

IVW - Schriftenreihe Band 133

Institut für Verbundwerkstoffe GmbH - Kaiserslautern

Florian Gortner

**Bio-basierte und nachwachsende
Füllstoffe für dichterereduzierte
Sheet Molding Compounds**

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. Ulf Breuer
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 2019

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 978-3-944440-30-9

Bio-basierte und nachwachsende Füllstoffe für dichtereduzierte Sheet Molding Compounds

Vom Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik
der Technischen Universität Kaiserslautern
zur Verleihung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

genehmigte

Dissertation

von

Herrn

Dipl.-Ing. (FH) Florian Gortner, M.Sc.

aus Rodalben

Tag der mündlichen Prüfung:	25.04.2019
Prüfungsvorsitzender:	Prof. Dr.-Ing. Paul Ludwig Geiß
1. Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Peter Mitschang
2. Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Frank Henning

D386

Für meine Familie

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand in den Jahren 2013 bis 2019 während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilung Verarbeitungstechnik der Institut für Verbundwerkstoffe GmbH.

Mein besonderer Dank gilt zunächst meinem Doktorvater und Erstgutachter, Herrn Professor Dr.-Ing. Peter Mitschang. Mit der Bereitstellung eines hervorragenden Arbeitsumfeldes und durch eine exzellente Betreuung bot er mir die Möglichkeit zur Anfertigung dieser Arbeit. Ebenso gilt mein Dank Herrn Professor Dr.-Ing. Frank Henning für die Zweitbegutachtung dieser Arbeit. Des Weiteren danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Paul Ludwig Geiß für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Während meiner Arbeit bildete die Zusammenarbeit und rege Diskussion mit sämtlichen Kolleginnen und Kollegen eine wichtige Grundlage und trug maßgeblich zum erfolgreichen Abschluss meiner Dissertation bei.

Ich danke besonders Herrn Michael Päßler für die Unterstützung, seine stets kritische und ehrliche Meinung, die wertvollen und ertragreichen Diskussionen und die Hilfe bei den ersten „Gehversuchen“ hinsichtlich SMC-Herstellung und -Verarbeitung. Ebenso gilt mein Dank den technischen Mitarbeitern der Abteilung Verarbeitungstechnik, im Speziellen Erhard Natter und Steven Brogdon, die die geplanten Versuche immer mit höchstem Eifer und Präzision unterstützt haben.

Ebenso danke ich Frau Heidrun Plocharzik für die vielen und aufschlussreichen Diskussionen und Hilfestellungen bezüglich der anfallenden Analysen. Wir konnten beide unsere Akzeptanz bezüglich der Arbeitsmethoden des jeweils anderen Kollegen erweitern und können jetzt auch fünf Nachkommastellen gerade sein lassen ☺. Frau Dr. Barbara Güttler möchte ich speziell für die Unterstützung im Bereich der Charakterisierung im Bereich bio-basierter Materialien danken. Ebenso gilt mein Dank den Kolleginnen und Kollegen des Instituts für Biotechnologie und Wirkstoffforschung (IBWF), im speziellen Frau Dr. Anja Schöffler und Herrn Dr. Jochen Fischer, die bei Fragestellungen bezüglich Schimmelbildung unterstützten.

Der guten Seele unserer Abteilung, Frau Andrea Hauck, gebührt ein besonderer Dank, da sie unermüdlich meine Paper, Präsentationen, Poster und Anträge von

Fehlern befreit hat. Außerdem hat sie in organisatorischen und privaten Angelegenheiten immer ein offenes Ohr und sorgt mit ihrer positiven Grundeinstellung immer für eine angenehme Arbeitsatmosphäre.

Ich danke weiterhin allen Kollegen der Abteilung Verarbeitungstechnik, die stets für eine produktive und positive Arbeitsatmosphäre gesorgt haben. Mein spezieller Dank gilt hierbei den ehemaligen und aktuellen Kollegen, besonders Dr.-Ing. Matthias Arnold, Dr.-Ing. Timo Grieser, Dr.-Ing. David May, Dr.-Ing. Jens Mack, Dr.-Ing. Marcel Christmann, Dr.-Ing. Jovana Džalto, Dr.-Ing. Martina Hümbert, Matthias Domm, Stephan Becker, Benedikt Bergmann, Christian Goergen, Andreas Krämer, Florian Kühn, Alexander Nuhn, Oliver Rimmel, Maximilian Salmins, Tim Schmidt, Jan Eric Semar, Björn Willenbacher, Julian Weber und Stefan Weidmann. Mein weiter Dank gilt allen technischen und wissenschaftlichen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern sowie Alumni des IVW.

Eine Arbeit in diesem Umfang ist alleine nicht zu bewältigen, daher danke ich allen Studierenden und studentischen Mitarbeitenden, die mich bei der Durchführung und Analyse der Versuche unterstützt und zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben.

Ohne den Rückhalt aus dem privaten Umfeld ist die Anfertigung einer solchen Arbeit nicht möglich. Ich möchte besonders meiner gesamten Familie danken, die durch ihre Förderung und Unterstützung meinen bisherigen Lebensweg entscheidend geprägt hat. Ebenso danke ich meinen Schwiegereltern, die sich immer für den aktuellen Stand der Arbeit interessiert haben und maßgeblich an den Korrekturen beteiligt waren.

Wenn ich eine Ablenkung zur Arbeit benötigt habe, waren meine Freunde jederzeit zur Stelle. Sie haben mich immer unterstützt und bei meinem Fünfjahresplan mitgefiebert ☺.

Der größte Dank gilt jedoch meiner Frau Theresa, die mir stets mit Geduld und Ausdauer zur Seite steht und mich meine Ziele bisher nie aus den Augen verlieren ließ. Speziell in den letzten Monaten dieser Arbeit sorgte sie durch ihre bedingungslose Unterstützung für die notwendigen Freiräume, die zum erfolgreichen Abschluss einer solchen Arbeit benötigt wurden.

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis verwendeter Abkürzungen	IV
Verzeichnis verwendeter Formelzeichen	VI
Kurzfassung.....	VIII
Abstract	IX
1 Einleitung und Zielsetzung	1
1.1 Ausgangssituation und Problemstellung.....	2
1.2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit	7
1.3 Verfügbarkeit bio-basierter und nachwachsender Rohstoffe	10
2 Stand der Technik	12
2.1 SMC-Märkte und -Anwendungen	12
2.2 Aufgaben und Wirkweisen einzelner Komponenten einer SMC-Rezeptur... 14	
2.2.1 Harzsystem	15
2.2.2 Füllstoffe	16
2.2.3 Verstärkungsfasern.....	19
2.2.4 Anwendungsspezifische Additive.....	22
2.3 Halbzeug-Herstellung und -Verarbeitung	29
2.4 Wesentliche Entwicklungen im Bereich der SMC-Technologie	34
2.4.1 Direkt-SMC (D-SMC)	34
2.4.2 Kohlenstofffaser-SMC (CF-SMC).....	35
2.4.3 Low-Density-SMC (LD-SMC).....	38
2.4.4 Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen in (duroplastischen) Fließpressmassen	39
3 Entwicklung eines SMC-Halbzeuges mit konventionellen Füllstoffen.....	42
3.1 Anforderungen an ein SMC-Halbzeug für technische Anwendungen.....	43
3.2 Verwendete Materialien.....	46
3.3 Charakterisierung konventioneller Füllstoffe.....	49
3.4 Entwicklung von SMC-Harzpastenrezepturen	53

3.4.1	Grundrezepturen.....	53
3.4.2	Charakterisierung der SMC-Rezepturen.....	55
3.4.3	Herstellung und Verarbeitung von SMC-Halbzeugen im Labormaßstab.....	61
3.4.4	Bestimmung mechanischer Kennwerte.....	63
3.4.5	Beurteilung der Halbzeugqualität.....	64
3.4.6	Optimierungsschritte der Harzpasten.....	65
3.5	Herstellung und Verarbeitung von SMC-Halbzeugen im industriennahen Maßstab.....	68
3.5.1	Harzpasten- und Halbzeugherstellung.....	68
3.5.2	Probekörperherstellung im industriennahen Maßstab.....	69
3.5.3	Bestimmung mechanischer Kennwerte.....	70
3.5.4	Bestimmung des realen Fasermassengehaltes.....	73
3.6	Zusammenfassung bisheriger Ergebnisse.....	75
4	Entwicklung eines SMC-Halbzeuges mit bio-basierten Füllstoffen.....	77
4.1	Anforderung an ein SMC-Halbzeug mit bio-basierten Füllstoffen.....	78
4.2	Theoretische Dichteabnahme durch das Ersetzen von konventionellen Füllstoffen durch bio-basierte Füllstoffe.....	81
4.3	Auswahl und Charakterisierung bio-basierter Füllstoffe.....	83
4.3.1	Dichtebestimmung ausgewählter bio-basierter Rohstoffe.....	83
4.3.2	Partikelgrößenbestimmung ausgewählter bio-basierter Rohstoffe.....	85
4.3.3	Feuchtigkeitsaufnahmeverhalten bio-basierter Rohstoffe.....	90
4.3.4	Einfluss bio-basierter Füllstoffe auf die Viskosität der Harzpaste.....	92
4.3.5	Zusammenfassung des Füllstoffscreenings.....	96
4.4	Anpassung der Rezeptur an die bio-basierten und nachwachsenden Rohstoffe im Labormaßstab.....	97
4.5	Herstellung und Verarbeitung von SMC-Halbzeugen im Technikumsmaßstab.....	99
4.6	Charakterisierung der Probekörper mit bio-basierten und nachwachsenden Füllstoffen.....	104

4.6.1	Bestimmung der Imprägnierqualität	104
4.6.2	Bestimmung mechanischer Kennwerte.....	106
4.6.3	Bestimmung des realen Fasermassengehaltes durch Veraschen	111
4.6.4	Bestimmung der Tendenzen zur Schimmelbildung.....	112
5	Empfehlungen zum Einsatz bio-basierter Füllstoffe in SMC-Halbzeugen.....	117
6	Zusammenfassung und Ausblick.....	119
7	Anhang.....	122
7.1	Übersichtstabelle marktgängiger GF-SMC-Halbzeuge.....	122
7.2	Berechnung der Harzpastendichte	122
7.3	Parameter der SMC-Herstellung im industrienahen Maßstab	123
7.4	Parameter der SMC-Probekörperplattenherstellung.....	124
7.5	Faserorientierung in einer SMC-Probe	125
7.6	Berechnung der maximal möglichen Dichtereduktion beim Einsatz von bio-basierten und nachwachsenden Rohstoffen	126
7.7	Partikelgrößenverteilung der konventionellen und der bio-basierten und nachwachsenden Füllstoffe.....	128
7.8	REM-Ansichten der verwendeten konventionellen und bio-basierten und nachwachsenden Füllstoffe.....	129
7.9	Vergleich des Viskositätsverhaltens der Referenz-Rezeptur IVW-1 und der optimierten Rezeptur IVW-Bio.....	130
7.10	REM-Ansichten der Bruchflächen der Dreipunkt-Biegeproben	131
7.11	Verwendete Pilze	131
7.12	Schimmelbildung auf SMC-Probekörperoberflächen.....	133
8	Literaturverzeichnis	134
	Publikationen und Konferenzbeiträge.....	146
	Betreute studentische Arbeiten.....	149
	Lebenslauf.....	150

Verzeichnis verwendeter Abkürzungen

Kurzform	Beschreibung
3K-Ansatz	Dreikomponentenansatz
AF	Aramidfaser
Al ₂ O ₃	Aluminiumoxid
Al(OH) ₃	Aluminiumhydroxid
ATH	Aluminiumtrihydrat
AVK	Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e.V.
bio-FS	Bio-basierter und nachwachsender Füllstoff
BMC	Bulk Molding Compound
C ₃₂ H ₁₈ N ₈	Phthalocyanin
Ca(OH) ₂	Kalziumhydroxid
CaCO ₃	Kalziumcarbonat
CaO	Kalziumoxid
CF	Kohlenstofffaser, aus engl.: carbon fiber
CF-SMC	Kohlenstofffaser-SMC
CNC	Computergesteuert, aus engl.: computerized numerical control
Co	Kobalt
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
DIN	Deutsches Institut für Normung, früher: Deutsche Industrie-Norm
D-SMC	Direkt-SMC
EG	Europäische Gemeinschaft
E-GF	Elektrisch isolierende Glasfaser, aus engl.: electric glasfaser
E-CR-GF	Chemisch beständige Glasfaser, aus engl.: E-glass corrosion resistant
EP-Harz	Epoxidharz
Fe ₂ O ₃	Eisenoxid
FKV	Faser-Kunststoff-Verbund
FMG	Fasermassengehalt
FS	Füllstoff
Gew.-%	Gewichtsprozent
GF	Glasfaser
GF-H	Hochfeste Glasfaser, aus engl.: high performance
GF-R	Chemisch resistente Glasfaser, aus engl.: resistance
GF-S	Glasfaser mit erhöhter Festigkeit, aus engl.: strenght
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
GHK	Glashohlkugel
GMT	Glasmattenverstärkter Thermoplast
HCl	Salzsäure

Kurzform	Beschreibung
HT-Faser	Hochfeste Fasern, aus engl.: high tenacity
IBWF	Institut für Biotechnologie und Wirkstoffforschung
ICT	Fraunhofer Institut für Chemische Technologie
IM-Faser	Fasern mit mittlerem E-Modul, aus engl.: intermediate modulus
IR	Infrarot
IVW	Institut für Verbundwerkstoffe
k.A.	keine Angabe (möglich)
KFZ	Kraftfahrzeug
kT	Kilotonne (1000 Tonnen)
KTL	Kathodische Tauchlackierung
LD-SMC	Low-Density-SMC
LFT	Langfaserverstärkter Thermoplast
LP-SMC	Low Profile SMC, SMC mit hoher Oberflächengüte
LS-SMC	Low Shrink SMC, SMC mit niedrigem Reaktionsschwund
Mg(OH) ₂	Magnesiumhydroxid
MgO	Magnesiumoxid
MM-G	Minimalmedium, Nährmedium in Sporenzucht
NF	Naturfaser
NFZ	Nutzfahrzeug
PA	Polyamid
PAN	Polyacrylnitril
PE	Polyethylen
phr	Massenanteil einer Komponente, aus engl.: parts per hundred
PP	Polypropylen
PrePreg	vorimprägnierte Fasern, aus engl.: preimpregnated fibres
QS	Qualitätssicherungsprozess
rCF-SMC	SMC-Halbzeug mit recycelten Kohlenstofffasern
REACH	Registration, Evaluation, Authorization and Restriction of Chemicals
REM	Rasterelektronenmikroskop
RTM	Resin Transfer Molding
Sb ₂ O ₃	Antimontrioxid
SdT	Stand der Technik
SMC	Sheet Molding Compound
TiO ₂	Titandioxid
TUK	Technische Universität Kaiserslautern
UHM-Faser	Hochmodulige Faser, aus engl.: ultra high modulus
UP	Ungesättigter Polyester
UP-Harz	Ungesättigtes Polyesterharz

Kurzform	Beschreibung
UV	Ultraviolettstrahlung
VE-Harz	Vinylester
WD	Arbeitsweite, aus engl. working distance
WPC	Wood Polymer Composite
WZI	Werkzeuginnendruck

Verzeichnis verwendeter Formelzeichen

Lateinische Formelzeichen

Symbol	Einheit	Beschreibung
A_0	%	Werkzeuggrundbelegung
A_w	g/m ²	Flächengewicht
b_{prod}	mm	Produktionsbreite
l_F	mm	Verstärkungsfaserlänge
m_1	g	Ausgangsmasse des trockenen Tiegels
m_2	g	Ausgangsmasse des trockenen Tiegels und der getrockneten Probe
m_3	g	Gesamtmasse des Tiegels inkl. Kalzinierungsrückstand
$m_{\text{Glasfasern}}$	g	Gewicht der Glasfasern
$m_{\text{Endgewicht inkl. Fraktion und Granulat}}$	g	Gewicht eines Siebes inkl. Granulat und Siebstoff
$m_{\text{Leergewicht inkl. Granulat}}$	g	Gewicht eines Siebes inkl. Granulat und Siebstoff
m_{Fraktion}	g	Gewicht einer Fraktion bei der Partikelgrößenbestimmung
$m_{\text{Pyk. gef.}}$	g	Gewicht des mit Harzpaste gefüllten Pyknometers
$m_{\text{Pyk. leer}}$	g	Gewicht des leeren Pyknometers
m_{trocken}	g	Grundgewicht eines Materials zu Beginn einer Messung
n_{FS}	1/min	Drehzahl Füllstoffdispersion
n_{HD}	1/min	Drehzahl Harzdispersion
p_i	bar	Werkzeuginnendruck
t_{FS}	s	Zeit Füllstoffdispersion
$t_{\text{Härt}}$	min	Aushärtedauer pro mm Bauteilstärke
t_{HD}	s	Zeit Harzdispersion
t_0	s	Zeitpunkt zu Beginn einer Messung
T_w	°C	Werkzeugtemperatur
v_1	mm/s	Schließgeschwindigkeit im Eilgang

Symbol	Einheit	Beschreibung
v_2	mm/s	Schließgeschwindigkeit während des Fließprozesses
$V_{\text{Pyk.}}$	cm ³	Volumen des Pyknometers
v_{prod}	m/min	Produktionsgeschwindigkeit

Griechische Formelzeichen

Symbol	Einheit	Beschreibung
$\alpha_{\text{T-SMC}}$	K ⁻¹	Wärmeausdehnungskoeffizient von SMC
$\alpha_{\text{T-Stahl}}$	K ⁻¹	Wärmeausdehnungskoeffizient von Stahl
$\rho_{3\text{K-Harz}}$	g/cm ³	Dichte eines 3-Komponenten-Ansatzes
ρ_{Additiv}	g/cm ³	Dichte des gewählten Additives
$\rho_{\text{Füllstoff}}$	g/cm ³	Dichte des Füllstoffs
$\rho_{\text{Harzpaste}}$	g/cm ³	Dichte der Harzpaste
$\rho_{\text{UP-Harz}}$	g/cm ³	Dichte des gewählten UP-Harzes
φ_{Additiv}	%	Rezepturabhängiger Anteil des Additives
$\varphi_{\text{Fraktion}}$	%	Rezepturabhängiger Anteil einer Fraktion
$\varphi_{\text{Füllstoff}}$	%	Rezepturabhängiger Anteil des Füllstoffs
$\varphi_{\text{UP-Harz}}$	%	Rezepturabhängiger Anteil des UP-Harzes
ρ_{GF}	g/cm ³	Dichte der Glasfasern

Kurzfassung

Der Werkstoff Sheet Molding Compound (SMC) wurde in den 1960er Jahren entwickelt und ermöglichte erstmals die großserientaugliche Herstellung von Faser-Kunststoff-Verbund (FKV) Bauteilen. Heutzutage werden ca. 20 % aller in Europa hergestellten Glasfasern in diesem Verfahren zu FKV verarbeitet. Die ökologischen und ökonomischen Anforderungen an FKV-Bauteile steigen kontinuierlich. Es werden immer leichtere, mechanisch höher belastbare und auch bio-basierte Pendanten zu bekannten Lösungen gefordert. Im Rahmen dieser Arbeit wurde der Einsatz von bio-basierten und nachwachsenden Rohstoffen als alternative Füllstoffe für duroplastische SMC-Halbzeuge untersucht. Die Verarbeitung der alternativen Füllstoffe in SMC-Halbzeugen darf keine negativen Einflüsse auf die Produktions- und Verarbeitungsabläufe mit sich bringen. Weiterhin soll durch den Einsatz der alternativen Füllstoffe eine Dichtereduktion um ca. 15 %, bei gleichbleibenden mechanischen Eigenschaften, erreicht werden. Die Verwendung der bio-basierten und nachwachsenden Füllstoffe darf nicht in Konkurrenz zur Nahrungsmittelindustrie stehen.

Zu Beginn der Arbeit wurden in Kooperation mit SMC-Experten und SMC-Herstellern die Spezifikationen und Anforderungen an ein Standard-SMC definiert. Anschließend wurde ein SMC-Halbzeug auf Basis eines ungesättigten Polyesterharzes, konventioneller mineralischer Füllstoffe und Glasfasern entwickelt. Dieses Halbzeug erfüllt mit einer Dichte von $1,95 \text{ g/cm}^3$, einem E-Modul von $10,4 \text{ GPa}$ und einer Zugfestigkeit von 100 MPa die geforderten Spezifikationen und diente im weiteren Verlauf der Arbeit als Referenz.

Im Rahmen der Arbeit wurde nachgewiesen, dass die Verarbeitung von bio-basierten und nachwachsenden Rohstoffen eine Adaption der zuvor entwickelten Harzpaste erfordert und Sonnenblumenkernschalenmehl als Füllstoff die konventionellen Füllstoffe zu 100 % ersetzen kann. Die resultierende Halbzeugdichte beträgt $1,55 \text{ g/cm}^3$ und liegt damit 20 % unter dem Referenzmaterial. Sowohl die mechanischen Kennwerte (E-Modul $10,8 \text{ GPa}$ und Zugfestigkeit 96 MPa) als auch die Herstellung und Verarbeitung der Harzpaste erreichen die Referenzwerte und sind mit konventionellen Halbzeugen vergleichbar. Im Rahmen der Arbeit konnte somit die Tauglichkeit bio-basierter und nachwachsender Füllstoffe für einen möglichen Serieneinsatz in SMC-Halbzeugen nachgewiesen werden.

Abstract

Sheet Molding Compound (SMC) was developed in the 1960s and initially enabled the production of glass fiber reinforced polymer composite (GFRPC) in mass scale production. Nowadays, both material and process are well established for the production of semi-structural components in various applications from construction industry to automotive components. Currently, approximately 20% of all glass fibers produced in Europe are processed to SMC. Increasing strict ecological and economical requirements for construction materials, force further development of SMC in order to strengthen its sales markets and open up new ones.

The objective of this work is the development of a SMC semi-finished product, using bio-based and renewable materials as alternative filler materials. The processing of the alternative fillers must not have any negative influence on the production and processing procedures. Furthermore, the use of alternative fillers should achieve a density reduction of 15% while maintaining the same mechanical properties. The use of bio-based and renewable fillers must not compete with the food industry.

At first, specifications and requirements for a standard SMC were defined in cooperation with SMC experts and producers. Afterwards a SMC semi-finished product based on unsaturated polyester resin, glass fibers and conventional mineral fillers was developed. With a density of 1.95 g/cm^3 , a Young's modulus of 10.4 GPa and a tensile strength of 100 MPa this SMC fulfills the specifications and is used as a reference for further development.

In a second step a SMC with bio-based and renewable fillers was developed. This work proves the complete replacement of conventional filler materials by bio-based and renewable filler materials. Therefore an adaption of the resin paste is necessary. The best results were achieved with a resin paste using sunflower hulls flour as filler material. The resulting semi-finished product shows a density of 1.55 g/cm^3 and both processability and mechanical properties are comparable to conventional SMC materials. With a fiber mass content of 30% by weight, a Young's modulus of 10.8 GPa and a tensile strength of 96 MPa are achieved.

1 Einleitung und Zielsetzung

Faser-Kunststoff-Verbunde (FKV) erfreuen sich zunehmender Beliebtheit bei vielfältigen technischen Anwendungen. Dies liegt sowohl in ihrem Aufbau als auch in einer Reihe von Vorteilen begründet, die sie für immer mehr Anwendungen interessant machen. Bei einem FKV werden Verstärkungsfasern und eine polymere Matrix kombiniert. Hierbei werden die positiven Eigenschaften der jeweiligen Komponenten vorteilhaft verknüpft, die Nachteile werden im Idealfall kompensiert [1]. Als Verstärkungsfasern werden heutzutage meist Glas- (GF), Kohlenstoff- (CF), Aramid-(AF) und Naturfasern (NF) eingesetzt. Diese werden in thermoplastische, duroplastische oder elastomere Matrixsysteme eingebettet. Hierbei bestimmen die Verstärkungsfasern die mechanischen Eigenschaften (z. B. Steifigkeit und Festigkeit) des FKV. Die Matrix überträgt durch Schub die auf den FKV wirkenden äußeren Kräfte in die Verstärkungsfasern und schützt diese zusätzlich vor äußeren, z. B. chemischen, thermischen und mechanischen Einflüssen. Hierdurch bieten FKV ein sehr hohes spezifisches Leichtbaupotenzial. Dies bedeutet, dass sehr hohe mechanische Eigenschaften wie zum Beispiel Festigkeit und Steifigkeit im Verhältnis zu einem geringen Eigengewicht erreicht werden können. Durch Topologieoptimierung besteht die Möglichkeit, FKV-Bauteile lastgerecht auszulegen und nur dort Material einzusetzen, wo es benötigt wird [2]. Weiterhin bieten FKV eine hohe Medienbeständigkeit; durch die Auswahl entsprechender Fertigungsverfahren, wie zum Beispiel der presstechnischen Verarbeitung, können sehr gute Oberflächenqualitäten erreicht werden [3]. Vorangetrieben wurden die frühen FKV-Entwicklungen hauptsächlich durch Anwendungen in den Bereichen Luft- und Raumfahrt. Heutzutage liegen diese hauptsächlich im Bereich der nachhaltigen Gewinnung von Energie, im Bereich von Mobilitätsanwendungen und im Bau- und Infrastruktur-Sektor, in dem ca. 30 % aller glasfaserverstärkter Komponenten verbaut werden [4].

Typische Randbedingungen, die ein FKV-Bauteil erfüllen muss, sind mechanische Leistungsfähigkeit, äußere Lasten, geplante Stückzahlen und Kosten. Diese bedingen eine angepasste Materialauswahl. Entsprechend der Randbedingungen und des Materials wird anschließend ein Herstellprozess, in dem die entsprechenden Bauteile produziert werden, ausgesucht. Bei der Wahl von Verstärkungsfasern mit einer Länge < 1 mm, welche als Kurzfasern bezeichnet werden, wird oftmals das Spritzguss-Verfahren gewählt. Hierbei sind Großserien von mehreren 100.000 Bauteilen pro

Jahr möglich. Verstärkungsfasern mit einer Länge von bis zu 50 mm werden als Langfasern bezeichnet und hauptsächlich in formgebenden Fließpressverfahren mit Stückzahlen bis 500.000 pro Jahr verarbeitet [5]. Hierbei werden meist die Halbzeuge Glasmattenverstärkte Thermoplaste (GMT), Langfaserverstärkte Thermoplaste (LFT) und duroplastische Sheet Molding Compounds (SMC) verarbeitet. Die Fasern mit einer Länge > 50 mm werden als Endlosfasern bezeichnet und werden meist nur durch die Bauteildimensionen limitiert. Aus Endlosfasern werden meist textile Flächen, welche als Gewebe und Gelege bezeichnet werden, oder Tapes hergestellt. Durch die Verarbeitung dieser Halbzeuge ist eine definierte Faserorientierung, zum Beispiel entlang von Lastpfaden, in Bauteilen möglich. Hierdurch weisen FKV mit Endlosfaserverstärkung höchste mechanische Eigenschaften, bezogen auf das entsprechende Bauteilgewicht, auf [2, 6]. Es gilt jedoch zu beachten, dass die Herstellung der Verstärkungsfasern zum Teil sehr energieintensiv ist [7].

In dieser Arbeit wird der Werkstoff Sheet Molding Compound (SMC) untersucht. SMC setzt sich aus Verstärkungsfasern, einer duroplastischen Matrix, anwendungsspezifischen Additiven und Füllstoffen, meist Kalziumcarbonat (CaCO_3) zusammen. Der Werkstoff war einer der ersten, mit dem die großserientaugliche Herstellung von FKV-Bauteilen möglich war. Heute ist er, aufgrund seines günstigen Preises, der vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten und der guten erreichbaren mechanischen Eigenschaften, industriell etabliert und sehr weit verbreitet. In dieser Arbeit wird der Aspekt der Nachhaltigkeit untersucht. Dieser Aspekt wird durch den Einsatz von bio-basierten und nachwachsenden Rohstoffen, welche als alternative Füllstoffe eingesetzt werden, behandelt. Durch das Ersetzen der konventionellen Füllstoffe durch Leichtbaufüllstoffe ist es möglich, die Dichte des Materials um bis zu 20 %, bei annähernd gleichen mechanischen Eigenschaften zu reduzieren und somit sowohl dem aktuellen Leichtbautrend als auch dem Einsatz bio-basierter Werkstoffe zu entsprechen.

1.1 Ausgangssituation und Problemstellung

SMC wurde in den frühen 1950er Jahren durch den Amerikaner Charles Fisk entwickelt. Ihm gelang es zum ersten Mal, ungesättigte Polyesterharze (UP-Harz) einzudicken und diese mit Textilglasmatten zu verstärken [8]. Zu Beginn der 1960er Jahre gelang der deutschen Chemieindustrie eine prozesssichere Eindickung von Polyesterharzen mittels Erdalkalioxiden zu realisieren. Es war erstmals möglich, einen Vis-

kositätsverlauf beginnend bei 5.000 - 20.000 mPa·s auf über 100 Mio. mPa·s zum Ende einer definierten Eindickung einzustellen [9]. Nach der Eindickung des Halbzeugs ist dieses für mehrere Monate lagerfähig. Eine vollständige Aushärtung erfolgt in einem Verarbeitungsprozess bei einer Werkzeugtemperatur größer 125 °C.

Die Entwicklung des SMC-Verarbeitungsprozesses begann in den 1970er Jahren. Es gelang erstmals, die heute üblichen Breitschneidwerke, welche die gleichzeitige Verarbeitung von mehreren Glasrovings zu einem Faserteppich ermöglichten, auf Flachbahnanlagen zu integrieren. Hierdurch konnten Halbzeuge mit frei wählbarer Breite (anfänglich auf 1500 mm begrenzt), verschiedenen Fasergehalten, Schnittlängen und Flächengewichten hergestellt werden. Mit zunehmender Qualität der Halbzeuge ist auch das Anwendungsspektrum gewachsen. Dieses war anfänglich, aufgrund der sehr guten isolierenden Eigenschaften, auf die Elektroindustrie beschränkt und wurde in Richtung Automobilindustrie erweitert. Ein großes Hindernis beim Einsatz von SMC-Bauteilen besteht im Schrumpfen der Bauteile, welcher im Bereich von bis zu 4 % liegt. Eine Anpassung der SMC-Rezepturen durch Wahl entsprechender Füllstoffe und Prozessadditive ermöglicht es, den Schrumpf großteils zu kompensieren. Diese Möglichkeit wird in Kapitel 2.2.4 thematisiert. Die SMC-Technologie ermöglichte den Entwicklern erstmals gegenüber den konventionell verwendeten Nasspress- und Handlaminier-Verfahren eine größere Gestaltungsfreiheit der Bauteile. Dies äußerte sich in möglichen Wändickenveränderungen, dem Einbringen von Rippen und Domen oder dem Umfließen von Befestigungsbuchsen. Nach DIN EN 14598-1 wird SMC als eine flächige, teigartige, verstärkte, härtbare Formmasse aus duroplastischen Reaktionsharzen in Form einer Matte beschrieben [10]. Für Standard SMC-Halbzeuge werden meist Harzsysteme auf Basis von UP-Harzen, Glasfasern mit einer Faserlänge von ca. 25,4 - 50,8 mm (1" - 2"), verschiedene anwendungsspezifische Additive und mineralische Füllstoffe genutzt. Die Zusammensetzung eines Standard SMC-Halbzeuges ist in Abbildung 1.1 aufgeführt. Durch Variation der einzelnen Komponenten ist es möglich, die Eigenschaften der SMC-Halbzeuge und – Bauteile in einem breiten Spektrum, in Abhängigkeit des geplanten Anwendungsfeldes, zu variieren [11, 12]. Durch die Verwendung entsprechender Anti-Schrumpf-Additive und Füllstoffe werden die Wärmeausdehnungskoeffizienten α_{T-SMC} eines SMC-Halbzeuges dem Wärmeausdehnungskoeffizienten von Stahl $\alpha_{T-Stahl}$ angeglichen [13]. SMC-Halbzeuge besitzen spezifische mechanische Eigenschaften, welche mit denen von Aluminium-Legierungen vergleichbar sind, siehe Tabelle 1.1.

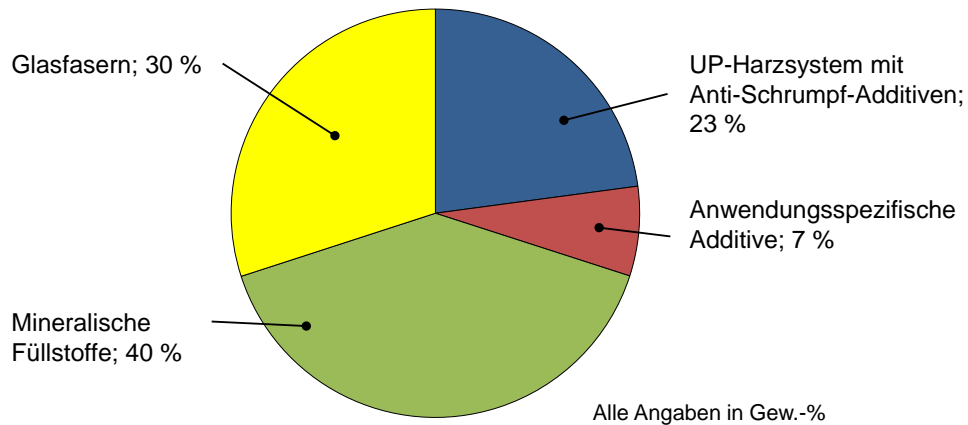


Abbildung 1.1: Zusammensetzung eines Standard SMC-Halbzeuges [6]

Spezielle SMC-Halbzeuge besitzen die Fähigkeit zur Abbildung von Class-A Oberflächen, wie sie zum Beispiel im Automobilbau gefordert sind. Hierbei sind Restriktionen hinsichtlich des Verstärkungsfasergehaltes und des Füllstoffanteils zu beachten, da diese sich negativ auf die Oberflächenqualität auswirken [14]. Durch die genannten mechanischen und verarbeitungstechnischen Vorteile ist eine Kombination von Stahl- und SMC-Bauteilen, zum Beispiel im Automobil- und Nutzfahrzeugbau möglich. Ein weiterer Vorteil von SMC-Bauteilen besteht in der Abbildung von komplexen Geometrien, wodurch eine größere Designfreiheit gegenüber Metallbauteilen ermöglicht wird [15]. Durch den Fließpressprozess wird eine gleichmäßige Faserverteilung der Verstärkungsfasern, auch in vorhandenen Verrippungen und Domen, in SMC-Bauteilen erreicht. SMC-Bauteile werden meist bei Losgrößen im Bereich von 8.000 bis 100.000 Stück pro Jahr eingesetzt, da die Investitionskosten deutlich geringer als bei der Herstellung vergleichbarer metallischer Komponenten liegen.

Tabelle 1.1: Vergleich ausgewählter mechanischer Kennwerte von Metallen, Nichteisenmetallen und SMC-Materialien

Bezeichnung	E-Modul in MPa		Zugfestigkeit in MPa		Dichte in g/cm ³	Quelle
	absolut	spezifisch	absolut	spezifisch		
Stahl S235JR (1.0037)	210.000	26.684	360	45,74	7,80	[16]
Aluminium (AlMgSi1)	66.000	24.354	310	114,39	2,71	[17]
GF-SMC (SMC1100)	13.000	7.222	150	83,33	1,80	[18]
CF-SMC (CSMC1100)	30.000	21.127	130	91,55	1,42	[19]

Dies lässt sich dadurch begründen, dass zur Herstellung von komplexen SMC-Bauteilen nur ein einziges Werkzeug benötigt wird. Bei der Herstellung von komplexen Metallbauteilen werden mehrere Umformwerkzeuge benötigt, da komplexe Metallbauteile in mehreren sequentiellen Umformvorgängen hergestellt werden [20]. Heutzutage besitzt der Werkstoff SMC einen marktdominierenden Anteil bei den Verfahren zur Herstellung von glasfaserverstärkten Kunststoffbauteilen (GFK) in Europa. Aktuell werden ca. 20 % aller GFK-Bauteile im SMC-Verfahren hergestellt, siehe Abbildung 1.2. Für Standard SMC-Halbzeuge werden meist Harzsysteme auf Basis von UP-Harzen, Schnittglasfasern mit einer Faserlänge von ca. 25,4 mm, verschiedene anwendungsspezifische Additive und mineralische Füllstoffe genutzt. Die Zusammensetzung eines klassischen SMC-Halbzeuges inklusive der Wirkweise der einzelnen Komponenten wird in Kapitel 2.2 näher beschrieben. Durch eine Anpassung der Rezeptur können die Werkstoffe auf die gleiche Wärmedehnung wie Stahl und die Fähigkeit zur Abbildung von Class-A Oberflächen eingestellt werden oder elektrisch isolierende, brandhemmende und elektromagnetisch durchlässige Eigenschaften aufweisen [11, 12].

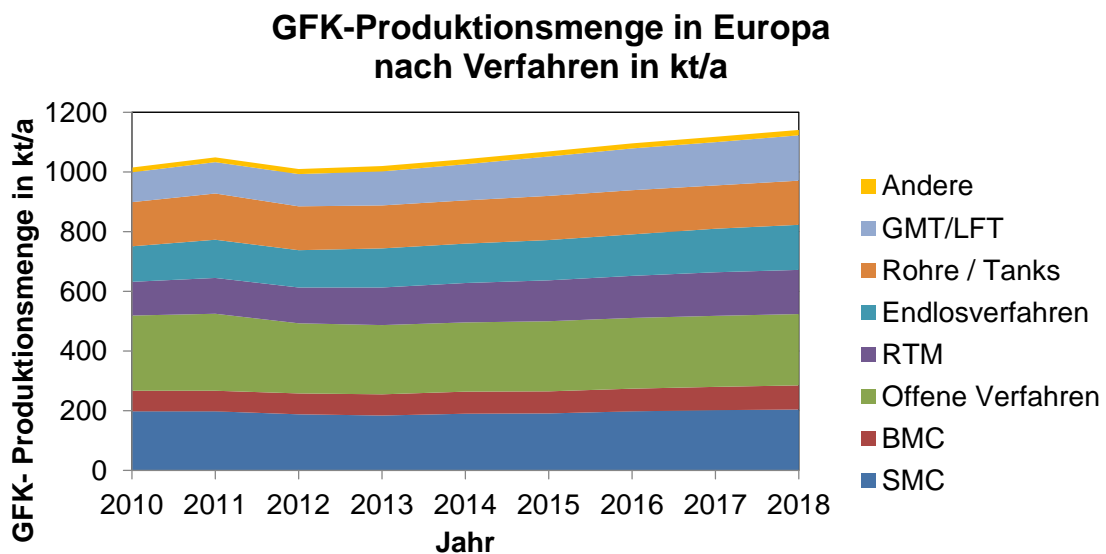


Abbildung 1.2: GFK-Produktionsmengen in Europa nach Verfahren [21, 4, 22]

Auf Basis dieser breit gefächerten Anwendungsmöglichkeiten und ihres attraktiven Preises haben sich die SMC-Werkstoffe in vielen Anwendungen etabliert. Um die Attraktivität von SMC-Werkstoffen für Endanwender auch künftig zu erhalten und zu steigern, ist unter dem Aspekt der Nachhaltigkeit eine Substitution fossiler durch nachwachsende Rohstoffe eine sinnvolle Alternative. Spätestens seit der Diskussion

um Ressourcenausbeutung und die Verlangsamung der Erderwärmung ist es für Hersteller, Verarbeiter und Nutzer von FKV-Bauteilen unumgänglich geworden, dieses Thema aktiv zu adressieren und neben einer Verringerung der CO₂-Bilanz, wie sie in der europäischen Verordnung EG NR. 443/2009 [23] festgeschrieben wurde, auch die Ausbeutung mineralischer Ressourcen sowie die Verschmutzung der Umwelt zu verringern. Mit der in Deutschland im Juli 2002 umgesetzten europäischen Richtlinie 2000/53/EG zur Altfahrzeugverordnung treten auch zunehmend Recycling-Aspekte in den Vordergrund [24]. Dies ist besonders bei SMC-Anwendungen im Kraftfahrzeug- (KFZ), Nutzfahrzeug- (NFZ) und Transportsektor wichtig. Basierend auf diesen Rahmenbedingungen wandelt sich der Trend vom High-Performance FKV hin zum Kompromiss zwischen CO₂- Fußabdruck und mechanischer Leistungsfähigkeit.

Abschätzung eines Absatzmarktes für SMC-Halbzeuge mit bio-basierten und nachwachsenden Füllstoffen

In Europa werden knapp 25 kT SMC- und BMC-Bauteile für den Automobilbereich produziert [4]. Der Einsatz von glasfaserverstärkten Kunststoffen im Automobilbau ist somit sehr weit verbreitet. Mittlerweile werden SMCs für die Automobilindustrie gefertigt, da sie leicht, widerstandsfähig und einfach zu handhaben sind, komplexe geometrische Formen abbilden können und dazu auch noch sehr preiswert erhältlich sind. Aktuell limitiert die Dichte der SMC-Halbzeuge die Anwendung von SMC im Automobilbereich. Die Entwicklung eines SMC-Halbzeuges mit geringerer Dichte wird schon seit Jahren von der Automobilbranche gefordert. Auf Basis dieser Forderungen wurden Low-Density SMC-Halbzeuge (LD-SMC) entwickelt, siehe Kapitel 2.4.3. Nach Abschätzung des SMC-Herstellers Lorenz Kunststofftechnik wird der Markt für SMC-Halbzeuge mit bio-basierten Füllstoffen auf mittelfristig 5 - 7 % des Absatzmarktes geschätzt, was einer Produktionsmenge von ca. 1.250 - 1.750 t/a bio-basierter Halbzeuge entsprechen würde. Auch ein Einsatz in der Automobilindustrie wird als realistisch betrachtet, wenn die Halbzeuge die Festigkeits- und Steifigkeitsanforderungen erfüllen, Witterungseinflüssen widerstehen und preislich für den Markt interessant sind.

1.2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines neuartigen SMC-Halbzeuges, bei dem ausgewählte erdölbasierte und mineralische Halbzeug-Komponenten durch teilweise bio-basierte und nachwachsende alternative Werkstoffe ersetzt werden. Es sollen Parameter hinsichtlich der erreichbaren Halbzeugqualität (z.B.: Harzpastenviskosität, Imprägnierqualität, Fasergehalt), der erreichbaren mechanischen Eigenschaften und der Verarbeitungsparameter abgeleitet werden. Der Fokus im ersten Teil der Arbeit liegt auf der Erlangung des Verständnisses der Wirkweise der einzelnen Komponenten der SMC-Halbzeuge. Mit Hilfe dieser Erkenntnisse wird eine SMC-Harzpaste auf Basis eines UP-Harzsystems, geschnittenen Glasfasern als Verstärkungsfasern und Kalziumkarbonat (CaCO_3) als konventionellem Füllstoff entwickelt. Dies ist notwendig, um ein dem konventionellen SMC entsprechendes Referenzmaterial zu definieren. Bisher wurden entsprechende Informationen weder von industrieller noch von wissenschaftlicher Seite aus veröffentlicht. Nachdem das Verständnis für das Halbzeug entwickelt wurde, werden in einem zweiten Schritt die konventionell verwendeten Füllstoffe durch bio-basierte und nachwachsende Rohstoffe ersetzt, um deren prinzipielle Tauglichkeit in einer SMC-Harzpaste nachzuweisen. Als gesetzte Randbedingung soll die Harzpaste unter konventionellen SMC-Verarbeitungsparametern, ohne anlagentechnische Änderungen, herstellbar und verarbeitbar sein. Die mechanischen Kennwerte der mit bio-basierten Füllstoffen hergestellten Probekörper sollen denen von konventionellen SMC-Halbzeugen, bei gleichem Fasermassengehalt (FMG), entsprechen.

Das Ziel der Arbeit lässt sich auf die folgenden Kernpunkte zusammenfassen:

- Entwicklung neuartiger SMC-Halbzeuge mit bio-basierten und nachwachsenden Füllstoffen
- Erlangung von Grundkenntnissen zur Entwicklung von SMC-Halbzeugen
- Entwicklung, Herstellung und Verarbeitung eines SMC-Halbzeuges auf Basis von ungesättigten Polyesterharzen und konventionellen Füllstoffen im Labor- und Technikums-Maßstab
- Ersetzen der konventionellen Füllstoffe mit einem maximalen Anteil an bio-basierten und nachwachsenden Füllstoffen

- Reduktion der SMC-Halbzeugdichte um mindestens 15 %, basierend auf der Abschätzung einer mittleren Füllstoffdichte der bio-basierten und nachwachsenden Rohstoffe von $1,0 \text{ g/cm}^3$
- Erhalt der mechanischen Kennwerte (Elastizitätsmodul, Zugfestigkeit, Biegemodul, Biegefestigkeit, Schlagzähigkeit) im Vergleich zu konventionellem SMC
- Einhaltung der Halbzeug- und Prozessparameter wie bei der Verarbeitung von konventionellem SMC

Aus der Zielsetzung und den damit verbundenen Kernpunkten ergibt sich die in Abbildung 1.3 dargestellte Struktur der Arbeit. Die einzelnen Inhalte werden nachfolgend beschrieben.

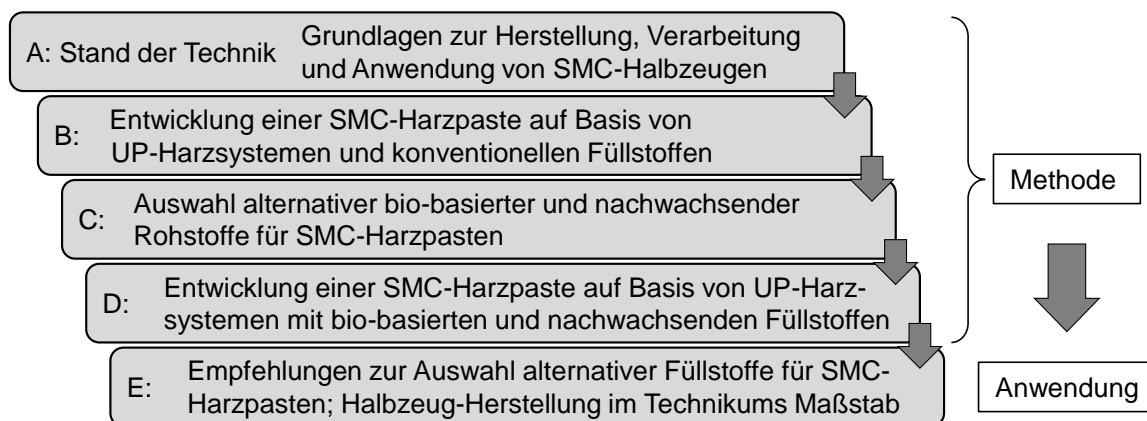


Abbildung 1.3: Struktur der Arbeit

A: Zu Beginn der Arbeit wird der Stand der Technik hinsichtlich der einzelnen Komponenten einer typischen SMC-Rezeptur, deren Verarbeitung zu einer SMC-Harzpaste, die anschließende Lagerung inkl. des Reifeprozesses sowie die Verarbeitung der Halbzeuge zu SMC-Bauteilen und deren Einsatzmöglichkeiten vorgestellt. Anschließend wird der Einfluss der einzelnen Komponenten einer Rezeptur hinsichtlich Verarbeitbarkeit und erreichbarer mechanischer Eigenschaften untersucht. Weiterhin werden wesentliche Entwicklungen im Bereich der SMC-Technologie (Direkt-SMC (D-SMC), Kohlenstofffaser-SMC (CF-SMC) und Low-Density-SMC (LD-SMC)) adressiert. Abschließend wird der Einsatz bio-basierter und nachwachsender Rohstoffe in duroplastischen Halbzeugen (SMC und BMC) zusammengefasst.

- B: Aufbauend auf den Ergebnissen aus dem Stand der Technik und Gesprächsrunden mit SMC-Experten werden in Kapitel 3 Anforderungen an eine SMC-Harzpaste bzw. an ein SMC-Halbzeug definiert. Im weiteren Verlauf des Kapitels wird eine SMC-Harzpaste, basierend auf ungesättigten Polyesterharzen, Glasfasern und konventionellen Füllstoffen entwickelt. Hierbei wird der Einfluss der einzelnen Komponenten zum Beispiel auf die Viskosität oder Dichte der Harzpaste untersucht.
- C: In Kapitel 4 werden die Auswahlkriterien für bio-basierte und nachwachsende Füllstoffe und deren Einsatz in SMC-Harzpasten identifiziert. Die Füllstoffe sollen Nebenprodukte der Holz- bzw. Nahrungsmittelindustrie sein und dürfen in keiner Konkurrenz zu dieser stehen. Die ausgewählten Füllstoffe müssen in ausreichenden Mengen und Qualitäten lieferbar sein. Basierend auf diesen Erkenntnissen wird eine SMC-Harzpaste entwickelt, welche bio-basierte und nachwachsende Rohstoffe nutzt. Durch die Verwendung von bio-basierten und nachwachsenden Rohstoffen, welche meist eine Dichte von ca. $0,9 - 1,2 \text{ g/cm}^3$ [25] aufweisen, soll die resultierende Dichte des SMC-Halbzeuges um ca. 20 % gesenkt werden. Dieses Halbzeug soll sich hinsichtlich der Herstellung, Verarbeitung, Lagerung und den Materialeigenschaften nicht von einem konventionellen SMC-Halbzeug unterscheiden. Ein besonderes Augenmerk wird auf die Feuchtigkeitsaufnahme und Schimmelbildung, welche bei bio-basierten Werkstoffen sehr wichtig ist, gelegt.
- D: Basierend auf den Untersuchungen in Kapitel 4 werden allgemeine Empfehlungen zur Auswahl von bio-basierten und nachwachsenden Rohstoffen und deren Einsatz in SMC-Harzpasten aufgestellt. Diese werden abschließend durch die Herstellung und Verarbeitung einer SMC-Harzpaste im industrienahen Maßstab validiert.

Im Ausblick der Arbeit soll die Möglichkeit diskutiert werden, rein petrochemisch-basierte Harze und Prozessadditive, wie zum Beispiel ungesättigte Polyesterharze (UP-Harze), interne Trennmittel und Dispergierhilfen durch (groß)teils bio-basierte Additive zu ersetzen. Hierbei sollen sich die Halbzeug-Eigenschaften nicht oder nur gering ändern.

1.3 Verfügbarkeit bio-basierter und nachwachsender Rohstoffe

Bei der Vorauswahl der bio-basierten und nachwachsenden Rohstoffe wurde darauf geachtet, dass diese regional aus deutschem und europäischem Anbau verfügbar sind. Hierdurch sollen lange Transportwege, welche die CO₂-Bilanz der Bioprodukte heraufsetzen, reduziert werden. Als mögliche alternative Füllstoffe wurden Holzmehle (Hart- und Weichholz), Rapsschrot, Reisschalen und Sonnenblumenkernschalen untersucht. Hierbei wurde darauf geachtet, dass die jeweils gewählten Produkte nicht in Konkurrenz zur Nahrungsmittelindustrie stehen und als Beiprodukte vorliegen.

Rapsschrot

Raps ist eine wirtschaftlich bedeutende Nutzpflanze, aus der unter anderem Rapsöl, welches als Speiseöl eingesetzt wird, und Biokraftstoff gewonnen wird. Diese Produkte werden aus den Rapssamen gewonnen, welche zu ca. 42 – 43% aus Öl bestehen. Hierzu wird die Rapssaat in Ölmühlen verpresst und das Rapsöl gewonnen. Das Rapsextraktionsschrot, welches nach der Ölgewinnung als Nebenprodukt zur Verfügung steht, wird meist zu Rapskuchen gepresst. Diese dienen als Proteinquelle in der Futtermittelindustrie bei Milchviehhaltung, Schweine- und Geflügelzucht [26]. Eine weitere Verwertungsmöglichkeit der Rapskuchen ist die Energiegewinnung durch thermische Verwertung. In Deutschland werden auf gut einer Million Hektar Ackerland Raps angebaut. Auf dieser Anbaufläche wird ein Ertrag von rund 3,3 Millionen Tonnen Raps erzielt [27].

Holzmehle

Holzabfälle werden in Deutschland meist energetisch (ca. 66 %) oder stofflich (ca. 33 %) genutzt. Bei der energetischen Nutzung werden die Stoffe thermisch verwertet, bei der stofflichen Nutzung hingegen werden die angefallenen Nebenprodukte meist zur Herstellung von Spanplatten oder mitteldichten Faserplatten genutzt [28]. Die Nebenprodukte sind unter anderem Sägespäne und Hackschnitzel, welche gemahlen und aufbereitet werden können. Je nach Holzsorte können alternative Anwendungsgebiete zum Beispiel die Verarbeitung als Füllstoff in thermoplastischen Anwendungen (z. B. Wood Polymer Composites (WPC)-Terrassendielen), Anwendung als Filtriermittel oder als Beimischung in der Futtermittelindustrie liegen.

Sonnenblumenschrot

Sonnenblumenschrot entsteht bei der Pressung von Sonnenblumensaaten in Ölmühlen. Bei diesem Vorgang wird das Sonnenblumenöl gewonnen, welches die größte wirtschaftliche Bedeutung aufweist. Das Sonnenblumenschrot, auch Sonnenblumenpresskuchen genannt, fällt hierbei als Nebenprodukt an, welches meist als Beimischung für die Wiederkäuer- bzw. Hühnerfütterung oder zur Energiegewinnung eingesetzt wird. Bei der Herstellung des Sonnenblumenöls können zwei Qualitätsstufen für geschälte und ungeschälte Sonnenblumenkerne unterschieden werden [29].

Reisschalen

Die größten Reisanbaugebiete der Welt liegen hauptsächlich im asiatischen Raum. Reis wird dort hauptsächlich in Indien, Thailand und China angebaut. Im europäischen Raum sind die Haupt-Anbauregionen Spanien und Italien. Heutzutage gehört Reis zu den wichtigsten Grundnahrungsmitteln. Die jährliche Anbaumenge beträgt ca. 600 Millionen Tonnen [30] weltweit. Bei der Ernte und Weiterverarbeitung der Reiskörner, auch Polieren genannt, fallen große Mengen an Reisschalen, welche auch Spelze genannt werden, an. Jährlich fallen weltweit mehr als 20 Millionen Tonnen an Reisschalen an [31], die es sinnvoll zu recyceln gilt. In Studien konnte die prinzipielle Verarbeitbarkeit von Reisschalen bzw. Reisschalenmehl-Asche als Ersatzstoff für Zement in Beton [32] bzw. als Füllstoff in SMC-Halbzeugen untersucht werden [33].

2 Stand der Technik

In diesem Kapitel wird ein grundlegender Überblick über den Werkstoff Sheet Molding Compound (SMC) gegeben. Hierbei werden unter anderem die Entwicklung des Werkstoffes und Verarbeitungsprozesses sowie Märkte, einzelne Komponenten einer typischen SMC-Rezeptur, die wesentlichen Entwicklungen und der Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen in SMC- und den artverwandten Bulk Molding Compound (BMC)-Halbzeugen dargelegt.

2.1 SMC-Märkte und -Anwendungen

Durch die Anpassung der SMC-Rezepturen an die jeweilige Anwendung ist es möglich, ein sehr breit gefächertes Anwendungsspektrum abzubilden. So können zum Beispiel durch Zugabe entsprechender Additive elektrisch isolierende oder brandhemmende Materialeigenschaften eingestellt werden. Durch die Zugabe von Aluminiumhydroxid, auch Aluminiumtrihydrat (ATH) genannt, ist es möglich, Brandschutznormen, welche es im öffentlichen Nahverkehr einzuhalten gilt, zu erfüllen [34]. Typische Anwendungsgebiete für SMC-Bauteile liegen im Bereich von elektrisch isolierenden Bauteilen wie zum Beispiel Schaltschränken und Lampengehäusen, Verkleidungselementen, in der Bauindustrie und im öffentlichen Nahverkehr sowie bei KFZ- und NFZ-Anwendungen. Im Privatbereich sind häufig Duschwannen und Waschbecken aber auch Haushaltsgeräte wie zum Beispiel Sandwichmaker und Bügeleisen (weiße Ware) aus SMC-Halbzeugen gefertigt [35], siehe Abbildung 2.1. Die Anwendungen sind in verschiedenen Ländern der Welt sehr unterschiedlich. In Japan werden fast alle typischen Badkeramiken aus SMC gefertigt [35]. In Europa ist das Material in diesen Anwendungsbereichen nur teilweise etabliert.



