21} & C_{22} & 0 \\ 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \quad \text{Gleichung 4.8}$$

Die Koeffizienten dieser Matrix sind:

$$C_{11} = \frac{E_1}{1 - \nu_{13} \cdot \nu_{31}} ; C_{12} = \frac{\nu_{13} \cdot E_3}{1 - \nu_{13} \cdot \nu_{31}} ; C_{22} = \frac{E_3}{1 - \nu_{13} \cdot \nu_{31}} ; C_{66} = G_{13} \quad \text{Gleichung 4.9}$$

- Berechnung der Nachgiebigkeitsmatrix [S']:

$$[S'] = [C']^{-1} \quad \text{Gleichung 4.10}$$

- Transformationsmatrix [T]:

$$[T] = \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & 2 \cdot m \cdot n \\ n^2 & m^2 & -2 \cdot m \cdot n \\ m \cdot n & -m \cdot n & m^2 - n^2 \end{bmatrix} \quad \text{Gleichung 4.11}$$

$$m = \cos(\theta) ; n = \sin(\theta)$$

- Transformierte Nachgiebigkeitsmatrix [S]:

$$[S] = [T]^T \cdot [S'] \cdot [T] \quad \text{Gleichung 4.12}$$

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{16} \\ S_{21} & S_{22} & S_{26} \\ S_{61} & S_{62} & S_{66} \end{bmatrix} \quad \text{Gleichung 4.13}$$

- Rückrechnung auf Ingenieurkonstanten im gedrehten Koordinatensystem:

$$E_x = \frac{1}{S_{11}} ; E_y = \frac{1}{S_{22}} ; G_{xy} = \frac{1}{S_{66}} ; \nu_{xy} = -\frac{S_{12}}{S_{22}} \quad \text{Gleichung 4.14}$$

Mit den vorgestellten Gleichungen und den ermittelten Kennwerten der Komponenten Faser und Matrix ergeben sich nach den in Gleichung 4.2 bis Gleichung 4.7 dargestellten Mischungsregeln die Steifigkeitskennwerte eines unidirektional endlosfaserverstärkten Verbunds. Mit Anwendung der Gleichung 4.8 bis Gleichung 4.14 wird die klassische Laminattheorie in Grundzügen beschrieben. Hierdurch kann die Abschätzung der Steifigkeitskennwerte eines Mehrschichtverbunds erfolgen, auch unter Berücksichtigung unterschiedlicher Werkstoffe der Einzelschichten.

Zwar stellt die Forderung nach einem unidirektionalen endlosfaserverstärkten Verbund eine besondere Einschränkung dar, dennoch kann die Berechnung zur

Abschätzung und zum Vergleich eines maximal möglichen Steifigkeitspotenzials im Zug- und Biegeversuch angewendet werden. Die Berechnungen werden sowohl für einen Laminataufbau gleicher Materialien durchgeführt als auch für die Werkstoffkombinationen aus z.B. flammhemmend ausgerüsteter Schicht und einer Standard-LFT-Schicht.

Aus den Einzelschichtuntersuchungen der jeweiligen Materialien werden die Laminatfestigkeiten berechnet. Die Steifigkeitskennwerte der von 0° abweichenden Lagen können aus Transformationsbeziehungen hergeleitet werden. Ausgehend von der Nachgiebigkeitsmatrix der 0° Lage kann mit Hilfe der Transformationsmatrix die Nachgiebigkeitsmatrix für eine um den Winkel φ gedrehte Lage berechnet werden.

Bruchfestigkeiten können mit dieser Methode nicht berechnet werden, da hier nur Aussagen über das Verformungsverhalten eines Laminats getroffen werden.

Ein Rückschluss auf resultierende Spannungen infolge äußerer Lasten bzw. Spannungen ist nicht zwingend aussagekräftig, da bei faserverstärkten Laminaten in der Regel ein linear-elastisches Materialverhalten vorliegt. Diese Prämisse ist bei diskontinuierlich langfaserverstärkten Werkstoffen nicht gegeben. Hier ist ein ausgeprägtes nicht-lineares Materialverhalten zu erkennen (siehe Versuchsergebnisse der Kapitel 4.2.1 bis 4.3.1).

Dennoch ist es hiermit möglich, für theoretisch applizierte Kräfte/ Spannungen die Verformungen zu berechnen und innerhalb des linearelastischen Bereichs (z.B. für die E-Modul-Bestimmung 0,05 – 0,25 % Dehnung) vergleichende Berechnungen durchzuführen.

Im Rahmen der Untersuchungen wurden als faserverstärkte Werkstoffe GMT und Glasfaser-LFT mit jeweils einem Fasergewichtsanteil von 30 % doppelt verpresst. Der Vergleich von Berechnung und Experiment zeigt hinsichtlich der Zugsteifigkeit eine gute Übereinstimmung (Tab. 4.7). Die Eingangsgrößen zur Berechnung sind den jeweiligen Experimenten der vorgenannten Kapitel oder der Literatur entnommen [95]. Die Anbindung der Schichten zueinander wurde mit Kapitel 4.4 vorgestellt.

Tab. 4.8: Vergleich von Experiment und Berechnung hinsichtlich der Zugsteifigkeit von werkstoffgleichen 0°/90°-Laminaten

Zugversuch	PP GF 30	GMT GF 30
Eingangsgrößen (aus Experiment)		
Faservolumengehalt	0,14	0,14
Querkontraktion v^M	0,35	0,35
Querkontraktion v^F	0,3	0,3
Gemessener E-Modul 0° [MPa]	8000	6300
Gemessener E-Modul 90° [MPa]	3500	2700
Gemessene Steifigkeit 0°/90°, E-Modul [MPa]	5900	4360
Ergebnis (aus der Berechnung)		
Berechnete Steifigkeit 0°/90° E-Modul [MPa]	5665	3965
Übereinstimmung Berechnung zu Experiment	-4%	-9%

4.6 Zwischenfazit und potenzieller Nutzen für die Serienfertigung

Das „Doppelt Pressen“ bietet gegenüber dem standardmäßigen, einfachen Pressverfahren den Vorteil eines gleichmäßigeren, gesteigerten Festigkeitsniveaus über alle Faserorientierungen bei der Biegefestigkeit. Die 0°/90°-Orientierung führt zu einem makroskopisch isotropen Materialverhalten (gleichmäßige Zugfestigkeit in allen Richtungen).

Reines PP zeigt gleichartiges Verhalten bei den Zug- und Biegefestigkeitsuntersuchungen ohne Steigerung durch das geänderte Verarbeitungsverfahren. Lediglich im Fallbolzenversuch zeigt das reine PP eine deutliche Steigerung. Die 0°/90°-Orientierung führt im Einlegebereich durch das „Doppelt Pressen“ zu einer Steigerung von 20 %. Das unidirektionale „Doppelt Pressen“ mit einer 0°/0°-Orientierung führt insgesamt zu einer Steigerung um ca. ein Drittel.

Bei GMT kann der Minimalwert bei Biege- und Zugfestigkeit durch das „Doppelt Pressen“ verdoppelt werden. Die Schlagzähigkeit erreicht durch das „Doppelt Pressen“ den gleichen Maximalwert, aber gleichzeitig ein doppelt so großes Minimum.

Das LFT-Stäbchengranulat mit der schmelzviskoserer Matrix erreicht mit dem „Doppelt Pressen“ die höchste durchschnittliche Biege- und Zugfestigkeit, diese konnte um bis zu 2/3 gegenüber dem einfach gepressten Bauteil gesteigert werden. Im Fallbolzentest (DIN 6603) erreicht dagegen das fließfähigere LFT das höchste Energieaufnahmevermögen.

Die Herausforderung besteht in der Herstellung belastungsangepasster Produkte. Es erfolgt eine Orientierung an der höchstbelasteten Stelle, wo diese Aufdickung appliziert wird. Einfallstellen können durch das vorgestellte Verfahren vermieden werden. In einem weiteren Schritt könnten die Ziele einer guten Oberfläche durch Hinterpressen von Folien erreicht werden. Durch das zweidimensionale Fließen der Pressmasse werden Lufteinschlüsse bei einer insgesamt geringen Wandstärke vermieden [128, 129].

Die scheinbare Scherfestigkeit hängt dabei vom Energieeintrag und somit von Einlege- bzw. Fließbereich ab. Vorteilhaft ist dann ein umgehendes Überpressen der ersten Laminatschicht, die noch nicht ganz Raumtemperatur erreicht hat. Um diese für gute Zugscherfestigkeiten ausreichende Substrattemperatur beim Fügen zu gewährleisten und einen Materialwechsel in der Schnecke zu vermeiden, sollten zwei Plastifiziereinheiten eingesetzt werden, vergleichbar dem Zwei-Komponenten-Spritzguss.

