

**Herstellung, Charakterisierung,
Modellierungsansätze und Simulation
von edelstahltextilverstärktem Polypropylen
(ETV-PP) und Langglasfaserthermoplasten mit
PP-Matrix (ETV-PP/GF)**

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

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Dipl.-Ing., Dipl.-Ing. (FH) André Meichsner
aus Stollberg / Erzgebirge

Tag der mündlichen Prüfung: 28. August 2009

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Christian Schindler
1. Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Martin Maier
2. Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Paul Ludwig Geiß

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Zeitraum von 2006 bis 2009 während meiner Tätigkeit als Doktorand in der Abteilung Berechnung und Konstruktion der Institut für Verbundwerkstoffe (IVW) GmbH in Kaiserslautern.

Mein außerordentlicher Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Professor Dr.-Ing. Martin Maier für die stets menschliche und umfassende Betreuung, Unterstützung und Diskussionsbereitschaft. Weiterhin danke ich ihm für die Übernahme des Erstgutachtens.

Bei Herrn Professor Dr.-Ing. Christian Schindler und Herrn Professor Dr.-Ing. Paul Ludwig Geiß bedanke ich mich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes bzw. des Zweitgutachtens und ihrem Interesse an meiner Arbeit.

Mein Dank gilt zudem Herrn Professor Dr.-Ing. Peter Mitschang, Techn.-Wiss. Direktor der Abteilung Verarbeitungstechnik, sowie Herrn Dr.-Ing. Ralf Schledjewski, Gruppenleiter der Presstechnik, für die zur Verfügung gestellte FKV-Fertigungstechnik.

Allen Mitarbeitern der IVW GmbH danke ich für die kompetente Unterstützung und die sehr gute Arbeitsatmosphäre. Besonders hervorheben möchte ich meine Kollegen Herrn Dipl.-Ing. Nikolai Voll und Herrn Dr.-Ing. Sebastian Schmeer für die fruchtbaren Diskussionen, Ratschläge und natürlich für die schöne gemeinsame Zeit in der Abteilung Berechnung und Konstruktion herzlich danken. Für die praktische Unterstützung danke ich meinen Kolleginnen und Kollegen Frau Dipl.-Ing. (FH) Valentine Kessler, Frau Sabine Yancey, Herrn Dipl.-Ing. (FH) Ralph Schneider, Herrn Stefan Gabriel, Herrn Dipl.-Ing. (FH) Michael Päßler, Herrn Erhard Natter, Herrn Dr. Sergiy Grishchuk, Herrn Dipl.-Ing. Andreas Noll, Herrn Hermann Giertzsch und Herrn Ralf Schimmele. Weiterhin wäre die Durchführung der Arbeit ohne den Beitrag meiner Studienarbeiter, Herrn Roland Arendt, Herrn Florian Pfaff, Herrn Vincent Weissenberger und Diplomarbeiterin Frau Anita Dimitrova kaum möglich gewesen, mein Dank an dieser Stelle auch an Euch.

Abschließend noch ein Dank an die DFG für die Förderung des Forschungsvorhabens im Rahmen des DFG-Graduiertenkollegs 814-2 „Ingenieurmaterialien auf verschiedenen Skalen: Experiment, Modellierung und Simulation“ und der Firma FACT-Kunststoffe GmbH für das kostenfrei zur Verfügung gestellte LFT-Material.

Ein besonders herzlicher Dank gebührt meinen Eltern, denen ich für die hingebungsvolle Unterstützung und Motivation auf meinem bisher so erfolgreichen Bildungsweg meine Arbeit widmen möchte.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Liste der verwendeten Abkürzungen und Symbole	VI
Kurzfassung.....	X
Abstract.....	XI
1 Einführung in die Thematik.....	1
1.1 Einleitung.....	1
1.2 Stand der Technik	2
1.2.1 Polypropylenwerkstoffe (PP).....	2
1.2.2 Langfaserthermoplastwerkstoffe (LFT).....	4
1.2.2.1 Herstellung und Verarbeitung	4
1.2.2.2 Anwendungen.....	6
1.2.2.3 Eigenschaften von LFT-Werkstoffen	7
1.2.3 Qualitative Eigenschaftsprofile metallischer Werkstoffe und deren Eignung zur Verstärkung.....	9
1.2.4 Textiltechnik	11
1.2.4.1 Allgemeines	11
1.2.4.2 Metallische Textilien	12
1.2.4.3 Herstellung metallischer Gewebe	14
1.2.5 Adhäsion, Adhäsionsmodelle und Einfluss der Oberflächen.....	15
1.2.6 Metallverstärkte Polymere und Composites	17
1.2.7 Mikromechanische Modellierung des Werkstoffverhaltens.....	18
1.3 Motivation, Ziele und Vorgehen.....	20
2 Werkstoffe und textile Verstärkungen.....	23
2.1 X5CrNi1810 (Werkstoffnummer: 1.4301)	23

2.2	PP- und LFT-Werkstoffe.....	23
2.2.1	PP-Werkstoffe	23
2.2.2	LFT-Werkstoff	23
2.3	Textile Verstärkungen	24
3	Mechanische Charakterisierung der Verbundwerkstoffkomponenten – Draht, Textilien und Matrices	25
3.1	Quasistatische Zugeigenschaften von Edelstahlverstärkungsdrähten mit verschiedenen Drahtdurchmessern.....	25
3.1.1	Probenvorbereitung und Versuchsdurchführung.....	25
3.1.2	Ergebnisse und Diskussion	26
3.2	Quasistatische Zugeigenschaften von verschiedenen Edelstahlverstärkungstextilien	28
3.2.1	Probenvorbereitung und Versuchsdurchführung.....	28
3.2.2	Ergebnisse und Diskussion	29
3.3	Dynamische Durchstoßeigenschaften von verschiedenen Edelstahlverstärkungstextilien	32
3.3.1	Probenvorbereitung und Versuchsdurchführung.....	32
3.3.2	Ergebnisse und Diskussion	33
3.4	Metallografie.....	35
3.5	Thermisches Verhalten und Beständigkeit der PP-Matrixsysteme	38
3.5.1	Allgemeines und Versuchsdurchführung.....	38
3.5.2	Ergebnisse und Diskussion	40
3.6	Werkstoffstruktur und Probenentnahme	42
3.7	Charakterisierung der Matrix- und Einbettungswerkstoffe im quasistatischen Zugversuch.....	46
3.7.1	Probenvorbereitung und Versuchsdurchführung.....	46
3.7.2	Ergebnisse und Diskussion	48

3.8	Charakterisierung der Matrix- und Einbettungswerkstoffe mittels hochdynamischem Durchstoßversuch	50
3.8.1	Probenvorbereitung und Versuchsdurchführung	50
3.8.2	Ergebnisse und Diskussion	51
4	Herstellung und mechanische Eigenschaften von edelstahltextilverstärktem PP und PP/GF (LFT)	53
4.1	Variation ausgewählter Herstellungsparameter	53
4.1.1	Herstellung von PP- und PP/GF-Plattenhalbzeugen	53
4.1.2	Herstellung der edelstahltextilverstärkten Verbunde (ETV-Verbunde) im Film-Stacking-Verfahren mit Variation ausgewählter Fertigungsparameter	54
4.1.3	Mechanisches Verhalten unter einachsiger Zugbeanspruchung	56
4.1.3.1	Probenvorbereitung und Versuchsdurchführung	56
4.1.3.2	Ergebnisse und Diskussion	56
4.1.4	Mechanisches Verhalten im hochdynamischen Durchstoßversuch	60
4.1.4.1	Probenvorbereitung und Versuchsdurchführung	60
4.1.4.2	Ergebnisse und Diskussion	61
4.2	Mikroskopische Untersuchungen an ETV-PP und ETV-PP/GF	66
4.2.1	Probenpräparation und Mikroskopieverfahren	66
4.2.2	Lichtmikroskopische Untersuchungen	66
4.2.3	Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen	71
4.3	Kombination ausgewählter Materialparameter	73
4.3.1	Anpassung des Fertigungsprozesses	73
4.3.2	Eingesetzte Matrix- bzw. Einbettungswerkstoffe und Edelstahlverstärkungstextilien	75
4.3.3	Mechanische Charakterisierung der neuartigen ETV-Verbundwerkstoffe im Zugversuch	76

4.3.3.1	Probenvorbereitung und Versuchsdurchführung	76
4.3.3.2	Ergebnisse und Diskussion	77
4.3.4	Mechanische Charakterisierung der neuartigen ETV- Verbundwerkstoffe im hochdynamischen Durchstoßversuch.....	84
4.3.4.1	Probenvorbereitung und Versuchsdurchführung	84
4.3.4.2	Ergebnisse und Diskussion	85
5	Haftungsoptimierung und weiterführende Charakterisierung von ETV- Verbunden mit sehr guten Impakteigenschaften	92
5.1	Haftungsoptimierung mittels Druckluftstrahlen	92
5.2	Einfluss der Vorbehandlung auf die quasistatischen Zugeigenschaften der ETV-Verbundwerkstoffe	93
5.2.1	Grundsätzliches	93
5.2.2	Ergebnisse und Diskussion	93
5.3	Rasterelektronenmikroskopie an Zugbruchflächen behandelte und unbehandelte Proben	95
5.4	Einfluss der Vorbehandlung auf die interlaminae Scherfestigkeit der ETV- Verbundwerkstoffe	97
5.4.1	Probenvorbereitung und Versuchsdurchführung	97
5.4.2	Ergebnisse und Diskussion	98
6	Berechnung des Zug-E-Moduls von ETV-PP- und ETV-PP/GF-Werkstoffen mittels mikromechanischer Modelle	100
6.1	Modellierungsansätze und Simulation	100
6.2	Ergebnisse und Diskussion	104
7	Zusammenfassung und Ausblick	106
8	Anhang	109
9	Literaturverzeichnis	114
	Liste der Publikationen	125

Liste der betreuten Studien- und Diplomarbeiten	125
Lebenslauf.....	126

Liste der verwendeten Abkürzungen und Symbole

Kurzform	Bedeutung
Al	Aluminium
Arall	aramidfaserverstärktes Aluminiumlaminat
BMC	bulk molding compounds
C	Kohlenstoff
CAD	computer aided design
CAE	computer aided engineering
CP	Copolymer
Cr	Chrom
1D, 2D und 3D	ein-, zwei- und dreidimensional
DB	Drahtbruch
DMTA	dynamisch-mechanisch-thermische Analyse
DSC	differential scanning calorimetry
EG	Edelstahlgewebe
EHZ	Einheitszelle
ESG	Edelstahlschweißgitter
ETV	Edelstahltextilverstärkung, edelstahltextilverstärkt
FE	finite Elemente
FKV	Faserkunststoffverbunde
Flä.-gew.	Flächengewicht
FML	Faser-Metall-Lamine
GF	Glasfaser
GFK	Glasfaserkunststoffverbund

Kurzform	Bedeutung
Glare	glass fiber reinforced aluminum
GMT	glasmattenverstärkter Thermoplast
HB	Brinellhärte
HDPE	high density polyethylene
HP	Homopolymer
ICM	injection compression molding
IM	injection molding
IVW	Institut für Verbundwerkstoffe GmbH
Kö.-	Köper-
LFRT	long glass fiber reinforced thermoplastics
LFT	Langfaserthermoplast
LFT-G	Langfaserthermoplastgranulat
LGF	long glass fiber
LW-	Leinwand-
MAG	Multiaxialgelege
MB	Matrixbruch
MFR	melt flow rate
Mg	Magnesium
Mn	Mangan
N	Stickstoff
ND	Niederdruck
Ni	Nickel
P	Phosphor
PA	Polyamid
PB	Probenbruch

Kurzform	Bedeutung
PE	Polyethylen
PP	Polypropylen
PP/GF	Polypropylen mit Langglasfaserverstärkung
REM	Rasterelektronenmikroskopie
RTM	resin transfer molding
S	Schwefel
SEM	scanning electron microscopy
SGF	short glass fiber
Si	Silizium
SMC	sheet molding compounds
STR	steel textile reinforcement, steel textile reinforced
SPW	single plain weave
Ti	Titan
UD	unidirektional
UV	ultraviolet
VB	vorbehandelt
μ CT	Mikrocomputertomografie, mikrocomputer-tomografisch

Zeichen	Einheit	Beschreibung
$A_{R_{F1}}$	[mm ²]	Größe der Einspannfläche
B_{KB}	[mm]	Breite der Kurzbiegeprobe
D_D	[mm]	Drahtdurchmesser
D_{KB}	[mm]	Dicke der Kurzbiegeprobe

Zeichen	Einheit	Beschreibung
ds_{Def}	[mm]	differentieller Deformationsweg
E_1	[MPa]	Zug-E-Modul in 1-Richtung
E_{Imp}	[J]	absorbierte Impaktenergie
F_{Dst}	[N]	Durchstoßkraft
F_{KBmax}	[N]	Maximalkraft im Kurzbiegeversuch
l_{0MM}	[mm]	Ausgangslänge des Mikromodells
M_W	[mm]	Maschenweite
R_{F1}	[N]	Gesamtreaktionskraft in der Einspannfläche in 1-Richtung
$R_{FK,i,1}$	[N]	Reaktionskraft am i-ten Knoten in 1-Richtung (Belastungsrichtung)
Δl_{MM}	[mm]	axiale Verlängerung des Mikromodells durch Zugbeanspruchung in 1-Richtung
ε_{11MM}	[-]	axiale Dehnung des Mikromodells in Belastungsrichtung
$\sigma_{R_{F1}}$	[MPa]	Reaktionsspannung in der Einspannung in 1-Richtung
τ_{ILS}	[MPa]	interlaminare Scherfestigkeit

Kurzfassung

Faser-Kunststoff-Verbunde (FKV) werden aufgrund ihres hohen Leichtbaupotentials in vielen Industriebereichen eingesetzt. Eine Verstärkung von Kunststoffen mit Fasern führt zu einer deutlichen Verbesserung der mechanischen Eigenschaften. Positive Veränderungen des Eigenschaftsspektrums sind zum Beispiel deutliche Verbesserungen des Zug-E-Moduls und der Zugfestigkeit. Negative Erscheinungen, die aus der Faserverstärkung resultieren können, sind eine geringere Bruchdehnung des Verbundwerkstoffes und ein spröderes Bruchverhalten bei Impact- und Crashbelastung. Um diesen Nachteil auszugleichen, werden vermehrt Metall-Kunststoff-Composites (Hybridverbundwerkstoffe) entwickelt, bei denen die positiven Eigenschaften von Metallen und Faser-Kunststoff-Verbunden gezielt kombiniert werden, um weitere Eigenschaftsverbesserungen zu erreichen.

Die vorliegende Arbeit behandelt die Entwicklung eines Herstellungsverfahrens sowie die Charakterisierung, Modellierung und Simulation von neuartigen hybriden edelstahltextilverstärkten Polypropylen- (ETV-PP) und Polypropylen/Langglasfaser-Werkstoffen (ETV-PP/GF). Für die Fertigung von ETV-Verbundwerkstoffen wurde ein zweistufiges Verfahren im Labormaßstab erarbeitet und eingeführt. Während der Fertigungsstudien wurden ausgewählte Prozess- und Materialparameter variiert, um deren Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften der neuartigen ETV-Faserkunststoffverbunde (ETV-FKV) zu untersuchen. Nicht in jedem Fall konnte eine eindeutige Abhängigkeit der mechanischen Eigenschaft von der variierten Prozessgröße festgestellt werden. Wenn die Ergebnisse in ihrer Gesamtheit betrachtet werden, treten folgende zwei äußerst positive Effekte in den Vordergrund: Zum einen konnte durch den Einsatz der Edelstahltextilverstärkungen die Fragmentierungsneigung von spröden PP-Matrixsystemen bei Impactbelastung erheblich verringert werden und zum anderen wurde die Energieabsorption bei hochdynamischer Durchstoßbeanspruchung signifikant verbessert. Die mittels Licht- und Rasterelektronenmikroskopie (REM) identifizierte schlechte Stahl/PP-Anhaftung konnte durch eine mechanische Vorbehandlung der Verstärkungstextilien ebenfalls gesteigert werden. Modelle zur mikromechanischen finite Elemente (FE) Simulation des Zug-E-Moduls von ETV-Verbundwerkstoffen wurden entwickelt und anhand von experimentellen Daten verifiziert und validiert.

Abstract

Due to their light-weight potential, fiber-plastic composites are utilized in many industrial sectors. A reinforcement of fiber-plastic materials leads to a definite improvement of mechanical properties. Positive modifications of the property spectrum include, e.g. definite improvements of Young's modulus and tensile strength. Negative aspects possibly resulting from fiber reinforcement cover a low ultimate strain of composite material and an even more brittle behavior during crash- and impact. In order to level out this disadvantage, increasingly metal-plastic-composites (hybrid composites) are being developed, where positive properties of metals and fiber-plastic-composites are specifically combined in order to attain further property improvement.

Present work contributes to manufacturing, characterization, modeling and simulation of high-grade stainless steel textile reinforced polypropylene (STR-PP) and polypropylene/long glass fiber reinforced materials (STR-PP/GF). For the manufacture of STR-composites, the bench scale production of a two-step manufacturing process was developed and introduced. During the studies, pre-selected manufacturing and material parameters were varied to investigate their influence on the residual mechanical properties of these novel STR-composites. Definite dependencies of the mechanical properties on varied process factors were not determined for every case.

Considering these results as a whole, emphasis is placed on the following two fundamental positive perceptions: on the one hand by using stainless steel textile reinforcements the fragmentation tendency of brittle PP matrix systems during impact was reduced, and on the other hand energy absorption during highly dynamic impact load improved significantly.

Likewise, the poor adhesion between steel and PP identified by using a light and scanning electron microscopy (SEM) was improved via mechanical pre-treatment of reinforcement textiles. Models for the micro-mechanical finite element simulation of the E-modulus were developed, verified, and validated on the basis of experimental data.

1 Einführung in die Thematik

1.1 Einleitung

In den letzten Jahrzehnten haben sich die faserverstärkten Kunststoffe ein äußerst breites Anwendungsfeld aufgrund ihres sehr guten Leichtbaupotentials erschlossen. Sie werden vor allem in den Bereichen Fahrzeugbau, Maschinenbau sowie in der Luft- und Raumfahrttechnik eingesetzt, mit dem Ziel, bewegte Massen und somit den Energieverbrauch zu reduzieren. Durch den Einsatz dieser Leichtbauwerkstoffe wird ein wichtiger Beitrag zur Ressourcenschonung und zum Umweltschutz geleistet. Eine bedeutende Gruppe dieser modernen Werkstoffe sind die glasfaserverstärkten Kunststoffe (GFK). Der GFK-Markt weist seit Jahren ein kontinuierliches Wachstum auf, wie anhand von Bild 1.1 deutlich wird.

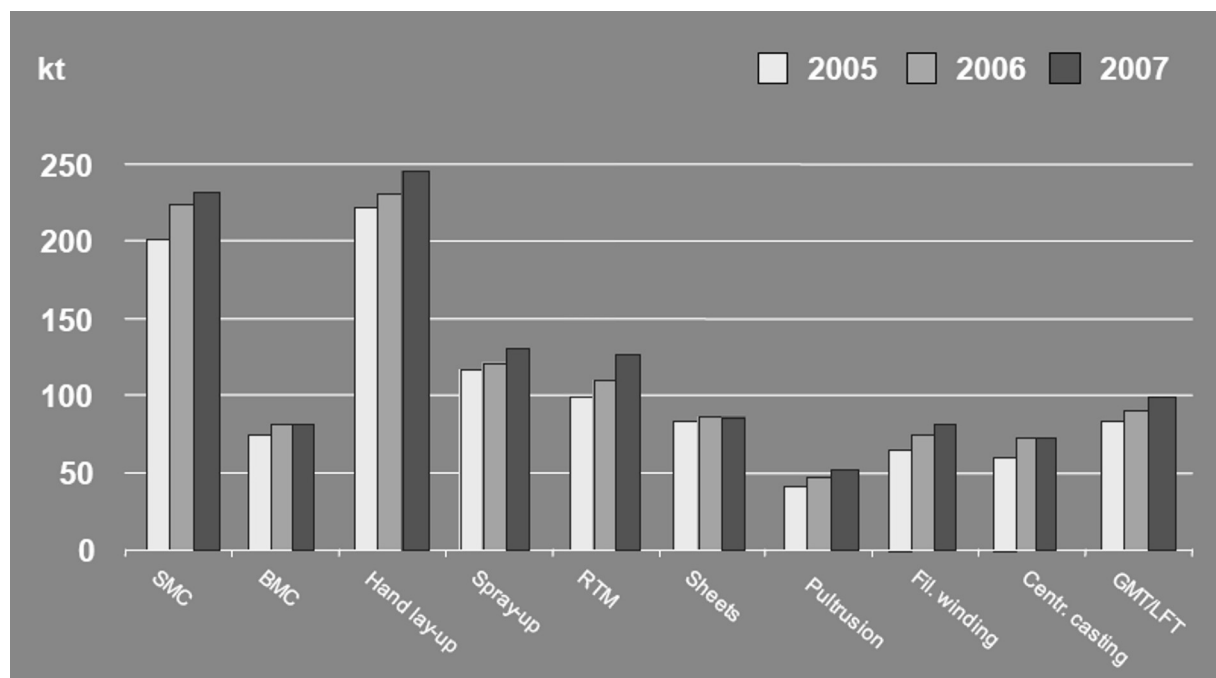


Bild 1.1: GFK-Produktion in Europa von 2005 – 2007 nach Herstellungstechnologien [Wit01]

Ferner wird in Bild 1.1 ersichtlich, dass die Untergruppe der glasmattenverstärkten (GMT) und langfaserverstärkten Thermoplaste (LFT) mit einer Jahresproduktion in 2007 von ca. 100000 t ein wichtiger Bestandteil des europäischen GFK-Marktes ist. Die GMT- und LFT-Werkstoffe gehören wie die Sheet Molding Compounds (SMC) oder Bulk Molding Compounds (BMC) mit duroplastischen Matrices zu den diskonti-

nuierlich faserverstärkten FKV und werden hauptsächlich im Pressverfahren verarbeitet. Die Hauptanwendungsgebiete von LFT sind semistrukturale Bauteile für die Fahrzeuggroßserienfertigung [CRG01].

1.2 Stand der Technik

1.2.1 Polypropylenwerkstoffe (PP)

Die Polypropylenwerkstoffe gehören zur Gruppe der Polyolefine. Sie sind weitgehend erforscht und in der Fachliteratur erörtert. Die Herstellung erfolgt durch Polymerisation von Propylenmonomeren unter Nutzung verschiedener Katalysatorsysteme [Ewe01, GBN01, Goo01, Moo01, NP01]. Die Basis bildet hierbei die Ziegler-Natta-Synthese. Das Bild 1.2 zeigt die Polymerisationsreaktion.

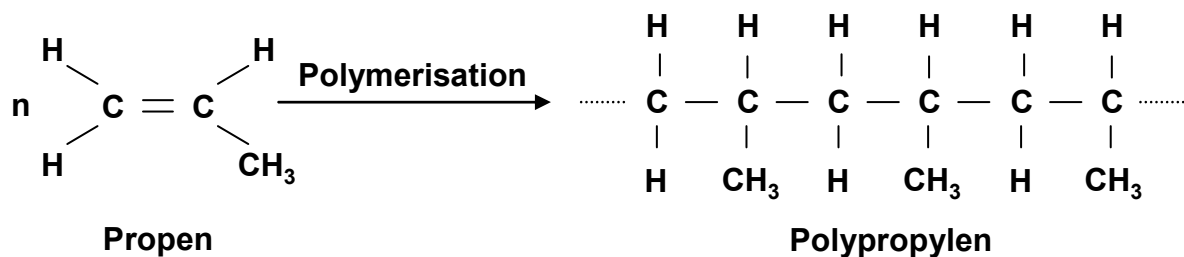


Bild 1.2: Polymerisationsreaktion zur Herstellung von PP [nach Int01]

Bei dieser Polymerisationsreaktion entstehen im Wesentlichen drei Typen von Polypropylen (isotaktisches, syndiotaktisches und ataktisches PP- s. Bild 1.3). Von großer wirtschaftlicher Bedeutung ist das isotaktische PP. Diese Polypropylene unterscheiden sich in der räumlichen Lage ihrer CH₃-Gruppen. Die Reihenfolge und Lage der Methylgruppen wird als Taktizität bezeichnet. Sie hat einen bedeutenden Einfluss auf die Eigenschaften des Polypropylens. Die Struktur und Morphologie beeinflusst ebenfalls signifikant das Werkstoffverhalten, in [Kar01], [Kar02] und [Moo01] wird auf die Struktur / Morphologie eingegangen. Weiterhin neigen die PP-Werkstoffe bei Unterschreitung der Glasübergangstemperatur (ca. -20 bis 0°C) zur Versprödung. Um diesen Effekt zu minimieren, werden PP-Blends mit zähmodifizierenden Zusätzen wie zum Beispiel Elastomere hergestellt [DMM01, GMM01, JUV01, KKS01]. Auch die Bildung von PP-Copolymerisaten mittels Zugabe anderer Alkene (z. B.: Ethylen und Butylen) führt zur Minimierung der Versprödungsneigung bei Tieftemperaturanwendungen [GH01, NPZ01].

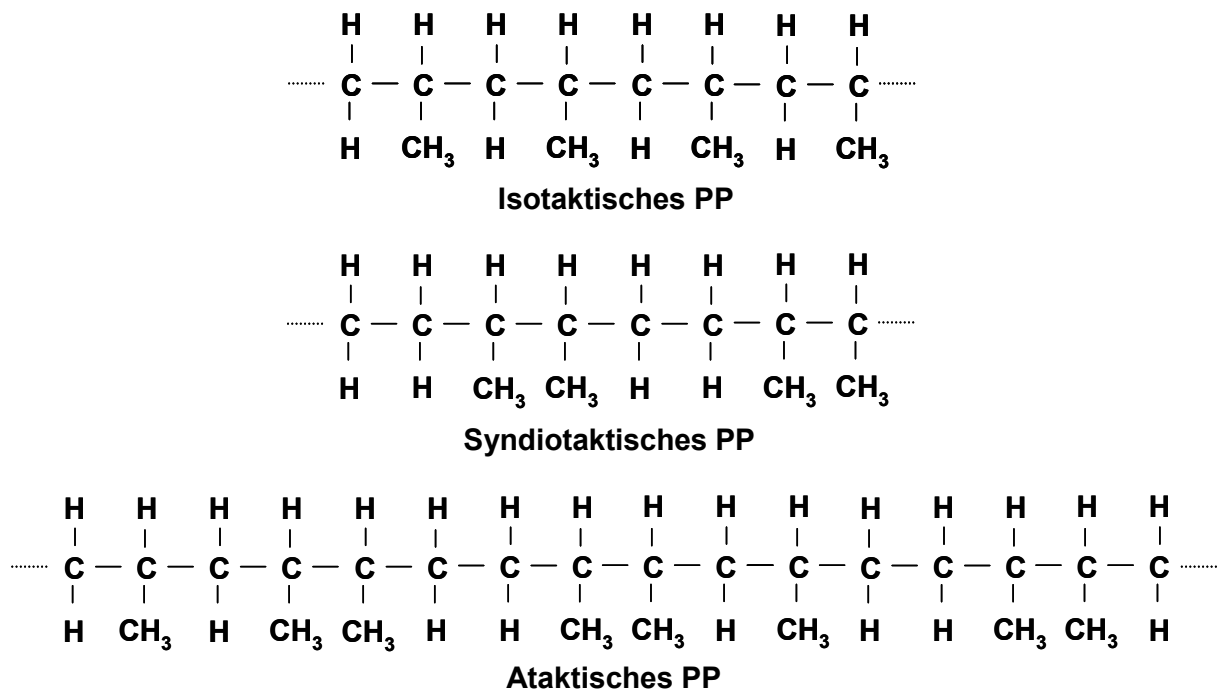


Bild 1.3: PP-Typen [nach Int01]

Im Allgemeinen weisen PP-Werkstoffe eine Reihe von Vorteilen für den großindustriellen Einsatz auf, wie zum Beispiel: geringe Dichte, relativ hoher Kristallitschmelzpunkt, chemische Beständigkeit und hoher Glanz. Um jedoch optimale Endgebrauchseigenschaften zu erreichen, können vor allem die mechanischen Eigenschaften durch Zusatz bestimmter Additive „maßgeschneidert“ werden. Für folgende Eigenschaftserweiterungen sind Zusätze erhältlich:

- Stabilisierung (Wärme und UV-Licht, s. [Den01, Hod01, Pos01])
- Nukleierung (Veränderung der Struktur und Morphologie zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften, s. [Moo01])
- Degradation (durch chemische und physikalische Einflüsse, s. [Kar01])
- Einfärbung (Pigmente)
- Verstärkung (anorganische und organische Stoffe und Fasern)
- Impact-Modifikation (Elastomerzusätze)

Abschließend ist noch festzustellen, dass die resultierende Struktur, Morphologie und der Kristallinitätsgrad von PP-Werkstoffen vom angewendeten Verarbeitungsverfahren abhängig ist [Kar01, Moo01].

1.2.2 Langfaserthermoplastwerkstoffe (LFT)

1.2.2.1 Herstellung und Verarbeitung

Die Entwicklung von faserverstärkten Thermoplastgranulaten erfolgte ursprünglich für die Verarbeitung im Spritzgieß- und Extrusionsprozess. Derartige Granulate sind in verschiedensten Abmessungen und Konfigurationen erhältlich (s. Bild 1.4) [Bra01].

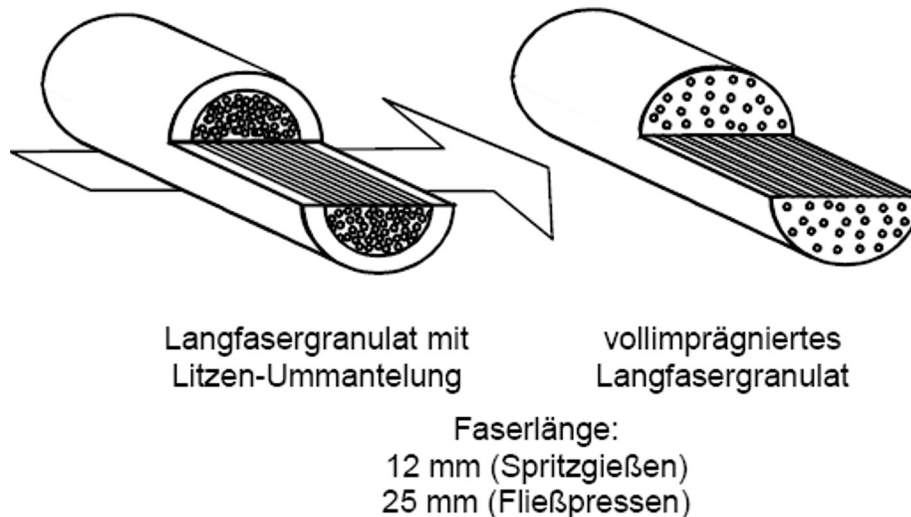


Bild 1.4: Handelsübliche Thermoplastgranulate [nach Bra01, NN01]

Die dargestellten Langfasergranulate werden im Plastifizier-/Press- und Spritzgießverfahren verarbeitet. Hierbei kommen kaum noch Langfasergranulate mit Litzen-Ummantelung zum Einsatz, da sie Schneckenkonfigurationen mit hohem Schereintrag erfordern, um eine vollständige Faserimprägnierung während des Plastifizierens zu erreichen. Die erhöhte Scherung führt aber zu einer massiven Faserschädigung und Faserlängenverkürzung im Extrudat [Bra01, NN01, Wol01].