Abbildung 2.1: Typische Anwendungsfelder für SMC-Bauteile

Neue Entwicklungen hinsichtlich Rezepturen und Verstärkungsfasern haben den Einsatz von SMC-Halbzeugen für strukturelle Anwendungen und Außenhautanwen-

dungen im Fahrzeugbau (Class-A) ermöglicht. Diese Bauteile werden meist bei hochpreisigen Fahrzeugen aus Prestige und fahrdynamischen Gründen eingesetzt [36]. Durch den Einsatz von SMC-Bauteilen als Hang-on-Parts ist eine Gewichtsreduktion der Außenhautbauteile möglich, wodurch auch der Fahrkomfort des Fahrzeuges erhöht wird. Abbildung 2.2 zeigt aktuelle SMC Sicht-Bauteile im Automobilbereich. [37, 38, 39]



Chevrolet Corvette Z06
Motorhaube Class-A
Quelle: www.reinforcedplastics.com



Mercedes SL (R231)
Kofferraumklappe
Quelle: Mercedes-Benz



Lamborghini Aventador (2013) Hintere
Kotflügel Class-A Quelle: Automobili Lamborghini

Abbildung 2.2: Class-A SMC-Anwendungen im Automobilbau

Der Werkstoff SMC bietet weiterhin die Möglichkeit, FKV-Bauteile und -Komponenten zu recyceln und als Füllstoffe einzusetzen. Hierzu werden die entsprechenden Komponenten auf eine Partikelgröße von ca. 25 - 125 μm gemahlen und als Füllstoff in die SMC-Harzpaste eingearbeitet. Hierbei können bis zu 30 % der konventionellen Füllstoffe durch Recycling-Füllstoffe ersetzt werden, ohne dass es zu prozesstechnischen oder mechanischen Einbußen kommt [40]. Diese Möglichkeit kann auch zum Recyceln von Kohlenstofffasern eingesetzt werden. Hierbei kann das Potential der Kohlenstofffasern jedoch nicht mehr voll ausgeschöpft werden [40]. Die BMW Group konnte durch den Einsatz eines vernadelten Vlieses aus recycelten Kohlenstofffasern (rCF-Vlies), in Kombination mit einem Vinylesterharz, erstmals die industrielle Herstellung und Verwertung entsprechender SMC-Halbzeuge realisieren. Diese werden beim BMW G11 (7er Serie Bj. 2013) als C-Säulen Verstärkungsbleche eingesetzt und dienen somit als strukturelles Bauteil in der Fahrzeugkarosserie, siehe Abbildung 2.3. [41, 42]



C-Säule Verstärkungsblech
aus rCF-SMC

Konventioneller Rohbau
aus Stahl- und Aluminiumblechen

Abbildung 2.3: rCF-C-Säule „Verstärkungsblech“ im Rohbau des BMW G11 (7er) [43]

Ein weiteres Anwendungsgebiet von SMC-Bauteilen liegt im Bereich der Luftfahrtanwendungen. Zur Herstellung der LD-SMC-Halbzeuge werden anstelle der konventionellen Füllstoffe Glashohlkugeln mit einer Dichte von ca. $0,35 \text{ g/cm}^3$ eingesetzt [44, 14]. Dadurch können SMC-Halbzeuge mit einer Dichte von $1,4 \text{ g/cm}^3$ hergestellt werden [45]. In Kapitel 2.4.3 wird der Einsatz von Glashohlkugeln ausführlicher beschrieben.

2.2 Aufgaben und Wirkweisen einzelner Komponenten einer SMC-Rezeptur

Eine typische SMC-Rezeptur besteht aus bis zu zwölf Komponenten [6]. Aufgrund der vielen unterschiedlichen Bestandteile ist SMC ein sehr heterogener Werkstoff. Die Eigenschaften der SMC-Rezeptur und des späteren SMC-Halbzeuges bzw. SMC-Bauteils werden durch die einzelnen Komponenten deutlich beeinflusst.

Das Halbzeug kann in hochgefüllte Harzpaste, welche aus flüssigen und pulverförmigen Komponenten besteht, und Verstärkungsfasern untergliedert werden. Als Grundharze für die Harzpasten werden meist UP-Harze, aufgrund ihres günstigen Preises und der mechanischen Eigenschaften, genutzt. Weiterhin besteht die Harzpaste aus einem thermoplastischen Additiv, welches dem thermischen Schrumpf entgegenwirkt. Die anwendungsspezifischen Additive setzen sich aus Reaktionsinhibitoren, Initiatoren, internen Trennmitteln, Farbstoffen, Viskositätsbeeinflussern, Stabilisatoren, Entlüftern oder Fraktionen von recycelten Materialien zusammen. Abbildung 2.4 zeigt eine vereinfachte Zusammensetzung eines Standard-SMC-Halbzeuges. Der massenmäßig größte Anteil einer SMC-Rezeptur (40 Gew-%) wird durch die Füllstoffe eingenommen. Hierbei ist es möglich, die Füllstoffe in funktionelle und nicht-funktionelle Füllstoffe zu untergliedern. Durch die funktionellen Füllstoffe (z. B. Aluminiumhydroxid Al(OH)_3) können zum Beispiel brandhemmende bzw. selbstverlöschende Eigenschaften des Halbzeuges generiert werden.

Als nicht funktioneller Füllstoff dient zum Beispiel das Mineral Kalziumcarbonat (CaCO_3), durch welches kostengünstig das Volumen des Halbzeuges vergrößert werden kann. Bei den konventionellen Füllstoffen ist nachteilig die hohe Dichte von $2,4 \text{ g/cm}^3$ (Al(OH)_3) bzw. $2,7 \text{ g/cm}^3$ (CaCO_3) im Vergleich zu den übrigen Komponenten der Rezeptur zu nennen.

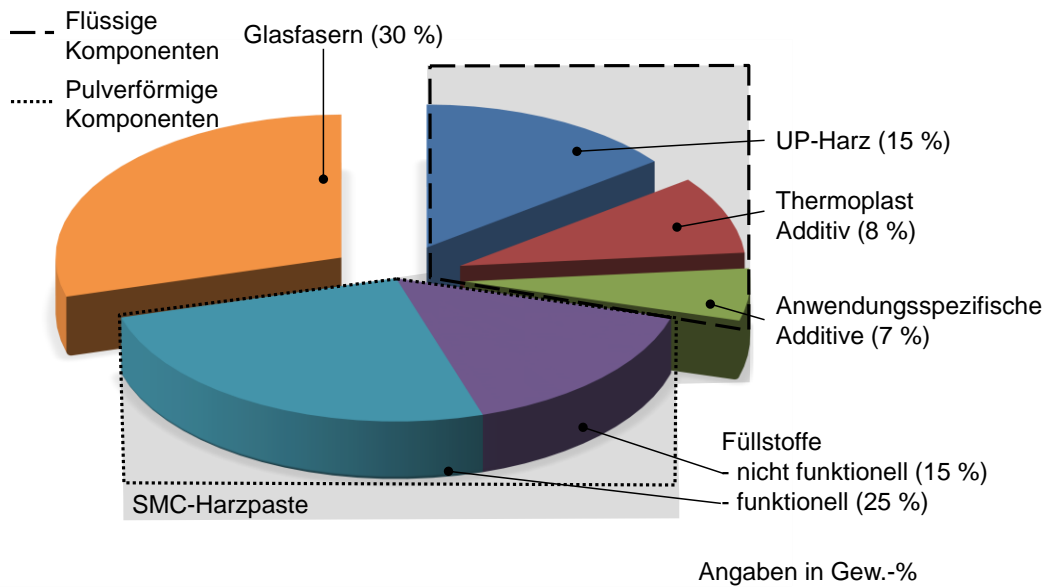


Abbildung 2.4: Vereinfachte Darstellung der Zusammensetzung eines konventionellen SMC-Halbzeuges [46]

2.2.1 Harzsystem

In SMC-Halbzeugen können unterschiedliche Harzsysteme, in Abhängigkeit des späteren Anwendungszweckes der Bauteile, verwendet werden. Die Variationsmöglichkeiten reichen von ungesättigten Polyesterharzen (UP) für Standardanwendungen über Vinylesterharze (VE) für chemische Stabilität bis hin zu Epoxidharzen (EP), welche hauptsächlich für Bauteile mit hohen mechanischen und thermischen Beanspruchungen genutzt werden. Aufgrund ihrer Verfügbarkeit, des günstigen Preises und der durchaus sehr guten mechanischen Eigenschaften, werden für Standard-SMC Komponenten hauptsächlich UP-Harzsysteme, welche als Produkt einer Polykondensationsreaktion aus gesättigten oder ungesättigten (C=C-Doppelbindung) Dicarbonsäuren und zweiwertigen Alkoholen (Dialkoholen) vorliegen, genutzt. Diese Reaktion wird unter Stickstoffatmosphäre bei Temperaturen zwischen 160 – 220 °C durchgeführt. Die mittlere Molekülmasse (Molmasse) der Makromoleküle liegt im Bereich von 1000 bis 3000 g/mol. Die hohe Molmasse wirkt sich positiv auf das Eindickungsverhalten aus. [12, 6]. Nachdem die gewünschte Molmasse erreicht wurde, wird das UP-Harz auf ca. 60 °C heruntergekühlt und anschließend in Styrol gelöst. Die gewünschten Eigenschaften wie zum Beispiel Lagerfähigkeit, Viskosität und Reaktivität können durch die Zugabe spezieller Prozessadditive gesteuert werden [12,

47, 6]. Nach der Polykondensation verfügen beide Komponenten über reaktive Doppelbindungen ($C=C$), welche sowohl durch Temperatureinfluss als auch durch chemische Komponenten geöffnet werden. Die Öffnung der Doppelbindungen führt zur Ausbildung eines irreversibel vernetzenden dreidimensionalen Polymernetzwerkes [47], siehe Abbildung 2.5. Die Aushärtung wird als radikalische Copolymerisation beschrieben. Bei der Aushärtung mittels Radikalstarter (bspw. Peroxide), welche bei Temperaturen ab ca. $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ als Initiatoren fungieren, werden vorhandene Doppelbindungen geöffnet und anschließend durch Coreaktion in die ungesättigte Polyesterkette ein dreidimensionales Netzwerk ausgebildet. Nach Abschluss der Vernetzungsreaktion beträgt der Styrolgehalt im Endbauteil meist ca. 2 - 4 %. [47, 48]

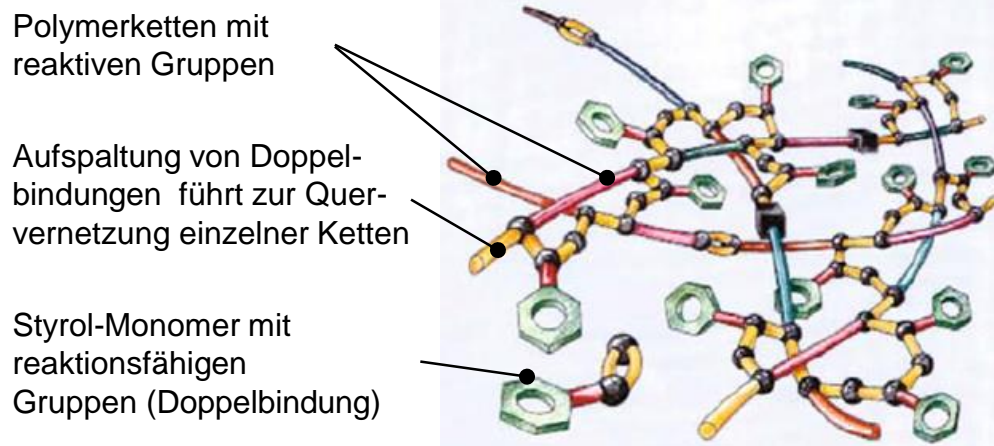


Abbildung 2.5: Schemabild eines dreidimensional vernetzenden UP-Harzsystems [6]

2.2.2 Füllstoffe

In Rezepturen konventioneller SMC-Halbzeuge werden bis zu 40 Gew.-% an Füllstoffen eingearbeitet, siehe Abbildung 2.4. Die Füllstoffe können in nicht-funktionelle und funktionelle Füllstoffe unterteilt werden. Die Aufgaben von funktionellen Füllstoffen können im Bereich des Brandschutzes oder im Bereich der Gewichtsreduktion liegen. Die Kosten dieser Füllstoffe überschreiten oft die Harzkosten. Als funktionelle Füllstoffe werden oftmals Aluminiumhydroxid ($\text{Al}(\text{OH})_3$) und Glashohlkugeln (GHK) verwendet. Die Aufgabe von nicht-funktionellen Füllstoffen besteht hauptsächlich darin, die Halbzeugkosten zu reduzieren [12]. Typische Aufgaben funktioneller und nicht funktioneller Füllstoffe in SMC-Halbzeugen sind unter anderem die Minimierung des Bauteilschrumpfs, die Sicherung des Fasertransports während der Verarbeitung, die Steigerung der Oberflächenqualität und der Chemikalienbeständigkeit sowie die Ausbildung von thermisch und elektrisch isolierenden Halbzeug-Eigenschaften [49].

In konventionellen SMC-Halbzeugen werden meist Kalziumcarbonat (CaCO_3), Aluminiumhydroxid ($\text{Al}(\text{OH})_3$), Silikate, Quarz- und Schiefermehl, Glashohlkugeln sowie gemahlene GFK-Reste als Füllstoffe verwendet [47]. Im Folgenden werden die am häufigsten verwendeten Füllstoffe Kalziumcarbonat, Aluminiumhydroxid und Glashohlkugeln beschrieben.

Kalziumcarbonat (CaCO_3)

Kalziumcarbonat ist der am häufigsten in SMC-Halbzeugen eingesetzte nichtfunktionelle Füllstoff. Dies liegt in seinen sehr guten Verarbeitungseigenschaften und im günstigen Rohstoffpreis begründet. Die mittlere Partikelgröße eines im Tagebau gewonnenen und aufbereiteten Kalziumcarbonates liegt im Bereich von 1 - 15 μm [50]. Für SMC-Anwendungen werden meist Kalziumcarbonate mit einem Partikeldurchmesser von 1,5 - 10 μm eingesetzt. Durch Variation entsprechender Chargen ($d_{50}=1,5 \mu\text{m}$ und $d_{50}=10 \mu\text{m}$) kann die resultierende mittlere Partikeldichte sehr gut eingestellt werden, was zu einer entsprechend geringen Harzpastenviskosität führt. Hierbei beträgt die mittlere Partikeldichte ca. $2,7 \text{ g/cm}^3$ [51, 52]. Das typische Erscheinungsbild der Kalziumcarbonat-Partikel ist in Abbildung 2.6 (links) gezeigt. Durch die Einarbeitung von Kalziumcarbonat in SMC-Harzpasten wird die Verarbeitungsschwindigkeit auf ein Minimum reduziert, wodurch eine prozesssichere Abbildung qualitativ hochwertiger Bauteiloberflächen, z. B. Class-A Oberflächen im Automobilbau, ermöglicht wird. Weiterhin bietet Kalziumcarbonat den Vorteil der Säurebeständigkeit, wodurch die Lackierbarkeit, z. B. in einer kathodischen Tauchlackierung (KTL), gewährleistet wird.

Aluminiumhydroxid ($\text{Al}(\text{OH})_3$)

Aluminiumhydroxid ist der in SMC-Halbzeugen am meisten verwendete funktionelle Füllstoff mit brandhemmenden und selbstverlöschenden Eigenschaften. Gewonnen wird dieser aus dem Mineral Gibbsit. Er stellt einen Zwischenschritt bei der Aluminiumherstellung dar und liegt in pulverförmiger Form mit einer Partikelgröße von 1,5 - 35 μm vor. Abbildung 2.6 zeigt das typische Aussehen von Aluminiumhydroxid-Partikeln. Knapp 35 % des Füllstoffs bestehen aus chemisch gebundenem Wasser, welches bei Temperaturen zwischen 200 - 400 $^\circ\text{C}$ freigegeben wird. Hierfür wird eine sehr große Wärmemenge, ca. 1200 kJ/kg, benötigt. Dies bedeutet, dass der Füllstoff seiner Umgebung sowohl Wärme entzieht als auch durch die Freisetzung des gebundenen Wassers Wasserdampf erzeugt, siehe (2.1).



Hierdurch wird sowohl Sauerstoff verdrängt, was zur Reduktion von Rauchgasen führt, als auch ein selbstverlöschender Effekt generiert. [12, 6]. Meist wird Aluminiumhydroxid bei Verkleidungsbauteilen im öffentlichen Nahverkehr eingesetzt, da hier besonders hohe Brandschutz-Auflagen erfüllt werden müssen.

Glashohlkugeln

Als funktionelle Leichtbaufüllstoffe werden meist Glashohlkugeln, auch Mikroglashohlkugeln genannt, eingesetzt. Diese bestehen aus einem chemisch inertem Borsilikatglas, zeichnen sich durch ihre sehr geringe Dichte von ca. $0,125 - 0,60 \text{ g/cm}^3$ [44] aus und besitzen eine Wandstärke von ca. $0,5 - 2,0 \mu\text{m}$. Durch ihre perfekte Kugelform, siehe Abbildung 2.6 (rechts), wird nur sehr wenig Harz benötigt, um diese in den Verbund einzubinden. Hierdurch wird die Harzpastenviskosität durch die Zugabe nur gering erhöht, wodurch das Einbringen großer Volumenanteile ermöglicht wird. Es gilt jedoch zu beachten, dass die Kugeln äußerst empfindlich auf äußere Krafteinwirkung reagieren und als letzte Komponente in eine Harzpaste bei möglichst geringen Drehzahlen dispergiert werden sollen [12].

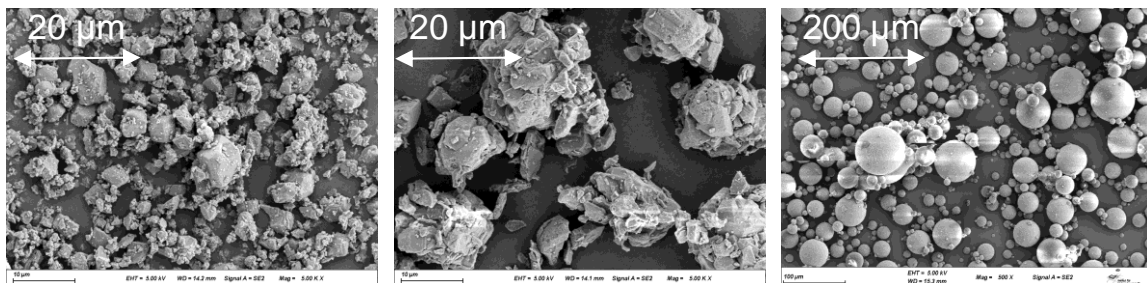


Abbildung 2.6: Rasterelektronenmikroskop (REM) -Aufnahmen von typischen SMC-Füllstoffen mit 5000-facher Vergrößerung; links Kalziumcarbonat, mittig: Aluminiumhydroxid, rechts: Glashohlkugeln mit 500-facher Vergrößerung

Die Verarbeitung soll bei reduziertem Pressdruck durchgeführt werden. Durch die Möglichkeit der Zugabe großer Volumen von Glashohlkugeln besteht die Gefahr, dass die Halbzeuge und später auch die Bauteile verspröden. Bei der Herstellung von Class-A Sichtflächen wird meist eine Mischung aus Kalziumkarbonat und Glashohlkugeln verwendet, um ein Optimum zwischen Leichtbaugüte und Oberflächenqualität zu erreichen [14].

2.2.3 Verstärkungsfasern

SMC-Halbzeuge werden üblicherweise mit Schnitffasern von kurzer bis mittlerer Länge (1“ - 2“ entspricht ca. 25,4 - 50,8 mm) verstärkt. Die Schnitffasern werden über Breitwalzenschneidwerke homogen, regellos und isotrop im Halbzeug verteilt. Die Schnitffasern sind zum einen für die mechanischen Eigenschaften im Halbzeug verantwortlich, zum anderen wirken sie dem Volumenschrumpf bei der Heißhärtung der Halbzeuge entgegen und sorgen für Dimensionsstabilität der Bauteile. Durch das Einbringen der Schnitffasern im Halbzeug ist es möglich, während des Verarbeitungsvorganges durch Fließprozesse komplexe Geometrien mit homogenen mechanischen Eigenschaften abzubilden. In SMC-Halbzeugen werden aufgrund ihres Marktpreises und der Verfügbarkeit hauptsächlich Glasfasern (Anteil > 97 Gew.-%) als Verstärkungsfasern eingesetzt. Entwicklungen in den letzten Jahren haben dazu geführt, dass unter anderem auch Kohlenstofffasern, Naturfasern und auch Basaltfasern als Verstärkungsfasern in SMC-Halbzeugen eingesetzt werden. Tabelle 2.1 gibt einen Überblick über ausgewählte mechanische Kennwerte ausgesuchter Fasertypen. Die Herstellung und die Unterschiede der einzelnen Fasertypen werden im Folgenden erläutert. Durch die Verwendung von Kohlenstofffasern können Halbzeuge mit erhöhten mechanischen Eigenschaften hergestellt werden. Der Einsatz von Natur- und Basaltfasern soll die Herstellung eines „grünen SMC“ ermöglichen [8].

Tabelle 2.1: Mechanische Kennwerte ausgewählter Verstärkungsfasern, nach [53]

Faser		Zug			Druck	Dichte	T _{max}
		Modul in GPa	Festigkeit in GPa	Dehnung in %	Festigkeit in GPa		
Glas	E-Typ	80	3,5	4,0	-	2,54	350
	S-Typ	90	4,5	5,7	1,1	2,46	300
Kohlenstoff	PAN-HT	240	3,75	1,6	2,9	1,78	500
	PAN-HM	400	2,45	0,7	1,6	1,85	600
	PAN-UHM	540	1,85	0,4	1,1	2,0	600
Stahl	-	200	2,8	4,8	-	7,8	1000
Natur	Hanf	70	0,6	1,6	-	1,45	200
	Flachs	30	0,75	2,0	-	1,48	200
Basalt	-	87	4,5	-	-	2,75	800

Glasfasern (GF)

Glasfasern sind die am meisten in SMC-Halbzeugen eingesetzten Verstärkungsfasern. Sie zeichnen sich hauptsächlich durch ihre hohe Wirtschaftlichkeit, eine gute Verfügbarkeit und die im Vergleich zu Kohlenstofffasern hohe Bruchdehnung aus. Für verschiedene Anwendungszwecke stehen unterschiedliche Glasfasersorten zur Verfügung. Meist werden E-Glasfasern (E-GF „Electric“) aufgrund ihrer hohen Wirtschaftlichkeit und ihrer sehr guten mechanischen Eigenschaften eingesetzt [54, 1]. Eine umweltfreundliche und borfreie Alternative zu E-Glasfasern bieten E-CR-Glasfasern (E-CR – „E-Glass Corrosion Resistant“), welche vergleichbare elektrisch isolierende Eigenschaften aufzeigen, aber deutlich korrosionsbeständiger sind [55]. Weiterhin sind H-, R- und S-Glasfasern (H – high performance, R – resistance, S – strength) als Fasertypen verfügbar. Diese weisen deutlich verbesserte mechanische Kennwerte und eine höhere Temperaturbeständigkeit auf, sind allerdings deutlich teurer als konventionelle E-Glasfasern, siehe Tabelle 2.1. Glasfasern werden im so genannten Düsenzieh-Verfahren hergestellt und direkt nach dem Abzug mit einer Schlichte versehen [53]. Die Aufgaben der Schlichte sind unter anderem die Gewährleistung der Faser-Matrix-Anbindung im Bauteilverbund und die Assemblierbarkeit der einzelnen Glasfasern zu Rovings. Der Durchmesser der Einzelfasern beträgt meist 9,5 - 16 μm . Diese werden zu Strands zusammengefasst und diese zum Roving assembliert. Ein typischer Roving, wie er für die SMC-Herstellung genutzt wird, besitzt meist 2400 bzw. 4800 tex. Dies bedeutet, dass ein Kilometer des entsprechenden Rovings 2400 bzw. 4800 g wiegt. Der Schlichteanteil beträgt meist ca. 1,4 - 1,8 Gew.-%. [14, 8]

Kohlenstofffasern (engl.: carbonfiber - CF)

Kohlenstofffasern bieten gegenüber Glasfasern den Vorteil deutlich höherer mechanischer Eigenschaften und einer geringeren Dichte, siehe Tabelle 2.1. Heute werden Kohlenstofffasern fast ausschließlich aus Precursor-Materialien, die aus Polyacrylnitril (PAN) synthetisiert werden, hergestellt. In einem Oxidations- und einem Karbonisierungsschritt werden die Precursor in Kohlenstofffasern umgewandelt. Durch eine Anpassung der Prozessführung können die mechanischen Eigenschaften der Fasern hinsichtlich einer hohen Zugfestigkeit und Bruchdehnung oder hoher Modulwerte angepasst werden. Als Standard werden high tenacity (HT)-Fasern vertrieben. Darüber hinaus sind Fasern mit erhöhtem E-Modul (IM = intermediate modulus, HM = high modulus und UHM = ultra high modulus) auf dem Markt verfügbar. Die Herstellung

von HM- und UHM-Faser ist jedoch sehr energieintensiv, was zu sehr hohen Halbzeugkosten führt. Die einzelnen Kohlenstofffasern werden in Bündeln zusammengefasst und üblicherweise in 1K, 2K, 3K, 6K, 12K, 24K und 48K bzw. 50K Rovingspulen vertrieben. Hierbei beschreibt K die Zusammenfassung von 1000 einzelnen Kohlenstofffasern. Für die Herstellung von SMC-Halbzeugen werden aufgrund des Preises meist 24K bzw. 50K Rovings, auch „heavy tow“ genannt, genutzt. Diese sind ca. achtfach teurer als Glasfasern [15, 1].

Bei der Verwendung von Kohlenstofffasern in SMC-Halbzeugen werden zwei verschiedene Prozesswege für eine optimale Imprägnierung der Faserabschnitte verfolgt. Diese sind zum einen die konventionelle Verarbeitung mittels Breitwalzenschneidwerken und anschließender Imprägnierung der Fasern durch die Harzpaste. Zum anderen werden die CF-Rovings mit der Harzpaste vorimprägniert und anschließend geschnitten, was zu einer homogeneren Imprägnierung der Halbzeuge führt. Weiterhin besteht die Möglichkeit in SMC-Halbzeugen recycelte Kohlenstofffasern einzuarbeiten. Hierzu ist eine grundlegende Anpassung der SMC-Rezeptur notwendig, da sonst eine mangelhafte Benetzung der Fasern vorliegt. Durch die Verwendung von CF/GF-SMC-Hybridhalbzeugen kann die Bauteiloberflächenqualität gegenüber reinen CF-SMC-Halbzeugen deutlich gesteigert werden. [8]

Naturfasern (NF)

Eine ökologische und ökonomische Alternative zu den konventionellen Verstärkungsfasern bilden Naturfasern. In mehreren Studien wurde unter anderem der Einsatz von Flachs, Hanf, Sisal und Jute hinsichtlich der Verarbeitbarkeit in UP- und EP-basierten SMC-Halbzeugen untersucht [56, 57, 58]. Es konnte nachgewiesen werden, dass die Naturfasern folgende Vorteile gegenüber Glasfasern zeigen: geringere Kosten, geringere Dichte, erhöhte Zähigkeit, vergleichbare spezifische mechanische Eigenschaften, siehe Tabelle 2.1 (rechts), Aufnahme von CO₂ während ihres Wachstums und eine biologische Abbaubarkeit. Weiterhin zeigen sie positive Eigenschaften hinsichtlich thermischer und akustischer Isolierung. [56]

Die Qualität der Naturfasern hängt von vielen Einflussfaktoren, wie zum Beispiel dem Anbaugebiet, dem Erntezeitraum, dem Röstgrad und der Nachbehandlung, ab. Diese Schwankungen müssen durch eine Aufbereitung der Fasern minimiert werden. Die Verarbeitung von Naturfasern auf konventionellen SMC-Produktionsanlagen ist nur durch Modifikationen der Faserzuführung möglich. Prozesstechnisch besteht die

Herausforderung in der gleichmäßigen Verteilung und homogenen Imprägnierung der Fasern. Die Herstellung komplexer SMC-Bauteile ist möglich. Jedoch zeigen NF-verstärkte Bauteile deutlich geringere mechanische Eigenschaften als konventionelle Halbzeuge, was durch eine inhomogene Faserverteilung im NF-SMC-Halbzeug selbst und durch kurze Einzelfaserlängen zu begründen ist [8]. Bei der Verarbeitung der Naturfasern zu strukturellen Bauteilen gilt es zu beachten, dass diese nur in endlicher Länge vorliegen und zuerst zu Stapelfaser-Garnen verarbeitet werden müssen, welche dann in modifizierten Schneidwerken zur Herstellung von SMC-Halbzeugen genutzt werden können.

Basaltfasern (BF)

Basaltfasern werden aus reinem Basaltgestein, welches ca. 13 % der Erdkruste bedeckt, gewonnen. Aus dem Basaltgestein werden durch Aufschmelzen des reinen Gesteins bei ca. 1400 °C, ohne die Zugabe sonstiger Chemikalien, Basaltfasern hergestellt. Nachdem das Gestein aufgeschmolzen ist, wird die Schmelze durch feine Ösen, wie sie auch bei der Herstellung von Glasfasern verwendet werden, abgezogen. Die dabei entstehenden Fasern werden mit einer Schlichte überzogen, die als Schutz vor äußeren Einflüssen und als Haftvermittler zwischen Faser und Matrix im Bauteil dient. In einem Einsatzbereich von -200 - 800 °C bieten Basaltfasern sehr gute elektrische und thermische Isolationseigenschaften [59]. Aufgrund der sehr guten mechanischen Eigenschaften, der ausgezeichneten thermischen und chemischen Stabilität, der sehr guten akustischen Isolationswirkung und der Umweltverträglichkeit, bieten Basaltfasern eine interessante Alternative zu konventionell verwendeten Glas- und Kohlenstofffasern. Ausgewählte Kennwerte der Basaltfasern sind in Tabelle 2.1 gezeigt. In [60] konnte die Verarbeitbarkeit von Basaltfasern in SMC-Halbzeugen nachgewiesen werden. Bei der Herstellung und Verarbeitung der Halbzeuge konnte die vorhandene Anlagentechnik ohne Modifikationen genutzt werden. Bei gleichem Fasermassengehalt konnten vergleichbare mechanische Eigenschaften erreicht werden.

2.2.4 Anwendungsspezifische Additive

Im folgenden Kapitel werden die Wirkweise und die Dosierung ausgewählter anwendungsspezifischer Additive beschrieben. Diese haben einen sehr großen Einfluss auf das Materialverhalten, die Verarbeitbarkeit und die Bauteileigenschaften.

Schwindungskompensation

Bei ungefüllten UP-Harzsystemen tritt nach dem Gelieren, während der Vernetzung, ein Volumenschrumpf von bis zu 10 % auf. Das Ausmaß der Schwindung ist von der Anzahl der Doppelbindung des Polyesters und dem Styrolanteil abhängig. Dieser Schrumpf führt zu deutlichen Eigenspannungen im Halbzeug und kann durch die Zugabe von Anti-Schrumpf-Additiven und Füllstoffen deutlich verringert bzw. ausgeschlossen werden [61]. Bis heute sind unterschiedliche Theorien zur Schwindung und Schwindungskompensationen bei SMC-Halbzeugen veröffentlicht. Die am häufigsten beschriebene Theorie besagt, dass thermoplastische Anti-Schrumpf-Additive in Tropfenform mit einer Größe von 1 - 100 µm gelöst im Monomer Styrol vorliegen. Während des Aushärtvorgangs reagiert das UP-Harz zuerst mit dem freien Monostyrol, bevor die thermoplastischen Additive zu polymerisieren beginnen. Hierdurch entstehen viele kleine Hohlräume, in denen ein Druck entsteht, welcher der Schwindung des Harzsystems entgegenwirkt. [6]

Die Zugabe von Verstärkungsfasern und Füllstoffen zur SMC-Harzpaste führt zu einer deutlichen Verringerung dieses Effektes bzw. verhindert diesen teilweise sogar ganz. Die Zugabe von thermoplastischen Kunststoffen, welche in Styrol gelöst sind, zur Harzpaste ermöglichte die Entwicklung neuer Harzpasten-Formulierungen. Hierbei konnte der Schrumpf auf ca. 0,3 % gesenkt werden [6]. Eine Weiterentwicklung der Rezepturen führte zu Entwicklungen von Low-Profile (LP), Low-Shrink (LS) und Class-A SMC-Halbzeugen [62, 63]. Die Formulierungen werden anhand ihres Schwindungsverhaltens klassifiziert, siehe Tabelle 2.2.

Tabelle 2.2: Abgrenzung des Schwindungsverhaltens verschiedener SMC-Typen [63]

Bezeichnung	Einfärbung	Schwindung
Standard	uneingeschränkt möglich	bis 3 %
Low Shrink (LS)	uneingeschränkt möglich	max. 0,1 %
Low Profile (LP)	nicht möglich	< 0,05 %
Class-A	teilweise möglich	max. 0,1 %

Reaktionsbeeinflussung

Durch die Zugabe von Initiatoren und Inhibitoren bzw. Stabilisatoren kann die Reife und Aushärtungsreaktion von SMC-Halbzeugen gesteigert werden. Im Folgenden werden diese Komponenten und deren Wirkweise näher erläutert.

a) Initiatoren

Initiatoren werden zur Initiierung der Aushärtereaktion von SMC-Harzpasten benötigt. Durch thermische Aktivierung im Presswerkzeug bei Temperaturen zwischen 80 - 160 °C zerfallen die Initiatoren und spalten freie Radikale ab. Diese Radikale öffnen die Doppelbindungen des Styrolrings und des ungesättigten Polyesters und reagieren mit diesen anschließend zu einem dreidimensionalen Netzwerk [12]. Als Initiatoren können eine große Anzahl organischer Peroxide genutzt werden. Die Ausbildung der Vernetzung führt zu einer Steigerung der Viskosität und läuft exotherm ab. Die Dosierung der Peroxide erfolgt im Verhältnis von ca. 0,5 - 2 % bezogen auf die Grundharzmenge. Um die Aushärtereaktion besser steuern zu können, werden den SMC-Harzpasten neben Initiatoren auch Inhibitoren zudosiert.

b) Inhibitoren / Stabilisatoren

Während der Lagerung des SMC-Halbzeuges zerfallen die Peroxide bereits zu einem geringen Teil. Die dabei frei werdenden Radikale können die Doppelbindungen des Styrolrings und des ungesättigten Polyesters auflösen und zu einer beginnenden Aushärtereaktion führen. Um eine vorzeitige Aushärtung des SMC-Halbzeuges während der Lagerung zu verhindern, werden Inhibitoren, auch (Langzeit-)Stabilisatoren genannt, zu der Harzpaste gemischt. Die frei werdenden Radikale der Peroxide lagern sich an den Inhibitoren an und reagieren bevorzugt mit diesen, solange bis diese aufgebraucht sind. Hierdurch kann eine Lagerdauer von bis zu sechs Monaten ermöglicht werden. Durch Zugabe von Kurzzeitinhibitoren kann die vorzeitige Aushärtung des Halbzeuges während des Fließvorgangs verhindert und somit z. B. längere Fließwege realisiert werden. Meist werden Quinon, p-Benzoquinone oder Methylmethacrylat als Inhibitoren eingesetzt. [8, 14]

Trennmittel

Bei der Herstellung von SMC-Bauteilen werden interne Trennmittel, welche in der Harzpaste selbst vorhanden sind, genutzt. Nur während des Einfahrprozesses eines neuen bzw. längere Zeit nicht genutzten Presswerkzeuges kommen externe Trennmittel, meist Wachse oder Stearate, zum Einsatz. Als interne Trennmittel werden meist Aluminium-, Zink- oder Kalziumstearat sowie Stearinsäure eingesetzt. Diese lagern sich während des Pressprozesses an der Werkzeugoberfläche an und verhin-

dern somit Bauteilhaftungen am Werkzeug. Die Dosierung interner Trennmittel beträgt bis zu 3 % der Gesamtharzpaste. [64, 8]

Eindickmittel

Bei der Herstellung und Verarbeitung von SMC-Halbzeugen und –Bauteilen ist die Eindickung der Harzpaste ein zentraler Punkt. Wenn die Harzpaste nicht eingedickt wird, sind sowohl die vorbereitenden Tätigkeiten (Handling, Zuschnitt, Transport in das Presswerkzeug) vor der Verarbeitung als auch der Fasertransport während der Verarbeitung nicht möglich. An die Eindickung der Harzpaste werden unter anderem die folgenden Anforderungen gestellt: a) der Eindickeffekt darf erst mit einer gewissen Verzögerung auftreten, da sonst keine prozesssichere Imprägnierung der Verstärkungsfasern gegeben ist, b) die Eindickung soll möglichst rasch nach der Halbzeugherstellung beginnen, um eine zügige Verarbeitung zu ermöglichen, c) das Level der Harzpastenviskosität soll einstellbar sein. [12, 8].

Üblicherweise werden zur Eindickung von SMC-Harzpasten Metalloxide bzw. Metallhydroxide der zweiten Hauptgruppe genutzt. Diese sind meist Kalziumoxid (CaO), Kalziumhydroxid (Ca(OH)_2), Magnesiumoxid (MgO) und Magnesiumhydroxid Mg(OH)_2 . Aufgrund ihres geringen Preises und des sehr gut einstellbaren und homogenen Eindickverlaufes kommt meist MgO und Mg(OH)_2 zur Eindickung von konventionellen SMC-Harzpasten zum Einsatz. Die Dosierung erfolgt im Bereich zwischen 0,5 – 3,0 %, bezogen auf die Harzmenge. Während der Herstellung der SMC-Halbzeuge auf der SMC-Anlage wird eine Harzpastenviskosität von 15 - 40 Pa·s benötigt. Dieser Viskositätsbereich ist sowohl groß genug, um einen homogenen Harzfilm auf die Trägerfolien aufzuziehen zu können als auch gering genug, um eine prozesssichere Imprägnierung der Verstärkungsfasern zu gewährleisten. Durch die Zugabe der Eindickmittel steigt die Viskosität der Harzpaste innerhalb weniger Tage von 15 - 40 Pa·s auf bis zu 20.000 Pa·s, siehe Abbildung 2.7, wodurch die prozesssichere Verarbeitung ermöglicht wird. Während der Verarbeitung im Presszyklus fällt die Viskosität temperatur- und druckbedingt wieder auf ein Minimum ab, wodurch das Fließen des Halbzeuges inklusive Fasertransport ermöglicht wird. Bei der anschließend einsetzenden Aushärtung steigt die Viskosität des Halbzeuges sehr stark an.

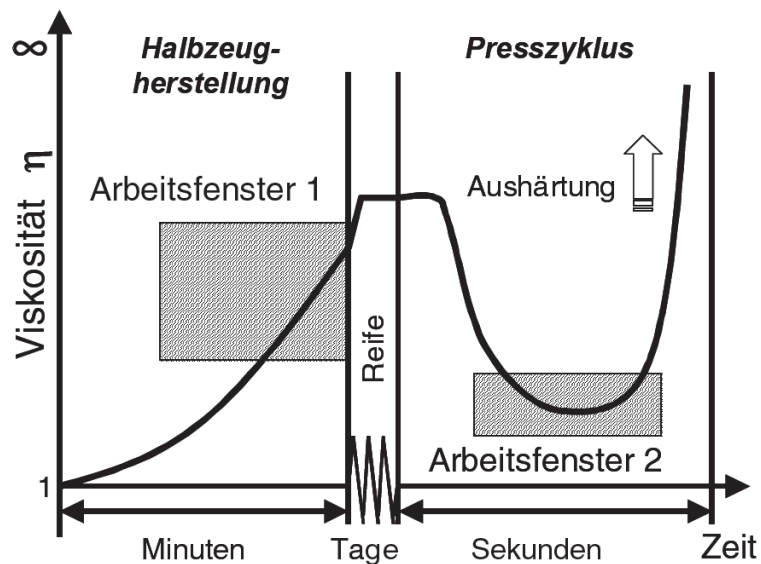


Abbildung 2.7: Viskositätsverlauf der SMC-Harzpaste / des SMC-Halbzeuges während der Halbzeugherstellung, Eindick- und Pressphase nach [53]

Brandschutzadditive

Brandhemmende Eigenschaften von SMC-Halbzeugen können durch die Zugabe spezieller Füllstoffe erzielt werden. Diese Füllstoffe können zum Beispiel halogenhaltige Verbindungen enthalten [65]. Alternativen zu halogenhaltigen Füllstoffen bieten z. B. Antimontrioxid (Sb_2O_3) oder Aluminiumhydroxid ($\text{Al}(\text{OH})_3$). Diese Verbindungen spalten bei Temperaturen über 200 °C Wasser ab und entwickeln im Brandfall somit eine Kühl- und Löschwirkung [47]. Brandhemmende und selbstverlöschende Eigenschaften sind für SMC-Anwendungen in (Schienen-)Fahrzeugen und der Bauindustrie unerlässlich.

Hautbildner

Hautbildner werden zur Reduktion der Emissionen von Harzsystemen eingesetzt. Sie unterbinden eine Emission der Monomere. Bei den Hautbildnern handelt es sich meist um ein Paraffin, welches mit in die Harzpaste dispergiert wird, aber nur schwer in ihr löslich ist. Sobald die Harzpaste nicht mehr in Bewegung ist, z. B. Ruhezeit zwischen Dispergierprozess und Verarbeitung bzw. im Raketkasten, setzen sich die Paraffin-Anteile auf der Oberfläche der Harzpaste ab und bilden eine geschlossene Oberfläche, siehe Abbildung 2.8. Durch den Einsatz von Hautbildnern kann sowohl die Qualität der Halbzeuge gesteigert als auch die Umweltemissionen reduziert werden [47, 12]. Paraffinwaxe werden typischerweise mit einer Dosierung von 0,05 - 0,15 Gew.-% bezogen auf das Harzsystem zugegeben.

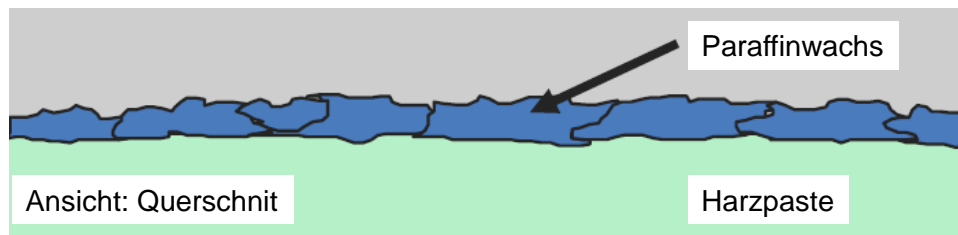


Abbildung 2.8: Schematische Darstellung Wirkweise Paraffinwachs nach [6]

Farbpaste / Pigmente

SMC-Halbzeuge werden größtenteils eingefärbt, da hierdurch ein komplett durchgefärbtes Bauteil hergestellt und eine nachträgliche, meist zeit- und kostenintensive, Lackierung umgangen werden kann. Eine Alternative zur Einfärbung bietet das In-Mold Coating. In diesem Verfahren wird eine Lackschicht auf das SMC-Bauteil während des Pressvorganges innerhalb des Presswerkzeuges aufgebracht [66]. Zur konventionellen Einfärbung werden meist synthetische organische Pigmente genutzt [6]. Tabelle 2.3 gibt einen Überblick über die üblicherweise verwendeten Pigmente. Die Pigmente werden zu Dispersionen, deren Grundharz mit dem verwendeten Einsatzharz kompatibel ist, verarbeitet und mit einem Anteil von ca. 3 - 5 % der Harzpaste zudosiert. Die Dichte der Pigmentdispersionen liegt meist im Bereich von ca. 1,5 - 6 g/cm³ [47].

Bei der Einfärbung der Halbzeuge gilt es die Einflüsse durch die Pigmente auf die Bauteile zu beachten. Diese sind zum Beispiel eine gesteigerte Beständigkeit gegen Ultraviolettstrahlung (UV) und Abrasionsbeständigkeit oder eine verbesserte thermische bzw. elektrische Leitfähigkeit. Sie können aber auch negativ die Harzpastenviskosität, das Fließverhalten oder die mechanischen Eigenschaften beeinflussen. Eine optimale Halbzeugqualität wird nur durch die Kompatibilität der verwendeten Komponenten erreicht [6].

Tabelle 2.3: Übersicht der meist verwendeten Pigmente für SMC-Halbzeuge [6, 47]

Farbe	Pigmenttyp	Summenformel	Volumenanteil	Einheit
Weiß	Titandioxid	TiO ₂	> 75	%
Schwarz	Eisenoxid	Fe ₂ O ₃	ca. 15	%
Blau	Kobalt	Co	k.A.	-
Grün	Phtalocyanin	C ₃₂ H ₁₈ N ₈	k.A.	-

Viskositätsbeeinflussung

Durch die Verwendung von Eindickmitteln, wie zum Beispiel Magnesiumoxid, kann der Eindickverlauf der SMC-Harzpaste bzw. des SMC-Halbzeuges gezielt gesteuert werden. Zur Anpassung der Grundviskosität einer Harzpaste können viskositätssenkende Additive wie zum Beispiel Thixotropiemittel verwendet werden. Ausgewählte Vertreter dieser Gruppe sowie deren Wirkweise werden im Folgenden erläutert.

a) Viskositätssenker / Netz- und Dispergieradditive

Das bekannteste Additiv zur Steuerung der Viskosität und Optimierung der Benetzungseigenschaften der Harzpaste ist Styrol. Alternativen sind unter anderem Methylmethacrylat sowie Acrylat- und Methacrylat-Monomere [47]. Diese bieten den Vorteil, dass der Styrolgehalt im Harz nicht erhöht wird, die Imprägnierbarkeit aber deutlich optimiert wird. Durch die Einarbeitung von Netz- und Dispergiermitteln in Harzpasten wird die Viskosität dieser deutlich gesenkt, wodurch die prozesssichere Imprägnierung der Füllstoffe und Fasern realisiert werden kann. Die Additive zeigen meist harz- und füllstoffafine Eigenschaften. Dies bedeutet, dass Füllstoffagglomerate beim Mischprozess schnell benetzt und aufgelöst werden können [14]. Die Dosierung der Viskositätssenker erfolgt im Bereich von ca. 0,5 - 2 % bezogen auf die Harzmenge [67].

b) Thixotropiemittel

Eine konventionelle SMC-Harzpaste weist ein thixotropes (Nicht-Newtonsches) Werkstoffverhalten auf. Dies bedeutet, dass bei der Harzpaste durch das Einbringen einer Scherbeanspruchung die Viskosität, in Abhängigkeit von der Zeit, sinkt und die Harzpaste in einen flüssigeren Zustand übergeht. Dieser Effekt tritt zum Beispiel beim Aufziehen des Harzfilms am Rakelkasten auf. Nach Beenden der Scherbeanspruchung stellt sich bei der Harzpaste wieder der ursprüngliche Viskositätszustand ein. Thixotropiemittel können die Verarbeitung von SMC-Harzpasten deutlich verbessern, da deren Einsatz das Aufbringen eines konstanten Harzfilmes, auch auf den schrägen Teilbereichen der Anlage, ermöglicht. Meist werden pyrogene Kieselsäuren als Thixotropiemittel verwendet [47].

2.3 Halbzeug-Herstellung und -Verarbeitung

Die Herstellung eines SMC-Bauteils gliedert sich in vier Prozessschritte. Diese sind:

- 1) die Harzpasten-Herstellung mittels Kreisscheibendissolver,
- 2) die Halbzeug-Herstellung auf einer SMC-Anlage,
- 3) der direkt anschließende Reifeprozess an einem temperierten Lagerort und
- 4) die abschließende Bauteilherstellung inklusive Nachbearbeitung.

Die Herstellung und Verarbeitung der Harzpasten sind ortsgebunden; die weiteren Prozesse können ortsunabhängig voneinander gestaltet werden. Der zeitliche Ablauf sieht eine direkte Abfolge von Harzpasten-Herstellung und -Verarbeitung vor. Daran schließt sich eine ca. vier- bis acht-tägige Lagerung inklusive Reife des Halbzeuges an. Nach abgeschlossenem Reifeprozess besteht ein bis zu sechsmonatiges Zeitfenster, in dem das Halbzeug zum Bauteil verarbeitet werden muss. Die anschließende Fertigung der Bauteile erfolgt meist in teil- bzw. voll-automatisierten Prozessstraßen [68]. Im Folgenden werden die einzelnen Prozessschritte erläutert.

1) Harzpasten-Herstellung

Eine SMC-Harzpaste besteht grundlegend aus den Komponenten Harzsystem, Verstärkungsfasern, Füllstoffen und anwendungsspezifischen Additiven. Die einzelnen Komponenten sowie deren Aufgabe und Wirkweise wurden in Kapitel 2.2 näher beschrieben. Bei Anlieferung der einzelnen Rohstoffe werden diese einer Wareneingangskontrolle unterzogen, um die Grundlagen für einen Qualitätssicherungsprozess (QS), der sich vom Rohstoff bis zum Bauteil über die komplette Prozesskette hinwegspannt, zu legen. So werden die Harze zum Beispiel hinsichtlich ihres Feuchte- und Styrolgehaltes und die Füllstoffe hinsichtlich ihrer Restfeuchte und ihrer Partikelgrößenverteilung kontrolliert.

Zu Beginn der Harzpasten-Herstellung werden die flüssigen Anteile der Harzpaste, welche aus dem Harzsystem, den gewählten Anti-Schrumpf Additiven und der Farbpaste bestehen, mit einem Kreisscheibendissolver dispergiert. Anschließend werden die Reaktionsinitiatoren und –inhibitoren zu der Dispersion hinzugegeben. Hierbei ist darauf zu achten, dies in zwei getrennten Schritten zu dispergieren, da eine gemeinsame Zugabe zu einer exothermen Reaktion führt. Abschließend werden die Füllstoffe bei erhöhter Drehzahl, siehe Tabelle 2.4, dispergiert. Die im Rührgefäß vorhande-

nen Quell- und Scherströmungen brechen die in den Füllstoffen vorhandenen Agglomerate auf.

Tabelle 2.4: Dispergier-Parameter bei der Herstellung einer konventionellen SMC-Harzpaste

Bezeichnung	Abkürzung	Zahlenwert	Einheit
Drehzahl Harzdispersion	n_{HD}	400	1/min
Zeit Harzdispersion	t_{HD}	60	s
Drehzahl Füllstoffdispersion	n_{FS}	900	1/min
Zeit Füllstoffdispersion	t_{FS}	60	s

Nachdem alle Komponenten zu einer homogenen Harzpaste dispergiert wurden, wird diese einer abschließenden Qualitätskontrolle unterzogen. Hierbei werden unter anderem die Farbe, Viskosität und Reaktivität der Harzpaste kontrolliert. Die Viskosität der Harzpaste, die bis auf das Eindickmittel vollständig vorbereitet ist, beträgt 15 - 40 Pa·s. Nach erfolgter Qualitätskontrolle wird diese anschließend über Rohrleitungen zur SMC-Anlage transportiert. Erst kurz vor der Verarbeitung wird das Eindickmittel, meist Magnesiumdioxid (MgO) über Statikmischer zur Harzpaste dosiert. Sobald das Eindickmittel zu der Harzpaste zugegeben wurde, beginnt eine physikalisch-chemische Reaktion, die zur Steigerung der Harzpasten-Viskosität führt. [6]

2) Halbzeug-Fertigung auf einer konventionellen SMC-Anlage

Die mit MgO versetzte Harzpaste wird auf einer SMC-Anlage zu SMC-Halbzeugen verarbeitet. Abbildung 2.9 zeigt den schematischen Aufbau einer SMC-Anlage zur Herstellung von SMC-Halbzeugen auf Basis von UP-Harzen und Glasfasern als Verstärkungsfasern. Auf zwei styroldichten Trägerfolien (1), welche meist einen dreilagigen Aufbau auf Polyethylen (PE) und Polyamid (PA) (PE/PA/PE) mit einer Gesamtdicke von 25 - 100 μm [67] aufweisen, wird jeweils mit einem Raketkasten, welcher mit der zuvor hergestellten Harzpaste gefüllt ist (2), ein Harzfilm homogener Dicke (3) aufgezogen. Auf den unteren Harzfilm werden homogen und regellos Verstärkungsfasern aufgestreut (4), welche in einem Breitwalzenschneidwerk (5) auf eine definierte Faserlänge, meist 1" - 2" (25,4 - 50,8 mm), geschnitten werden. Tabelle 2.5 gibt eine Übersicht über typische Produktionsparameter bei der Herstellung von SMC-Halbzeugen. Die geschnittenen Fasern werden anschließend vom oberen Harzfilm bedeckt. Dieser dreilagige Aufbau durchläuft anschließend die Walk- und Imprägnierstrecke (6).

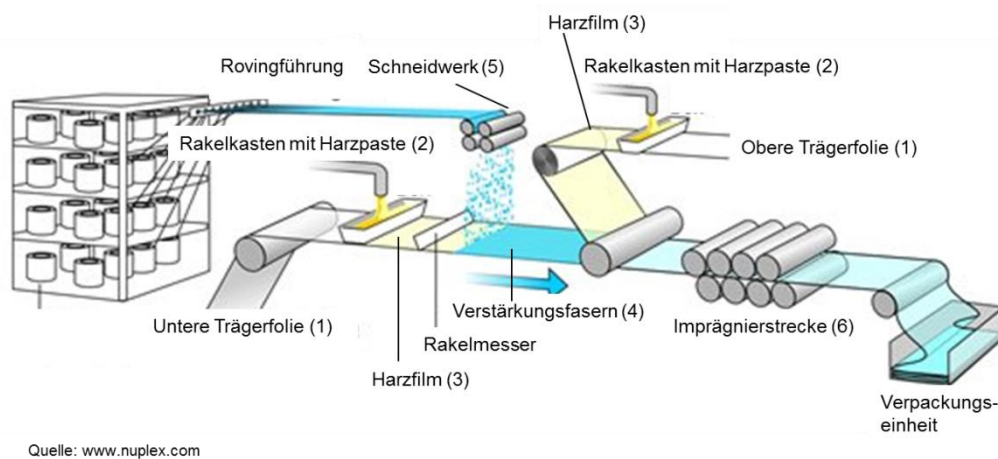


Abbildung 2.9: Prinzipskizze einer Anlage zur Herstellung von SMC [69]

Im Bereich der Imprägnierstrecke werden die Glasfasern durch die Imprägnierwalzen mit der Harzpaste imprägniert und der ehemals dreilagige Aufbau (Harzpaste – Schnittglas – Harzpaste) zu einem homogenen Halbzeug verarbeitet. Abschließend wird das Halbzeug entweder auf Stahlkerne mit Bordscheiben aufgewickelt und styroldicht verpackt oder über einen Portalleger in Lager- und Transportboxen in einer Zickzackablage abgelegt und anschließend ebenfalls styroldicht verpackt. Das Gesamtgewicht der auf die Stahlkerne aufgewickelten Halbzeuge beträgt meist ca. 20 bis 150 kg; das Gewicht der Transportboxen, welche größtenteils für den außereuropäischen Export vorgesehen sind, 150 - 700 kg. Bei modernen SMC-Anlagen betragen die Schwankungen des Flächengewichts meist weniger als $\pm 5\%$, die Schwankungen im Glasgehalt sind kleiner als $\pm 3\%$ Gew.-% [70].