Der wirtschaftliche Nutzen des „Doppel Pressen“ hängt vom Anforderungsprofil an den Werkstoff bei einer bestimmten Applikation und den einstellbaren Verarbeitungsbedingungen ab (Kapitel 5.2).

Hinsichtlich der Flammhemmung wurde im Ergebnis ein Gradientenwerkstoff vorgestellt. Trotz der nicht ausreichenden Flammhemmung bei Kantenbeflammung ist eine flammhemmende Beschichtung einer kompletten Seite, die als Fläche einer möglichen Flamme zugewandt ist, im Pressverfahren möglich und erreicht dabei die höchste Prüfkategorie. Gleichzeitig kann die andere Schicht die entsprechenden Lasten aufnehmen, wie es z. B. bei Unterbodenverkleidungen erforderlich ist.

5 Betriebswirtschaftliche Analyse über die Wertschöpfungskette der Eigenschaftserweiterung

Die betriebswirtschaftliche Analyse wird bei dieser Entwicklung zur Eigenschaftserweiterung von Fließpresshalbzeugen auf der Basis einer Vergleichsrechnung durchgeführt. Diese beinhaltet die Betrachtung der Prozessstufen und der daraus resultierenden Stückkosten. So sind zunächst für einen Prozess die Gesamtkosten K (Gleichung 5.1) einer Periode zu bestimmen, die auf die Ausbringungsmenge x umgelegt werden, um die Stückkosten k (Gleichung 5.2) darzustellen [130, 131].

$$K = K_f + k_v x \quad \text{Gleichung 5.1}$$

$$k = \frac{K}{x} = \frac{K_f}{x} + k_v \quad \text{Gleichung 5.2}$$

Die Gesamtkosten K setzen sich aus den variablen ($k_v \cdot x$) und fixen Bestandteilen (K_f) zusammen. Dabei sind variable Stückkosten k_v ausbringungsmengenabhängig. Die fixen Kosten K_f bleiben von der gewählten Ausbringungsmenge unabhängig.

Bei gravierenden Änderungen der Ausbringungsmenge (Steigerung der Produktionskapazität) verhalten sich Fixkosten sprunghaft und bleiben lediglich innerhalb eines Produktionsmengenintervalls konstant.

So unterscheidet die betriebswirtschaftliche Theorie grundsätzlich vier Größen zur Messung von Kosten:

- Gesamtkosten innerhalb eines Zeitraums (z.B. Planungsperiode),
- Kosten pro Beschäftigungszeiteinheit,
- Stückkosten (Gesamtkosten im Verhältnis zur Ausbringungsmenge) und die
- Grenzkosten, die eine Veränderung der Stückkosten bei Änderung der Ausbringungsmenge darstellen.

Bei den vorgestellten Arbeiten steht jeweils die Prozesskette fest, wobei Teilprozessschritte verändert wurden. Die technischen Veränderungen schlagen sich in der Kostenzusammensetzung nieder. Dabei kommt der Grenzkostenrechnung, Kostenbetrachtung einer zusätzlich hergestellten Einheit, die größte Bedeutung zu.

Die Erlösseite bleibt dabei zunächst unberücksichtigt. Sie kommt spätestens bei der Planung des optimalen Produkt-Mix' und der Gestaltung des Produktionsprogramms

zum Tragen. Im Hinblick auf eine Gewinnmaximierung und eine Wahlmöglichkeit im Einsatz von Produktionsfaktoren stellt die Deckungsbeitragsrechnung oder letztlich die Vollkostenrechnung die geeignete Variante dar. Dabei ist jedoch nicht nur die Kenntnis der Kostenfunktionen, sondern insbesondere der Erlösfunktionen zwingend erforderlich. Beide Funktionen sind ausbringungsmengenabhängig und beinhalten Grenzkosten und Grenzerlöse.

Eine technisch-betriebswirtschaftliche Darstellung und auch abschließende Bewertung der Vorteilhaftigkeit einer der in Kap. 3.2.2 vorgestellten Varianten wird unter Einbeziehung von Prämissen vorgenommen. Zum Vergleich ist das in der Praxis üblicherweise eingesetzte flammhemmend ausgerüstete PA 66 mit aufgenommen worden (Kap. 5.1) [90, 132]. Eine Übersicht der verschiedenen Kostenrechnungsverfahren liefert Tab. 5.1.

Tab. 5.1: Übersicht der Kostenrechnungsverfahren [aus: 131]

	Istkosten	Normal- und Istkosten	Plan- und Istkosten
Vollkostenrechnung	Vollkostenrechnung	Normalkostenrechnung	Plankostenrechnung
Teilkostenrechnung	Deckungsbeitragsrechnung; Direct Costing	-	Grenzplankostenrechnung

Beim Fließpressverfahren handelt es sich um einen mehrstufigen Produktionsprozess. Für ein flächiges Bauteil werden mit der Tab. 5.2 die Prozessstufen beim Pressen dargestellt und entsprechend bewertet. Die Bewertung berücksichtigt eine eventuelle Wiederholung einzelner Prozessstufen (Z.B. Nacharbeit). Je nach Prozessstufe und besonders entsprechend dem Automatisierungsgrad entstehen Energie- und Abschreibungskosten (AfA) für die eingesetzten Anlagen bzw. Arbeitskosten für Personaleinsatz. Sofern sich die Ausbringungsmengen durch einen Materialwechsel verändern, sind über die Maschinenstundensätze die Kostenanteile für Energie und Abschreibungen anzupassen.

Tab. 5.2: Prozess- und Kostenstufen des LFT-Fließpressverfahrens

Prozessstufe	LFT-Fließpressverfahren	Kosten für
Produktstufe 0		Rohstoff: Polypropylen
Prozessstufe 1	Compoundieren, Kühlen, Granulieren	Energie, AfA; Additive
Prozessstufe 2	Schmelzen, Faserimprägnierung, Kühlung, Granulierung	Energie, AfA; Glasfaser
Produktstufe 1		PP-GF 30
Prozessstufe 3	Plastifizieren, Aufbereitung der Pressmasse	Energie, AfA
Zwischenstufe 4	Transfer in Kavität	Energie, AfA, Arbeitskosten
Prozessstufe 4	Fließpressen	Energie, AfA, Arbeitskosten
Prozessstufe 5	Entformung	Energie, AfA, Arbeitskosten
Produktstufe 2		Rohbauteil
Prozessstufe 6	Nachbearbeitung	Energie, AfA, Arbeitskosten
Prozessstufe 7	Applikation, Lackierung	Energie, AfA, Arbeitskosten
Produktstufe 3		Fertigbauteil
Prozessstufe 8	Montage	Energie, AfA, Arbeitskosten
Produktstufe 4	Einstandkosten beim Verwender	Fertigprodukt
Prozessstufe 9	Entsorgungskosten/-erlöse	Recycling

Die Produktionskosten ergeben sich aus der Summe gemäß der Gleichung 5.3 [133].

$$K_p = K_f + \sum_k \sum_l m_k * m_l * EW_{kl} \quad \text{Gleichung 5.3}$$

mit

K_p = Produktionskosten;

K_f = nicht umgelegte Fixkosten (Gemeinkosten);

EW_{kl} = Einzelwert des Vorgangs k und des Elements l;

m_k = Anzahl des Vorgangs k (Anzahl der Prozessstufen)

m_l = Anzahl des Vorgangs l (Häufigkeit der einzelnen Prozessstufen)

Dabei werden die jeweiligen Kosten einer Prozessstufe (Vorgang) ermittelt und über alle Stufen des Herstellungsprozesses (Bild 2.10) zu den Gesamtkosten summiert.

Die Eigenschaftserweiterung von flammhemmender Ausrüstung kann mit unterschiedlichen Materialien erreicht werden. Entsprechend wird die eigene Entwicklung flammhemmend ausgerüstetem PP dem flammhemmend ausgerüsteten PA gegenüber gestellt. Die Umsetzung kann mit unterschiedlichen Verfahren (Bild 3.6) erzielt

werden, wobei zur Vergleichsrechnung der Einschneckenplastifizierprozess herangezogen wurde.

Ebenso wie bei der Vergleichsrechnung von Verfahren sind materialspezifische Anlageneinstellungen (Energieeinsatz) zu berücksichtigen und insbesondere Maschinenstundensätze zu berechnen. Die betriebswirtschaftlichen Basisparameter liefert hierzu Tab. 8.2 (Anhang).