Die rechts in Bild 1.4 dargestellten vollimprägnierten Langfasergranulate werden mittels Pultrusionsverfahren gefertigt [BJ01, Bra01, Wol01]. Bei diesem Verfahren werden vorgeheizte Endlosglasfaserrovings durch einen Imprägnierkopf geführt. Innerhalb des Imprägnierkopfs erfolgt die Tränkung des Rovings mit PP-Schmelze unter erhöhtem Druck. Anschließend wird der Strang gekühlt und mittels Granulator auf die gewünschte Endlänge geschnitten (Bild 1.4 und 1.5) [BJ01, Bra01]. Hierbei entspricht die Granulatlänge üblicherweise auch der Faserlänge. Das Verfahren ist schematisch in Bild 1.5 dargestellt [Bra01].

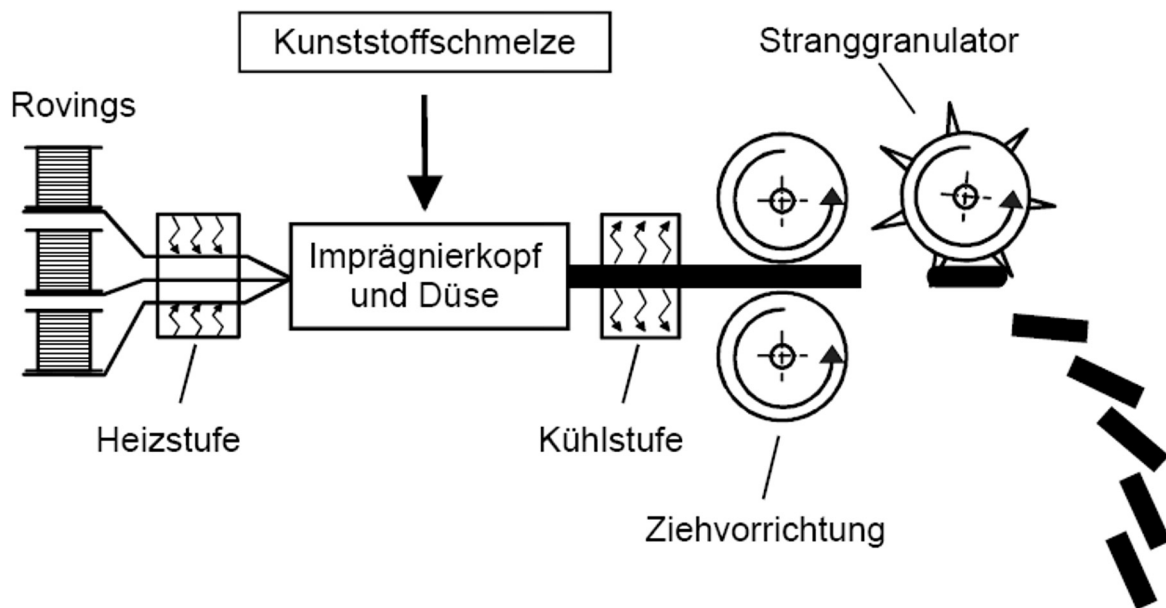


Bild 1.5: Fertungsverfahren für LFT-Granulate (LFT-G) [Bra01]

Die LFT-Granulate werden mittels Einschneckenextruder aufgeschmolzen, um im Fließpressverfahren verarbeitet werden zu können. Dies geschieht durch äußeren Wärmeeintrag über Heizelemente und durch innere Erwärmung infolge von Reibungs- und Scherungsprozessen. Zudem werden durch die Schervorgänge innerhalb des Plastifizierers die Rovings in Einzelfilamente aufgespleisst und damit die Imprägnierung verbessert. Das Ziel ist hierbei, die Scherbeanspruchung im Extruder durch geeignete Schnecken geometrien möglichst klein zu halten, um die Faserverkürzung zu minimieren [Bra01, Oel01]. Durch den Plastifizierprozess liegt im Extrudat eine spiralartige Faserorientierung vor. Der Austrag des Plastifikats kann über Rund- oder Breitschlitzdüsen erfolgen. Abschließend wird das Extrudat in das Presswerkzeug eingelegt und sofort verpresst [Bra01, Kap01]. Das Bild 1.6 zeigt schematisch das LFT-G Verarbeitungsverfahren.

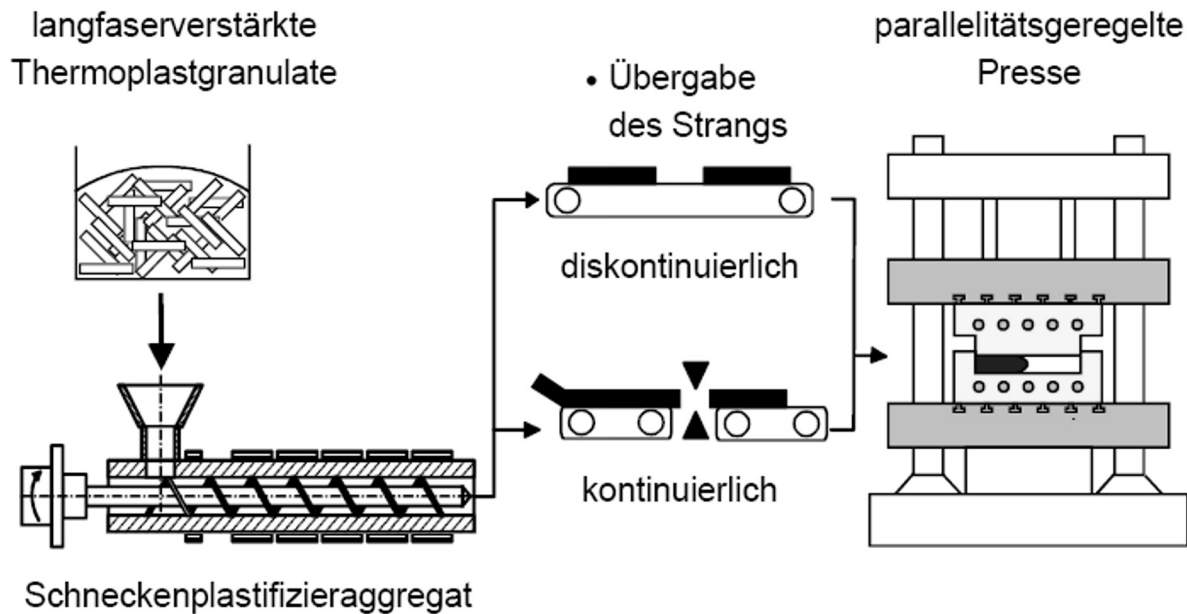


Bild 1.6: Verarbeitung von LFT-G (schematisch) [nach Bra01]

Aus der entsprechenden Fachliteratur sind die Anforderungen und die Arbeitsweisen der angewendeten Maschinenteknik hinreichend bekannt und werden zur Ergänzung im Folgenden mit angegeben [Bra01].

- Einschneckenplastifizierer mit:
 - Schnecke [BM01, BM02, Bra01]
 - Beheizung [Bra01, Mic01, Uph01]
 - Sensoren [Bra01]
- Pressentechnologie mit:
 - Hochpräzise Hydraulikpressen mit Parallelitätsregelung [Bra01, Oel01, Spe01]
 - Tauchkantenverschlusspresswerkzeuge [Bra01, Oel01]

1.2.2.2 Anwendungen

Seit Anfang der 90er Jahre des vorigen Jahrhunderts etablieren sich LFT-Werkstoffe mit bedeutenden Wachstumsraten am Markt der faserverstärkten Polymere. Der Anwendungsschwerpunkt dieser FKV liegt im Bereich semistruktureller Automobilbauteile. Der wesentliche Vorteil von LFT-Materialien liegt in einer sehr guten Relation des Eigenschaftsprofils zu den Kosten.

In Bild 1.7 sind Anwendungen für LFT im Automobilbau dargestellt.

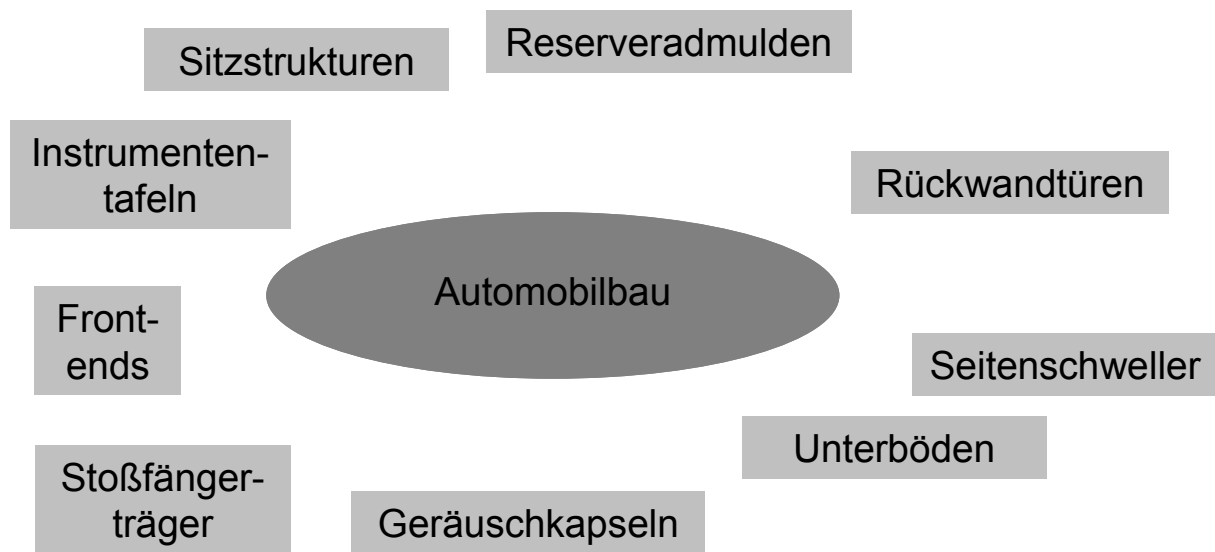


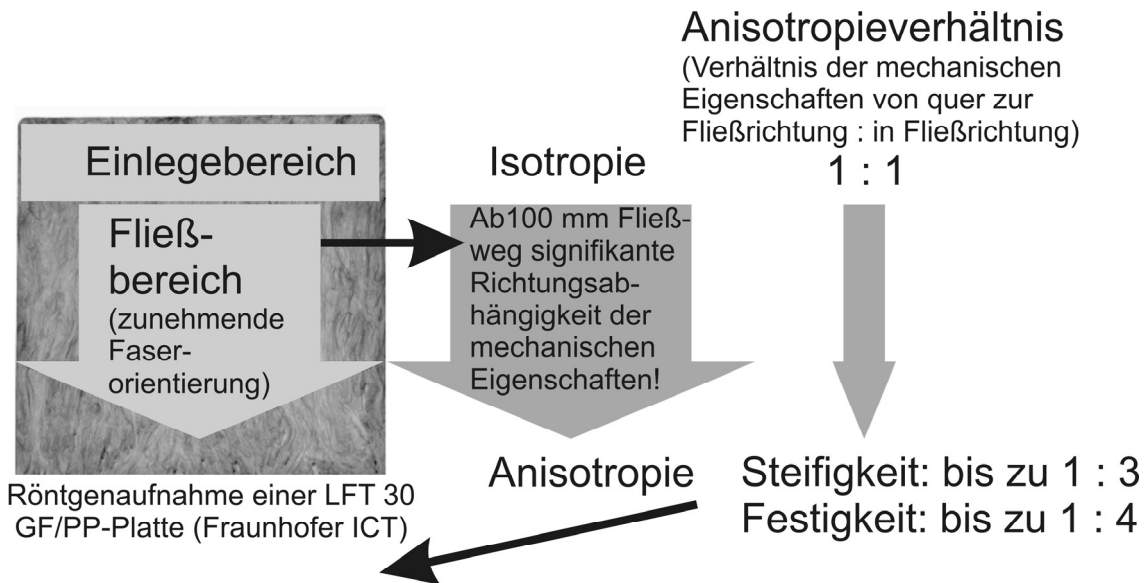
Bild 1.7: Anwendungen für LFT im Automobil [nach SE01]

1.2.2.3 Eigenschaften von LFT-Werkstoffen

Eine Vielzahl von Veröffentlichungen behandelt die Eigenschaften von Langfaserthermoplastwerkstoffen [BEB01, Bra01, EBB01, Ede01, Har01, KHT01, Lüc01, RHE01, RRS01, RSS01, Sch01, Som01, Sta01]. Allgemein lässt sich feststellen, dass die mechanischen und thermischen Eigenschaften von Langfaserthermoplasten im Wesentlichen von folgenden Einflussgrößen geprägt werden:

- Matrixtyp (PP, PA, etc.)
- Verstärkungsfasern (Glas-, Karbon- und Naturfasern)
- Faserlängen (Faserkürzung durch Verarbeitung, Granulatlänge)
- Faserorientierung (Fließprozess in der Kavität)
- Fasermassenanteile (s. auch Kapitel 4)

Besonders die Faserorientierung bzw. die daraus resultierende Anisotropie beeinflusst maßgeblich die mechanischen Eigenschaften (Steifigkeiten und Festigkeiten) von spritzgegossenen und gepressten LFT-Bauteilen. In Bild 1.8 wird der Einfluss der Anisotropie auf die mechanischen Eigenschaften veranschaulicht.



Die Richtungsabhängigkeit der Materialeigenschaften im Fließbereich ist nicht vernachlässigbar!

Bild 1.8: Veranschaulichung der Anisotropie durch Fließpressen von LFT und der daraus resultierenden Steifigkeit / Festigkeit [nach EBB01]

Der Einfluss der Faserlänge im Bauteil ist ebenfalls von großer Bedeutung für die mechanischen Eigenschaften.

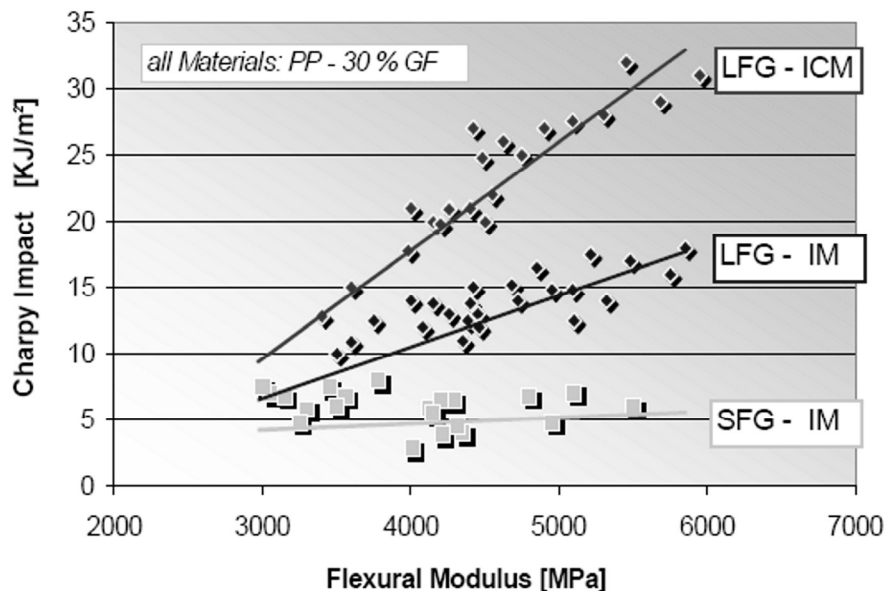


Bild 1.9: Abhängigkeit der Charpy-Schlagzähigkeit und des Biege-E-Moduls von der Verarbeitung der daraus resultierenden Faserlänge (IM→Injection Molding; ICM→Injection Compressing Molding; SFG→Short Glass Fiber; LFG→Long Glass Fiber) [NN02]

Die Endfaserlänge in diskontinuierlich faserverstärkten Bauteilen ist zunächst abhängig vom verwendeten Granulattyp (Kurzfaser- oder Langfasergranulat) und vom Verarbeitungsverfahren (Bild 1.9). Generell wird deutlich, dass mit steigender Faserlänge im Bauteil eine Erhöhung des Eigenschaftskennwerts verbunden ist.

1.2.3 Qualitative Eigenschaftsprofile metallischer Werkstoffe und deren Eignung zur Verstärkung

Durch intensives Studium von Fachliteratur zur Thematik metallische Werkstoffe konnten qualitative Eigenschaftsprofile zu verschiedenen Legierungen angefertigt werden, die zur Verstärkung von PP- und LFT-Werkstoffen in Betracht gezogen wurden [BS01, Gob01, Hor01, IS01, RM01, Sch03, Sei01]. Bild 1.10 zeigt wesentliche Eigenschaften von Metalllegierungen, die für die Verwendung in Form von Verstärkungsstrukturen relevant sind.

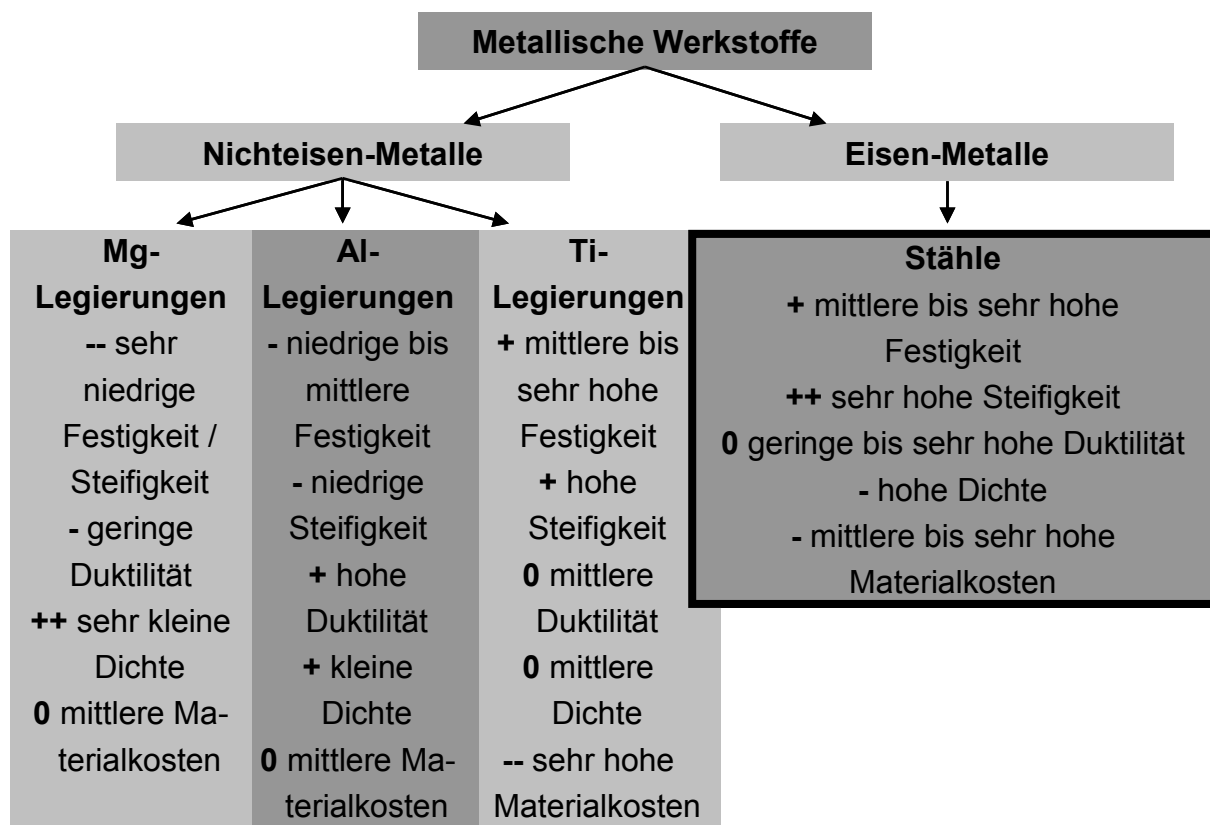


Bild 1.10: Qualitative Eigenschaftsprofile von metallischen Legierungen [nach BS01, Gob01, Hor01, IS01, RM01, Sch03, Sei01]

So wird deutlich, dass Magnesium- und Aluminiumlegierungen sehr kleine Dichten (Mg-Legierungen ca. $1,7 \text{ kg/dm}^3$ und Al-Legierungen ca. $2,7 \text{ kg/dm}^3$) im Vergleich zu

Stahl bei ebenfalls geringen absoluten mechanischen Eigenschaften aufweisen und damit dennoch eine befriedigende Leichtbaugüte erreichen. Jedoch weisen diese beiden Werkstoffgruppen deutliche Nachteile auf, wie zum Beispiel eine geringe chemische Beständigkeit, schlechte Schweißbarkeit und ein geringes Energieabsorptionsniveau bei Crashbelastung. Auch Titanlegierungen (Dichte ca. $4,5 \text{ kg/dm}^3$) weisen sehr gute Leichtbaueigenschaften (Verhältnis von mechanischer Eigenschaft zur Dichte) auf, jedoch sind die Materialkosten sehr hoch. Die Stahlwerkstoffe zeichnen trotz hoher Dichte (ca. $7,8 \text{ kg/dm}^3$) eine hohe Leichtbaugüte und sehr gute Energieabsorptionseigenschaften aus, wobei die Materialkosten ebenfalls sehr hoch sein können (Legierungselementabhängig). Aufgrund des guten Energieabsorptionsverhaltens bei Crashbeanspruchung sollten Stahlwerkstoffe zur Verstärkung von PP und LFT verwendet werden.

So werden in Bild 1.11 die qualitativen Eigenschaftsprofile von Stahlgruppen, eingeteilt nach Legierungselementgehalt, veranschaulicht [BS01, Gob01, Sch03, Wei01].

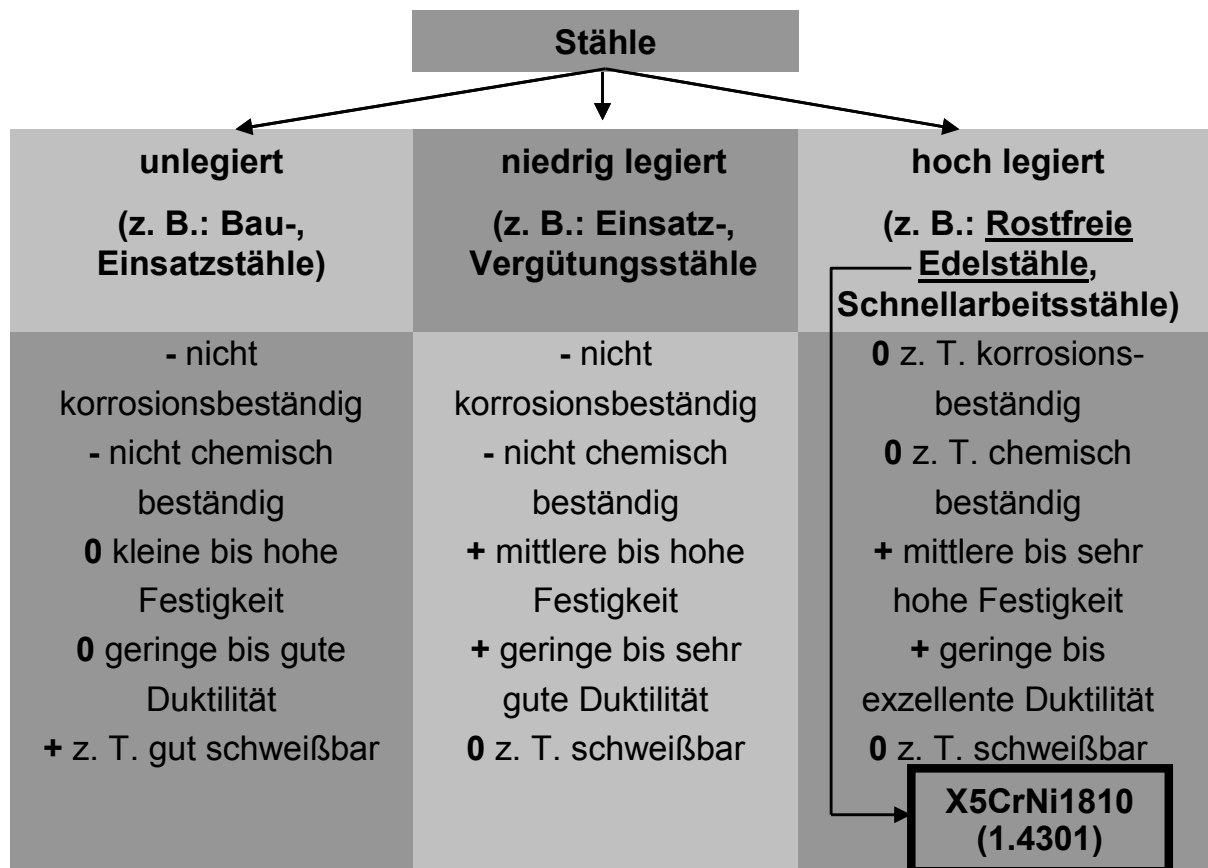


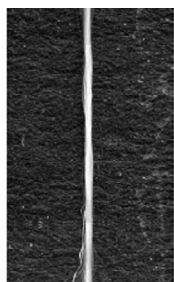
Bild 1.11: Qualitative Eigenschaftsprofile von Stahlgruppen nach Legierungselementgehalt [nach BS01, Gob01, Sch03, Wei01]

Die hoch legierten Stähle zeigen ein sehr ausgewogenes Eigenschaftsprofil bei erhöhten Materialkosten. Von besonderer Bedeutung innerhalb dieser Gruppe sind die rostfreien, metastabilen, austenitischen Edelstähle (z. B.: X5CrNi1810, Werkstoffnummer: 1.4301), die bei plastischer Deformation nicht nur eine Festigkeitssteigerung durch Versetzungsbewegungsbehinderung (Kaltverfestigung) erfahren, gleichzeitig kommt es noch zu einer Gefügewandlung des Austenits in α' -Martensit (Härtegefüge). Trotz der Gefügewandlung neigt der Stahl nicht zur Versprödung, was ihn zum Einsatz in Verstärkungselementen in FKV für Impaktanwendungen mit großen Deformationen prädestiniert. Weiterhin sind diese Stähle rostfrei. Dieser Aspekt gewinnt vor allem bei der Verstärkung von PA-Werkstoffen an Bedeutung, da dieses Matrixsystem hydrophil ist. Eine Korrosion der Verstärkung tritt nicht auf und somit wird eine Degradation der mechanischen Eigenschaften des FKV unterbunden.

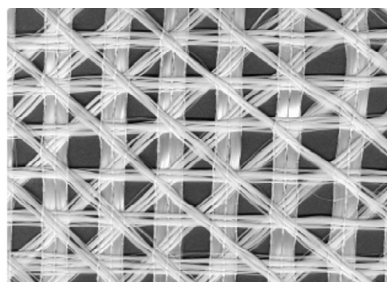
1.2.4 Textiltechnik

1.2.4.1 Allgemeines

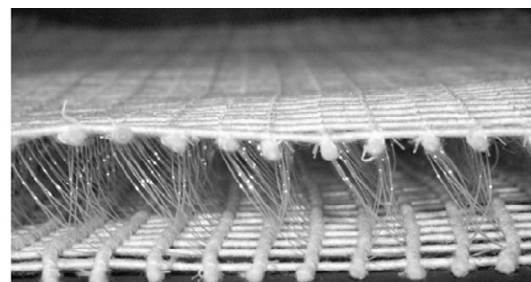
Die Verstärkung von Polymerwerkstoffen zur Erhöhung der mechanischen Eigenschaften erfolgt in technischen Anwendungen überwiegend mit textilen Strukturen. Diese textilen Strukturen lassen sich nach ihrer dimensionalen Ausdehnung in drei Hauptgruppen unterteilen (Bild 1.12).



1D-Struktur:
Filament,
Garn,
Roving,
etc.



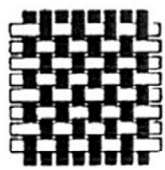
2D-Struktur:
Gelege, Gewirke,
Gewebe, etc.



3D-Struktur:
volumeneinschließend (!),
Abstandsgewirke, -gewebe, etc.

Bild 1.12: Textile Strukturen [nach Gri01]

Im Allgemeinen werden die 1D-Strukturen (Glas-, Karbon- und Aramidfasern) zur Herstellung der mehrdimensionalen Gebilde (Gewebe, Gestricke etc.) verwendet. Für Composite-High-Tech-Anwendungen werden vor allem textile Flächengebilde wie Gelege oder Gewebe verarbeitet. Mit ihnen lassen sich besonders hohe Faservolumenanteile und somit sehr gute mechanische Eigenschaften realisieren. Weiterhin lassen sich insbesondere Gewebe in einer Vielzahl unterschiedlicher Bindungsarten herstellen, die einen Einfluss auf die Eigenschaften des Textils, wie auch des daraus hergestellten Verbundwerkstoffs, haben (Bild 1.13).