Tabelle 2.5: Wichtige Produktionsparameter bei der SMC-Herstellung

Parameter	Abkürzung	Zahlenwert	Einheit
Produktionsgeschwindigkeit	v_{prod}	2-10	m/min
Produktionsbreite	b_{prod}	500 - 2400	mm
Flächengewicht	A_w	1500 - 4000	g/m ²
Verstärkungsfaserlänge	l_F	25,4 - 50,8	mm

3) Reifeprozess

Nachdem das Halbzeug hergestellt wurde, schließt sich im dritten Prozessschritt die Halbzeugreife an. Der Reifeprozess findet in klimatisierten Räumen meist bei Raumtemperatur innerhalb von 4 - 10 Tagen statt. Während dieser Reifedauer steigt die Viskosität des Halbzeuges von 15 - 40 Pa·s (Viskosität bei der Harzpastenherstel-

lung) bis auf eine Verarbeitungsviskosität von ca. 2000 - 20.000 Pa·s an. Während der Reifung reagiert das Magnesiumoxid mit den endständigen Säuregruppen des Harzes, ohne dass es zu einer räumlichen Vernetzung kommt [71, 6]. Nach erfolgreicher Reifung zeigt das Halbzeug eine handhabbare lederartige und nicht klebrige Konsistenz [71]. Ein Indiz für eine erfolgreiche und abgeschlossene Reifung ist die Möglichkeit des Entfernens der Trägerfolien ohne Anhaftungen des Halbzeuges. Eine weitere Reifung des Halbzeuges kann durch Lagerung bei niedriger Temperatur ($< -12\text{ °C}$) verlangsamt bzw. gestoppt werden. Die Eindickung des Halbzeuges ist ein entscheidendes Element in der SMC-Verarbeitungskette. Sie bestimmt maßgeblich das Fließverhalten, den gleichmäßigen Fasertransport innerhalb des Werkstückes und ist ausschlaggebend für die Handhabung vor dem Einlegen in das Presswerkzeug [6].

4) Verarbeitung

Nachdem das Halbzeug gereift ist, wird es in gekühlten Containern zu den verarbeitenden Betrieben transportiert. Zur Verarbeitung der SMC-Halbzeuge werden kraftgebundene Hydraulikpressen mit Parallelregelung eingesetzt [72]. Hierbei schließt die Presse geschwindigkeitsgeregelt im Eilgang bis zum Erreichen eines definierten Kraftniveaus. Sobald dieses erreicht ist, wird auf ein kraftgeregeltes Schließprogramm umgeschaltet und dieses bis zum vollständigen Schließen des Presswerkzeuges weiter gefahren.

Die Verarbeitung des SMC-Halbzeuges zum SMC-Bauteil kann in vier Schritte gegliedert werden. Zu Beginn der Verarbeitung wird die Trägerfolie manuell oder (teil-) automatisiert von dem SMC-Halbzeug entfernt und dieses mit computergesteuerten (CNC) Schneidanlagen auf das benötigte Maß, welches ca. 40 – 80 % der projizierten Werkzeugfläche entspricht, zugeschnitten. Die Einzellagen (Sheets) werden anschließend zu Paketen (Stacks) gestapelt. Nachdem das Gewicht der Stacks an die Sollvorgabe angepasst wurde, werden diese händisch oder automatisiert in das ca. $135 - 155\text{ °C}$ heiße Presswerkzeug an zuvor exakt definierter Stelle positioniert. [12, 73]

Zur Verarbeitung selbst werden Tauchkantenwerkzeuge [6] genutzt. Diese Werkzeuge besitzen meist eine polierte und hartverchromte Werkzeugoberfläche und werden durch eine Tauchkante abgedichtet. Eine Tauchkante ist ein ca. 0,02 - 0,05 mm dünner Spalt zwischen Ober- und Unterwerkzeug, der während des Schließens der

Werkzeuge ausgebildet wird. Dieser Spalt ermöglicht es der Luft, während der Verarbeitung, aus dem Werkzeug zu entweichen. Sobald das zu verarbeitende Material auf die Tauchkante auftrifft, kühlt dieses ab und verschließt sie. Durch diesen Effekt kann der Werkzeuginnendruck aufgebaut werden. Bedingt durch die Temperatur des Presswerkzeuges wird die Viskosität des Halbzeuges reduziert. Mit dem Schließen des Presswerkzeuges geht eine Kompaktierung des Lagenpaketes einher. Weiterhin induziert die Erwärmung des Lagenpakets eine Reduktion der Halbzeug-Viskosität, wodurch der Fließvorgang einsetzt und das Halbzeug die Kavität vollständig ausfüllt [41]. Dies geschieht bei Werkzeuginnendrücken von 80 - 120 bar [74]. Die geschnittenen Kurzfasern werden von der fließenden, hochgefüllten SMC-Harzpaste mittransportiert und in der kompletten, teils auch sehr komplexen Kavität verteilt. Die hohe Werkzeugtemperatur setzt die chemische Aushärtereaktion des Harzes in Gang und aktiviert die thermoplastische Schrumpfkompensation [74]. Nachdem das Bauteil ausgehärtet ist, wird es aus dem Werkzeug entnommen und nachbearbeitet (z. B. entgratet).

Nach der Entnahme und erfolgter Nacharbeit werden die Bauteile auf optionalen Spannrahmen gelagert, um einem Verzug während des Auskühlens vorzubeugen. Typische Losgrößen für SMC-Bauteile liegen im Bereich von ca. 10.000 und 500.000 Stück pro Jahr [5]. Tabelle 2.6 gibt eine Übersicht über typische SMC-Verarbeitungsparameter [49]. Diese sind jedoch sehr stark von den jeweils verwendeten Halbzeugen abhängig.

Tabelle 2.6: Übersicht ausgewählter konventioneller SMC-Verarbeitungsparameter

Parameter	Abkürzung	Zahlenwert	Einheit
Schließgeschwindigkeit im Eilgang	v_1	bis 1000	mm/s
Schließgeschwindigkeit während des Fließprozesses	v_2	1 - 5	mm/s
Werkzeuggrundbelegung	A_0	40 - 80	%
Werkzeugtemperatur	T_w	ca. 135 - 155	°C
Werkzeuginnendruck	p_i	ca. 80 - 120	Bar
Aushärtedauer pro mm Bauteilstärke	$t_{\text{Härt}}$	ca. 0,25 – 1,0	min

2.4 Wesentliche Entwicklungen im Bereich der SMC-Technologie

Im folgenden Unterkapitel werden wesentliche Entwicklungen, welche die SMC-Technologie maßgeblich beeinflusst haben, erläutert. Durch die Anwendung dieser neuen Technologien konnte das Anwendungsspektrum für SMC-Bauteile maßgeblich erweitert werden.

2.4.1 Direkt-SMC (D-SMC)

In einer Kooperation zwischen dem Fraunhofer Institut für Chemische Technologie (ICT), der Dieffenbacher GmbH und der DSM Composite Resins GmbH wurde in den Jahren 2008 bis 2011 der Direkt Sheet Molding Prozess (D-SMC) entwickelt. Ziel des D-SMC-Prozesses ist es, eine schnelle Reifung des Halbzeuges innerhalb weniger Minuten nach der Produktion zu ermöglichen [14]. Hierdurch ist es möglich, ein duroplastisches Halbzeug direkt am Ort der späteren Verarbeitung zum Bauteil herzustellen und somit Kosten, Zeit und Energie für temperierte Lagerung und Transport einzusparen. Bei der Herstellung der D-SMC-Harzpaste werden die flüssigen Harzpasten-Komponenten (Harz, Härter, anwendungsspezifische Additive, Farbstoffe, etc.) kontinuierlich in einem Doppelschneckenextruder gemischt. Die pulverförmigen Harzpastenkomponenten werden über einen Sidefeeder zudosiert, siehe Abbildung 2.10 links. Zur Herstellung des D-SMC-Halbzeuges wird eine modifizierte SMC-Flachbandanlage genutzt. Über zwei Rakelkästen werden zwei Harzfilme auf zwei styroldichte Trägerfolien aufgerakelt. Auf den unteren Harzfilm werden die Verstärkungsfasern, meist Glasfasern mit einer Länge von 25 mm, homogen und regellos aufgestreut und dieser Film vom oberen Harzfilm bedeckt. Anschließend durchläuft dieser Aufbau die temperierte Imprägnier- und Reifestrecke [75]. Innerhalb der Reifestrecke kann das Halbzeug mit einer maximalen Temperatur von bis zu 100 °C beaufschlagt werden, wodurch eine rezepturabhängige Schnellreifung initialisiert wird [14].

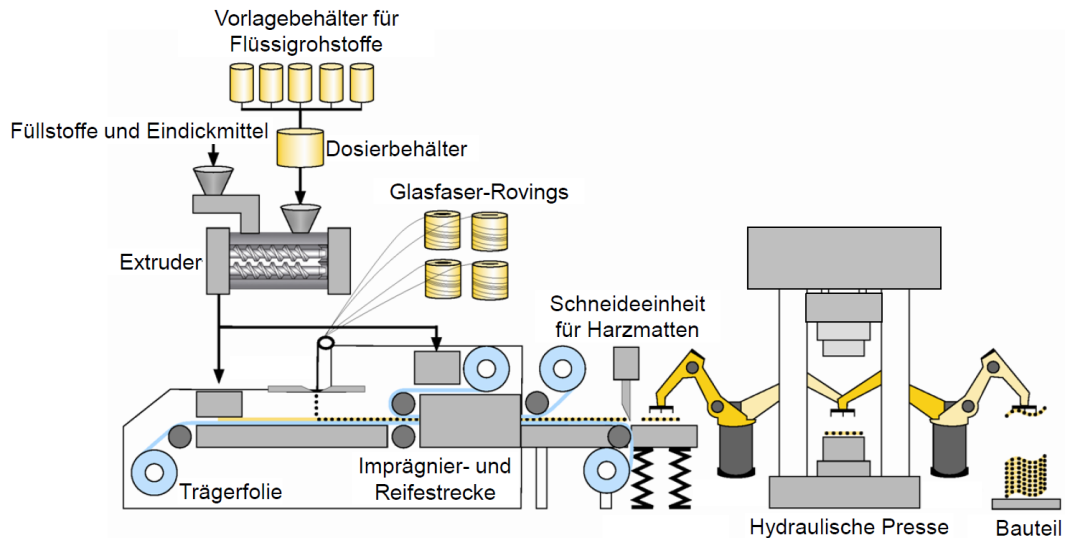


Abbildung 2.10: Darstellung des D-SMC-Verfahrens [11]

Nachdem das Halbzeug gereift ist, werden die Trägerfolien abgerollt und die einzelnen Zuschnitte durch einen CNC-Cutter geschnitten, gewogen, gestapelt und über ein automatisiertes Greifersystem dem Verarbeitungsprozess zugeführt. Ein D-SMC kann bei gleichen Prozessparametern wie ein konventionelles SMC verarbeitet werden und weist bei gleichem Fasermassengehalt vergleichbare mechanische Eigenschaften auf [76, 14]. Durch die Schnellreifung kann ein stabiler, reproduzierbarer Prozess mit konstanter Materialqualität ermöglicht werden, welcher eine kostenintensive Reifezeit von mehreren Tagen ersetzen kann. Weiterhin bietet das D-SMC-Verfahren den Vorteil einer sehr stark verkürzten Prozesskette, da eine Prozesszeit vom Rohstoff bis zum fertigen Bauteil in weniger als 30 Minuten erreicht werden kann. Hierdurch kann sehr schnell auf Materialschwankungen reagiert werden. Weiterhin können neue Harzsysteme und Rezepturen sehr schnell validiert und eine lückenlose Prozessdatenüberwachung garantiert werden. [11, 77]

2.4.2 Kohlenstofffaser-SMC (CF-SMC)

SMC-Bauteile werden seit den 1980er Jahren im KFZ- und NFZ- Bereich erfolgreich eingesetzt. Hierbei liegen die Einsatzbereiche der meist glasfaserverstärkten duroplastbasierten Bauteile im Bereich der semi-strukturellen Anwendungen, wie zum Beispiel bei Verkleidungsbauteilen oder Außenhautbauteilen [37, 78]. Anfang der 2000er Jahre wurden SMC-Halbzeuge, bei denen Kohlenstofffasern als Verstärkungsfasern eingesetzt wurden, entwickelt [79]. Diese Entwicklung beruht auf der Notwendigkeit, Gewichtseinsparungen zu realisieren, um damit einhergehend den

Sekundär-Energiebedarf während der Nutzungsdauer zu senken und zum Schutz des Klimas beizutragen. Durch den Einsatz von Kohlenstofffasern als Verstärkungsfasern sollten diese Ziele unter anderem durch eine verringerte Halbzeugdichte und gesteigerte mechanische Eigenschaften realisiert werden [80]. Es konnten Halbzeuge entwickelt werden, welche annähernd gleiche Herstell-, Verarbeitungs- und Prozessbedingungen wie konventionelle GF-SMC-Halbzeuge aufweisen, jedoch um bis zu 300 % steifer [81, 82] sind. Tabelle 2.7 gibt einen Überblick über die mechanischen Kennwerte ausgewählter SMC-Halbzeuge mit Glas- und Kohlenstofffaserverstärkung.

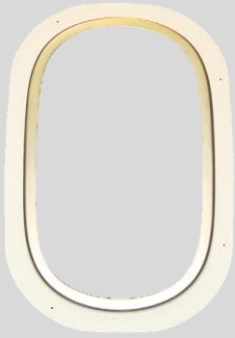

Tabelle 2.7: Überblick über ausgewählte mech. Kennwerte von GF- und CF-SMC-Halbzeugen (Dichte gem. DIN EN ISO 1183 A, E-Modul und Zugfestigkeit nach DIN EN ISO 527-4)

Hersteller	Bezeichnung	Verstärkungs-faseranteil in Gew.-%	Dichte in g/cm ³	E-Modul in MPa	Zugfestigkeit in MPa	Quelle
Menzolit	CARBON SMC 0150	CF / k. A.	1,80	10.000	55	[83]
Menzolit	SMC0430	GF / k. A.	1,30	8.000	60	[84]
Menzolit	SMC1100	GF / k. A.	1,80	13.000	150	[18]
Polynt	SMCarbon® 90 CF60-3k	CF / 60	1,53	45.000	300	[85]
Polynt	SMCarbon® 90CF60-12k	CF / 60	1,51	34.000	228	[86]
Polynt	SMCarbon® 90 CF50-3k	CF / 50	1,47	34.650	225	[87]

CF-SMC-Halbzeuge werden meist ohne Füllstoffe und auf Basis von Epoxid- und Vinylesterharzen hergestellt. Somit sind sie in ihrer Zusammensetzung konventionellen CF-PrePreg-Materialien sehr ähnlich. CF-SMC-Halbzeuge können CF-PrePreg-Materialien in einigen Anwendungen ohne mechanische Einbußen, z.B. beim Einsatz als Kernmaterial für Prepreg-SMC-Prepreg Sandwiches, ersetzen [88].

Durch die erreichten mechanischen Eigenschaften wurde es ermöglicht, Bauteile in strukturellen Anwendungsbereichen, zum Beispiel im Luftfahrt- und Automobilbereich, aus CF-SMC zu fertigen, siehe Tabelle 2.8.

Tabelle 2.8: CF-SMC Bauteile mit strukturellen Anwendungsbereichen

Anwendung	Fensterrahmen Boeing 787 Dreamliner	Heckdeckel BMW M4
Abbildung		
Anmerkung	50 % leichter als konv. Aluminiumrahmen [89]	Tragstruktur aus CF-SMC, Gewichtseinsparung: 5 kg [90]

Mit den gesteigerten mechanischen Eigenschaften geht die Möglichkeit zur Reduktion der Bauteildicke einher. Hierbei ist es in Einzelfällen möglich, die Wanddicke von SMC-Bauteilen gegenüber Aluminiumbauteilen um bis zu 35 % zu reduzieren und somit entsprechend das Bauteilgewicht um bis zu 50 % zu reduzieren. [91, 89]

Eine weitere Möglichkeit zum Einsatz von Kohlenstofffasern in SMC besteht im Bereich des Kohlenstofffaser-Recyclings. Bis zum Jahr 2020 wird mit ca. 39.000 Tonnen Kohlenstofffasern pro Jahr, anfallend in End-of Life-Bauteilen, Produktionsabfällen und Fehlchargen gerechnet, die es sinnvoll zu recyceln gilt. Dies ist notwendig, da die Einlagerung der Kohlenstofffasern auf Deponien in Europa verboten ist und Müllverbrennungsanlagen keine kohlenstofffaserhaltige Abfälle mehr annehmen dürfen [92]. Aktuell besteht die einzige sinnvolle Möglichkeit zur Wiedergewinnung der Kohlenstofffasern im Pyrolyse-Prozess. Hierbei werden zu recycelnde Bauteile unter Ausschluss von Sauerstoff bei Temperaturen zwischen 500 °C und 900 °C zersetzt [93]. Im Pyrolyseprozess können Fasern zurückgewonnen werden, welche anschließend beschichtet und zu vernadelten Matten weiterverarbeitet werden können. Diese können anschließend mit einer duroplastischen Matrix imprägniert und im SMC-Pressverfahren verarbeitet werden [92]. Abbildung 2.11 zeigt den Rohbau eines BMW G11. In diesem Fahrzeug wurden zum ersten Mal in einem industriellen Serienprozess recycelte Kohlenstofffasermatten zu strukturellen rCF-SMC-Bauteilen im Karosseriebau verarbeitet.

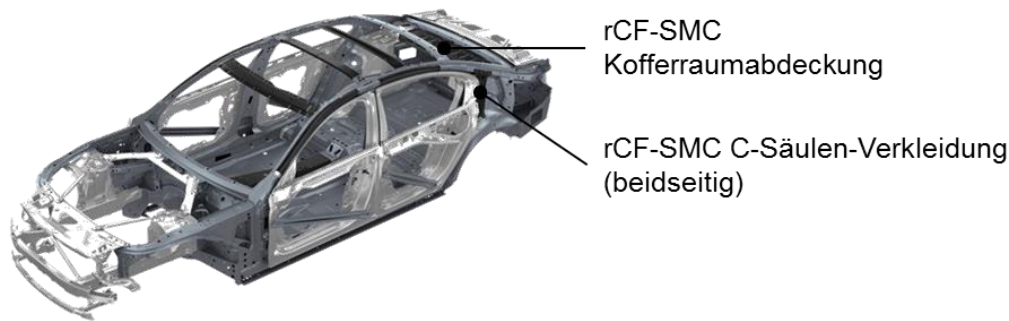


Abbildung 2.11: Rohbau des BMW G11 (7er) mit rCF-SMC-Bauteilen [43]

2.4.3 Low-Density-SMC (LD-SMC)

Durch die Einarbeitung von Füllstoffen mit geringer Dichte ($\ll 1 \text{ g/cm}^3$), z. B. Glas-hohlkugeln, oder alternativer Leicht-Füllstoffe [44] und die Verwendung von hochfes-ten Polymerfasern können so genannte „Low-Density-SMC“-Halbzeuge hergestellt werden. Diese Halbzeuge besitzen eine Halbzeugdichte von ca. $1,3 \text{ g/cm}^3$. Anwen-dung finden solche Halbzeuge hauptsächlich in den Bereichen Luftfahrt, Transport und Verkehr, Maschinenwesen und bei Karosserieteilen, siehe Abbildung 2.12 [94].



Abbildung 2.12: Anwendungen für Low-Density-SMC; links: Karosserieteil, rechts: Luftfahrtanwendung

Die Vorteile von Low-Density SMC sind unter anderem die sehr geringe Dichte, wel-che einer Gewichtsersparnis von ca. 30 % gegenüber konventionellen SMC ent-spricht, der gesteigerte Beulwiderstand und eine erhöhte Korrosionsfestigkeit. Diese Erhöhung wird durch das Ersetzen der konventionellen mineralischen Füllstoffe durch die Leichtbaufüllstoffe ermöglicht, da diese chemisch inert sind. Nachteilig sind die erhöhten Halbzeugkosten mit ca. 35 % Mehrpreis gegenüber einem konventionel-len SMC und die poröse Bauteiloberfläche, welche einer Nachbehandlung bedarf, zu nennen. So müssen die Bauteiloberflächen mehrfach gespachtelt und geschliffen werden, bevor sie abschließend lackiert werden können [95].

2.4.4 Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen in (duroplastischen) Fließpressmassen

In mehreren Forschungsprojekten aus industrieller und wissenschaftlicher Herangehensweise wurde der Einsatz von bio-basierten und nachwachsenden Rohstoffen in SMC- und den artverwandten Bulk Molding Compound (BMC)-Halbzeugen untersucht. Die Zusammensetzung von BMC-Halbzeugen entspricht großteils derer von SMC-Halbzeugen, allerdings werden die Halbzeuge im Knetverfahren und unter Verwendung von Kurzglasfasern mit einer Länge von 12 mm hergestellt [96]. Die Herstellung von SMC-Halbzeugen unter Verwendung von Naturfasern und konventionellen UP-Harzsystemen ist möglich, hat sich aber noch nicht im SMC-Markt durchsetzen können [97]. Dies liegt unter anderem in einer kostenintensiven Faservorbereitung und den damit einhergehenden Restriktionen begründet. Anwendungen für duroplastische Halbzeuge in Kombination mit Naturfasern sind zum Beispiel bei Smartphone-Hüllen [97], jedoch nicht im Bereich der (Groß-) Serienprozesse, in denen SMC-Halbzeuge normalerweise verarbeitet werden, zu finden.

In Kombination mit thermoplastischer Matrix sind bio-basierte und nachwachsende Füllstoffe in vielen Bereichen etabliert. Der bekannteste Anwendungsfall ist die Verarbeitung von Holzmehl in Wood-Plastic-Composites (kurz: WPC) im Extrusionsverfahren. Ein klassisches WPC besteht zu ca. 70 Gew.-% aus Holzmehlen, 25 Gew.-% Polyethylen oder Polypropylen und 5 Gew.-% Additiven [98]. Auch in der Orthopädietechnik, im Kostümbau und in Verstärkungsmaterialien werden bio-basierte Materialien angewendet [99].

SMC-Halbzeuge

Der Einsatz und die Verarbeitbarkeit von Naturfasern (z. B. Flachs, Hanf, Jute, Baumwolle und Sisal) in SMC-Halbzeugen wurde in mehreren Forschungsarbeiten grundlegend untersucht und nachgewiesen [100, 101, 94]. Naturfasern bieten den Vorteil einer sehr geringen Dichte. Ihre spezifischen mechanischen Eigenschaften sind mit denen von E-Glasfasern vergleichbar [102]. Es ist jedoch zu beachten, dass die Naturfasern, im Gegensatz zu den üblicherweise verwendeten Endlosroving, eine endliche Länge aufweisen, was zu Restriktionen hinsichtlich Verarbeitung und Herstellung der SMC-Halbzeuge führt. Sie können lediglich mithilfe spezieller Faser-aufbereitungs- und Fasereinbringungsverfahren, beispielsweise in einer Doppeldosienschnecke mit anschließender Vibrationseinspeisung, der Harzpaste zugeführt

werden [103, 104]. Weiterhin ist es notwendig, die Fasern vor der Verarbeitung zu trocknen, da die mechanischen Eigenschaften sonst negativ beeinflusst werden [105]. Wenn die Fasern in Form eines flächigen und vernadelten Halbzeuges zugeführt werden, können diese nicht mehr aneinander abgleiten und es ist nur noch ein Umform- bzw. Prägeprozess realisierbar. Hierzu werden die Naturfasern mittels Krempel- und Kreuzlegeprozess zu einem Faserflor mit entsprechendem Flächen-gewicht abgelegt und anschließend vernadelt, so dass ein handhabbares Halbzeug (Naturfaservlies) entsteht. In Anbetracht der Tatsache, dass der Herstellungsprozess von SMC-Halbzeugen in den letzten Jahrzehnten nahezu unverändert geblieben ist, erscheint eine anlagentechnische Änderung zur Einbringung von Naturfasern für viele SMC-Hersteller aktuell nicht wirtschaftlich. Es konnte jedoch gezeigt werden, dass durch den Einsatz von Vinylester (VE)- und UP-Harzsystemen [106, 107] in Kombination mit Natur- und Basaltfasern [60] mechanische Eigenschaften von konventionellen SMC-Halbzeugen erreicht werden können. Die Natur- und Basaltfasern bieten den Vorteil, dass die Halbzeugdichte und der Halbzeugpreis reduziert werden kann. Auch die Kombination mit teilweise bio-basierten Reaktivharzsystemen ist möglich [108, 109].

BMC-Halbzeuge

Der Einsatz von Naturfasern in Bulk Molding Compound (BMC)-Halbzeugen ist durch Lorenz Kunststofftechnik GmbH, Osnabrück [110, 111] nachgewiesen worden. Durch die Einarbeitung der Naturfasern im Knet-Prozess werden diese nicht eingekürzt bzw. geschädigt. In den „Öko-BMC“-Halbzeugen, siehe Abbildung 2.13, werden weiterhin konventionelle Füllstoffe wie Kalziumkarbonat und ATH als Brandschutzmittel genutzt. Hierdurch können trotz des hohen bio-basierten Anteils die entsprechenden Brandschutznormen erfüllt werden [34]. Die mechanischen Kennwerte sind mit denen glasfaserverstärkter Produkte vergleichbar, bieten jedoch den Vorteil, dass Schnitt- und Stanzabfälle zu 100 % recycelt werden können. Bei einer energetischen Verwertung verbrennen die Fasern CO₂-neutral und praktisch rückstandsfrei. Die Gesamtbilanz ist „umweltfreundlich und unbedenklich für Mensch und Ökosystem“ [111].



Abbildung 2.13: Öko-BMCs der Firma Lorenz [111] mit verschiedenen Verstärkungsfasern; links: Sisal, mittig: Jute, rechts: Baumwolle (Jeans)

Zusammenfassung des Standes der Technik

In diesem Kapitel wurden die Grundlagen der SMC-Herstellung von den einzelnen Komponenten und deren jeweiliger Aufgabe in einer Rezeptur, über die Halbzeugherstellung bis hin zur Verarbeitung erläutert. Weiterhin wurden die grundlegenden Entwicklungen der letzten Jahre sowie der Einsatz von bio-basierten und nachwachsenden Rohstoffen in SMC erläutert.

Zusammenfassend ergibt sich bei der Betrachtung des Standes der Technik das folgende Bild:

- Die SMC-Technologie war eine der ersten Technologien, die die prozesssichere und (groß)serientaugliche Herstellung von FKV ermöglichte.
- SMC-Halbzeuge sowie deren Technologie sind in vielfältigen Anwendungsspektren etabliert.
- Die etablierte Technologie muss für künftige Rezepturentwicklungen beibehalten werden, kann jedoch geringfügig angepasst werden.
- Die Interaktion der einzelnen Komponenten einer SMC-Rezeptur sowie die Entwicklung und Herstellung einer SMC-Rezeptur ist hoch komplex.
- Durch Anpassung der SMC-Rezeptur und der verwendeten Verstärkungsfasern können die Anwendungsbereiche der SMC-Halbzeuge von elektrisch isolierenden Komponenten bis hin zu strukturellen Anwendungen im Luftfahrtbereich angepasst werden.
- Die Verwendung von bio-basierten und nachwachsenden Rohstoffen in SMC-Halbzeugen wurde bisher nur in wenigen (Forschungs-)Projekten untersucht; es sind keine serienreifen SMC-Halbzeuge verfügbar.

3 Entwicklung eines SMC-Halbzeuges mit konventionellen Füllstoffen

Die Entwicklung eines SMC-Halbzeuges auf Basis von ungesättigten Polyesterharzen und konventionellen Füllstoffen stellt die Grundlagen für die Entwicklung eines SMC-Halbzeuges auf Basis von bio-basierten und nachwachsenden Rohstoffen dar. Diese Entwicklung eines Referenz-Halbzeuges ist notwendig, da die SMC-Hersteller aus Gründen der Geheimhaltung keine Angaben zu ihren Rezepturzusammensetzungen geben. Nur wenn das grundlegende Zusammenwirken der Einzelkomponenten innerhalb einer Rezeptur verstanden ist, kann der Einfluss von bio-basierten und nachwachsenden Rohstoffen in SMC-Halbzeugen nachvollzogen und bezüglich der Verarbeitbarkeit untersucht werden.

Zu Beginn der Entwicklung werden Fragestellungen zu den Anforderungen an eine SMC-Harzpaste bzw. an ein SMC-Halbzeug gestellt und erklärt. Das Hauptziel ist die Vergleichbarkeit mit am Markt verfügbaren SMC-Halbzeugen und die Schaffung einer soliden Basis für weitere Versuchsreihen. Diese Vergleichbarkeit kann unter anderem an der Herstell- und Verarbeitbarkeit mit konventioneller Anlagen- und Prozesstechnik und an ausgewählten mechanischen Eigenschaften nachgewiesen werden. Dies wurde durch Expertengespräche mit Mitgliedern des AVK Arbeitskreises SMC/BMC besprochen.

Im Folgenden werden zunächst die Anforderungen, welche durch SMC-Hersteller und Anwender an ein SMC-Halbzeug gestellt werden, geklärt und in einer Spezifikation zusammengefasst. Im Anschluss werden die Rohstoffe, die für die in Kapitel 3.4.1 verwendeten Rezepturen genutzt wurden, beschrieben. Danach werden die Füllstoffe umfassend hinsichtlich ihrer physikalischen Eigenschaften untersucht. Anschließend werden vier grundlegende SMC Rezepturen, welche auf Basis einer Literaturrecherche und in Abstimmung mit SMC-Rohstofflieferanten und -Experten erarbeitet wurden, hinsichtlich ihrer Verarbeitbarkeit im Labormaßstab untersucht und deren Verarbeitbarkeit optimiert. Abschließend werden die Ergebnisse aus dem Labormaßstab auf den Technikumsmaßstab übertragen und die Verarbeitbarkeit auf der am IVW vorhandenen SMC-Anlage inklusive presstechnischer Verarbeitung unter industrienahen Prozessbedingungen optimiert.

3.1 Anforderungen an ein SMC-Halbzeug für technische Anwendungen

Zu Beginn der Entwicklung eines SMC-Halbzeuges wurden die Spezifikationen, welche das Halbzeug erfüllen muss, erarbeitet. Diese Spezifikationen wurden unter anderem durch eine umfassende Literaturrecherche, Gespräche mit SMC-Experten des AVK Arbeitskreises SMC/BMC sowie SMC-Herstellern und –Verarbeitern definiert. Hierdurch wird eine Entwicklung, welche mit am Markt verfügbaren SMC-Halbzeugen vergleichbar ist, gewährleistet. Tabelle 3.1 gibt einen Überblick über die Spezifikationen des SMC-Halbzeuges. Es ist zu beachten, dass diese Spezifikationen sich gegenseitig beeinflussen und meist nicht separat betrachtet werden können. Im Folgenden werden die einzelnen Spezifikationen näher erläutert. In Tabelle 7.1 im Anhang sind mechanische Kennwerte marktgängiger GF-SMC-Halbzeuge aufgeführt.

Tabelle 3.1: Spezifikationen des SMC-Halbzeuges mit konventionellen Füllstoffen

Kategorie	Anforderung
Halbzeugdichte	1,7 - 1,9 g/cm ³
Viskosität	<ul style="list-style-type: none"> • Harzpastenviskosität (auf SMC-Anlage) 15 - 40 Pa·s • Halbzeugviskosität (presstech. Verarbeitung) 20.000 Pa·s
Verstärkungsfaser	Glasfaser, 2400 / 4800 tex, Faserlänge 1 Zoll
Fasergehalt	30 ± 3 Gew.-%
Eindickung	innerhalb von 4 - 8 Tagen unter Zugabe von MgO
Fließverhalten	Keine Entmischung von Fasern und Harzpaste, keine optischen Verfärbungen
Mech. Kennwerte eines Bauteils	<ul style="list-style-type: none"> • E-Modul ca. 10 - 12 GPa • Zugfestigkeit ca. 80 - 100 MPa
Verarbeitbarkeit	<ul style="list-style-type: none"> • Harzpastenherstellung mit Kreisscheibendissolver • Halbzeugherstellung auf SMC-Anlage (Harzfilmdicke, Imprägnierung der Verstärkungsfasern bei konv. Drücken) • Halbzeugverarbeitung in parallelger. Fließpressprozess bei konv. Parametern (140 °C, 120 bar, 3 Minuten Zyklus)
Bauteilqualität	<ul style="list-style-type: none"> • Porengehalt max. 3 % • Homogene Faserverteilung, auch in Rippen und Domen
Flächengewicht	2000 - 40000 g/m ² ± 5 Gew.-%

Halbzeugdichte

Die Dichte konventioneller SMC-Halbzeuge wird sehr stark durch den Füllstoff- und Verstärkungsfasergehalt bestimmt. Je nach gewählten Füllstoffen, Füllstoffgehalten

zwischen 20 - 40 Gew.-% und Fasergehalten zwischen 20 - 35 Gew.-%, liegt die Dichte von konventionellen SMC-Halbzeugen im Bereich von 1,7 - 2,0 g/cm³. In Abhängigkeit von den gewählten Füllstoffen und Fasergehalten werden unter anderem die Dichte, die mechanischen Eigenschaften und das Brandverhalten beeinflusst.

Viskosität

Die Viskosität eines SMC-Halbzeuges stellt einen zentralen Punkt der Harzpastenentwicklung dar und verändert sich von der Vorbereitung der Harzpaste mittels Dissolver (15 - 40 Pa·s) über die Herstellung des SMC-Halbzeuges (Harzpaste inkl. Verstärkungsfasern) und die Reifezeit (ca. 2.000 - 20.000 Pa·s) bis zur Verarbeitung zum SMC-Bauteil kontinuierlich, siehe Abbildung 2.7. Nur durch die richtige Harzpastenviskosität kann die prozesssichere Verarbeitung von SMC-Harzpaste und -Halbzeug gewährleistet werden.

Verstärkungsfasern

Bei der Entwicklung des Halbzeuges wurde die Art der Verstärkungsfasern auf Glasfasern beschränkt. Dies wurde aufgrund des sehr hohen Marktanteils von GF-SMC, welcher mehr als 95 % beträgt, festgelegt [22]. Die Fasern sollen als Multi-End Rovings mit einer tex-Zahl von 2400 bis maximal 4800 vorliegen. Die Faserlänge kann durch Änderungen des Messerabstandes im Schneidwerk in einem Bereich von ½ Zoll bis zwei Zoll geändert werden. In dieser Arbeit wird eine Faserlänge von einem Zoll gewählt, da diese die Standard-Faserlänge bei konventionellen SMC-Halbzeugen ist.

Fasergehalt

Der Fasergehalt ist maßgeblich für die mechanischen Eigenschaften verantwortlich. Bei konventionellen SMC-Halbzeugen liegt dieser im Bereich von 20 - 35 Gew.-%. Für die Entwicklung im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Fasermassengehalt von 30 % definiert. Die Schwankungen des Fasermassengehaltes sollen sowohl im Halbzeug als auch im Bauteil geringer als ± 3 Gew.-% sein.

Eindickung

Die Eindickung des SMC-Halbzeuges soll mittels MgO möglich sein. Dieses Eindickmittel wurde im Voraus definiert, da es das am häufigsten verwendete Eindickmittel ist und prozesstechnisch am sichersten verarbeitbar ist. Die Eindickung kon-

ventioneller SMC-Halbzeuge dauert meist zwischen vier und acht Tagen und kann durch Änderung der Umgebungstemperatur gesteuert werden.

Fließverhalten

Das Fließverhalten des SMC-Halbzeuges soll mit dem Fließverhalten konventioneller SMC-Halbzeuge vergleichbar sein. Dies bedeutet, dass eine 60 %-Werkzeugauslage gewählt werden kann und während des Schließvorgangs des Presswerkzeugs das SMC-Halbzeug überall in das Presswerkzeug fließt, Rippen füllt und auch dort die Verstärkungsfasern homogen verteilt vorliegen. Durch Wahl einer auf das Harzsystem ausgewählten Faserschichte wird der Faser-Matrix-Entmischung vorgebeugt.

Mechanische Kennwerte

Die mechanischen Kennwerte des SMC-Bauteils sollen mit denen konventioneller SMC-Bauteile vergleichbar sein. Hierzu wurde ein Fasermassegehalt von 30 % definiert. Dieser führt nach DIN EN ISO 14598 (Stand Juli 2005) bei SMC-Bauteilen zu einem E-Modul von ca. 10 GPa und einer Zugfestigkeit von ca. 70 MPa [112].

Verarbeitbarkeit

Die Herstellung der SMC-Harzpaste soll mittels Kreisscheiben-Dissolver geschehen. Dieser bietet den Vorteil, dass durch die auftretenden hohen Scherkräfte sowohl eine Agglomeratbildung der Füllstoffe minimiert als auch eine effiziente und homogene Durchmischung der Einzelkomponenten ermöglicht wird. Die Harzpaste soll nach Zugabe aller Komponenten eine Verarbeitungsviskosität von 15 - 40 Pa·s aufzeigen und auf einer konventionellen SMC-Anlage verarbeitbar sein. Nach der Reifung soll das SMC-Halbzeug in einem parallelgeregelten Fließpressprozess verarbeitbar sein.

Bauteilqualität

Die Bauteilqualität von SMC-Halbzeugen wird maßgeblich durch eine homogene Faserverteilung im kompletten SMC-Bauteil sowie einen geringen Porengehalt bestimmt. Prozessbedingt (Harzpasten- und Halbzeugherstellung) sind im SMC-Halbzeug sehr viele Lufteinschlüsse vorhanden. Diese können durch das Fließen des Materials im Presswerkzeug „herausgedrückt“ werden, so dass im SMC-Endbauteil nur noch ein geringer Porengehalt vorliegt. Dieser darf laut Aussage von SMC-Experten bis zu 3 % betragen.

Flächengewicht

Das Flächengewicht des auf der SMC-Anlage hergestellten SMC-Halbzeuges soll 2000 - 4000 g/m² betragen. Die Schwankung des Flächengewichtes soll geringer als $\pm 5 \%$ sein.

3.2 Verwendete Materialien

Zur Durchführung der Vorversuche im Labormaßstab und für die spätere Übertragung der Ergebnisse auf Technikumsmaßstab wurden alle Komponenten, welche für die Herstellung einer SMC-Harzpaste benötigt werden, ausgewählt und beschafft. Die Auswahl der ersten Harzsysteme erfolgte in Zusammenarbeit mit Mitgliedern des AVK-Arbeitskreises SMC/BMC. Anhand der gewählten Harzsysteme wurden entsprechend chemisch kompatible Anti-Schrumpf-Additive und die weiteren Komponenten der SMC-Harzpasten ausgewählt. Alle ausgewählten Materialien erfüllen die REACH-Verordnung [113]. Es wurden repräsentative Standard-Materialien, welche in der SMC-Industrie Anwendung finden, ausgewählt.

Harzsysteme

Als Harzsysteme wurden die UP-Harze Palapreg P17-02 [114] und Palapreg P18-03 [115] der Firma DSM (heute Firma AOC Aliancys) und Polylite 661-000 [116] sowie Polylite 31660-30 [117] der Firma Reichhold ausgewählt. Die wichtigsten Materialeigenschaften sind in Tabelle 3.2 zusammengefasst.

Tabelle 3.2: Wichtigste Materialeigenschaften der verwendeten UP-Harze

Parameter	Einheit	Palapreg P17-02	Palapreg P18-03	Polylite 661-000	Polylite 31660-30
Hersteller	-	DSM	DSM	Reichhold	Reichhold
Dichte	kg/m ³	1,10	1,10	1,10	1,15 $\pm 0,02$
Viskosität (23°C)	mPa·s	1300 -1500	1680 -1900	500 -700	1300 -1600
Wassergehalt	%	0,04 - 0,07	0,06 - 0,10	0,10	0,12

Anti-Schrumpf-Additive

Durch die Zugabe dieser Additive, auch Low-Profile Additive genannt, soll die Schwindung der Bauteile minimiert werden. In dieser Arbeit wurden Additive, die zu den gewählten Grundharzen kompatibel sind und durch die jeweiligen Hersteller empfohlen wurden, gewählt. Tabelle 3.3 gibt einen Überblick über die wichtigsten Materialeigenschaften der jeweiligen Additive. Hierbei wurden sowohl Low-Profile-Additive (LP) und Low-Shrinkage-Additive (LS) verwendet. Die Wirkweise der Anti-Schrumpf-Additive ist in Kapitel 2.2.4 beschrieben.

Tabelle 3.3: Wichtigste Materialeigenschaften der verwendeten Anti-Schrumpf-Additive

Parameter	Einheit	Norpol LP-9887 [118]	Norpol LP-9880 [119]	Palapreg H 814-01 [120]	Palapreg H 852-03 [121]
Hersteller	-	Reichhold	Reichhold	DSM	DSM
Wirkweise	-	LS	LP	LS	LP
Viskosität (23°C)	mPa·s	5000 -6500	4000 ±1000	5200 - 5600	150 - 175
Dichte	g/cm ³	0,95	0,99	0,95	1,1

Netz- und Dispergieradditive

Jedes Harzsystem kann nur eine definierte Menge an Verstärkungsfasern und Füllstoffen imprägnieren. Durch die Zugabe von Netz- und Dispergieradditiven wird eine Imprägnierung der Fasern und Füllstoffe erleichtert und optimiert. Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Netz- und Dispergieradditive BYK-W 996 [122] und BYK-W 9010 [123] der Firmen BYK Additives & Instruments sowie LUVATINE VC104 [124] und LUVATINE VC105 [125] der Firma Lehmann&Voss&Co. gewählt. Tabelle 3.4 gibt einen Überblick über die wichtigsten Materialeigenschaften.

Tabelle 3.4: Wichtigste Materialeigenschaften der verwendeten Netz- und Dispergieradditive

Parameter	Einheit	BYK-W 996	BYK-W 9010	LUVATINE VC104	LUVATINE VC105
Hersteller	-	BYK	BYK	Lehmann& Voss&Co	Lehmann& Voss&Co
Dichte	kg/m ³	0,97	1,16	1,16	1,03
Wassergehalt	%	-	0,02	0,02	0,11
Dosiervorgabe	phr	3-4	0,5-1,0	0,5-1,0	1,0-2,0

Farbstoff

Zur Einfärbung der Harzpaste wurde die hochkonzentrierte Pigmentpaste CC Weiß SL75 des Herstellers Brohl Chemie, welche in einem ungesättigten Polyester gelöst ist, genutzt. Mit einer Dichte von ca. 2,3 g/cm³ und einer Viskosität von 7,5 Pa·s ist die Einarbeitung in die Harzpaste problemlos möglich [126].

Eindickmittel

Zur Eindickung der Harzpaste wurde die Magnesiumdioxid-Paste MK35 NV des Herstellers Lehmann&Voss&Co. genutzt. Diese Paste besteht zu 35 Gew.-% aus einem mittelreaktiven Magnesiumdioxid, welches in einem ungesättigten Polyesterharz gelöst ist und kann für alle gängigen SMC-Formulierungen verwendet werden [127].

Füllstoffe

Bei der Entwicklung der Rezepturen wurden sowohl nicht funktionelle als auch funktionelle Füllstoffe verwendet. Die nicht funktionellen Füllstoffe werden hauptsächlich zum kostengünstigen Generieren des Bauteilvolumens eingesetzt. Die funktionellen Füllstoffe sollen als Flammenschutz eingesetzt werden. Als nicht funktionelle Füllstoffe wurden die Kalziumkarbonate Omyacarb® 5-VA [128] und Millicarb®-OG [52] eingesetzt. Weiterhin wurde als funktioneller Füllstoff das Aluminiumhydroxid Martinal® ON-306 [129] verwendet. Tabelle 3.5 fasst einige der wichtigsten Materialeigenschaften zusammen.

Tabelle 3.5: Wichtigste Materialeigenschaften der verwendeten Füllstoffe

Parameter	Einheit	Omyacarb® 5-VA	Millicarb®- OG	Martinal® ON-306
Hersteller	-	OMYA GmbH	OMYA GmbH	Martinswerk GmbH
Dichte	kg/m ³	2,74	2,71	2,4
Partikelgröße (d ₅₀)	µm	6	3	7
Feuchtegehalt	%	0,2	0,2	< 0,4
Aufgabe im Halbzeug	-	Volumen generieren, Fa- sertransport, Chemikali- enbeständigkeit		Flamm- schutz

Verstärkungsfasern

Als Verstärkungsfasern wurden assemblierte E-Glass Rovings mit einer Tex-Zahl von 2400 bzw. 4800 des Herstellers Owens Corning Reinforcements eingesetzt. Konkret wurden die Rovings P204 (2400 tex) und R63 (4800 tex) verwendet [130, 55].

3.3 Charakterisierung konventioneller Füllstoffe

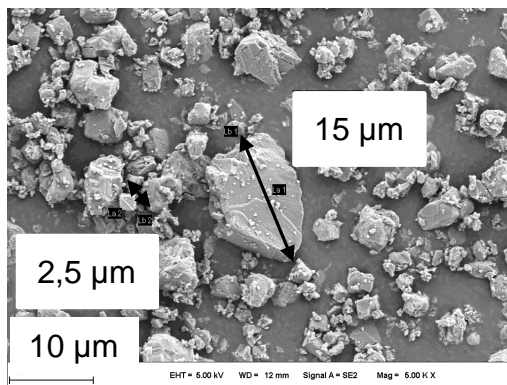
Die verwendeten Materialien wurden charakterisiert, bevor mit der Entwicklung eigener Rezepturen begonnen wurde. Anhand dieser Charakterisierung soll das grundlegende Verhalten der verschiedenen Füllstoffe in einer SMC-Rezeptur verstanden werden.

Die Charakterisierung der Füllstoffe wird exemplarisch beschrieben. Diese wurden hinsichtlich ihrer Oberflächenbeschaffenheit, der Partikelgrößenverteilung, der Imprägnierbarkeit und dem Feuchteaufnahmeverhalten untersucht. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen werden benötigt, um aufbauend auf diesen alternative bio-basierte und nachwachsende Füllstoffe auswählen zu können.

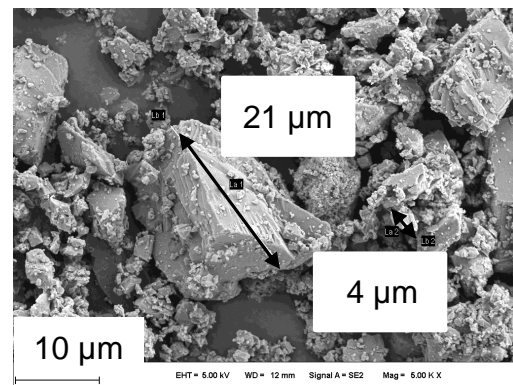
Oberflächenbeschaffenheit (REM-Aufnahmen)

Zu Beginn der Untersuchungen wurden die einzelnen Füllstoffe mittels Rasterelektronenmikroskopie (REM) untersucht. Hierbei wurde ein spezielles Augenmerk auf die Oberflächenbeschaffenheit bzw. -geometrie und die Partikelgrößenverteilung gelegt. Auf Basis dieser Aufnahmen können Rückschlüsse auf die Imprägnierbarkeit bzw.

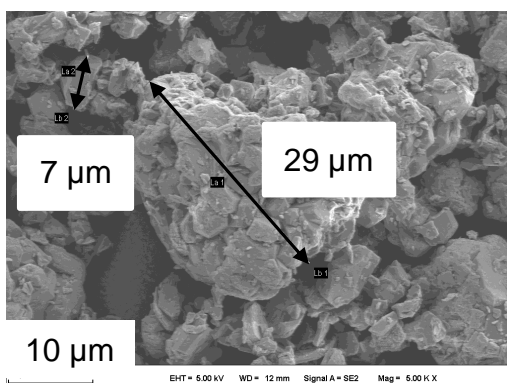
die Einbindung der Partikel in den Verbund erarbeitet werden. Abbildung 3.1 zeigt die Oberflächen der in der Arbeit verwendeten Füllstoffe sowie eine Verteilung der unterschiedlich großen Partikel. In der oberen Reihe sind die Partikel der Kalziumcarbonate gezeigt. Beide Partikel zeigen eine scharfkantige Oberfläche. Es ist kein struktureller Unterschied zwischen den einzelnen Materialien erkennbar. Die Partikelgrößen liegen mit 3 - 15 μm (Millicarb-OG) bzw. 4 - 21 μm (Omyacarb 5V) im Bereich der Datenblattangaben. Die Partikel des Aluminiumhydroxid (Martinal ON-307) zeigen eine kubische Oberfläche mit einer Partikelgröße im Bereich von 4 - 10 μm . Es ist eine starke Agglomerat-Bildung zu erkennen. Diese Agglomerate zeigen eine Größe von bis zu 30 μm . Das interne Trennmittel Zinkstearat besteht aus elliptischen Partikeln, die zu Agglomeratbildung neigen. Die Partikel zeigen eine geschlossene Oberfläche bei einer Größe von ca. 0,8 - 1,2 μm .



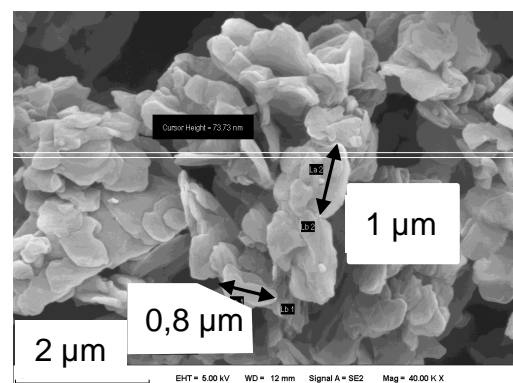
Kalziumcarbonat (Millicarb-OG),
5000-fache Vergrößerung



Kalziumcarbonat (Omyacarb 5V),
5000-fache Vergrößerung



Aluminiumhydroxid (Martinal ON-307),
5000-fache Vergrößerung



Zinkstearat (Zinkum 5),
40.000-fache Vergrößerung

Abbildung 3.1: REM-Oberflächenaufnahmen ausgewählter Füllstoffe für SMC-Halbzeuge

Feuchtegehalt

Der Feuchtegehalt der nicht funktionellen und funktionellen Füllstoffe sowie das Feuchtaufnahmeverhalten beeinflusst die Verarbeitbarkeit und das Verarbeitungsverhalten der Füllstoffe stark. Füllstoffe, die eine hohe Grundfeuchte aufweisen, müssen zum Beispiel vor der Verarbeitung getrocknet werden. Die Grundfeuchte, welche bei allen Materialien im Anlieferungszustand vorliegt, wurde in Trocknungsversuchen auf einem Kern Feuchtebestimmer vom Typ MLS bestimmt. Hierzu wurde der Boden einer Aluminium-Wägeschale vollflächig mit dem zu untersuchenden Material bedeckt und in die Messkammer, welche über eine Wägezelle verfügt, eingelegt. Mittels Infrarot (IR)-Strahlung wird das zu untersuchende Material so lange erhitzt, bis über einen Zeitraum von zwei Minuten keine Änderung der Masse festgestellt wird (Massenkonstanz). Abbildung 3.2 zeigt die Ergebnisse der in dieser Arbeit verwendeten Füllstoffe.

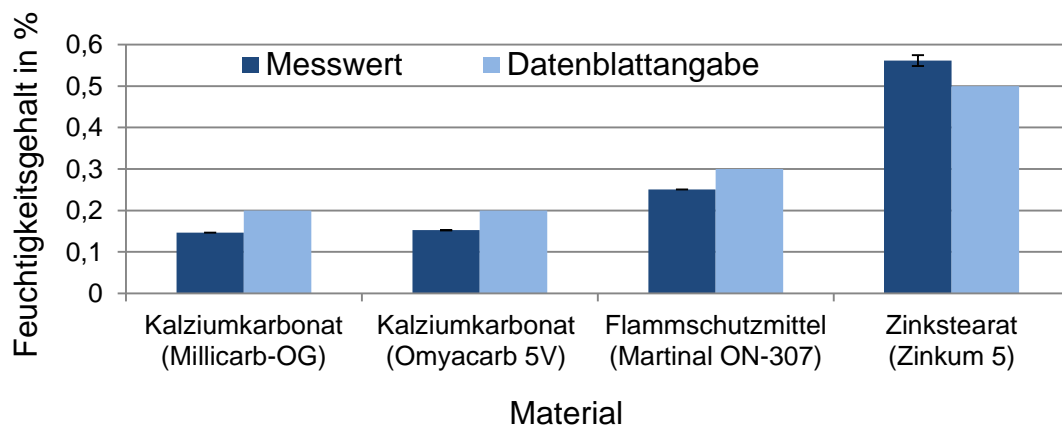


Abbildung 3.2: Feuchtigkeitsgehalt ausgewählter SMC-Füllstoffe im Anlieferungszustand

Der tatsächliche Feuchtigkeitsgehalt der Füllstoffe lag bis zu 25 % unter dem maximal möglichen Wert, der in den Datenblättern angegeben ist. Lediglich beim Zinkstearat lag der tatsächliche Wert ca. 10 % über den Datenblattangaben.

Feuchtigkeitsaufnahme

Nachdem die Grundfeuchte der Füllstoffe im Anlieferungszustand bestimmt war, wurde im zweiten Schritt das Feuchtigkeitsaufnahmeverhalten der einzelnen Füllstoffe untersucht. Hierzu wurden die einzelnen Füllstoffe in einer präparierten Aluminiumschale in einer Klimakammer (Marke: Weiss, Typ: SB22) bei konstant 25 °C und 95 % relativer Luftfeuchtigkeit bis zur Sättigung eingelagert. Abbildung 3.3 zeigt das

Feuchtigkeitsaufnahmeverhalten. Hierbei ist zu erkennen, dass die Füllstoffe Kalziumcarbonat und Aluminiumhydroxid innerhalb von 2,5 Stunden ihre maximale Sättigung erreichen (0,05 bzw. 0,02 %) und sich diese innerhalb einer Versuchsdauer von 67,5 Stunden nur minimal ändert. Die Stearate hingegen nehmen innerhalb der ersten 48 Stunden konstant Feuchtigkeit auf und zeigen eine Sättigung im Bereich von ca. 0,8 % Massenzunahme. Dies entspricht ca. dem zehnfachen Wert der Füllstoffe und ist auf der rechten Ordinate aufgetragen.

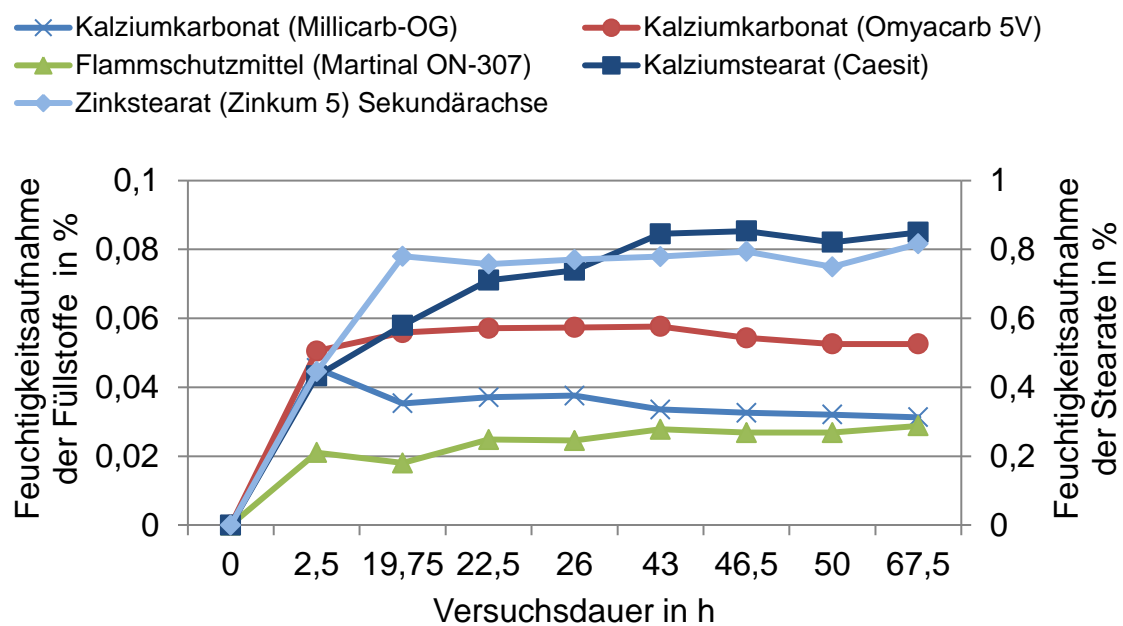


Abbildung 3.3: Maximale Feuchtigkeitsaufnahme ausgewählter SMC-Füllstoffe

Trocknungsversuche maximal feuchter Füllstoffe

Die in der Klimakammer maximal befeuchteten Füllstoffe wurden anschließend wieder im Feuchtebestimmer (Firma Kern, Typ: MLS) bis zur Massenkonstanz getrocknet. Alle Füllstoffe erreichten wieder die Ursprungswerte. Diese Ergebnisse zeigen, dass die Materialien robust gegenüber äußeren Feuchtigkeitseinflüssen sind. Es sollte jedoch bei der Lagerung darauf geachtet werden, dass die Materialien in einem trockenen und kühlen Raum gelagert werden, da man sie sonst vor der Verarbeitung gegebenenfalls nochmals trocknen muss.