Die in Tab. 5.4 dargestellten Stundensätze werden, ausgehend von dem eingesetzten Kapital, das in einer bestimmten Zeit zurückfließen und eine Verzinsung erfahren soll, auf der Basis der Kapitalwertmethode (Gleichung 5.4) berechnet.

$$\text{Kapitalwert: } KW = \sum_{t=0}^T (E_t - A_t)q^{-t} \quad \text{Gleichung 5.4}$$

Mit den vorgestellten Prozessschritten und den betriebswirtschaftlichen Basisparametern lassen sich in Verbindung mit Erfahrungswerten und Literaturangaben sowohl für die flammhemmende Ausrüstung von GF-PP als auch für das Verfahren des „Doppelt Pressen“ Stückkosten abschätzen. Materialspezifische und Verarbeitungsbedingungen müssen bei dieser Rechnung wiederum berücksichtigt werden. Tab. 5.3 zeigt den für diese Berechnungen anzuwendenden Maschinenstundensatz, der neben dem Kapitaleinsatz auch die Peripherie (Miete) und die Energie berücksichtigt.

Tab. 5.3: Anschaffungskosten, Kapitalwert und Stundensätze der eingesetzten Produktionsmittel

Anlage	Anschaffungskosten [€]	Output	Einheit	Kapitalwert [€]	Stundensatz aufs Kapital [€/h]	Maschinenstundensatz [€/h]
Einheit	[€]					
Compoundierextruder einschl. Peripherie	400.000	300	[kg/h]	587.731	31,35	97,35
Doppelschnecken-Extruder-Kombination für Direkt-LFT	700.000	300	[kg/h]	1.028.530	54,85	120,85
Plastifiziereinheit	250.000	300	[kg/h]	367.332	19,59	67,99
Kunststoffpresse parallelgeregelt	1.800.000	18.000	[kN]	2.644.791	141,06	207,06
Presswerkzeug	275.000			404.065	21,55	21,55
Handhabungsmittel	200.000			293.866	15,67	26,67
Heizgeräte	40.000			58.773	3,13	13,69

5.1 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der Prozesskette Flammhemmung

Für die Entwicklungsarbeit der Flammhemmung sind zunächst die Kosten zur Herstellung und Bereitstellung des Standardwerkstoffs und des flammhemmend ausgerüsteten Compounds zu ermitteln, wie es mit Kapitel 3.6 vorgestellt wurde. Diese Kosten sind mit einem anderen flammhemmend ausgerüsteten Werkstoff zu vergleichen.

Die Berechnungen stützen sich sowohl auf Erfahrungswerte und Abschätzungen als auch auf Marktdaten und basieren auf der mit Bild 3.6 vorgestellten Variante 2.

Mit der in Kapitel 3 vorgeschlagenen Umsetzung des Verfahrens ergeben sich aufgrund von Fließfähigkeit und Schmelztemperatur der Grundmatrix unterschiedliche Zykluszeiten, die sich direkt auf die Ausbringungsmenge auswirken.

Mit Tab. 5.6 werden die Stoffkosten der eingesetzten Grundstoffe vorgestellt, die zur Berechnung der Kosten in Abhängigkeit der jeweiligen Wertschöpfungsstufe Tab. 5.6 herangezogen werden müssen.

Tab. 5.6: Ausbringungsmenge und Stoffkosten eingesetzter Werkstoffe

	GF PP (30 Gew.-%)	GF PP (60 Gew.-%)	Masterbatch Mat F	Master- batch Mat G bzw. I	Vergleichs- werkstoff PA66; GF 30 FSM (ZnS 20%)
Ausbringungsmenge (Stück/h)	57,6	40	57,6	40	40
Output Masse [kg/h]	184,32	128	184,32	128	154
Matrix [€/kg]	1,1	1,1	1,1	1,1	2,3
Glas [€/kg]	2	2			2
Faseranteil [Gew.-%]	0,3	0,6		0,55	0,3
Matrixanteil [Gew.-%]	0,7	0,4	0,6	0,45	0,5
Additivanteil [Gew.-%]			0,4		0,2
Additivkosten [€/kg]			6	5	6,5

Tab. 5.7: Herstellungskosten [€/kg] je nach Materialauswahl [134, 135].

LFT-Fließpressverfahren	Prozessstufe (Inhalt: Kosten/kg)	GF PP 30 Gew.-%	GF PP 60 Gew.-%	Master- batch Mat F	Master- batch Mat G bzw. I	PP + Mat F, GF 30 Gew.-%	Vergleichs- werkstoff PA66; GF 30 Gew.-% , FSM (ZnS 20%)
Matrixkosten	Produktstufe 0	1,10	1,10	1,10	1,10		2,30
Gesamtmat.-kosten X %GF, Y% Additiv, 100-(X+Y) % Matrix	Prozessstufe 1	1,37	1,64	3,06	3,25		3,05
Compoundieren, Küh- len, Faserimprägnie- rung, Granulieren	Prozessstufe 2	0,58	0,65	0,65	0,80		0,80
	Kosten nur Produktions- stufe 1	1,95	2,29	3,71	4,05	3,00	3,85
Plastifizieren Aufbereitung der Pressmasse	Prozessstufe 3	0,37	0,53	0,37	0,53	0,45	0,44
Transfer in Kavität	Zwischenstufe	0,14	0,21	0,14	0,21	0,18	0,17
Heizgeräte	Zwischenstufe	0,07	0,11	0,07	0,11	0,09	0,09
Fließpressen	Prozessstufe 4	1,12	1,62	1,12	1,62	1,37	1,34
Entformung	Prozessstufe 5	0,14	0,21	0,14	0,21	0,18	0,17
Personalkosten		0,57	0,82	0,57	0,82	0,69	0,68
	Kosten nur Produktions- stufe 2	2,43	3,49	2,43	3,49	2,96	2,90
	Produktstufe 2	4,38	5,78	6,14	7,54	5,96	6,75
	Rohbauteil- kosten	14,00	18,51	19,63	24,12	19,07	26,00

Die Materialkosten steigen im Verlauf des Herstellungsprozesses durch die flammhemmende Ausrüstung von Polypropylen um 36%. Die Mehrstufigkeit des Prozesses ist in Tab. 5.5 dargestellt. Der gestiegene Energieaufwand zur Herstellung der Masterbatches schlägt sich jeweils in den Kosten der Prozessstufe 2 nieder. In der Gegenüberstellung mit dem Vergleichswerkstoff flammhemmend ausgerüstetes Polyamid (PA 66; GF 30, FSM (ZnS 20%)) ist das entwickelte flammhemmend ausgerüstete Polypropylen (PP+Mat F, GF 30) bei gleichen Bauteilabmessungen kostengünstiger.

Bei gleichen Abmessungen wirkt sich die knapp 20% höhere Dichte für PA nachteilig aus. PA 66 GF30 bietet jedoch bessere mechanische Eigenschaften (z. B. Zugfestigkeit 190 MPa gegenüber 115 MPa für PP GF30) und somit höhere Bauteilfestigkeiten. Dennoch kann ein Vergleich auf der Basis gleicher Bauteilfestigkeiten der kon-

kurrierenden Werkstoffe nicht durchgeführt werden, da das Bauteil aus PA GF 30 in einer Bauteildicke von 1,7 mm ausgeführt werden müsste, was mit dieser Anlagenkonfiguration nicht erreichbar ist (mangelnde Presskraftkapazität). Zudem müsste eine stärkere flammhemmende Ausrüstung für diese Bauteildicke des PA erfolgen, was sich wiederum nachteilig auf die mechanischen Eigenschaften auswirkt.

Ausgangspunkt war ein nicht flammhemmend ausgerüstetes Bauteil auf der Basis von PP-GF 30 in einer bestehenden Anlagenkonfiguration. Eine halogenfreie Flammhemmung wäre bisher unter Verwendung eines höherwertigen Matrixwerkstoffes wie PA (PA 66; GF 30, FSM (ZnS 20%)) möglich, was zu den dargestellten Mehrkosten führen würde (Tab. 5.4). Somit stellt die Entwicklung der halogenfreien Flammhemmung langglasfaserverstärkter Thermoplaste in der Konfiguration von glasfaserverstärktem Phosphor-Stickstoff-Synergist ausgerüstetem Polypropylen ein technisches und wirtschaftliches Optimum dar.