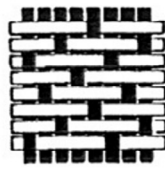
A)

A) Leinwandbindung



B)

B) Köperbindung



C)

C) Schuss-Atlas-Bindung

1) **möglichst flacher Fadenverlauf:**

z. B.: Atlasbindung

2) **gute sphärische Verformbarkeit (Drapierbarkeit):**

z. B.: Köperbindung

3) **gute Hantierbarkeit:**

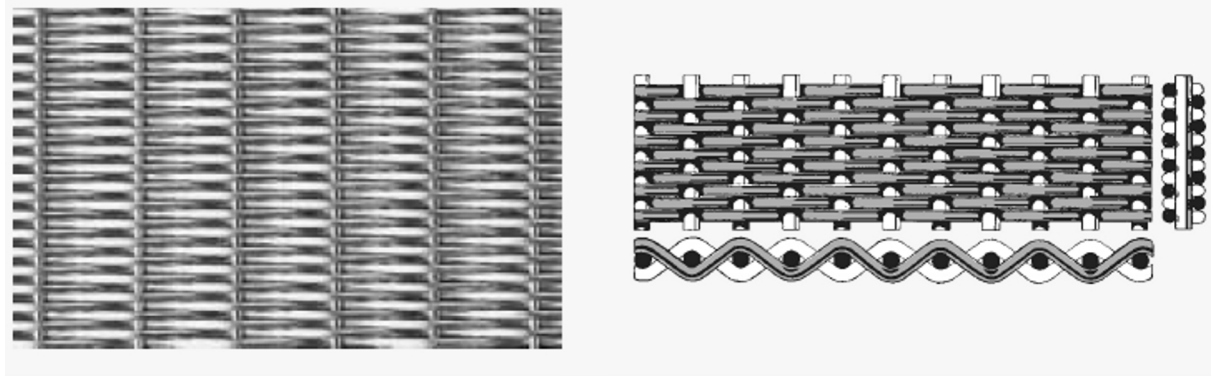
z. B.: Leinwandbindung

Bild 1.13: Typische Gewebefbindungen [nach Gri01]

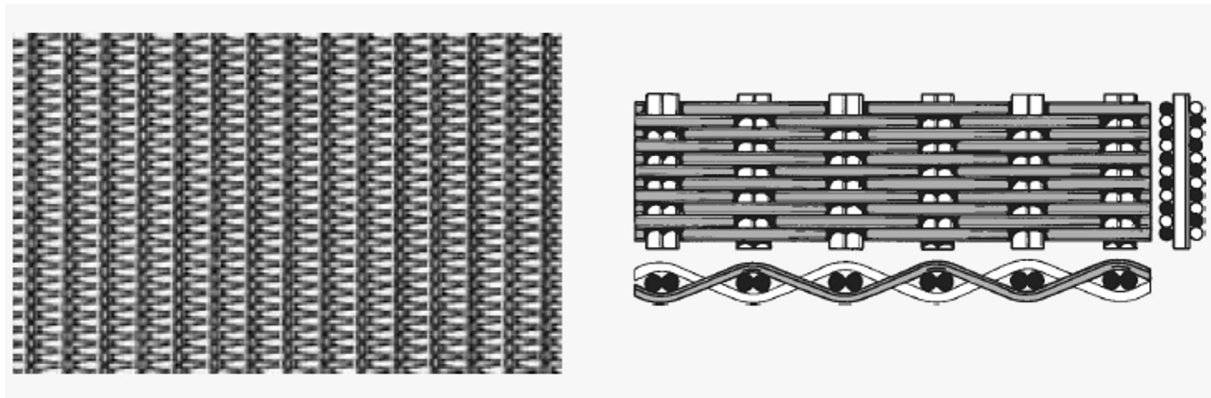
So weisen FKV mit Leinwandgewebeverstärkung (kurze Flottierung) kleinere mechanische Kennwerte für Zugfestigkeit und Zugsteifigkeit auf als FKV mit Atlasgewebeverstärkung (lange Flottierung) [Gri01].

1.2.4.2 Metallische Textilien

Im Vergleich zu den konventionellen Verstärkungstextilien besitzen Metalltextilien für die Verstärkung von Polymeren für technische Anwendungen nahezu noch keine Relevanz. Der Haupteinsatz derartiger Metalltextilien liegt in der Filtertechnik. Aus diesem Grund sind sie auch in weiteren Bindungsarten am Markt erhältlich (Bild 1.14).



SPW Glatte Tresse



SPW mit doppelten Kettdrähten

Bild 1.14: Filtertressen (Auswahl) [NN03]

Zudem weisen metallische Textilien noch weitere Unterschiede zu konventionellen textilen Gebilden auf:

- in den meisten Fällen werden Einzeldrähte direkt zu Textilien verarbeitet, ein Verspinnen von sehr dünnen Filamenten zu verarbeitbaren Rovings kann entfallen
- Metalle sind schmelzschweißbar, somit sind auch stoffschlüssig verbundene Gelege (Schweißgitter) herstellbar

Zur Herstellung von Metalltextilien eignen sich prinzipiell alle Metalle / Metalllegierungen, die eine gute plastische Kaltverformbarkeit aufweisen, da sie im textilen Fertigungsprozess z. T. erheblich deformiert werden.

1.2.4.3 Herstellung metallischer Gewebe

Die metallischen Gewebe werden in ähnlicher Weise wie konventionelle Gewebe gefertigt, d. h. sie weisen demzufolge auch die klassische Struktur bestehend aus Kett- und Schussdraht auf. Es sind auf diesem Weg verschiedenste Bindungsarten (s. vorangegangene Kapitel) wie Leinwandgewebe etc. oder auch Filtertressen herstellbar. Für die Herstellung von metallischen Geweben werden spezielle und hochproduktive Webmaschinen eingesetzt. Aufgrund der sehr großen wirkenden Prozesskräfte, die durch die hohe Steifigkeit der zu verwebenden Metalldrähte bedingt sind, werden Bauteile und Baugruppen dieser Maschinen besonders großzügig dimensioniert (Bild 1.15). Aus diesen Gründen laufen die Maschinen auch in den meisten Fällen langsamer als Webmaschinen für konventionelle Anwendungen.

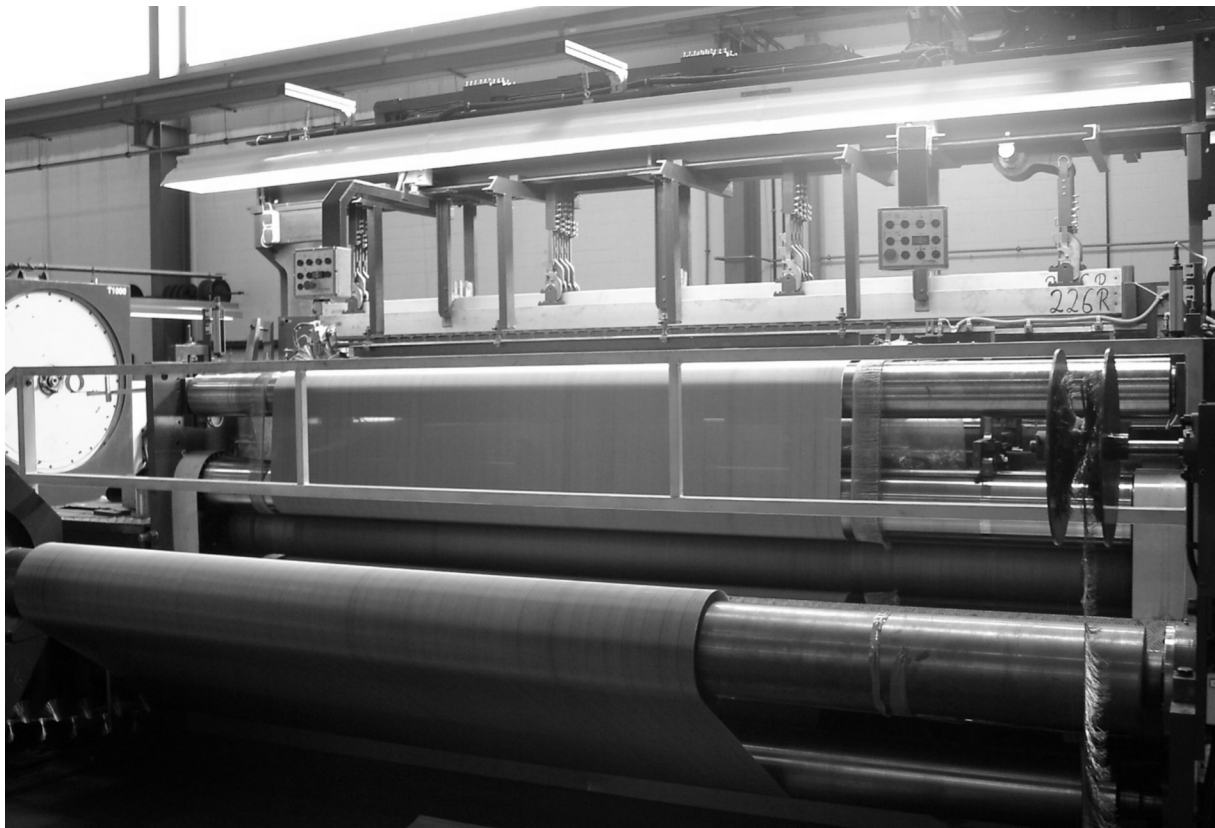


Bild 1.15: Metallwebmaschine [GKD01]

1.2.5 Adhäsion, Adhäsionsmodelle und Einfluss der Oberflächen

Die Adhäsion, d. h. die Bindungskräfte in der Grenzfläche zwischen Faser und Matrix, beeinflusst maßgeblich die mechanischen Eigenschaften des Verbundwerkstoffs [Ros01]. Ebenso ist aus der Füge- und Klebtechnik bekannt, dass die Fügstellenfestigkeit von der Adhäsion abhängig ist [BGK01]. Aus der Fachliteratur sind die wesentlichen Adhäsionsmodelle bekannt und werden in Bild 1.16 dargestellt.

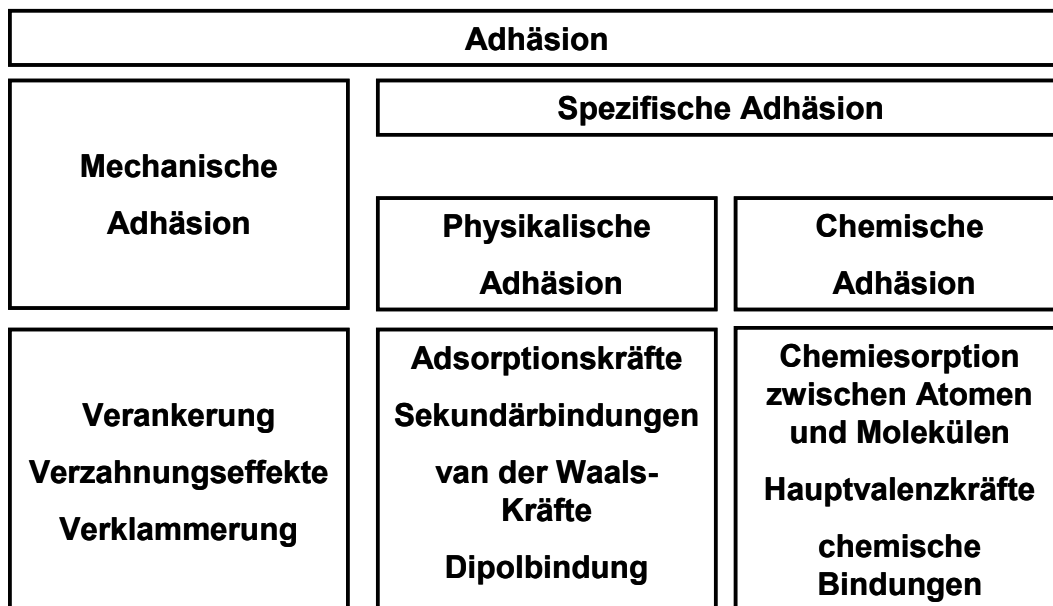


Bild 1.16: Adhäsionsmodelle [nach Int02]

Weiterhin sind in Bild 1.16 die Wirkungsmechanismen der einzelnen Modelle ersichtlich. Generell lässt sich feststellen, dass der Oberflächenzustand von zentraler Bedeutung für die Haftung ist. Die Adhäsion lässt sich gezielt durch Vorbehandlung der zu verbindenden Werkstoffoberflächen verbessern. Bekannt sind hierzu wieder mechanische [BE01, BGK01, JSH01, RTD01], chemische [BE01, BGK01, BH01, Bro01, JSH01] und physikalische [BGK01, CKH01, KKW01] Verfahren (Tabelle 1.1). Ein bedeutendes Beispiel für eine Kopplung von mechanischer und chemischer Adhäsion liefert seit Jahrzehnten die Reifenherstellung. Dabei wird während der Fertigung der Gürtel eines Reifens nicht mit Einzelstahldrähten verstärkt, sondern mit Stahlcords (Geflecht aus Einzeldrähten). Somit kann der zugeführte Kautschuk während der Herstellung in den Stahlcord eindringen. Dies führt zu einer Erhöhung der mechanischen Adhäsion durch Verankerung der Cords im Kautschuk.

Weiterhin werden Stahlcords mit einer Messingbeschichtung verwendet, da diese eine Anbindung des bei der Vulkanisation in den Kautschuk eingebrachten Schwefels ermöglicht. Chemische Adhäsion wird somit letztendlich zwischen Stahlcord (-beschichtung) und Kautschuk realisiert.

Tabelle 1.1: Oberflächenvorbehandlungen und deren Wirkungen [nach BGK01, Bis01]

Verfahren	Art der Behandlung	Wirkungen
1. Reinigen, Entfetten	Waschen mit Wasser bzw. Lösungsmitteln thermisch	Keine Strukturveränderungen der Oberfläche
2. Mechanische Vorbehandlung	Schleifen, Schmirgeln, Druckluftstrahlen	Geometrische Veränderung der Oberfläche (Rauheit), Entfernung von Kontaminationen, Aktivierung der Oberfläche
3. Chemische Vorbehandlung	Ätzen, Beizen mit sauren oder alkalischen Stoffen, auch Gasen, thermisch durch Beflammung	Veränderung der chemischen Struktur der Oberfläche (Oxidation, Phosphatierung, Anreicherung fremder Elemente an der Oberfläche)
4. Physikalische, vorzugsweise elektrische / Strahlenvorbehandlung	Corona, ND-Plasma, UV-, Laser-, Elektronenstrahlung	Physikalische und chemische Veränderung des Oberflächenzustandes
5. Mischung von chemischen und physikalischen Behandlungen	Corona, Ozonisieren, Primern	Physikalische und chemische Veränderung des Oberflächenzustandes
6. Beschichten	Haftvermittler, metallische Beschichtungen (Verzinkung, Messingbeschichtung)	Physikalische und chemische Veränderung des Oberflächenzustandes

Die Qualität der Haftung von Grenzflächen kann mittels geeigneter Versuche, wie zum Beispiel Faserauszugtests, charakterisiert werden [Sch02, SFR01].

1.2.6 Metallverstärkte Polymere und Composites

In der Luftfahrtindustrie wurden bzw. werden noch heute metallverstärkte Verbundwerkstoffe in Form von Schichtverbunden (Arall und Glare) in Serienanwendungen eingesetzt. Hierbei steht **Arall** für ein **A**ramidfaserverstärktes **Al**uminiumlaminat und **Glare** für einen glasfaserverstärkten Aluminiumschichtverbund (engl. **g**lass fiber **r**einforced aluminium) [WS01]. Diese Werkstoffe zeichnen sich durch sehr gute mechanische Eigenschaften aus und gehören zur Gruppe der **F**aser-**M**etall-**L**aminate (**FML**) [CC01, Ver01]. Für automobiltechnische Anwendungen in der Serienfertigung sind metallverstärkte Kunststoffe und Verbundwerkstoffe noch unbedeutend. Im Rahmen eines Forschungsvorhabens werden derzeit die Einsatzmöglichkeiten und Einsatzgrenzen von edelstahltextilverstärktem Polypropylen (ETV-PP) und LFT-Werkstoffen (ETV-LFT) untersucht. In [MM01] wird ein Fertigungsprozess für edelstahltextilverstärkte Thermoplaste und LFT-Werkstoffe vorgestellt. Diese Untersuchungen zeigten auf, dass mit der Edelmetalltextilverstärkung die Impact- und Crasheigenschaften erheblich verbessert werden können [MM01, MVM01, MVM02].

Im Rahmen eines Forschungsprojekts der Universität Gent wurde ein glasmattenverstärkter Thermoplast (GMT) zusätzlich mit Stahlcords verstärkt, um die Energieabsorption und die Strukturintegrität von crashbeanspruchten Bauteilen zu verbessern [VdA01]. Auf Basis des in [VdA01] beschriebenen neuartigen Verbundwerkstoffs wurde ein Pkw-Stoßfänger mit deutlich besserer mechanischer Performance als konventionelle Lösungen entwickelt, der kurz vor der Serieneinführung steht [KDO01].

Weiterhin wird in [AB01] über die Edelmetallgewebeverstärkung von glasfaserverstärktem Polyphenylensulfid und glasfaserverstärkten Epoxidharzen berichtet. Erkendirici et al. berichten in [Erk01] von stahlgewebeverstärkten Polyethylenverbundwerkstoffen, deren Ermüdungs- und Bruchverhalten untersucht wurde (Bild 1.17).

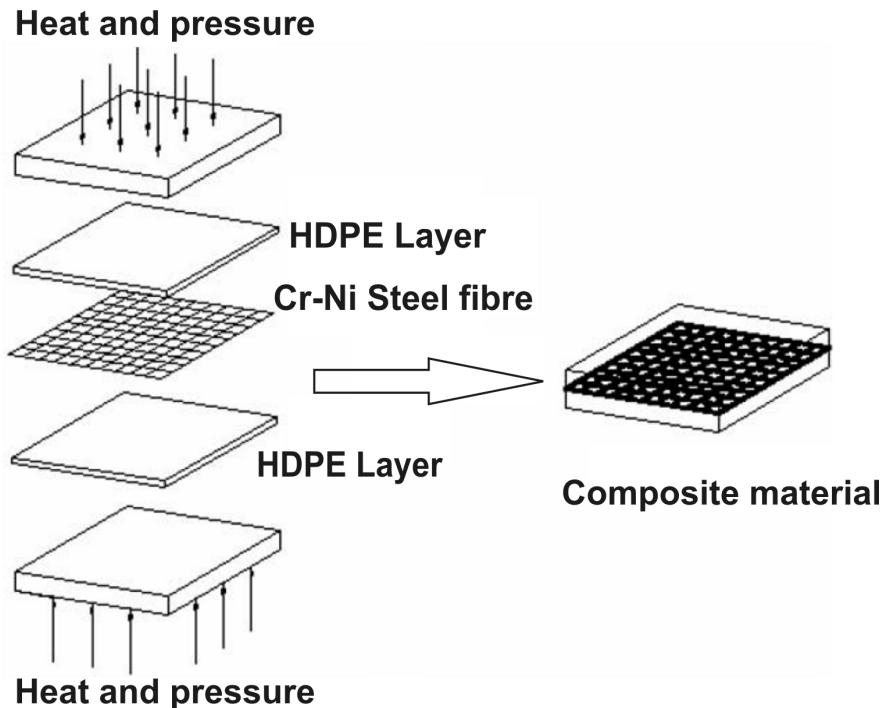


Bild 1.17: Herstellungsprozess eines Cr-Ni-Stahl/PE-Verbundes nach [Erk01]

In [RK01] wird das Verhalten von faserverstärkten Polypropylen-Aluminium-Laminaten unter Zug- und Ermüdungsbeanspruchung untersucht.

In der Elektrotechnik werden Kunststoffgehäuse mit Metallfasern und -geweben zur Verbesserung der elektromagnetischen Abschirmung ausgerüstet [LC01, PRH01, Rot01].

Metallfasern werden auch zur Erhöhung des Reibverschleißwiderstands [Ali01] und der thermischen und elektrischen Leitfähigkeit von Kunststoffen eingesetzt [MS01].

1.2.7 Mikromechanische Modellierung des Werkstoffverhaltens

Die mikromechanische Modellierung und Simulation ist ein bewährtes Werkzeug zur Vorhersage von mechanischen Eigenschaften und des Schädigungsverhaltens komplexer neuartiger Verbundwerkstoffe und Werkstoffkonfigurationen [GGP01, HT01, SV01]. Dabei werden ausgehend vom real vorliegenden Werkstoff bzw. Prüfkörper in den meisten Fällen parametrische Mikromodelle generiert. Solche Mikromodelle werden in der Regel aus einem oder mehreren repräsentativen Volumenelementen aufgebaut (engl. unit cell modeling). In der Fachliteratur werden repräsentative Volumenelemente sinngemäß als kleinstmögliche Werkstoffvolumenelemente einer Makrostruktur verstanden, mit deren Hilfe es dennoch möglich ist, unter Nutzung vorhan-

dener Symmetrien bzw. Periodizitäten das makroskopische Verhalten abzubilden [Lom01, Lua01].

So wird in Bild 1.18 eine vernetzte Einheitszelle (EHZ) eines vernähten Multiaxialgelege-Laminats gezeigt.

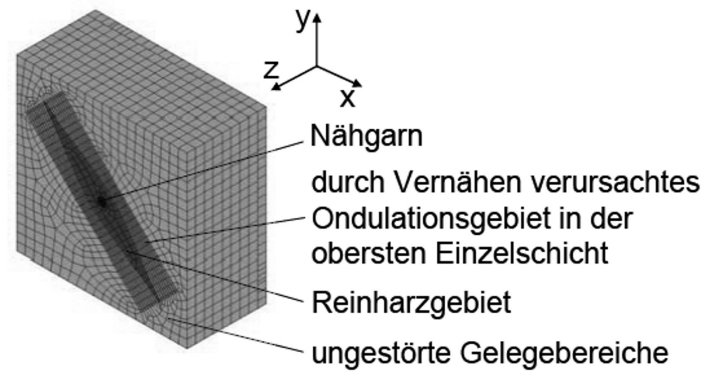


Bild 1.18: Vernetzte Einheitszelle eines vernähten Multiaxialgelege-(MAG-)Laminats [SH01]

Mit Hilfe der in Bild 1.18 dargestellten EHZ lassen sich die Steifigkeits- und Festigkeitskennwerte sowie das Versagensverhalten derartig neuer Composite-Strukturen abschätzen [SH01].

Weiterhin ist es durch Dehnungsanalysen an FE-Mikromodellen möglich, einen detaillierten Einblick in die Werkstoffbeanspruchung zu erhalten. Als Beispiel hierfür wird in Bild 1.19 die mittels FEM berechnete wahre Dehnungsverteilung in X-Richtung in einer Einheitszelle im Lasteinleitungsbereich unter Zugbeanspruchung (X-Richtung) eines schweißgitterverstärkten Polypropylens gezeigt.

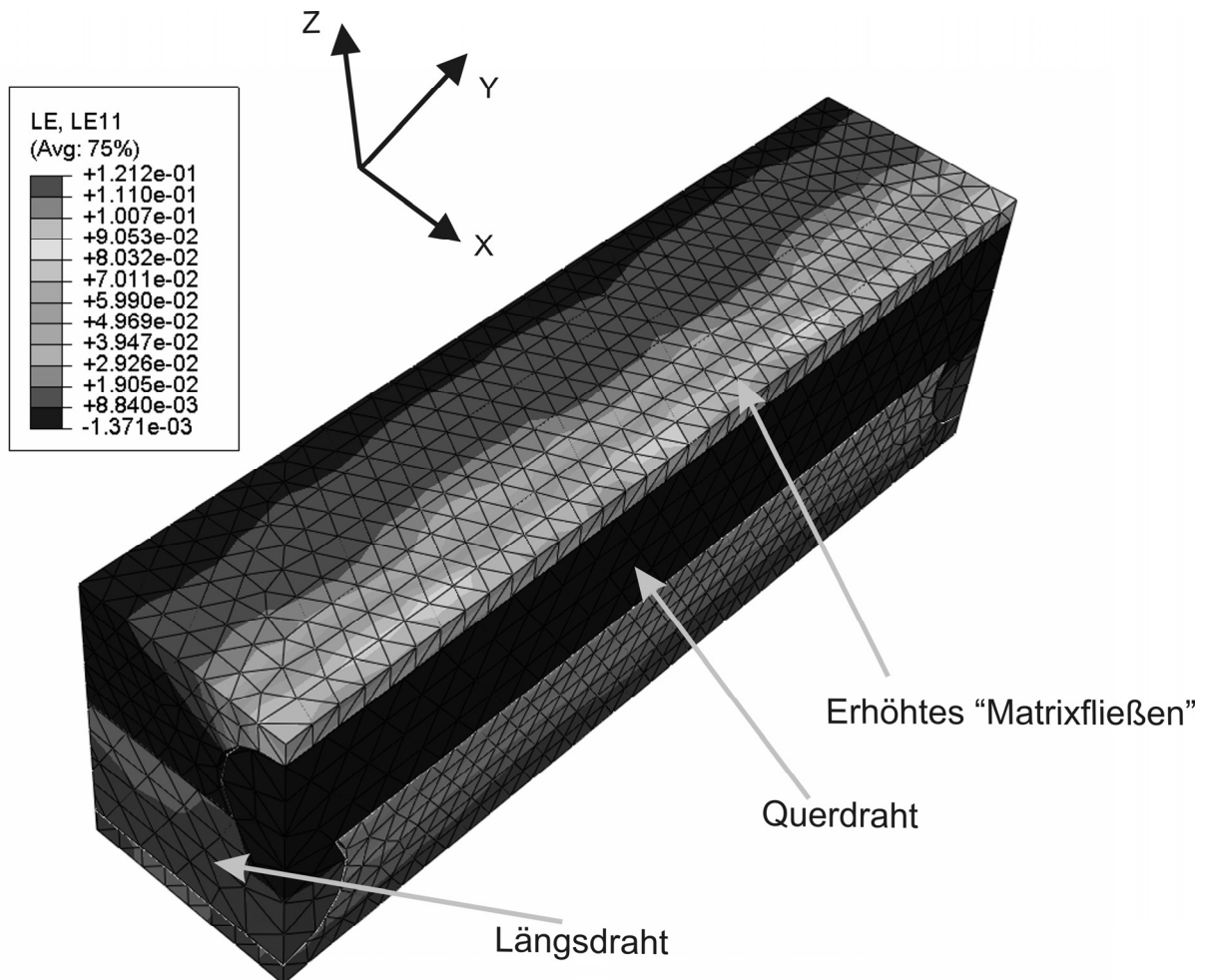


Bild 1.19: Wahre Dehnung in X-Richtung einer EHZ eines schweißgitterverstärkten Polypropylens (Lasteinleitungsbereich) [nach MVM02]

Hierbei wird deutlich, dass eine signifikante Dehnungsüberhöhung im Bereich der Querdrähte vorliegt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass im Bereich der Querdrähte aufgrund des geringen Matrixquerschnitts, Volumenkonstanz und der wirkenden Zugbeanspruchung ein erhöhtes „Matrixfließen“ auftritt [MVM02].

1.3 Motivation, Ziele und Vorgehen

Faser-Kunststoff-Verbunde (FKV) werden aufgrund ihres hohen Leichtbaupotentials in vielen Industriebereichen eingesetzt. Eine Verstärkung von polymeren Matrixsystemen mit Fasern führt zu einer signifikanten Verbesserung der mechanischen Eigenschaften. Positive Veränderungen des Eigenschaftsspektrums sind zum Beispiel deutliche Verbesserungen der Steifigkeiten und Festigkeiten. Eine negative Erscheinung, die aus der Faserverstärkung resultieren kann, ist zum Beispiel eine geringere

Bruchdehnung des Werkstoffes. Im besonderen Maße werden diese negativen Eigenschaftsveränderungen am Beispiel der langfaserverstärkten Thermoplastwerkstoffe (LFT) deutlich. Die langfaserverstärkten Thermoplaste haben sich aufgrund ihrer guten Leichtbaueigenschaften und großserientauglichen Verarbeitungsverfahren insbesondere in der Automobilindustrie bei semistrukturellen Anwendungen wie z.B. Unterböden, Frontends, Geräuschkapseln, Instrumententafelträgern usw. durchgesetzt [KHT01]. Bei Impact- und Crashbeanspruchung zeigen diese Werkstoffe jedoch ein sprödes Bruchverhalten, das Bauteil wird zu Bruchstücken fragmentiert und verliert seine strukturelle Integrität (Bild 1.20). Um diesen Nachteil auszugleichen, soll im Rahmen der Arbeit ein Fertigungsverfahren für Edelstahl-LFT-Verbunde entwickelt werden, mit dessen Hilfe die positiven Eigenschaften von Edelstahl und LFT-Verbunden gezielt kombiniert werden können, um weitere Eigenschaftsverbesserungen zu erzielen.



Bild 1.20: Fragmentierte LFT-Crashelemente (Prototypen) [Int03]

An das zu entwickelnde Herstellungsverfahren werden die Anforderungen gestellt, dass es durch Modifikation aus einem oder aus einer Kombination von mehreren bekannten reproduzierbaren FKV-Verarbeitungsverfahren abgeleitet werden kann. Im weiteren Verlauf der Untersuchungen, nachdem ein möglicher Herstellungsprozess etabliert wurde, sollen ausgewählte wesentliche Fertigungsparameter angepasst werden, um sehr gute Impakteigenschaften bei diesen neuartigen Verbundwerkstoffen realisieren zu können. In einem nächsten Schritt soll auf Basis der angepassten Fertigungsparameter eine Materialparametervariation vorgenommen werden, das heißt, verschiedene Matrixmaterialien werden mit unterschiedlichen Verstärkungselementen zu Edelstahl-LFT-Verbunden kombiniert. Das Ziel dieser Untersuchung soll die Herstellung einer oder mehrerer Edelstahl-LFT-Composites mit sehr gutem

Impaktverhalten sein. Parallel zu den Herstellungsversuchen und der mechanischen Charakterisierung sollen Struktur-Eigenschafts-Analysen mittels optischer Verfahren durchgeführt werden, um z.B. Aussagen über die Qualität der Stahl-Matrix-Haftung zu erhalten. Basierend auf den Erkenntnissen der Struktur-Eigenschafts-Analysen können dann, falls dies erforderlich ist, weitere werkstoffliche Optimierungen durchgeführt werden, so z.B. eine Verbesserung der problematischen Edelstahl-PP-Anhaftung. Abgerundet werden die experimentellen Forschungsarbeiten mit einer weiterführenden mechanischen Charakterisierung der Edelstahl-LFT-Verbunde mit im Vergleich sehr guten Impakteigenschaften.

Abschließend sollen mikromechanische Modellierungs- und Simulationsansätze für diese neue Gruppe von FKV aufgezeigt werden. Sie sollen zur Berechnung von Werkstoffkennwerten der untersuchten neuartigen Verbundwerkstoffe dienen und mittels experimentell ermittelter Daten verifiziert und validiert werden.

2 Werkstoffe und textile Verstärkungen

2.1 X5CrNi1810 (Werkstoffnummer: 1.4301)

Wie schon im Stand der Technik dargestellt wurde, sollen die PP- und LFT-Werkstoffe im Rahmen dieses Forschungsprojekts mit textilen Flächengebilden aus rostfreiem Edelstahl X5CrNi1810 verstärkt werden, um die Neigung zur Fragmentierung bei Impaktbelastung zu verringern und gleichzeitig die Energieaufnahme bei crashartiger Beanspruchung signifikant zu verbessern. Aufgrund der hervorragenden Kaltverformbarkeit und guten Festigkeit des Edelstahls sollte dies möglich sein. Im Anhang A1 werden die chemische Zusammensetzung und ausgewählte physikalische Eigenschaften von X5CrNi1810 dargestellt.

2.2 PP- und LFT-Werkstoffe

2.2.1 PP-Werkstoffe

Für die Herstellung der Matrices bzw. Einbettungsmaterialien (PP/GF) wurden zwei PP-Matrixsysteme der Firma Lyondellbasell verwendet, zum einen ein sehr fließfähiges PP-Homopolymer (Moplen HP 500V) und zum anderen ein duktileres PP-Copolymer (Moplen EP 340K). Die zwei PP-Werkstoffe weisen neben den unterschiedlichen rheologischen auch stark unterschiedliche mechanische Eigenschaften auf, mit deren Hilfe der Einfluss des Matrixwerkstoffes auf die Herstellung und letztendlich auf die resultierenden mechanischen Eigenschaften der edelstahltextilverstärkten Verbundwerkstoffe untersucht wurde. Anhang A2 und A3 zeigen wesentliche Eigenschaftskennwerte der untersuchten Polypropylene.