3.4 Entwicklung von SMC-Harzpastenrezepturen

Aus den in Kapitel 3.2 beschriebenen Einzelkomponenten werden in diesem Kapitel vier SMC-Rezepturen, basierend auf den vier gewählten Grundharzen, entwickelt. Entsprechend der Herstellerempfehlungen werden die Anti-Schrumpf-Additive gewählt, welche eine hohe chemische Kompatibilität besitzen. Aufbauend auf durchgeführten Vorversuchen werden Reaktionsinhibitoren und –initiatoren sowie die anwendungsspezifischen Additive gewählt. Die daraus resultierenden SMC-Rezepturen werden grundlegend hinsichtlich ihrer Verarbeitbarkeit im Labormaßstab untersucht. Dies beinhaltet unter anderem die Charakterisierung des Misch- und Dispergierverhaltens und die Bestimmung der Harzpastenviskosität in Abhängigkeit von Füllstoffgehalt und Styrolanteil. Anschließend werden aus den Harzpasten im Hand-SMC-Verfahren SMC-Halbzeuge hergestellt. Diese Halbzeuge werden auf einer Laborpresse zu Probekörperplatten verarbeitet, welche zur Bestimmung mechanischer Kennwerte dienen. Anhand der Probekörperplatten werden das Fließverhalten und die Imprägnierqualität der Halbzeuge beurteilt. Basierend auf diesen Ergebnissen werden die Harzpasten optimiert und letztendlich eine Rezeptur ausgewählt, welche hinsichtlich ihrer Verarbeitbarkeit im Technikumsmaßstab optimiert wird.

Diese optimierte Rezeptur wird anschließend, wie in Kapitel 3.5 beschrieben, auf der am Institut vorhandenen SMC-Anlage (Hersteller: Schmidt & Heinzmann, Typ: SMCl ine600) zu SMC-Halbzeugen verarbeitet. Nach der Reifung werden die Halbzeuge auf einer parallelgeregelten 800 Tonnen-Bauteilpresse im industriellen Maßstab (Hersteller: Dieffenbacher, Typ: PHP 800/650) zu Probekörperplatten verpresst und anschließend charakterisiert.

3.4.1 Grundrezepturen

Auf Basis der von DSM Composite Resins bereitgestellten SMC-Grundharze wurden die SMC-Harzpasten „Rezeptur 1“ und „Rezeptur 2“ entwickelt, siehe Tabelle 3.6. Die Abgrenzung dieser beiden Rezepturen besteht hauptsächlich in der Verwendung eines funktionellen Füllstoffs (Flammschutzmittel) in Verbindung mit konventionellen Füllstoffen in Rezeptur 1 gegenüber einem rein konventionellen Füllstoff in Rezeptur 2. Weiterhin wurde die Menge der Eindickpaste in Verbindung mit dem Polymerisationsinhibitor geändert. Durch die Wahl einer hochdosierten Eindickpaste und einer

entsprechenden Dosierung wird der Einfluss der Dosierung auf die Eindickung untersucht. Beide Rezepturen werden mit einer weißen hochdosierten Pigmentpaste eingefärbt. Zur Senkung der Grundviskosität der Grundrezeptur 2 wurde ein Teil an technischem Styrol hinzugefügt und dessen Einfluss auf die Verarbeitbarkeit der Harzpaste untersucht.

Die hier gezeigten Rezepturen wurden aufgrund chemischer Kompatibilität der einzelnen Komponenten untereinander entwickelt. Das Ziel bei der Entwicklung der Grundrezepturen besteht darin, chemisch kompatible Komponenten in einer Gesamtrezeptur zu vereinen, die die gestellten Spezifikationen erfüllt.

Tabelle 3.6: SMC-Grundrezepturen auf Basis der DSM-Harze

Komponenten	Einheit	Rezeptur 1		Rezeptur 2	
		Bezeichnung	Anteil	Bezeichnung	Anteil
UP-Harzsystem	g	Palapreg P17-02	17,12	Palapreg P18-03	13,00
Anti-Schrumpf-Additiv	g	Palapreg H-814-01	7,33	Palapreg H-852-03	10,40
Netz- und Dispergier-Additiv	g	BYK W996	0,36	BYK W910	0,06
Internes Trennmittel	g	Zinkum 5	0,98	Zinkum 5	0,97
Polymerisations-initiator	g	Trioxognox C	0,36	Peroxan BEC	0,32
Polymerisations-inhibitor	g	Pergaslow HD10	0,36	Pergaslow HD10	0,06
Füllstoff	g	Millicarb OG	12,22	Millicarb OG	42,41
Flammschutzmittel	g	Martinal ON310	28,69	-	-
Eindickpaste	g	Luvatol MK35	1,95	Luvatol MK35	0,35
Technisches Styrol	g	-	-	-	1,80
Farbpaste	g	CC Weiß	0,63	-	0,63
Verstärkungsfaser	g	OC P204	30,00	OC P204	30,00

Tabelle 3.7 zeigt die beiden Rezepturen, welche auf Basis der ungesättigten Polyesterharze des Herstellers Reichhold entwickelt wurden. Auch bei diesen Rezepturen wurde in Rezeptur 3 ein Brandschutzmittel verwendet, welches in Rezeptur 4 durch einen höheren Anteil an nicht funktionellen Füllstoffen ausgeglichen wird. Zur Steige-

Die Imprägnierung der Verstärkungsfasern wurde in Rezeptur 3 ein Netz- und Dispergieradditiv gewählt. Weiterhin wurden zur Steuerung der Aushärtereaktion chemisch kompatible Polymerisationsinhibitoren und –initiatoren gewählt. Die Eindickung wurde über die Beimischung eines MgO gesteuert. Durch die Anpassung des Mengenverhältnisses der Eindickpaste kann das Eindickverhalten der Halbzeuge gezielt gesteuert werden.

Tabelle 3.7: SMC-Grundrezepturen auf Basis der Reichhold-Harze

Komponenten	Rezeptur 3			Rezeptur 4	
	Einheit	Bezeichnung	Anteil	Bezeichnung	Anteil
UP-Harzsystem	g	Polylite 661-000	13,52	Polylite 31660-30	15,75
Anti-Schrumpf-Additiv	g	Norpol 9880	6,32	Norpol 9887	8,47
Netz- und Dispergier-Additiv	g	BYK W910	0,33	-	-
Internes Trennmittel	g	Zincum 5	0,49	Zincum 5	0,55
Polymerisations-initiator	g	Trigonox C	0,33	Trigonox C	0,55
Polymerisations-inhibitor	g	PBQ 10%	0,04	PBQ 10%	0,06
Füllstoff	g	Millicarb OG	20,17	Millicarb OG	41,36
Flammschutzmittel	g	Martinal ON310	25,61	-	-
Eindickpaste	g	Luvatol MK35	0,61	Luvatol MK35	0,68
Technisches Styrol	g	-	1,95	-	1,95
Farbpaste	g	CC Weiß	0,63	CC Weiß	0,63
Verstärkungsfasern	g	OC P204	30,00	OC P204	30,00

3.4.2 Charakterisierung der SMC-Rezepturen

Zur Charakterisierung der SMC-Harzpasten und des Einflusses einzelner Komponenten auf Verarbeitbarkeit dieser, werden im Folgenden die verwendeten Charakterisierungsmethoden beschrieben.

Mischverhalten

Zu Beginn der Rezepturenentwicklung wurde der Einfluss der Rührergeometrie, siehe Abbildung 3.4, auf das Misch- und Dispergierverhalten der einzelnen Komponenten und der Gesamtharzpaste untersucht. Hierbei konnte eine optimale Durchmischung der flüssigen Komponenten durch die Wahl eines dreiflügligen Flügel- und Impeller-rührers (Durchmesser jeweils 60 mm) erlangt werden. Das homogene Einbringen der pulverförmigen Füllstoffe ist mit diesen Rührertypen jedoch nicht möglich. Es bilden sich Agglomerate, welche während des Rührens nicht mehr aufgebrochen werden konnten. Dies ist durch einen zu geringen Energieeintrag, bedingt durch zu geringe Scherströmungen, zu erklären. Bei der Verwendung einer Zahn-/Dispergierscheibe, siehe Abbildung 3.4 links, können alle flüssigen Komponenten homogen miteinander verrührt werden.

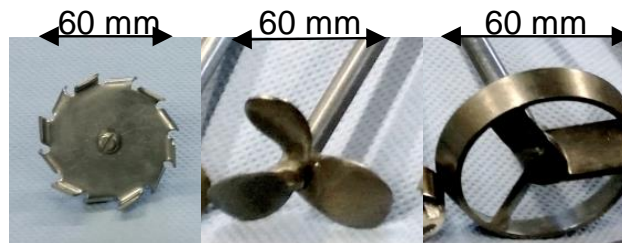


Abbildung 3.4: Übersicht der verwendeten Rührertypen, von links nach rechts: Dispergierscheibe, Flügel- und Impeller-Rührer; Durchmesser jeweils 60 mm

Ebenfalls können alle pulverförmigen Komponenten, bedingt durch hohe auftretende Scheerkräfte, in den SMC-Rezepturen eingearbeitet und homogen dispergiert werden. Für die Versuchsdurchführung im Labormaßstab wurde ein IKA Rührwerk vom Typ RW16 basic gewählt. Die gewählte Drehzahl lag im Bereich von 500 - 700 Umdrehungen pro Minute. Die jeweiligen Komponenten wurden für ca. 45 Sekunden miteinander verrührt. Die gewählte Dispergierscheibe besitzt einen Durchmesser von 60 mm; über den Umfang sind 12 Zähne verteilt.

Bestimmung der Harzpastenviskosität

Eine Standard-SMC-Harzpaste mit unterschiedlichen Komponenten und Füllstoffen besitzt einen thixotropen Charakter und verhält sich wie eine nicht-newtonsche Flüssigkeit. Es ist sehr wichtig den Einfluss einzelner Harzpasten-Komponenten auf die Harzpastenviskosität zu kennen und die Viskosität der Harzpaste gezielt zu steuern. Eine konventionelle SMC-Harzpaste besitzt eine Verarbeitungsviskosität im Bereich

von 15 - 40 Pa·s. Tabelle 3.8 ordnet diese Viskosität allgemein bekannten Viskositäten zu.

Tabelle 3.8: Übersicht ausgewählter Viskositätswerte

Material bei Raumtemperatur (25°C)	Einheit	Viskosität
Wasser	Pa·s	0,001
Olivenöl	Pa·s	0,1
Optimum einer SMC-Harzpaste	Pa·s	30
Honig	Pa·s	100

Die Harzpastenviskosität der einzelnen Rezepturen wurde im Labormaßstab nach EN ISO 2555:1999 [131] bestimmt. Da die Viskosität temperaturabhängig ist, werden alle Messungen in einem doppelwandigen temperierten Behälter durchgeführt, siehe Abbildung 3.5. Die Temperatur des Behälters und der sich darin befindlichen Harzpaste werden durch eine Temperiereinheit auf 25 °C temperiert. Die Viskositätsmessung erfolgt mit einem Viskosimeter des Herstellers Brookfield, Typ LVDV II+pro tools mit der Spindelnummer 64, Spindeltyp 7. Vor Beginn der jeweiligen Messreihe wird das Viskosimeter mit einer entsprechenden Kalibrierflüssigkeit kalibriert.

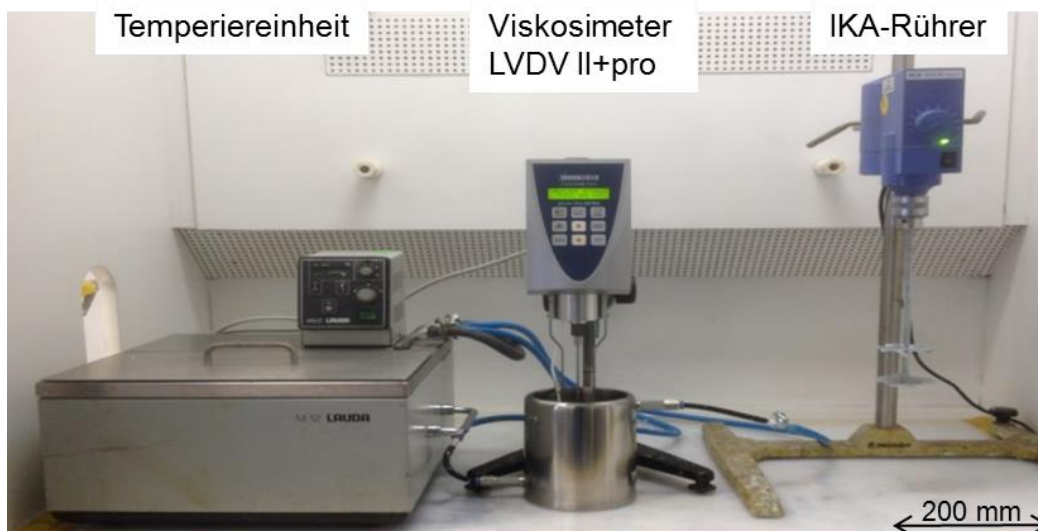


Abbildung 3.5: Messaufbau zur Bestimmung der Harzpastenviskosität

Die Ergebnisse der Viskositätsmessungen sind in Abbildung 3.6 dargestellt. Hierbei ist ersichtlich, dass die vier Harzpasten unterschiedliche Grundviskositäten im Bereich von 10 bis 66 Pa·s zeigen. Bei allen Harzpasten steigt die Viskosität durch die Zugabe des Eindickmittels Magnesiumoxid kontinuierlich und homogen innerhalb der

ersten 30 Minuten nach Zugabe an. Dieser Verlauf entspricht einem Verlauf, wie er für die Verarbeitung der Harzpasten auf der SMC-Anlage gewünscht ist. Durch die hohe Grundviskosität der Rezeptur 1 wird diese für die folgenden Versuchsreihen ausgeschlossen. Die Rezepturen 2 und 3 liegen mit einer Grundviskosität von 26 und 25 Pa·s sehr nah beieinander. Durch die Zugabe von Styrol bzw. durch Reduktion der Füllstoffanteile kann die Grundviskosität deutlich gesenkt werden. Es gilt zu beachten, dass Styrol ein Reaktionsmonomer ist, welches die Reaktionskinematik beeinflussen kann. Rezeptur 4 zeigt mit 10 Pa·s die geringste Grundviskosität. Durch Reduktion der zugegebenen Styrolmenge und geringe Erhöhung des Füllstoffgehaltes kann die Grundrezeptur auf 15 Pa·s eingestellt werden. Durch Erhöhung des Eindickmittelanteils ist es möglich, das Eindickverhalten so zu steuern, dass die Viskosität ca. 20-30 Minuten nach der Herstellung der Harzpaste in einem Bereich von 40 Pa·s liegt. Hierdurch ist eine prozesssichere und effiziente Verarbeitung der Harzpaste zum Halbzeug auf SMC-Anlagen möglich. Nachdem das MgO zur Harzpaste dosiert wurde, beginnt diese augenblicklich mit der Eindick-Reaktion. Bis zur Imprägnierung der Verstärkungsfasern darf die Harzpaste eine Viskosität von 40 Pa·s nicht überschreiten.

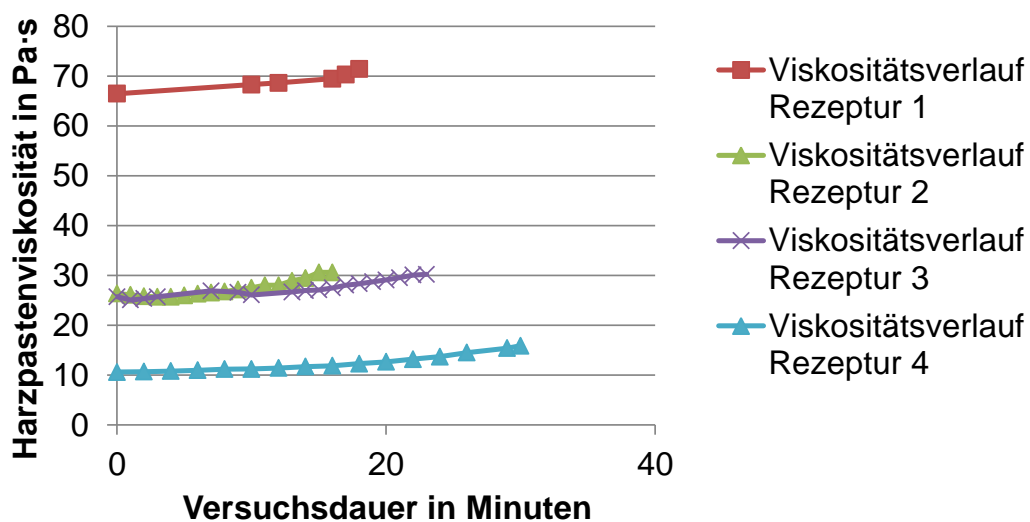


Abbildung 3.6: Ergebnisse der Viskositätsmessung nach EN ISO 2555:1999

Dichtebestimmung

Zur Bestimmung der Dichte von pastösen Materialien stehen verschiedene Methoden zur Verfügung. Diese sind unter anderem die Bestimmung mittels Pyknometer, Den-

symeter, Aröometer und dem Ultraschall-Pulsecho-Verfahren. In dieser Arbeit wird die Dichte der pastösen Massen mittels Pyknometer bestimmt. Abbildung 3.7 zeigt ein Pyknometer mit einem Volumen von 49,998 ml (Beschriftung 50 ml) und die einzelnen Schritte, die zur Bestimmung der Harzpastendichte notwendig sind. Zunächst wird das Gewicht des leeren Pyknometers (1) mit einer Laborwaage auf 0,001 g genau bestimmt. Anschließend wird das Pyknometer komplett mit der Harzpaste (2) gefüllt, der Deckel aufgelegt und per Hand geschlossen (3). Hierbei wird die überflüssige Harzpaste herausgepresst (4) und die Oberfläche des Pyknometers mit einem Lösungsmittel gereinigt. Abschließend wird die Masse des gefüllten Pyknometers wieder mit der Laborwaage bestimmt. Die in den Versuchsreihen genutzte Harzpaste wurde in einem Labordissolver homogenisiert und ohne Anlegen eines Vakuums verarbeitet und geprüft.

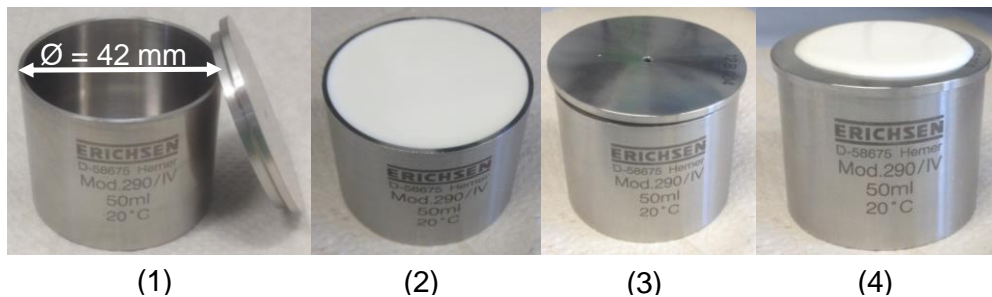


Abbildung 3.7: Einzelne Schritte zur Dichtebestimmung von pastösen Massen mittels Pyknometer

Die Dichte der Harzpaste ($\rho_{\text{Harzpaste}}$) wird nach Formel (3.1) berechnet und ergibt sich aus der Massendifferenz des gefüllten ($m_{\text{Pyk.gef.}}$) und des leeren Pyknometers ($m_{\text{Pyk.leer}}$) dividiert durch das sich darin befindliche Volumen ($V_{\text{Pyk.}}$).

$$\rho_{\text{Harzpaste}} = \frac{m_{\text{Pyk.gef.}} - m_{\text{Pyk.leer}}}{V_{\text{Pyk.}}} \quad (3.1)$$

Zur Kontrolle dieser Methode wurden die ermittelten Werte der Harzpastendichte mit den berechneten Werten verglichen. Die Berechnung der Referenzwerte der Harzpastendichte wurde anhand der jeweiligen Massenverhältnisse der Einzelkomponenten in den jeweiligen Rezepturen durchgeführt. Abbildung 3.8 zeigt einen exemplarischen Abgleich der realen und berechneten Harzpastendichte der Rezeptur 4. Die berechnete Harzpastendichte liegt mit $1,67 \text{ g/cm}^3$ ca. 3,2 % über der bestimmten realen Harzpastendichte von $1,62 \text{ g/cm}^3$. Nur wenn die exakte Dichte der Harzpaste be-

kannt ist, kann ein homogenes und prozessstabiles Halbzeug hergestellt werden. Die Methode zur Berechnung der Harzpastendichte ist in Anhang 7.2 erläutert.

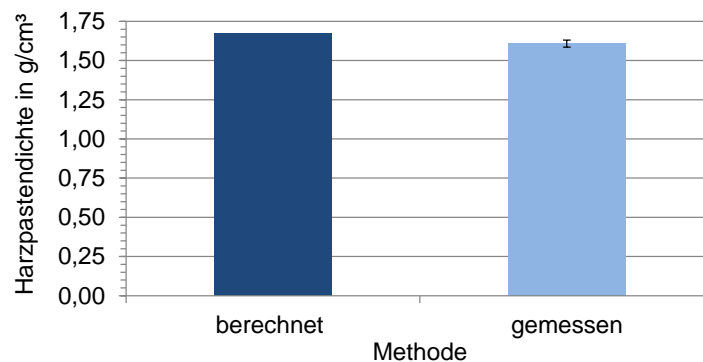


Abbildung 3.8: Übereinstimmung der berechneten und realen Harzpastendichte

Bei dem gewählten Fasermassenanteil von 30 Gew.-% und einer Dichte der Glasfasern (ρ_{GF}) von 2,55 g/cm³ ergibt sich eine berechnete SMC-Halbzeugdichte von 1,86 g/cm³. Dieser Wert entspricht der Spezifikation.

Zusammenfassung der Ergebnisse der Harzpasten-Charakterisierung

- Die Rührergeometrie besitzt einen sehr großen Einfluss auf die Harzpastenhomogenität und dabei eingebrachte Luftblasen im Halbzeug. Nur durch die Wahl eines Zahnscheibenrührers mit einer Dispergierscheibe kann eine homogene Harzpaste hergestellt werden. Die hierbei auftretenden Scherkräfte und die hohen Drehzahlen können zu einer Erwärmung der Harzpaste führen.
- Bei der Viskositätsmessung wurde ein großer Einfluss der Temperatur auf die Viskosität wahrgenommen. Ebenso wurde die Vergleichbarkeit der Messwerte in unterschiedlichen Messgefäßen (800 ml doppelwandiger Messbecher und 500 ml Messbecher) nachgewiesen.
- Die mit dem Pyknometer bestimmten Dichten stimmen sehr gut mit den berechneten Dichten überein.

Anmerkung: Viskositätskennwerte, welche in zwei baugleichen Viskosimetern eines Herstellers bestimmt wurden (hier Brookfield, Typ LVDV II+pro) können nicht absolut miteinander verglichen werden, da immer Schwankungen von Viskosimeter zu Viskosimeter auftreten. Diese Aussage wird durch den Hersteller der Viskosimeter bestätigt. Die Messwerte werden zur Abschätzung von Tendenzen genutzt und nicht als Absolutwerte betrachtet.

Die gewählten Methoden können somit zur zuverlässigen Charakterisierung der Harzpasten eingesetzt werden.

3.4.3 Herstellung und Verarbeitung von SMC-Halbzeugen im Labormaßstab

Zunächst werden SMC-Halbzeuge im Hand-SMC-Verfahren hergestellt. Abbildung 3.9 gibt die einzelnen Schritte, welche bei der Herstellung eines SMC-Halbzeuges im Labormaßstab durchlaufen werden, wieder. Zu Beginn der Herstellung von SMC-Halbzeugen werden ca. 350 g Harzpaste (1) im Labormaßstab, wie in den Kapiteln 3.4.1 und 3.4.2 beschrieben, hergestellt. Anschließend wird diese Harzpaste auf einer styroldichten Trägerfolie auf einer Fläche von ca. 1000 x 500 mm² homogen aufgerakelt (2). Auf die Hälfte dieser Fläche (500 x 500 mm²) werden die Verstärkungsfasern (150 g, 1 Zoll Länge, geschnitten auf der SMC-Anlage) homogen aufgestreut, so dass sich ein Massenanteil von 30 Gew.-% ergibt (3). Anschließend wird die Harzpaste mittig geklappt, so dass ein dreilagiger Aufbau (Harzpaste / Verstärkungsfasern / Harzpaste) entsteht (4). Dieser Aufbau wird in der Kompaktierungseinheit der SMC-Anlage kompaktiert und imprägniert, wodurch ein homogenes SMC-Halbzeug entsteht (5). Vorversuche haben gezeigt, dass eine Imprägnierung per Hand keine zufriedenstellenden Ergebnisse liefert. Nach der Halbzeugherstellung erfolgt die vier- bis zehntägige Reife in einer klimatisierten Kammer meist bei Raumtemperatur. Während dieser Reife steigt die Viskosität des Halbzeuges auf ca. 2.000 - 20.000 Pa·s an.

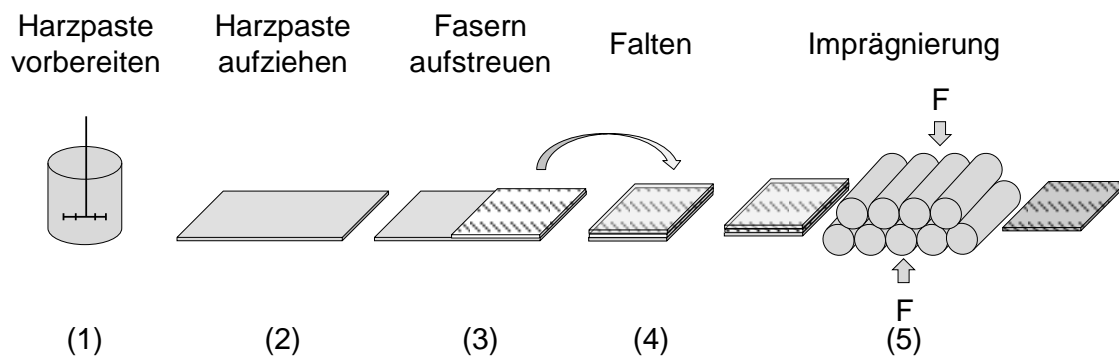


Abbildung 3.9: Prozessschritte bei der Herstellung von SMC-Halbzeugen im Labormaßstab

Nachdem die SMC-Halbzeuge hergestellt und gereift sind, werden sie auf einer Laborpresse (Typ: P300 P/M, Hersteller: Dr. Collin Maschinenbau, Ebersberg) zu Probekörperplatten mit den Abmaßen 160 x 100 x 4 mm³ verarbeitet. Hierbei wurden

eine Werkzeuggrundbelegung entsprechend dem Stand der Technik von 60 % und eine Verarbeitungstemperatur entsprechend der Vorgaben der Harzhersteller von 145 °C gewählt. In Vorversuchen wurde der Einfluss der Presskraft auf das Formfüllverhalten untersucht, siehe Abbildung 3.10. Basierend auf diesen Ergebnissen wird ein Verarbeitungsdruck von 120 bar für die folgenden Versuche gewählt, da nur dieser Verarbeitungsdruck zu einer vollständigen Füllung des Presswerkzeuges geführt hat.

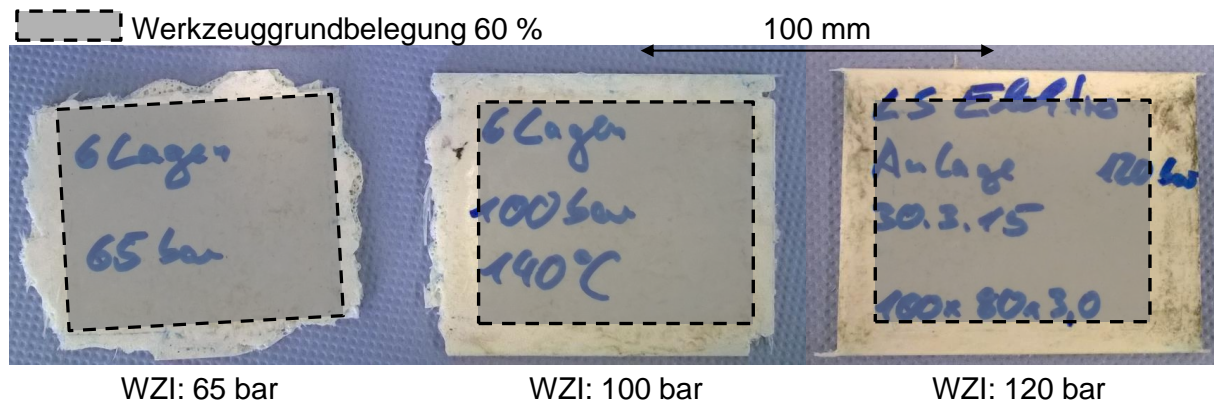


Abbildung 3.10: Einfluss des Werkzeuginnendruckes (WZI) auf das Formfüllverhalten

Abbildung 3.11 zeigt die jeweiligen Schritte bei der Herstellung von SMC-Probekörperplatten im Labormaßstab. Das gereifte SMC-Halbzeug (1) wird auf eine Größe von 60 % der Werkzeuggrundfläche (2) zugeschnitten. Hierbei richtet sich die verwendete Lagenanzahl nach der benötigten Dicke der Prüfplatten, welche meist 4 mm beträgt. Nachdem der Stack vorbereitet wurde, wird er in das temperierte Presswerkzeug eingelegt und (3) verarbeitet. Nach dem Entformen erhält man Prüfplatten (4) mit den Abmaßen 100 x 160 mm², welche anschließend mechanischen Prüfungen unterzogen werden.

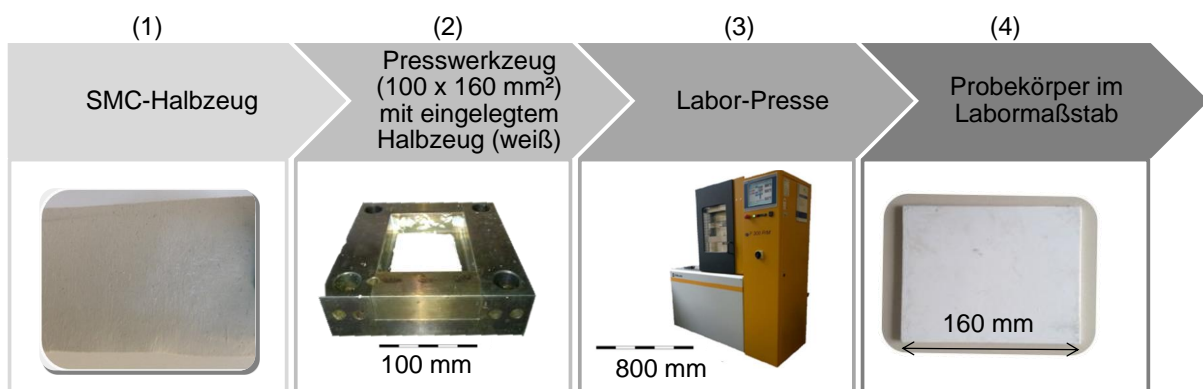


Abbildung 3.11: Prozessschritte der Verarbeitung der SMC-Halbzeuge im Labormaßstab

3.4.4 Bestimmung mechanischer Kennwerte

Der Einfluss der jeweiligen Rezepturen auf die erreichbaren mechanischen Eigenschaften wird durch die Bestimmung von mechanischen Kennwerten und Schlibfbildern belegt. Hierzu werden aus den hergestellten Probekörperplatten auf einer CNC-Fräse (TYP Diadrive 2000; Hersteller: Mutronic) Probekörper entnommen und anschließend in Anlehnung an die entsprechenden Prüfnormen geprüft. Zur statistischen Absicherung werden pro Prüfserie jeweils sieben Probekörper präpariert, wobei mindestens fünf als gültig die Prüfung bestehen müssen. Dies bedeutet, dass die Proben nicht innerhalb der Einspannbereiche oder direkt daneben versagen. Die Probekörper wurden in der ersten Versuchsreihe lediglich hinsichtlich ihrer Zugeigenschaften getestet.

Zur Bestimmung der Zugeigenschaften wurden Probekörper vom Typ 1BA 75 x 5 (kleine Probekörper) nach DIN EN ISO 527-2 [132] mit den Abmaßen $75 \times 10 \times 4 \text{ mm}^3$ präpariert und auf einer Zwick Universalprüfmaschine (Typ: 1474, Hersteller: Zwick GmbH & Co. KG, Ulm) mit mechanischen Klemmen und einer 10 kN Kraftmessdose geprüft. Abbildung 3.12 zeigt die Ergebnisse der mechanischen Prüfung der Probekörper. Hierbei ist zu erkennen, dass die erreichten Elastizitätsmoduln im Bereich des Zielwertes von 10 - 12 GPa liegen. Dieser Wert ist faserdominiert und durch den in den Proben vorhandenen Fasergehalt von ca. 30 Gew.-% zu erklären. Die hohen Schwankungen im Bereich der Standardabweichung lassen sich durch Materialinhomogenitäten, die durch die Herstellung im Hand-Verfahren auftreten, erklären. Die Werte der Zugfestigkeit liegen mit 20 - 40 MPa ca. 50 % unter den geforderten Werten der Spezifikation. Diese sind durch die Faser-Matrix-Haftung dominiert und zeigen eine notwendige Optimierung dieser auf. Auch hier können die großen Schwankungen der Messwerte durch Materialinhomogenitäten erklärt werden.

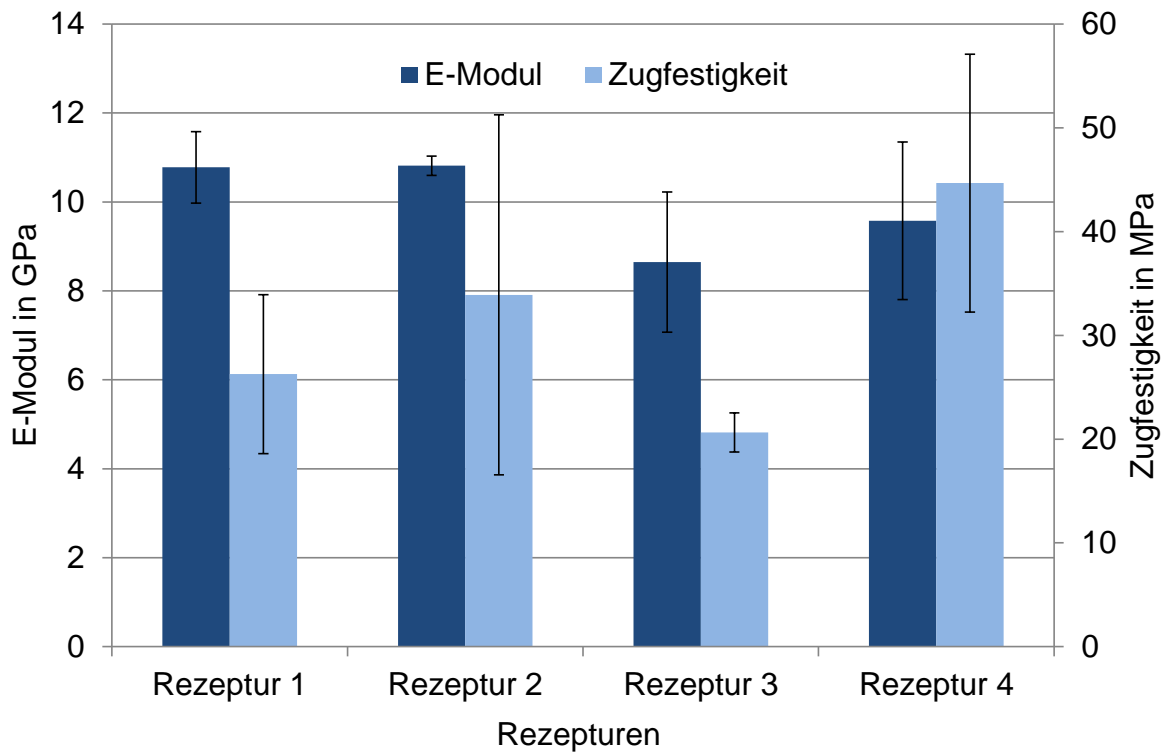


Abbildung 3.12: Mechanische Kennwerte im Zugversuch in Anlehnung an DIN EN ISO 527-4 der Grundrezepturen

3.4.5 Beurteilung der Halbzeugqualität

Bei den grundlegenden Untersuchungen im Labormaßstab wurde der Einfluss der Harzpastenviskosität und des Imprägnierdruckes auf die Halbzeugqualität untersucht. Hierbei konnte nachgewiesen werden, dass eine Harzpastenviskosität von mehr als 40 Pa·s zu einer mangelhaften Imprägnier- und Halbzeugqualität führt. Ebenso führt ein zu geringer Imprägnierdruck, zum Beispiel wenn dieser manuell aufgebracht wird, zu einer mangelhaften Imprägnierqualität. Beide Phänomene äußern sich in einem inhomogenen SMC-Halbzeug, siehe Abbildung 3.13 links. Auch nach der Reifung ist ein dreilagiger Halbzeugaufbau (Harzpaste / Verstärkungsfasern / Harzpaste) erkennbar. Hierbei liegen im Inneren des Halbzeuges unimprägnierte Glasfasern vor, welche auch während der Verarbeitung nicht mehr imprägniert werden können und letztendlich zu Fehlstellen im Bauteil führen, siehe Abbildung 3.13 rechts. Ein Halbzeug dieser Qualität ist als Ausschuss zu werten und kann für weitere Untersuchungen nicht genutzt werden.



Abbildung 3.13: Mangelhafte Imprägnierung eines SMC-Halbzeuges (50x50 mm²) (links) führt zu Fehlstellen im SMC-Probekörper (rechts)

3.4.6 Optimierungsschritte der Harzpasten

Aufgrund der Ergebnisse der Viskositätsmessung und der mechanischen Eigenschaften wurde Rezeptur 4 für die weitere Optimierung des Verarbeitungscharakters gewählt. In mehreren Optimierungsschritten wurden:

- a) das pulverförmige interne Trennmittel „Zincum 5“ durch das flüssige interne Trennmittel „P9065“ des Herstellers Byk [133] ersetzt. Hierdurch konnte eine Reduktion der Grundviskosität der Harzpaste auf 13 Pa·s erreicht werden. Weiterhin führt das interne Trennmittel P9065 zu einer homogenen und schlierenfreien Probekörperplattenoberfläche und erleichtert den Entformungsvorgang.
- b) das verwendete Grundharz „Polylite 31660-30“ durch lieferanteninterne Umstellungen bedingt auf das Nachfolgehharz „Polylite PO-4655“ gewechselt. Beide Harze sind chemisch nahezu identisch.
- c) der Anteil der thermoplastischen Additive aufgrund der Harzumstellung angepasst.
- d) der Anteil des Eindickmittels um knapp 20 % reduziert. Hierdurch wurde das Verarbeitungsfenster verlängert und die Verarbeitung der Halbzeuge im Handverfahren verbessert.

Tabelle 3.9 zeigt die Rezeptur 4 und die aus der Optimierung resultierende Rezeptur IVW-1. Die optimierte Rezeptur „IVW-1“ stellt die Grundlage und somit Referenz für alle weiteren Untersuchungen dieser Arbeit dar.

Tabelle 3.9: SMC-Grundrezeptur 4 und optimierte Rezeptur IVW-1

Komponenten	Rezeptur 4			Rezeptur IVW-1	
	Einheit	Bezeichnung	Masse	Bezeichnung	Masse
UP-Harzsystem	g	Polylite 31660-30	15,75	Polylite PO 4655	15,75
Anti-Schrumpf-Additiv	g	Norpol 9887	8,47	Norpol 9887	8,01
Internes Trennmittel	g	Zincum 5	0,55	P9065	0,92
Polymerisations-initiator	g	Trigonox C	0,55	Trigonox C	0,55
Polymerisations-inhibitor	g	PBQ 10%	0,06	PBQ 10%	0,06
Füllstoff	g	Millicarb OG	41,36	Millicarb OG	41,59
Eindickpaste	g	Luvatol MK35	0,68	Luvatol MK35	0,54
Technisches Styrol	g	-	1,95	-	1,95
Farbpaste	g	CC Weiß	0,63	CC Weiß	0,63
Verstärkungsfaser	g	OC P204	30,00	OC P204	30,00

Durch die vorgenommenen Optimierungsschritte (Rezeptur „IVW-1“) konnte die Imprägniergüte und damit verbunden auch die Halbzeugqualität deutlich gesteigert werden. Dies ist darin zu erkennen, dass nach der Reife ein homogenes Halbzeug vorliegt, welches beim Ablösen der Trägerfolien nicht in zwei Einzellagen getrennt werden kann, siehe Abbildung 3.14 links. Die Umstellung des internen Trennmittels führt zu einem prozesssichereren Formfüllverhalten und einer vereinfachten Entformbarkeit der Probekörperplatten. Die Verunreinigungen auf der Oberfläche sind durch das Versuchswerkzeug bedingt.

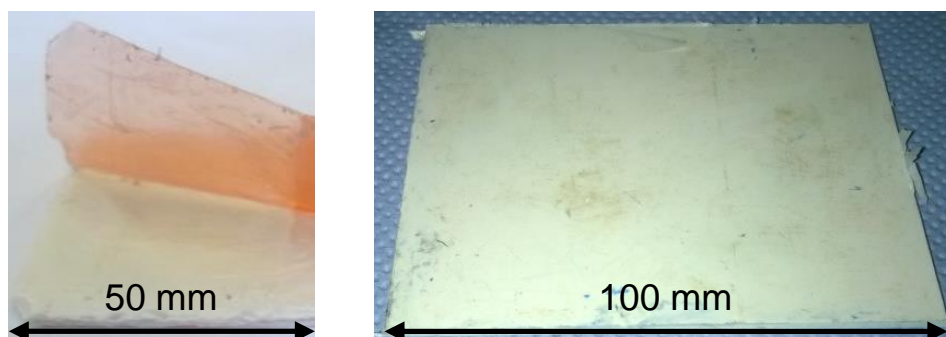


Abbildung 3.14: Ablösbarkeit der Trägerfolie eines optimal imprägnierten SMC-Halbzeuges (links) und Probekörperplatte (rechts) eines mit optimierter Rezeptur hergestellten Halbzeuges

Die optimierte Halbzeugrezeptur (IVW-1) führt bei gleichbleibenden Prozessbedingungen zu deutlich gesteigerten mechanischen Kennwerten, siehe Abbildung 3.17, gegenüber der Grundrezeptur 4, siehe Abbildung 3.12. Der Elastizitätsmodul konnte von 9,5 GPa um 30 % auf 12,5 GPa gesteigert werden, die Zugfestigkeit konnte von 45 MPa mehr als verdoppelt werden und lag bei 98 MPa.

Zusammenfassung der Harzpastenoptimierung:

Einhergehend mit der Optimierung der Rezeptur wurde der Viskositätsverlauf bzw. das Eindickverhalten der Rezeptur hinsichtlich der definierten Randbedingungen optimiert, siehe Abbildung 3.15. Die Harzpaste besitzt eine Grundviskosität von 13 Pa·s. Innerhalb von 18 Minuten erreicht sie eine Viskosität von 15 Pa·s. Eine Verarbeitung der Harzpaste auf einer SMC-Anlage ist mit dieser Grundviskosität problemlos möglich. Wenn die Viskosität der Harzpaste zu gering ist, führt dies dazu, dass die Paste nach dem Auftrag auf die Trägerfolie im Randbereich verläuft und abflacht. Eine prozesssichere Halbzeug-Herstellung ist somit nicht mehr möglich. Die optimierte Rezeptur dickt innerhalb von 58 Minuten bis zu einer Viskosität von 40 Pa·s ein. Dieses Zeitfenster wird als ausreichend für eine maschinelle Verarbeitung betrachtet.

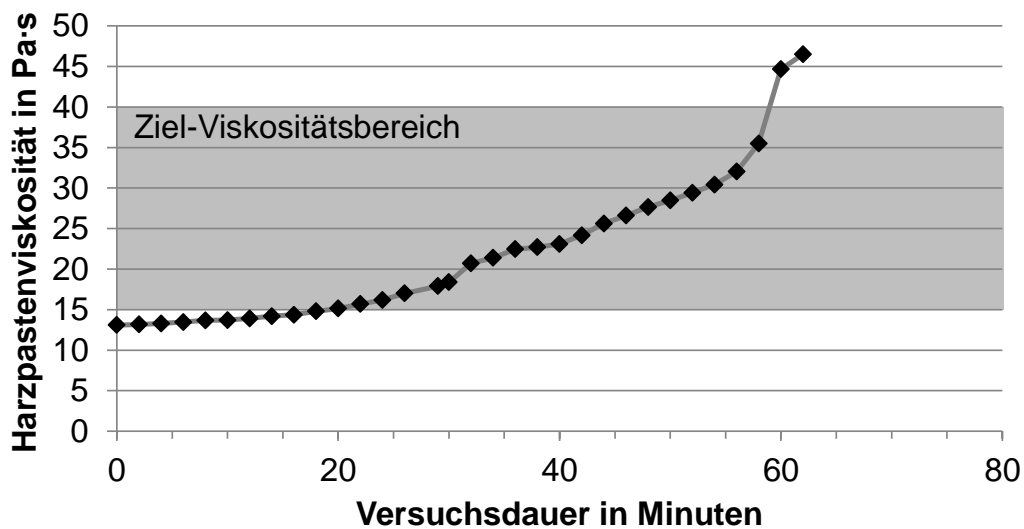


Abbildung 3.15: Viskositätsverlauf der optimierten Rezeptur "IVW-1" nach EN ISO 2555:1999

3.5 Herstellung und Verarbeitung von SMC-Halbzeugen im industriena- hen Maßstab

Im folgenden Kapitel wird die Herstellung von SMC-Halbzeugen im industriena-
hen Maßstab beschrieben. Sowohl für die Entwicklung eines SMC-Halbzeuges mit kon-
ventionellen Füllstoffen als auch für die Nutzung von bio-basierten und nachwach-
senden Rohstoffen muss die Skalierbarkeit vom Labor- auf den industriena-
hen Maßstab nachgewiesen werden. Falls eine Skalierbarkeit nicht möglich ist, muss die Re-
zeptur des Halbzeuges entsprechend angepasst werden. Die Unterschiede zwischen
Labor- und industriena-
hem Maßstab liegen sowohl in der Harzpasten-Vorbereitung
als auch in der Halbzeug-Herstellung und der Halbzeug-Verarbeitung zu Probekör-
perplatten. Durch den Einsatz industriena-
her Fertigungsmethoden wird eine Verbes-
serung der Halbzeug-Homogenität und der daraus resultierenden mechanischen
Kennwerte erwartet.

3.5.1 Harzpasten- und Halbzeugherstellung

Die Herstellung der Harzpasten im industriena-
hen Maßstab erfolgte gemäß der Re-
zeptur „IVW-1“, die im Technikumsmaßstab entwickelt und optimiert wurde. Im in-
dustriena-
hen Maßstab wurden Masterbatch-Ansätze von 5 bis 15 kg Harzpaste in
einem Dissolver (Typ: Vakuum-KREIS-DISSOLVER, Marke: Wilhelm Niemann Ma-
schinenfabrik) unter Verwendung eines Zahnscheiben-Aufsatzes homogenisiert. Als
Masterbatch-Ansatz wird in diesem Fall eine Harzpaste, welche bis auf das Magne-
siumoxid vollständig homogenisiert wurde, bezeichnet. Hierbei wurden in einem ers-
ten Schritt die flüssigen Komponenten der Rezeptur homogenisiert ($n = 700$ 1/min,
 $t = 90$ s) und anschließend die Füllstoffe schrittweise dosiert, sodass eine homogene
Harzpaste entstand. Die Harzpaste wurde in zwei gleich große Anteile, welche in den
unteren und oberen Raketkasten eingefüllt werden, geteilt. Zu jedem Anteil wurde
das MgO unmittelbar vor der Verarbeitung hinzugefügt. Nach dem Einbringen des
MgO muss die Harzpaste innerhalb von 15 bis maximal 30 Minuten zum SMC-
Halbzeug verarbeitet sein, da sonst eine Imprägnierung der Schnitffasern durch die
Harzpaste, deren Viskosität kontinuierlich ansteigt, nicht mehr möglich ist. Die Her-
stellung der SMC-Halbzeuge wurde auf der am Institut vorhandenen SMC-Anlage,
siehe Abbildung 3.16 links, durchgeführt. Bei der maschinellen Verarbeitung der
Harzpaste wird diese in zwei Raketkästen eingefüllt und jeweils auf eine styroldichte

Trägerfolie ein Harzfilm (1) mit einer Breite von 300 mm aufgezogen. Auf den unteren Harzpastenfilm werden die Verstärkungsfasern mit einer Länge von 1 Zoll homogen und regellos aufgestreut (2) und anschließend von einem zweiten Harzpastenfilm bedeckt. Dieser dreilagige Aufbau (unterer Harzpastenfilm / Schnitffasern / oberer Harzpastenfilm) durchläuft die Walkstrecke, in der die Verstärkungsfasern imprägniert werden und ein homogenes Halbzeug entsteht (3). Dieses wird anschließend auf Pappkerne aufgewickelt, styroldicht verpackt und in temperierten Lagerräumen eingelagert. Nachdem das Halbzeug ca. acht Tage gereift ist, erfolgt die anschließende Verarbeitung auf einer Laborpresse. Die Parameter der Halbzeug-Herstellung sind in Anhang 7.3 aufgeführt.

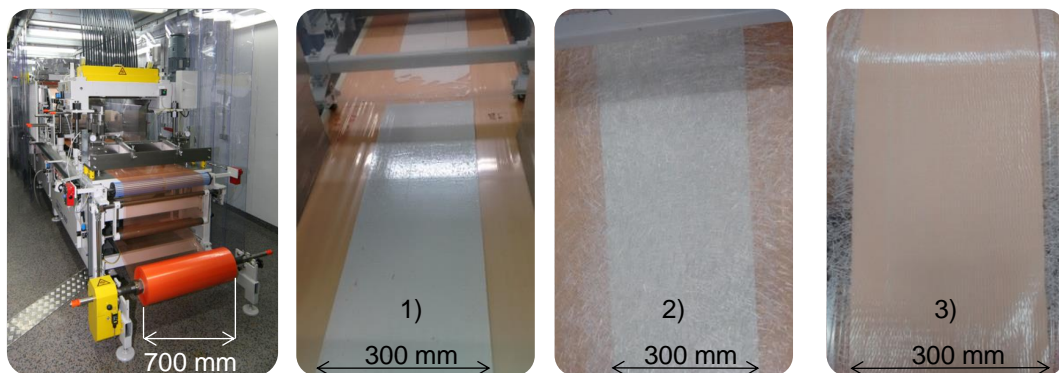


Abbildung 3.16: Institutseigene SMC-Anlage (links) und Prozessschritte der SMC-Herstellung im Labormaßstab mit 1) Aufbringen eines homogenen Harzfilms, 2) homogenes Aufstreuen der Verstärkungsfasern und 3) SMC-Halbzeug nach Imprägnierung der Verstärkungsfasern

3.5.2 Probekörperherstellung im industrienahen Maßstab

Nach der Reife der Halbzeuge wurden diese auf einer Laborpresse im Technikummaßstab (Hersteller: IVW-Eigenbau) zu Probekörperplatten mit den Abmaßen $340 \times 480 \times 4 \text{ mm}^3$ verarbeitet. Bei der Verarbeitung wurden eine Werkzeuggrundbelegung von 60 %, eine Werkzeugtemperatur von 145 °C und eine Zykluszeit von 300 s bei einem anlagenbedingt begrenzten Werkzeuginnendruck von 60 bar gewählt. Die weiteren Prozessparameter sind in Anhang 7.4 aufgeführt.

Aus einer Materialcharge wurden jeweils mehrere Probekörperplatten unter gleichen Prozessbedingungen hergestellt. Diese Platten wurden umlaufend 15 mm besäumt. Aus den verbleibenden Probekörperplatten wurden anschließend die Probenkörper für die einzelnen Zug-, Biege- und Schlagzähigkeits- Prüfungen in Längs- und in Querrichtung entnommen.

3.5.3 Bestimmung mechanischer Kennwerte

Zur Bestimmung der Materialqualität der entwickelten SMC-Halbzeuge werden die mechanischen Kennwerte, welche mit diesen Halbzeugen erreicht werden können, ermittelt. Hierzu werden unter anderem Zugkennwerte nach DIN EN ISO 527-4, Biegekennwerte nach DIN EN ISO 14125 und Schlagzähigkeitskennwerte nach DIN EN ISO 179 Teil 1 bestimmt. Anhand der mechanischen Kennwerte wird anschließend die Materialqualität bewertet.

Zugversuche

Zur Bestimmung der Zugeigenschaften wurden pro Messreihe je sieben Probekörper vom Typ 2 (Rechteck-Zugstab ohne Aufleimer) nach DIN EN ISO 527-4 [134] mit den Abmaßen $250 \times 25 \times 4 \text{ mm}^3$ präpariert und auf einer Zwick Universalprüfmaschine (Typ: 1474, Hersteller: Zwick GmbH & Co. KG, Ulm) mit hydraulischen Klemmen und einer 100 kN Kraftmessdose geprüft. Als Vorkraft wurden 5 N gewählt, die Prüfungsgeschwindigkeit betrug 2 mm/min. Die Bestimmung des E-Moduls wurde im Bereich von 0,05 und 0,25 % Dehnung durchgeführt, wobei die Dehnung über Makrowegaufnehmer aufgezeichnet wurde. Abbildung 3.17 zeigt die Ergebnisse der mechanischen Untersuchungen. Durch die maschinelle Herstellung der SMC-Halbzeuge und die Verarbeitung zu großen Probekörperplatten ($250 \times 696 \times 4 \text{ mm}^3$) kann eine deutlich homogenere Halbzeug- und Probekörperqualität erreicht werden. Dies kann unter anderem durch die optische Analyse und die Bestimmung des realen Faser-massengehaltes der Proben belegt werden. Die erreichten mechanischen Kennwerte für E-Modul und Zugfestigkeit der Proben, welche in Längs- und Querrichtung der Probekörper entnommen wurden, liegen sehr nahe zusammen. Der E-Modul beträgt 11,8 bzw. 12,5 GPa, die Zugfestigkeit 104 bzw. 98 MPa. Die erreichten mechanischen Eigenschaften liegen innerhalb der spezifizierten Werte. REM-Aufnahmen der Bruchflächen und Schlibbilder der Probekörper, siehe Anhang 7.5, lassen auf eine homogene und regellose Ausrichtung der Verstärkungsfasern in der Ebene deuten. Eine homogene und regellose Ausrichtung der Verstärkungsfasern in der Plattenebene führt zu isotropen Werkstoffeigenschaften. Das Werkstoffverhalten der Rezeptur „IVW-1“ kann somit als quasi-isotrop erachtet werden.