5.2 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung des „Doppelt Pressen“-Prozesses

Der wirtschaftliche Nutzen des „Doppelt Pressen“ wird zunächst aus der Analyse der erreichten mechanischen Kennwerte abgeleitet. Es könnte vermutet werden, dass das „Doppelt Pressen“ auch zu doppelten Kosten führe, doch ist zu bedenken, dass je Presszyklus nur die Hälfte an Material eingesetzt wird. Gleichzeitig verringert sich die Zykluszeit, auch die Berechnung geht von einer nahezu halbierten Ausbringung (52,6 %) aus. Eine geringere Wandstärke erlaubt zudem ein früheres Öffnen des Werkzeugs zumal eine höhere Substrattemperatur die adhäsive Bindung zur Schicht der 2. Pressung begünstigt. Diese Vergleichsrechnung von einfachem und „Doppelt Pressen“ zeigt die Tab. 5.

Das „Doppelt Pressen“ von glasfaserverstärktem PP-LFT führt zu gestiegenen Bauteilkosten um 48 %. Damit ergibt sich ein betriebswirtschaftlicher Vorteil nur aus einer entsprechend größeren Steigerung einer technischen Eigenschaft (z.B. Energieaufnahmevermögen). Eine derartige Steigerung wurde nicht erreicht (Kap. 4.2.2).

Die Ausrüstung mit einer flammhemmenden Schicht bringt keine Vorteile, da keine mechanischen Verbesserungen erzielt werden können (Kap. 4.3.1). Die Eigenschaftserweiterung um die Flammhemmung einer Laminatschicht beim „Doppelt Pressen“ (mit dem entwickelten Masterbatch) führt zu wesentlich höheren Bauteilkosten (23,51 €) als mit der faserverstärkten, flammhemmend ausgerüsteten Variante (19,07 € gemäß Tab. 5.4).

Tab. 5.8: Vergleichende Bauteilkostenrechnung einfaches und „Doppelt Pressen“

	Prozessstufe (Inhalt: Kosten/kg)	GF PP 30 Gew.-% 1 Bauteil	GF PP 30 Gew.-% 1. Pressung	GF PP 30 Gew.-% 2. Pressung Bauteil	GF PP 30 + Master- batch Mat F 2.Pressung	GF PP 30 + Master- batch Mat G 2.Pressung
LFT-Fließpress- verfahren						
Matrixkosten	Produktstufe 0	1,10	1,10	1,10	1,10	
Gesamtmat.-kosten X %GF, Y % Additiv, 100-(X+Y) % Matrix	Prozessstufe 1	1,37	1,37	1,37	3,06	
Compoundieren, Kühlen, Faserim- prägnierung, Granulieren	Prozessstufe 2	0,58	0,58	0,58	0,65	
	Kosten nur Produktions- stufe 1	1,95	1,95	1,95	3,71	2,30
Plastifizieren Aufbereitung der Pressmasse	Prozessstufe 3	0,37	0,71	0,71	0,71	0,71
Transfer in Kavität	Zwischenstufe	0,14	0,28	0,28	0,28	0,28
Heizgeräte	Zwischenstufe	0,07	0,14	0,14	0,14	0,14
Fließpressen	Prozessstufe 4	1,12	2,16	2,16	2,16	2,16
Entformung	Prozessstufe 5	0,14		0,28		
Personalkosten		0,57	1,09	1,09	1,09	1,09
	Kosten nur Produktions- stufe 2	2,43	4,38	4,66	4,38	4,38
	Produktstufe 2	4,38	6,33	6,61	8,09	6,68
	Rohbauteil- kosten	14,00	10,13	10,57	12,94	10,69
	Rohbauteil- kosten Doppelt Pres- sen in Euro			20,70	23,51	21,26

Der wirtschaftliche Vorteil ergäbe sich, sofern die flammenhemmende Schicht in den Materialkosten günstiger ist als die faserverstärkte, flammhemmend ausgerüstete Variante und dabei gleich gute mechanische Eigenschaften aufweisen würde. Zwar können die Bauteilkosten durch die Verwendung zugekaufter Compounds (z.B. Masterbatch G) reduziert werden, doch im Schichtaufbau mit GF-PP beim „Doppelt Pressen“ wird kein verbessertes mechanisches Eigenschaftsprofil erreicht. Die flammhemmende Ausrüstung von glasfaserverstärktem PP, wie es mit dem Masterbatch F erreicht wurde, zeigt die größte Effizienz hinsichtlich mechanischer Eigenschaften und Kosten.

6 Zusammenfassung

Langfaserverstärkte Thermoplaste haben über die letzten Jahre hinweg eine Erfolgsgeschichte geschrieben. Sie haben ihren Marktanteil gesteigert und sind auch in den ökonomisch rezessiven Phasen weiter gewachsen. In der Halbzeugform des Stäbchengranulats haben LFT zudem auch Prozessgrenzen überschritten, indem sie nun sowohl im Spritzgieß- als auch Fließpressverfahren eingesetzt werden. Das Anwendungspotenzial für diesen Werkstoff ist noch nicht erschöpft. Zur Nutzbarmachung dieses Potenzials soll diese Arbeit einen Betrag leisten.

Die Behinderung des Einsatzes in neuen Anwendungsgebieten begründet sich oftmals in einer unzureichenden Flammhemmung und zum Teil auch mit ungünstigen mechanischen Eigenschaften des Bauteils. Zu beiden Restriktionen zeigt diese Arbeit Lösungsmöglichkeiten auf. Für langfaserverstärkte Thermoplaste auf Basis des Matrixwerkstoffes Polypropylen wird eine Erweiterung von Materialeigenschaften auf zwei Wegen erreicht. Einerseits erfolgt durch Compoundieren eine flammhemmende Ausrüstung und andererseits verbesserte Bauteileigenschaften durch die prozesstechnische Änderung des „Doppelt Pressen“.

Diese Entwicklungsziele basierten auf der Analyse der derzeitigen Eigenschaften und des Umfelds als Ergebnis der SWOT-Analyse. Sie bildete die Eingangsgröße zur Bewertung von Eigenschaften und der Definition von Entwicklungszielen im Rahmen der Quality-Function-Deployment-Methode.

Hinsichtlich der Flammhemmung wurde im Vorgriff auf die sich weiter verschärfenden Recyclingrichtlinien (Richtlinie 2000/53/EG) im Straßenfahrzeugbau als Entwicklungsziel die halogenfreie Flammhemmung verfolgt und umgesetzt. Es wurden verschiedene Compounds hergestellt und in Anlehnung an anwendungsspezifische Prüfmethode untersucht. Dabei wurden mit dem Material F sehr gute Ergebnisse in den jeweils höchsten Prüfkategorien gemäß DIN 53438 K1 und UL 94 V0 (2,6 mm) erzielt. Gleichzeitig erreicht dieses Compound, das im einfachen und kostengünstigen Einschneckenplastifizierverfahren verarbeitet wurde, gleich gute mechanische Eigenschaften wie das Standard-LFT. Die Untersuchung der Fließfähigkeit hat ergeben, dass die Glasfaserverstärkung einen größeren Einfluss auf die Plastifikatfließfähigkeit hat, als die Additivierung durch Füllstoffe. Eine Kombination aus beiden Werkstoffen übersteigt dabei aber nicht das Viskositätsmaximum eines Compounds.

Weiterhin konnte mittels Röntgenbildanalyse gezeigt werden, dass die Faserorientierung im Bauteil stark von der Fließfähigkeit abhängig ist, mit der Schlussfolgerung, dass mit einer höheren Schmelzviskosität der Pressmasse die Faserausrichtung stärker behindert wird.

Die Abwandlung der Verfahrensvariante, bei der eine erste Schicht durch eine weitere überpresst wird („Doppelt Pressen“), zeigt besonders bei den dynamischen Eigenschaften eine wesentliche Steigerung um den Faktor zwei. Durch ein bestimmtes Belegungsschema der Kavität kann eine $0^\circ/90^\circ$ -Faserorientierung erreicht werden, was bei den quasi-statischen Untersuchungen zu insgesamt deutlich verbesserten Festigkeitswerten bei Zug- und Biegebeanspruchung führt. Die Simulation der Steifigkeit zeigt dabei gute Übereinstimmung mit dem Experiment.

Es konnte belegt werden, dass die Zugscherfestigkeit von der Art des Substrats und, besonders bei materialhomogenen Laminaten, von der Substrattemperatur und der Kavitätsbestückung abhängt. Die ermittelte Zugscherfestigkeit reicht an Werte heran, die als Referenzwerte aus Autoklavproben in Fügeverfahren angeführt werden.