2.2.2 LFT-Werkstoff

Für die Herstellung der entsprechenden LFT-Verbundwerkstoffe stand ein PP/GF-Granulat der Firma FACT (Typ FACTOR ADD PP-LGF 60/30 N25) mit einer Ausgangslänge von 25 mm und 60 % Fasergewichtsanteil zur Verfügung. Durch Abmischen mit reinem PP kann der gewünschte Fasergewichtsanteil des Plastifikats eingestellt werden. Eine Untersuchung des Glasfasergewichtsanteils und des PP-Typs auf die Verarbeitungs- und die mechanischen Eigenschaften wird somit möglich. Herstellerangaben zu den Eigenschaften sind derzeit nicht verfügbar.

2.3 Textile Verstärkungen

Zur Verstärkung und zur Verbesserung der Crash- und Impakteigenschaften von PP- und LFT-Werkstoffen wurden fünf verschiedene Verstärkungstextilien aus X5CrNi1810 verwendet. Die Textilien unterscheiden sich im Wesentlichen durch ihre Geometrie, Bindungsart und das Flächengewicht (Tabelle 2.1). Mit Hilfe der fünf unterschiedlichen Edelstahlverstärkungen wurde der Einfluss der Textilstruktur auf die Fertigung und die Materialeigenschaften der ETV-Verbunde untersucht.

Tabelle 2.1: Merkmale der textilen Verstärkungen

Textil	Flächengewicht [kg/m²]	Drahtdurchmesser; Maschenweite [mm]	Bindungsart [-] (s. Kapitel 1.2.4)
0,2x0,2	1,3	0,2; 0,2	Köper
0,3x0,315	1,3	0,3; 0,315	Leinwand
0,4x1,0	1,45	0,4; 1,0	Leinwand
0,6x0,67	3,6	0,6; 0,67	Leinwand
1,0x6,0	1,8	1,0; 6,0	Schweißgitter

3 Mechanische Charakterisierung der Verbundwerkstoffkomponenten – Draht, Textilien und Matrices

3.1 Quasistatische Zugeigenschaften von Edelstahlverstärkungsdrähten mit verschiedenen Drahtdurchmessern

3.1.1 Probenvorbereitung und Versuchsdurchführung

Die Zugversuche an den Edelstahldrähten wurden in Anlehnung an die Norm DIN EN 10002-1 durchgeführt [Nor01]. Hierbei lag der Fokus auf der Ermittlung des plastischen Formänderungsvermögens des Stahls. Auf eine Ermittlung des E-Moduls des Stahls wurde deshalb verzichtet, entsprechende Werte sind aus der Literatur und anderen Quellen bekannt [Int07]. Es wurden Runddrähte mit denselben Durchmessern, wie sie in den textilen Verstärkungen vorkommen (s. Kapitel 2), untersucht. Für die Versuche wurde eine Universalprüfmaschine der Firma Zwick Roell vom Typ 1474 mit pneumatischen Spannelementen verwendet. Wesentliche Parameter der Tests sind in der Tabelle 3.1 abgebildet.

Tabelle 3.1: Prüfparameter im Drahtzugversuch

Geprüfte Drahtdurchmesser [mm]	0,2; 0,3; 0,4; 0,6; 1,0
Probenanzahl [-]	5
Messlänge [mm]	100
Spanndruck [bar]	3
Prüfgeschwindigkeit [mm/min]	10 (außer 0,2 mm: 5)

3.1.2 Ergebnisse und Diskussion

Im folgenden Bild 3.1 sind die gemittelten Zugspannungs-Dehnungs-Diagramme der untersuchten Drahtdurchmesser dargestellt.

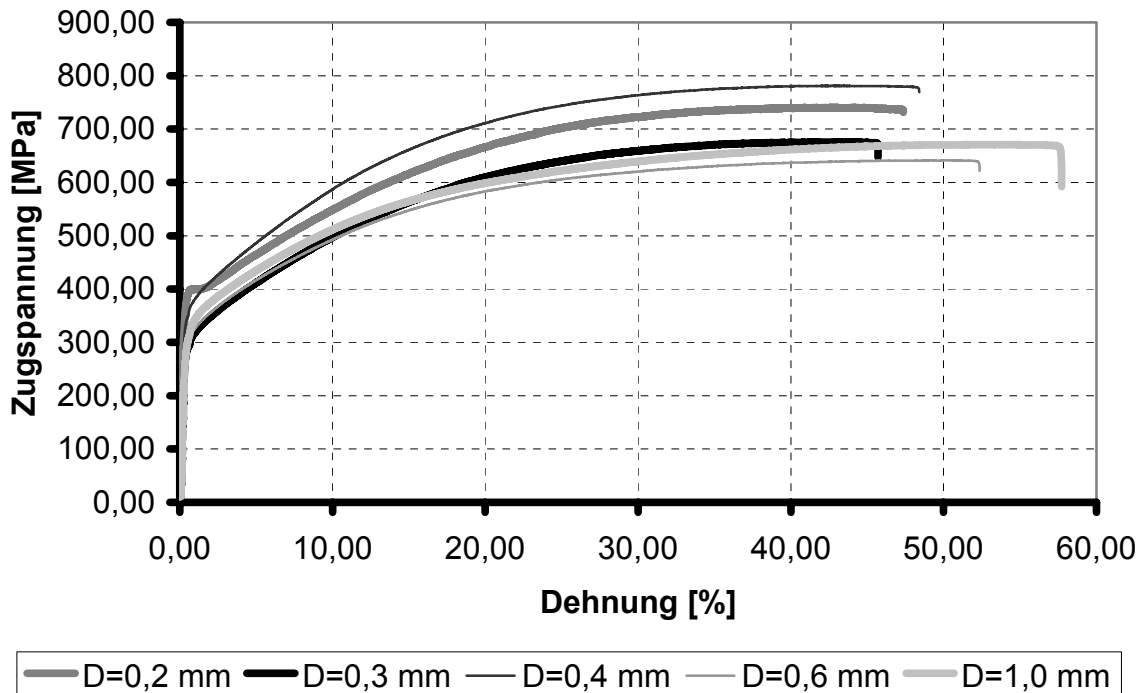


Bild 3.1: Gemittelte technische Zugspannungs-Dehnungs-Diagramme

In Bild 3.1 ist zu erkennen, dass von den verschiedenen Drahtdurchmessern ein Festigkeitsspektrum von ca. 640 bis etwa 780 MPa abgedeckt wird. Die Bruchdehnungen liegen in einen Bereich von ca. 45% bis etwa 58%. In den meisten Fällen weisen die Verstärkungsdrähte mit den kleineren Durchmessern höhere Festigkeiten, aber kleinere Bruchdehnungen auf als Drähte mit relativ großer Querschnittsfläche. Folgende Gründe können hierfür in Betracht gezogen werden:

- unterschiedliche Korngrößen (feines Gefüge → hohe Festigkeit) [Got01]
- Unterschiede in den Gefügeumwandlungen und Umwandlungseffekten (martensitische Umwandlung, Zwillingsbildung) [Got01]
- Verkleinerung des Prüfkörpervolumens → Reduzierung der Fehlstellenanzahl (Size-Effekt)

Generell wird das sehr gute plastische Formänderungsvermögen von Drähten aus X5CrNi1810 deutlich, welches somit entscheidend zur Erhöhung der Energieabsorption eines damit verstärkten Composites beitragen kann.

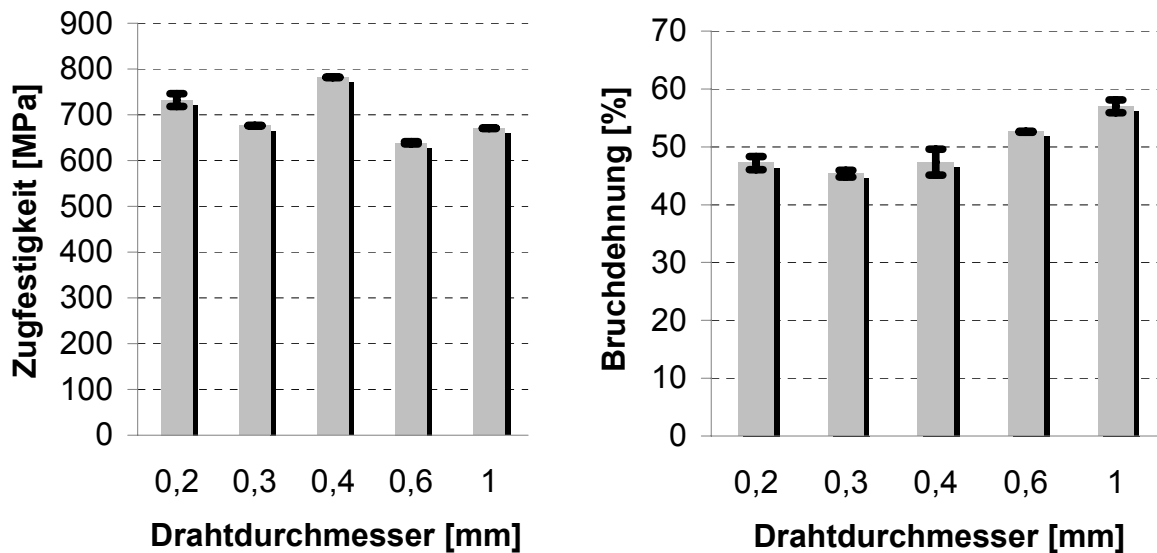


Bild 3.2: Ermittelte Zugfestigkeiten und Bruchdehnungen

Die zur Einschätzung der statischen Energieaufnahme wesentlichen Werkstoffkennwerte wurden aus dem Bild 3.1 ermittelt und werden explizit nochmals in Bild 3.2 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die höchste Festigkeit nicht bei dem 0,2 mm Draht vorliegt, sondern erst bei dem Draht mit einem Durchmesser von 0,4 mm. Folgender Grund wurde hierfür in Betracht gezogen:

Nach dem Drahtziehen wird eine Austenitisierung (Wärmebehandlung) durchgeführt, um verformungsinduziert gebildeten Martensit zu lösen. Diese Wärmebehandlung kann aber von unterschiedliche Güte sein, daraus folgt, dass Martensit (sehr feste Phase) auch nach der Wärmebehandlung noch vorhanden sein kann und somit zu einer Festigkeitssteigerung beiträgt (s. Kapitel 3.4) [Neb01].

Weiterhin wurde eine Zunahme der Bruchdehnung vom 0,3 mm zum 0,2 mm Draht verzeichnet. Es wird angenommen, dass auch in diesem Fall das Dehnungsverhalten von einer unterschiedlichen Gefügestruktur geprägt wird.

3.2 Quasistatische Zugeigenschaften von verschiedenen Edelstahlverstärkungstextilien

3.2.1 Probenvorbereitung und Versuchsdurchführung

Der Textilstreifenzugversuch wurde in Anlehnung an die Norm DIN EN ISO 13934-1 durchgeführt [Nor02]. Hierbei wurden die in Kapitel 2 beschriebenen textilen Flächegebilde einer Zugprüfung unterzogen, die zur Herstellung der edelstahltextilverstärkten Verbunde verwendet werden sollen. Die Charakterisierung erfolgte auf einer Universalprüfmaschine der Firma Zwick Roell des Typs 1474 mit pneumatischen Spannelementen. Der Fokus der Prüfungen lag auf der Bestimmung des plastischen Formänderungsvermögens der einzelnen Textilien. Die Prüfung wurde zu Beginn an genormten Streifenproben mit den Abmessungen $300 \times 50 \text{ mm}^2$ in Schuss- und Kettfadenrichtung durchgeführt. Jedoch führte der im Bereich der Spannelemente auftretende mehrachsige Spannungszustand bei den „leichten“ Textilien vermehrt zu Einspannungsbrüchen, d. h. es wurden nicht verwertbare Versuchsergebnisse generiert. Deshalb wurde eine Formanpassung durchgeführt, die letztendlich eine Form ähnlich der Prüfkörpergeometrie nach DIN EN ISO 527-1 lieferte. Die neue Prüfkörperform ist in Bild 3.3 dargestellt.

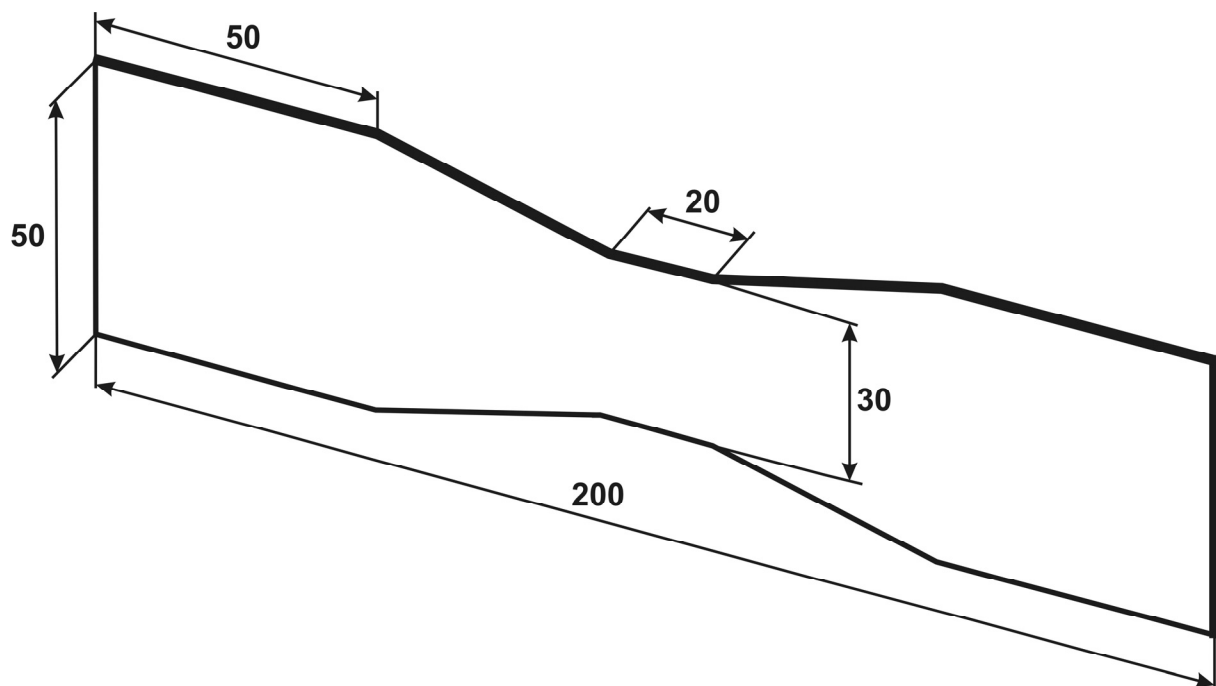


Bild 3.3: Angepasste Prüfstreifengeometrie ($200 \times 30 \text{ mm}^2$)

In Tabelle 3.2 sind weitere wesentliche Prüfparameter dargestellt.

Tabelle 3.2: Prüfparameter im Textilizugversuch

Textil/Bindung $D_D \times M_W$ [mm] Flächengewicht [kg/m ²]	Köper 0,2 x 0,2 1,3	Leinwand 0,3 x 0,315 1,3	Leinwand 0,4 x 1,0 1,45	Leinwand 0,6 x 0,67 3,6	Schweißgitter 1,0 x 6,0 1,8
Probe- körperperform [mm ²]	200 x 30	200 x 30	200 x 30	200 x 30 / 300 x 50	300 x 50
Mess- länge [mm]	100	100	100	100 / 200	200
Spanndruck [bar]	3	3	3	3	3
Prüf- geschwindigkeit [mm/min]	20	20	20	20	20
Prüf- richtung	Schuss/ Kette	Schuss/ Kette	Schuss/ Kette	Schuss/ Kette	Schuss/ Kette

3.2.2 Ergebnisse und Diskussion

In Bild 3.4 wird in exemplarischer Weise das Verhalten eines Leinwandgewebes (EG 0,6x0,67 mm) und eines Schweißgitters (ESG 1,0x6,0 mm) unter uniaxialer Zugbelastung in Schuss- und Kettfadenrichtung in Form von Zugkraft-Zugdehnungsverläufen dargestellt. In Bild 3.4 ist zu erkennen, dass vor allem bei dem Leinwandgewebe die Schussrichtung deutlich höhere Kräfte überträgt als die Kettrichtung. Weiterhin wird deutlich, dass die Verformbarkeit des Leinwandtextiles in Schussrichtung im Vergleich zur Kettfadenrichtung verringert ist. Ein ähnliches Verhalten ist auch bei dem Schweißgitter zu beobachten, wobei der Unterschied im Kraftniveau nicht so deutlich ausfällt. Die übertragbaren Zugkräfte (Zugfestigkeiten) und Zugdehnungen in die jeweiligen Fadenrichtungen sind über die entsprechende Vorspannkraft der Fäden beim Webprozess variierbar [Mie01].

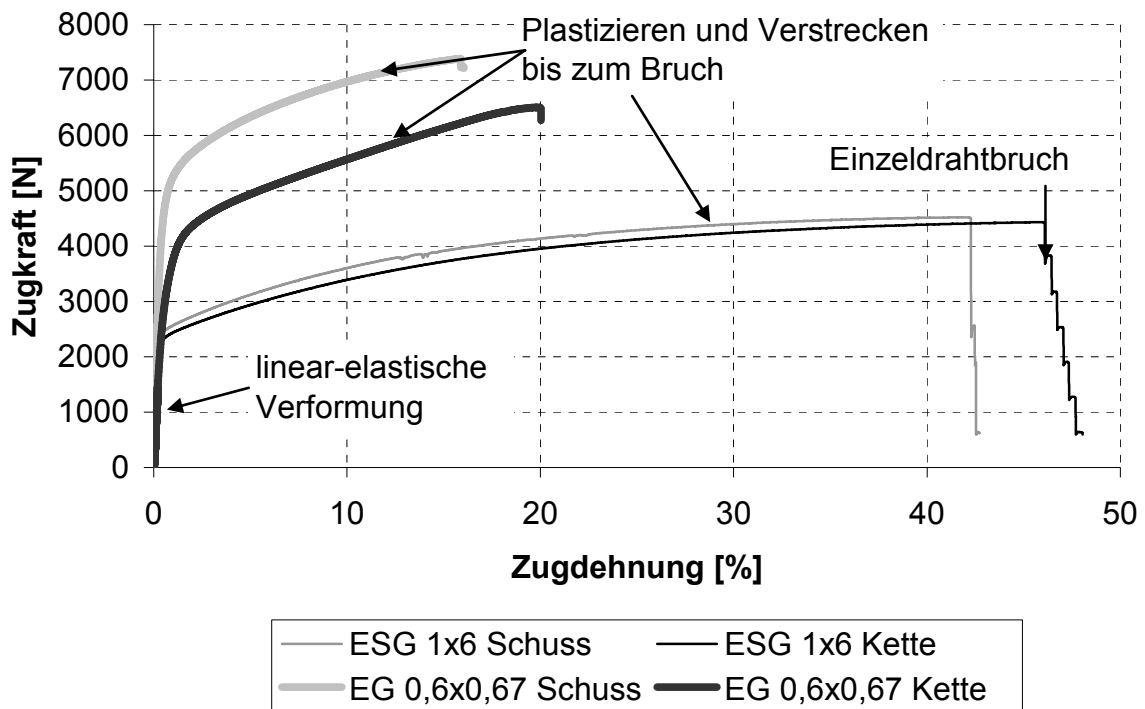


Bild 3.4: Exemplarische Zugkraft-Zugdehnungs-Verläufe

Das bedeutet im Einzelnen:

Wird eine hohe Vorspannkraft in eine Fadenrichtung gewählt, liegt nach dem Webprozess der Draht wenig onduziert im Gewebe vor. Daraus folgt, dass in diese Richtung hohe Textilfestigkeiten bei niedrigen Dehnungen erreicht werden.

Der vorangegangene dargestellte Zusammenhang wird nochmals in Bild 3.5 ersichtlich, in dem die ertragbaren breitenbezogenen Höchstzugkräfte der verschiedenen geprüften Edelstahltextilien dargestellt sind.

Weiterhin wird am Beispiel des Gewebes 0,6x0,67 mm deutlich, dass nur eine geringe Festigkeitsminderung von ca. 5% (Kettfadenrichtung) bzw. ca. 10% (Schussfadenrichtung) durch die Prüfkörpergeometrieangepassung in Kauf genommen werden musste. Die Geometrieinflüsse auf die ertragbaren Höchstzugkräfte sind somit nahezu vernachlässigbar.

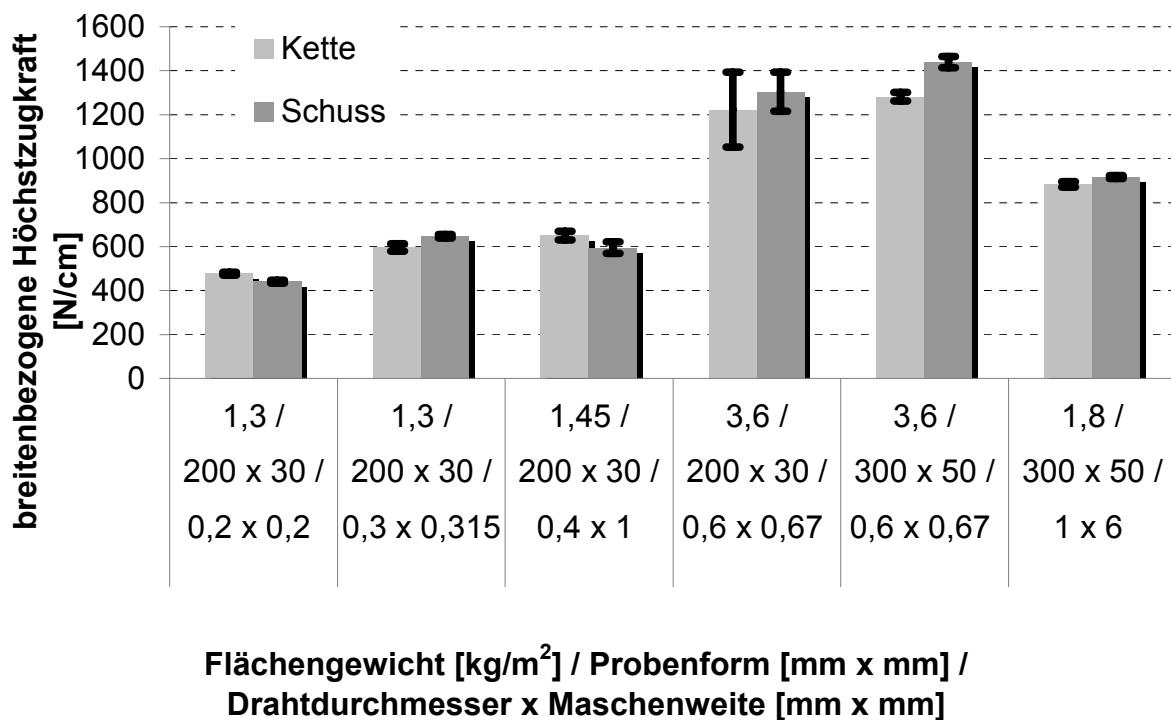


Bild 3.5: Breitenbezogene Höchstzugkraft der geprüften Textilien in Anlehnung an Norm DIN EN ISO 13934-1

Zudem wird deutlich, dass die Textilien mit den höchsten Flächengewichten auch die höchsten Zugkräfte übertragen.

In Bild 3.6 werden die Dehnungen bei Höchstzugkraft der geprüften Textilien dargestellt. Die Darstellung erfolgt wieder für die Schuss- und Kettfadenrichtung. Mittels dieser Grafik soll das bereits diskutierte Dehnungsverhalten der Textilien verdeutlicht werden. So zeigt die Fadenrichtung mit der höheren übertragbaren Zugkraft in den meisten Fällen die geringere Dehnung. Für das 0,2x0,2 mm Köpergewebe wurde ein gegenteiliges Verhalten verzeichnet. Das Schweißgitter zeigt ebenfalls einen deutlichen Unterschied zwischen den Dehnungen in „Schuss- und Kettfadenrichtung“. Als Grund hierfür wurde eine sehr hohe Vorspannung der „Schussfäden“ in Betracht gezogen, die eine plastische Vorschädigung des Drahtes zur Folge hat und somit zu einer Höchstzugkraftdehnungsreduktion führt. Abschließend kann zusammenfassend festgestellt werden, dass diese festen und hochdehnfähigen Textilien ein sehr gutes statisches Energieabsorptionsverhalten zeigen.

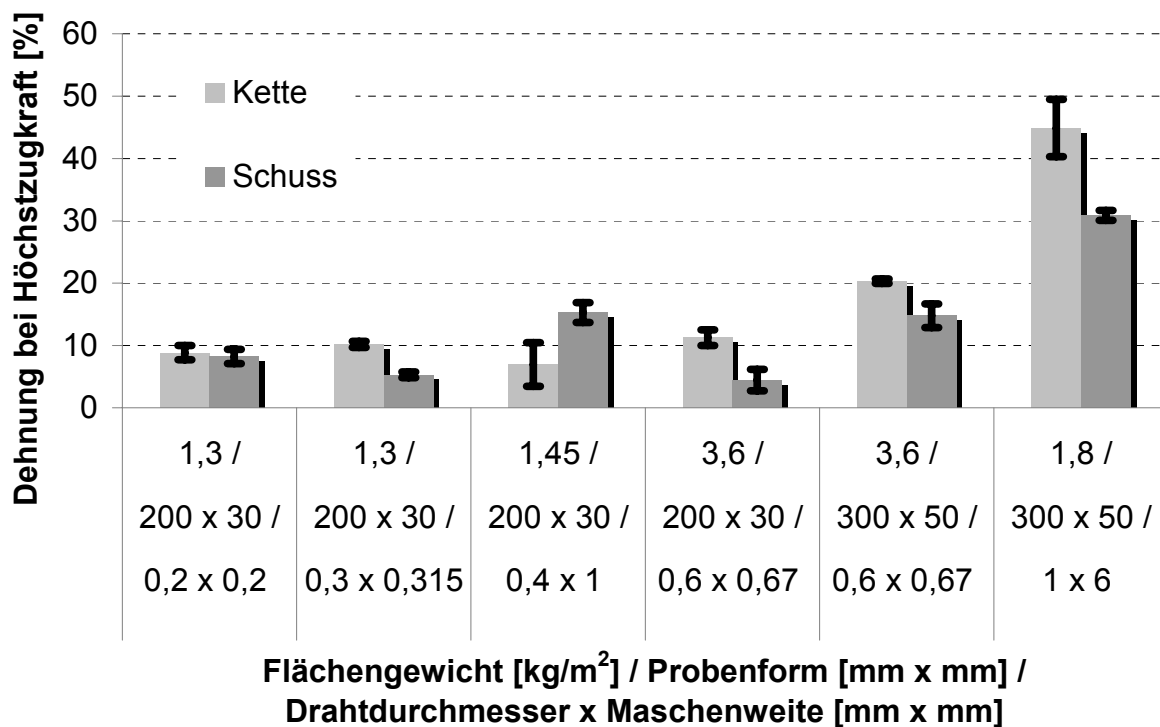


Bild 3.6: Dehnungen bei Höchstzugkraft der geprüften Textilien in Anlehnung an Norm DIN EN ISO 13934-1

3.3 Dynamische Durchstoßeigenschaften von verschiedenen Edelstahlverstärkungstextilien

3.3.1 Probenvorbereitung und Versuchsdurchführung

Die Textildurchstoßprüfungen wurden in Anlehnung an die Norm DIN EN ISO 6603-2 durchgeführt [Nor03]. Die Prüfung wurde an allen fünf ausgewählten Edelstahltextilien durchgeführt. Als Prüfeinrichtung wurde eine Minifallturmanlage der Firma CEAST vom Typ Fractovis genutzt (Funktionsprinzip s. Anhang A0). Der Schwerpunkt dieser Charakterisierung liegt in der Ermittlung der absorbierten Impaktenergie und der dynamisch-plastischen Deformation bei einer mehrachsigen Beanspruchung. Die wesentlichen Prüfeinstellungen und Prüfparameter sind in Tabelle 3.3 zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 3.3: Prüfparameter / Prüfeinstellungen im Textildurchstoßversuch

Probenform [mm x mm]	160 x 160
Spannvorrichtung [-]	pneumatisch / mechanisch (Schlauchschele)
Spannkraft [kN]	3 / -
Impaktordurchmesser [mm]	20
Impaktmasse [kg]	10,357
Impaktenergie [J]	125
Impaktgeschwindigkeit [m/s]	4,9
Fallhöhe [m]	1,23
Federkompression [mm]	26,7

3.3.2 Ergebnisse und Diskussion

In Bild 3.7 sind typische Durchstoßkraft-Deformations-Verläufe der untersuchten fünf Verstärkungstextilien dargestellt. Das Köpergewebe 0,2x0,2 mm und das Leinwandgewebe 0,6x0,67 mm zeigen ein sehr gutes Formänderungsvermögen, bis die Maximalkraft erreicht wird. Die größten Durchstoßkräfte werden von den „schweren“ Textilien erzielt (Schweißgitter 1x6 mm und Leinwandgewebe 0,6x0,67 mm, da bei diesen Prüfkörpern deutlich mehr Werkstoff pro Flächeneinheit durchstoßen werden muss). Die übrigen drei Edelstahltextilien liegen nahezu auf einem Kraftniveau. Diese Staffelung der Textilien sollte sich auch bei der Betrachtung der absorbierten Impaktenergie widerspiegeln. Die absorbierte Impaktenergie wird durch Integration der Durchstoßkraft-Deformations-Verläufe wie folgt ermittelt:

$$E_{\text{Imp}} = \int F_{\text{Dst}} \cdot ds_{\text{Def}} \quad (3.1)$$

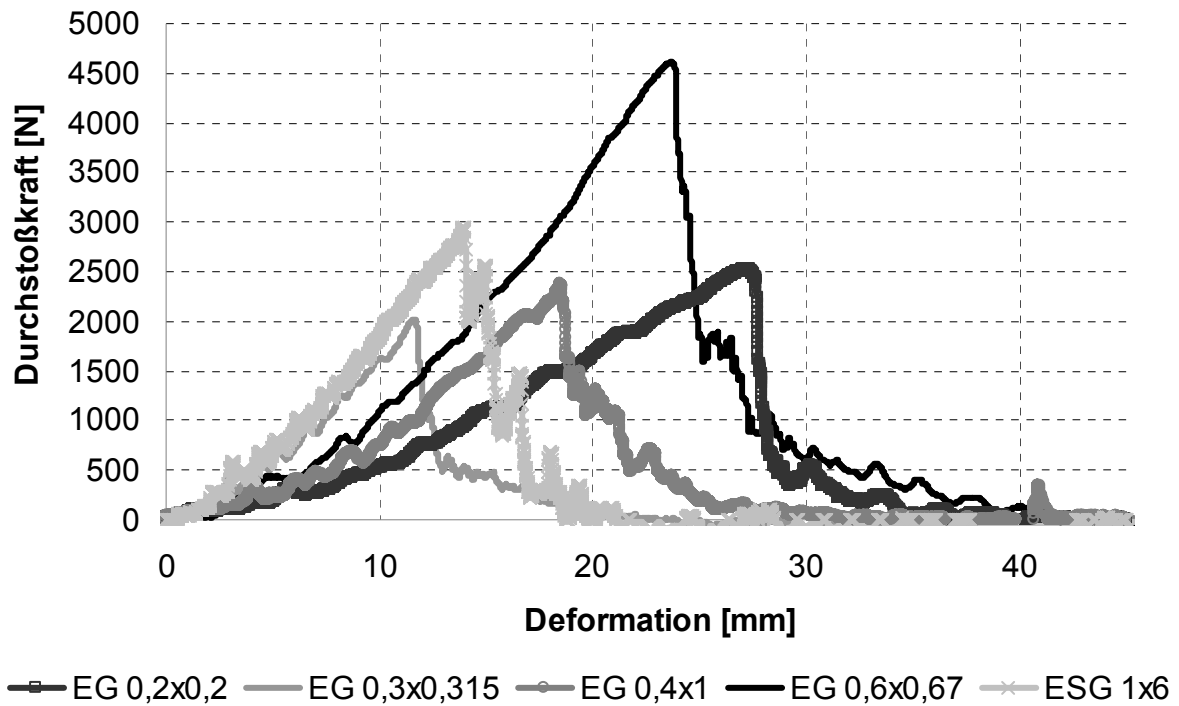


Bild 3.7: Durchstoßkraft-Deformations-Verläufe der geprüften Textilien (typ.)