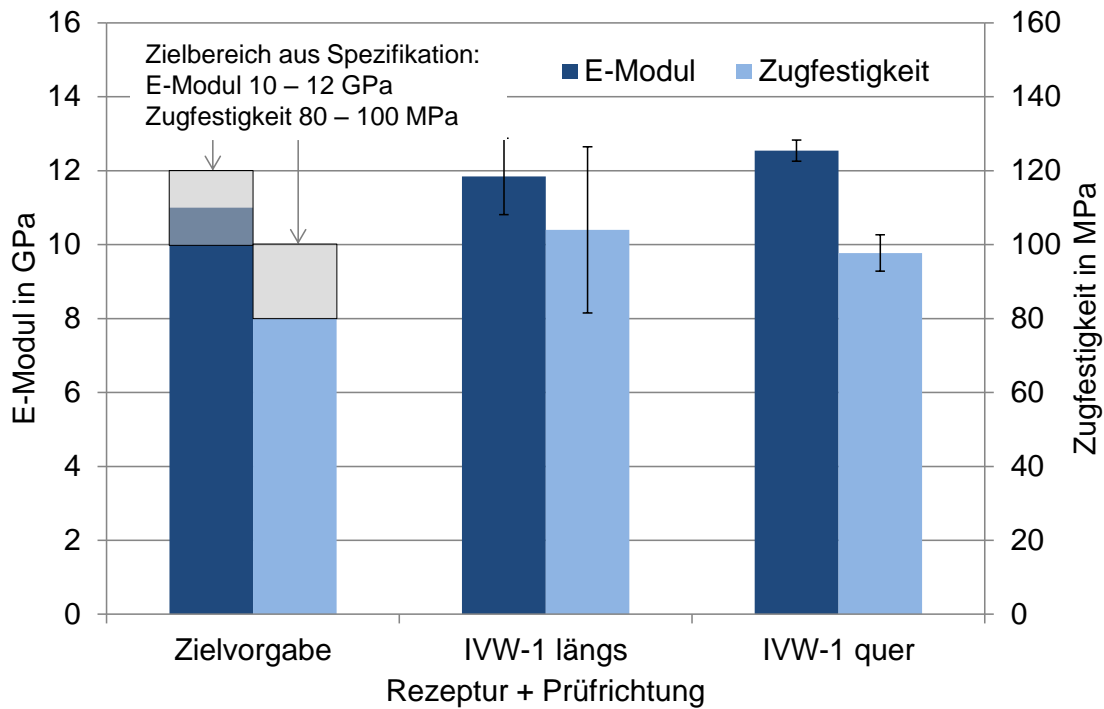


Abbildung 3.17: Mechanische Kennwerte im Zugversuch in Anlehnung an DIN EN ISO 527-4, Prüfkörper Typ 2 im Labormaßstab

Die Ergebnisse zeigen insgesamt, bis auf die Versuchsreihe zur Bestimmung der Zugfestigkeit in Längsrichtung, eine akzeptable Streuung. Durch eine Verarbeitung in einem parallelgeregelten Fließpressprozess bei höheren Pressdrücken (> 100 bar) und längeren Fließwegen (> 150 mm) könnten homogenere Ergebnisse ermöglicht werden. Diese Ergebnisse werden mit den mechanischen Ergebnissen in Kapitel 4.6 beschrieben.

Biegeversuche

Die Biege-Kennwerte Biege-E-Modul und die Biegefestigkeit wurden im Biegeversuch nach DIN EN ISO 14125 [135] auf einer Zwick Universalprüfmaschine (Typ: 1445 Retroline, Hersteller: Zwick GmbH & Co. KG, Ulm) mit einer 10 kN-Kraftmessdose durchgeführt. Hierbei wurden Probekörper der Klasse II mit den Abmaßen $80 \times 15 \times 4$ mm³ verwendet. Als Vorkraft wurden 2 N gewählt; die Prüfgeschwindigkeit betrug 2 mm/min. Abbildung 3.18 zeigt die Ergebnisse der Kennwertermittlung. Es ist ersichtlich, dass die Kennwerte in und quer zur Fließrichtung vergleichbar sind. Tendenziell zeigen die Kennwerte, welche quer zur Fließrichtung bestimmt wurden, eine größere Streuung als die Kennwerte in Fließrichtung. Dies kann durch die teilweise Vorzugsorientierung der Verstärkungsfasern entlang der jeweili-

gen Fließrichtung erklärt werden. Durch das gleichzeitige Fließen des SMC-Halbzeuges im ebenen Plattenwerkzeug in x- und y-Richtung soll ein homogenes isotropes Werkstoffverhalten generiert werden. Bei Betrachtung der Biege-Kennwerte, unter Berücksichtigung ihrer jeweiligen Standardabweichung, können diese als vergleichbar betrachtet werden. Als Referenz dient ein GF-SMC (HUP 31838/30 RN-1090) des Herstellers Polynt, welches laut Datenblatt einen Biege-E-Modul von 8 GPa und eine Biegefestigkeit von 150 MPa bei einem Verstärkungsfasergehalt von 30 Gew.-% besitzt.

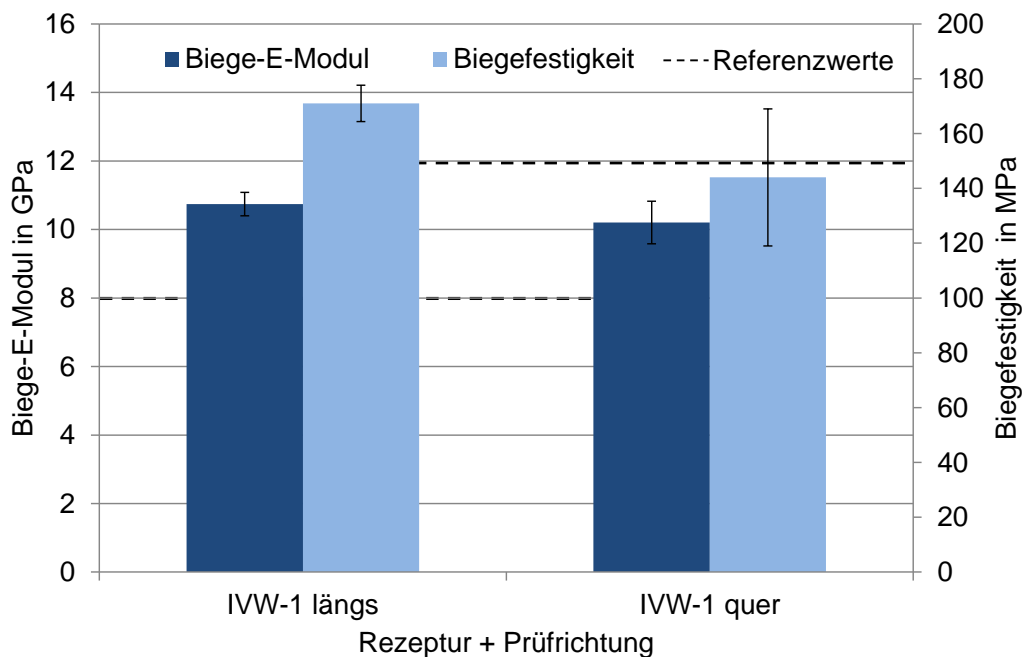


Abbildung 3.18: Ergebnisse der mechanischen Prüfung im Dreipunkt-Biegeversuch in Anlehnung an DIN EN ISO 14125, Probekörperklasse 2

Kerbschlagbiegeversuche nach Charpy

Die Bestimmung der Schlagzähigkeit wurde in Anlehnung an DIN EN ISO 179 Teil 1 [136] auf einem Prüfstand [Typ: CEAST 4519, Hersteller: Instron® GmbH, Darmstadt] mit einem 4 kN-Hammer durchgeführt. Die Größe der Probekörper betrug $80 \times 15 \times 4 \text{ mm}^3$, der Test wurde in Flachkantstellung durchgeführt, der Auflagerabstand L beträgt $62^{+0,5}_{-0,0} \text{ mm}$. Die Ergebnisse der Prüfung sind in Abbildung 3.19 gezeigt. Hierbei ist zu erkennen, dass die Kennwerte in Längs- und Querrichtung auf einem vergleichbaren Niveau liegen. Als Referenzmaterial wurde ebenfalls das SMC HUP 31838/30 RN-1090 des Herstellers Polynt gewählt. Dieses besitzt bei einem Fasermassengehalt von 30 Gew.-% eine Schlagzähigkeit von 65 MPa.

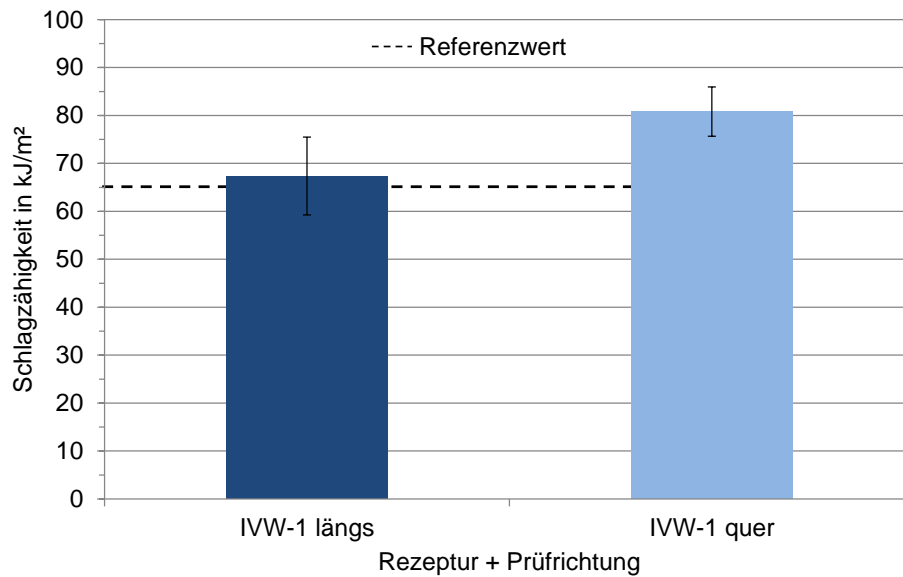


Abbildung 3.19: Ergebnisse der Schlagzähigkeitsuntersuchung nach DIN EN ISO 179-1

3.5.4 Bestimmung des realen Fasermassengehaltes

Bei der Herstellung der in dieser Forschungsarbeit beschriebenen Halbzeuge wurde ein Fasermassengehalt von 30 % festgelegt. Nach Rücksprachen mit Vertretern von SMC-Herstellern bei einer Sitzung des Arbeitskreises SMC/BMC der AVK wurde eine Abweichung des Zielfasergehaltes von $\pm 3\%$ als Zielwert aus industrieller Sicht vorgegeben. Die Bestimmung des Fasermassengehaltes der Verstärkungsfasern in den hergestellten und geprüften Proben wurde im Verfahren A des Kalzinierungsverfahrens gemäß DIN EN ISO 1172 [137] durchgeführt und erfolgt in mehreren Prozessschritten. Zur Trocknung der Probekörper wurde ein Trockenschrank T6120 der Firma Thermo genutzt. Die jeweiligen Massen der Probekörper wurden auf einer Analysewaage ABT 220.5 DM des Herstellers Kern bestimmt. Zur Veraschung wurde ein Muffelofen P330 der Firma Nabertherm verwendet.

Zu Beginn der Untersuchung werden sowohl die SMC-Proben (ca. $10 \times 10 \times 4 \text{ mm}^3$) als auch Keramikschalen für 48 Stunden bei 80°C in einem Trockenschrank getrocknet. Nach der Trocknung beschreibt m_1 die Ausgangsmasse des trockenen Tiegels in Gramm, m_2 die Ausgangsmasse des trockenen Tiegels und der getrockneten Probe und m_3 die Endmasse des Tiegels inklusive des Kalzinierungsrückstandes. Bei der Kalzinierung werden die Proben innerhalb von zwei Stunden auf 550°C erhitzt

und danach die Temperatur für zwei Stunden konstant gehalten. Nachdem die Proben inkl. der Tiegel ausgekühlt sind, werden diese gewogen und nach Formel (3.2) der Kalzinierungsrückstand berechnet, welcher sich aus dem Glasfasergehalt und weiteren Feststoffen zusammensetzt.

$$M_{\text{Glasfasern+Füllstoffe}} = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} * 100 \quad (3.2)$$

Der Kalzinierungsrückstand wird mit Wasser aus dem Keramiktiegel in einen Glasfiltertiegel (Porengröße 1) gespült und dort anschließend unter Schwenken konzentrierte Salzsäure (HCl) hinzugegeben. Die Zersetzung der Feststoffe spiegelt sich in einer exothermen Reaktion wieder, so dass die Proben im Glasfiltertiegel für zwei Stunden unter einem Abzug gelagert werden müssen. Nach der Zersetzung der Feststoffe werden die Glasfiltertiegel über eine Nutsche abfiltriert und die Glasfasern im Ofen bis zum Erreichen der Massekonstanz getrocknet. Abschließend wird das Gewicht der Glasfasern ($m_{\text{Glasfasern}}$) bestimmt und nach Formel (3.3) der Glasfasergehalt der Probe berechnet.

$$\text{Glasfasergehalt} = \frac{m_{\text{Glasfasern}}}{\text{Probengewicht}} * 100 \quad (3.3)$$

Der Einfluss der Verarbeitung und Kalzinierung auf die Oberflächenstruktur wurde durch Aufnahmen mit einem Rasterelektronenmikroskop (REM) (Typ: SUPRA 40VP, Hersteller: Carl Zeiss Microscopy GmbH, Jena) bei 1000-facher Vergrößerung untersucht. Abbildung 3.20 zeigt die Oberflächen einer sich im Ursprungszustand befindlichen (links, Schlichte lokal erkennbar) und einer verarbeiteten und kalzinierten Glasfaser-Probe (rechts). Hierbei ist zu erkennen, dass sowohl die Verarbeitung als auch die Kalzinierung keinen Einfluss auf die Oberflächenstruktur zeigt und das Kalzinierungsverfahren zur Bestimmung des realen Fasermassengehaltes bei dieser Verstärkungsfaser angewendet werden kann. Der Durchmesser der Glasfasern ist vor und nach der Kalzinierung identisch, jedoch sind keine Schlichte-Anteile mehr auf der Faser vorhanden.

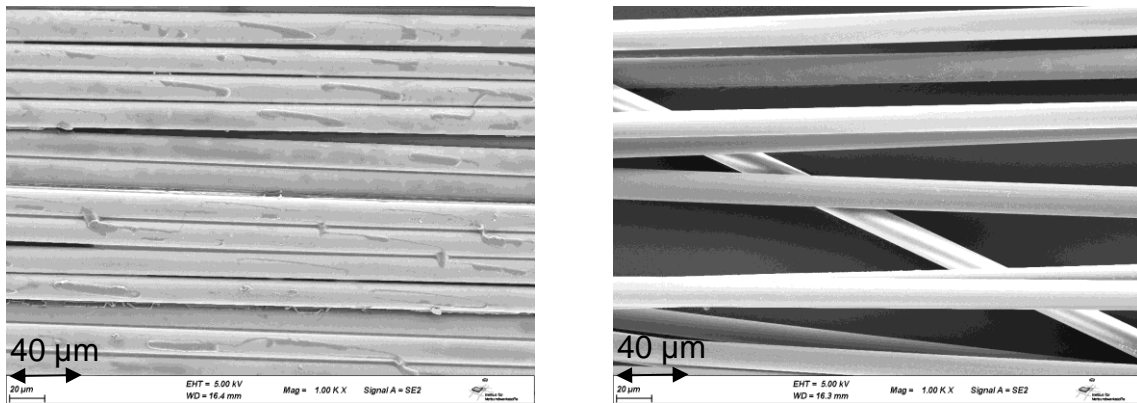


Abbildung 3.20: REM-Aufnahme mit 1000-facher Vergrößerung einer im Ursprungszustand befindlichen (links) und einer verarbeiteten und kalzinierten Probe (rechts) der Glasfaser P204

Die Ergebnisse der Auswertung der hergestellten und untersuchten Proben wird in Tabelle 3.10 gezeigt. Hierbei ist zu erkennen, dass die geprüften Proben innerhalb der geforderten Toleranz von $\pm 3\%$ um den Zielwert liegen. Die Parameter, welche zur Herstellung der Proben der Rezeptur „IVW-1“ gewählt wurden, können somit als prozesssicher betrachtet werden.

Tabelle 3.10: Ergebnisse der FMG-Bestimmung der hergestellten SMC-Proben

Probenbezeichnung	Soll-FMG [%]	Ist-FMG [%]	Absolute Abweichung	Anforderung erfüllt [ja/nein]
HUP 31838/30 RN-1090	30	30,91	+ 0,91	Ja
HUP 31838/30 RN-1090	30	31,50	+ 1,5	Ja
IVW-1 Probe 1	30	29,44	- 0,56	Ja
IVW-1 Probe 2	30	29,07	- 0,93	Ja
IVW-1 Probe 3	30	30,44	+ 0,44	Ja
IVW-1 Probe 4	30	27,92	- 2,08	Ja
IVW-1 Probe 5	30	32,14	+ 2,14	Ja

3.6 Zusammenfassung bisheriger Ergebnisse

Es wurden eine SMC-Harzpaste und ein SMC-Halbzeug mit konventionellen Füllstoffen entwickelt. Die Entwicklung einer eigenen SMC-Rezeptur, welche sowohl im Labor- als auch im industriennahen Maßstab verarbeitet werden kann, stellt eine der Kern-Aufgaben dieser Arbeit dar. Nur wenn das Zusammenspiel der einzelnen Kom-

ponenten verstanden wird, kann darauf aufgebaut werden und in dem weiteren Teil der Arbeit eine Modifikation der Harzpaste untersucht werden.

- Es wurden vier grundlegende Rezepturen auf Basis verschiedener Grund-Harzsysteme erarbeitet und hinsichtlich erreichbarer mechanischer Kennwerte untersucht.
- Aufbauend auf diesen Rezepturen wurde eine Rezeptur für die Verarbeitung im labor- und industrienahen Maßstab optimiert (IVW-1).

Die optimierte Rezeptur kann im industrienahen Maßstab, unter Verwendung konventioneller Prozessparameter, verarbeitet werden und erfüllt alle geforderten Spezifikationen. Aufbauend auf den positiven Ergebnissen kann diese Rezeptur als Basis für nachfolgende Untersuchungen hinsichtlich des Einsatzes von bio-basierten und nachwachsenden Rohstoffen für duroplastische Halbzeuge genutzt werden.

4 Entwicklung eines SMC-Halbzeuges mit bio-basierten Füllstoffen

Basierend auf den in Kapitel drei gewonnenen Erkenntnissen, wurde eine SMC-Harzpaste bzw. ein SMC-Halbzeug entwickelt, mit dem die zuvor spezifizierten Anforderungen hinsichtlich Verarbeitbarkeit und mechanischer Eigenschaften erfüllt werden konnten. Im Folgenden wird die Möglichkeit des Einsatzes von bio-basierten und nachwachsenden Rohstoffen in SMC-Halbzeugen untersucht. Hierbei sollen ehemalige Nebenprodukte aus der Nahrungsmittelindustrie als Füllstoffe eingesetzt und somit ein technisch und wirtschaftlich sinnvolles Upcycling – die Herstellung von neuen Produkten aus ehemaligen Bei- bzw. Abfallprodukten – ermöglicht werden. Diese Rohstoffe bieten den Vorteil, dass sie nicht separat abgebaut und keine weiteren fossilen Energieträger zu deren Gewinnung eingesetzt werden müssen. Bisher werden die Rohstoffe meist als Einstreu bzw. Beimischung in tierischen Futtermitteln eingesetzt. Die Dichte von bio-basierten Materialien beträgt meist um 1 g/cm^3 . Dies entspricht knapp 40 % der Dichte von konventionellen Füllstoffen. Durch das Einbringen der bio-basierten Füllstoffe könnte somit die Dichte der Halbzeuge deutlich gesenkt werden, was zu leichteren Bauteilen und dadurch zu Einsparungen im Sekundär-Energiebedarf führen kann.

Zunächst werden die Anforderungen an ein SMC-Halbzeug mit bio-basierten und nachwachsenden Rohstoffen spezifiziert. Hierbei ist die Hauptanforderung die Verarbeitbarkeit der Harzpaste zum Halbzeug mit konventioneller Anlagentechnik und unter Verwendung von konventionellen Anlagenparametern. Als Basis für die Entwicklung einer Harzpaste mit bio-basierten und nachwachsenden Rohstoffen dient die in Kapitel drei dieser Arbeit entwickelte SMC-Rezeptur „IVW-1“. Diese wird hinsichtlich des Viskositätsniveaus und des Eindickverhaltens an die neu gewählten Füllstoffe angepasst und modifiziert. Weiterhin wird in diesem Kapitel die maximal mögliche Dichteabnahme, die durch das Ersetzen von konventionellen Füllstoffen erreicht werden kann, berechnet und in Realversuchen verifiziert, siehe Anhang 7.6. Anschließend wird die Verarbeitbarkeit der bio-basierten und nachwachsenden Füllstoffe im Labor- und industrienahen Maßstab untersucht sowie experimentell erreichbare mechanische Kennwerte bestimmt. Abschließend wird die Tendenz hinsichtlich Schimmelbildung untersucht.

4.1 Anforderung an ein SMC-Halbzeug mit bio-basierten Füllstoffen

Vor Beginn der Entwicklung eines SMC-Halbzeuges mit bio-basierten und nachwachsenden Rohstoffen wurden die Spezifikationen, welche das Halbzeug erfüllen soll, definiert. Diese stimmen zu großen Teilen mit den Spezifikationen der konventionellen SMC-Halbzeuge überein, werden jedoch um die spezifischen Punkte, welche in Kombination mit dem Einsatz bio-basierter Füllstoffe stehen, ergänzt. Die Spezifikationen wurden mit potentiellen Rohstofflieferanten und SMC-Herstellern und Teilnehmern des AVK Arbeitskreises SMC/BMC abgestimmt. Tabelle 4.1 gibt einen Überblick über die wichtigsten Spezifikationen. Die einzelnen Spezifikationen werden im Anschluss an die Tabelle erläutert.

Tabelle 4.1: Spezifikationen des SMC-Halbzeuges mit bio-basierten und nachwachsenden Füllstoffen

Kategorie	Anforderung
Halbzeugdichte	Reduktion der Halbzeugdichte von 1,9 g/cm ³ auf 1,6 g/cm ³
Bio-basierter Anteil	> 75 % bezogen auf Füllstoffe
Viskosität	Harzpastenviskosität (auf SMC-Anlage) 15 - 40 Pa·s Halbzeugviskosität (Pressprozess) 2.000 - 20.000 Pa·s
Eindickverhalten	innerhalb von 4 - 8 Tagen unter Zugabe von MgO
Fließ- und Formfüllverhalten	Vergleichbare Verarbeitungsparameter, Interaktion Verstärkungsfasern / Harzpaste mit bio-basierten Füllstoffen
Fasergehalt	30 ± 3 Gew.-%
Mechanische Kennwerte	E-Modul ca. 10 - 12 GPa Zugfestigkeit ca. 80 - 100 MPa
Verarbeitbarkeit	Harzpastenherstellung mit Kreisscheibendissolver Halbzeugherstellung auf SMC-Anlage Halbzeugverarbeitung in parallelger. Fließpressprozess
Bauteilqualität	Porengehalt max. 3 %, homogene Faser- und Füllstoffverteilung, keine unimprägnierten Fasern/Füllstoffe auf Bauteiloberfläche
Flächengewicht	1500 - 3000 g/m ² ± 5 Gew.-%

Halbzeugdichte

Die Dichte der SMC-Halbzeuge mit bio-basierten und nachwachsenden Rohstoffen wird sehr stark durch den Füllstoff- und Verstärkungsfasergehalt bestimmt. Je nach gewählten bio-basierten Füllstoffen mit Füllstoffgehalten zwischen 10 - 20 Gew.-% und Fasergehalten der Glasfaser-Verstärkungsfasern zwischen 20 - 35 Gew.-% soll die Dichte der SMC-Halbzeuge mit bio-basierten Füllstoffen in einem Bereich von 1,35 bis 1,60 g/cm³ liegen. Die Dichte von konventionellen SMC-Halbzeugen beträgt, in Abhängigkeit von Faser- und Füllstoffgehalt, ca. 1,85 bis 2,0 g/cm³. In Abhängigkeit von den gewählten Füllstoffen werden unter anderem die mechanischen Eigenschaften und das Brandverhalten beeinflusst.

Bio-basierter Anteil

In mehreren Messreihen werden die konventionellen Füllstoffe teilweise bzw. komplett durch unterschiedliche Konzentrationen der bio-basierten und nachwachsenden Füllstoffe ersetzt und jeweils der Einfluss auf die Verarbeitbarkeit und die erreichbaren mechanischen Kennwerte untersucht. Der maximal mögliche Anteil an bio-basierten und nachwachsenden Füllstoffen wird durch den Anstieg der Harzpastenviskosität limitiert.

Viskosität

Die Viskosität des SMC-Halbzeuges mit bio-basierten und nachwachsenden Füllstoffen stellt einen zentralen Punkt der Harzpastenherstellung und -verarbeitung dar. Die Rezeptur mit bio-basierten und nachwachsenden Rohstoffen muss zwingend mit konventioneller Labor- und Anlagentechnik herstellbar und verarbeitbar sein. Hierbei soll die Harzpaste während der Herstellung eine Grundviskosität von 15 - 40 Pa·s aufweisen, durch die Zugabe von MgO eindickbar sein und mit einem konventionellen SMC-Verarbeitungsprozess (Werkzeugtemperatur: 145 °C, Werkzeuginnendruck: 120 bar, Zyklusdauer: 300 s) zum Bauteil verarbeitet werden können.

Eindickung

Zur Eindickung des Halbzeuges soll MgO verwendet werden, da dies das üblicherweise verwendete Eindickmittel ist. Der Wechsel der Füllstoffe soll keinen Einfluss auf das Eindickverhalten, z. B. Verlängerung der Eindickdauer, haben.

Fließverhalten

Das Fließverhalten des SMC-Halbzeuges mit bio-basierten und nachwachsenden Füllstoffen soll mit dem Fließverhalten des entwickelten Halbzeuges „IVW-1“ bzw. konventioneller SMC-Halbzeuge vergleichbar sein. Dies bedeutet, dass bei einer Werkzeuggrundbelegung von 60 % und der Wahl entsprechender Prozessparameter (Werkzeugtemperatur: 145 °C, Werkzeuginnendruck: 120 bar, Zyklusdauer: 300 s) die komplette Kavität eines Bauteils, ohne Entmischungen von Harzpaste und Verstärkungsfasern, gefüllt wird. Ebenso sollen Rippen und Dome vollständig gefüllt werden.

Verstärkungsfasern und Fasergehalt

Bei der Herstellung des Halbzeuges werden, wie bei der Rezeptur „IVW-1“, Glasfasern (P204, 2400 tex) des Herstellers Owens Corning als Verstärkungsfasern genutzt. Der Anteil der Schnitffasern im Halbzeug soll 30 ± 3 Gew.-% betragen, die Länge ein Zoll.

Mechanische Kennwerte

Die erreichbaren mechanischen Kennwerte sollen sich nicht von denen eines SMC-Halbzeuges mit konventionellen Füllstoffen unterscheiden. Bei einem Fasergehalt von 30 Gew.-% werden ein E-Modul von ca. 10 GPa und eine Zugfestigkeit von ca. 80 MPa erwartet.

Verarbeitbarkeit

Die Herstellung der Harzpaste mit bio-basierten und nachwachsenden Rohstoffen soll mittels Kreisscheiben-Dissolver möglich sein. Durch die Wahl einer Zahnscheibe ist es möglich, eventuell vorhandene Agglomerate aufzulösen und eine homogene Harzpaste herzustellen. Nach der Reife soll das SMC-Halbzeug mit bio-basierten und nachwachsenden Füllstoffen im parallelgeregelten Fließpressprozess bei Werkzeugtemperaturen um 145 °C und Werkzeuginnendrücken von ca. 60 bis 120 bar verarbeitet werden. Die Zykluszeit des Verarbeitungsvorganges soll sich nicht von der konventioneller Halbzeuge unterscheiden.

Bauteilqualität

Die Bauteilqualität wird maßgeblich durch die Homogenität des Halbzeuges bestimmt. Der Porengehalt im Probekörper soll maximal 3 % betragen. Es dürfen keine Füllstoff-Agglomerate bzw. unimprägnierte Fasern im Bauteil vorliegen, da diese die

Qualität deutlich herabsetzen würden. Ebenso dürfen keine unimprägnierten bio-basierten Füllstoffe direkt an der Bauteiloberfläche vorliegen, da diese durch direkten Kontakt mit der Umgebungsluft und -Feuchtigkeit beginnen könnten zu schimmeln. Schimmelbildung führt zur Schwächung des Bauteils und behindert dessen weitere Verwendung.

Flächengewicht

Das Flächengewicht des auf der SMC-Anlage hergestellten SMC-Halbzeuges mit bio-basierten und nachwachsenden Füllstoffen soll zwischen 1500 und 3000 g/m² betragen. Dies entspricht, bedingt durch den Dichteunterschied bei gleichem Volumen, einem Flächengewicht von 2000 - 4000 g/m² bei konventionellen Halbzeugen. Die Schwankungen des Flächengewichts sollen geringer als 5 % sein.

4.2 Theoretische Dichteabnahme durch das Ersetzen von konventionellen Füllstoffen durch bio-basierte Füllstoffe

Die Dichte von SMC-Halbzeugen kann durch das Ersetzen der konventionellen Füllstoffe durch Füllstoffe mit geringerem spezifischem Gewicht, z. B. bio-basierte und nachwachsende Füllstoffe oder Glashohlkugeln mit einer Dichte von ca. 0,36 g/cm³, verringert werden. In dieser Arbeit werden ausschließlich bio-basierte Füllstoffe untersucht. Wird ein bio-basierter Füllstoff eingesetzt, kann zusätzlich zur Dichtereduktion die CO₂-Bilanz der Halbzeuge verbessert werden. Zur Abschätzung der maximal möglichen Dichteverringeringung wird im Folgenden eine vereinfachte Berechnung der Harzpastendichte durchgeführt. Hierfür werden die Komponenten der konventionellen SMC-Harzpaste „IVW-1“ in die Kategorien „Harz“ und „Füllstoffe“ zusammengefasst und die jeweilige Dichte berechnet.

In der Kategorie „Harz“ werden die Komponenten UP-Harz, thermoplastisches Schrumpfaditiv, Styrol, Farbpaste, Trennmittel und Magnesiumoxid zusammengefasst. In der Kategorie „Füllstoff“ werden die nicht funktionellen Füllstoffe betrachtet. Tabelle 4.2 gibt einen Überblick über die Dichte einer konventionellen Harzpaste. Die einzelnen Komponenten wurden gravimetrisch eingebracht. Durch die jeweilige, zuvor bestimmte Dichte der Komponenten, ergibt sich das Volumen der einzelnen Komponenten. Eine ausführliche Berechnung der Einzeldichten von „Harz“ und „Füllstoff“ der Tabellen 4.2 und 4.3 sind in Anhang 7.6 aufgeführt.

Tabelle 4.2: Berechnung der konventionellen Harzpastendichte (vgl. Abb. 3.8)

Komponente	Gewichtsanteil in g	Volumen in cm ³	Dichte in g/cm ³
Harz	28,41	26,53	1,07
Füllstoff	41,59	15,35	2,71
Summe	70,00	41,88	-
Harzpastendichte in g/cm ³		1,67	

Wenn konventionelle Füllstoffe durch bio-basierte und nachwachsende Füllstoffe ersetzt werden sollen, ist eine ausreichende Imprägnierung der Füllstoffe zu gewährleisten. Hierzu wird ein volumenbasierter Austausch der konventionellen Füllstoffe gewählt. Dabei wird das Volumen der konventionellen Füllstoffe (15,35 cm³ aus Tabelle 4.2) durch das Volumen der bio-basierten Füllstoffe (15,35 cm³) ersetzt, siehe Tabelle 4.3. Zur Abschätzung dieses Volumens wird in einem ersten Schritt mit einer mittleren Dichte von 1,0 g/cm³ für die bio-basierten Füllstoffe gerechnet. Diese Annahme beruht auf einer Abschätzung, basierend auf vorangegangenen Messreihen. Ebenfalls stellt dieser Ansatz sicher, dass genügend Harz zur Imprägnierung der Füllstoffe vorhanden ist. Die Berechnung der Harzpastendichte mit bio-basierten und nachwachsenden Füllstoffen ist in Tabelle 4.3 gezeigt.

Tabelle 4.3: Berechnung der Harzpastendichte mit bio-basierten Füllstoffen

Komponente	Gewichtsanteil in g	Volumen in cm ³	Dichte in g/cm ³
Harz	28,41	26,53	1,07
Bio-basierter Füllstoff	15,35	15,35	1,00*
Summe	43,76	41,88	-
Harzpastendichte in g/cm ³		1,05	

* Mittelwert als Annahme, basierend auf vorangegangenen Messreihen

Aufgrund der deutlich geringeren Dichte der bio-basierten Füllstoffe ergibt sich eine rechnerische Harzpastendichte von 1,05 g/cm³ im Gegensatz zu 1,67 g/cm³ bei konventionellen Füllstoffen. Dies entspricht einer Dichtereduktion von ca. 37,5 %. Bei der Herstellung von SMC-Halbzeugen mit einem Fasergehalt von 30 Gew.-% ($\rho_{GF} = 2,55 \frac{g}{cm^3}$) ergibt sich eine theoretische Halbzeugdichte von 1,94 g/cm³ auf Basis der

Referenz-Rezeptur IVW-1 und $1,49 \text{ g/cm}^3$ auf Basis der Rezeptur mit maximalem Gehalt an bio-basierten und nachwachsenden Füllstoffen. Dies entspricht einer maximal möglichen Reduktion der Bauteildichte von 22,66 %.

4.3 Auswahl und Charakterisierung bio-basierter Füllstoffe

Im Folgenden werden die Grundlagen zur Auswahl und Charakterisierung bio-basierter und nachwachsender Rohstoffe, welche als Alternative für konventionelle Füllstoffe in SMC-Halbzeugen dienen können, beschrieben. Die möglichen alternativen Füllstoffe wurden, in Absprache mit Rohstofflieferanten, SMC-Herstellern und Teilnehmern des AVK Arbeitskreises SMC/BMC, unter anderem hinsichtlich ihrer Verfügbarkeit, Dichte, Partikelgrößenverteilung, Imprägnierbarkeit, Verarbeitbarkeit in SMC-Harzpasten, ihrer Neigung zur Feuchtigkeitsaufnahme und der damit verbundenen Tendenz zur Schimmelbildung untersucht.

4.3.1 Dichtebestimmung ausgewählter bio-basierter Rohstoffe

Das Potenzial durch Reduktion der Dichte einer SMC-Harzpaste, in der bio-basierte und nachwachsende Füllstoffe eingesetzt werden, ist von der Dichte der jeweils verwendeten Füllstoffe abhängig. Zur Bestimmung der Dichte wurden die jeweils gewählten Füllstoffe in einem Harzpastenansatz mit drei Komponenten verarbeitet und die Dichte der Harzpaste mit einem Pyknometer, wie in Kapitel 3.4.2 beschrieben, bestimmt. In dem Dreikomponenten-Ansatz wurde das in der Grundrezeptur IVW-1 verwendete ungesättigte Polyesterharz „Polylite 31660-30“, ein benetzendes Additiv „P9065“ des Herstellers BYK und der jeweilige Füllstoff verarbeitet. Die Zusammensetzung des 3K-Ansatzes ist in Tabelle 4.4 gezeigt.

Tabelle 4.4: Zusammensetzung des 3K-Harzpastenansatzes zur Bestimmung der Dichte der bio-basierten Füllstoffe

Komponente	Bezeichnung	Massenanteil in %
UP-Harz	Polylite 31660-30	65
Benetzendes Additiv	P9065	5
bio-basierter Füllstoff	verschiedene	30

Die Dichten des Grundharzes ($\rho_{\text{UP-Harz}}$) und des Additives (ρ_{Additiv}) wurden zuvor bestimmt. Sofern die Dichten und Mengenanteile der jeweiligen Komponenten ($\varphi_{\text{UP-Harz}}$ und φ_{Additiv}) einer Harzpastenrezeptur bekannt sind, kann die Gesamtdichte ($\rho_{\text{3K-Harz}}$) nach Formel (4.1) berechnet werden. Wenn die Gesamtdichte und die Massenanteile der jeweiligen Komponenten einer Harzpaste bekannt sind, kann durch Umstellung der Formel (4.1) zu (4.2) die Dichte einzelner Komponenten ($\rho_{\text{Füllstoff}}$) berechnet werden.

$$\rho_{\text{3K-Harz}} = \rho_{\text{UP-Harz}} * \varphi_{\text{UP-Harz}} + \rho_{\text{Additiv}} * \varphi_{\text{Additiv}} + \rho_{\text{Füllstoff}} * \varphi_{\text{Füllstoff}} \quad (4.1)$$

$$\rightarrow \rho_{\text{Füllstoff}} = \frac{\rho_{\text{3K-Harz}} - \rho_{\text{UP-Harz}} * \varphi_{\text{UP-Harz}} - \rho_{\text{Additiv}} * \varphi_{\text{Additiv}}}{\varphi_{\text{Füllstoff}}} \quad (4.2)$$

Die Ergebnisse der Dichteberechnung sind in Tabelle 4.5 gezeigt. Es ist ersichtlich, dass alle gewählten Füllstoffe eine Dichte kleiner 1 g/cm³ aufzeigen.

Tabelle 4.5: Dichten ausgewählter bio-basierter Füllstoffe

Komponente	Dichte in g/cm ³
Hartholz	0,86 ± 0,05
Weichholz	0,68 ± 0,03
Sonnenblumenkernschalenmehl	0,95 ± 0,08
Rapsschrot	0,96 ± 0,02
Reisschalenmehl	0,85 ± 0,02

Diese Ergebnisse können durch einen Eintauchtest in Wasser bestätigt werden. Alle verwendeten Materialien schwimmen im Wasser, saugen sich jedoch innerhalb weniger Minuten voll, sodass Ihre Dichte steigt. Es ist ersichtlich, dass die Dichte der

Füllstoffe sehr stark vom gewählten Material abhängt. Weichholz zeigt mit $0,68 \text{ g/cm}^3$ die geringste Dichte. Bei einer prozesssicheren Verarbeitbarkeit (homogene Verteilung und Imprägnierung) und volumetrisch gleichem Einsatz der Weichholz-Füllstoffe in einem Halbzeug würde sich somit das größte Leichtbaupotenzial für diese Füllstoffe ergeben. Alle anderen Füllstoffe besitzen eine Dichte um $0,85 - 0,95 \text{ g/cm}^3$. Somit sind diese ca. 30 % schwerer als das Weichholzmehl. Dennoch sind sie ca. 70 % leichter als die konventionellen Füllstoffe.

4.3.2 Partikelgrößenbestimmung ausgewählter bio-basierter Rohstoffe

Bei der Auswahl und Beschaffung der bio-basierten und nachwachsenden Füllstoffe wurde darauf geachtet, dass diese, wenn möglich, in einer homogenen Partikelgröße vorliegen. Diese sollte nach Möglichkeit mit der konventioneller Füllstoffe vergleichbar sein, um die Verarbeitungs- und Bauteileigenschaften nicht negativ zu beeinflussen. Die Partikelgröße konventioneller Füllstoffe beträgt laut Datenblattangaben $1,5 - 15 \mu\text{m}$ bei CaCO_3 und $1,5 - 35 \mu\text{m}$ bei $\text{Al}(\text{OH})_3$. Zur Bestimmung der realen Partikelgröße und der vorliegenden Partikelgrößenverteilung der Füllstoffe wurden sowohl die konventionellen als auch die bio-basierten und nachwachsenden Füllstoffe optisch mittels REM und durch eine Siebanalyse untersucht. Mit dem REM wird die Oberflächenbeschaffenheit der Füllstoffe untersucht sowie eine stichpunktartige Vermessung der Füllstoffe durchgeführt. Die real vorliegende Partikelgrößenverteilung wird mittels Sieb-Analyse bestimmt.

Siebturmanalyse

Bei der Siebturmanalyse werden die zu untersuchenden Füllstoffe in einem Siebturm in unterschiedliche Partikelgrößenfraktionen separiert. Der Siebturm der Marke FRITSCH Typ Analysette 3 PRO wird aus einer Auffangschale, mehreren Siebschalen mit unterschiedlicher Maschenweite ($25 \mu\text{m}$ bis zu 5 mm) und einer Verschlusschale aufgebaut. In der vorliegenden Arbeit wurden Siebe mit einer Maschenweite von $25 \mu\text{m}$ bis $500 \mu\text{m}$ eingesetzt. Als Zwischenstufen wurden $63 \mu\text{m}$, $125 \mu\text{m}$ und $250 \mu\text{m}$ gewählt, siehe Abbildung 4.1. In jedes Sieb wurden vor Beginn des jeweiligen Siebvorgangs $5,00 \text{ g}$ Polypropylen (PP)-Granulat eingefüllt, um Anhaftungen des Siebgutes an den jeweiligen Siebmaschen und Agglomeratbildung vorzubeugen. Weiterhin wurden das Leergewicht und das Gewicht jeder Siebschale inklusive PP-

Granulat vor der Messung aufgezeichnet. Zu Beginn der jeweiligen Messungen wurden 50 g der zu untersuchenden Füllstoffe in den Siebturm gefüllt und dieser verschlossen. Als Siebparameter wurden eine Amplitude von 1,5 mm in vertikaler Richtung, eine Siebdauer von 15 Minuten und eine automatische Amplitudenregelung gewählt.

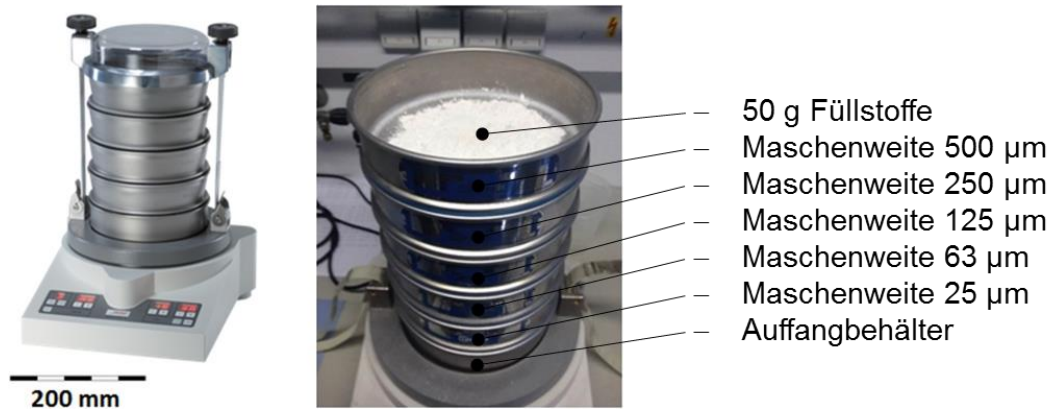


Abbildung 4.1: Siebturm zur Bestimmung der Partikelgrößenverteilung

Nach Ablauf der Versuchsdauer werden die einzelnen Siebe mit den jeweiligen Fraktionen ausgewogen und somit das Gewicht der jeweiligen Fraktionen nach Formel (4.3) bestimmt. Anhand der jeweiligen Massenanteile wird die prozentuale Partikelgrößenverteilung nach Formel (4.4) berechnet. Pro Material wurden fünf Messungen durchgeführt.

$$m_{\text{Fraktion}} = m_{\text{Endgewicht inkl. Fraktion und Granulat}} - m_{\text{Leergewicht inkl. Granulat}} \quad (4.3)$$

$$\varphi_{\text{Fraktion}} = \frac{m_{\text{Fraktion}}}{m_{\text{Gesamtmasse}}} \quad (4.4)$$

Bei der Siebturmanalyse konnte nachgewiesen werden, dass die Partikelgrößenverteilung der konventionellen Füllstoffe nicht mit den Datenblattangaben übereinstimmt. Laut Datenblattangaben beträgt die Partikelgröße der konventionellen Füllstoffe 1,5 - 15 µm für CaCO₃ und 1,5 - 35 µm für Al(OH)₃. Die Siebturmanalyse hat gezeigt, dass die Füllstoffe zu Agglomeratbildung im Anlieferungszustand neigen und eine mittlere Partikelgröße von 25 - 125 µm bei CaCO₃ und bis 63 µm bei Al(OH)₃ aufzeigen, siehe Abbildung 4.2. Diese Tendenz zur Ausbildung von Agglomeraten

wurde durch REM-Aufnahmen bestätigt. Die Agglomerate der Füllstoffe können beim Dispergieren aufgebrochen werden.

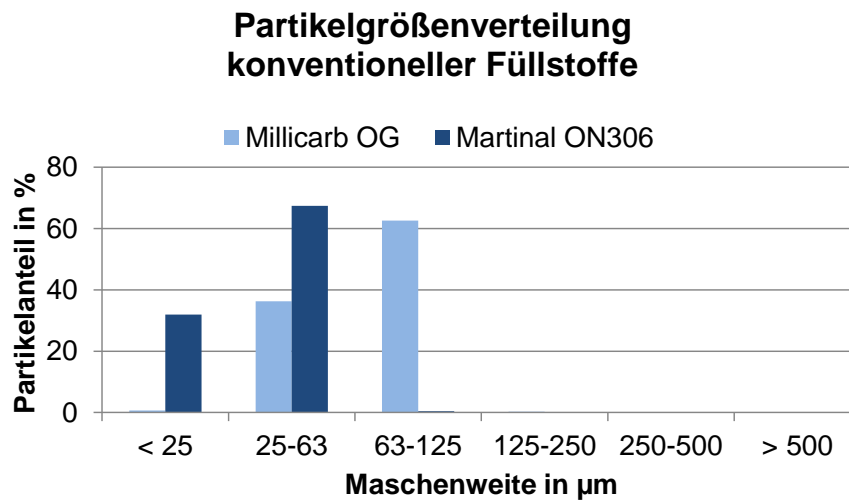


Abbildung 4.2: Prozentuale Partikelgrößenverteilung der konventionellen Füllstoffe

Die Ergebnisse der Partikelgrößenverteilung der bio-basierten und nachwachsenden Füllstoffe sind in Abbildung 4.3 gegeben. Hierbei ist zu erkennen, dass die verschiedenen Materialien deutlich voneinander unterscheidende Partikelgrößen im Anlieferungszustand aufweisen. Die Spanne der Holzmehle reicht von 25 μm bis teilweise deutlich größer 500 μm . Das Sonnenblumenkernschalenmehl besitzt eine mittlere Partikelgröße im Bereich von ca. 63 - 250 μm , die Reisschalen 125 - 500 μm und das Rapsschrot 25 - 250 μm . Die ursprünglichen Partikelgrößen können durch entsprechende Mahlvorgänge an die Randbedingungen bei der Herstellung von SMC-Halbzeugen angepasst werden. Ein solcher Schritt würde einen zusätzlichen Energieeintrag benötigen und wird in dieser Arbeit ausgespart. Eine graphische Aufbereitung der Ergebnisse aller Füllstoffe ist in Abbildung 7.3 in Anhang 7.7 gezeigt.

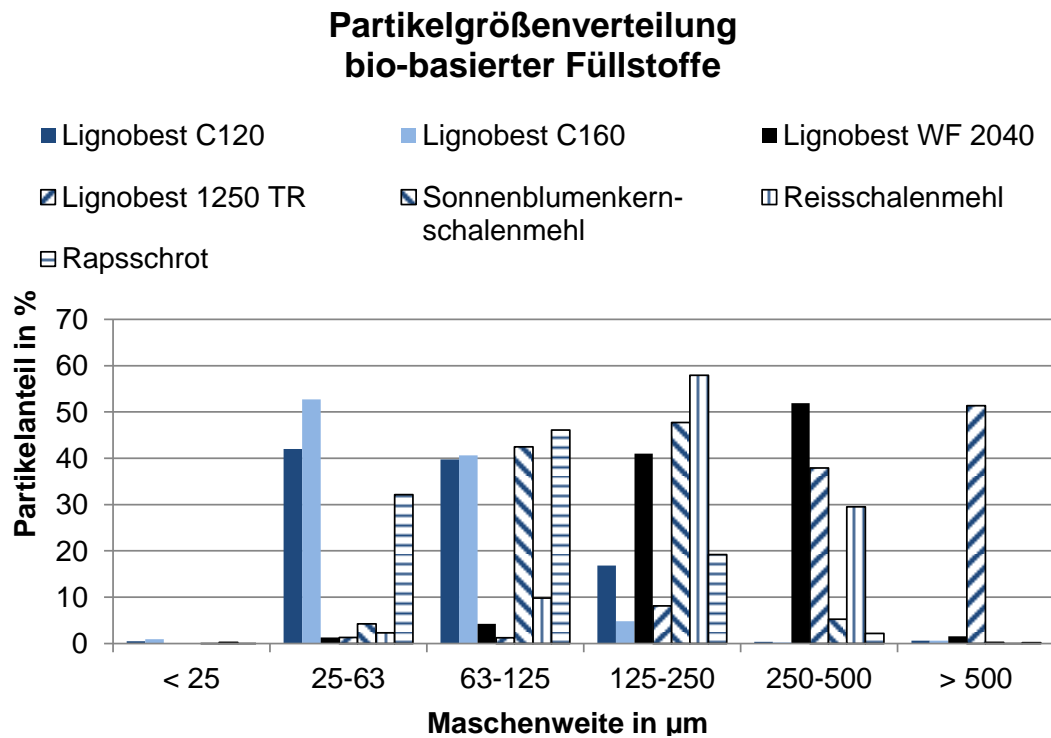


Abbildung 4.3: Prozentuale Partikelgrößenverteilung der bio-basierten und nachwachsenden Füllstoffe

REM-Analyse

Ein Überblick über die einzelnen Partikelgrößen und deren Verteilung wurde mittels REM-Analyse gewonnen. Hierzu wurde das Mikroskop Supra VP40 Gemini von Carl Zeiss genutzt. Zur Vorbereitung der einzelnen Versuche wurden die entsprechenden Proben mit einer Gold-Palladium-Schicht gesputtert. Die gezeigten Aufnahmen wurden bei einer Arbeitsweite (WD = working distance) von 13 bis 15 mm sowie einer Beschleunigungsspannung von 3 bzw. 5 kV erstellt. Abbildung 4.4 zeigt jeweils eine Detailabbildung mit 10.000-facher Vergrößerung der konventionellen Füllstoffe. Auf der linken Seite ist der konventionelle und nicht-funktionelle Füllstoff CaCO_3 dargestellt.

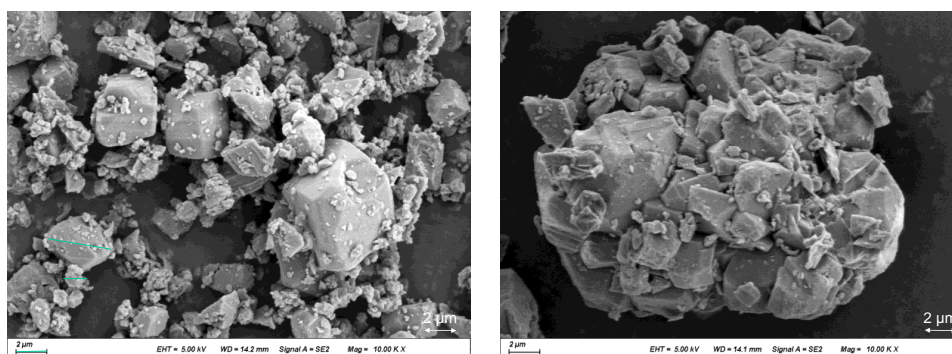


Abbildung 4.4: links: Detailansicht Millicarb OG, rechts: Detailansicht Martinal ON 306

Die Vermessung der einzelnen Partikel bzw. Agglomerate ergibt eine mittlere Partikelgröße von 2 μm , jedoch treten vermehrt Agglomerate, welche während der Harzpastenherstellung aufgebrochen und dispergiert werden, auf. Auch bei der Untersuchung des funktionellen Füllstoffs $\text{Al}(\text{OH})_3$ zeigt sich eine starke Tendenz zur Agglomeratbildung zwischen den einzelnen Partikeln. Die mittlere Partikelgröße beträgt 2,5 μm . Die Größe der Agglomerate beträgt bis zu 32 μm . Beide Füllstoffe zeigen eine geschlossene und scharfkantige Oberflächenstruktur. Die Agglomerate zeigen eine zerklüftete Oberfläche, welche viele Hinterschnitte bietet, auf.

Exemplarisch für die bio-basierten und nachwachsenden Füllstoffe sind in Abbildung 4.5 links eine Detailaufnahme von gemahlenem Rapsschrot und rechts eine Detailaufnahme von gemahlenen Sonnenblumenkernschalen gezeigt. Für diese sowie für die weiteren bio-basierten Füllstoffe, welche in Anhang 7.8 dargestellt sind, ist eine offenporige und abgerundete Oberfläche charakteristisch. Über diese offenporige Oberfläche können die bio-basierten Füllstoffe sehr gut in die Harzpaste eingebunden werden. Die Partikelgröße der dargestellten Rapsschrot-Partikel liegt im Bereich um 63 - 125 μm , die der gemahlenen Sonnenblumenkernschalen im Bereich von 63 - 250 μm .

Die Ergebnisse der Partikelgrößenbestimmung mittels Siebturmanalyse und REM stimmen mäßig überein. Dies wird mit dem Vorhandensein von Agglomeraten, welche die Größenbestimmung bei den REM-Aufnahmen dominieren, begründet. Bei der Bestimmung der Partikelgröße mittels Siebturm werden die Agglomerate durch die im Siebverfahren verwendeten PP-Pellets teilweise aufgebrochen. Das Siebturm-Verfahren ist somit deutlich günstiger und effizienter, um die Partikelgrößenbestimmung durchzuführen und stellt somit ein mögliches Verfahren für eine Wareneingangskontrolle dar.

Das als konventioneller Füllstoff verwendete CaCO_3 zeigt im Anlieferungszustand eine, durch Agglomeratbildung bedingte, mittlere Partikelgröße von 25 - 125 μm . Diese stimmt sehr gut mit der mittleren Partikelgröße der gewählten bio-basierten und nachwachsenden Füllstoffe überein.

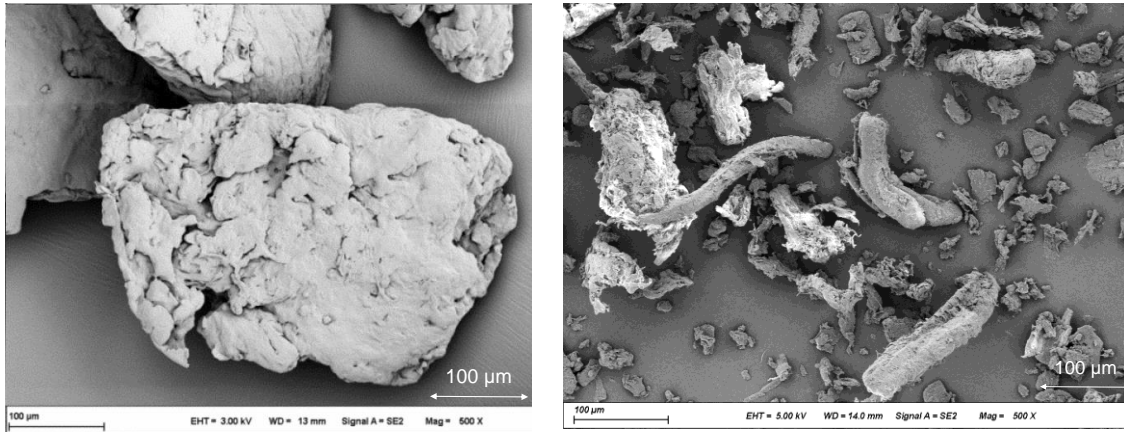


Abbildung 4.5: links: Detailansicht gemahltes Rapsschrot, rechts: Detailansicht gemahlene Sonnenblumenkernschalen

4.3.3 Feuchtigkeitsaufnahmeverhalten bio-basierter Rohstoffe

Die Bestimmung des Feuchtigkeitsaufnahmeverhaltens ist für die Lagerung und Verarbeitung sowohl von bio-basierten und nachwachsenden Füllstoffen als auch von konventionellen Füllstoffen unumgänglich, da dieses Verhalten einen großen Einfluss auf die Lagerbedingungen hat. Durch die Untersuchung des Feuchtigkeitsaufnahmeverhaltens bei Raumklima und in einem Klimaschrank (Typ: SB 22 160, Marke: Weiss) können die Rahmenbedingungen für die Lagerung der Füllstoffe untersucht werden. Ebenso kann die Tendenz der Hydrophilie der einzelnen Füllstoffe nachgewiesen werden.