Die betriebswirtschaftliche Analyse der Herstellkosten zu den beiden Entwicklungsergebnissen zeigt die Bedingungen auf, wie diese wirtschaftlich vorteilhaft in der Praxis eingesetzt werden können. Im Rahmen des „Doppelt Pressen“ wurden beide Untersuchungsschwerpunkte miteinander kombiniert. Diese Kombination erreichte in der einseitigen Flächenbeflammung die höchste Flammhemmung. Gleichzeitig wurden gute mechanische Eigenschaften erzielt. Ein wirtschaftlicher Vorteil kann daraus so lange nicht gezogen werden, wie die flammhemmend ausgerüstete Laminatschicht des Masterbatches teurer ist als der insgesamt flammhemmend ausgerüstete FKV (FR-FKV). Dieser FR-FKV ist für das angestrebte Anwendungsgebiet großflächiger Beplankungen, anderen flammhemmend ausgerüsteten FKV-Werkstoffen wie z. B. PA überlegen. Das „Doppelt Pressen“ ist bereits ab einer Steigerung der Performance um die Hälfte der ursprünglichen Eigenschaften dem Verfahren einfach gepresster Bauteile wirtschaftlich überlegen.

7 Literatur

- [1] Karger-Kocsis, J. : Werkstoffe. In 'Handbuch Verbundwerkstoffe - Werkstoffe - Verarbeitung - Anwendung'; Hrsg.: Neitzel / Mitschang. München: Hanser-Verlag 2004, S. 43ff.
- [2] Neitzel, M.; Mitschang, P.: Handbuch Verbundwerkstoffe. Carl Hanser Verlag. München, 2000, S. 192 ff.
- [3] Ziegmann, G.: Faserverbunde im Schienenfahrzeugbau. Kunststoffe 87/9, Carl Hanser Verlag, München, 1997, S. 1142 –1146.
- [4] Bourban, P.-E.; Manson, J.-A.E.: Integrated Manufacturing. In 'Polypropylene: an A-Z reference' Hrsg.: Karger-Kocsis, J.. Kluwer 1999, S. 341-347.
- [5] Richtlinie VDA 232-101 „VDA-Liste für deklarationspflichtige Stoffe – Inhaltsstoffe in Bauteilen und Werkstoffen“. VDA Werkstoffblatt, Verband der Automobilindustrie e.V. (VDA), Frankfurt Juli 2001.
- [6] Karger-Kocsis, J.: Composites (Structure, Properties, Manufacturing). In: Salamone, J.C.: Polymeric Materials Encyclopedia. CRS-Press, Boca-Raton 1996.
- [7] Neitzel, M.; Breuer U.: Die Verarbeitungstechnik der Faser-Kunststoff-Verbunde. Hanser, München, 1997, S. 62.
- [8] Oelgarth, A.; Dittmar, H.; Stockreiter, W.; Wald, H.H.: GMT oder LFT?. Kunststoffe 88 / 4, Carl Hanser Verlag, München 1998.
- [9] Hafellner R., Pichler M., Wörndle R., Steinbichler G., Egger P.: Lange Fasern spritzgießen. Kunststoffe 90 / 3, Carl Hanser Verlag 2000, S. 44 ff..
- [10] Lutz, A.: Beitrag zur Entwicklung innovativer Fertigungstechniken für die Verarbeitung thermoplastischer Faserverbundwerkstoffe. Dissertation. Berlin: Mensch und Buch Verlag 1999.
- [11] Brüssel, R.; Kühfűsz, R.: Ein Jahr Serienproduktion von Menzolit-Fibron Lang-Faserverstärktem-Thermoplast mit dem Direktverfahren. '1. Intern. AVK-TV Tagung', AVK-TV, Frankfurt(Ed.), Baden-Baden, September 1998, 1998, A2-1-9.

- [12] Bültjer, U; Ehentraut, P.: Produktion von GFK und duroplastischen Formmassen in Europa, Vortrag, 4. Internationale AVK-TV Tagung Baden-Baden, September 2001.
- [13] Verband Kunststoffverarbeitende Industrie e.V.: Wirtschaftsdaten und Graphiken zu Kunststoffen (Stand 28.03.2001), Frankfurt 2001.
- [14] Richtlinie 2000/53/EG des Europäischen Parlamentes und des Rates vom 18. September 2000 über Altfahrzeuge.
- [15] Bültjer, U: Produktion von GFK und duroplastischen Formmassen in Europa, Vortrag, 5. Internationale AVK-TV Tagung Baden-Baden, September 2002.
- [16] Bültjer, U: Produktion von GFK und duroplastischen Formmassen in Europa, Vortrag, 6. Internationale AVK-TV Tagung Baden-Baden, Oktober 2003.
- [17] Bültjer, U: Produktion von GFK und duroplastischen Formmassen in Europa, Vortrag, 7. Internationale AVK-TV Tagung Baden-Baden, September 2004.
- [18] Bültjer, U: Produktion von GFK und duroplastischen Formmassen in Europa, Vortrag, 8. Internationale AVK-TV Tagung Baden-Baden, September 2005.
- [19] Mitschang, P.; Weimer, C.: Komplexe multi-textile Preforms (Potenziale der Nähetechnik. Kunststoffe 2000, S. 114-116.
- [20] Weyrauch, F.; Stadtfeld, H.; Mitschang, P.: Simulation and control of the LCM process with future matrix systems. 'FPCM - International Conference in Composite Materials', Advani, S. G.(Ed.), USA, Newark, Delaware, July 7-9, 2004, University of Delaware, 2004, pp. 95-100.
- [21] Geiger, O.; Droste, A.; Eyerer, P.; Henning, F.; Krause, W.: Neue Einsatzfelder für LFT-D-ILC Technologie - Lokal verstärkte Bauteile aus technischen Thermoplasten. '5. Int. AVK-TV-Tagung', AVK-TV(Ed.), Baden-Baden/ 17.-18. September 2002, Frankfurt, 2002, B 5 1-16.
- [22] Brast, K.: Verarbeitung von langfaserverstärkten Thermoplasten im direkten Plastifizier-/ Pressverfahren. RWTH Aachen: Dissertation IKV, RWTH Aachen 2001.
- [23] Caratsch H.P.: Anlagen zum Herstellen von Prepreg. Kunststoffe 79 / 3, 1989, S. 221-224.

- [24] Gutowski T.G., Bonhomme L.: The Mechanics of Prepreg Conformance. In 'Journal of Composite Materials' 22 /. Laboratory of Manufacturing and Productivity. Mar. 1988, 204-223.
- [25] Lee W.J., Seferis J.C.: Prepreg Processing Science. In 'Sampe Quaterly' /. Dept. of Chemical Engineering, Jan.1986, 58-68.
- [26] Repecka L.: Prepreg Characteristics and their Effects on Automated Tape Laying Machines. In 'New Generation Materials and Processes' /. Structural Materials BASF 1988, 55-64.
- [27] Wallentowitz, H.; Adam, H.; Bröcking, J.: Potential of fiber reinforced plastic space frame structures. VDI Tagung Entwicklung im Karosseriebau, Hamburg, 14-15. Mai 1996, Seite 477-495.
- [28] Beckwith, S.W.: RTM, VARTM, and SCRIMP processing infusin technologies. 'SAMPE 44th ISSE / SAMPE '99', Long Beach, CA, 24.05.1999, Beckwith Technology Group, Murray, Utah, 1999.
- [29] Kissinger, C.: Ganzheitliche Betrachtung der Harzinjektionstechnik - Messsystem zur durchgängigen Fertigungskontrolle. Kaiserslautern: Dissertation Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, IVW-Schriftenreihe, Band 28, Kaiserslautern 2001. S. 25.
- [30] Chavka, N.G.; Dahl, J.-S.: P4: Glass Fiber Preforming Technology for Automotive Applications. In: Resin Transfer Molding SAMPE Monograph No. 3. SAMPE Publications. Covina. USA. 1999.
- [31] Weyrauch, F.; Stadtfeld, H.; Mitschang, P.: Simulation and control of the LCM process with future matrix systems. 'FPCM - International Conference in Composite Materials', Advani, S. G.(Ed.), USA, Newark, Delaware, July 7-9, 2004, University of Delaware, 2004, pp. 95-100.
- [32] Rösch, M.; Lohmiller, J.; Wang, J. and Winckler, S.: Processing Of Advanced Thermoplastic Composites Using A Novel Cyclic Thermoplastic Polyester One Part System Designed For Resin Transfer Molding, Proceedings of the 25th International SAMPE Europe Conference, Paris, France, April 2004.
- [33] Giocosa, A.: L'utilisation du SMC/ BMC dans les voitures Renault pendant les vingt dernières années. 'Automotive Seminar - SMC/BMC on the road to innovation', Cambrai, Frankreich, 13./14.11.2002, European Alliance for SMC, AVK-TV Frankfurt, 2002, Kap. 9.