Die für jedes Textil berechnete absorbierte Impaktenergie ist in Grafik 3.8 abgebildet.

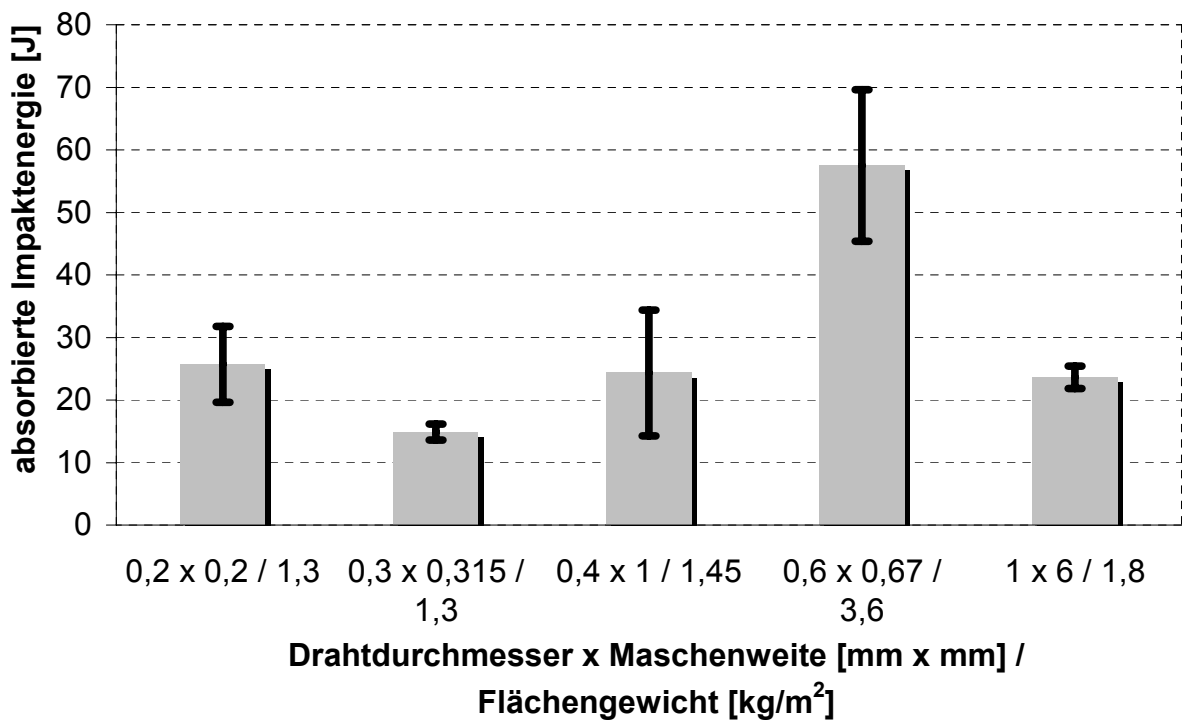


Bild 3.8: Absorbierte Impaktenergien der geprüften Textilien

Bei der Betrachtung von Bild 3.8 wird deutlich, dass das Leinwandgewebe 0,6x0,67 mm aufgrund seiner hohen Dehnbarkeit und der hohen erzielten Durchstoßkräfte mit Abstand die höchste Impaktenergie absorbiert. Bis auf das Leinwandgewebe 0,3x0,315 mm liegen alle übrigen Textilien in etwa auf demselben Absorptionsniveau, da je nach Probe etwas höhere Durchstoßkräfte durch kleinere Verformungen kompensiert werden oder umgekehrt. Wie schon angedeutet wurde, weist das 0,3x0,315 mm Edelstahltextil die schlechtesten Energieabsorptionseigenschaften auf. Dies lässt sich durch das geringste Kraft- und Deformationsniveau von allen geprüften Materialien erklären.

Zur Verdeutlichung des hervorragenden dynamisch-plastischen Formänderungsverhaltens derartiger Edelstahltextilien bei Durchstoßbeanspruchung ist ein typisches Bruchbild vom Leinwandgewebe 0,4x1 mm im Folgenden abgebildet (s. Bild 3.9).

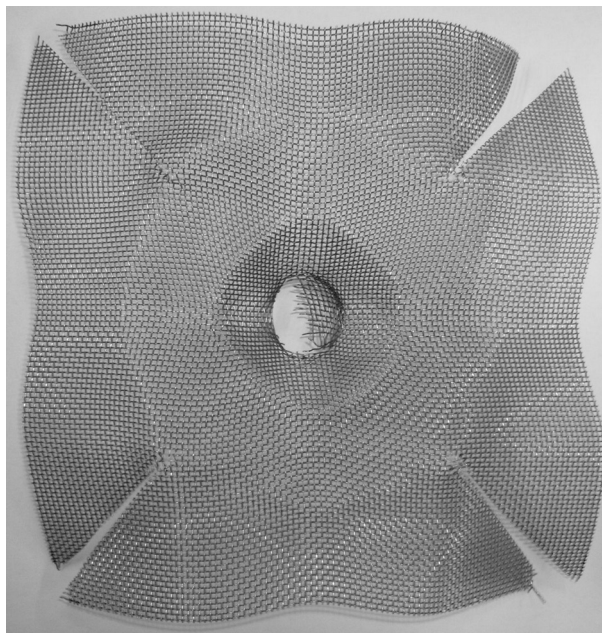


Bild 3.9: Bruchbild eines Leinwandgewebes 0,4x1 mm (typ.)

3.4 Metallografie

Innerhalb dieses Abschnitts werden metallografische Aufnahmen des austenitischen Edelstahls X5CrNi1810 dargestellt und diskutiert. Hierzu wurden aus Probekörperplatten ohne vorhergehende mechanische Beanspruchung und aus bis zum Zugbruchversagen deformierten ETV-Verbundwerkstoffen 5 mm x 5 mm große Probekörper entnommen und anschließend in Epoxydharz eingebettet. Danach erfolgte eine Schleif- und Polierbearbeitung des Materials mit dem Ziel, das Gefüge optisch

analysieren zu können. Die so vorbereiteten Schriffe wurden dann mittels Polarisationsmikroskopie untersucht. Eine Präparation von einzelnen Edelstahldrähten ohne Einbettung in PP/GF stellte sich als nicht zielführend heraus. Die notwendigen Schleif- und Polierarbeiten führten in den meisten Fällen zu einer völligen Abtragung des Drahtes. Alle metallografischen Untersuchungen wurden in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Werkstoffkunde der Technischen Universität Kaiserslautern durchgeführt.

Im Weiteren wird in Bild 3.10 das Gefüge von 0,6 mm Edelstahldrähten ohne Belastungshistorie einer Probe des Werkstoffs PP/GF 40 (CP) mit Leinwandgewebeverstärkung (0,6x0,67 mm) dargestellt.

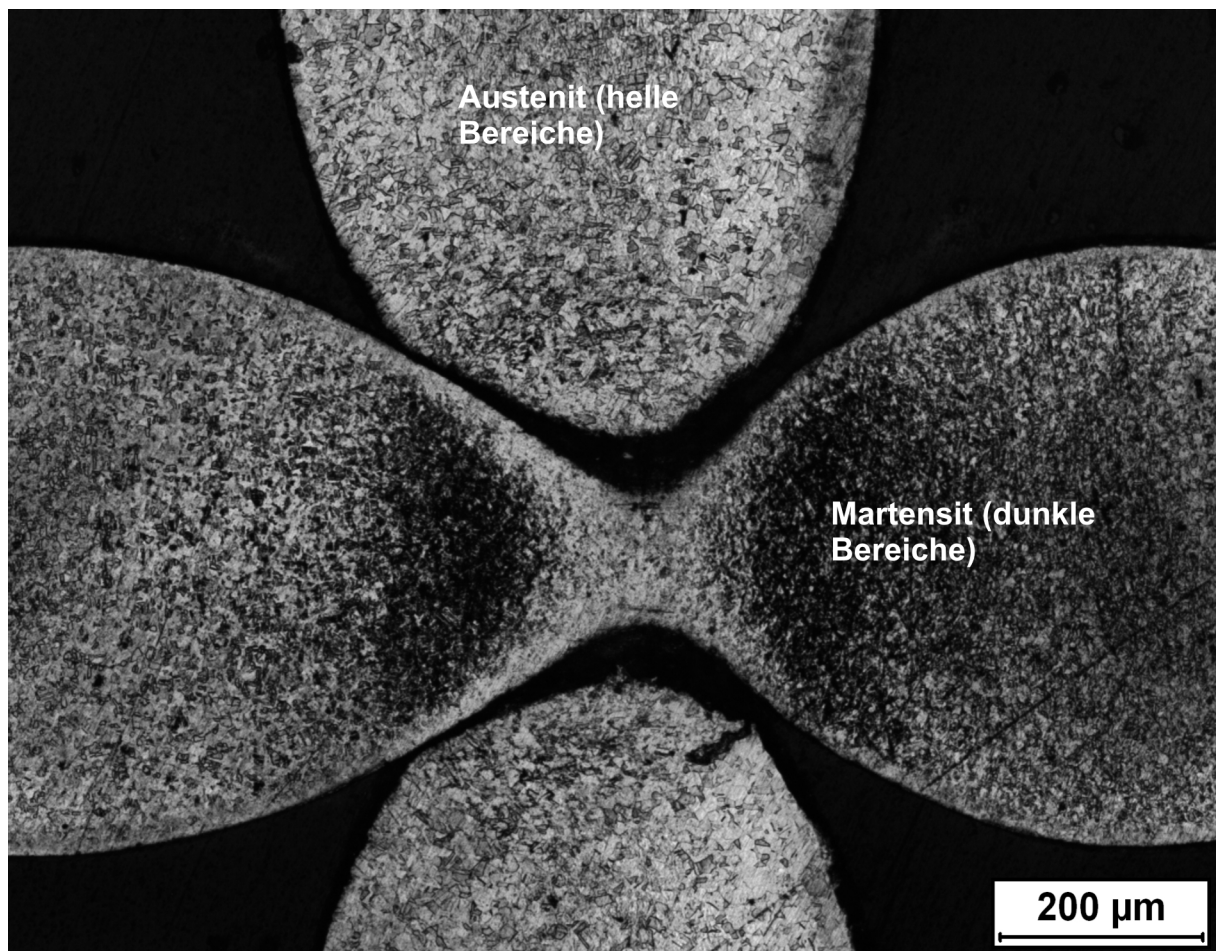


Bild 3.10: Gefüge von 0,6 mm X5CrNi1810-Drähten ohne Belastungshistorie einer Probe des Werkstoffs PP/GF 40 (CP) mit Leinwandgewebeverstärkung (0,6x0,67 mm)

Bild 3.10 zeigt, dass selbst ohne mechanische Beanspruchung große Bereiche des dargestellten Gefüges eine martensitische Struktur aufweisen (dunkle Gefügeanteile). Dies resultiert aus dem Webprozess, bei dem die austenitischen Edelstahldrähte (helle Gefügeanteile im Bild) erheblich plastisch deformiert werden und so verformungsinduziert α' -Martensit bilden [Sma01]. Ferner bedeutet das für die mechanischen Eigenschaften der Drähte, dass sie eine höhere Festigkeit bei gleichzeitig reduzierter plastischer Verformbarkeit aufweisen. Kurz zusammengefasst: Es liegt eine Vorschädigung der Drähte vor. Im Folgenden wird in Bild 3.11 das Gefüge der Zugbruchfläche eines 0,6 mm Drahtes, der ebenfalls einer Probe des Werkstoffs PP/GF 40 (CP) mit Leinwandgewebeverstärkung (0,6x0,67 mm) entnommen wurde, dargestellt.

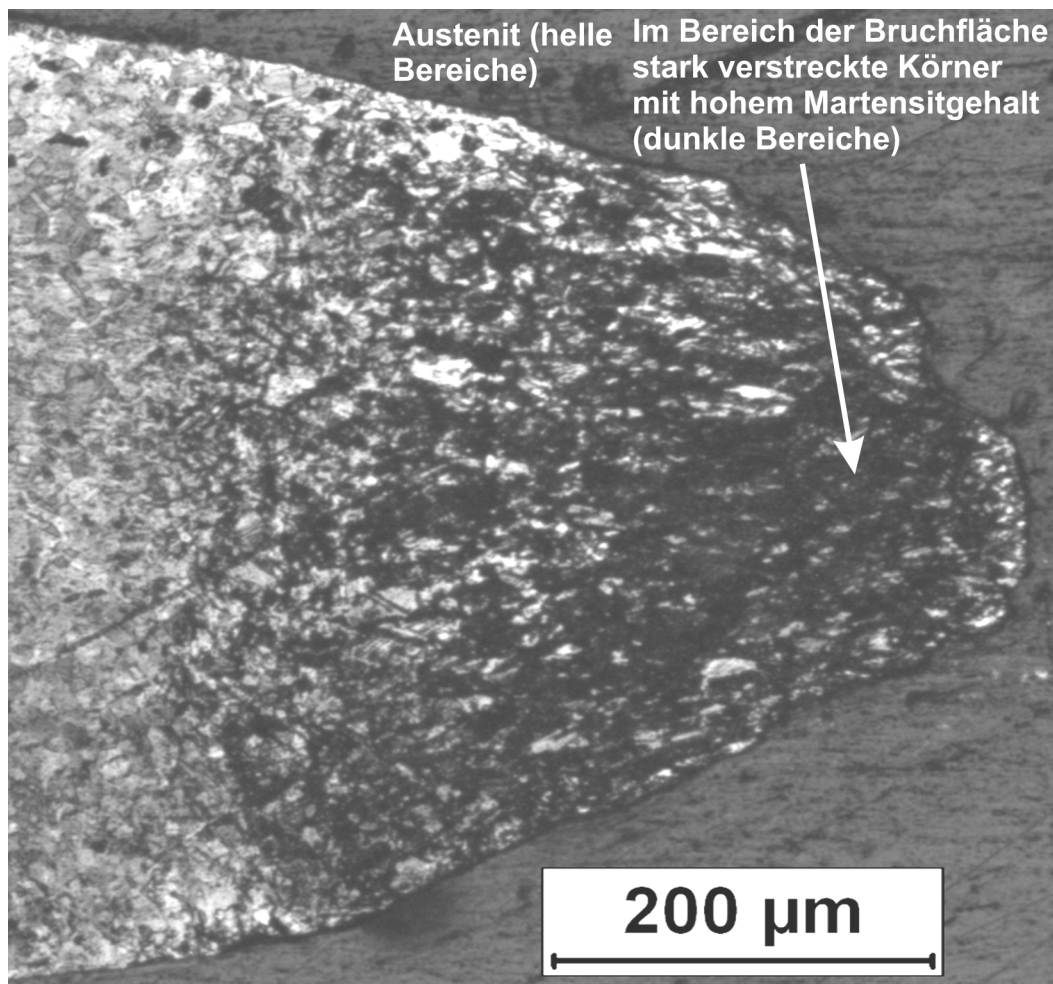


Bild 3.11: Gefüge einer Zugbruchfläche eines 0,6 mm Edelstahldrahtes des Werkstoffs PP/GF 40 (CP) mit Leinwandgewebeverstärkung (0,6x0,67 mm)

Bild 3.11 verdeutlicht, dass bei diesem Verbundwerkstoff nur im Bereich der Bruchfläche eine sehr starke α' -Martensitbildung (dunkle Gefügebereiche) und eine Verstreckung der Körner stattgefunden hat. Dies bedeutet, dass der Draht nur lokal und nicht über die gesamte Länge plastisch deformiert wurde. Durch das abrupte Versagen der LFT-Einbettung bei einer Dehnung von ca. 2 % wird somit die maximal mögliche plastische Deformation der gesamten Edelstahltextilverstärkung nicht erreicht, d. h. das quasistatische Energieabsorptionspotential der Verstärkung wird bei uniaxialer Zugbeanspruchung nicht vollständig genutzt.

3.5 Thermisches Verhalten und Beständigkeit der PP-Matrixsysteme

3.5.1 Allgemeines und Versuchsdurchführung

Im Folgenden werden das thermische Verhalten und die Beständigkeit der in diesem Forschungsprojekt eingesetzten Matrixwerkstoffe untersucht. Als Matrixsysteme werden ein PP-Homopolymer HP 500 V (**HP**; kurzkettig, großer MFR, relativ geringe Bruchdehnung, große Festigkeit / Steifigkeit) und ein PP-Copolymer EP 340 K (**CP**; langkettig, kleiner MFR, große Bruchdehnung, geringe Festigkeit / Steifigkeit) verwendet. Die Untersuchungen zur Ermittlung des thermischen Verhaltens und der Beständigkeit wurden mittels DSC-Verfahren durchgeführt. Für die Versuchsdurchführung wurde ein DSC-Gerät 821 der Firma Mettler Toledo verwendet. Das thermische Verhalten und die Kristallinität wurden durch einen Heiz- / Kühlzyklus bestimmt. Wesentliche Parameter dieses Versuchs sind in Tabelle 3.4 dargestellt.

Tabelle 3.4: Parameter zur Bestimmung des thermischen Verhaltens / Kristallinität

PP	HP 500 V (HP) / EP 340 K (CP)
Starttemperatur - Heizen [°C]	20
Endtemperatur - Heizen [°C]	230
Starttemperatur - Kühlen [°C]	230
Endtemperatur - Kühlen [°C]	20
Atmosphäre [-]	Stickstoff
Heizrate [K/min]	10
Kühlrate [K/min]	10

Weiterhin unterliegen die PP-Werkstoffe bei der Herstellung der edelstahltextilverstärkten Verbunde (ETV-Verbunde) sehr großen thermischen Belastungen (s. Kapitel 4). Aufgrund dieser thermischen Belastungen wurde eine Schädigung der PP-Matrixsysteme in Betracht gezogen. Um eine thermische Schädigung der Matrices ausschließen zu können, wurde der thermische Verlauf des Fertigungsprozesses mittels DSC-Verfahren nachgebildet. Die Versuche wurden deshalb unter Luftatmosphäre mit zwei Heiz- / Kühlzyklen durchgeführt. Der erste Zyklus bildet den thermischen Verlauf des Plastifizier- / Pressprozesses für PP und PP/GF nach (Verweildauer des Plastifikats im Extruder wurde auf 15 Minuten abgeschätzt). Zyklus 2 dient zur Nachbildung der thermischen Beanspruchung der Ofenerwärmung und des Pressvorgangs bei der Herstellung der ETV-Verbunde. Eine Abkühlrate, wie sie beim Pressen der entsprechenden Werkstoffe auftritt (> 40 K/min), konnte regelungstechnisch nicht dargestellt werden. Für die Heiz- und Kühlrate wurde deshalb der gleiche Wert gewählt.

Die wesentlichen Parameter der Untersuchung zur thermischen Beständigkeit der PP-Materialien sind in Tabelle 3.5 dargestellt.

Tabelle 3.5: Parameter zur Bestimmung der thermischen Beständigkeit

PP	HP 500 V (HP) / EP 340 K (CP)
Starttemperatur – Heizen1 [°C]	25
Endtemperatur – Heizen1 [°C]	230 / 250
Starttemperatur – Kühlen1 [°C]	230 / 250
Endtemperatur – Kühlen1 [°C]	25
Atmosphäre - Zyklus1 [-]	Luft
Heizrate - Zyklus1 [K/min]	13,67 / 15
Kühlrate - Zyklus1 [K/min]	13,67 / 15
Starttemperatur – Heizen2 [°C]	25
Endtemperatur – Heizen2 [°C]	210
Starttemperatur – Kühlen2 [°C]	210
Endtemperatur – Kühlen2 [°C]	25
Atmosphäre – Zyklus2 [-]	Luft
Heizrate – Zyklus2 [K/min]	18,5 / 13,21
Kühlrate – Zyklus2 [K/min]	18,5 / 13,21

3.5.2 Ergebnisse und Diskussion

In Bild 3.12 sind die ermittelten Wärmeleistungs-Temperatur-Verläufe der untersuchten PP-Werkstoffe zur Bestimmung des thermischen Verhaltens und der Kristallinität dargestellt. Mittels Bild 3.12 wird deutlich, dass die Schmelz- und Rekristallisationstemperaturen in einem für PP üblichen Bereich liegen. Für das PP-Homopolymer wurde zudem eine höhere Kristallinität im Vergleich zum PP-Copolymer ermittelt (s. [GS01]). Dies bedingt entsprechende Werkstoffeigenschaften wie hohe Festigkeit, Steifigkeit und kleine Bruchdehnung. Weiterhin ist der deutlich größere Rekristallisationspeak bei PP (HP) ersichtlich, welcher zu einer weiteren Erhöhung der Sprödigkeit des Werkstoffs beitragen kann.

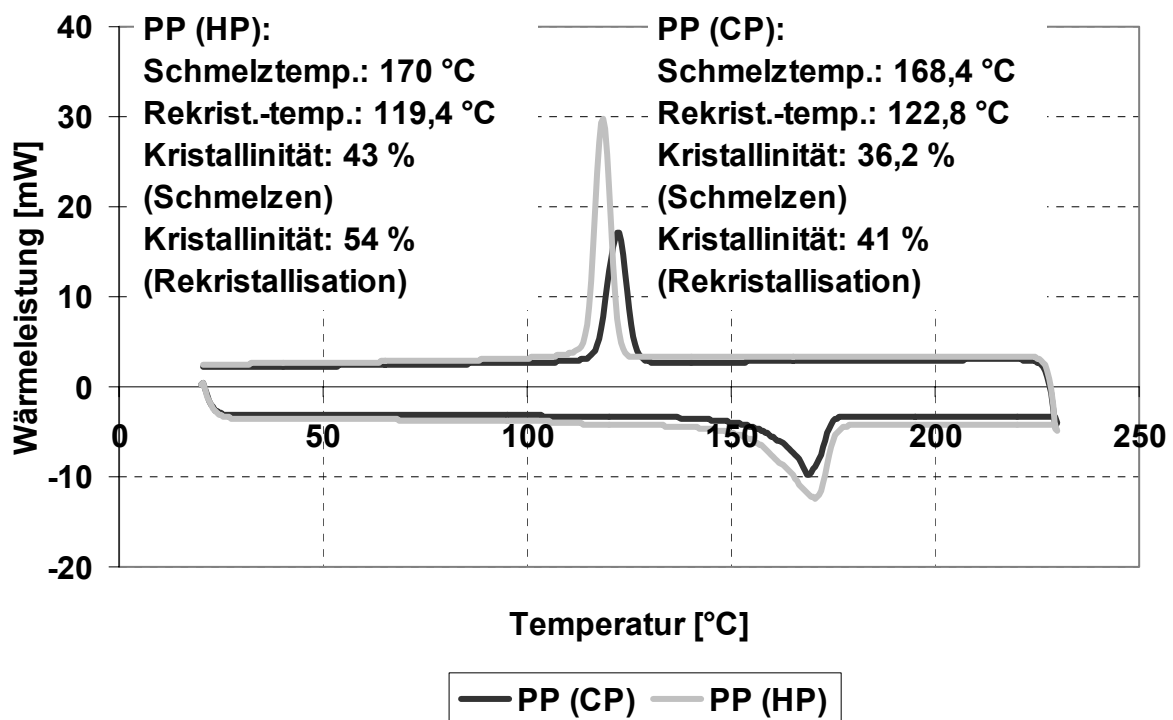


Bild 3.12: Thermisches Verhalten und Kristallinität der eingesetzten PP-Werkstoffe

In Grafik 3.13 werden die Wärmeleistungs-Temperatur-Verläufe der zwei untersuchten PP-Werkstoffe zur Bestimmung der thermischen Beständigkeit unter Fertigungsbedingungen abgebildet.

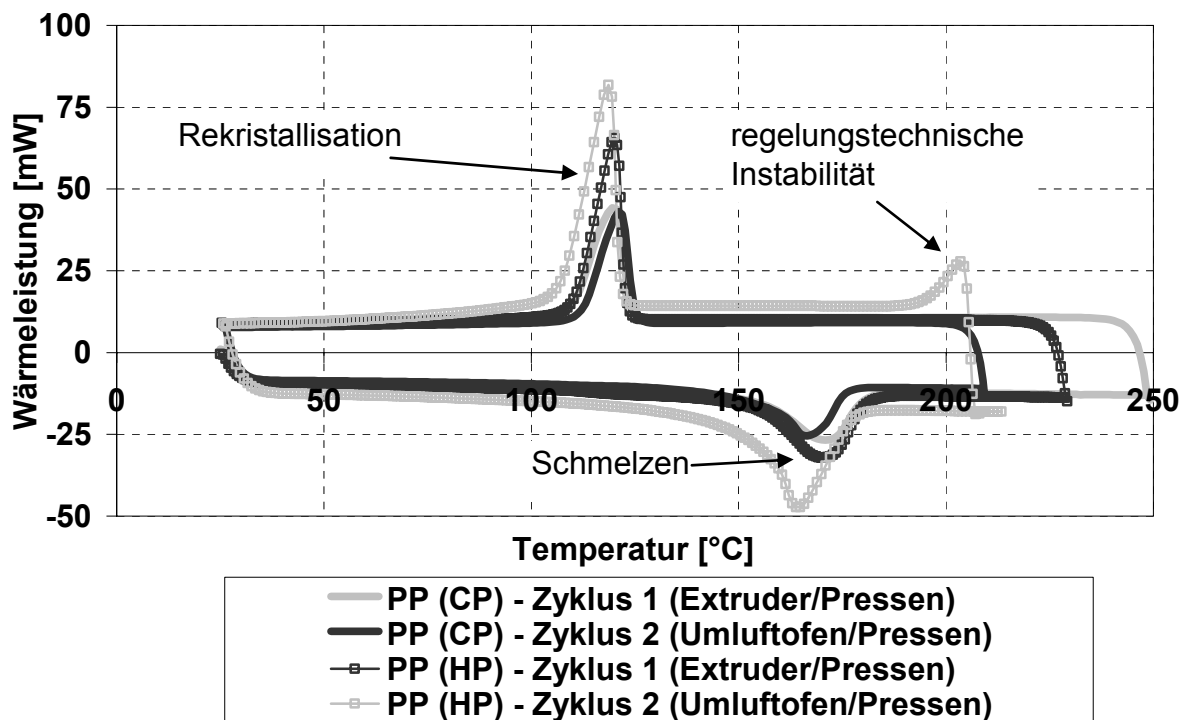


Bild 3.13: Wärmeleistungs-Temperatur-Verläufe zur Prüfung der thermischen Beständigkeit der PP-Werkstoffe unter Fertigungsbedingungen

Mit Hilfe von Bild 3.13 wird deutlich, dass trotz erheblicher thermischer Beanspruchung keiner der geprüften PP-Werkstoffe thermisch geschädigt wird, obwohl im zweiten Zyklus des PP-Homopolymers eine Wärmeleistungsspitze zwischen dem Bereich Heizen und Kühlen ersichtlich ist. Dieser resultiert aus einer regelungstechnischen Instabilität im Umschaltzeitpunkt von schnellem Aufheizen zu schnellem Kühlen (18,5 K/min). Weiterhin ist eine deutliche Zunahme der Schmelz- und Rekristallisationswärme und somit der Kristallinität zwischen dem ersten und dem zweiten Zyklus bei dem PP (HP) zu erkennen. Es ist deshalb mit einer deutlichen Versprödung des Werkstoffs durch den Fertigungsprozess zu rechnen. Bei dem untersuchten PP-Copolymer tritt dieses Verhalten kaum auf. Abschließend ist noch festzustellen, dass eine leichte Verschiebung der Schmelz- und Rekristallisationstemperaturen zwischen dem ersten und zweiten Zyklus zu verzeichnen ist.

3.6 Werkstoffstruktur und Probenentnahme

Wie schon dargestellt wurde, werden als Matrixmaterialien zwei PP-Werkstoffe mit unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften zur Herstellung der ETV-Verbundwerkstoffe eingesetzt. Diese werden mit einem PP-Langglasfaserkonzentrat (FACTOR ADD PP-LGF 60/30 N25 der Firma FACT) in unterschiedlichen Konzentrationen abgemischt und als PP/GF-Einbettung zur Fertigung von ETV-Verbundwerkstoffen verwendet. Aus den PP- und PP/GF-Werkstoffen werden in einem Plastifizier- / Fließpressprozess Plattenhalbzeuge hergestellt, welche anschließend zu den edelstahltextilverstärkten Verbunden weiterverarbeitet werden. Der Herstellungsprozess wird umfassend in Kapitel 4 dargestellt. Der wesentliche Punkt, der entscheidend für die Werkstoffstruktur und die Fließorientierung des PP/GF ist, ist die Lage des Plastifikats im Werkzeug. So wurde bei allen Untersuchungen, die mit dem PP-Homopolymer durchgeführt wurden, eine mittige Einlegeposition des Plastifikats im Werkzeug gewählt, um folgende Ziele zu erreichen (s. Kapitel 4.1):

- allseitig kurze Fließwege zur Verhinderung eines vorzeitigen Einfrierens der Fließfront bei kleiner Materialmasse → vollständige Formfüllung bei minimaler Plattendicke → hoher Metallvolumengehalt bei den ETV-Verbunden

Bei den weiteren Untersuchungen, die auf Basis des PP-Copolymers durchgeführt wurden, erfolgte eine Anpassung des Fertigungsprozesses (s. Kapitel 4.3). Es wurde dazu übergegangen, das Plastifikat außerhalb der Werkzeugmitte einzulegen. Folgende Ziele sollten mit dieser Änderung im Fertigungsprozess erreicht werden:

- Verlängerung des Fließweges in eine Werkzeugrichtung → stärkere Orientierung der Langglasfasern → höhere mechanische Eigenschaften in Fließrichtung des PP/GF (LFT) → höhere mechanische Eigenschaften der ETV-Verbundwerkstoffe

Zur Veranschaulichung der durch das Fließen auftretenden Faserorientierungen wurde an einer Durchlichtaufnahme eines PP/GF 40 (HP) – Plattenbereichs eine Faserwinkelanalyse mit der an der IVW GmbH entwickelten Software FIBORAS durchgeführt (s. Bild 3.14).