Zum Einfluss des Verarbeitungsstadiums auf das Feuchtigkeitsaufnahmeverhalten wurden Untersuchungen der Füllstoffe im Anlieferungszustand, und nachdem sie zu einem Probekörper verarbeitet wurden, durchgeführt.

Versuche im Anlieferungszustand:

Zur Bestimmung des Feuchtigkeitsgehaltes der Füllstoffe im Ursprungszustand wurden diese in einem Feuchtebestimmer Typ MLS der Marke Kern, wie in Kapitel 3.3 beschrieben, untersucht. Direkt im Anschluss wurde eine definierte Menge an Füllstoffen auf einer Laborwaage ($d = 0,0001 \text{ g}$) abgewogen und diese Menge als getrocknete Grundmasse zum Zeitpunkt t_0 ($m_{\text{trocken};t_0}$) definiert. Anschließend wurde die definierte Menge bei Raumklima unter $20 - 23 \text{ °C}$ und einer Luftfeuchtigkeit von $40 - 50 \text{ %}$ ausgelagert. Hierbei wurde der Massenzuwachs über einen Zeitraum von fünf Tagen dokumentiert. Es wurde festgestellt, dass die konventionellen Füllstoffe

eine maximale Feuchte von 0,5 % aufnehmen. Die bio-basierten Füllstoffe hingegen absorbieren eine höhere Feuchtigkeitsmenge, bedingt durch ihre offenporige Oberflächenstruktur und ihre natürliche Hydrophilie. Abbildung 4.6 zeigt das Feuchtigkeitsaufnahmeverhalten der Füllstoffe in einem Klimaschrank. Die Temperatur im Klimaschrank beträgt 30 °C, die Luftfeuchtigkeit 95 %. Hierbei ist ebenfalls die höhere Feuchtigkeitsaufnahme der bio-basierten Füllstoffe zu erkennen. Diese liegt ca. 20-fach höher als bei den konventionellen Füllstoffen. Weiterhin ist anzumerken, dass nach fünf Tagen keine Sättigung der Feuchtigkeit erreicht werden konnte. Basierend auf dieser Erkenntnis wurde die Versuchsreihe auf acht Tage verlängert, um eine Sättigung zu erreichen. Eine exakte Messung der Sättigung ist jedoch nicht möglich, da bei den bio-basierten Proben nach ca. sechs Tagen eine Schimmelbildung beginnt und daraufhin eine Unterscheidung der Gewichtszunahme, bedingt durch Feuchtigkeitsaufnahme oder Schimmelbildung, nicht mehr möglich ist. Diese Erkenntnis führt zu dem Entschluss, dass die Lagerung von bio-basierten Füllstoffen unbedingt in trockenen und luftdicht abgeschlossenen Behältern stattfinden muss. Die konventionellen Füllstoffe zeigen eine maximale Feuchtigkeitsaufnahme von 0,7 % bei den Aluminiumhydroxiden (Millicarb ON 306) und 1,6 % bei den Kalziumcarbonaten (Martinal OG). Eine Lagerung kann in geschlossenen Behältern ohne weitere Maßnahmen realisiert werden.

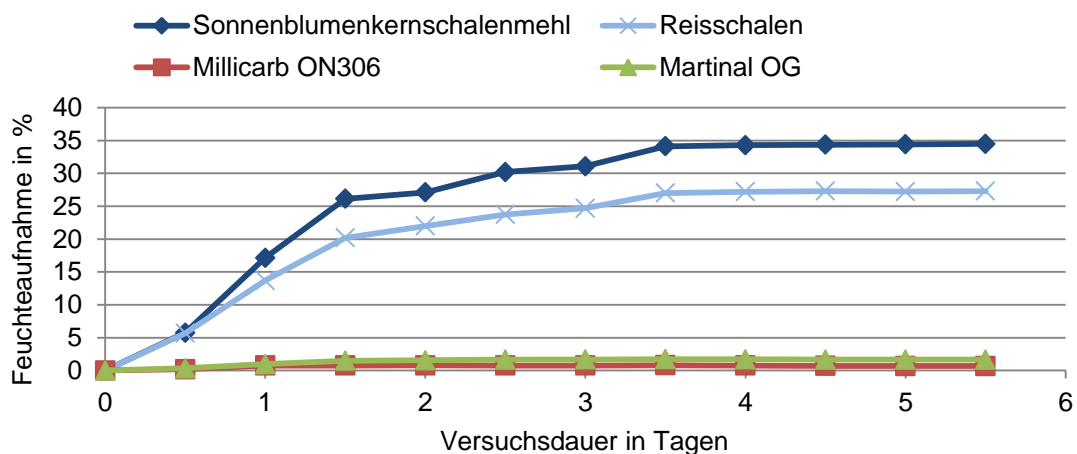


Abbildung 4.6: Feuchtigkeitsaufnahme ausgesuchter Füllstoffe in einer Klimakammer

Versuche im verarbeiteten Zustand:

Der Einfluss der Verarbeitung auf die Feuchtigkeitsaufnahme wurde an Halbzeugen, welche mit konventionellen oder bio-basierten Füllstoffen hergestellt wurden, unter-

sucht. Hierzu wurden jeweils fünf Probekörperplatten aus einem konventionellen industriell verfügbaren SMC-Halbzeug, der entwickelten Harzpastenrezeptur „IVW-1“ und Halbzeugen mit bio-basierten und nachwachsenden Füllstoffen hergestellt. Aus diesen Probekörperplatten wurden Probekörper der Abmaße 100 x 15 x 4 mm³ entnommen und diese in einem Klimaschrank bei 23 °C und 80 % relativer Luftfeuchtigkeit ausgelagert. Abbildung 4.7 zeigt die Ergebnisse der Auslagerung. Hierbei konnte nachgewiesen werden, dass die in dieser Arbeit entwickelte Rezeptur „IVW-1“ ein mit dem industriellen Standard (Menzolit; SMC1400) vergleichbares Feuchtigkeitsaufnahmeverhalten hat. Der Gewichtsanstieg der Proben betrug innerhalb von 15 Tagen ca. 0,2 %, bezogen auf das Startgewicht. Im Gegensatz hierzu zeigen die Proben mit den bio-basierten und nachwachsenden Füllstoffen einen deutlichen Gewichtsanstieg von bis zu 0,5 %, bezogen auf das Startgewicht. Die in dieser Versuchsreihe genutzten Halbzeuge mit bio-basierten Füllstoffen wurden im Labormaßstab und im Hand-Verfahren gefertigt. Durch eine Fertigung im Technikums-Maßstab kann das Feuchtigkeitsaufnahmeverhalten eventuell reduziert werden.

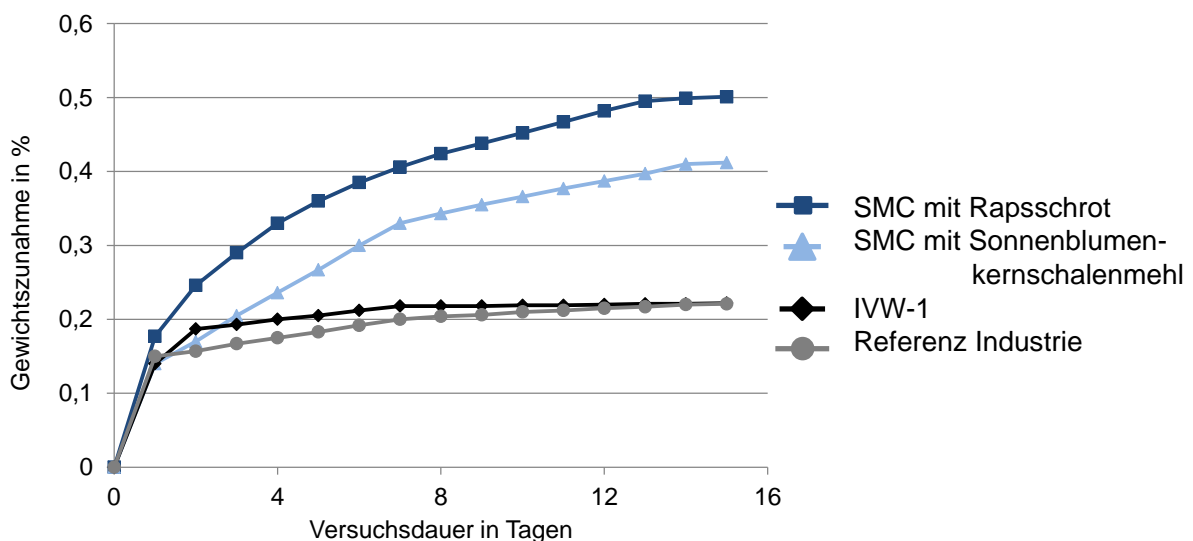


Abbildung 4.7: Feuchtigkeitsaufnahme von SMC-Halbzeugen im Labormaßstab

4.3.4 Einfluss bio-basierter Füllstoffe auf die Viskosität der Harzpaste

Bei der Bestimmung der Dichte der einzelnen konventionellen, bio-basierten und nachwachsenden Füllstoffe konnte nachgewiesen werden, dass die bio-basierten und nachwachsenden Füllstoffe sich bis zum Erreichen eines Sättigungswertes mit der aus der Luft verfügbaren Feuchtigkeit anreichern. Die Füllstoffe wurden vor der

Bestimmung der jeweiligen Dichte bei Raumklima im Labor (Luftfeuchtigkeit: 45 %, Temperatur: 20 °C) bis zur Sättigung ausgelagert. Hierbei beträgt der Feuchtegehalt der Füllstoffe zwischen 4,5 und 5,0 %. Bei der Verarbeitung der bio-basierten und nachwachsenden Füllstoffe wurde festgestellt, dass diese sich während der Verarbeitung in einem UP-Harz innerhalb von 15 Minuten sättigen und somit ihre Dichte verändern. Alle in Kapitel 4.3.1 angegebenen Werte entsprechen den jeweiligen Sättigungswerten. Einhergehend mit der Steigerung der Dichte der einzelnen Füllstoffe, konnte auch ein Einfluss auf die resultierende Harzpastenviskosität nachgewiesen werden. Die Aufnahme der Flüssigkeit lässt sich durch die offenporige Oberfläche und die natürliche Hydrophilie der Füllstoffe begründen. Durch die Aufnahme der in der Harzpaste vorhandenen flüssigen Komponenten steigt die Viskosität der Harzpaste an. In diesem Kapitel wird der Einfluss der einzelnen Füllstoffe und der Füllstoffpartitionen auf die resultierende Harzpastenviskosität untersucht. Hierbei dient die Harzpastenviskosität der Rezeptur „IVW-1“ wieder als Referenz. Diese Rezeptur wurde so entwickelt, dass sie bei einem Füllstoffanteil von 100 % der konventionellen Füllstoffe eine maximale Viskosität von 40 Pa·s besitzt, siehe Abbildung 4.8; gestrichelte Trendlinie. Das Volumen der konventionellen Füllstoffe wurde, entsprechend der Dichteverhältnisse, in das zu dosierende Volumen der bio-basierten und nachwachsenden Füllstoffe umgerechnet. Die Masse der bio-basierten und nachwachsenden Füllstoffe wurde in zehn Partitionen aufgeteilt. Diese Partitionen wurden einzeln in die Grund-Harzpaste, basierend auf der Rezeptur „IVW-1“ ohne Füllstoffe, mittels Kreisscheibendissolver, homogenisiert. Nach jedem einzelnen Homogenisierungsvorgang wurde die resultierende Harzpastenviskosität bestimmt. Die einzelnen Partitionen wurden so lange zur Harzpaste dosiert, bis eine resultierende Viskosität der Harzpaste von 40 Pa·s erreicht wurde. Hierdurch ist es möglich, das Viskositätsverhalten der einzelnen Füllstoffe und der einzelnen Partitionen auf die Gesamtharzpaste abzubilden. Die Messreihen wurden jeweils fünf Mal wiederholt.

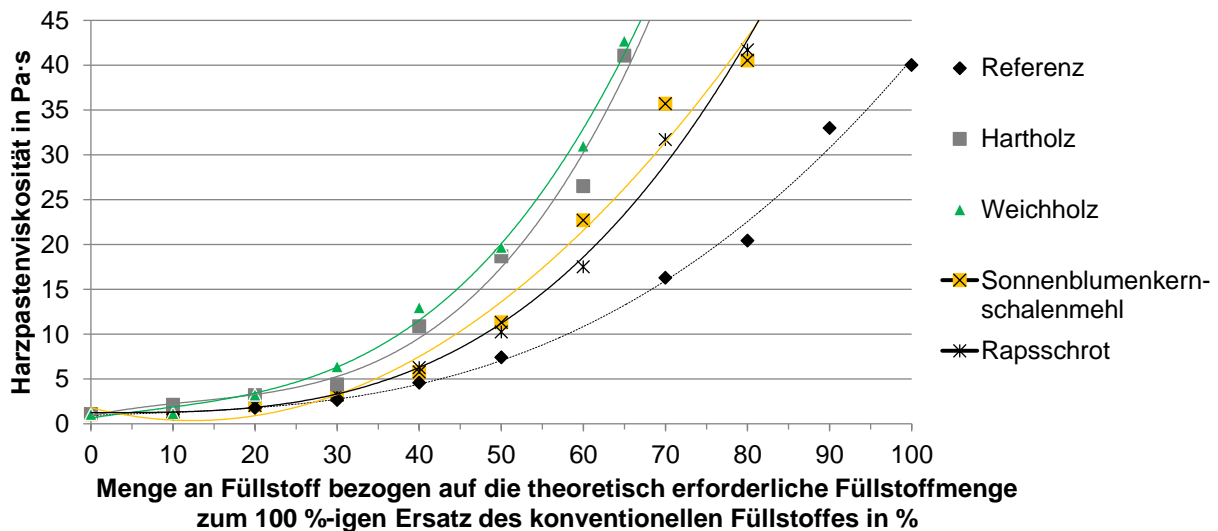


Abbildung 4.8: Einfluss der bio-basierten Füllstoffe auf die Harzpastenviskosität

Es konnte nachgewiesen werden, dass die verwendeten Holzmehle aus Weich- und Hartholz einen negativen Einfluss auf das Viskositätsverhalten zeigen, da diese zu einem sehr starken Anstieg der Viskosität, bezogen auf die homogenisierte Füllstoffmenge, führen. Es konnten nur knapp 60 % der benötigten Füllstoffmenge in die Grundharzpaste dispergiert werden, bis diese die Verarbeitungsgrenze von 40 Pa·s erreicht hat. Rapsschrot und Sonnenblumenkernschalenmehl zeigten einen niedrigeren Viskositätsanstieg, bezogen auf die homogenisierte Füllstoffmenge. In den ersten Versuchsreihen konnten ca. 80 % der benötigten Füllstoffmenge homogenisiert werden. Durch Anpassung der Rezeptur, siehe Kapitel 4.4, konnte der Füllstoffanteil später auf das gewünschte Maß erhöht werden.

In einer weiteren Versuchsreihe wurde der Einfluss der unterschiedlichen Partikelgrößen der bio-basierten und nachwachsenden Füllstoffe auf den Viskositätsverlauf der Harzpaste untersucht. Hierzu wurden diese mit Hilfe des Siebturmes in die folgenden Fraktionen separiert:

- Fraktion 1: 0 - 63 μm
- Fraktion 2: 63 - 125 μm
- Fraktion 3: 125 - 250 μm
- Fraktion 4: 250 - 500 μm

Anschließend wurden die einzelnen Fraktionen jeweils in 5 %-Schritten der berechneten Gesamtmenge zu der Harzpaste dosiert und der Einfluss der Partikelgröße auf

die Viskosität bestimmt. Abbildung 4.9 zeigt das Viskositätsverhalten der unfraktionierten Füllstoffe (Raute, schwarze Linie) und den jeweiligen Viskositätsverlauf der einzelnen Fraktionen. Es konnte nachgewiesen werden, dass Fraktionen mit größerer Partikelgröße (125 - 500 μm), in blau (Stern) und lila (Kreuz) dargestellt, bei gleicher gravimetrischer Dosierung zu einem geringeren Viskositätsanstieg als die Fraktionen mit kleiner Partikelgröße (0 - 125 μm), in grün (Dreieck) und rot (Quadrat) dargestellt, führen. Die Messungen wurden jeweils bis zu einem Gesamtfüllstoffanteil von 75 % des berechneten Gesamtfüllstoffanteils durchgeführt, um die Forderungen der Halbzeug Spezifikationen zu erfüllen. Die Sprünge in den Verläufen der Viskositätskurven sind durch notwendige Anpassung der Spindeldrehzahl des Viskosimeters zu erklären.

Es konnte gezeigt werden, dass bei den bio-basierten Füllstoffen bei gleicher gravimetrischer Dosierung große Partikel (125 – 500 μm) zu einem geringeren Viskositätsanstieg als kleine Partikel (1 – 125 μm) des gleichen bio-basierten Füllstoffs führen.

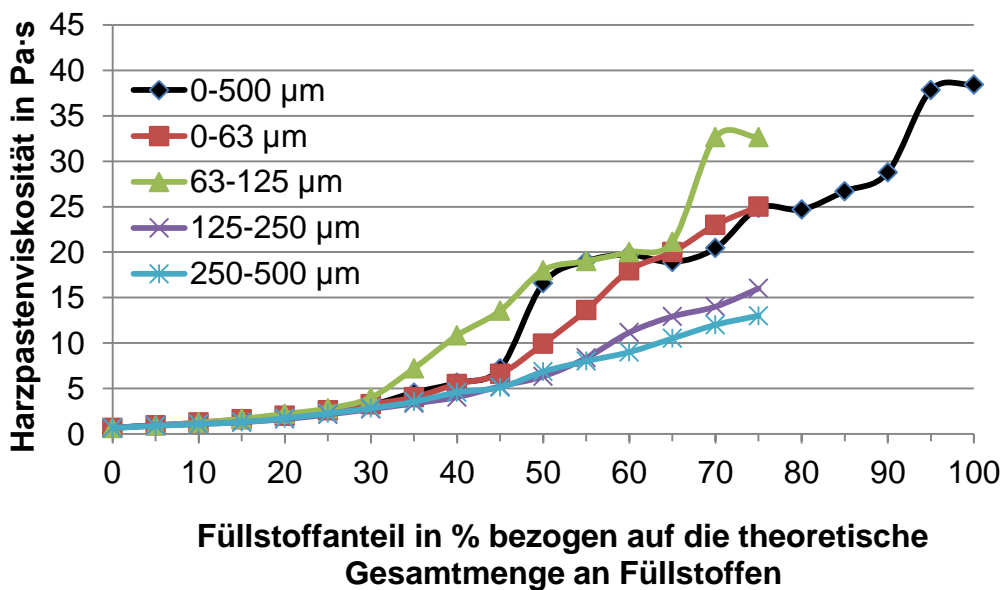


Abbildung 4.9: Einfluss der Partikelgröße der bio-basierten Füllstoffe auf die Harzpastenviskosität

Ergebnisse der Viskositätsmessung:

- Es konnte gezeigt werden, dass die Hart- und Weichholzmehle sehr gut mit einem Kreisscheibendissolver dispergiert werden konnten, jedoch frühzeitig zu einem Anstieg der Viskosität führen. Bei ca. 65 % Zugabe der berechneten Füll-

stoffmenge wurde eine Viskosität der Harzpaste von 40 Pa·s erreicht. Dies äußert sich durch eine Verschiebung der Trendlinie nach links.

- Bei der Verarbeitung von Rapsschrot und Sonnenblumenkernschalenmehl war es möglich, über 80 % der benötigten Füllstoffe in die Harzpaste einzubetten, bevor die Grenzviskosität von 40 Pa·s erreicht wurde. Diese Füllstoffe erfüllen die Forderung der Spezifikation nach einem bio-basierten und nachwachsenden Füllstoffgehalt von mindestens 75 % ohne Anpassung der Harzpastenrezeptur.
- Die Verarbeitung der bereits in den vorherigen Untersuchungen verwendeten Reisschalen war nicht möglich, da diese aufgrund von Lieferproblemen für keine der weiteren Untersuchungen zur Verfügung stehen. Diese werden somit für die weiteren Versuche ausgeschlossen.
- Die Einbringung von bio-basierten und nachwachsenden Rohstoffen als Füllstoffe in SMC-Harzpasten konnte erfolgreich durchgeführt werden.
- Es ist zu beachten, dass die hydrophilen und offenporigen Füllstoffe zu einem starken Anstieg der Harzpastenviskosität der Grundrezeptur führen.
- Bei der Dosierung der einzelnen Fraktionen von Sonnenblumenkernschalenmehl konnte gezeigt werden, dass Füllstoffe mit größerem Partikeldurchmesser (125 - 500 µm) zu einem geringeren Viskositätsanstieg führen als kleinere Partikel (0 - 125 µm)

4.3.5 Zusammenfassung des Füllstoffscreenings

In den grundlegenden Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass die Verwendung von bio-basierten und nachwachsenden Rohstoffen als Alternative zu konventionellen Füllstoffen in SMC-Halbzeugen möglich ist. Aufgrund der lokalen Verfügbarkeit wurden als Füllstoffe Rapsschrot, Hart- und Weichholzmehle, Sonnenblumenkernschalenmehl und Reisschalenschrot gewählt. Diese wurden hinsichtlich ihrer Partikelgrößenverteilung, welche einen sehr großen Einfluss auf den Fasertransport und die Oberflächenqualität während der Verarbeitung hat, untersucht. Hierbei konnte gezeigt werden, dass die Partikel aller untersuchten bio-basierten und nachwachsenden Füllstoffe im Anlieferungszustand deutlich größer (25 - 500 µm) sind als die der konventionellen Füllstoffe (3 - 15 µm). Die bio-basierten und nachwachsenden Füllstoffe zeigen weiterhin ein ca. zwanzig Mal so hohes Feuchtigkeitsaufnahmeverhalten wie die konventionellen Füllstoffe. Ihre Einarbeitung in eine konventionelle

SMC-Harzpaste ist möglich. Jedoch führt dies zu einer starken Erhöhung der Grundviskosität der Harzpaste. Durch eine Anpassung der Harzpastenrezeptur soll die Verarbeitung möglichst hoher Füllstoffanteile realisiert werden. Auf Basis des sehr hohen Viskositätsanstieges durch Hart- und Weichholzmehle werden diese für die weiteren Versuche ausgeschlossen. Ebenso wurde Reisschalenschrot für weitere Versuche aufgrund von Lieferengpässen ausgeschlossen. Für die weiteren Versuche wurden Rapsschrot und Sonnenblumenkernschalenmehl gewählt. Diese Füllstoffe führen zu einem mäßigen Viskositätsanstieg, welcher durch eine Anpassung der Rezeptur ausgeglichen werden soll.

4.4 Anpassung der Rezeptur an die bio-basierten und nachwachsenden Rohstoffe im Labormaßstab

Die Verarbeitung von nachwachsenden und bio-basierten Füllstoffen in der Grundrezeptur „IVW-1“ erfordert eine Anpassung und Modifikation bezüglich der Viskosität. Durch die Wahl eines flüssigen Trennmittels (BYK P9065, Kapitel 3.4.6) konnte die Viskosität der konventionellen Harzpaste gesenkt und gleichzeitig die Qualität der Bauteile deutlich gesteigert werden. Durch die Zugabe eines Additivs soll die Viskosität der Grundharzpaste gesenkt werden. Weiterhin wird durch die Zugabe eines benetzenden und viskositätssenkenden Additives die Benetzung der zugegebenen Füllstoffe optimiert, so dass diese prozesssicherer in die Harzpaste eingebunden werden können und nicht zu Agglomeratbildung neigen. Hierdurch soll die vollständige Zugabe der berechneten und benötigten Füllstoffmenge ermöglicht werden, ohne die Grenzviskosität von 40 Pa·s zu überschreiten. Als mögliche viskositätssenkende Additive wurden auf Basis einer umfangreichen Recherche (Literatur, Lieferanten und SMC-Hersteller) die in Tabelle 4.6 gezeigten Additive gewählt. Die Additive werden üblicherweise in einer Dosierung von 0,5 - 2 %, bezogen auf die Grundharzmenge, beigemischt und weisen eine Dichte um 1 g/ml auf. Eine Dosierung der Additive muss vor Zugabe der Füllstoffe erfolgen, so dass diese homogen in die Grundharzpaste dispergiert werden können.

Tabelle 4.6: Auswahl viskositätssenkender Additive

Hersteller	Bezeichnung	Dosierung	Dichte [g/ml]
BYK	BYK-W 996	1-2 % auf Harz	1,04
BYK	BYK-W 980	1-2 % auf Harz	0,99
Lehmann&Voss&Co.	LUVATINE VC 104	0,5-1 % auf Harz	1,16
Lehmann&Voss&Co.	LUVATINE VC 105	0,5-2 % auf Harz	1,03

Durch die Zugabe der viskositätssenkenden Additive konnte eine deutliche Verbesserung der Imprägnierbarkeit der bio-basierten und nachwachsenden Rohstoffe erreicht werden. Die besten Ergebnisse wurden mit dem Additiv „LUVATINE VC 104“ des Herstellers Lehmann&Voss&Co. bei einer Dosierung von einem Prozent, bezogen auf die Grundharzmenge, erreicht. Abbildung 4.10 zeigt den Viskositätsverlauf der optimierten und angepassten SMC-Harzpastenrezeptur mit Sonnenblumenkernschalenmehl als Füllstoff. Ein Vergleich der Viskositätsverläufe der Referenzrezeptur IVW-1 und der optimierten Rezeptur mit bio-basierten Füllstoffen ist in Anhang 7.9 gegeben. Dieser wurde mit einem Brookfield Viskosimeter DV2T und der Prüfspindel LV 64 aufgezeichnet. Als Drehzahlen wurden 40 Umdrehungen pro Minute bei Füllstoffgehalten zwischen 0 und 45 %, für höhere Füllstoffgehalte eine Drehzahl von 20 Umdrehungen pro Minute, und ab 90 % des berechneten Füllstoffgehaltes wurden 15 Umdrehungen pro Minute gewählt. Die Änderung der Drehzahl ist durch die Bauart des Viskosimeters und den Anstieg der Viskosität bedingt. Hierdurch lassen sich die Sprünge im Viskositätsverlauf begründen. Die Messungen wurden in einem doppelwandigen und auf 25 °C temperierten Messbehälter durchgeführt. Durch das Einbringen des entsprechenden viskositätssenkenden Additivs konnte eine Zugabe von 100 % der berechneten bio-basierten und nachwachsenden Füllstoffe ermöglicht werden. Die hierdurch optimierte Rezeptur wird für die weiteren Untersuchungen gewählt.

Die nachfolgenden Untersuchungen wurden aufgrund der Verfügbarkeit und der Werkstoffqualität lediglich mit Sonnenblumenkernschalenmehl durchgeführt. Dieser bio-basierte und nachwachsende Rohstoff ist als kommerzielles Produkt in gleichbleibender Qualität verfügbar.

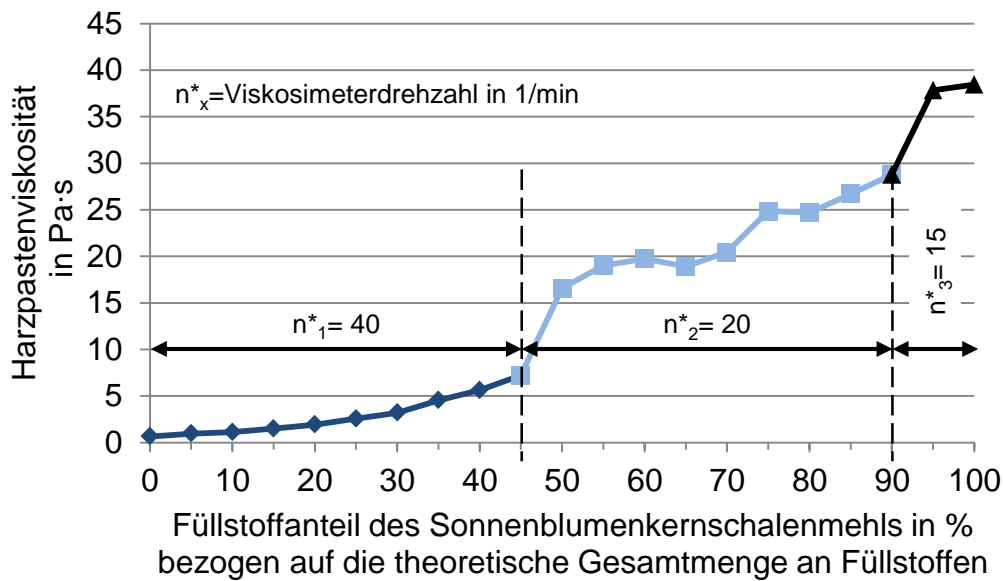


Abbildung 4.10: Einfluss des Füllstoffgehaltes auf die Harzpastenviskosität bei optimierter Rezeptur

4.5 Herstellung und Verarbeitung von SMC-Halbzeugen im Technikumsmaßstab

Nach erfolgreicher Optimierung der Harzpastenrezeptur hinsichtlich der Verarbeitung von bio-basierten und nachwachsenden Füllstoffen im Labormaßstab wird die Herstellung und Verarbeitung von SMC-Harzpasten und -Halbzeugen im Technikumsmaßstab untersucht. In Kapitel 4.2 wurden zuvor die Anforderungen hinsichtlich der Verarbeitbarkeit der SMC-Halbzeuge mit bio-basierten und nachwachsenden Füllstoffen definiert. Die Halbzeuge sollen mit konventioneller SMC-Anlagentechnik unter konventionellen Verarbeitungsparametern hergestellt und verarbeitet werden können. Aufgrund der Erkenntnisse aus Kapitel 3 wird zur Herstellung von SMC-Halbzeugen ein Dissolver mit Zahnscheibe gewählt. Weiterhin wird der Schritt der Hand-SMC-Herstellung ausgespart, da dieser zu großen Abweichungen innerhalb der Halbzeuge und zu geringer Halbzeug- und Bauteilqualität geführt hat.

Harzpastenherstellung

Zur Herstellung der Harzpaste wurden ein Kreis Dissolver V KDV 48-5,4 FU der Firma WILHELM NIEMANN GmbH & Co und ein temperierter doppelwandiger Mischbehälter mit einem Volumen von 15 Litern gewählt. Zur Dispergierung der einzelnen

Komponenten der Harzpastenrezeptur wurde eine Zahnscheibe mit 19 Zähnen und einem Durchmesser von 175 mm gewählt. Die flüssigen Komponenten der Rezeptur wurden bei einer Drehzahl von 400 1/min für 1,5 Minuten miteinander vermischt. Die pulverförmigen Komponenten der Rezeptur wurden bei Drehzahlen zwischen 200 und 300 1/min für je 2 Minuten beigemischt. Mit steigendem Füllstoffgehalt wurde die Drehzahl der Zahnscheibe schrittweise erhöht. Nachdem alle Komponenten der Harzpastenrezeptur, außer Magnesiumoxid, miteinander vermengt waren, wurde die Paste bei 1000 Umdrehungen pro Minute für fünf Minuten dispergiert. Während der Dispergier-Phase steigt die Harzpastentemperatur auf bis zu 34 °C, bedingt durch die eingebrachte Scherenergie der Dissolverscheibe, an. Dies ist eine Grenztemperatur, welche nicht überschritten werden darf, da dies sonst zu einer erhöhten Styrolemmission und ersten Reaktionsvorgängen in der Harzpaste führen kann. Unmittelbar vor der Verarbeitung wird der Harzpaste das Magnesiumoxid bei Drehzahlen um 400 1/min für ca. 1,5 Minuten beigemischt und der Batch in zwei gleichgroße Mengen geteilt. Diese Harzpastenansätze werden in die beiden Rakelkästen der SMC-Anlage eingefüllt.

Herstellung des SMC-Halbzeugs auf der SMC-Anlage

Bevor die Herstellung der SMC-Halbzeuge begonnen werden kann, müssen die Anlagenparameter festgelegt werden. Diese sind in Tabelle 4.7 gezeigt und stimmen mit den Parametern zur Herstellung von konventionellen SMC-Halbzeugen überein. Die Produktionsbreite wurde für die ersten Versuchsreihen auf 300 mm reduziert; diese wird bei nachfolgenden Versuchsreihen auf 500 mm erweitert.

Tabelle 4.7: Auszug aus den Produktionsparametern bei der Herstellung der SMC-Halbzeuge mit bio-basierten und nachwachsenden Rohstoffen

Parameter	Wert	Einheit
Produktionsbreite	300	mm
Flächengewicht	2500	g/m ²
Produktionsgeschwindigkeit	1,8	m/min
Verstärkungsfaser P204	2400	tex
Verstärkungsfasergehalt	30	Gew.-%
Schneidwerk Drehzahl	25	1/min

Die Wahl der Produktionsbreite von 300 mm bedingt eine Zuführung von 13 Verstärkungsfaser-Rovings. Hierdurch wird eine homogene und gleichmäßige Verteilung der

Schnittfasern über der gesamten Produktionsbreite gewährleistet. Mit einer Schneidwerk-drehzahl von 25 Umdrehungen pro Minute wird ein Fasermassengehalt von 30 Gew.-% im Halbzeug erreicht.

Die einzelnen Schritte zur Herstellung der Harzpaste von bio- basierten und nachwachsenden Rohstoffen sind in Abbildung 4.11 gezeigt. Die zuvor hergestellte Harzpaste wird in die Raketkästen der SMC-Anlage (1) eingefüllt und ein homogener Harzfilm (2) auf die styroldichte Trägerfolie aufgezogen. Eventuell vorhandene Füllstoff-Agglomerate in der Harzpaste können sich beim Aufbringen des Harzfilms unter dem Rakelmesser verkeilen und dazu führen, dass sich Fehlstellen im Halbzeug bilden oder zu einem Folienriss führen. In diesem Fall müsste die Produktion gestoppt, die Anlage gereinigt und die bereits eindickende Harzpaste entsorgt werden. Diesem Phänomen kann durch ausreichende Dispergierung der Füllstoffe vorgebeugt werden. Auf den Harzfilm werden anschließend homogen und regellos die Verstärkungsfasern mit einer Länge von 25,4 mm aufgestreut (3). Die Fasern werden durch einen zweiten Harzfilm bedeckt. Anschließend durchläuft dieser dreilagige Aufbau (Harzfilm – Verstärkungsfasern – Harzfilm) die Imprägnierstrecke. Hierbei werden die Fasern durch die Harzpaste imprägniert. Dies äußert sich durch ein homogenes Halbzeug (4, mittig). Beim Ablösen der Trägerfolie vom Halbzeug kann eine Anhaftung der Harzpaste an der Trägerfolie beobachtet werden (4, links). Bei der Herstellung wurde eine Produktionsbreite von 300 mm gewählt. Die Verstärkungsfasern wurden auf einer Breite von 360 mm aufgebracht, um eventuell austretende Harzpaste binden zu können (5). Direkt nach der Herstellung wurde das Halbzeug vom Wickelkern abgewickelt, um eine Qualitätskontrolle durchführen zu können. Hierdurch sind die Verwerfungen im vom Kern abgewickelten Halbzeug zu erklären (6). Wenn das Halbzeug auf dem Kern vollständig reift und erst danach abgewickelt wird, treten diese Verwerfungen nicht auf.

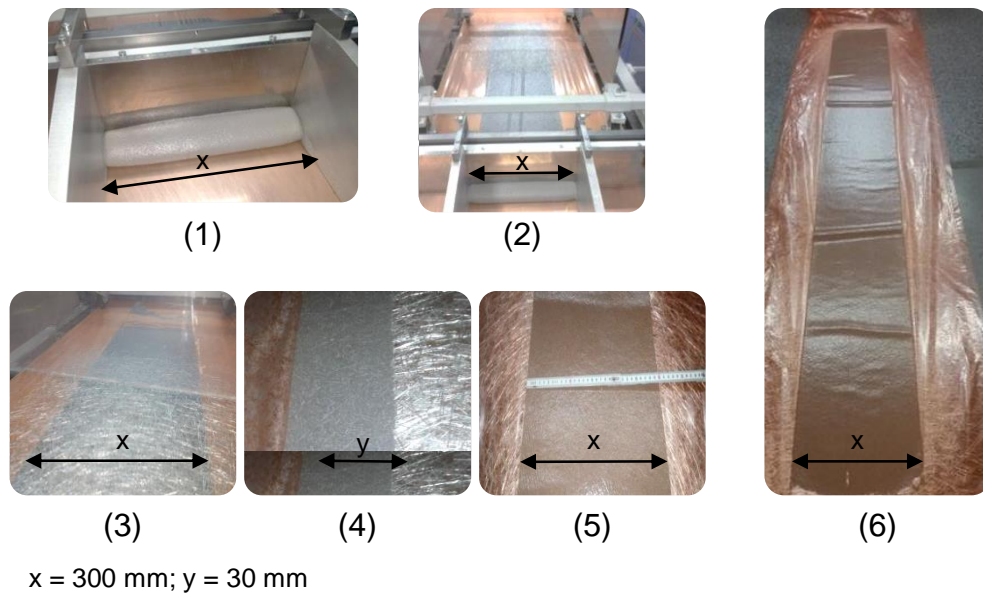


Abbildung 4.11: Produktionsschritte (1 bis 6) bei der Herstellung von SMC-Halbzeugen mit bio-basierten und nachwachsenden Rohstoffen

Nachdem das Halbzeug unter konventionellen Prozessparametern hergestellt werden konnte, schließt sich die vier bis achttägige Reifezeit in gekühlten Räumen bei einer Temperatur von ca. 16 - 20 °C an. Innerhalb dieser Reifezeit steigt die Viskosität des Halbzeuges auf bis zu 20.000 Pa·s an. Das Reifestadium des Halbzeuges wird wie bei einem konventionellen Halbzeug durch einen Abzugsversuch bestimmt. Wenn sich die Trägerfolie rückstandsfrei vom Halbzeug ablösen lässt, kann die Reife des Halbzeuges als beendet angesehen werden.

Verarbeitung von SMC-Halbzeugen zu SMC-Probekörperplatten

Nachdem das Halbzeug 12 Tage gereift ist, erfolgt die anschließende Verarbeitung zu Probekörperplatten. Diese werden in einem ersten Schritt in einer Eigenbaulaborpresse zu Probekörperplatten mit den Abmaßen 340 x 480 x 4 mm³ verpresst, um die prinzipielle Verarbeitbarkeit nachweisen zu können. In einem zweiten Schritt werden die Halbzeuge auf einer Bauteilpresse mit Parallelregelung zu Probekörperplatten mit den Abmaßen 250 x 696 x 4 mm³ verarbeitet. Hierbei werden Prozessparameter, welche mit denen konventioneller SMC-Halbzeuge vergleichbar sind, gewählt. Tabelle 4.8 gibt einen Überblick über die verwendeten Prozessparameter zur Herstellung der Probekörperplatten im Technikumsmaßstab. Der maximale Werkzeug-Innendruck der Eigenbaupresse beträgt 60 bar. Dieser Wert ist bei konventionellen SMC-Halbzeugen als untere Verarbeitungsgrenze angegeben und somit zur Herstellung von Probekörperplatten zulässig. Weiterhin verfügt diese Presse nicht

über eine aktive Parallelhaltung. Eine mittige Materialeinlage im Presswerkzeug ist somit zwingend nötig. Die Bauteilpresse im industriellen Maßstab verfügt über eine aktive Parallelregelung. Der maximale Werkzeuginnendruck wird auf 120 bar limitiert. Ebenso bietet die Presse die Möglichkeit zur weggeregelten Herstellung der Bauteile. Hierdurch wird ein gleichmäßiges Schließen des Presswerkzeuges gewährleistet.

Tabelle 4.8: Verarbeitungsparameter zur Herstellung der Probekörperplatten aus SMC-Halbzeugen mit bio-basierten und nachwachsenden Rohstoffen

Parameter	Eigenbau- Presse	Bauteilpresse, parallelgeregelt	Einheit
Pressenbezeichnung	Eigenbau	Dieffenbacher, PHP 800/650	-
Werkzeugtemperatur	145	145	°C
Werkzeugbelegung	60	60	%
Schließgeschwindigkeit	k. A., kraftgeregelt	1,5	mm/s
Haltezeit pro mm Wandstärke	60	60	s
Verarbeitungsdruck	60	120	bar
Werkzeugoberfläche	Werkzeugstahl, gefräst und mit Korn 220 poliert		-
Probekplattengröße	340 x 480 x 4	250 x 696 x 4	mm ³

Mit den gewählten Verarbeitungsparametern konnten Probekörperplatten auf der Eigenbau-Presse bis zu einem Gehalt von 75 % der bio-basierten und nachwachsenden Füllstoffe hergestellt werden. Bei einem höheren Anteil der bio-basierten und nachwachsenden Füllstoffe werden größere Werkzeuginnendrucke benötigt. Bei der Verarbeitung der Halbzeuge im Labormaßstab führen geringere Werkzeuggrundbelegungen (40 - 55 %) zu einer homogeneren Probekörperplattenoberfläche. Die Füllung des Presswerkzeuges und die anschließende Entformung sind möglich. Zur Herstellung der Probekörperplatten auf der Bauteilpresse wurde, entsprechend der Vorversuche, eine Werkzeuggrundbelegung von 60 % gewählt. Die Verarbeitung im parallelgeregeltten Fließpressprozess in Tauchkantenwerkzeugen ist problemlos möglich. Es treten keine Entmischungen von Fasern und Matrix, trockene Oberflächen oder sonstige Oberflächendefekte in den Probekörperplatten auf. Der Einfluss der bio-basierten und nachwachsenden Rohstoffe und des Werkzeuginnendruckes auf die mechanischen Eigenschaften und die Halbzeugqualität wird in Kapitel 4.6 behandelt. Durch die Erhöhung des Werkzeuginnendruckes auf 120 bar ist die Her-

stellung von Probekörperplatten mit einem 100 %-igen Füllstoffanteil an bio-basierten und nachwachsenden Rohstoffen möglich.

Zusammenfassung

- In diesem Kapitel konnte gezeigt werden, dass eine Anpassung der Rezeptur an die bio-basierten und nachwachsenden Füllstoffe durch viskositätssenkende Additive notwendig ist.
- Die im Vergleich zu konventionellen Füllstoffen größeren Primärpartikel der bio-basierten und nachwachsenden Füllstoffe wirken sich nicht negativ auf das Dispergier- und Verarbeitungsverhalten der Harzpaste aus.
- Es konnte gezeigt werden, dass die Herstellung von SMC-Harzpasten mit bio-basierten und nachwachsenden Füllstoffen unter Verwendung konventioneller Anlagentechnik möglich ist.
- Die Verarbeitung der Harzpasten zu Halbzeugen und Probekörpern ist ebenfalls mit konventionellen Prozessparametern möglich.

Die Verarbeitung von bio-basierten und nachwachsenden Rohstoffen als Füllstoffe in SMC-Halbzeugen ist unter konventionellen Prozessparametern möglich.

4.6 Charakterisierung der Probekörper mit bio-basierten und nachwachsenden Füllstoffen

Nachdem die einzelnen bio-basierten und nachwachsenden Rohstoffe und deren Verarbeitung zu SMC-Harzpasten untersucht und optimiert wurden, wurden aus diesen Harzpasten im Technikums-Maßstab Halbzeuge hergestellt und der Einfluss der presstechnischen Verarbeitung untersucht. Im Folgenden werden die hergestellten Probekörperplatten bezüglich ihrer Imprägnierqualität, den erreichbaren mechanischen Eigenschaften, des realen Fasermassengehaltes und ihrer Tendenzen bezüglich Schimmelbildung untersucht.

4.6.1 Bestimmung der Imprägnierqualität

Die Imprägnierqualität der Halbzeuge mit bio-basierten und nachwachsenden Rohstoffen wird anhand von Schliffbildern untersucht. Hierbei werden die Proben aus den Probekörperplatten mit einer Diamant-Säge entnommen und anschließend in einem

kalthärtenden Epoxid-Harz eingegossen. Nachdem die Proben geschliffen sind, werden sie mit einem Auflichtmikroskop untersucht und Bilder mit 25-facher bis 250-facher Vergrößerung aufgenommen. Abbildung 4.12 zeigt ein Schlibfbild einer SMC-Probe mit 100 % bio-basierten und nachwachsenden Füllstoffen in 250-facher Vergrößerung. Die Harzpaste wurde im Labormaßstab mit dem IKA-Rührwerk hergestellt. Es zeichnen sich Bereiche ab, in denen vermehrt Füllstoff-Agglomerate und Verstärkungsfasern auftreten. Eine homogene Verteilung der Fasern über den Querschnitt der Proben ist nicht erkennbar.

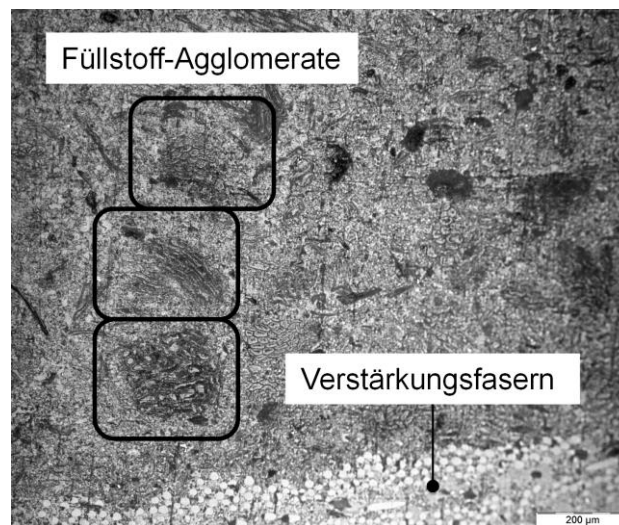


Abbildung 4.12: Schlibfbild eines SMC-Probekörpers mit bio-basierten Füllstoffen, Herstellung im Labormaßstab

Durch die Verwendung des Dissolvers, einer Zahnscheibe und einer Dispergierdauer von mehreren Minuten ist eine gleichmäßige Verteilung der Füllstoffe ohne Agglomerate in der Harzpaste möglich. Bedingt durch den Prozess der Halbzeugherstellung und der Verarbeitung, kommt es sowohl bei konventionellen SMC-Halbzeugen als auch bei Halbzeugen mit bio-basierten und nachwachsenden Rohstoffen zu Inhomogenitäten innerhalb der Probekörper. Abbildung 4.13 zeigt zwei Schlibfbilder von Proben, welche aus einer 4 mm dicken Probekörperplatte entnommen wurden. Die Platten wurden bei einem Werkzeuginnendruck von 120 bar bei 145 °C und einer Haltezeit von 300 s und einer Werkzeuggrundbelegung von 50 % hergestellt. Die Proben wurden jeweils 20 mm vom Plattenrand entfernt mit einer Diamantsäge entnommen. Links ist ein Schlibf eines konventionellen SMC-Halbzeuges (IVW-1) gezeigt. Hier sind deutlich Zonen mit hohem Harzpastenanteil bzw. hohem Verstärkungsfaseranteil zu erkennen. Die eingebetteten Verstärkungfasern sind vollständig von der um-

gebenden Harzpaste imprägniert. Dies ist durch die scharfe Kontur der Fasern im Halbzeug belegbar. Wenn die Fasern mangelhaft imprägniert und an die Harzpaste angebunden wären, würde dies zu Ausbrüchen während des Schleifvorganges führen. Diese Ausbrüche zeichnen sich auf den Schliiffbildern als schwarze Ränder ab. Auf der rechten Seite ist der Schliff einer Probe mit 100 % bio-basierten und nachwachsenden Rohstoffen dargestellt. Auch hier sind harzreiche Zonen und faserreiche Zonen erkennbar. Die Verstärkungsfasern sind vollständig in der Harzpaste eingebunden. Es sind keine Faserausbrüche erkennbar. Die bio-basierten Füllstoffe beeinflussen die Imprägnierung der Verstärkungsfasern nicht. Eine Verarbeitung des Halbzeuges im parallelgeregelten Fließpressprozess inklusive des Fasertransports ist gewährleistet.

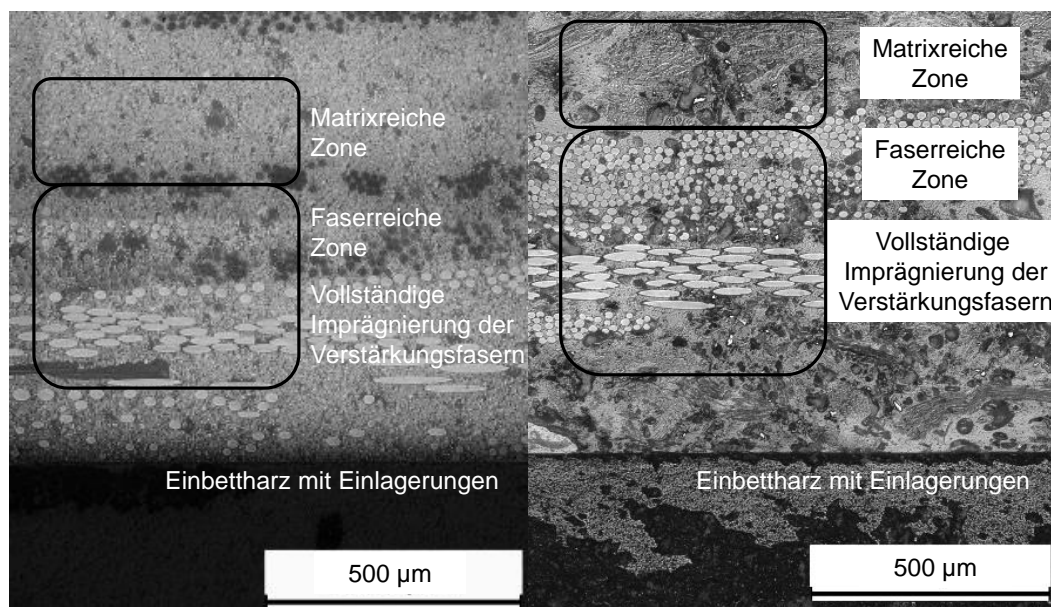


Abbildung 4.13: Vergleich der Imprägnierqualität eines konventionellen SMC-Halbzeuges (links) und eines SMC-Halbzeuges mit bio-basierten und nachwachsenden Füllstoffen (rechts)

4.6.2 Bestimmung mechanischer Kennwerte

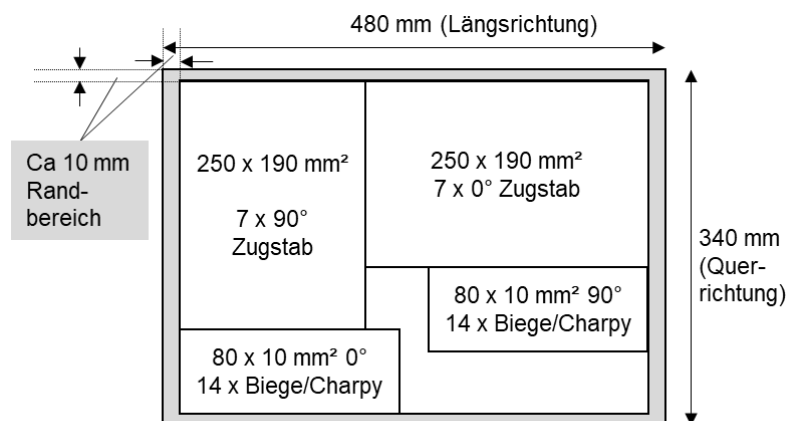
Zur Beurteilung des Einflusses der bio-basierten und nachwachsenden Füllstoffe auf die mechanischen Eigenschaften der Halbzeuge wurden Probekörperplatten mit verschiedenen Anteilen der Füllstoffe hergestellt. Hierzu wurden in den Harzpasten die Anteile der konventionellen Füllstoffe in 25 %-Schritten durch die bio-basierten und nachwachsenden Füllstoffe ersetzt und der Einfluss dieser Änderung untersucht. Der Einfluss dieser Änderung auf die mechanischen Kennwerte wurde anhand der folgenden Untersuchungen durchgeführt:

- a) Zugversuch in Anlehnung an DIN EN ISO 527-4:1997-07 [134]
- b) Dreipunkt-Biege-Versuch in Anlehnung an DIN EN ISO 14125:2011-05 [135]

Bei den gezeigten Ergebnissen wurde das Sonnenblumenkernschalenmehl als bio-basierter Füllstoff (bio-FS) genutzt.

a) Zugversuch in Anlehnung an DIN EN ISO 527-4:1997-07

Zur Bestimmung des Elastizitätsmoduls und der Zugfestigkeit wurden, gemäß DIN EN 14598-2 - Tabelle 3, Zugversuche durchgeführt. Hierbei wurden Probekörper vom Typ 2 (Rechteckprobe ohne Aufleimer) mit den Abmaßen $250 \times 25 \times 4 \text{ mm}^3$ genutzt. Als Prüfgeschwindigkeit wurden 2 mm/min gewählt; die Vorkraft betrug 5 N . Die Versuche wurden auf der Universalprüfmaschine Typ 1474 des Herstellers Zwick Roell GmbH & Co.KG mit einer 250 kN Kraftmessdose, unter Verwendung einer hydraulischen Spanneinrichtung, durchgeführt. Pro Versuchsreihe wurden jeweils sieben Probekörper aus der Längs- und Querrichtung der Probekörperplatte entnommen, siehe Abbildung 4.14.



$0^\circ/90^\circ$ bezogen auf die Plattenlängsrichtung/Produktionsrichtung

Abbildung 4.14: Entnahmeposition der Probekörper im Technikumsmaßstab

Abbildung 4.15 zeigt die Ergebnisse aus den Probeplatten, welche auf der Eigenbaupresse im Labormaßstab mit einem maximalen Werkzeuginnendruck von 60 bar verarbeitet wurden. Es ist ersichtlich, dass die mechanischen Kennwerte Elastizitätsmodul und Zugfestigkeit der Proben mit bio-basierten und nachwachsenden Füllstoffen im Bereich der Referenzwerte liegen. Es ist keine Tendenz erkennbar, die zeigen würde, dass ein höherer Füllstoffanteil zu schlechteren mechanischen Eigenschaften führt. Die großen Schwankungen der Kennwerte bei den Proben mit 25 und

50 % bio-basierten und nachwachsenden Füllstoffen können durch den sehr geringen Verarbeitungsdruck im Werkzeug erklärt werden.