- [34] aus: <http://www.nr5lebt.de/> vom 01.Mai 2005 (Original-Bilder: Deutsche Renault AG, Brühl) und eigene Recherche Messe-JEC 2002.
- [35] Schemme, M.: Sicherung der Produktqualität bei der Herstellung und Verarbeitung von SMC-Werkstoffen. Dissertation. Erlangen: Lehrstuhl für Kunststofftechnik, Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. G. W.Ehrenstein, Universität Erlangen-Nürnberg 1997.
- [36] Kia, H.: Sheet moulding compounds: science and technology. Munich: Carl Hanser Verlag, München 1993.
- [37] N.N.: Beefed up SMC meets automotive demands. Reinforced Plastics. / (September 1993), S. 24-28.
- [38] Sommer, M.: Schwer entflammbare GFK-Systeme. Kunststoffe. 90 / 6, 2000, S. 84-86.
- [39] Arbeitsgemeinschaft Verstärkte Kunststoffe – Technische Vereinigung e.V. (AVK-TV), Pressemitteilung anlässlich der 4. Internationalen AVK-Tagung in Baden-Baden, Oktober 2001.
- [40] Saechtling, H.: Kunststoffaschenbuch. 27. Auflage. München: Carl Hanser Verlag 1998., S. 549 ff.
- [41] <http://www.netcomposites.com/news.asp?2686> vom 14.01.2005
- [42] Produktdatenblatt: „Carbon Fibre SMC“ der Lonza Compounds GmbH & Co. KG, Miehlen, Germany.
- [43] N.N.: High Modulus SMC debuts in automotive front end. Modern Plastics International. / (March 1995), S. 78.
- [44] Bültjer, U.: Produktion von GFK und duroplastischen Formmassen in Europa. '5. Int. AVK-TV-Tagung', AVK-TV Frankfurt (Ed.), Baden-Baden/ 17.-18.09.2002, (2002), P1-1-8.
- [45] Mattus, V.: Zur werkstofflichen Verwertung lang- und endlosfaserverstärkter Thermoplaste. Kaiserslautern: Dissertation Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, IVW-Schriftenreihe, Band 6. Kaiserslautern 2000.
- [46] Meij A., Kissinger C., Neitzel M.: Fließfähigkeit von GMT. In 'Kunststoffe' 85 / 3. Carl Hanser Verlag 1995, S. 378-379.
- [47] Edelmann, K.: Prozeßintegrierte Analyse des Fließverhaltens von faserverstärkten thermoplastischen Preßmassen für die Serienfertigung. Kaiserslau-

- tern: Dissertation Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, IVW-Schriftenreihe, Band 18. Kaiserslautern 2001.
- [48] Bültjer, U.; Ehrentraut, P.: Die europäischen Märkte für GFK und duroplastische Formmassen. '4. Int. AVK-TV-Tagung', AVK-TV Frankfurt(Ed.), Baden-Baden, Oktober 2001, (2001), P2-1-6.
- [49] Meij, A.: Über den Einfluß der Halbzeugart auf die Herstellung und Qualität von Formteilen aus Glasmattenverstärkten Thermoplasten (GMT). Dissertation. Aachen: Shaker Verlag 1996.
- [50] Schijve, W.: Properties of long glass fibre polypropylene composites with varying fibre length distributions. 'ECCM 10, 10th European Conference on Composite Materials', ESCM, Free University of Brussels (VUB)(Ed.), Brugge (Belgium), June 3-7, 2002, (2002) .
- [51] Produktprospekt „âCelstran, âCompel, âFiberod – Long-fiber-reinforced thermoplastics (LFT), Ticona GmbH, Frankfurt a. M., September 1999, S. 4.
- [52] DKI Darmstadt; IIT, Neu Dehli, Studies on fibre breakage during processing of plastics. Schlußbericht zum Forschungsvorhaben der Stiftung Volkswagenwerk, Az. I/38069, 1987
- [53] Lutz, A.; Velten, K.; Evstatiev, M.: A new tool for fibre bundle impregnation: experiments and process analysis. European conference of composite materials, Neapel, 1998 .
- [54] European Patent Specification EP 0 756 536 B1: "Verfahren und Vorrichtung zur Faserbündelimpregnierung". Anmelder: Institut für Verbundwerkstoffe GmbH; Erfinder: Lutz, A. (1998).
- [55] Lutz, A.: Beitrag zur Entwicklung innovativer Fertigungstechniken für die Verarbeitung thermoplastischer Faserverbundwerkstoffe. Dissertation, Mensch & Buch Verlag, 1999, S. 105.
- [56] Ehnert, G.P.: MART-Compound - Eine Neue Materialgeneration. In: Tagungshandbuch zur 21. AVK-Tagung. Mainz, 1981, S. 23-1.
- [57] Liebold, R.: LFT kommt groß raus. Kunststoffe 88/ 9, 1998, S. 1470 ff.
- [58] Karger-Kocsis, J.: Swirl Mat- and Long Discontinuous Fiber Mat – Reinforced Polypropylene Composites – Status and Future Trends. In: Polymer Composites, 21, 2000/ 4, S. 514 ff .

- [59] Patent Nr. DE000019530020A1: „Verfahren zum Herstellen eines Compounds aus einem Kunststoff mit fester Fasereinlage“. Anmelder: Menzolit-Fibron GmbH, 75015 Bretten. Erfinder: Brüssel, R.; Kühfusz, R.. 1995.
- [60] Ernst, H.; Dieffenbacher GmbH & Co.: LFT – eine neue Technologie setzt sich durch. <http://www.dieffenbacher.de/d/news/artikel/index.html>, Eppingen: 2001.
- [61] Patentschrift DE4016784 C2: “Extruder zum Aufbereiten von Kunststoff unter Zuführung mindestens eines Faserstrangs” Anmelder: Werner und Pfleiderer GmbH & Co. KG. 1993.
- [62] Sommer, M.M.; Edelmann, K.; Wöginger, A.: Thermoplastische Prepregs und Halbzeuge. In 'Handbuch Verbundwerkstoffe - Werkstoffe - Verarbeitung - Anwendung' Neitzel / Mitschang. München: Hanser-Verlag 2004, S. 123.
- [63] Datenblatt Fa. FACT GmbH, Kaiserslautern „PP LGF 40N“, Stand 06/2003.
- [64] Albrecht, M.; Dekorsy, T. et al.: Praxisnahe GMT-Werkstoffkennwerte für die Bauteilauslegung. *Kunststoffe*. 83/ 3, 1993, S. 207-212.
- [65] Imagebroschüre Dieffenbacher GmbH & Co. KG: „LFT-D-ILC Technologie, Einarbeitung von Verstärkungsfasern in ein Polymer-Compound nach dem ILC-Direktverfahren“. Stand: 10/2000, S. 25.
- [66] Henning, F.; Ernst, H.; Brüssel, R.; Geiger, O.; Krause, W.: LFTs for automotive applications. *Reinforced Plastics*. 49. Jahrgang. (2005), 2/2005, S. 24-33.
- [67] Handels, B.; Schmidt, S.: Life Cycle Analysis und Life Cycle Costing von SMC Teilen. '7. Internationale AVK-TV-Tagung', AVK-TV Frankfurt(Ed.), Baden-Baden/ 28.-29.09. 2004, 2004, A5 1-6.
- [68] Richtlinie 200/53/EG des Europäischen Parlamentes und des Rates vom 18.September 2000 über Altfahrzeuge. *ABI der EG* Nr. L 269/34, 2000.
- [69] Wöginger, A.: Prozesstechnologien zur Herstellung kontinuierlich faserverstärkter thermoplastischer Halbzeuge. Kaiserslautern: Dissertation Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, IVW-Schriftenreihe, Band 41. Kaiserslautern 2004.
- [70] Informationsbrochüre „Pressen and more“. Dieffenbacher GmbH & Co. KG, Eppingen, 2005.
- [71] Saechtling: *Kunststoff Taschenbuch*, 27. Ausgabe. München: Carl Hanser Verlag 1998, S. 638 ff.