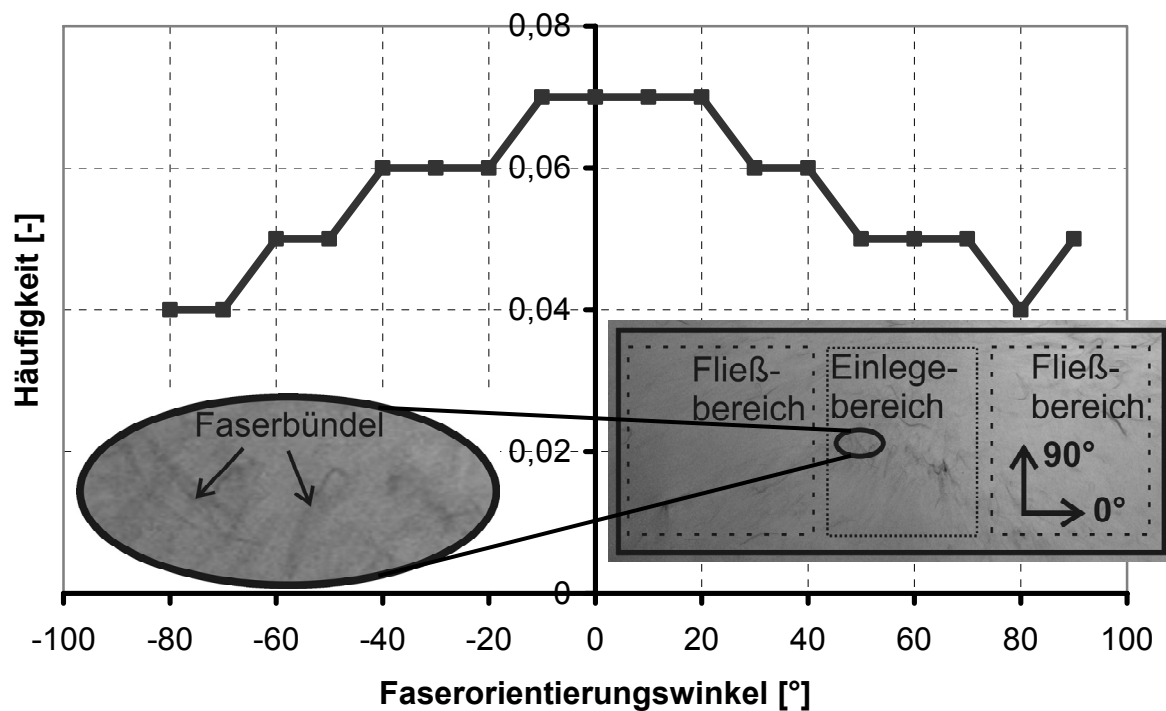


Bild 3.14: FIBORAS-Faserwinkelanalyse an einer Durchlichtaufnahme eines PP/GF 40 (HP) - Plattenbereichs mit Plastifikateinlegeposition in der Werkzeugmitte

Zur Faserwinkelbestimmung wurden in diesem Fall nur die sichtbaren und schlecht imprägnierten Glasfasern genutzt. Bei LFT-Platten mit einem sehr guten Imprägnierungsgrad sollte eine Faserwinkelanalyse an einem Röntgenbild durchgeführt werden. Mittels Bild 3.14 wird die bereits diskutierte Fließorientierung deutlich: Die Langglasfasern sind mit großer relativer Häufigkeit im Bereich von -10° bis $+20^{\circ}$ orientiert. Dieses Analyseergebnis bildet im Wesentlichen die Basis für die Erstellung der Probenentnahmepläne, welche im Folgenden noch abgebildet und diskutiert werden.

Eine weiteres Verfahren zur Visualisierung von Werkstoffstrukturen und Faserorientierungen im 3D-Bereich sind μ CT-Aufnahmen (mikrocomputertomografische Aufnahmen). Eine solche Aufnahme ist in Bild 3.15 dargestellt. Das Bild zeigt einen Ausschnitt aus dem Fließbereich einer PP/GF 40 (CP) - Platte mit außermittiger Plastifikateinlegeposition im Werkzeug. Die mikrocomputertomografischen Aufnahmen wurden in Zusammenarbeit mit der Abteilung für Werkstoffwissenschaften der IVW GmbH erstellt.

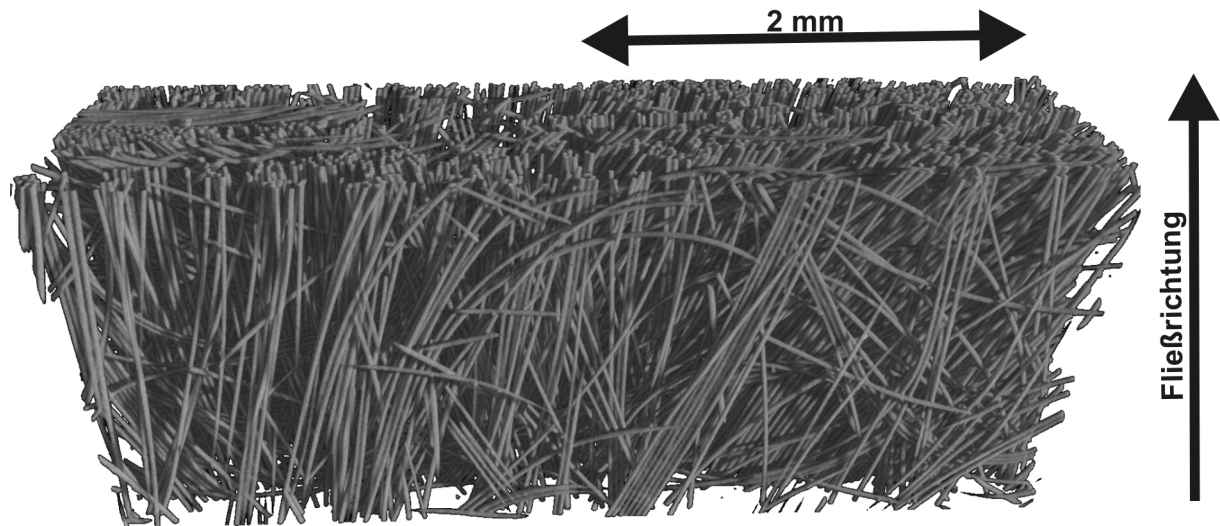


Bild 3.15: μ CT-Aufnahme aus dem Fließbereich einer PP/GF 40 (CP) – Platte mit außermittiger Plastifikateinlegeposition

In Bild 3.15 ist wieder die mehrheitliche Orientierung der Langglasfasern in die Fließrichtung zu erkennen, was besonders hohe mechanische Eigenschaften in dieser Richtung bedingt. Dementsprechend wird auch die Prüfkörperentnahme zur mechanischen Charakterisierung nach Bild 3.15 vorgenommen werden.

Die auf den Erkenntnissen der strukturellen Untersuchungen entwickelten Probenentnahmepläne zur mechanischen Prüfung der Matrixmaterialien werden in Bild 3.16 gezeigt. In der oberen Abbildung des Bildes 3.16 ist die Probekörperentnahme aus den PP- bzw. LFT-Platten mit homopolymerer PP-Matrix zu sehen. Weiterhin ist die schon vorangegangenen beschriebene Plastifikateinlegeposition gekennzeichnet. Aus den PP- bzw. PP/GF (HP) – Probekörperplatten werden abgeleitet von Bild 3.14 entsprechend Zugprüfkörper nach DIN EN ISO 527-4 [Nor04] in 0°-Richtung (Fließorientierung) und zur Bestimmung der Orthotropie in 90°-Richtung (quer zur Fließorientierung) entnommen. Eine Entnahme von Durchstoßprüfkörpern erfolgt ebenfalls. Die Orientierung der Langglasfasern ist in diesen Prüfkörpern von untergeordneter Bedeutung, da bei der Durchstoßprüfung ein mehrachsiger Spannungszustand im Werkstoff auftritt.

In der unteren Abbildung in Bild 3.16 ist der Entnahmeplan für Probekörper auf Basis des PP-Copolymers dargestellt. Auf eine Zugprüfung quer zur Fließorientierung der Langglasfasern wurde für diesen Matrixtyp verzichtet, um den Versuchsaufwand zu reduzieren (s. Kapitel 4.3).

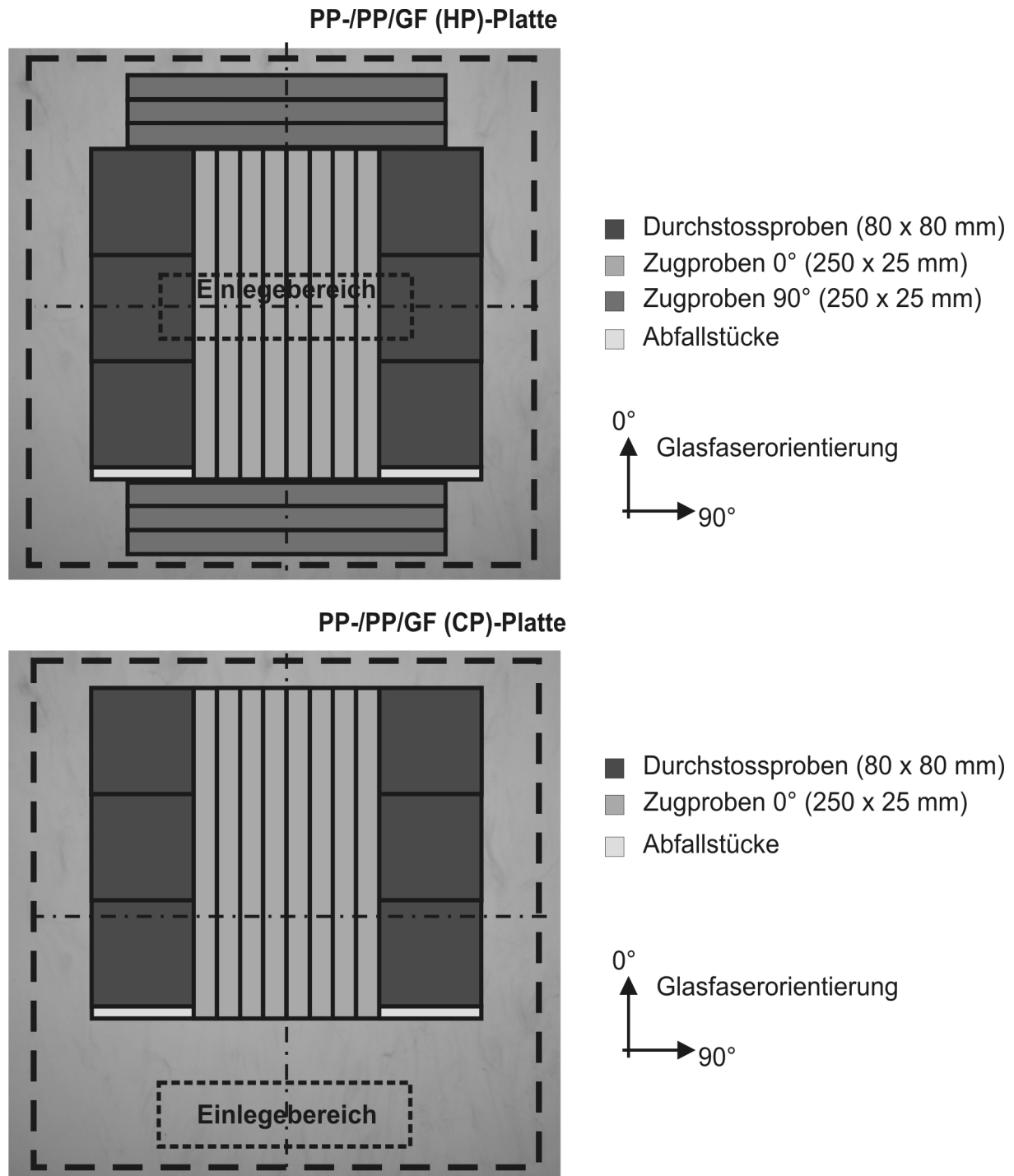


Bild 3.16: Probekörperentnahmepläne

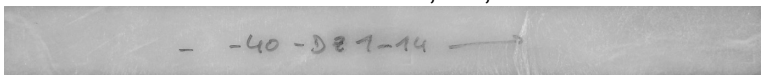
Anmerkung: Für die interlaminare Scherfestigkeitsprüfung (s. Kapitel 5) wurden die entsprechenden Versuchskörper aus dem Bereich der Prüfkörperentnahme in Fließrichtung in Anlehnung an Bild 3.16 untere Abbildung gefertigt. Weiterhin wurde die Probenentnahme für die ETV-Verbundwerkstoffe ebenfalls in Anlehnung an Bild 3.16 vorgenommen.

3.7 Charakterisierung der Matrix- und Einbettungswerkstoffe im quasi-statischen Zugversuch

3.7.1 Probenvorbereitung und Versuchsdurchführung

Die Zugversuche der untersuchten Matrix- und Einbettungswerkstoffe wurden in Anlehnung an DIN EN ISO 527-4 durchgeführt. Für die Versuchsdurchführung wurden zwei Universalprüfmaschinen der Firma Zwick Roell (Typ 1474 und 1485) verwendet. Die wesentlichen Versuchsparameter der durchgeführten Prüfungen sind in Tabelle 3.6 dargestellt.

Tabelle 3.6: Wichtige Prüfparameter im Zugversuch

Prüfparameter	Zwick 1474	Zwick 1485
Prüfkörperabmessungen, Flachzugprüfkörper Länge x Breite x Dicke [mm ³] und Prüfkörperbild	250 x 25 x 1,5-2,9 	
Kraftaufnehmer [kN]	10	250
Spannvorrichtung	Pneumatisch	Hydraulisch
Spanndruck [bar]	3	100 - 150
Vorkraft [N]	100	100
Messlänge [mm]	150	150
Einspannlänge [mm]	100	100
Messlänge der Makrowegaufnehmer [mm]	60	60
Dehnungsbereich der E-Modul-Ermittlung [%]	0,05 – 0,25	0,05 – 0,25
Prüfgeschw. bei E-Modul-Ermittlung [mm/min]	1	1
Prüfgeschw. nach E-Modul-Ermittlung [mm/min]	15 (PP-Werkstoffe); 7,5 (LFT-Werkstoffe)	15 (PP-Werkstoffe); 7,5 (LFT-Werkstoffe)

Die Probenentnahme für die Zugprüfungen erfolgte nach der Darstellung in Kapitel 3.6. Das wesentliche Ziel dieser Untersuchungen bestand in der Ermittlung von

Kennwerten der Matrix- und Einbettungswerkstoffe unter einachsiger Zugbelastung für die Simulation. Weiterhin sollten die Spannungs-Dehnungs-Verläufe bestimmt werden, um eine Abschätzung des Materialverhaltens der edelstahlverstärkten Verbundwerkstoffe (ETV-Verbundwerkstoffe) durchführen zu können. Folgende Matrix- (PP) bzw. Einbettungswerkstoffe (LFT) wurden untersucht:

Matrixsysteme:

- PP-Homopolymer (HP; Basell HP 500 V hergestellt im Plastifizier- / Fließpressprozess)
- PP-Copolymer (CP; Basell EP 340 K hergestellt im Plastifizier- / Fließpressprozess)

Einbettungswerkstoffe (langglasfaserverstärkte PP-Werkstoffe mit verschiedenen Glasfasergewichtsanteilen und PP-Matrixsystemen):

- PP/GF 40 (HP) (Langfaserthermoplast (LFT) mit 40-Gew.-% Glasfasern bestehend aus PP – Basell HP 500 V und LFT- Konzentrat der Firma FACT - FACTOR ADD PP-LGF 60/30 N25 – hergestellt im Plastifizier- / Fließpressprozess)
- PP/GF 40 (CP) (Langfaserthermoplast (LFT) mit 40-Gew.-% Glasfasern bestehend aus PP – Basell EP 340 K und LFT- Konzentrat der Firma FACT - FACTOR ADD PP-LGF 60/30 N25 – hergestellt im Plastifizier- / Fließpressprozess)
- PP/GF 20 (CP) (Langfaserthermoplast (LFT) mit 20-Gew.-% Glasfasern bestehend aus PP – Basell EP 340 K und LFT- Konzentrat der Firma FACT - FACTOR ADD PP-LGF 60/30 N25 – hergestellt im Plastifizier- / Fließpressprozess)

Auf den Herstellungsprozess der Probekörper wird ausführlich in Kapitel 4.1.1 eingegangen.

3.7.2 Ergebnisse und Diskussion

Im folgenden Bild 3.17 sind die für die untersuchten Matrix- und Einbettungswerkstoffe ermittelten typischen Spannungs-Dehnungs-Verläufe dargestellt.

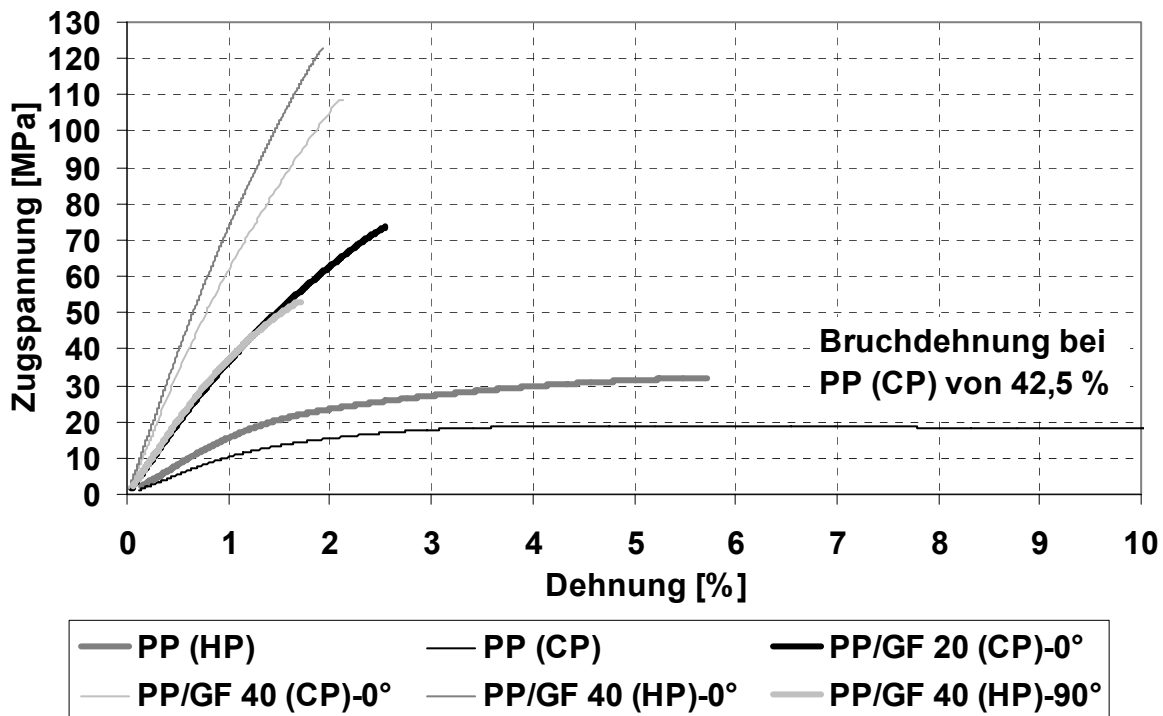


Bild 3.17: Typische technische Spannungs-Dehnungs-Verläufe der untersuchten Matrix- und Einbettungswerkstoffe

Mit Hilfe von Bild 3.17 wird deutlich, dass die unverstärkten PP-Matrixwerkstoffe relativ hohe Dehnungen bei kleinen Festigkeiten aufweisen, wobei sich das PP-Copolymer unter einachsiger Zugbeanspruchung deutlich duktiler verhält als das PP-Homopolymer. Im Gegensatz dazu sind bei dieser Belastungsart höhere Steifigkeiten und Festigkeiten bei dem PP-Homopolymer ermittelt worden. Generell ist jedoch festzustellen, dass die Werksangaben insbesondere bei den erzielbaren Bruchdehnungen oft nicht erreicht wurden, da die untersuchten Prüfkörper nicht im Spritzgießverfahren, sondern im Fließpressverfahren hergestellt wurden. Dieses Herstellungsverfahren bedingt größere Sphärolite und eine höhere Kristallinität in besonderem Maße bei dem PP-Homopolymer (die übermolekularen Strukturen sind unterschiedlich), was zu einer erhöhten Spröbruchneigung und zu einer verringerten Bruchdehnung führt [s. Kar01]. Weiterhin wird mittels Bild 3.17 ersichtlich, dass im Fließpress-

verfahren hergestellte LFT-Werkstoffe nicht als quasiisotrope Materialien betrachtet werden können. Im Falle des in 0°- und 90°-Richtung untersuchten PP/GF 40 (HP) wurden im Vergleich zur 90°-Richtung (quer zur Fließrichtung) etwa doppelt so große Zugsteifigkeiten und Zugfestigkeiten in die Fließrichtung (0°) ermittelt (s. Tabelle 3.7). Für das PP/GF 20 (CP) wurden im Zugversuch mittlere Eigenschaftskennwerte bestimmt. Die höchsten Zugfestigkeiten und Zugsteifigkeiten wurden von den Matrix- bzw. Einbettungswerkstoffen mit den höchsten Glasfasergehalten (PP/GF 40 (HP) und PP/GF 40 (CP)) in die Fließrichtung (0°) ermittelt, wobei sich die Eigenschaften der eingesetzten Polypropylene auch im LFT-Verbund widerspiegeln (Festigkeit und Bruchdehnung, s. Tabelle 3.7). Die wesentlichen Kennwerte, die der Zugversuch lieferte, sind in der folgenden Tabelle 3.7 zusammenfassend abgebildet.

Tabelle 3.7: Gemittelte Zugversuchskennwerte der Matrix- / Einbettungswerkstoffe

Werkstoff	Zugfestigkeit (R_m)	E-Modul	Bruchdehnung (A_5)
PP (HP)	31,5 MPa	1585 MPa	5,1 %
PP/GF 40 (HP)-0°	110 MPa	7167 MPa	1,9 %
PP/GF 40 (HP)-90°	54 MPa	4099 MPa	1,8 %
PP (CP)	18,5 MPa	1040 MPa	55,1 %
PP/GF 20 (CP)-0°	75 MPa	3912 MPa	2,5 %
PP/GF 40 (CP)-0°	108 MPa	6644 MPa	2,1 %

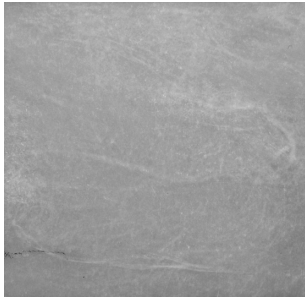
Auf eine Darstellung von Bruchbildern und des Bruchverhaltens wird in diesem Kapitel verzichtet. Sie erfolgt in Verbindung mit dem ETV-Verbundwerkstoffbruchverhalten in Kapitel 4.

3.8 Charakterisierung der Matrix- und Einbettungswerkstoffe mittels hochdynamischem Durchstoßversuch

3.8.1 Probenvorbereitung und Versuchsdurchführung

Der instrumentierte Durchstoßversuch in Anlehnung an die Norm DIN EN ISO 6603-2 dient im Wesentlichen zur Bestimmung der Energieabsorptionseigenschaften von Werkstoffen unter Impaktbelastung [GS01].

Tabelle 3.8: Versuchsparemeter bei der Durchstoßprüfung

Prüfkörperabmessungen: Länge x Breite x Dicke [mm ³] mit Prüfkörperbild	80 x 80 x 1,5-2,9 
Spannvorrichtung [-]	pneumatisch
Spannkraft [kN]	3
Impaktordurchmesser [mm]	20
Impaktmasse [kg]	7,357 bei PP (CP); PP/GF 20 (CP); PP/GF 40 (CP) 6,357 bei PP (HP); PP/GF 40 (HP)
Impaktenergie [J]	5 bei PP (HP) 50 bei PP/GF 40 (HP) 125 bei PP (CP) 175 bei PP/GF 20 (CP); PP/GF 40 (CP)
Impaktgeschwindigkeit [m/s]	5J=1,25; 50J=3,97; 125J=5,8; 175J=6,9
Fallhöhe [m]	5J=0,08; 50J=0,80; 125J=1,73; 175J=2,43
Federkompression [mm]	5J=0; 50J=0; 125J=41,4; 175J=57,8

Die Versuche wurden auf der Minifallturmanlage der Firma CEAST des Typs Fractovis durchgeführt. Die Ermittlung der Kraft-Deformations-Verläufe und der absorbier-

ten Impaktenergie der zur Verfügung stehenden Matrix- bzw. Einbettungswerkstoffe standen im Vordergrund dieser Untersuchungen. Die Impakteigenschaften der edelstahltextilverstärkten Verbundwerkstoffe (ETV-Verbundwerkstoffe) werden wesentlich durch die Eigenschaften der Matrices geprägt. Die wichtigsten Versuchsparameter sind in Tabelle 3.8 abgebildet.

3.8.2 Ergebnisse und Diskussion

In Bild 3.18 sind typische Kraft-Deformations-Verläufe der untersuchten Matrix- und Einbettungswerkstoffe dargestellt.

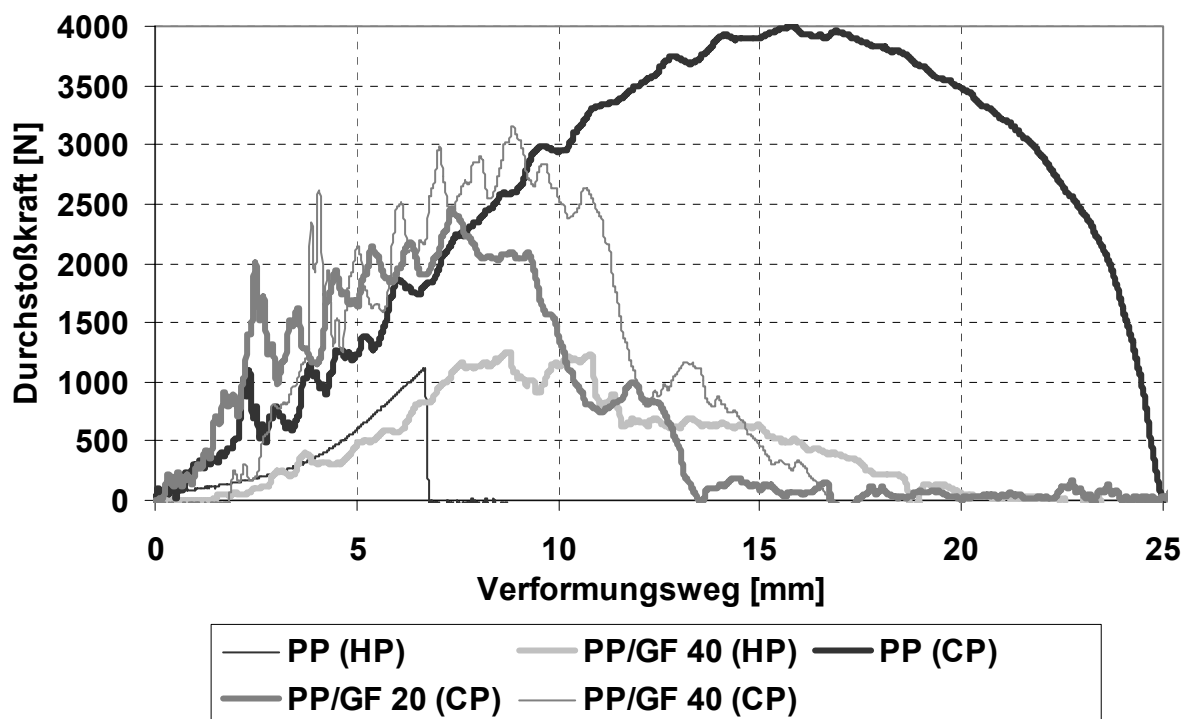


Bild 3.18: Typische Kraft-Deformations-Verläufe der untersuchten Matrix- / Einbettungswerkstoffe

Das höchste Kraftniveau und der größte Deformationsweg und somit die beste Energieabsorption wurden mit Abstand bei dem duktilen PP-Copolymer ermittelt. Die Kraft-Weg-Verläufe von PP/GF 20 (CP) und PP/GF 40 (CP) zeigen ebenfalls ein hohes Niveau, wobei die Größenordnungen vom Langglasfasergehalt in der PP-Matrix abhängen. Weiterhin wird deutlich, dass die Zugabe von Langglasfasern bei dem PP-Copolymer zu einer Reduktion der Energieabsorption infolge einer Matrixversprödung führt. Das spröde empfindliche PP-Homopolymer zeigt hingegen äu-

ßerst niedrige Energieabsorptionseigenschaften bei Impaktbelastung. Ein mittleres Kraft-Weg-Niveau wird bei PP/GF 40 (HP) in Bild 3.18 ersichtlich. Bei diesem wenig duktilen Matrixtyp führt die Langglasfaserverstärkung zu einer Erhöhung des Durchstoßkraft- und Deformationswegniveaus und damit zu einer verbesserten Energieabsorption.

Die gemittelten und dickennormierten Energieabsorptionswerte (Berücksichtigung von unterschiedlichen Probendicken [s. Bra01]) der untersuchten Matrix- und Einbettungswerkstoffe sind in der Tabelle 3.9 quantitativ erfasst.

Tabelle 3.9: Gemittelte Energieabsorptionswerte der Matrix- / Einbettungswerkstoffe (dickennormiert)

Werkstoff	dickennormierte Impaktenergie
PP (HP)	1,1 J/mm
PP/GF 40 (HP)	6,7 J/mm
PP (CP)	16 J/mm
PP/GF 20 (CP)	7,8 J/mm
PP/GF 40 (CP)	9,9 J/mm

Eine Betrachtung des Bruchverhaltens der Matrix- und Einbettungswerkstoffe unter Impaktbeanspruchung erfolgt an ausgewählten Beispielen in Kapitel 4.