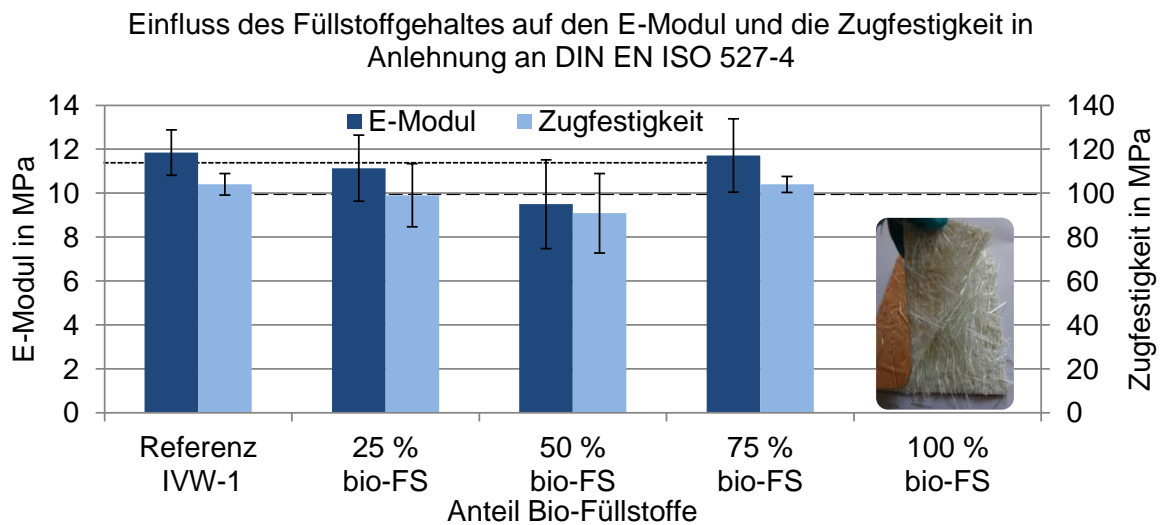


Abbildung 4.15: Ergebnisse der Zugversuche in Anlehnung an DIN EN ISO 527-4, Probekörperherstellung im Technikums-Maßstab

Die Ergebnisse der erreichten mechanischen Eigenschaften der Probekörperplatten, welche unter industriennahen Prozessbedingungen hergestellt wurden, sind in Abbildung 4.16 dargestellt. Hierbei ist ersichtlich, dass die Verarbeitung der Proben mit 100 % bio-basierten und nachwachsenden Füllstoffen möglich ist. Die erreichten mechanischen Kennwerte für den Elastizitätsmodul und die Zugfestigkeit liegen im Bereich der industriellen Referenzwerte. Bedingt durch längere Fließwege im Werkzeug und einen höheren Verarbeitungsdruck von 120 bar konnte die Streuung der Kennwerte im Vergleich zu den Probekörperplatten, welche mit 60 bar Werkzeuginnen- druck hergestellt wurden, deutlich reduziert werden.

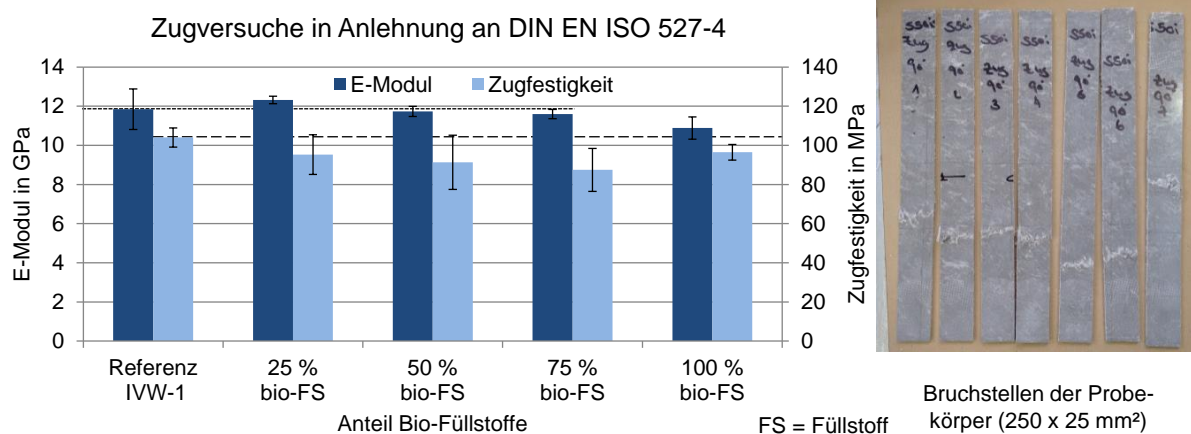


Abbildung 4.16: Ergebnisse der Zugversuche in Anlehnung an DIN EN ISO 527-4, Probekörperherstellung im parallelgeregelten Fließpressprozess

b) Dreipunkt-Biege-Versuch in Anlehnung an DIN EN ISO 14125:2011-05

Zur Bestimmung des Biegemoduls und der Biegefestigkeit wurden, gemäß DIN EN 14598-2 - Tabelle 3, Biegeversuche in Anlehnung an DIN EN ISO 14125 durchgeführt. Es wurden Probekörper der Klasse 2 mit den Abmaßen 80 x 15 x 4 mm³ genutzt. Als Prüfungsgeschwindigkeit wurden 2 mm/min gewählt; die Vorkraft betrug 2 N. Die Versuche wurden auf der Universalprüfmaschine Typ 1445 Retroline des Herstellers Zwick Roell GmbH & Co.KG mit einer 10 kN Kraftmessdose und Einbeziehung des korrigierten Traversenweges durchgeführt. Der Auflagerdurchmesser betrug 5 mm, die Stützweite 64 mm. Pro Versuchsreihe wurden jeweils sieben Probekörper, welche aus der Längsrichtung der Probekörperplatte entnommen wurden, geprüft. Die Entnahmerichtung entspricht somit der Richtung des größten Fließweges.

Abbildung 4.17 zeigt die Ergebnisse aus den Probeplatten, welche auf der Eigenbaupresse im Labormaßstab mit einem maximalen Werkzeuginnendruck von 60 bar verarbeitet wurden. Es ist ersichtlich, dass die mechanischen Kennwerte Biegemodul und Biegefestigkeit der Proben mit bio-basierten und nachwachsenden Füllstoffen im Bereich der Referenzwerte liegen. Tendenziell ist erkennbar, dass ein höherer Anteil von bio-basierten und nachwachsenden Rohstoffen zu einer Senkung des Biegemoduls führt. Für die Biegefestigkeit ist keine Signifikanz erkennbar. Ab einem Anteil von 50 % an bio-basierten und nachwachsenden Rohstoffen sind große Schwankungen in den einzelnen Kennwerten erkennbar. Dies ist durch Inhomogenitäten der Probekörperplatten, bedingt durch die Herstellung der Harzpaste mit einem Labor-Rührwerk, zu erklären. Bei der Herstellung der Harzpaste mit bio-basierten und nachwachsenden Rohstoffen muss zwingend ein Dissolver mit Zahnscheibe genutzt werden, da nur so die im Füllstoff vorhandenen Agglomerate aufgebrochen werden können.

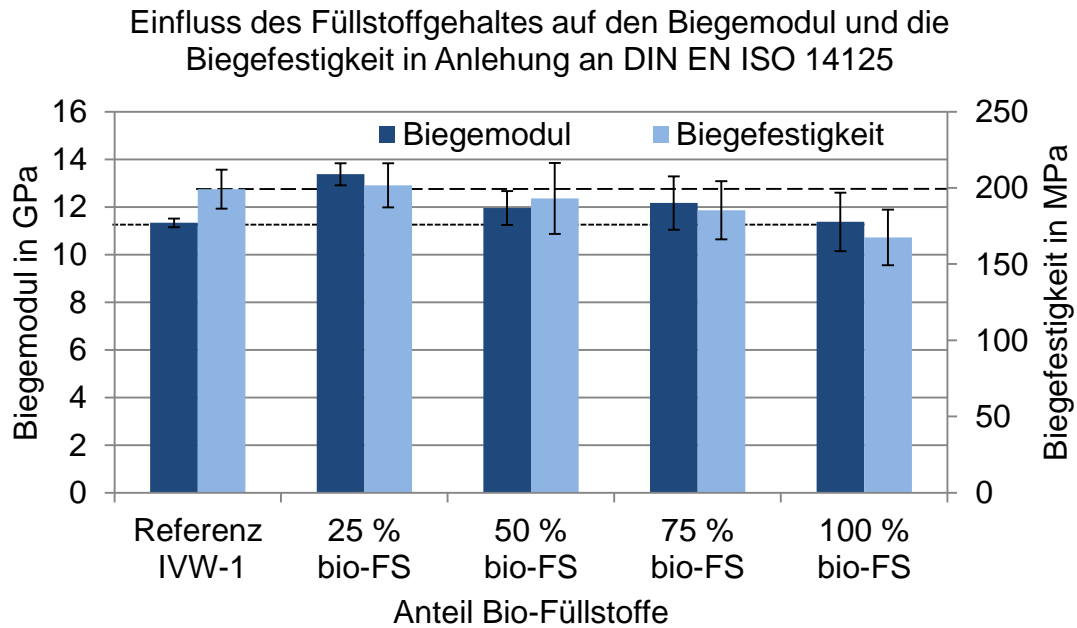


Abbildung 4.17: Ergebnisse der Biegeversuche in Anlehnung an DIN EN ISO 14125, Probekörperherstellung im Technikums-Maßstab

Die erreichten mechanischen Eigenschaften der Probekörperplatten, welche unter industrienahen Prozessbedingungen hergestellt wurden, sind in Abbildung 4.18 dargestellt. Hierbei ist ersichtlich, dass die parallelgeregelte Verarbeitung bei Werkzeuginnendrücken von 120 bar zu sehr gleichmäßigen mechanischen Eigenschaften, unabhängig vom Füllstoffgehalt der bio-basierten und nachwachsenden Rohstoffe, führt. Die Tendenz, welche bei der Verarbeitung im Labormaßstab beobachtet werden konnte, dass ein Anstieg der bio-basierten und nachwachsenden Füllstoffe zu einem Abfall der mechanischen Kennwerte führt, ist bei der industrienahen Verarbeitung nicht vorhanden. Die erreichten mechanischen Kennwerte für den Biegemodul und die Biegefestigkeit liegen auf dem Niveau der industriellen Referenzwerte. In Anhang 7.10 sind die Bruchflächen der geprüften Proben von ausgewählten bio-basierten und nachwachsenden Rohstoffen gezeigt. Hierbei ist deutlich der Einfluss der Füllstoffe auf die Faser-Matrix-Haftung erkennbar. Bei der Verwendung von Sonnenblumenkernschalenmehl ist gegenüber der Verwendung von Rapsschrot eine deutlich bessere Faser-Matrix-Haftung ersichtlich. Die gezeigten Diagramme der mechanischen Prüfung zeigen die Ergebnisse, welche bei der Verwendung von Sonnenblumenkernschalenmehl erreicht wurden.

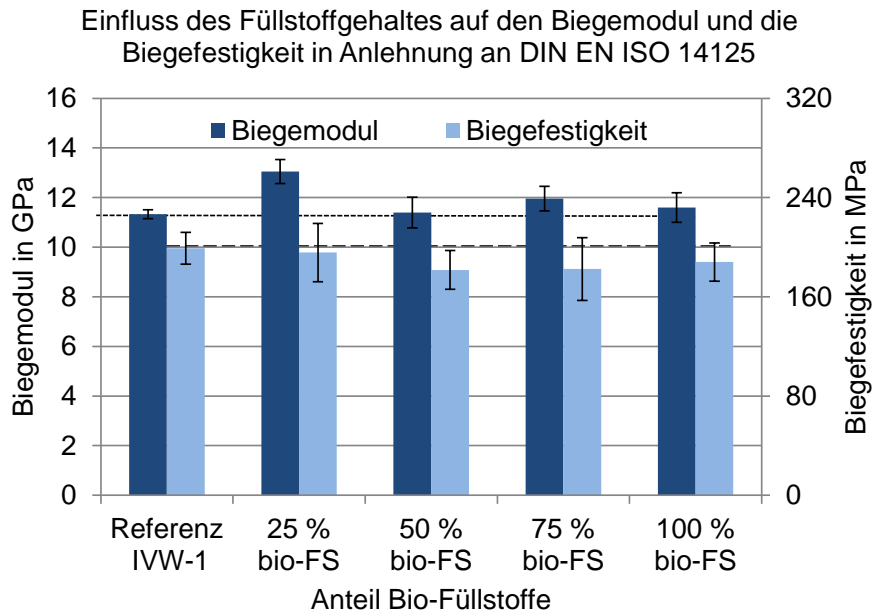


Abbildung 4.18: Ergebnisse der Biegeversuche in Anlehnung an DIN EN ISO 14125, Probplattenherstellung im parallelgeregelten Fließpressprozess

4.6.3 Bestimmung des realen Fasermassengehaltes durch Veraschen

Die Bestimmung des realen Fasermassengehaltes wurde, wie zuvor in Kapitel 3.5.4 beschrieben, durchgeführt. Bei der Kalzinierung der Proben mit bio-basierten und nachwachsenden Füllstoffen ist ein vollständiger thermischer Abbau der Füllstoffe möglich. Hierdurch wird keine zusätzliche Salzsäure zum Lösen von Veraschungsrückständen in den Glasfasern, wie es bei den konventionellen Füllstoffen üblich ist, benötigt. Tabelle 4.9 zeigt die Ergebnisse der Fasermassengehaltsbestimmung der SMC-Halbzeuge mit bio-basierten und nachwachsenden Füllstoffen.

Tabelle 4.9: Ergebnisse der FMG-Bestimmung der hergestellten SMC-Proben

Probenbezeichnung	Soll-FMG [%]	Ist-FMG [%]	Absolute Abweichung [%]	Anforderungen erfüllt [ja/nein]
IVW-1	30	29,44	- 0,56	ja
25 % bio-FS	30	29,07	- 0,93	ja
50 % bio-FS	30	33,35	+ 3,35	nein
75 % bio-FS	30	34,53	+ 3,53	nein
100 % bio-FS	30	32,14	+ 2,14	ja

Es ist deutlich, dass der Fasermassengehalt der Proben mit unterschiedlichen bio-basierten und nachwachsenden Füllstoffgehalten bis auf zwei Ausnahmen in dem geforderten Zielbereich von 30 ± 3 Gew.-% Faseranteil liegt. Diese Abweichungen sind jedoch nicht von den Füllstoffen, sondern von den Parametern bei der Herstellung der SMC-Halbzeuge abhängig. Die Proben, die die geforderte Toleranz nicht erfüllen, liegen nur sehr geringfügig außerhalb des Zielkorridors. Die Auswahl der Füllstoffe hat keinen Einfluss auf den Fasergehalt.

4.6.4 Bestimmung der Tendenzen zur Schimmelbildung

Eine der unvermeidlichen Fragestellungen, welche bei der Entwicklung und Herstellung eines Halbzeuges mit bio-basierten und nachwachsenden Rohstoffen auftritt, ist die Beständigkeit gegenüber biotischen Faktoren wie Bakterien und Pilzen (z. B. Schimmelbildung). Diese Fragestellung gilt es zu klären, da die bio-basierten Bestandteile des Halbzeugs eine der Haupt-Kohlenstoffquellen darstellen, welche Pilze für ihr Wachstum benötigen. In Kooperation mit dem Institut für Biotechnologie und Wirkstoff-Forschung gGmbH (IBWF, Kaiserslautern) wurden die Tendenzen zur Schimmelbildung in mehreren Versuchsreihen untersucht. Hierzu wurden sowohl mit den jeweiligen Füllstoffen im Ursprungszustand als auch mit SMC-Probekörpern mit unterschiedlicher Füllstoff-Konzentration Untersuchungen durchgeführt. Die Probekörper besitzen die Abmaße $15 \times 15 \times 4 \text{ mm}^3$ und wurden mit einer Diamantsäge ohne Zugabe von Kühlflüssigkeit aus den Probekörperplatten herausgearbeitet. Der Zustand der Oberflächen und der Schnittkanten der Proben wurde zu Beginn der Untersuchungen mit einem Auflichtmikroskop dokumentiert. Hierbei konnte gezeigt werden, dass die bio-basierten und nachwachsenden Füllstoffe im Halbzeug eingebunden sind und nicht als einzelne Partikel an der Bauteiloberfläche bzw. Schnittkante vorliegen, siehe Abbildung 4.20, 1).

Zur Untersuchung des Einflusses der bio-basierten und nachwachsenden Rohstoffe auf die Schimmelbildung wurden die folgenden drei Methoden gewählt:

- 1) Auslagerung der Probekörper mit unterschiedlichen Füllstoffkonzentrationen in Petrischalen, welche mit einer Nährlösung (Agar) befüllt und mit ausgewählten Pilz-Kulturen inkubiert wurden.**

- 2) Inkubation der Proben in Erlenmeyerkolben mit Sporen, die aus verschiedenen biologischen Proben (z. B. Standardhumus oder Luftfilterproben) gewonnen wurden.
- 3) Auslagerung der Probenkörper mit unterschiedlichen Füllstoffkonzentrationen in Anlehnung an die in der Automobilbranche gebräuchliche Norm GMW3259

1) Auslagerung in Petrischalen

Die Beständigkeit der Proben gegenüber einem direkten Kontakt mit Pilzen wurde durch Auslagerung in Petrischalen untersucht. Die Petrischalen waren mit Agar und verschiedenen ausgewählten Pilzen präpariert, siehe Anhang 7.11. Diese wurden nach biologischen Gesichtspunkten ausgewählt. Hierbei wurden a) solche Pilze ausgewählt, die dafür bekannt sind, eine hohe Anzahl lignolytischer oder zellolytischer Enzyme zu sekretieren (vor allem Basido- oder Ascomyceten) oder die b) häufig in der Umwelt anzutreffen sind (z. B. in der Luft: *Trichoderma* spp., *Penicillium* spp., *Fusarium* spp. und *Alternaria* spp.). Das Agarmedium in den verwendeten Platten dient den Pilzen als Stickstoffquelle und für die Grundversorgung mit Kohlenstoffen und Spurenelementen, welche sie für ihr Wachstum benötigen. Durch das Einbringen der Proben mit bio-basierten und nachwachsenden Füllstoffen kann geprüft werden, ob die Mikroorganismen zusätzlich auf die Füllstoffe als Kohlenstoffquelle zurückgreifen und diese entsprechend destruieren. Zur Vergrößerung der Kontaktfläche und zur Simulation einer geschädigten Probenoberfläche wurden in einige Proben Bohrungen mit einem Durchmesser von 2,5 mm eingebracht. Die dabei entstandenen Bohrspäne und der Bohrstaub wurden ebenfalls in Petrischalen mit Agar eingelagert und entsprechend mit Pilzen inokuliert, siehe Abbildung 4.19.

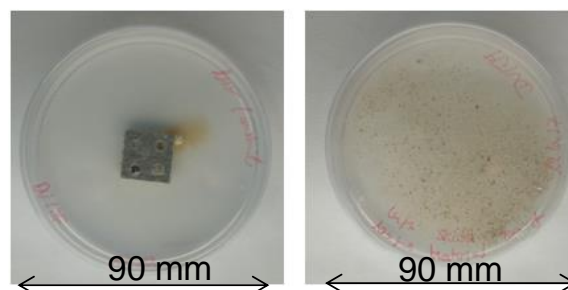


Abbildung 4.19: links: Probekörper mit eingebrachten Bohrungen, rechts: Bohrstaub mit bio-basierten Füllstoffen in Petrischale

Durch die Verwendung von Proben mit unterschiedlicher Konzentration an bio-basierten und nachwachsenden Rohstoffen sollte der Einfluss auf das Pilzwachstum nachgewiesen werden. In Abbildung 4.20 ist die Schnittkante mit offenliegenden Verstärkungsfasern und Füllstoffen einer SMC-Probe mit 75 % bio-basierten Füllstoffen gezeigt. Zu Beginn der Inkubation sind die Fasern und Füllstoffe deutlich zu erkennen (1). Nach einer Inkubationszeit von 15 Tagen haben sich bei der mit Umgebungsluft inkubierten Probe deutlich sichtbare Mikroorganismen (2) in Form eines Schleimfilms gebildet, die die Oberfläche der Proben komplett umhüllen. Nachdem die Proben mit sterilisiertem Wasser gewaschen wurden, sind keinerlei Schädigungen und Anhaftungen an den Verstärkungsfasern und Füllstoffen mehr erkennbar.

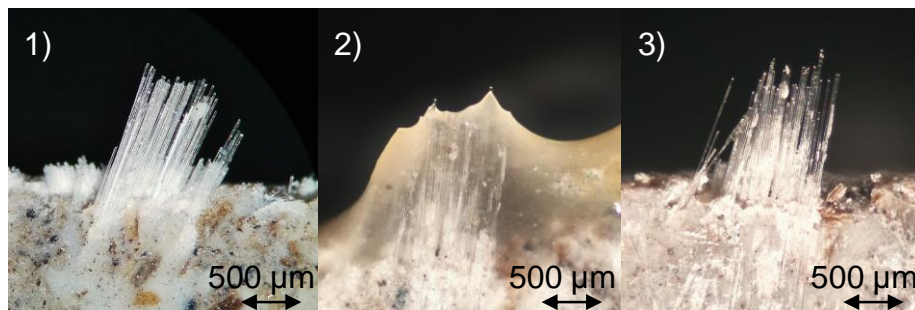


Abbildung 4.20: Stadien des Bewuchses der SMC-Proben mit bio-basierten Füllstoffen: 1) Versuchsbeginn, 2) nach 15 Tagen, 3) Versuchsende (42 Tage)

2) Inkubation in Erlenmeyerkolben

Bei dieser Methode wurden die Probekörper in Erlenmeyerkolben, welche mit unterschiedlichen Inkubationsmedien gefüllt waren, gelagert. Als Inkubationsmedien wurden a) reine *Trichoderma*-Sporen, b) Sporen aus der Umgebungsluft und c) eine Lösung aus einem standardisierten Humusboden gewählt. Die Medien wurden folgendermaßen hergestellt:

a) Reine *Trichoderma*-Sporen

In 100 ml reinen Nährmediums (Minimalmedium MM-G) wurden 10.000 Sporen (100 Sporen/ml) von *Trichoderma* sp. (IBWF 09-17) gegeben. Die Sporen wurden von einer gut verwachsenen Oberflächenkultur auf Agar durch Filtration gewonnen.

b) Umgebungsluft-Probe

Bei der Umgebungsluft-Probe wurden Mikroorganismen aus 1000 l Umgebungsluft auf einem Gelatine-Einmalfilter gesammelt. Anschließend wurde der Filter in 10 ml

MM-G Medium gelöst. Zwei Milliliter der gelösten Luftprobe wurden anschließend in einem Erlenmeyerkolben zu 100 ml MM-G Medium gegeben.

c) Standardisierter Humusboden

Zur Inkubation mit einem standardisierten Humusboden wurden 10 g Humus (Fertigkompost mittelkörnig, Nr. 4095, Anlage Hoppstädten-Weiersbach) in 100 ml MM-G Medium gegeben.

Nachdem die Inkubationsmedien hergestellt waren, wurden die Proben darin platziert und die Erlenmeyerkolben 42 Tage lang auf einem Orbitalschüttler (40 U/min, 27 °C) inkubiert, siehe Abbildung 4.21.

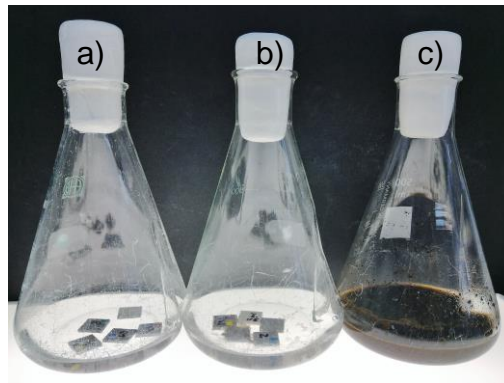


Abbildung 4.21: SMC-Probekörper in Erlenmeyerkolben inkubiert mit a) *Trichoderma* sp. b) Umgebungsluft c) Humus

Bei der Inkubation auf der Petrischale und dem Erlenmeyerkolben wurden die einzelnen Probekörper bei 27 °C in einem Laborinkubator inkubiert. Innerhalb einer Wachstumsdauer von vier bis sechs Wochen wurden die Proben oberflächenanalytisch (REM- und Auflichtmikroskop-Aufnahmen) und auf Wachstum von Mikroorganismen hin untersucht. Es konnte keinerlei Schimmelbildung bzw. Schädigung der Proben, welche in unterschiedlichen Nährmedien im Erlenmeyerkolben ausgelagert wurden, nachgewiesen werden.

3) Auslagerung gemäß GMW3259

In dieser Versuchsreihe wurden die Proben in Anlehnung an die im Automobilbau für naturfaserverstärkte Kunststoffe verwendeten Prüfanweisung „GMW3259-Mildew Resistance“ untersucht [138]. Hierbei werden die Probekörper auf einem Abstandhalter in einer Petrischale mit einem Durchmesser von 90 mm gelagert, siehe Abbildung 4.22. Auf den Boden des Behälters werden 5 ml destilliertes Leitungswasser gegeben. Durch die Halterung wird ein direkter Wasserkontakt vermieden. Anschlie-

ßend wird die Probe luftdicht verschlossen und für 40 Tage bei 37 °C inkubiert. Es erfolgt eine wöchentliche Überwachung der Schimmelbildung, weiterhin erfolgt zum Ende der Inkubationszeit ein Geruchstest.

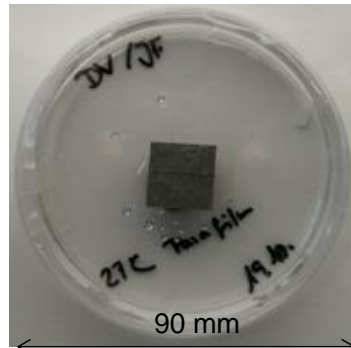


Abbildung 4.22: Probe nach GMW3259 in Petrischale mit 5 ml destilliertem Leitungswasser

Nach der Inkubationszeit von 40 Tagen konnte keinerlei Schimmelbildung nachgewiesen werden. Ebenso konnte keine Änderung im Eigengeruch der Probe, welche auf eine eventuelle Schimmelbildung hinweisen würde, wahrgenommen werden.

Zusammenfassung: Bei allen Proben, unabhängig von der Konzentration der bio-basierten und nachwachsenden Füllstoffe und der Umgebungsbedingungen, konnte keinerlei Abbau der Proben durch Mikroorganismen festgestellt werden. Die Organismen wachsen so lange, wie sie ihre Nährstoffe aus den Agar-Platten beziehen können. Sobald diese aufgebraucht sind, sterben die Mikroorganismen ab oder stellen ihr Wachstum ein. Die in den SMC-Probekörpern befindlichen bio-basierten und nachwachsenden Füllstoffe können von den Mikroorganismen nicht als Kohlenstoffquelle erschlossen werden. In Anhang 7.12 sind REM-Aufnahmen der Oberflächen und der Schnittkanten von inkubierten SMC-Proben mit 100 % bio-basierten und nachwachsenden Rohstoffen gezeigt. Dort ist das Pilzmyzel deutlich erkennbar. Allerdings ist keine Schädigung der SMC-Proben nachweisbar.

Bei der Durchführung der Untersuchung zu Geruchs- und Schimmelbildung nach GMW3259 konnte keinerlei Schimmelbildung und Änderungen im Eigengeruch der Proben, welcher auf eine Schimmelbildung deuten würde, festgestellt werden.

Die Untersuchungen bezüglich der Abbaubarkeit der bio-basierten und nachwachsenden Füllstoffe haben gezeigt, dass diese vollkommen in der Harzpaste eingebunden sind und gemäß der aktuellen Untersuchungen keine Schädigungen der Probekörper bzw. Bauteile durch Pilzbefall zu befürchten ist.

5 Empfehlungen zum Einsatz bio-basierter Füllstoffe in SMC-Halbzeugen

In dieser Arbeit konnte ein SMC-Halbzeug mit bio-basierten und nachwachsenden Füllstoffen entwickelt werden. Dieses Halbzeug zeigt, dass der Einsatz von bio-basierten Derivaten für aktuelle konventionelle FKV-Komponenten durchaus möglich ist. Durch die Wahl der bio-basierten und nachwachsenden Rohstoffe können sowohl endliche fossile Rohstoffe eingespart als auch ein sinnvolles Upcycling für Beiprodukte aus der Nahrungsmittel- und Holzindustrie realisiert werden. Durch die Wahl von bio-basierten Materialien, welche meist eine Dichte um 1 g/cm^3 besitzen, ist zusätzlich eine Gewichtseinsparung möglich. Die in dieser Arbeit gewählten Füllstoffe wurden aufgrund lokaler Verfügbarkeit ausgewählt. In verschiedenen Teilen der Welt können jeweils lokal-verfügbare bio-basierte Füllstoffe zum Einsatz in SMC-Halbzeugen kommen. Bei der Auswahl müssen die folgenden Punkte untersucht werden:

- Die Neigung zur Feuchtigkeitsaufnahme bestimmt maßgeblich die Verarbeitbarkeit in einer Harzpaste. Wenn die Füllstoffe eine zu große Menge Harz aus der vorhandenen Grund-Harzmenge aufnehmen, steigt die Viskosität der Harzpaste stark an und eine Verarbeitung der Füllstoffe bzw. Imprägnierung der Verstärkungsfasern ist nicht mehr möglich.
- Die Viskosität der Harzpaste wird durch die Partikelgröße der Füllstoffe maßgeblich beeinflusst. Eine Mischung verschieden großer Partikelgrößenfraktionen ($1 - 500 \mu\text{m}$) führt zu einer Reduktion der Harzpastenviskosität.
- Die Füllstoffe müssen in der Harzpaste eingebunden sein, da sie sonst bei Kontakt zur Umgebungsluft Feuchtigkeit absorbieren und dies die Grundlage zur Schimmelbildung darstellt.

Die in dieser Arbeit entwickelten SMC-Halbzeuge zeigen ein Verarbeitungs- und Fließverhalten, welches mit dem von konventionell verfügbaren Halbzeugen vergleichbar ist. Bei der Verarbeitung von bio-basierten Füllstoffen sind jedoch Verarbeitungsdrücke von mehr als 100 bar innerhalb der Werkzeugkavität notwendig, um eine vollständige Werkzeugfüllung zu erreichen. Abbildung 5.1 zeigt einen Demonstrator, der aus einem SMC-Halbzeug mit 100 % bio-basierten und nachwachsenden

Füllstoffen gefertigt wurde. Die bio-basierten und nachwachsenden Füllstoffe beeinflussen das Fließ- und Formfüllverhalten nicht; eine vollständige Füllung des Demonstrators inklusive sich verjüngenden Rippen und Domen ist möglich. Durch das nachgewiesene Fließ- und Formfüllverhalten der Halbzeuge mit bio-basierten und nachwachsenden Füllstoffen können die allgemein gültigen Designrichtlinien der SMC/BMC-Alliance [35] zur Auslegung von SMC-Bauteilen angewendet werden.

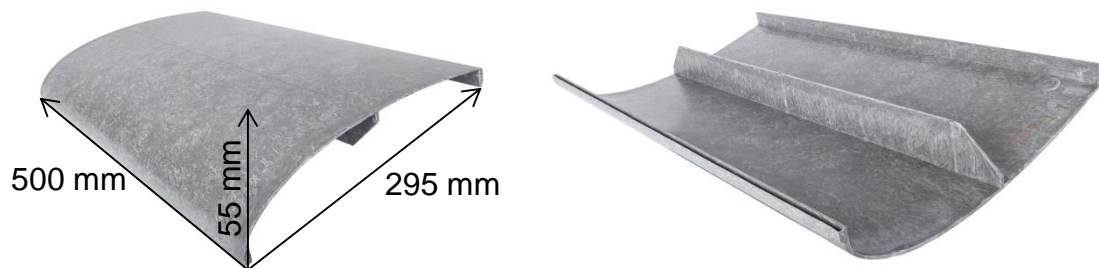


Abbildung 5.1: SMC-Demonstrator "Heckspoiler" hergestellt mit SMC-Halbzeug unter Verwendung von bio-basierten und nachwachsenden Füllstoffen

Bei dem in dieser Arbeit entwickelten Halbzeug konnten, bei ausschließlicher Verwendung bio-basierter und nachwachsender Rohstoffe als Füllstoffe und gleichem Fasermassengehalt wie bei einem konventionellen Halbzeug, vergleichbare mechanische Kennwerte erreicht werden. Basierend auf den Ergebnissen der mechanischen Prüfungen und der Untersuchungen hinsichtlich Schimmelbildung kann die Aussage getroffen werden, dass ein Halbzeug mit bio-basierten und nachwachsenden Rohstoffen in ähnlichen Anwendungsbereichen wie ein konventionelles GF-SMC eingesetzt werden kann.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Der SMC-Prozess stellt seit den 1960er Jahren einen der ersten Verarbeitungsprozesse, mit denen die großserientaugliche Herstellung von glasfaserverstärkten Kunststoffen realisiert werden konnte, dar. Heute ist der Prozess zur Herstellung von verschiedensten Bauteilen in semistrukturellen Anwendungsbereichen weltweit etabliert. Aktuell werden in Europa ca. 20 % aller Glasfasern im SMC-Verfahren verarbeitet. In den vergangenen zehn Jahren wurden neue SMC-Halbzeuge, z. B. durch den Einsatz von Kohlenstofffasern (CF-SMC), speziellen Leichtbaufüllstoffen (LD-SMC) oder Class-A fähigen Halbzeugen, entwickelt. Durch diese Entwicklungen konnte der Einsatz von SMC-Halbzeugen am Markt gestärkt werden. Der Druck auf die duroplastischen Halbzeuge wächst kontinuierlich durch die immer stärker werdende Konkurrenz der Thermoplaste. Nur durch Weiterentwicklung können neue Absatzmärkte für SMC-Halbzeuge erschlossen werden.

Ziel der vorliegenden Arbeit war die Entwicklung eines neuartigen SMC-Halbzeuges, bei dem bio-basierte und nachwachsende Rohstoffe (z. B. Rapsschrot und Sonnenblumenkernschalenmehl) als Füllstoffalternativen zu konventionellen Füllstoffen eingesetzt werden. Durch den Einsatz dieser Füllstoffe soll die Dichte der neu entwickelten Halbzeuge, bei gleicher Verarbeitbarkeit und gleichbleibenden mechanischen Eigenschaften, um ca. 15 % reduziert werden.

Zunächst wurden die für die Entwicklung eines neuen Halbzeuges relevanten Parameter wie zum Beispiel Dichte, Verstärkungsfasergehalt und –länge, mechanische Eigenschaften und Verarbeitungsverhalten in einer Spezifikation definiert.

Aufbauend auf dieser Spezifikation und als Basis für die Entwicklung des SMC-Halbzeuges mit bio-basierten und nachwachsenden Füllstoffen diente das ebenfalls in dieser Arbeit entwickelte SMC-Halbzeug „IVW-1“ mit konventionellen Füllstoffen und Glasfasern als Verstärkungsfasern. Dieses Halbzeug erreicht bei einem Faser-massengehalt von 30 % und einer Dichte von $1,95 \text{ g/cm}^3$ einen E-Modul um 10,4 GPa und eine Zugfestigkeit von 100 MPa. Weiterhin weist es die gleichen Verarbeitungseigenschaften wie ein konventionelles SMC-Halbzeug auf und ist somit mit einem am Markt verfügbaren SMC-Halbzeug vergleichbar.

Zu Beginn der Entwicklung des Halbzeuges mit bio-basierten und nachwachsenden Füllstoffen wurde in separaten Parameterstudien die Verfügbarkeit, Lieferform und

Verarbeitbarkeit in einem SMC-Halbzeug untersucht. In einer Parameterstudie bezüglich des Einflusses des Füllstoffgehaltes, Füllstofftyps und der Partikelgröße auf die Viskosität der Harzpaste konnte gezeigt werden, dass nicht jeder lokal verfügbare bio-basierte und nachwachsende Füllstoff in einem SMC-Halbzeug verarbeitet werden kann. In dieser Studie zeigten Rapsschrot und Sonnenblumenkernschalenmehl den geringsten Einfluss auf das Viskositätsverhalten, so dass diese für die weiteren Untersuchungen genutzt wurden. Durch die Verwendung eines viskositätssenkenden Additivs konnte zudem die Viskosität der Harzpaste auf den in der Spezifikation definierten Grenzwert von 40 Pa·s gesenkt werden. Hierdurch ist eine prozesssichere Imprägnierung der Fasern möglich, wodurch ein homogenes Halbzeug hergestellt werden kann.

Bei der Studie zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften im Zug- und Biegeversuch konnte nachgewiesen werden, dass das teilweise bzw. vollständige Einbringen von bio-basierten und nachwachsenden Füllstoffen keinen allzu großen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften hat. Die mechanischen Eigenschaften werden großteils von den Verstärkungsfasern, deren Gehalt sowie deren homogener Verteilung im Halbzeug bestimmt. Durch die alternativen Füllstoffe werden die Fasern während der Verarbeitung im Fließpressverfahren homogen im Probekörper bzw. Bauteil verteilt, was zu gleichbleibend guten mechanischen Eigenschaften führt.

In enger Zusammenarbeit mit dem Institut für Biotechnologie und Wirkstoff-Forschung (IBWF) wurde eine Parameterstudie zum Schimmelverhalten von SMC-Komponenten und -Probekörpern durchgeführt. Hierbei wurden die Proben unter anderem auf inkubierten Agar-Trägerplatten eingelagert, mit gelösten Schimmelsporen infiziert und gemäß üblicher Normen aus der Automobilbranche inkubiert. Bei allen Tests konnte kein Nachweis erbracht werden, dass die im SMC-Halbzeug vorhandenen bio-basierten Füllstoffe als Kohlenstoffquelle für die Pilze und Sporen dienen und somit deren Wachstum fördern.

Nachdem die Halbzeuge im Labormaßstab entwickelt und verifiziert wurden, konnten die gewonnenen Erkenntnisse auf einen industrienahen Maßstab übertragen werden. Hierbei wurde die Harzpaste auf einer Schmidt & Heinzmann SMC-Anlage (SMCline600) zu einem Halbzeug verarbeitet und auf einer 800 t Bauteilpresse mit Parallelregelung zu Probekörperplatten und Demonstratoren verarbeitet. Das Verarbeitungsverhalten der Halbzeuge mit bio-basierten und nachwachsenden Füllstoffen

unterscheidet sich hierbei nicht von dem Verarbeitungsverhalten konventioneller Halbzeuge. Bei der Bestimmung der mechanischen Kennwerte der im industrienahen Maßstab hergestellten Platten konnte bei den Probekörpern mit 100 % bio-basierten und nachwachsenden Rohstoffen ein Elastizitätsmodul von 10,9 GPa und eine Zugfestigkeit von 96 MPa erreicht werden. Diese mechanischen Kennwerte sind mit den im Labormaßstab erreichten Kennwerten vergleichbar.

Das Ziel dieser Arbeit war es, den Einsatz von bio-basierten und nachwachsenden Rohstoffen als alternative Füllstoffe für SMC-Halbzeuge zu untersuchen. Durch Modifikation einer SMC-Harzpaste wurde es ermöglicht, Sonnenblumenkernschalenmehl als Alternative zu dem konventionell verwendeten Kalziumkarbonat einzusetzen. Dieser Wechsel hatte keinen Einfluss auf das Verarbeitungsverhalten des Halbzeuges und auf die erreichbaren mechanischen Eigenschaften. Es wurde jedoch eine Dichtereduktion von 20 %, bei gleichbleibenden mechanischen Eigenschaften ermöglicht. Durch diese Dichtereduktion kann die Wettbewerbsfähigkeit von SMC-Halbzeugen für zukünftige Anwendungen gesichert und eventuell neue Anwendungsgebiete erschlossen werden.

Basierend auf den Ergebnissen dieser Arbeit kann die Aussage getroffen werden, dass die Verwendung von bio-basierten und nachwachsenden Rohstoffen als Füllstoffe in SMC-Halbzeugen möglich ist.

Zur Steigerung des Anteils von bio-basierten und nachwachsenden Komponenten in SMC-Halbzeugen kann in künftigen Arbeiten der Einsatz von Naturfasern als Verstärkungsfasern untersucht werden. Diese zeigen eine sehr gute Adhäsion in der Faser-Matrix-Grenzschicht aufgrund ihrer kompatiblen Chemiestruktur. Hierbei erfolgt die Bindung im Wesentlichen über kovalente Mechanismen und Wasserstoffbrückenbindungen zwischen den OH-Gruppen des Harzes und der Cellulose bzw. des Lignins der Naturfasern. Weiterhin bieten Naturfasern gewichtsspezifische Vorteile gegenüber Glasfasern, sodass die Halbzeugdichte von NF-SMC Bauteilen gegenüber konventionellen Bauteilen reduziert werden kann. Hierdurch ist eine Einsparung sowohl von Primär- als auch von Sekundärenergie während der Lebensdauer der Bauteile möglich.

7 Anhang

7.1 Übersichtstabelle marktgängiger GF-SMC-Halbzeuge

Tabelle 7.1: Übersicht mechanischer Kennwerter marktgängiger GF-SMC-Halbzeuge

Halbzeug	Hersteller	Dichte in g/cm ³	E-Modul in GPa	Zugfestigkeit in MPa	Quelle
SMC0400	Menzolit	1,9	11	90	[139]
SMC0430	Menzolit	1,3	8	60	[84]
SMC0500	Menzolit	1,1	7	60	[140]
SMC1400	Menzolit	1,9	10	130	[141]
SMC2400	Menzolit	1,9	10	60	[142]

7.2 Berechnung der Harzpastendichte

Tabelle 7.2 zeigt das Ergebnis der Dichteberechnung der vom IVW entwickelten SMC-Rezeptur „IVW-1“. Hierbei werden die flüssigen Komponenten in der Kategorie „Harz“ zusammengefasst und anschließend mit den „Füllstoffen“ kombiniert, wodurch sich die Harzpaste ergibt.

Bei der Herstellung der Komponente „Harz“ werden die einzelnen Komponenten (a) gravimetrisch dosiert (b). Zur Berechnung der Harzpastendichte werden über die spezifischen Dichten der Harzpastenkomponenten (c) die jeweiligen Volumen der Komponenten (d) berechnet und anschließend zusammengefasst (e). Das gleiche Vorgehen wird auch bei den Füllstoffen vorgenommen (A – E).

Über das resultierende Gesamtgewicht (1) und das Gesamtvolumen (2) wird die Gesamtdichte (3) der Harzpaste berechnet. Dieser Wert wird über Pyknometer-Versuche verifiziert, siehe Kapitel 3.4.2.

Tabelle 7.2: Berechnung der theoretischen Harzpastendichte der Rezeptur "IVW-1"

Rezeptur IVW-1					e			1	2	3
Kurzbezeichnung	a	b	c	d	Volumen Harzpaste in cm ³	Dichte Harzpaste in g/cm ³	Gewicht Harzpaste in g	Gesamtgewicht in g	Gesamtvolumen in cm ³	Gesamtdichte in g/cm ³
Harz	Polylite PO 4655	15,75	1,15	13,70	26,53	1,07	28,41	70,00	41,88	1,67
	Norpol 9887	8,01	0,95	8,43						
	P9065	0,92	0,95	0,97						
	Trigonox C	0,55	0,93	0,59						
	PBQ 10%	0,06	0,93	0,06						
	Luvatol MK35	0,54	1,50	0,36						
	-	1,95	0,91	2,15						
CC Weiß	0,63	2,30	0,27							
					Volumen Füllstoffe in cm ³	Dichte Füllstoffe in g/cm ³	Gewicht Füllstoffe in g			
Füllstoff	Millicarb OG	41,59	2,71	15,35	15,35	2,71	41,59			
Kurzbezeichnung	A	B	C	D	E					

7.3 Parameter der SMC-Herstellung im industriennahen Maßstab

Tabelle 7.3 gibt eine Übersicht über die Parameter, die zur Herstellung von konventionellen SMC-Halbzeugen im industriennahen Maßstab gewählt wurden. Der Fasermassengehalt im Halbzeug kann durch Anpassung der Bandgeschwindigkeit und Drehzahl des Schneidwerkes angepasst werden. Durch Variation des Rakelspaltes wird die Dicke der Harzpaste auf den Trägerfolien, welche auch von der Grundviskosität der Harzpaste abhängig ist, eingestellt. Bei den hergestellten Halbzeugen wurde der Rakelspalt als konstant gewählt. Durch Variation der Bandgeschwindigkeit und der Schneidwerkdrehzahl wurde der Fasermassengehalt eingestellt.

Tabelle 7.3: Parameter zur Herstellung von konventionellen SMC-Halbzeugen im Technikums-Maßstab

Parameter	Zahlenwert	Einheit
Produktionsgeschwindigkeit	1,8	m/s
Produktionsbreite	300	mm
Anzahl der Rovings / Hersteller inkl. Typbezeichnung	23 / Owens Corning P204 2400 tex	-
Schneidwerkdrehzahl	50	1/min
Rakelspalt unterer Rakelkasten (R1)	1,2	mm
Rakelspalt oberer Rakelkasten (R2)	1,2	mm
Rakelkastenheizung	ausgeschaltet	°C
Stand der Kompaktierungsrollen (auf Block / mäandrierend + parallel / keil)	mäandrierend, parallel	-
Anpressdruck der Kompaktierungsrollen	3	bar

7.4 Parameter der SMC-Probekörperplattenherstellung

Tabelle 7.4 gibt eine Übersicht über die gewählten Parameter, welche zur Herstellung der Probekörperplatten im industrienahen Maßstab auf der Eigenbau-Laborpresse gewählt wurden. Zur Bestimmung der mechanischen Kennwerte wurden Probekörperplatten mit einer Dicke von 4 mm hergestellt. Der gewählte Werkzeuginnendruck von 60 bar entspricht einem minimal möglichen Werkzeuginnendruck bei der Verarbeitung von SMC-Halbzeugen.

Tabelle 7.4: Parameter zur Herstellung von SMC-Probekörperplatten im industrienahen Maßstab

Parameter	Zahlenwert	Einheit
Probekörperplattengröße (L x B)	340 x 480	mm ²
Probekörperplattenstärke	4	mm
Werkzeuggrundbelegung	60	%
Werkzeuginnendruck	60	bar
Schließkraft	980	kN
Haltezeit	300	s
Trennmittel (werkzeugseitig)	Frekote 770 NC	

7.5 Faserorientierung in einer SMC-Probe

In Abbildung 7.1 ist die Bruchfläche einer SMC-Zugprobe dargestellt. Es ist eine regellose Faserorientierung in der Ebene der Bruchfläche zu erkennen.

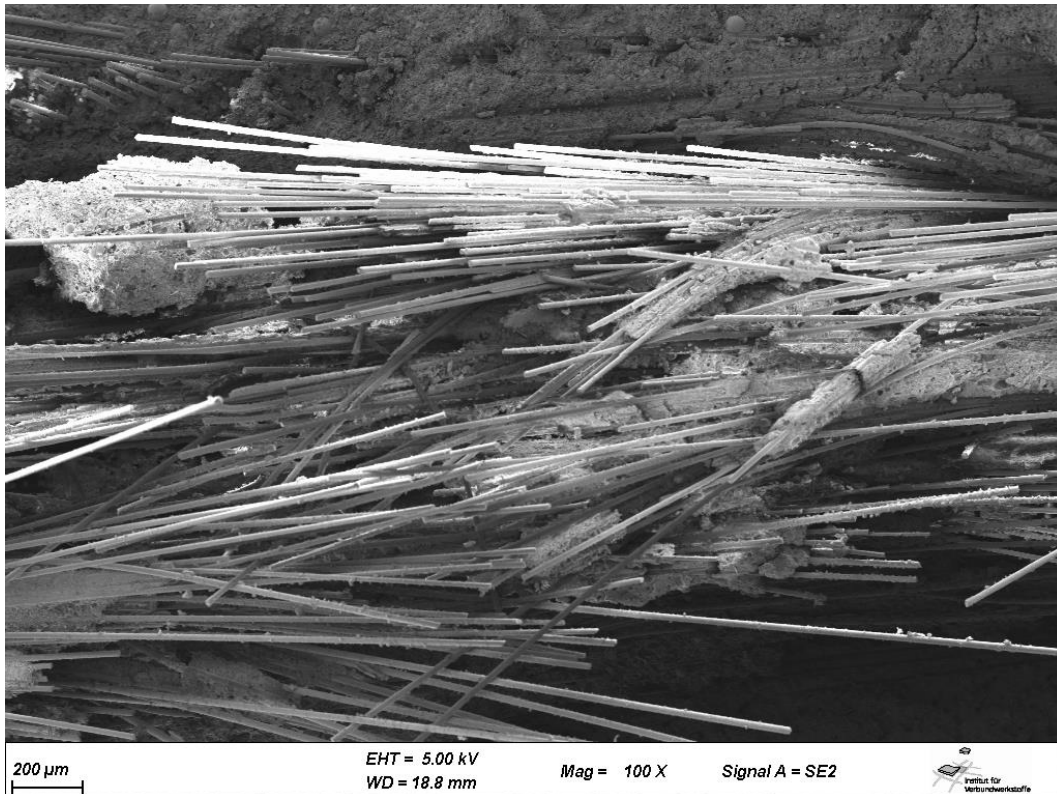


Abbildung 7.1: Bruchfläche einer SMC-Zugprobe, Rezeptur „IVW-1“

Abbildung 7.2 zeigt ein Schliffbild der Rezeptur „IVW-1“. Hierbei sind Verstärkungsfasern, welche senkrecht zur Bildebene orientiert sind, kreisrund dargestellt. Verstärkungsfasern, welche in eine andere Bildebene orientiert sind, werden mit elliptischem Querschnitt dargestellt.

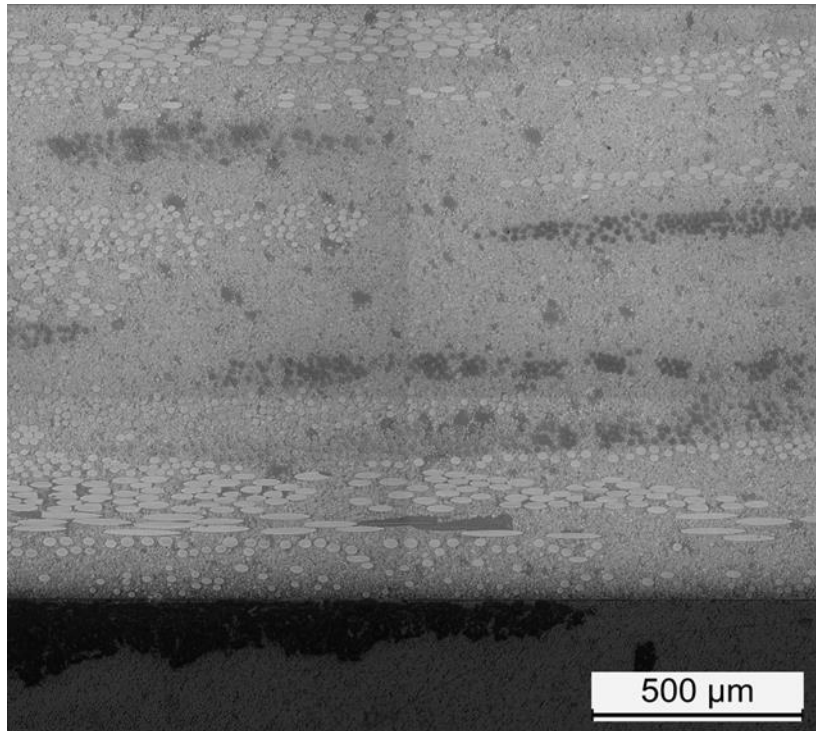


Abbildung 7.2: Schliffbild einer SMC-Probe, Rezeptur "IVW-1"

7.6 Berechnung der maximal möglichen Dichtereduktion beim Einsatz von bio-basierten und nachwachsenden Rohstoffen

Zur Berechnung der maximal möglichen Dichtereduktion durch den Einsatz von bio-basierten und nachwachsenden Rohstoffen wurde in einem ersten Schritt die Dichte der konventionellen Harzpaste – Rezeptur „IVW-1“ in Kapitel 7.2 berechnet. Mit einer Harzpastendichte von $1,67 \text{ g/cm}^3$ ergibt sich bei einem Glasfaseranteil von 30 Gew.-%, nach Tabelle 7.5 eine Halbzeugdichte von $1,94 \text{ g/cm}^3$. Bei der Ersetzung des Volumens der konventionellen Füllstoffe durch bio-basierte und nachwachsende Füllstoffe ergibt sich nach Tabelle 7.6 eine Harzpastendichte von $1,04 \text{ g/cm}^3$. Bei einem gleichbleibenden Verstärkungsfaseranteil von 30 Gew.-% ergibt sich nach Tabelle 7.7 eine Halbzeugdichte von $1,49 \text{ g/cm}^3$. Hierdurch ergibt sich eine Reduktion der Harzpastendichte um 37 % bzw. einer Reduktion der Halbzeugdichte um 22 %.

Tabelle 7.5: Berechnung der Halbzeugdichte eines konventionellen SMC-Halbzeuges

Komponente	Dichte	Einheit	Massenanteil im Halbzeug	Einheit
Harzpaste IVW-1	1,67	g/cm ³	70	%
Verstärkungsfaser P204	2,55	g/cm ³	30	%
Halbzeugdichte	1,94	g/cm³		

Tabelle 7.6: Berechnung der Harzpastendichte mit bio-basierten und nachwachsenden Füllstoffen

Rezeptur mit maximalem bio-basiertem Anteil

Kurzbezeichnung	a	b	c	d	e			1	2	3
Komponente	Anteil in g		Dichte laut Datenblatt in g/cm ³	Volumen (m/roh) in cm ³	Volumen Harzpaste in cm ³	Dichte Harzpaste in g/cm ³	Gewicht Harzpaste in g	Gesamtgewicht in g	Gesamtvolumen in cm ³	Gesamtdichte in g/cm ³
Harz	Polylite PO 4655	15,75	1,15	13,70	26,53	1,07	28,41	43,76	41,88	1,045
	Norpol 9887	8,01	0,95	8,43						
	P9065	0,92	0,95	0,97						
	Trigonox C	0,55	0,93	0,59						
	PBQ 10%	0,06	0,93	0,06						
	Luvatol MK35	0,54	1,50	0,36						
	-	1,95	0,91	2,15						
CC Weiß	0,63	2,30	0,27							
					Volumen Füllstoffe in cm ³	Dichte Füllstoffe in g/cm ³	Gewicht Füllstoffe in g			
Füllstoff	Bio-basierter Füllstoff	15,35	1,00	15,35	15,35	1,00	15,35			
Kurzbezeichnung	A	B	C	D	E					

Tabelle 7.7: Berechnung der Halbzeugdichte eines SMC-Halbzeuges mit bio-basierten und nachwachsenden Füllstoffen

Komponente	Dichte	Einheit	Massenanteil im Halbzeug	Einheit
Harzpaste „bio-Füllstoffe“	1,04	g/cm ³	70	%
Verstärkungsfaser P204	2,55	g/cm ³	30	%
Halbzeugdichte	1,49	g/cm³		

7.7 Partikelgrößenverteilung der konventionellen und der bio-basierten und nachwachsenden Füllstoffe

Die Bestimmung der Partikelgrößenverteilung der konventionellen und bio-basierten und nachwachsenden Füllstoffe wurde mit einem Siebturm durchgeführt. Es wurden Siebe mit den Maschenweiten 25 μm , 63 μm , 125 μm , 250 μm und 500 μm eingesetzt. Die Ergebnisse der Siebversuche sind graphisch in Abbildung 7.3 dargestellt. Hierbei ist klar zu erkennen, dass die konventionellen Füllstoffe Martinal ON306 und Millicarb OG eine Partikelgrößenverteilung von 0 bis 125 μm aufzeigen. Die bio-basierten und nachwachsenden Füllstoffe hingegen zeigen eine Partikelgrößenverteilung im Bereich von 25 bis 500 μm .