- [72] Domininghaus, H.: Die Kunststoffe und ihre Eigenschaften. 5. völlig neu bearbeitet und erweiterte Auflage. Springer-Verlag Berlin 1998, Beilage 1.
- [73] Schatt, W.: Einführung in die Werkstoffwissenschaft. 7. überarbeitete Auflage. Leipzig: Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie 1991, S. 414.
- [74] Sommer, M.M.; Pässler, M.; Schledjewski, R.: Sandwichkonstruktion für Sportschläger. Kunststoffe. Jahrgang 94. (2004), Heft 5, 89-91.
- [75] Johannaber, F.; Michaeli, W.: Handbuch Spritzgießen. München: Hanser-Verlag 2001, S. 153-158.
- [76] Kotler, P.; Bliemel, F.: Marketing-Management. 7. Auflage. Verlag Poeschel . Stuttgart, S. 69 ff.
- [77] Hauser, J. R.; Clausing, D.: The House of Quality. In 'Managing the New Product Development Process' Dolan, R. J.. Boston: Addison-Wesley Publishing Company Inc. 1993, S. 351-367.
- [78] Saatweber, J.: Kundenorientierung durch Quality Function Deployment. 1. Auflage. München: Hanser 1997.
- [79] Michaeli, W.; Wegner, M.: Einführung in die Faserverbundwerkstoffe. München, Wien: Hanser 1989.
- [80] Mayer, C.: Prozessanalyse und Modellbildung zur Herstellung gewebeverstärkter, thermoplastischer Halbzeuge. IVW- Schriftenreihe; Bd. 5. Kaiserslautern: Institut für Verbundwerkstoffe GmbH 1999.
- [81] Gysling, H. in Batzer, H.: Polymere Werkstoffe, Band I: Chemie und Physik. Stuttgart: Georg Thieme Verlag 1985, S. 9
- [82] SpecialChem: www.Omnexus.com/resources/articles: Inherently Flame Retardant Polymers Find Wider Uses, Dec. 1 2004, p. 1-6.
- [83] Troitzsch, J.: Brandverhalten von Kunststoffen. München: Hanser-Verlag 1982, S. 64.
- [84] Stepek, J., Daoust, H.: Additives for Plastics, Band 5 Polymers/Properties and Applications. New York: Springer-Verlag 1983, S. 201-206.
- [85] Klatt, M.: Neue Flammenschutzmittel – Systeme und ihre Wirkungsweise in Kunststoffen. 3. Fachtagung: Kunststoffe, Brandschutz- und Flammenschutzmittel. SKZ, Würzburg 1998.

- [86] Scheichl, L.: Brandlehre und chemischer Brandschutz, 2. Auflage. Heidelberg: Hüthig Verlag 1958, S. 35.
- [87] Schwister, K.: Taschenbuch der Chemie, Leipzig: Fachbuchverlag 1995, S. 347ff.
- [88] Wanzke, W.: Neue Entwicklungen mit Phosphorverbindungen für technische Kunststoffe. Tagungsband: 3. Fachtagung: Kunststoffe, Brandschutz- und Flammenschutzmittel. Süddeutsches Kunststoffzentrum , Würzburg 1998.
- [89] Uhlenbroich, Th.: Flammenschutzmittel auf Zinksulfidbasis. Tagungsband: 3. Fachtagung: Kunststoffe, Brandschutz- und Flammenschutzmittel. Süddeutsches Kunststoffzentrum , Würzburg 1998.
- [90] Uhlenbroich, Th.; Amirzadeh-Asl, D.: Flammwidrig ohne Halogene und Antimon. Kunststoffe. 88. Jahrgang (1998), 11/1998, S. 2054-2056.
- [91] Postel, W.-C.: Neues zu anorganischen Brandschutzadditiven: Expandierender Graphit. Tagungsband: 3. Fachtagung: Kunststoffe, Brandschutz- und Flammenschutzmittel. Süddeutsches Kunststoffzentrum , Würzburg 1998.
- [92] Sommer, M.: Halogenfreier Flammenschutz für SMC, BMC, Profilziehen und Leiterplatten. '5. Internationale AVK-TV Tagung', Baden-Baden, September 2002, AVK-TV Frankfurt a. M., (2002), E 5 1-8.
- [93] Schartel, B.; Braun, U.; Schwarz, U.; Reinemann, S.: Fire retardancy of polypropylene/flax blends. Polymer. 44 (2003), 20, pp. 6241-6250.
- [94] Saechtling, H.: Kunststofftaschenbuch. 27. Auflage. München: Carl Hanser Verlag 1998.
- [95] Domininghaus, H.: Die Kunststoff und Ihre Eigenschaften. 5., völlig neu bearbeitet und erweiterte Auflage. Berlin: Springer Verlag 1998.
- [96] Vogel, H.: Flammfestmachen von Kunststoffen, Technologie der makromolekularen Chemie, Reihe: Hilfsstoffe der Kunststofftechnik. Heidelberg: Dr. Alfred Hüthig Verlag GmbH. 1966, S. 158.
- [97] Fuhr, K.: Brandsicherheit von Kraftfahrzeugen. Tagungsband: 3. Fachtagung: Kunststoffe, Brandschutz- und Flammenschutzmittel. Süddeutsches Kunststoffzentrum , Würzburg 1998.

- [98] Mitzlaff, M.: Europäische Harmonisierung im Bauwesen. Tagungsband: 3. Fachtagung: Kunststoffe, Brandschutz- und Flammschutzmittel. Süddeutsches Kunststoffzentrum, Würzburg 1998.
- [99] DIN EN 13823: Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten – Thermische Beanspruchung. Deutsches Institut für Normung. Berlin, Köln Beuth-Verlag 2000.
- [100] DIN 4102-1: Brandverhalten von Baustoffen und Bauprodukten. Deutsches Institut für Normung. Berlin, Köln: Beuth-Verlag 1998.
- [101] Richtlinie 95/28/EG des Europäischen Parlamentes und des Rates vom 24. Oktober 1995 über das Brennverhalten von Werkstoffen der Innenausstattung bestimmter Kraftfahrzeugklassen; Dokument 395L0028; EUR-Lex: Geltendes Gemeinschaftsrecht; <http://europa.eu.int/eur-lex/de/lif/dat/>.
- [102] Kia, H.: Sheet moulding compounds: science and technology. Munich: Carl Hanser Verlag, München 1993.
- [103] Starke, J.: Beiträge zum Pressen langfaserverstärkter Kunststoffe – Aufheizen von flächigen verstärkten Thermoplasten – Faserorientierung – Rheologische Betrachtungen. In Aachener Beiträge zur Kunststoffverarbeitung Hrsg. Michaeli, W., IKV, RWTH Aachen: Dissertation, Verlag der Augustinus Buchhandlung, 1994.
- [104] Goldbach H., Koch B.: Pkw-Tür aus Kunststoff-Stahlblech-Verbund. 81 / 7 (1991), 634-637.
- [105] Goldbach, H.; Hoffner, J.: Hybridbauteil in der Serienfertigung. Kunststoffe. 87 (1997), 9, 1133-1138.
- [106] Koch, B.; Knözinger, G.; Pleschke, T.; Wolf, H.-J.: Hybrid-Frontend als Strukturbauteil. Kunststoffe. 89 (1999), 3, S. 82-86.
- [107] Wakeman, M.D. ; Eble, E. ; Beyeler, P.; Herrmann, T.; Månson, J-A.E: Hybrid thermoplastic composite beam structures integrating UD tow, stamped fabric, and over-injection/compression moulding. 'ECCM 11, 11th European Conference on Composite Materials', Rhodos(Greece)/ May 31 - June 03, 2004, (2004).
- [108] Hardt, B.; Reinirkens, G.: Hinter der Folie. Plastverarbeiter 47, Nr. 8, 1996, S. 8-21.