4 Herstellung und mechanische Eigenschaften von edelstahltextilverstärktem PP und PP/GF (LFT)

4.1 Variation ausgewählter Herstellungsparameter

4.1.1 Herstellung von PP- und PP/GF-Plattenhalbzeugen

Zur Herstellung der edelstahltextilverstärkten Verbunde (ETV-Verbunde) wurde ein zweistufiges Verfahren angewendet. Im ersten Schritt wurde ein diskontinuierlicher und reproduzierbarer Standard-Plastifizier- / Fließpressprozess genutzt, um die PP- und PP/GF-Plattenhalbzeuge herzustellen (s. Anhang A4). Hierzu wurde PP/GF-Granulat der Firma FACT (Typ FACTOR ADD PP-LGF 60/30 N25) mit einem Fasergewichtsanteil von 60% und einer Länge von 25 Millimetern verwendet. Um die Verarbeitungseigenschaften des Granulates zu verbessern, wurde dieses mit PP der Firma Lyondellbasell (Typ Moplen HP 500V) auf einen Fasergewichtsanteil von 40 % abgemischt. Als zweiter, alternativer Matrixwerkstoff wurde unverstärktes PP vom gleichen Typ verwendet.

LFT-Granulat und PP wurden in einem Einschneckenextruder des Typs Kannegieser KMH 60S plastifiziert, das Plastifikat mittig in ein Plattenpresswerkzeug mit den Abmessungen 547 x 547 mm² eingelegt und zu 1,6 mm dicken Platten verpresst.

Tabelle 4.1 zeigt die Verarbeitungsparameter zur Herstellung der PP- und PP/GF-Plattenelemente.

Tabelle 4.1: Verarbeitungsparameter des PP- und PP/GF-Plastifikats [MM01]

Masstemperatur [°C]	Werkzeugtemperatur oben/unten [°C]	Dosierlänge [mm]	Werkzeuginnendruck [MPa]	Pressenschließgeschwindigkeit [mm/s]
220	75/85	110	20	10

4.1.2 Herstellung der edelstahltextilverstärkten Verbunde (ETV-Verbunde) im Film-Stacking-Verfahren mit Variation ausgewählter Fertigungsparameter

In einem zweiten Herstellungsschritt werden die PP- und LFT-Plattenhalbzeuge mit metallischen Textilien zu einem ETV-Verbundwerkstoff verpresst. Folgende Werkstoffvarianten wurden hergestellt (s. Bild 4.1):

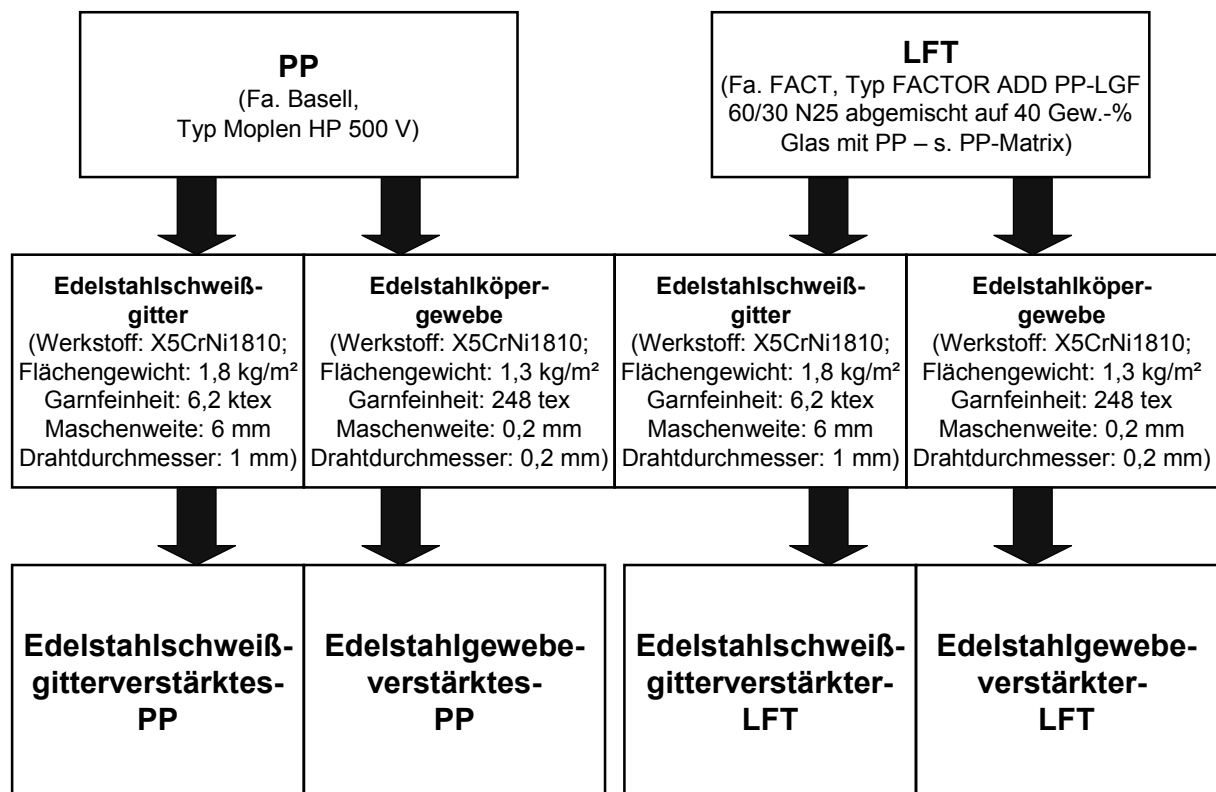


Bild 4.1: Hergestellte ETV-Verbunde [MVM02]

Als metallische Verstärkungsstrukturen wurde das Edelstahlkörpergewebe 0,2x0,2 mm sowie das Edelstahlschweißgitter 1x6 mm gewählt (s. Bilder 4.1 / 4.2), um die Einflüsse der Fertigungsparametervariation auf ein fein und ein grob strukturiertes Verstärkungstextil zu ermitteln. Die Plattenhalbzeuge wurden vor dem Verpressen auf ein Maß von 450x450 mm² und die Metalltextilien auf ein Maß von 500x500 mm² zugeschnitten, um die beim Aufheizen auftretende unterschiedliche Wärmedehnung der Kunststoffplatten und des Edelstahls zu kompensieren. Nach dem Zuschneiden wurden die metallischen Verstärkungselemente 30 Minuten bei 230°C thermisch vorbehandelt, um eine fettfreie Drahtoberfläche zu erhalten.

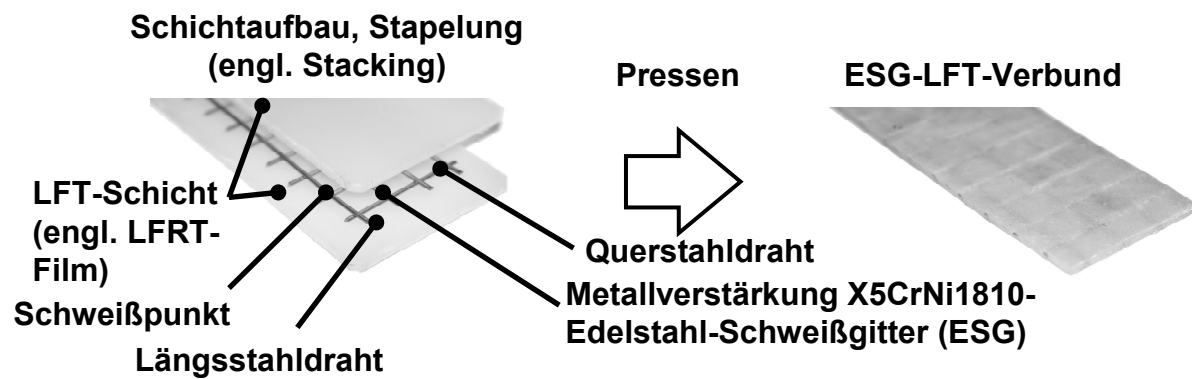


Bild 4.2: Herstellung der ETV-Verbunde im Film-Stacking-Verfahren [MVM02]

Die geschichteten Verbundaufbauten (s. Bild 4.2) wurden anschließend innerhalb von 10 Minuten in einem Umluftofen (230°C) auf eine Massetemperatur von 210-215°C erhitzt. Die aufgeheizten Verbunde wurden dann in eine parallelgeregeltere Presse des Typs Dieffenbacher PHP 800/650 mit dem schon beschriebenen Plattenwerkzeug eingelegt und bei variierten Werkzeuginnendrücken und Pressenschließgeschwindigkeiten verpresst. Die Auswahl von Werkzeuginnendruck und Pressenschließgeschwindigkeit als variable Fertigungsparameter wurden vorgenommen, da sie großen Einfluss auf folgende Aspekte zeigen:

- Größe der Schergeschwindigkeiten und Scherkräfte im Fließspalt und mögliche Schädigung der Verstärkung
- Abkühlung der Matrix beim Pressvorgang, daraus folgt eine Erhöhung der Scherkräfte im Fließspalt durch Zunahme der Viskosität und mögliche Schädigung des Verstärkungstextils

In Tabelle 4.2 sind die variierten Fertigungsbedingungen zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 4.2: Fertigungsparametervariation für die ETV-Verbundherstellung [MM01]

Werkzeuginnendruck [MPa]: 5; 10; 15; 20	Pressenschließgeschwindigkeit [mm/s]: 7,5 = konstant
Pressenschließgeschwindigkeit [mm/s]: 5; 7,5; 10	Werkzeuginnendruck [MPa]: 20 = konstant
Massetemperatur [°C]: 210-215	Werkzeugtemperatur oben/unten [°C]: 70/80

Die Aufheizzeit, Massetemperatur und Presswerkzeugtemperatur wurden für alle Versuche konstant gehalten.

4.1.3 Mechanisches Verhalten unter einachsiger Zugbeanspruchung

4.1.3.1 Probenvorbereitung und Versuchsdurchführung

Die quasistatische Zugprüfung wurde in Anlehnung an die Norm DIN EN ISO 527-4 mit einer Zwick Universalprüfmaschine vom Typ 1474 durchgeführt. Die Probenentnahme und die Versuchsdurchführung erfolgten in der Weise, wie sie schon im Kapitel 3.6 und 3.7 dargestellt wurden. Im Rahmen der Zugprüfungen wurden das Spannungs-Dehnungs- und das Bruchverhalten der PP-, LFT- und ETV-Werkstoffe untersucht. Weiterhin wurde die Abhängigkeit der mechanischen Zugeigenschaften von den variierten Fertigungsparametern bestimmt.

Von einer Zugprüfung des PPs mit Köperstahlgewebeverstärkung wurde abgesehen, da aufgrund der Sprödigkeit des Polypropylens schon bei der spanenden Probenherstellung Randdelaminationen in den Proben auftraten.

4.1.3.2 Ergebnisse und Diskussion

Spannungs-Dehnungs- und Bruchverhalten

Die Prüfergebnisse zeigen, dass die metallische Verstärkung von PP und LFT-Werkstoff zu einer signifikanten Steifigkeitserhöhung führt, wobei sehr gute Materialeigenschaften in der Fließrichtung (0°-Richtung) erzielt werden, da der Großteil der Glasfasern in Belastungsrichtung orientiert ist (s. Kapitel 3.6). Weiterhin wird deutlich,

dass sich das Bruchverhalten von klassischen FKV-Laminaten deutlich unterscheidet. Im Fall des Schweißgitters mit LFT-Einbettung versagt zuerst das LFT, danach kommt es zum Bruch der Verstärkungsdrähte bis zum vollständigen Probenbruch. Ein ähnliches Verhalten zeigt auch die PP-Matrix mit Schweißgitterverstärkung. Zuerst versagt hier die Matrix mehrfach an den Querdrähten der Verstärkung (Bild 4.3, 4.4), während die Metallverstärkung in Zugrichtung weiter plastisch deformiert wird, bis Draht- und damit der Probenbruch eintritt.

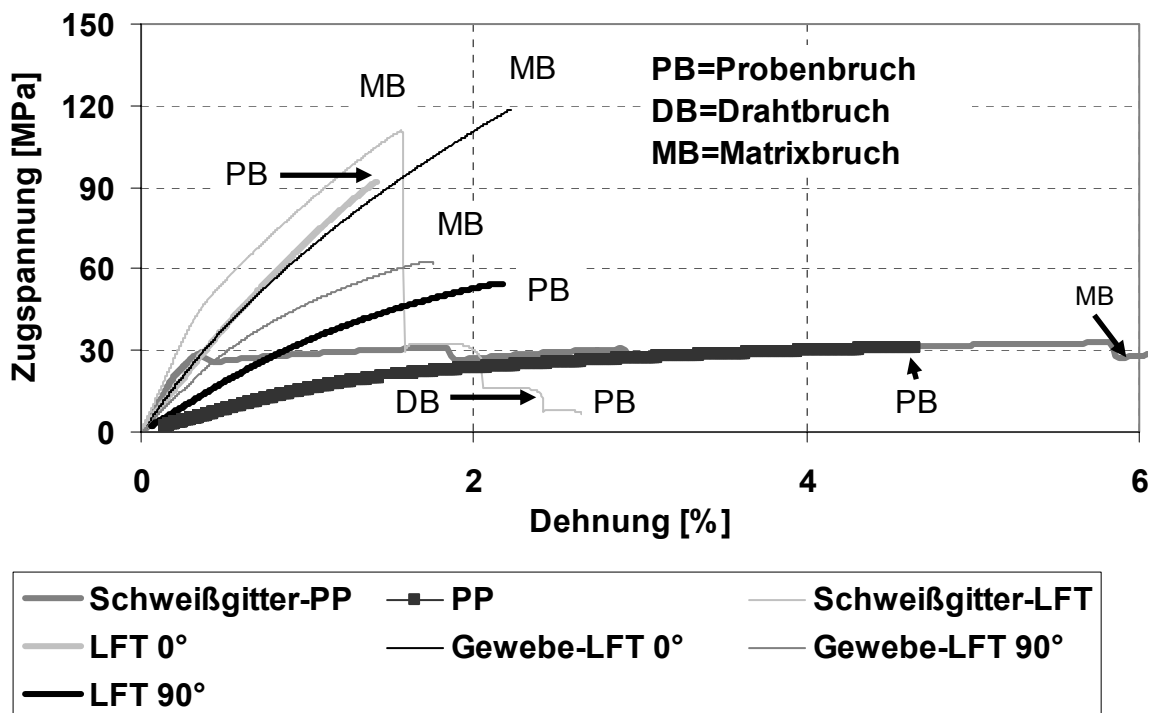


Bild 4.3: Typische technische Spannungs-Dehnungs-Verläufe / Schädigungs- / Bruchverhalten der geprüften Werkstoffe [MM01]

Bild 4.4 zeigt, dass das verwendete Polypropylen bei Zugbelastung spröde unter Splitterbildung versagt. Die Sprödigkeit des Polypropylens wird auch im Falle des Schweißgitter-PPs deutlich, wobei die Matrix wesentlich früher versagt als die metallische Verstärkung. Der Bruch der Matrix trat dabei stets an den Querdrähten auf.

Auch die LFT-Proben zeigten ein sprödes, schlagartiges Versagen, während bei den ETV-Verbunden mit LFT-Einbettung zuerst der Einbettungswerkstoff versagt und erst anschließend bei höheren Dehnungen Drahtbruch und damit auch Totalversagen erfolgt.

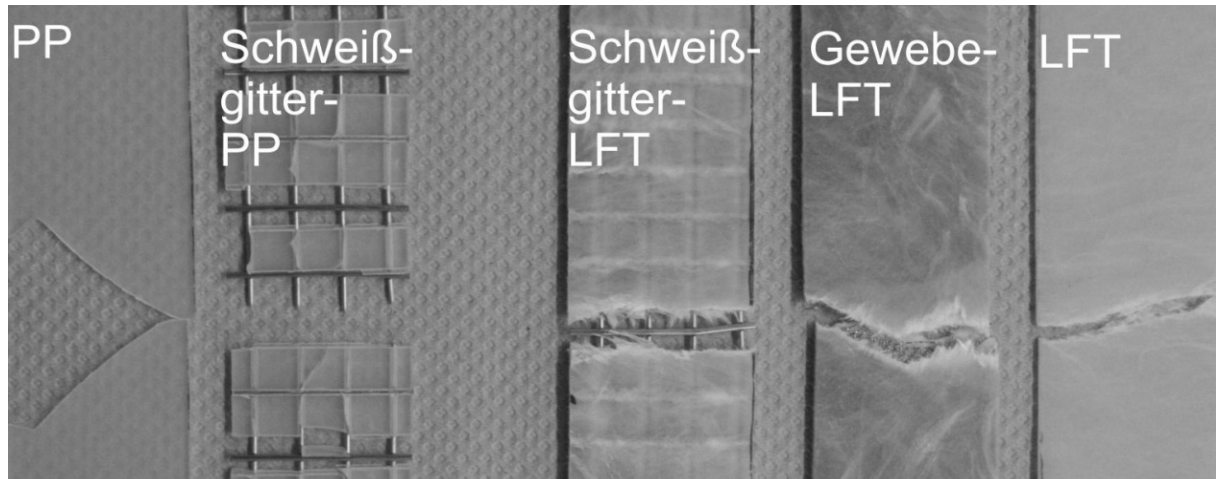


Bild 4.4: Typische Bruchbilder der geprüften Werkstoffe bei einachsiger Zugbelastung [MM01]

Mechanische Zugeigenschaften in Abhängigkeit der variierten Fertigungsbedingungen

In Bild 4.5 wird der Zug-E-Modul in Abhängigkeit des Werkzeuginnendrucks dargestellt.

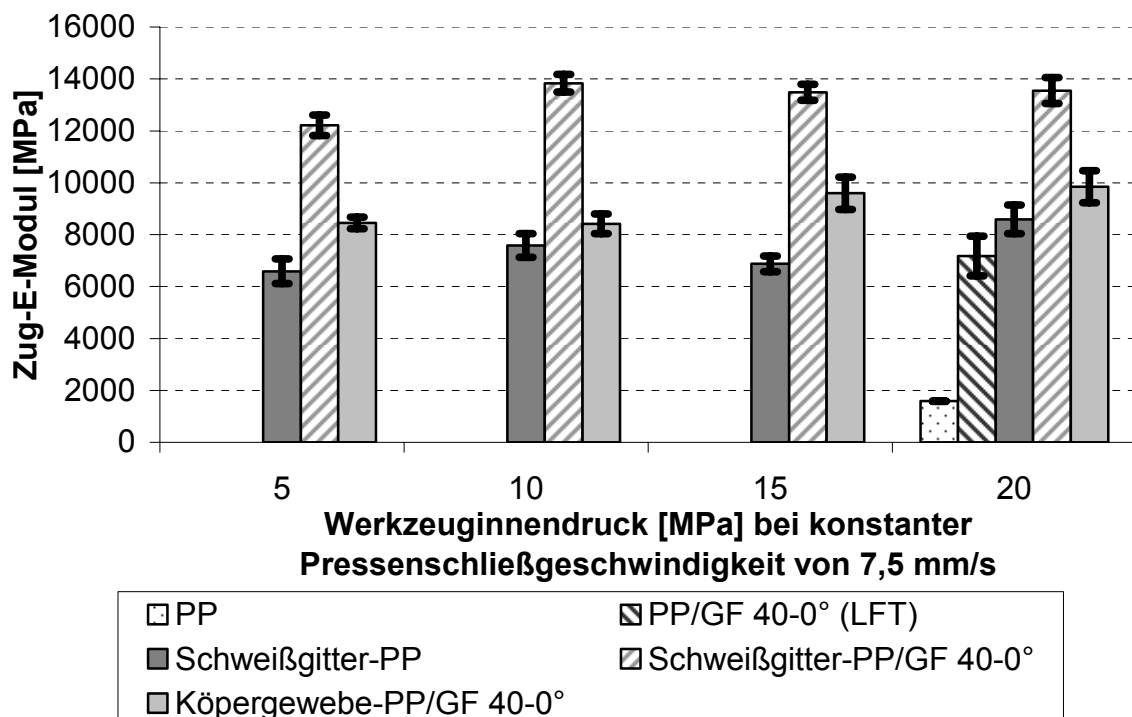


Bild 4.5: Zug-E-Modul als Funktion des variierten Werkzeuginnendrucks

Anhand von Bild 4.5 lässt sich darstellen, dass bei den ETV-Verbunden mit LFT-Einbettung relativ hohe Werkzeuginnendrucke den Zug-E-Modul ebenfalls positiv in seiner Größe beeinflussen, da die Imprägnierung und Kompaktierung verbessert wird. Abschließend ist jedoch festzustellen, dass die Messwerte aufgrund der stark inhomogenen Werkstoffstruktur generell deutlichen Streuungen unterliegen, wodurch die Ermittlung eines Trends erschwert wird.

Die Steifigkeit des schweißgitterverstärkten PP's folgt keinem Trend. Die Verbundsteifigkeit wird in diesem Fall sehr stark durch die heterogene Verstärkungssteifigkeit geprägt, d. h. mögliche Streuungen in den Textileigenschaften beeinflussen maßgeblich die Verbundeigenschaften (s. unverstärktes PP in Bild 4.5).

Insgesamt betrachtet, führt eine Edelstahltextilverstärkung bei allen untersuchten Werkstoffen zu einer deutlichen Steifigkeitserhöhung.

Eine Darstellung der Abhängigkeit des Zug-E-Moduls von der Pressenschließgeschwindigkeit erfolgt im Anhang A 5.

In Bild 4.6 wird die Zugfestigkeit als Funktion der Pressenschließgeschwindigkeit dargestellt.

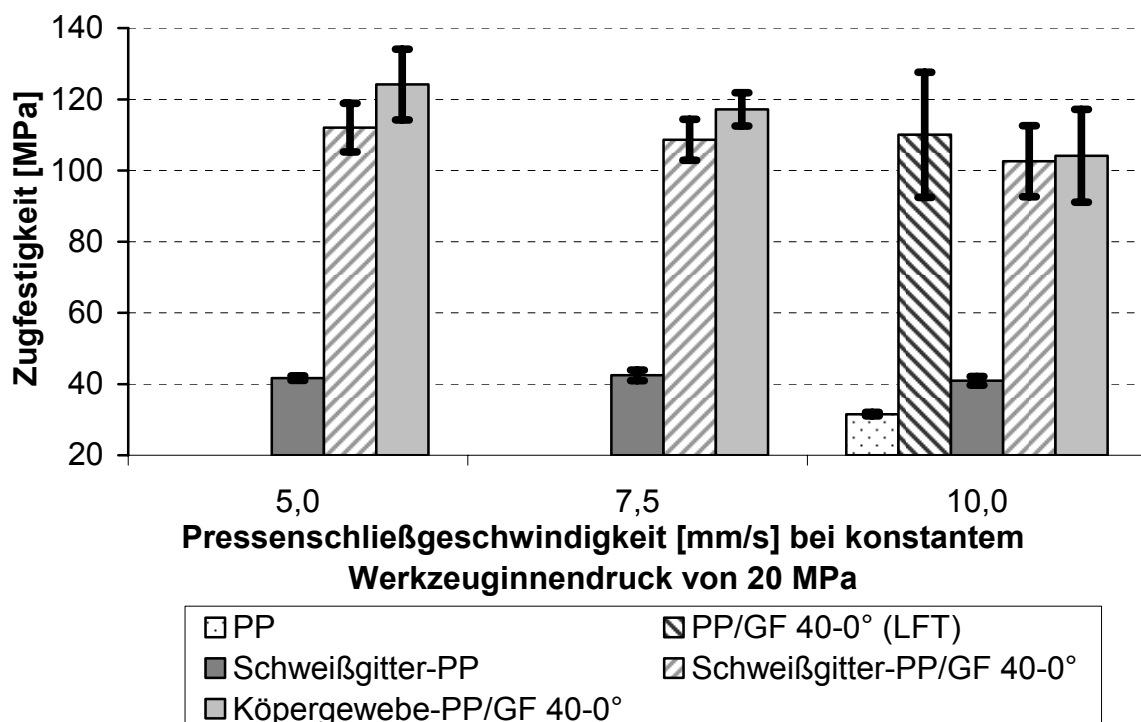


Bild 4.6: Zugfestigkeit als Funktion der variierten Pressenschließgeschwindigkeit

Bild 4.6 verdeutlicht, dass bei den edelstahltextilverstärkten Verbunden mit der hochgefüllten PP/GF 40-Einbettung generell die höchsten Festigkeitswerte bei niedrigen Pressenschließgeschwindigkeiten erzielt werden konnten. Die kleinen Schließgeschwindigkeiten führen zu kleineren Schergeschwindigkeiten und somit zu kleineren Scherspannungen im Fließspalt, d. h. die Schädigung der Glasfasern und der Edelstahltextilverstärkung wird minimiert und die Festigkeit dadurch erhöht. Jedoch unterliegen die Festigkeitswerte ähnlich wie die E-Modul-Werte signifikanten Streuungen, die durch den stark heterogenen Werkstoffaufbau bedingt sind.

Das schweißgitterverstärkte PP zeigt nahezu keine Abhängigkeit von der Pressenschließgeschwindigkeit. Als Grund hierfür wurden die sehr homogenen Festigkeitseigenschaften von Verstärkung und Matrix in Betracht gezogen, die demzufolge auch eine ausgeprägte Homogenität in den Eigenschaften des Verbunds bewirken. Weiterhin verursacht das Fließen des niedrigviskosen PP-Homopolymers im Vergleich zum hochviskosen PP/GF 40 auch bei hohen Schließ- und Schergeschwindigkeiten nur relativ kleine Scherspannungen im Fließspalt, die das Verstärkungstextil schädigen können.

Der Zusammenhang von Festigkeit und variiertem Werkzeuginnendruck ist ergänzend im Anhang A 6 dargestellt.

4.1.4 Mechanisches Verhalten im hochdynamischen Durchstoßversuch

4.1.4.1 Probenvorbereitung und Versuchsdurchführung

Die Durchstoßprüfungen wurden in Anlehnung an DIN EN ISO 6603-2 mit einer Fallturmanlage des Typs Fractovis der Firma Ceast durchgeführt. Bei dieser Durchstoßprüfung wurden weitgehend die gleichen Parameter wie in Kapitel 3.8 verwendet. Zum Vergleich sind die Eigenschaften der unverstärkten Matrix- bzw. Einbettungswerkstoffe mit dargestellt. Das wesentliche Ziel dieser Untersuchung bestand in der Ermittlung des Kraft-Deformations- und Bruchverhaltens sowie in der Bestimmung der absorbierten Impaktenergie. Weiterhin erfolgte eine Untersuchung der Abhängigkeit der absorbierten Impaktenergie von den variierten Herstellungsparametern, um geeignete Bedingungen zur ETV-Verbundherstellung festlegen zu können.

Bei der Festlegung geeigneter Fertigungsbedingungen sind zwei wesentliche Aspekte zu beachten:

- hohe Energieabsorption beim Durchstoß
- geringe herstellungsbedingte Schädigung des Verstärkungstextils

4.1.4.2 Ergebnisse und Diskussion

Kraft-Deformations- und Bruchverhalten

In Bild 4.7 sind die typischen Kraft-Deformations-Verläufe der untersuchten Werkstoffe dargestellt.

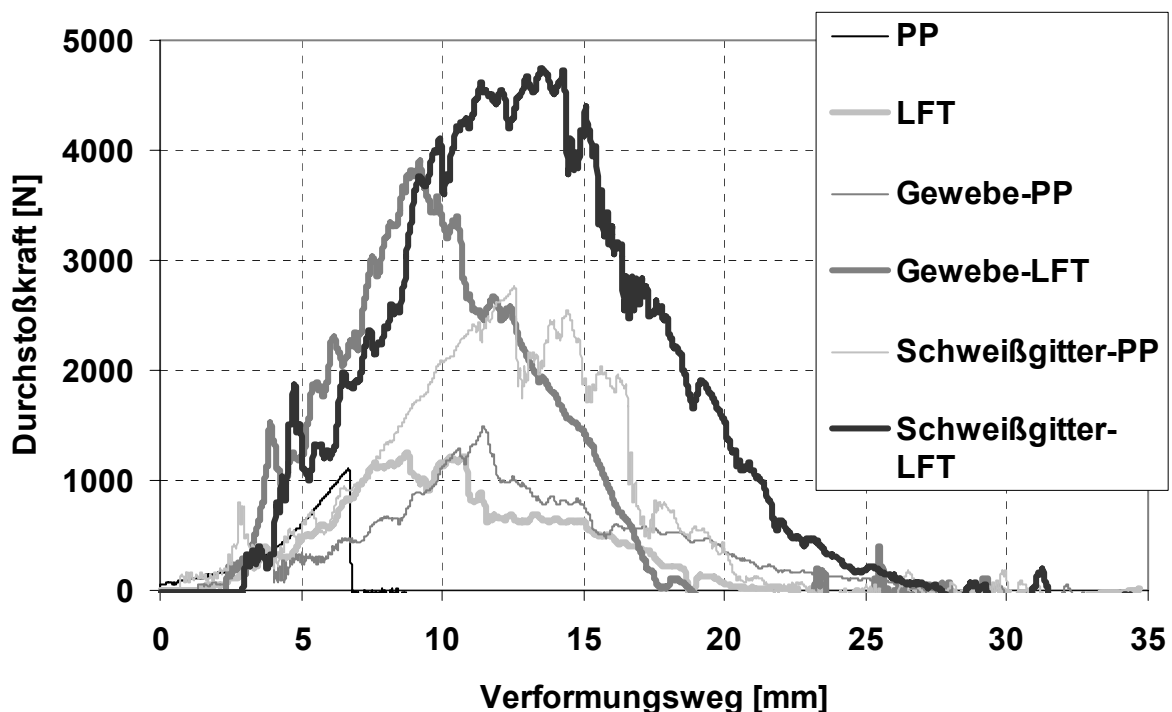


Bild 4.7: Kraft-Deformations-Verläufe der geprüften Werkstoffe (typ.) [MM01]

Die ETV-Verbunde weisen im Vergleich zu dem unverstärkten PP bzw. PP/GF 40 (LFT) eine deutliche Erhöhung der Durchstoßkraft und des Verformungsweges und damit auch eine Erhöhung der Impaktenergieaufnahme auf. Durch den Einsatz metallischer Verstärkungen konnte eine Verbesserung der Energieabsorption erreicht werden.

In Bild 4.8 sind typische Bruchbilder der verschiedenen Werkstoffe bei Impaktbelastung dargestellt.