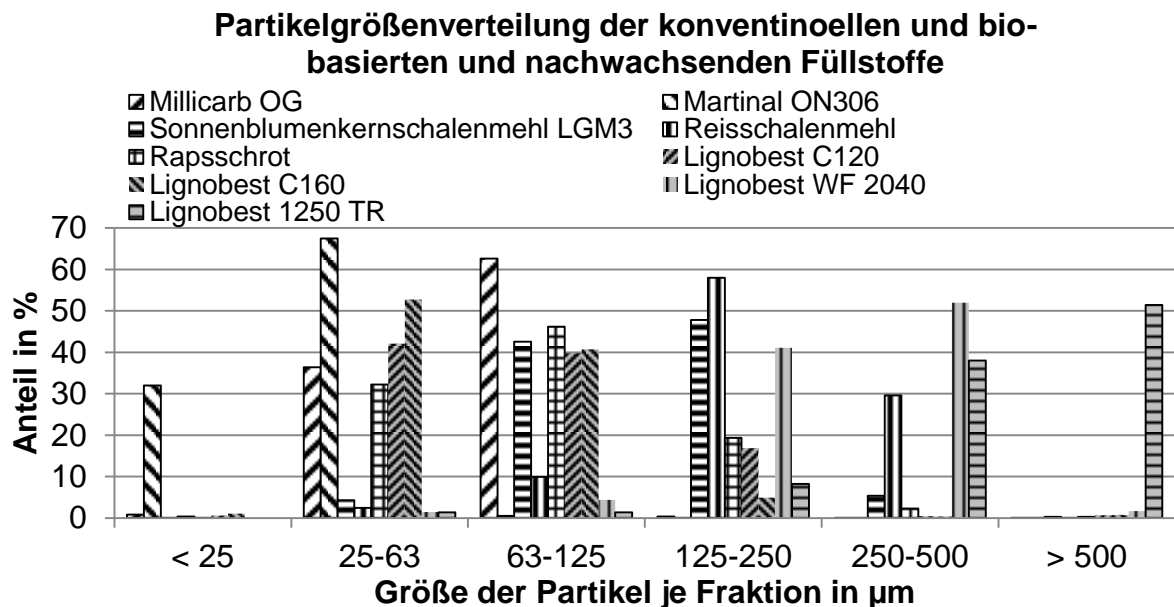


Abbildung 7.3: Ergebnis der Partikelgrößenverteilung gemäß Siebanalyse

7.8 REM-Ansichten der verwendeten konventionellen und bio-basierten und nachwachsenden Füllstoffe

Die Abbildungen 10.2 und 10.3 zeigen REM-Aufnahmen der konventionellen Füllstoffe. Es ist deutlich deren geschlossene und scharfkantige Oberfläche ersichtlich. Weiterhin ist erkennbar, dass die Partikel des Martinal zu Agglomeratbildung neigen. Diese Agglomerate müssen während eines Dispergierprozesses wieder voneinander gelöst werden. Beim Füllstoff Millicarb ist erkennbar, dass sich kleine Partikel vereinzelt auf der Oberfläche von größeren Partikeln ablagern, diese aber insgesamt nicht zur Agglomeratbildung neigen.

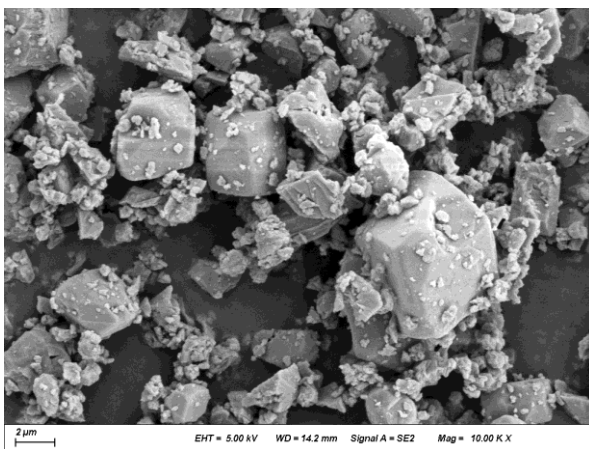


Abbildung 7.4: REM-Aufnahme des konventionellen Füllstoffes Millicarb OG

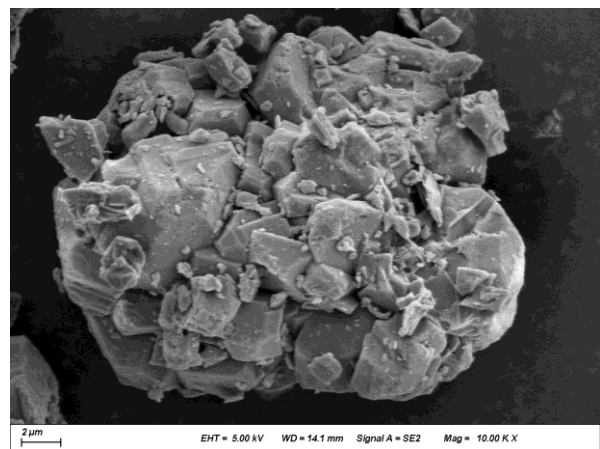


Abbildung 7.5: REM-Aufnahme des konventionellen Füllstoffes Martinal ON306

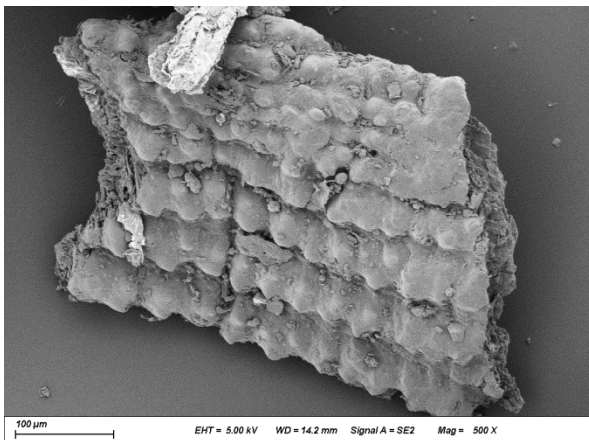


Abbildung 7.6: REM-Aufnahme einer Reisschale

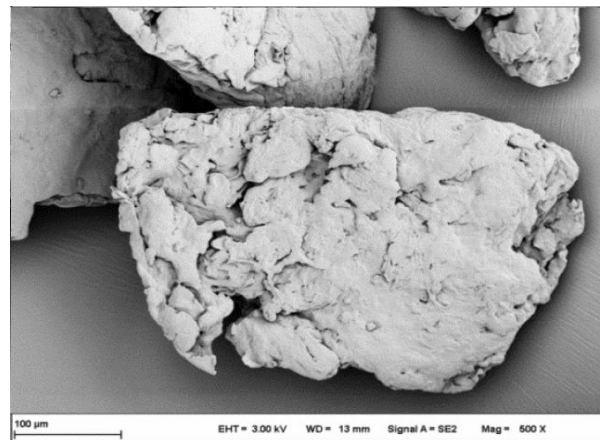


Abbildung 7.7: REM-Aufnahme eines Rapsschrotpartikels

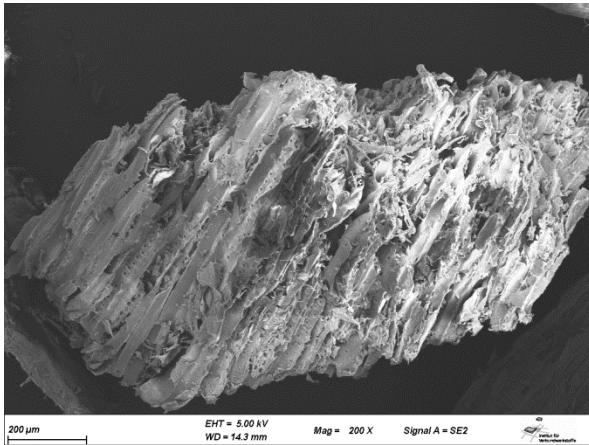


Abbildung 7.8: REM-Aufnahme eines Holzmehl-Partikels (Lignobest 1250 TR)

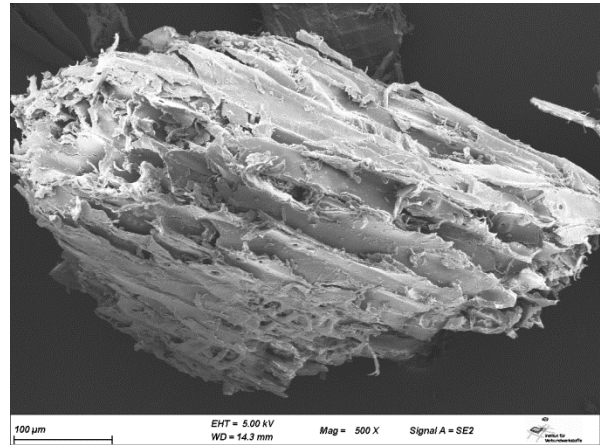


Abbildung 7.9: REM-Aufnahme eines Holzmehl-Partikels (Lignobest WF2400)

7.9 Vergleich des Viskositätsverhaltens der Referenz-Rezeptur IVW-1 und der optimierten Rezeptur IVW-Bio

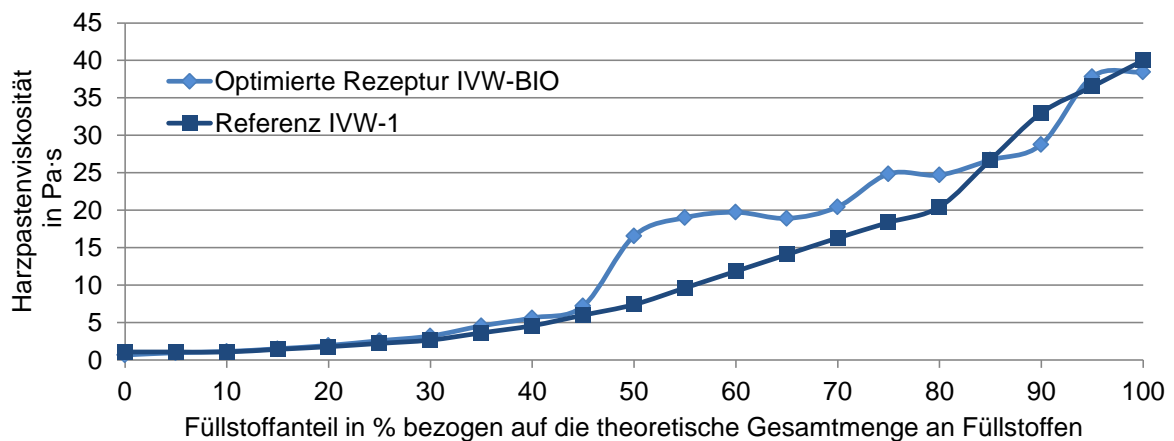


Abbildung 7.10: Vergleich der Viskositätsverhaltens der SMC-Rezepturen IVW-1 und IVW-BIO

7.10 REM-Ansichten der Bruchflächen der Dreipunkt-Biegeproben

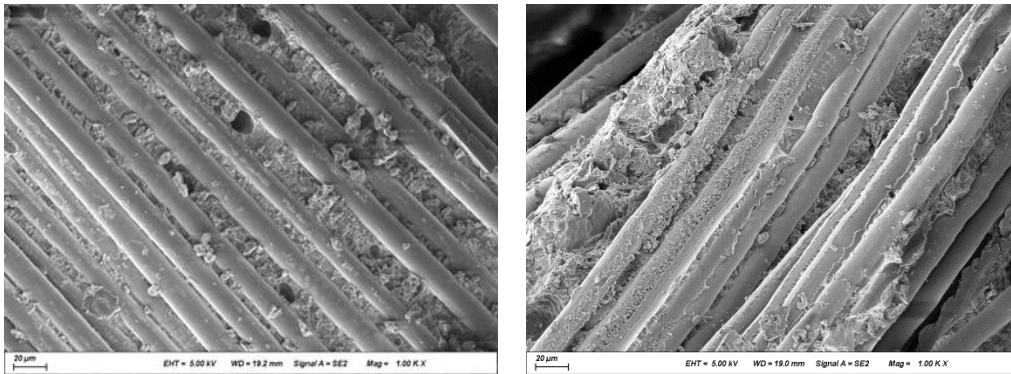


Abbildung 7.11: Bruchflächen von geprüften Dreipunkt-Biegeproben; links: Verwendung von Rapsschrot als bio-basiertem und nachwachsendem Rohstoff, rechts: Verwendung von Sonnenblumenkernschalenmehl als bio-basiertem und nachwachsendem Rohstoff, Vergrößerung jeweils 1000-fach

7.11 Verwendete Pilze

Die bei dieser Untersuchung verwendeten Pilze wurden auf Basis der Erfahrungen des IBWF ausgewählt. Die folgenden Pilze und deren Sporen wurden im Rahmen der Arbeit getestet:

Gliocephalotrichum sp. (IBWF 099-09): Die Arten in der Gattung *Gliocephalotrichum* (Hypocreales, Nectriaceae) sind meist bodenbesiedelnde Pilze, die bei einigen wichtigen tropischer Obstfrüchte nach der Ernte zu Lagerfäulnis führen. Obwohl Arten von *Gliocephalotrichum* im Allgemeinen nicht als wichtige Pflanzenpathogene angesehen werden, kann ihre Fähigkeit, Fruchtfäule nach der Ernte hervorzurufen, Auswirkungen auf den Export und die Lagerung von Früchten haben [143]. Die Gattung kommt ubiquitär vor.

Didymella pinodella (syn. *Phoma pinodella*; IBWF E08006): Die Familie der Didymelaceae hat mehr als beschriebene 5400 Vertreter und enthält als Hauptgattungen *Ascochyta*, *Didymella* und *Phoma*. Spezies dieser Familie sind Kosmopoliten und sind in den verschiedensten Habitaten anzutreffen [144].

Polyporus sp. (IBWF 06029): Die Gattung *Polyporus* gehört zu den holzerstörenden Pilzen (in der Regel Weißfäule-Erreger). Eine Grundvoraussetzung dafür ist die Abgabe von lignolytischen oder zellolytischen Enzymen in die Umgebung [145].

Penicillium sp. (IBWF 088-17): In der Natur gibt es zahlreiche Mikroorganismen, die Xylan, Cellulose, Hemicellulose oder Lignin effizient abbauen können. Insbesondere filamentöse Pilze wie z. B. Arten der Gattung *Penicillium* haben gezeigt, dass sie ein breites Spektrum an Enzymen sezernieren (xylanolytische, lignolytische und zellolytische Enzyme) [146].

Fusarium sp. (IBWF 090-17): *Fusarium* ist eine große und komplexe Gattung und kommt in Ökosystemen in allen Teilen der Welt vor, wodurch sie als Modell für ein besseres Verständnis biogeografischer Prozesse, die die Verteilung von Pilzen beeinflussen, nützlich sind [147]. Auch Fusarien produzieren eine große Bandbreite an zellulolytischen und xylanolytischen [148] Enzymen.

Alternaria sp. (IBWF 093-17): Schimmelpilze der Gattung *Alternaria* sind vor allem Saprophyten, die aufgrund ihrer zellulolytischen Enzyme in einer Vielzahl von Habitaten anzutreffen sind [149].

Trichoderma sp. (IBWF 09-17): *Trichoderma*-Spezies sind ubiquitär verbreitete Pilze, die hauptsächlich im Boden und an organischem Material zu finden sind. Es sind sehr schnell wachsende Pilze, die eine große Zahl von Sporen (luftverbreitend) produzieren. Es werden verschiedene Enzyme für den Abbau von Homo- und Heteropolymeren gebildet (z. B. Glucanasen, Chitinasen, Xylanasen). Vertreter dieser Gattung finden Anwendung in der Enzymproduktion und als biologische Kontrollagenzien [150].

7.12 Schimmelbildung auf SMC-Probekörperoberflächen

Im Rahmen der Untersuchungen wurden die SMC-Probekörper mit unterschiedlichen Gehalten an bio-basierten und nachwachsenden Füllstoffen mit den in Kapitel 7.11 beschriebenen Pilzen infiziert und die Proben anschließend auf Agar-Platten, welche als Nährstoffbasis dienen, ausgelagert. Während des Wachstums der Pilze haben diese sich über die Oberfläche der Halbzeuge ausgebreitet, siehe Abbildung 7.12. Nachdem die Pilze die Nährstoffe der Agar-Platten aufgebraucht haben, konnte kein weiteres Wachstum mehr festgestellt werden. Zum Wachstumsende wurden die Proben getrocknet und sterilisiert, um anschließend REM-Aufnahmen anzufertigen. Abbildung 7.13 zeigt die Oberfläche einer SMC-Probe in 4000-facher Vergrößerung. Hierbei sind die einzelnen Myzelfäden der Pilze klar erkennbar. Weiterhin ist ersichtlich, dass das Myzel nicht in die Oberfläche der Proben eingedrungen ist. Während des Trocknens (65 °C für 18 Stunden im Umluftofen) der Proben haben sich Risse in der Oberfläche und des Pilzmyzels gebildet. Bei nicht getrockneten Referenzproben sind keine Risse ersichtlich.

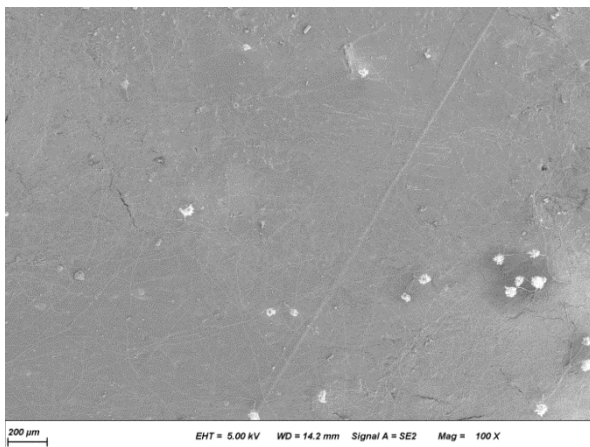


Abbildung 7.12: Oberflächenaufnahme einer SMC-Probe mit 100 % bio-basierten und nachwachsenden Füllstoffen nach durchgeführten Schimmeltests

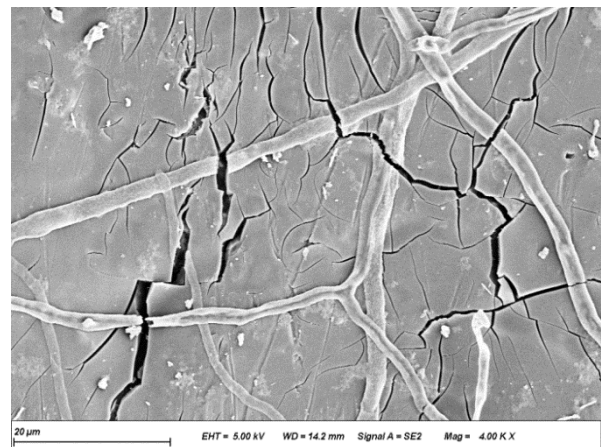


Abbildung 7.13: Oberflächenaufnahme einer getrockneten SMC-Probe mit Pilzmyzel

8 Literaturverzeichnis

- [1] Ehrenstein, G.W.: Faserverbund-Werkstoffe: Werkstoffe – Verarbeitung - Eigenschaften, München, Wien: Carl Hanser Verlag, 2006.
- [2] Neitzel, M.; Mitschang, P.: Handbuch Verbundwerkstoffe: Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung. 2. Auflage, Heidelberg, München, Berlin: Carl Hanser Verlag, 2004.
- [3] Christmann, M.: Optimierung der Organoblechherstellung durch 2D-Imprägnierung, Kaiserslautern: IVW-Schriftenreihe 114, 2014.
- [4] Witten, E.: „The Composites Market,“ AVK Industrievereinigung verstärkte Kunststoffe, Frankfurt, 2017.
- [5] Ooms, P.: *Wirtschaftlichkeit von BMC/SMC/CIC*, Osnabrück: 1. internationales Lorenz-Thermoset-BMC/SMC/CIC-Symposium, 2016.
- [6] AVK - Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e.V. | Federation of Reinforced Plastics, Handbuch Faserverbundkunststoffe / Composites - Grundlagen, Verarbeitung, Anwendung, Wiesbaden: Springer Verlag, 2013.
- [7] Das, S.: „Life cycle assessment of carbon fiber-reinforced polymer composites,“ *The International Journal of Life Cycle Assessment*, pp. 268-282, Vol. 16, 2011.
- [8] Orgéas, L.; Dumont, P.: „Sheet Molding Compounds,“ in *Wiley Encyclopedia of Composites*, Grenoble, John Wiley & Sons, Inc., 2012, pp. 2683-2728.
- [9] Grünewald, R.; Walter, O.: „15 Jahre Erfahrung mit Harzmatten,“ *Plastverarbeiter*, Nr. 9, 1975.
- [10] DIN EN 14598-1:2005-07, „Verstärkte härtbare Formmassen - Spezifikation für Harzmatten (SMC) und faserverstärkte Pressmassen (BMC) - Teil 1“.
- [11] Henning, F.: Faserverstärkte Kunststoffe. Handbuch Leichtbau - Methoden, Werkstoffe, Fertigung, München: Hanser Verlag, 2011.
- [12] Kia, Hamid G.: SMC Sheet Molding Compounds Science and Technology, München: Hanser Verlag, 1993.
- [13] Stachel, P. und AVK | Industrievereinigung verstärkte Kunststoffe | Federation of Reinforced Plastics: „SMC-BMC,“ 08. 11. 2012. [Online]. Available: https://www.avk-tv.de/files/20121108_smc_bmc.pdf. [Zugriff am 28. 06. 2017].

- [14] Keckl, C.: Einfluss der Eindickung von dichterem Sheet Moulding Compound auf die Formteilwelligkeit, Stuttgart: Fraunhofer Verlag, 2016.
- [15] Lässig, R.; Eisenhut, M.; Arne, M.; et al: Serienproduktion von hochfesten Faserverbundbauteilen - Perspektiven für den deutschen Maschinen- und Anlagenbau, Roland Berger Strategy Consultants, 2012.
- [16] Wittel, H.; Muhs, D.; et al.: Roloff/Matek Maschinenelemente Normung, Berechnung, Gestaltung; 21. Auflage, Wiesbaden: Springer Vieweg , 2013.
- [17] AMCO Metall-Service GmbH, „amco - WENN METALL UND SERVICE GLÄNZEN,“ [Online]. Available: <https://amco-metall.de/aluminium-platten/>. [Zugriff am 14 07 2018].
- [18] Menzolit®, „Menzolit - Datenblätter - SMC1100,“ 21. 03. 2014. [Online]. Available: www.menzolit.com. [Zugriff am 22. 10. 2017].
- [19] Menzolit®, „Menzolit - Datenblätter - carbonSMC1100,“ 21. 03. 2014. [Online]. Available: www.menzolit.com. [Zugriff am 22. 10. 2017].
- [20] Menzolit®, „SMC + BMC Arbeitskreishomepage,“ 01 2013. [Online]. Available: http://www.smc-bmc.info/wp-content/uploads/2013/01/Auszug_Wirtschaftlichkeit.pdf. [Zugriff am 22. 04. 2018].
- [21] Witten, E.: „The Composites Market,“ AVK Industrievereinigung verstärkte Kunststoffe, Frankfurt , 2013.
- [22] AVK - Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e.V. , „PRESSE BOX - Der GFK-Markt Europa 2018,“ 12 11 2018. [Online]. Available: <https://www.pressebox.de/pressemitteilung/avk-ev/Der-GFK-Markt-Europa-2018/boxid/930403>. [Zugriff am 21 11 2018].
- [23] Amtsblatt der europäischen Union, *Verordnung (EG) Nr. 443/2009 des europäischen Parlaments und des Rates vom 23.April 2009 zur Festlegung von Emissionsnormen für neue PKW im Rahmen des Gesamtkonzepts der Gemeinschaft zur Verringerung der CO2-Emissionen von Personenkraftwagen*, Brüssel, 2009.
- [24] N, N., „EG-Altfahrzeugrichtlinie 2000/53,“ EUR-Lex Access to European Union Law, 17. 09. 2015. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/HTML/?uri=LEGISSUM:l21225&from=DE>. [Zugriff am 24. 02. 2016].
- [25] Dzalto, J.; Mitschang, P.; Gortner, F.: „Neue Konzepte zur Verarbeitung von naturfaserverstärkten Kunststoffen,“ Leichtbau und Composites, 4a Technologietag, Schladming, 2017.

-
- [26] Deutscher Verband Tiernahrung e.V., „FutterFakten - Raps als Futtermittel,“ 2018. [Online]. Available: <https://www.dvtiernahrung.de/aktuell/futterfakten/raps-als-futtermittel.html>. [Zugriff am 22 08 2018].
- [27] ADAMA Deutschland GmbH, „Die Trockenheit 2018 beeinflusst den Rapsanbau 2018/19,“ PRESSEBOX, 28 08 2018. [Online]. Available: <https://www.pressebox.de/pressemitteilung/feinchemie-schwebda-gmbh/Die-Trockenheit-2018-beeinflusst-den-Rapsanbau-2018-19/boxid/919276>. [Zugriff am 23 11 2018].
- [28] Kaltschmitt, M.; Hartmann, H.; Hofbauer, H.: Energie aus Biomasse - Grundlagen, Techniken und Verfahren - 2. Auflage, Heidelberg: Springer , 2009.
- [29] Krämerbräu Kern.Kompetenz.Bio, „Produkte - Bio-Presskuchen,“ 2018. [Online]. Available: <http://kramerbraeu.de/produkte-2/presskuchen/sonnenblumen-presskuchen/>. [Zugriff am 22 08 2018].
- [30] Reishunger GmbH, „REISHUNGER,“ Brainspin Geeks, 2018. [Online]. Available: <https://www.reishunger.de/>. [Zugriff am 13 11 2018].
- [31] dpa/cl, „Welt.de - Hochleistungsbatterien aus Reis-Resten,“ dpa, 11 07 2013. [Online]. Available: <https://www.welt.de/wissenschaft/article117939390/Hochleistungsbatterien-aus-Reis-Resten.html>. [Zugriff am 23 11 2018].
- [32] BAM - Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, „Wie wir arbeiten - Pionier des Bio-Betons,“ BAM, 05 02 2016. [Online]. Available: <https://www.bam.de/Content/DE/Interviews/Wie-wir-arbeiten/pionier-des-bio-betons.html>. [Zugriff am 23 11 2018].
- [33] Kumar, R.N.; Voon, B.H.; Rozman, H.D.; Abusman, A.; Bauer, F.: Rice Husk Ash as Filler in Unsaturated Polyester based Sheet Moulding Compound (SMC), *International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials* , pp. 659-670, 16 August 2010.
- [34] Lorenz, T.: *Flammschutz duroplastischer Formmassen im Bahn-, Luftfahrt-, Automobil- und Elektrobereich - BMC0204 & SMC0208*, Osnabrück: Lorenz Kunststofftechnik GmbH, 2016.
- [35] Magnaud, H.: Design for Success - A DESIGN & TECHNOLOGY MANUAL FOR SMC BMC, Brüssel: SMC/BMC-Alliance, 2016.
- [36] Moeller, E.: Handbuch Konstruktionswerkstoffe - Auswahl, Eigenschaften, Anwendung 2. Auflage, München, Wien: Carl Hanser Verlag, 2014.
- [37] Lohse, H.: „How Do You Glue,“ 2009. [Online]. Available: <http://www.how-do->

- you-glue.de/downloads/10.pdf. [Zugriff am 13. 06. 2018].
- [38] Lamborghini Service Ried: „Der Lamborghini Aventador LP 750-4 Superveloce,“ [Online]. Available: <http://www.lamborghini-ried.at/news/der-lamborghini-aventador-lp-750-4-superveloce.html>. [Zugriff am 23. 06. 2018].
- [39] DAIMLER®, „Alu-Rohbau im neuen Mercedes-Benz SL: Unterm Strich 140 Kilo leichter,“ 2012. [Online]. Available: <http://media.daimler.com/marsMediaSite/de/instance/ko.xhtml?oid=9817820&reIID=1001&resultInfoTypeId=175#toRelation>. [Zugriff am 24. 01. 2018].
- [40] Schiebisch, J.: Zum Recycling von Faserverbundkunststoffen mit Duroplastmatrix, Erlangen: Universität Erlangen - Nürnberg; Lehrstuhl für Kunststofftechnik (LKT), 1995.
- [41] Schommer, D.: „Development of a Solid Mechanics Based Material Model for the Compression Molding Behavior of SMC Materials,“ in *14th International Conference on Flow Processes in Composite Materials*, Luleå, Schweden, 2018.
- [42] Duhovic, M.: „Development of a Solid Mechanics Based Material Model for the Compression Molding Behavior of SMC Materials,“ in *14th International Conference on Flow Processes in Composite Materials*, Luleå, Schweden, 2018.
- [43] Gardiner, G.: „CompositesWorld - Is the BMW 7 Series the future of autocomposites?,“ 10. 07. 2016. [Online]. Available: <https://www.composites-world.com/articles/is-the-bmw-7-series-the-future-of-autocomposites>. [Zugriff am 23. 06. 2018].
- [44] 3M Deutschland GmbH Advanced Materials Division, „3M Deutschland GmbH Advanced Materials Division - Produktinformationen und Spezifikationen,“ 2017. [Online]. Available: http://solutions.3mdeutschland.de/wps/portal/3M/de_DE/EU-EAMD/Home/OurProducts/GlassBubbles/. [Zugriff am 09. 02. 2018].
- [45] Schwemmer, M.: *Light Weight Applications - 3M(TM) Glass Bubbles*, Köln: 3M, 2015.
- [46] Gortner, F.; Schüffler, A.; Fischer, J.; Mitschang, P.: „Biobased filler for SMC,“ *bioplasticsMAGAZINE*, pp. 34-35, 2018.
- [47] Aurer, J. H.; Kasper, A.: *Ungesättigte Polyesterharze - Kunststoffe mit unbegrenzten Möglichkeiten*, Landsberg/Lech: Verlag Moderne Industrie, 2003.
- [48] Manshausen, P.: *Die aktuelle Wochenschau*; Borchers GmbH, 2007. [Online]. Available: <http://archiv.aktuelle-wochenschau.de/2007/woche23/woche23>.

- html. [Zugriff am 16. 06. 2018].
- [49] Lorenz Kunststofftechnik GmbH, *Grundlagen der SMC-Verarbeitung*, Frankfurt: AVK Arbeitskreis SMC/BMC, 2000.
- [50] Gysau, D.: *Füllstoffe: Grundlagen und Anwendungen (Farbe und Lack Edition)*, Hannover: Vincentz Network, 2006.
- [51] Tegethoff, W.: *Calcium Carbonate - From the Retaceous Period into the 21st Century*, Basel-Boston-Berlin: Birkhäuser Verlag, 2001.
- [52] Omya GmbH, *Produktdatenblatt Millicarb®-OG*, Köln: Omya GmbH, 2011.
- [53] Neitzel, M.; Mitschang, P.; Breuer, U.: *Handbuch Verbundwerkstoffe - Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung - 2., aktualisierte und erweiterte Auflage*, München: Carl Hanser Verlag, 2014.
- [54] Cripps, D.: „NetComposites,“ Gurit, [Online]. Available: <https://netcomposites.com/guide-tools/guide/reinforcements/glass-fibrefiber/>. [Zugriff am 10. 3. 2016].
- [55] OWENS CORNING COMPOSITE MATERIALS, LLC, „P204 Roving for SMC - PRODUCT INFORMATION,“ Owens Corning, Ohio, 2008.
- [56] Mehta, G.; Mohanty, A.K.; et. al.: „Novel Biocomposites Sheet Molding Compounds for Low Cost Housing Panel Applications,“ pp. 169-175, Vol. 13 April 2005.
- [57] Müssig, J.; Schmehl, M.; et. al: „Exterior components based on renewable resources produced with SMC technology - Considering a bus component as example,“ *INDUSTRIAL CROPS AND PRODUCTS*, pp. 132-145, 8 März 2006.
- [58] Lautenschläger, M.; Scheiwe, M.H.; Weidmann, K.A.; Henning, F.; Elsner, P.: „Study of Influencing Factors on the Flowability of Jute Nonwoven Reinforced Sheet Molding Compound,“ *World Academy of Science, Engineering and Technology*, pp. 50-55, 2017.
- [59] Medina, L.: „Basaltfaser-Hybridstrukturen als Verstärkungsfasern für Verbundwerkstoffe,“ in *CCeV-AG Biocomposites*, Kaiserslautern, 2018.
- [60] Asadi, A.; Baaij, F.; Mainka, H.; et al.: „Basalt fibers as a sustainable and cost-effective alternative to glass fibers in sheet molding compound (SMC),“ *Composites Part B*, pp. 210-218, 9 Mai 2017.
- [61] Sueck, T.: *Neue UP-Harze für das SMC- und BMC-Verfahren*, Cottbus : Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg, 2008.

- [62] Schönthaler, W.: „Schrumpfarme UP-Preßmassen und -Prepreg,“ *AVK-Tagungshandbuch*, 1970.
- [63] Demmler und Lawonn, „Schrumpfarme ungesättigte Polyesterharze für das Warmpressen,“ *AVK-Tagungshandbuch*, 1970.
- [64] Baerlocher GmbH, „Baerlocher Worldwide,“ 2018. [Online]. Available: <https://www.baerlocher.com/downloads/#p482>. [Zugriff am 18 07 2018].
- [65] Gerthsen, T.: *Chemie für den Maschinenbau 2 - Organische Chemie für Kraft- und Schmierstoffe; Polymerchemie für Polymerwerkstoffe*, Karlsruhe: Universitätsverlag Karlsruhe, 2008.
- [66] Rayle, J.W.; Cassil, D.W, et al.: „Advancements in Injection In-Mold Coating Technology,“ *METAL FINISHING*, Nr. September , pp. 41-44, 1995.
- [67] Lehmann&Voss&Co., *Carrier Foils for SMC-Production Technisches Datenblatt*, Hamburg: Lehman&Voss&Co.KG, 2013.
- [68] POLYTEC HOLDING AG , „PASSION FOR POLYTEC - Geschäftsbericht 2015,“ Friedrich VDV, Linz, 2015.
- [69] Nuplex Industries Ltd., 2014. [Online]. Available: <http://www.nuplex.com/composites/processes/hot-moulding-processes>. [Zugriff am 22 06 2018].
- [70] Ooms, P.: *Qualität kein Standard, sondern ein Prozess*, Osnabrück: 1. Internationales Lorenz-Thermoset-BMC/SMC/CIC-Symposium, 2016.
- [71] Rodriguez, E.: „On the Thickening Mechanism of Unsaturated Polyesters by Alkaline Earth Oxides and Hydroxides,“ *Journal of Applied Polymer Science* 40, pp. 1847-1855, 1990.
- [72] Raddatz, A.: „TU Chemnitz,“ 28. 03. 2018. [Online]. Available: <https://www.leichtbau.tu-chemnitz.de/>. [Zugriff am 09. 05. 2018].
- [73] Gortner, F.; Mitschang, P.: *Regenerative and bio-based Materials für Sheet Molding Compounds (SMC)*, Xi'an, China: 21st Conference on Composite Materials (ICCM-21), 2017.
- [74] Schürmann, H.: *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden*, Heidelberg: Springer-Verlag, 2007.
- [75] Potyra, T.; Graf, M.; Reuther, E.: „Direct Compounding - Insight and results of the first full scale pilot plant,“ in *10th ACCE, 15.-16.September*, Troy (MI), 2010.

- [76] N.N.: „SMC-Directline Herstellung langfaserverstärkter duromerer Faververbundbauteile im Direktverfahren,“ in *AVK-Tagung*, Stuttgart, 2011.
- [77] Kuppinger, J.; Henning, F.: *Leichtbauweise - aktuelle Herausforderungen und Lösungsansätze*, Hochschulcampus Tuttlingen : Leichtbauworkshop 2013, 2013.
- [78] Sommer, M.: „SMC und BMC Neue Anwendungen - neue Märkte,“ *Kunststoffe*, pp. 226-227, Oktober 2001.
- [79] Aubry, J.: „HexMC - bridging the gap between prepreg and SMC,“ *REINFORCEDplastics*, pp. 38-40, June 2001.
- [80] Türk, O.; Zur Heide Schulte, J.: „Leichte Klappe - Kohlenstofffaser-SMC für die Heckdeckel-Innenschale eines Sportwagens,“ *Lightweight Design*, pp. 26-32, Januar 2010.
- [81] Bruderick, M.; Shinedling, M.; Kiesel, M.: „ Applications of Carbon Fiber SMC for the Dodge Viper“, 2002.
- [82] Evans, A.D.; Qian, C.C.; Turner, T.A.; Harper, L.T.; Warrior N.A.: „Flow characteristics of carbon fibre moulding compounds,“ *Composites: Part A*, pp. 1-12, 2016.
- [83] Menzolit®, „Menzolit - Datenblätter - SMC0150,“ 21. 03. 2014. [Online]. Available: www.menzolit.com. [Zugriff am 22. 10. 2017].
- [84] Menzolit®, „Menzolit - Datenblätter - SMC0430,“ 21. 03. 2014. [Online]. Available: www.menzolit.com. [Zugriff am 22. 10. 2017].
- [85] Polynt Composites Germany GmbH, „Polynt - Datenblätter - SMCarbon®90 CF60-3k,“ [Online]. Available: www.polynt.com. [Zugriff am 22. 10. 2017].
- [86] Polynt Composites Germany GmbH, „Polynt - Datenblätter - SMCarbon® 90 CF60-12k,“ [Online]. Available: www.polynt.com. [Zugriff am 22. 10. 2017].
- [87] Polynt Composites Germany GmbH, „Polynt - Datenblätter - SMCarbon® 90 CF50-3k,“ [Online]. Available: www.polynt.com. [Zugriff am 22. 10. 2017].
- [88] Swentek, I.; Greydanus, S.; Schmidt, A.; Ter Heide, S.: „High-performance epoxy/carbon fiber SMC,“ *JEC COMPOSITES MAGAZINE* , pp. 52-56, N°119 März 2018.
- [89] NORDAM Group Inc. , „Boeing 787 features composite window frames,“ *REINFORCEDplastics*, p. 4, March 2007.

- [90] BMW Group - Pressearchiv Deutschland, 09 2013. [Online]. Available: <https://www.press.bmwgroup.com/deutschland/photo/detail/P90134007/der-neue-bmw-m3-m4-leichtbaukonzept-heckklappe-09-2013>. [Zugriff am 13. 06. 2018].
- [91] DSM Composite Resins, „Carbon fibre SMC halves weight of automotive parts,“ *REINFORCEDplastics*, p. 16, July/August 2003.
- [92] Rademacker, T.: „CFRP RECYCLING - BUSINESS OPPORTUNITY,“ carboNXT®, Darmstadt, 2018.
- [93] Gebhard, K.: „Umweltdatenbank,“ 2018. [Online]. Available: <https://www.umweltdatenbank.de/cms/lexikon/42-lexikon-p/1354-pyrolyse.html>. [Zugriff am 13 06 2018].
- [94] Placke, M.: *Perspektiven von Duroplasten*, Osnabrück: 1. internationales Lorenz-Thermoset-BMC/SMC/CIC-Symposium, 2016.
- [95] Graf, M.; Henning, F.; Reuther, E.: „SMC-Direktverfahren für mehr Wirtschaftlichkeit,“ *Lightweight Design*, pp. 44-47, August 2011.
- [96] Ooms, P.: *Grundlagen BMC/CIC/SMC*, Osnabrück: 1. internationales Lorenz-Thermoset-BMC/SMC/CIC-Symposium, 2016.
- [97] Türk, O.: *Stoffliche Nutzung nachwachsender Rohstoffe*, Wiesbaden: Springer Verlag, 2014.
- [98] Vogt, D.; Karus, M.; Ortmann, S.; Schmidt, C.; Gahle, C.: „Firmenhomepage nova-institut,“ Januar 2006. [Online]. Available: http://nova-institut.de/pdf/06-01_WPC-Studie.pdf. [Zugriff am 29 06 2019].
- [99] Rhenoflex GmbH, „Firmenhomepage Rhenoflex,“ 2018. [Online]. Available: <https://rhenoflex.de/product/rx-v-5000-6/>. [Zugriff am 29 06 2019].
- [100] Müssig, J.; Schönfeld, U.; von Buttlar, H.-B.; Schmehl, M.: „Karosserie aus Naturfasern und Pflanzenöl,“ *Kunststoffe*, Nr. 3, pp. 78-83, 2007.
- [101] Müssig, J.; Schmehl, M.; et al.: „Exterior components based on renewable resources produced with SMC technology - Considering a bus component as example,“ *INDUSTRIAL CROPS AND PRODUCTS*, pp. 132-145, 8.März 2006.
- [102] Morasch, A.; Prievitzer, J.; Baier, H.: „Zur ganzheitlichen Bewertung von Werkstoffen am Beispiel von naturfaserverstärkten und glasfaserverstärkten Kunststoffen,“ Technische Universität München (TUM), München, 2011.
- [103] van Voorn, B.; Smit, H.H.G.; Sinke, R.J.; de Klerk, B.: „Natural fibre reinforced

- sheet moulding compound," *Composites Part A*, pp. 1271-1279, 2001.
- [104] Mehta, G.; Mohanty, A.K.; Thayer, K.; Misra, M.; Drazal, L.T.: „Novel Biocomposites Sheet Molding Compounds for Low Cost Housing Panel Applications," *Journal of Polymers and the Environment*, pp. 169-175, April 2005.
- [105] Bledzki, A.K.; Gassan, J.: „Composites reinforced with cellulose based fibers," *PROGRESS IN POLYMER SCIENCE*, pp. 221-274, 2 Dezember 1998.
- [106] Lee, E. C.; Flanigan, C. M.; et al.: „Hemp Fiber Reinforced Sheet Molding Compounds For Automotive Applications," Ford Motor Company, Dearborn, MI 48124.
- [107] Williams, K.A.; Flanigan, C.M.; et al.: „NATURAL FIBERS - A NOVEL APPROACH TO REINFORCING AUTMOTIVE COMPOSITES," Ford Motor Company, Dearborn, MI 48124.
- [108] Türk, O.; Schönfeld U.; Dippon, K.: „Ultra-LowEmissions Formteile für den Automobilinnenraum: Eine neue SMC-Generation auf der Basis von Epoxydharzen aus nachwachsenden Rohstoffen," AVK , Essen, 2006.
- [109] Fachagentur nachwachsende Rohstoffe, „Fachagentur nachwachsende Rohstoffe - Projektverzeichnis," 01. 07. 2016. [Online]. Available: www.fnr.de. [Zugriff am 21. 10. 2017].
- [110] Lorenz Kunststofftechnik GmbH, „Kunststoff Magazin Online," 10 2015. [Online]. Available: <https://www.kunststoff-magazin.de/gruene-werkstoffe/duroplaste-feuerfest-spritzbar-und-oeko.htm>. [Zugriff am 5. 12. 2017].
- [111] Lorenz Kunststofftechnik GmbH, „Industriezeitschrift," 26. August 2015. [Online]. Available: <http://www.industriezeitschrift.de/nachrichtenleser/feuerfest-spritzbar-und-oeko.html>. [Zugriff am 26. 10. 2017].
- [112] DIN EN 14598-3: 2005-07, *Verstärkte härtbare Formmassen - Spezifikation für Harzmatten (SMC) und faserverstärkte Pressmassen (BMC) - Teil 3: Spezifische Anforderungen.*
- [113] „REACH - was ist das?," Umwelt Bundesamt, 01 Juni 2007. [Online]. Available: <https://www.reach-info.de/>. [Zugriff am 02 Dezember 2018].
- [114] DSM Composite Resins, *Produktdatenblatt P17-02*, Düsseldorf, März 2014.
- [115] DSM Composite Resins, *Produktdatenblatt P18-03*, Düsseldorf, Februar 2016.
- [116] Reichhold, *Produktdatenblatt POLYLITE® 661-000*, Sandefjord (Norwegen), Februar 2007.

- [117] Reichhold, *Produktdatenblatt POLYLITE® 31660-30*, Sandefjord (Norwegen), Juli 2007.
- [118] Reichhold, *NORPOL LP-ADDITIVE 9887*, Sandefjord (Norwegen), 2014.
- [119] Reichhold, *Produktdatenblatt NORPOL LP-ADDITIVE 9880*, Sandefjord (Norwegen), Oktober 2016.
- [120] DSM Composite Resins, *Produktdatenblatt Palapreg H814-01*, Düsseldorf, Februar 2013.
- [121] DSM Composite Resins, *Produktdatenblatt Palapreg H852-03*, Düsseldorf, Februar 2012.
- [122] BYK Additives & Instruments , *Produktdatenblatt BYK-W 996*, Wesel, Oktober 2017.
- [123] BYK Additives & Instruments , *Produktdatenblatt BYK-W 9010*, Wesel, Juli 2005.
- [124] Lehmann&Voss&Co, *Produktdatenblatt LUVATINE VC 104*, Hamburg, April 2016.
- [125] Lehmann&Voss&Co, *Produktdatenblatt LUVATINE VC 105*, Hamburg, April 2016.
- [126] Brohl Chemie, *Produktdatenblatt CC Weiß SL 75%*, Andernach, November 2012.
- [127] Lehmann & Voss & Co., *Produktdatenblatt Luvatol MK35NV*, Hamburg, November 2013.
- [128] OMYA GmbH, *Produktdatenblatt Omyacarb® 5-VA*, Köln, November 2011.
- [129] Martinswerk GmbH, *Produktdatenblatt Martinal® ON-306*, Bergheim, Februar 2017.
- [130] Owens Corning Composite Materials LCC, *Composite Solution, Reinforcement Guide*, Ohio , 2011.
- [131] DIN EN ISO 2555:2017-05, *Kunststoffe - Harze im flüssigen Zustand, als Emulsionen oder Dispersionen - Bestimmung der scheinbaren Viskosität mit einem Rotationsviskosimeter mit Einzelzylinder(ISO/DIS 2555:2017)*.
- [132] DIN EN ISO 527-2:07-2012, *Kunststoffe – Bestimmung der Zugeigenschaften – Teil 2: Prüfbedingungen für Form- und Extrusionsmassen(ISO 527-2:2012)*.

- [133] BYK Additives & Instruments , *Produktdatenblatt BYK-P 9065*, Wesel, April 2017.
- [134] DIN EN ISO 527-4:1997-07, „Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften - Teil 4: Prüfbedingungen für isotrop und anisotrop faserverstärkte Kunststoffverbundwerkstoffe (ISO 527-4:1997); Deutsche Fassung EN ISO 527-4:1997“.
- [135] DIN EN ISO 14125:2011-05, „Faserverstärkte Kunststoffe - Bestimmung der Biegeeigenschaften (ISO 14125:1998 + Cor.1:2001 + Amd.1:2011); Deutsche Fassung EN ISO 14125:1998 + AC:2002 + A1:2011“.
- [136] DIN EN ISO 179-1:2010-11, „Kunststoffe - Bestimmung der Charpy-Schlageigenschaften - Teil 1: Nicht instrumentierte Schlagzähigkeitsprüfung (ISO 179-1:2010); Deutsche Fassung EN ISO 179-1:2010“.
- [137] DIN EN ISO 1172:1998-12, „Textilglasverstärkte Kunststoffe - Prepregs, Formmassen und Lamine - Bestimmung des Textilglas- und Mineralfüllstoffgehalts; Kalzinierungsverfahren (ISO 1172:1996); Deutsche Fassung EN ISO 1172:1998“.
- [138] GMW3259, *Mildrew Resistance*, 5th Edition Hrsg., 5th Edition, September 1, 2016, 2016.
- [139] Menzolit®, „Menzolit - Datenblätter - SMC 0400,“ 21 03 2014. [Online]. Available: www.menzolit.com. [Zugriff am 22 10 2017].
- [140] Menzolit®, „Menzolit - Datenblätter - SMC0500,“ 21 03 2014. [Online]. Available: www.menzolit.com. [Zugriff am 22 10 2017].
- [141] Menzolit®, „Menzolit - Datenblätter - SMC1400,“ 21 3 2014. [Online]. Available: www.menzolit.com. [Zugriff am 22 10 2017].
- [142] Menzolit®, „Menzolit - Datenblätter - SMC2400,“ 21 03 2014. [Online]. Available: www.menzolit.com. [Zugriff am 22 10 2017].
- [143] Lombard, L., Serrato-Diaz, L.M., Cheewangkoon, R., French-Monar, R.D., Decock, C. and Crous, P.W.: „Phylogeny and taxonomy of the genus *Gliocephalotrichum*,“ *Persoonia: Molecular Phylogeny and Evolution of Fungi*, Bd. 32, Nr. doi: 10.3767/003158514X680261, p. 127, 2014.
- [144] Chen, Q., Hou, L.W., Duan, W.J., Crous, P.W., Cai, L.: „Didymellaceae revisited. *Stud. Mycol.*,“ <https://doi.org/10.1016/j.simyco.2017.06.002>, 2017.
- [145] Webster, J., Weber, R.: „Introduction to fungi,“ Cambridge University Press, Cambridge, 2007.

- [146] Chávez, R., Bull, P. and Eyzaguirre, J.: „The xylanolytic enzyme system from the genus *Penicillium*,“ *Journal of biotechnology*, Bd. 123/4, Nr. doi:10.1016/j.jbiotec.2005.12.036, pp. 413-433, 2006.
- [147] Summerell, B.A., Laurence, M.H., Liew, E.C. and Leslie, J.F.: „Biogeography and phylogeography of *Fusarium*: a review,“ *Fungal Diversity*, Bd. 44/1, Nr. doi: 10.1007/s13225-010-0060-2, pp. 3-13, 2010.
- [148] Panagiotou, G., Kekos, D., Macris, B.J. and Christakopoulos, P.: „Production of cellulolytic and xylanolytic enzymes by *Fusarium oxysporum* grown on corn stover in solid state fermentation,“ *Industrial Crops and Products*, Bd. 18/1, Nr. doi: 10.1016/S0926-6690(03)00018-9, pp. 37-45, 2003.
- [149] Thomma, B.P.H.J.: „*Alternaria* spp.: from general saprophyte to specific parasite,“ *Mol. Plant Pathol.* , Bd. 4, Nr. <https://doi.org/10.1046/j.1364-3703.2003.00173.x>, pp. 225-226, 2003.
- [150] Brotman, Y., Kapuganti, J.G., Viterbo, A.: „*Trichoderma*. Curr. Biol. 20,“ <https://doi.org/10.1016/j.cub.2010.02.042>, 2010.

Publikationen und Konferenzbeiträge

Zeitschriften

Gortner, F.; Medina, L.; Mitschang, P.: Influence of Textile Reinforcement on Bending Properties and Impact Strength of SMC-components; KMUTNB: International Journal of Applied Science and Technology Vol 8, No 4, Seite 259-269

Arnold, M.; Gortner, F.; Cojutti, M.; Wahl, P. & Mitschang, P.: Influence of textile parameters on the out-of-plane permeability of carbon fiber non-crimp fabrics; ACL: Advanced Composite Letters; Volume 25, Issue 5, September - October 2016; p.121-126

Gortner, F.; Mitschang, P.: Die Nachhaltigkeit steckt im Detail - Biobasierte Füllstoffe für Sheet-Molding-Compound-Anwendungen, Kunststoffe 05/2017, S.86-89

Gortner, F.; Mitschang, P.: Sustainability depending on the details - Bio-Based Filler Materials for Sheet Molding Compound Applications, Kunststoffe International, 05/2017, S.49-52

Gortner, F.; Schöffler, A.; Fischer, J.; Mitschang, P.: Bio-based filler for SMC, bioplasticsMAGAZINE, 03/2018, S. 34-35.

Gortner, F.; Medina, L.: SMC - Ganz maßgeschneidert; CCeV-Magazin Heft 01/2015, Seite 49-50

Gortner, F.: Fahrzeugteile pflanzen und ernten, CCeV Magazin, 2/2017, S.37

Gortner, F.: Fahrzeugteile anpflanzen und ernten, CVC News 2017 S. 36-37

Gortner, F.: Effiziente Prozesskette zur Verarbeitung von naturfaserverstärkten Thermoplasten, CVC News 2|2018, S. 30-32

Symposien und Konferenzbeiträge

D. Schommer, M. Duhovic, F. Gortner und M. Maier, Advanced Simulation of Polymer Composite SMC Compression Molding using Fluid-Structure Interaction in LS-DYNA® 13th International LS-DYNA User Conference, Detroit, 8.-10. Juni 2014

- Gortner, F.; Medina, L.; Mitschang, P.: Advanced SMC processing in combination with textile reinforcement, ICCM20, 19.-24. Juli 2015, Copenhagen Dänemark
- Gortner, F.; Medina, L.; Mitschang, P.; Advanced SMC processing with continuous fiber reinforcement, 1st International Composites Congress, 21.-22. September 2015, Stuttgart, Deutschland
- Medina, L.; Gortner, F.; Nechwatal, A.: NATURAUTO: Development of a new test tool to measure emissions and odors from NF composites, Bio!CAR-Conference on biobased Materials for Automotive Applications, 24.-25. September 2015, Stuttgart, Deutschland
- Gortner, F.; Medina, L.: NATURAUTO: Einfluss der Verarbeitungsparameter und der Prüfnorm auf die mechanischen Eigenschaften von NFPP-Verbundwerkstoffen, 2. Fachtagung NATURFASERVERSTÄRKTE KUNSTSTOFFE, 10. Mai 2016, Kaiserslautern, Deutschland
- Gortner, F.; Medina, L.; Mitschang, P.: Optimized bast fiber reinforced polypropylene for automotive applications, 17th European Conference on Composites Materials, 26.-30. Juni 2016, München, Deutschland
- Džalto, J.; Mitschang, P.; Gortner, F.: Neue Konzepte zur Verarbeitung von „I Kunststoffen, 4a Technologietag 2017 Leichtbau und Composites 23.-24. März 2017, Schladming, Österreich
- Gortner, F.; Mitschang, P.: Regenerative and bio-based materials for sheet molding compound, International Conference of Composite Materials ICCM21, 20.-25. August 2017, Xi'an, China
- Gortner, F.; Mitschang, P.: Natural fibers and bio-based filler materials for fiber-reinforced polymer composites (FRPC), Sustainability Workshop, 13. November 2017, TU Kaiserslautern
- Gortner, F.; Mitschang, P.: Einsatz nachwachsender Füllstoffe für duroplastische Anwendungen, Sitzung der CCeV-Arbeitsgruppe „Biocomposites“, 06. September 2018, TU Kaiserslautern

Gortner, F.; Mitschang, P.: Bio-basierte und nachwachsende Füllstoffe für duroplastische Fließpressmassen; 22. Symposium Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde, 26.-28. Juni 2019, Kaiserslautern – eingereicht und angenommen

Gortner, F.; Mitschang, P.: Effiziente Prozesskette zur Verarbeitung von naturfaserverstärkten Thermoplasten; 22. Symposium Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde, 26.-28. Juni 2019, Kaiserslautern – eingereicht und angenommen

Betreute studentische Arbeiten

- Christian Honecker, Charakterisierung endlosfaserverstärkter SMC-Bauteile, IVW-Berichtsnummer 15-060, 2015
- Philip Tent-Beaumont, Charakterisierung von SMC-Harzpasten, IVW-Berichtsnummer 15-033, 2015
- Thayananthan Thivakaran, Untersuchungen zum Einfluss von Probekörpergeometrie und Prüfnorm auf die mechanischen Eigenschaften von Naturfaserbauteilen, IVW Berichtsnummer 16-013, 2016
- Andreas Milch, Einfluss der Variation von Verstärkungsfasern und Verarbeitungsparametern auf die strukturmechanischen Eigenschaften von EP-SMC, unterliegt Geheimhaltung, 2016
- Andreas Milch, Einfluss lokaler Endlosfaserverstärkung auf die strukturmechanischen und crashrelevanten Eigenschaften von SMC-Bauteilen, IVW-Berichtsnummer 16-012, 2016
- Waldemar Wagenleitner, Untersuchungen zur Additivierung naturfaserverstärkter Kunststoffe für Automobilanwendungen, IVW-Berichtsnummer 17-004, 2017
- Punjabi Mohammad Shoeb Mohammad Irfan, Untersuchungen zur Herstellung von biologisch basierten SMC – Harzpasten, IVW-Berichtsnummer 18-065, 2017
- Punjabi Mohammad Shoeb Mohammad Irfan, Naturfaserverstärkte Duroplastprepregs, IVW-Berichtsnummer 18-066, 2017
- Bhargava Chary Ambarepeta, Untersuchungen zur Herstellung von SMC-Harzpasten mit geringer spezifischer Dichte, IVW-Berichtsnummer 17-027, 2017
- Maximilian Salmins, Untersuchungen zur Herstellung von SMC-Harzpasten mit geringer spezifischer Dichte im Technikumsmaßstab, IVW-Berichtsnummer 17-047, 2017
- Divya Vani Tirukolluri, Untersuchungen zur Schimmelbildung an biologisch basierten SMC-Harzpasten, IVW-Berichtsnummer 18-015
- Viswanathan Narayanan, Untersuchungen zur Infraroterwärmung und Verarbeitung additiver naturfaserverstärkter Thermoplaste, IVW-Berichtsnummer 18-071, 2018