- [109] Hölzel, S.: In-Mould-Dekoration faserverstärkter Thermoplaste. '5. Int. AVK-TV-Tagung', AVK-TV(Ed.), Baden-Baden/ 17. -18. September 2002, Frankfurt, 2002, A6 1-10.
- [110] Krause, W. et. al.: Einsatzpotenzial von Schlaufenverstärkungen aus langglasfaserverstärktem Polypropylen.. '8. Int. AVK-TV-Tagung', AVK-TV (Ed.), Baden-Baden/ 27.-28. September 2005, Frankfurt, 2005, A11 1-10.
- [111] Geiger, O.; Droste, A.; Eyerer, P.; Henning, F.; Krause, W.: Neue Einsatzfelder für LFT-D-ILC Technologie - Lokal verstärkte Bauteile aus technischen Thermoplasten. '5. Int. AVK-TV-Tagung', AVK-TV(Ed.), Baden-Baden/ 17.-18. September 2002, Frankfurt (2002), B 5 1-16.
- [112] Wakeman, M. D.; Cain, T. A.; Rudd, C.; Brooks, D. R.; Long, A. C.: Compression Moulding of Sandwich Structures of GMTs and Co- Mingled Materials for Optimised Macro and Micro Mechanical Properties. '5 th ICAC '97', Glasgow, September 4-5, 1997.
- [113] Sommer, M.M.; Päßler, M.; Schledjewski, R.: The Composite Hurley - copying nature. JEC- Composites. June-July 2004, 2004, No. 10, p. 19.
- [114] Report on HYBRIDMAT 2: Strategies in the joining of hybrid materials in automotive structures – a mission to France and Germany, <http://www.faraday-advance.net/content/news/34.pdf>. verfügbar: 26.05.2005
- [115] Wöginger, A.: Prozesstechnologien zur Herstellung kontinuierlich faserverstärkter thermoplastischer Halbzeuge. Kaiserslautern: Dissertation Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, IVW-Schriftenreihe, Band 41. Kaiserslautern 2004.
- [116] Nowacki, J.: Prozessanalyse des Umformens und Fügens in einem Schritt von gewebeverstärkten Thermoplasten. Kaiserslautern: Dissertation Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, IVW-Schriftenreihe, Band 24. Kaiserslautern 2001
- [117] Mattus, V.: Zur werkstofflichen Verwertung lang- und endlosfaserverstärkter Thermoplaste. Kaiserslautern: Dissertation Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, IVW-Schriftenreihe, Band 6. Kaiserslautern 2000, S. 24-27.
- [118] Davis, Bruce A. et al.: Compression Moulding. München: Carl Hanser Verlag 2003.
- [119] Matsuoka, T.: Fiber orientation due to processing and its prediction. In 'Polypropylene: an A-Z reference' Hrsg.: Karger-Kocsis, J.. Kluwer 1999, S. 233-239.

- [120] Fujiyama, M.: Processing-induced morphology. In 'Polypropylene: an A-Z reference' Hrsg.: Karger-Kocsis, J.. Kluwer 1999, S. 668-677.
- [121] Matsuoka, T.: Warpage and its prediction in injection-molded parts. In 'Polypropylene: an A-Z reference' Hrsg.: Karger-Kocsis, J.. Kluwer 1999, S. 859-865.
- [122] Albrecht, M.; Dekorsy, T. et al.: Praxisnahe GMT-Werkstoffkennwerte für die Bauteilauslegung. *Kunststoffe*. 83 (1993), 3, 207-212.
- [123] Schlarb, A. K.H.: Zum Vibrationsschweißen von Polymerwerkstoffen. Kassel: Dissertation, Universität Gesamthochschule Kassel 1989, S. 88.
- [124] Fisa, B.; Meddad, A.: Weldlines. In 'Polypropylene: an A-Z reference' Hrsg.: Karger-Kocsis, J.. Kluwer 1999, S. 874-881.
- [125] Johannaber, F.; Michaeli, W.: Handbuch Spritzgießen. München, Wien: Hanser 2001.
- [126] Friedrich, K.; Schlarb, A. K.: Einführung in die Verbundwerkstoffe (Composites), Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, Kaiserslautern 2004/2005. S. 151-171.
- [127] Moser, K., Faser-Kunststoff-Verbund: Entwurfs- und Berechnungsgrundlagen, VDI-Verlag: Düsseldorf, 1992.
- [128] N.N.: Werkzeug zum Hinterspritzen lackierter Folien. *Kunststoffe*. 91 (2001), 12, S. 56-57.
- [129] McCarty, S. P. et. al.: A new approach for in-mold finishing: The Valyi Surface Finishing/ Compression Molding Process. 'ANTEC 99', Society of Plastics Engineers Annual Technical Conference(Ed.), New York, 1999, May 2-6, SPE, Society of Plastics Engineering, 1999, S. 2911-2914.
- [130] Schierenbeck, H.: Grundzüge der Betriebswirtschaftslehre. Hauptband. 11. Auflage. München: Oldenbourg Verlag 1993.
- [131] Rachlin, R.: Praxishandbuch Budgetplanung. Frankfurt/ Main: Campus Verlag 2001.
- [132] Uhlenbroich, Th.: Zinksulfid als Flammschutz-Additiv. *Kunststoffe*. 85. Jahrgang (1995), 1/1995, 90-91.
- [133] Schlimbach, J.; Mitschang, P.: Prozessbasierte Wirtschaftlichkeitsanalyse der FKV-Verarbeitungstechniken. In 'IVW-Kolloquium 2002' , Neitzel, M.. Kaisers-

lautern: Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, IVW-Schriftenreihe, Band 6. Kaiserslautern 2002, S. 244-248.

- [134] <http://www.kiweb.de>; Rubrik: Polymerpreise, Nachrichten: Nr. KI [201528] vom 28.10.2004; KI [202896] vom 30.05.2005 ; 02.06.2005 KI [202929] vom 02.06.2005.
- [135] Campus Datenbank, Version 4.5. CWFG mbH, Frankfurt a. M. 2001. <http://www.campusplastics.com/access/adress.html>.

8 Anhang

Tab. 8.1: Bewertung der Attribute der Tab. 2.6

Nr.	Attribut	Bedeutung x-Achse (0=gering; 1=wichtig)	Attributs- susprägung y-Achse (0=gering; 1=stark)	Änderungs- möglichkeit Kreisgröße	Maßnahme
1	Emissionen	0,1	0,1	0,1	C
2	Schadstoffe beim Recyc- ling	0,1	0,1	0,2	C
3	Schadstoffe bei der Her- stellung	0,1	0,2	0,2	C
4	Schadstoffe bei der Nut- zung	0,1	0,2	0,2	C
5	Durchgangswiderstand	0,5	0,2	0,5	C
6	Viskosität	0,45	0,25	0,7	C
7	Einfallstellen/ Schrumpf	0,1	0,4	0,4	C
8	Wasseraufnahme	0,1	0,5	0,2	D
9	Kriechen	0,1	0,7	0,1	D
10	Härte	0,55	0,1	0,55	A
11	Flammhemmung	0,75	0,2	0,4	A
12	Einstellbare Faserorientie- rung	0,8	0,2	0,3	A
13	Warm-/Formbeständigkeit	0,8	0,25	0,4	A
14	Wechselbeanspruchung	0,55	0,3	0,1	A
15	Festigkeit	0,75	0,35	0,5	A
16	Steifigkeit	0,75	0,35	0,5	A
17	Lackierfähigkeit	0,75	0,35	0,3	A
18	Oberflächengüte	0,75	0,35	0,3	A
19	Dichte	0,8	0,5	0,4	A
20	Chemische Beständigkeit	0,55	0,55	0,7	B
21	Zähigkeit	0,75	0,75	0,25	B
22	Schweißbarkeit	0,75	0,75	0,8	B
23	Fügefähigkeit	0,75	0,75	0,8	B
24	Formbarkeit	0,8	0,75	0,8	B
25	Kosten/kg	0,9	0,75	0,5	B
26	Recyclingfähigkeit	0,9	0,8	0,7	B

Tab. 8.2: Betriebswirtschaftliche Basisparameter

Betriebswirtschaftliche Basisparameter	Einheit	Größe (Matrix PP, GF 30 Gew.-%)
Arbeitstage	[Tage/ a]	250
Eff. Betriebsstunden p.a. im Zweischichtbetrieb	[h/ a]	3750
ROI (Return on Investment)	[Jahre]	5
Kalkulatorischer Zinssatz	[%]	8
Personalkostensatz	[€/h]	30
Raumkostensatz	[€/m ² /a]	210
Energiekosten	[€/kW]	0,11

Wartung und Instandhaltung	[%]	20
Schichtzulage	[%]	15
Ausschuss (einschließlich Einrichten)	[%]	4
Bauteilgewicht	[kg/Stück]	3,2
Werkzeuginnendruck	[MPa]	15
Bauteilfläche (bei Bauteildicke d=2,7mm)	m ²	1,05
Zykluszeit	[s]	60
Presszeit	[s]	50
Ausbringungsmenge	[Stück/h]	57,6

Liste betreuter Studien- und Diplomarbeiten

Maria Teresa Escribano, 2004

Investigation of the impact of imperfections in Sheet Moulding Compound (SMC) (semi-finished) on parts quality

Yuan Yao, 2004

Untersuchung des Fließverhaltens von Pressmassen

- 09/1997 - 04/1998 Betriebswirtschaftliche Studienarbeit: "Kundenorientierte Bedarfsanalyse für Bindemittel für Kfz-Faserformteile", Fa. BASF AG, Abt. EDD/KI, Ludwigshafen
- 06/1998 - 11/1998 Diplomarbeit: "Identifizierung neuer Geschäftsfelder für die BASF AG im Bereich Bauchemie - Untersuchung der deutschen Bauwirtschaft"; Fa. BASF AG, Abt. EDD/KB, Ludwigshafen

Basel, im März 2006