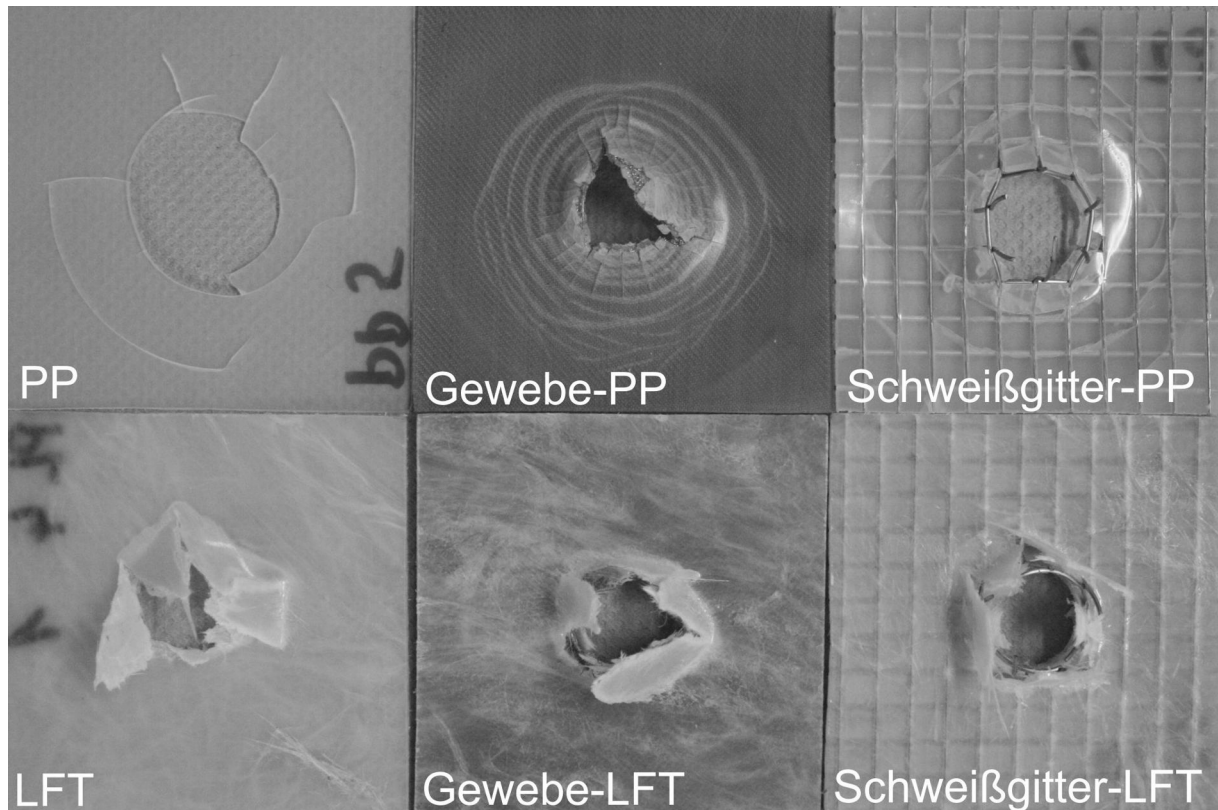


Bild 4.8: Typische Bruchbilder bei Impaktbelastung [MM01]

Die im Kapitel 4.1.3.2 angesprochene Sprödigkeit der Matrix- bzw. Einbettungswerkstoffe wird auch am Beispiel der Durchstoßproben ersichtlich. Da nur eine geringe Splitterbildung auftrat, ist eine deutliche Verbesserung des Bruchverhaltens bei den ETV-Verbunden mit PP-Matrix im Vergleich zum unverstärkten PP erkennbar.

Eine angestrebte Verbesserung der Strukturintegrität von spröden Matrixsystemen und Verbundwerkstoffen konnte somit durch eine duktile metallische Verstärkung erreicht werden.

Die textilen Edelstahlverstärkungen dieser neuartigen Verbundwerkstoffe weisen alle sehr große plastische Deformationen auf, wodurch die Energieabsorption wesentlich gesteigert wurde.

In Bild 4.8 ist nur eine geringe Metall-Matrixanhaftung erkennbar. Es verbleiben nach der Schädigung nahezu keine Matrixpartikel am Stahldraht.

Durchstoßeigenschaften in Abhängigkeit der variierten Ferti- gungsbedingungen

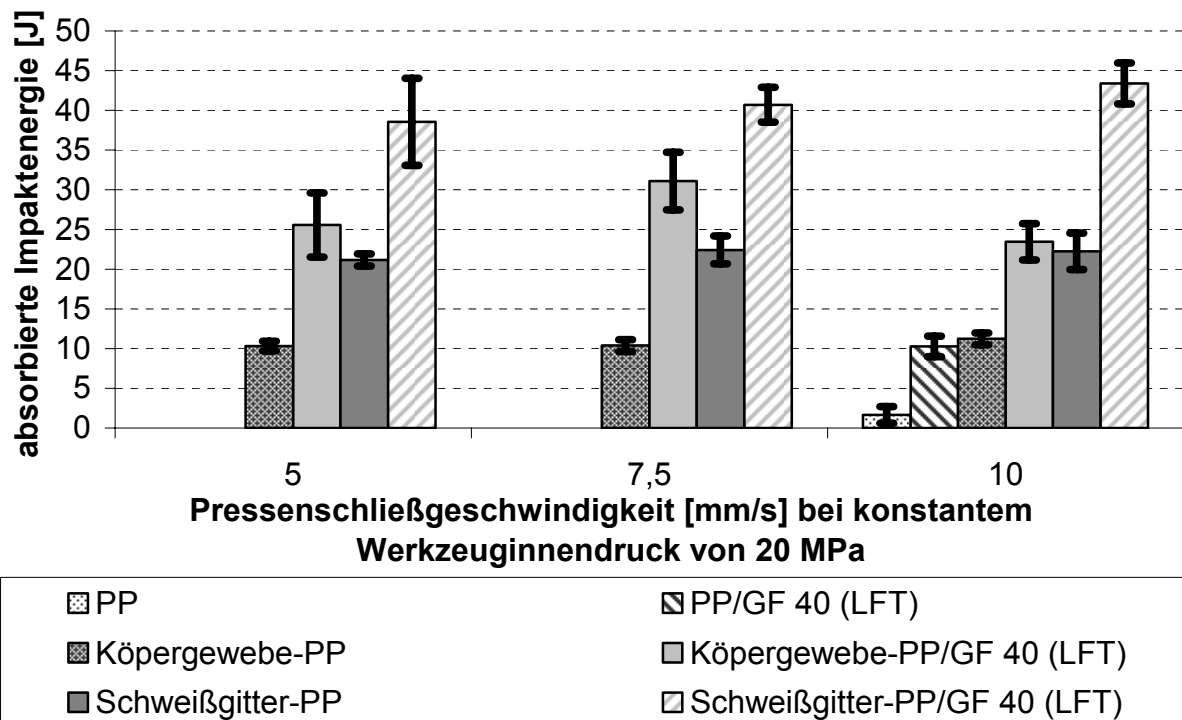


Bild 4.9: Absorbierte Impaktenergie als Funktion der Pressenschließgeschwindigkeit

Die Verbunde mit PP-Matrix zeigen keine Abhängigkeit der absorbierten Impaktenergie von der variierten Pressenschließgeschwindigkeit. Die Energieabsorption von Köpergewebe-PP liegt nahezu konstant im Bereich von 10,3-11,2 J und die von Schweißgitter-PP im Bereich von 21,1-22,4 J. Im Vergleich dazu zeigen die edelstahltextilverstärkten Verbunde mit einer LFT-Einbettung eine Abhängigkeit der Energieaufnahme von der Pressenschließgeschwindigkeit. Die größte Impaktenergieaufnahme erfolgt bei Schweißgitter-LFT mit 10 mm/s und bei Köpergewebe-LFT mit 7,5 mm/s Pressenschließgeschwindigkeit. Weiterhin wird in Bild 4.9 die sehr niedrige Energieabsorptionsfähigkeit des verwendeten PP-Homopolymers deutlich. Eine befriedigende Energieabsorption wird beim LFT ohne Edelstahlverstärkung ersichtlich. Generell wird in Bild 4.9 deutlich, dass mit Hilfe der metallischen Textilverstärkung eine Erhöhung der Impaktenergieaufnahme für die untersuchten Matrix- bzw. Einbettungswerkstoffe erzielt werden konnte.

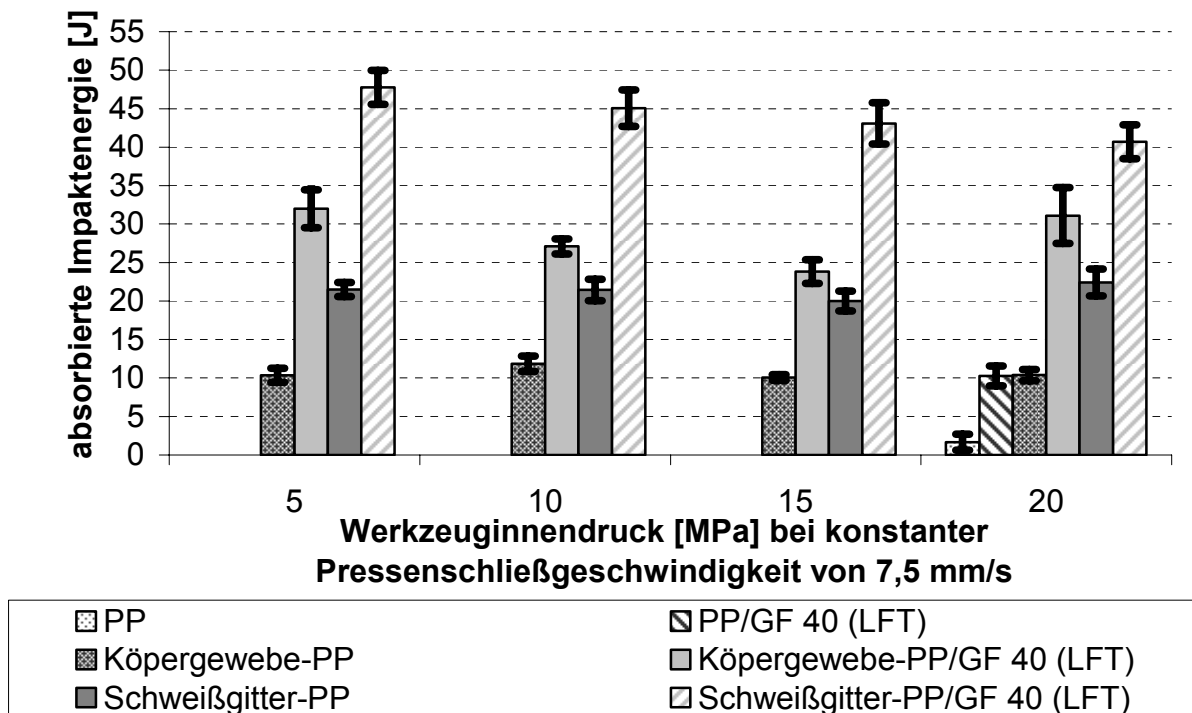


Bild 4.10: Absorbierte Impaktenergie als Funktion des Werkzeuginnendrucks

Ähnlich zu Bild 4.9 zeigen die PP-Matrix Verbunde wieder eine nahezu konstante Energieaufnahme über dem variierten Werkzeuginnendruck. Bei Schweißgitter-PP liegen die Werte im Bereich von 20-22,4 J. Das Körpergewebe-PP weist Energieaufnahmewerte von 10,1-11,8 J auf. Einen deutlichen Trend in der Energieabsorption zeigt hingegen das schweißgitterverstärkte LFT: Die höchsten Werte werden bei einem Werkzeuginnendruck von 5 MPa erreicht. Das Körpergewebe mit LFT-Einbettung zeigt zwei Maxima in der Energieaufnahme. Sie liegen bei dem minimalen und maximalen untersuchten Werkzeuginnendruck an. Der Höchstwert von 32 J wurde jedoch bei einem Werkzeuginnendruck von 5 MPa ermittelt. Die insgesamt größten Energieaufnahmen zeigten mit Abstand wieder die Schweißgitter-LFT-Verbunde.

Ableitung von geeigneten Verarbeitungsparametern für die Herstellung weiterer ETV-Verbunde

Das wesentliche Ziel der Untersuchung des Einflusses der Variation von Werkzeuginnendruck und Pressenschließgeschwindigkeit bestand in der Ermittlung von Fertigungsparametern, die eine möglichst werkstoffschonende ETV-Verbundherstellung sicherstellen sollen, d. h. Vermeidung von Scherung und Drahtbruch im Verstär-

kungstextil durch hohe fließinduzierte Schubspannungen. Weiterhin sollen die hergestellten Verbunde sehr gute Energieabsorptionswerte beim Durchstoßversuch aufweisen, sodass fein strukturierte Gewebeverstärkungen (Maschenweite bis ca. 1 mm und Drahtdurchmesser bis ca. 1 mm) mit einer LFT-Einbettung bei mittleren Pressenschließgeschwindigkeiten und kleinen Werkzeuginnendrücken zu verarbeiten sind. Ähnliche Fertigungsparameter wurden auch bei der Herstellung von grob strukturierten schweißgitterverstärkten LFT-Verbunden (Maschenweiten und Drahtdurchmesser größer oder gleich 1 mm) angewendet, wobei in diesem Fall eine hohe Schließgeschwindigkeit zu bevorzugen ist. Gewebe- und schweißgitterverstärkte Verbunde mit PP-Matrix zeigten nahezu keine Abhängigkeit von den untersuchten Fertigungsparametern. Sie können deshalb mit kleinen bis mittleren Pressenschließgeschwindigkeiten und kleinen bis mittleren Werkzeuginnendrücken gefertigt werden, um die Textilbeanspruchung durch den Pressprozess zu minimieren. Die ermittelten geeigneten Verarbeitungsparameter sind zur besseren Veranschaulichung quantitativ in Tabelle 4.3 abgebildet.

Tabelle 4.3: Geeignete Verarbeitungsparameter für die ETV-Verbundherstellung

Verstärkung und Matrix- /Einbettungswerkstoff	Werkzeuginnendruck [MPa]	Pressenschließgeschwindigkeit [mm/s]
Schweißgitter-LFT ($M_W \geq 1\text{mm}$; $D_D \geq 1\text{mm}$)	5	10
Gewebe-LFT ($M_W \leq 1\text{mm}$; $D_D \leq 1\text{mm}$)	5	7,5
Schweißgitter-PP ($M_W \geq 1\text{mm}$; $D_D \geq 1\text{mm}$)	5-10	5-7,5
Gewebe-PP ($M_W \leq 1\text{mm}$; $D_D \leq 1\text{mm}$)	5-10	5-7,5

4.2 Mikroskopische Untersuchungen an ETV-PP und ETV-PP/GF

4.2.1 Probenpräparation und Mikroskopieverfahren

Aus dem Bereich der Zugbruchflächen und einer unbelasteten Probe wurden $5 \times 5 \text{ mm}^2$ große Probekörper für die Rasterelektronen- und / oder Lichtmikroskopie entnommen, entsprechend präpariert und untersucht. Das Vorgehen bei der Probenextraktion und der Einsatz der Mikroskopieverfahren sind in Bild 4.11 dargestellt.

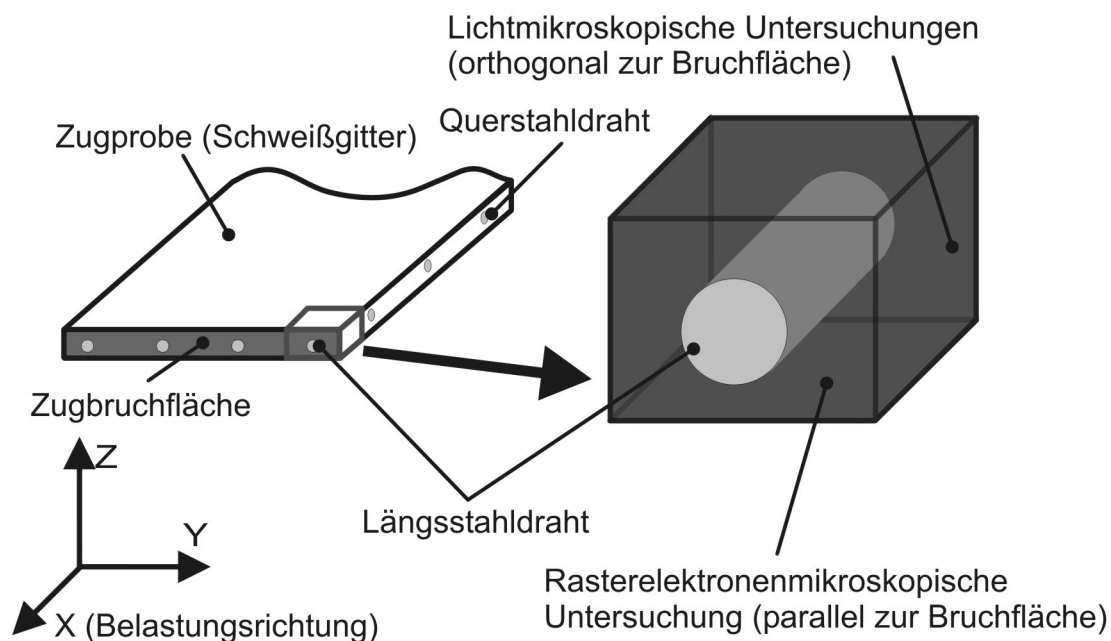


Bild 4.11: Probenextraktion und Einsatz von Mikroskopieverfahren [MVM02]

4.2.2 Lichtmikroskopische Untersuchungen

Im Folgenden werden anhand von lichtmikroskopischen Aufnahmen das Deformations- und Bruchverhalten sowie die Morphologie von edelstahltextilverstärkten PP- und LFT-Werkstoffen untersucht und diskutiert.

Bild 4.12 zeigt eine lichtmikroskopische Aufnahme der Bruchfläche eines edelstahlgewebeverstärkten LFT-Werkstoffes. Die ursprünglich in der Aufnahme weiß erscheinende Edelmetallgewebeverstärkung wurde aus Darstellungsgründen (Kontrastreduzierung) mittels Bildbearbeitungssoftware grau eingefärbt.

In der lichtmikroskopischen Aufnahme ist das spröde Versagen der LFT-Matrix unter einachsiger Zugbelastung gut zu erkennen. Die Aufnahme zeigt, dass sich die Stahl-

drähte in Belastungsrichtung (x-Richtung) durch die zunehmende Gewebestreckung von der Matrix ablösen und beim Bruch aus der Matrix herausgezogen werden. Dieses Verhalten und die Tatsache, dass kaum Matrixpartikel auf den Stahldrähten verbleiben, deuten auf eine schlechte Stahl-Matrix-Anbindung hin.

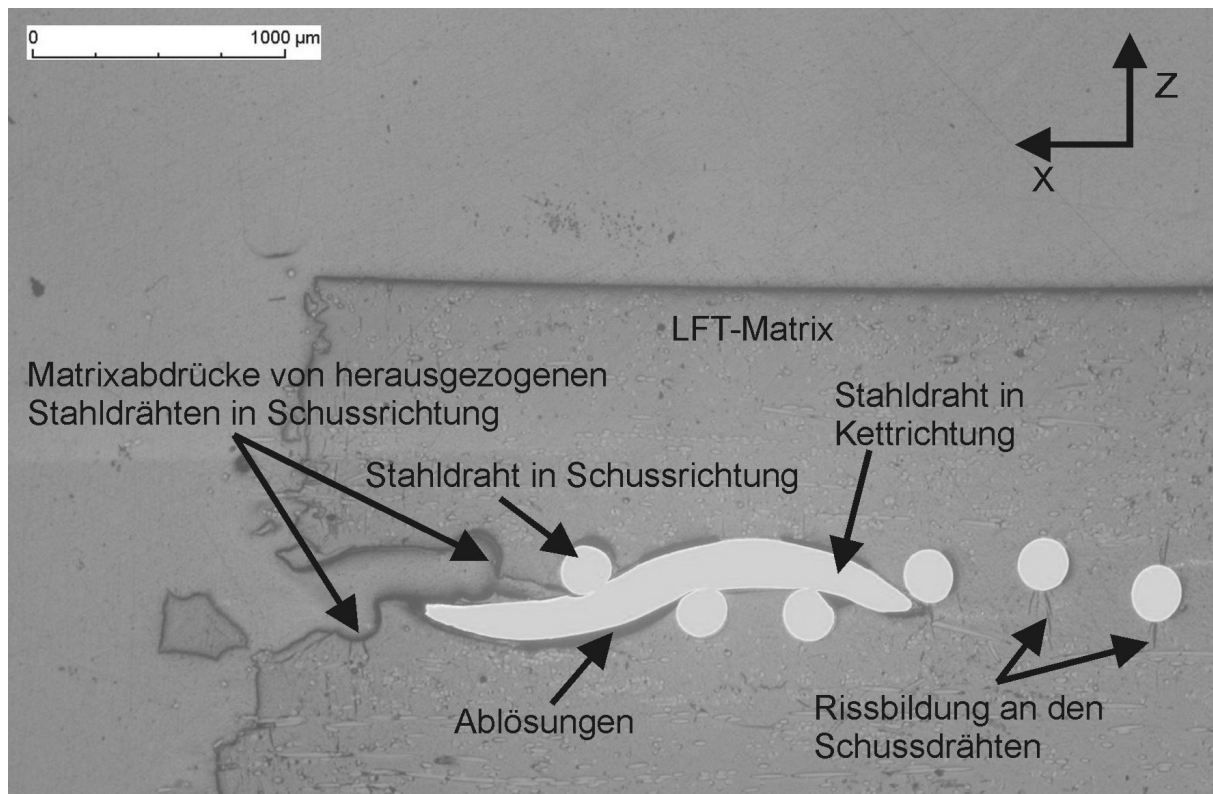


Bild 4.12: Lichtmikroskopische Aufnahme der Bruchfläche eines edelstahlgewebeverstärkten LFT-Werkstoffes [MVM02]

Die Zugbeanspruchung führt bei steigender Belastung zu einer weiteren Verstärkung des Verstärkungstextils, dies wiederum bedingt eine Vertikalverlagerung der Drähte in Schussrichtung und somit auch Spannungsspitzen in der Matrix im Bereich der Schussdrähte. Diese Spannungsspitzen initiieren letztendlich die Bildung von Rissen und den Bruch der Matrix.

In Bild 4.13 wird eine Bruchfläche eines edelstahlschweißgitterverstärkten LFT-Werkstoffes gezeigt.

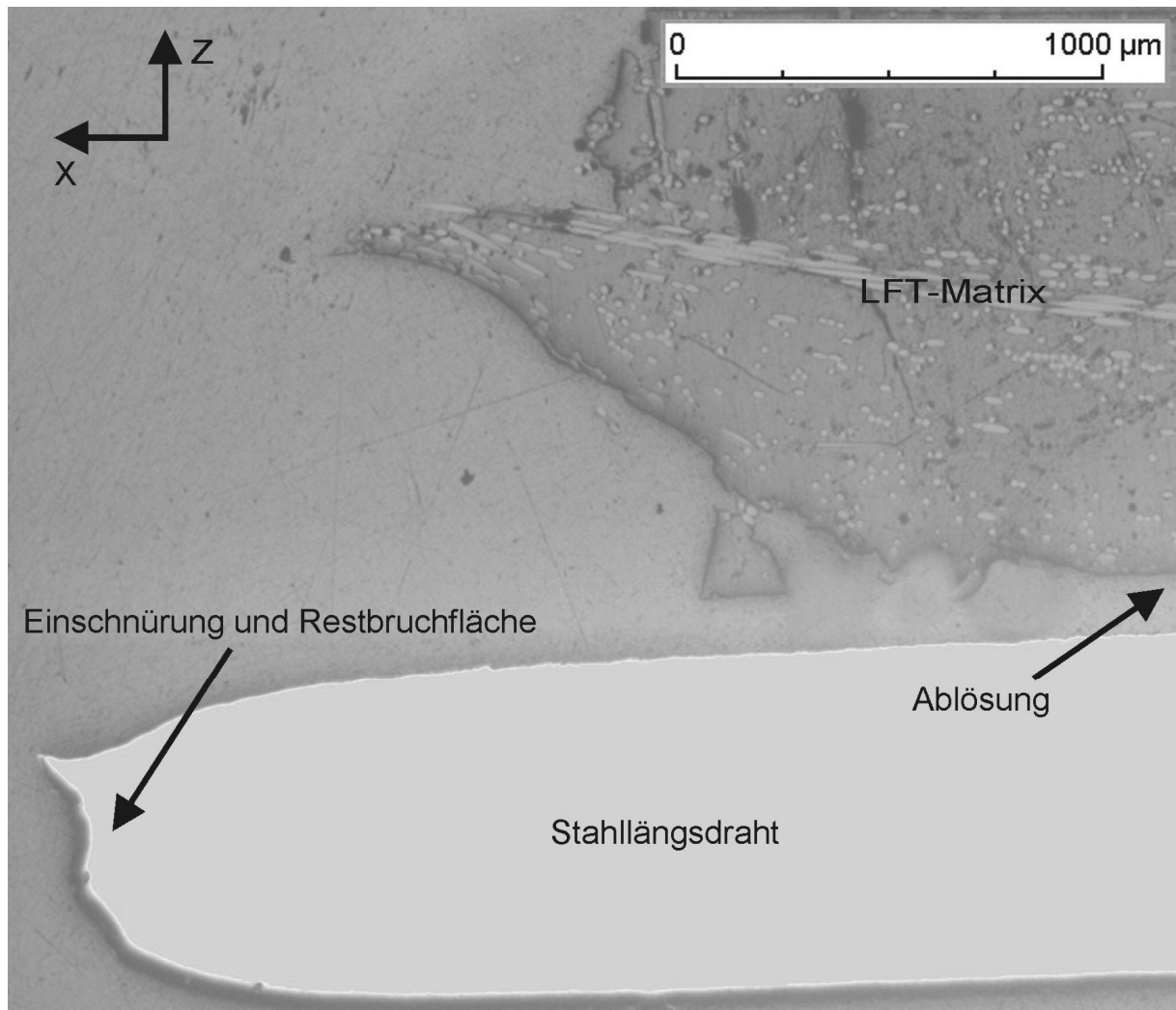


Bild 4.13: Lichtmikroskopische Aufnahme der Bruchfläche eines edelstahlschweißgitterverstärkten LFT-Werkstoffes [MVM02]

Das Bruchbild weist Analogien zu Bild 4.12 auf. So sind in dieser Aufnahme ebenfalls eine geringe Stahl-Matrix-Haftung und ein sprödes Bruchverhalten des LFT-Werkstoffes erkennbar. Der Stahllängsdraht zeigt eine starke plastische Deformation und Einschnürung im Bereich der Bruchfläche. Ein Matrixbruch der Zugproben mit Schweißgitterverstärkung erfolgt in den meisten Fällen an den Querdrähten aufgrund von sehr großen lokalen Dehnungsüberhöhungen und Kerbwirkung in diesen Bereichen.

In Grafik 4.14 ist eine Schliffaufnahme eines unbelasteten edelstahlschweißgitterverstärkten LFT-Werkstoffes abgebildet.

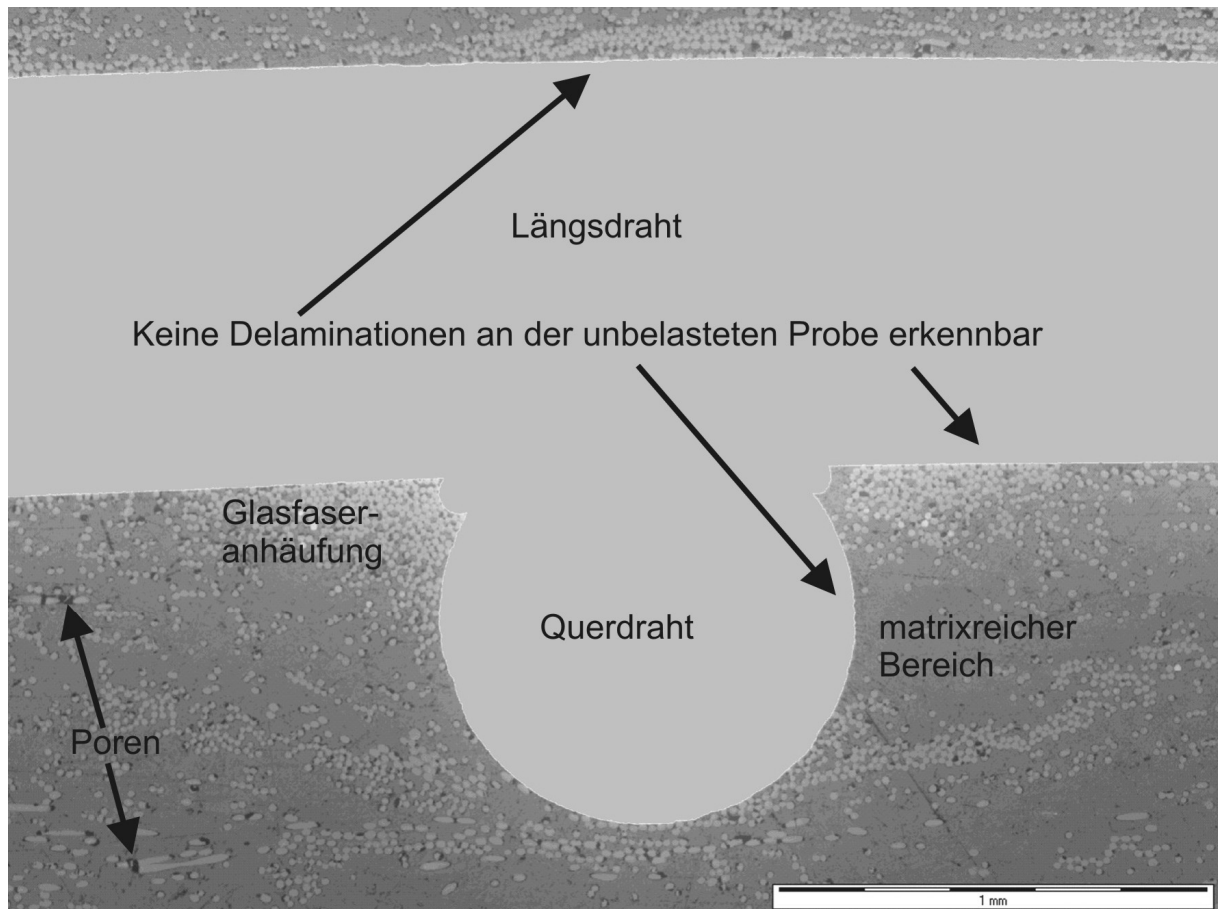


Bild 4.14: Lichtmikroskopische Aufnahme eines unbelasteten schweißgitterverstärkten LFT-Werkstoffes [MVM02]

Im Wesentlichen wird deutlich, dass ohne Einwirkung von Belastung keine Delaminationen im Verbund auftreten. Weiterhin sind Faseranhäufungen im Bereich der Drahtkreuzungspunkte ersichtlich, welche aus der Verarbeitung im Pressverfahren resultieren (Filterwirkung der Verstärkung). Eine geringe Anzahl von Poren ist ebenfalls in Bild 4.14 ersichtlich. Diese sind durch die Luftaufnahme der LFT-Plattenelemente bei der Umluftofenerwärmung ohne Pressdruck bedingt.

Bild 4.15 zeigt die Zugbruchflächenaufnahme eines edelstahlschweißgitterverstärkten Verbundes mit PP-Matrix.

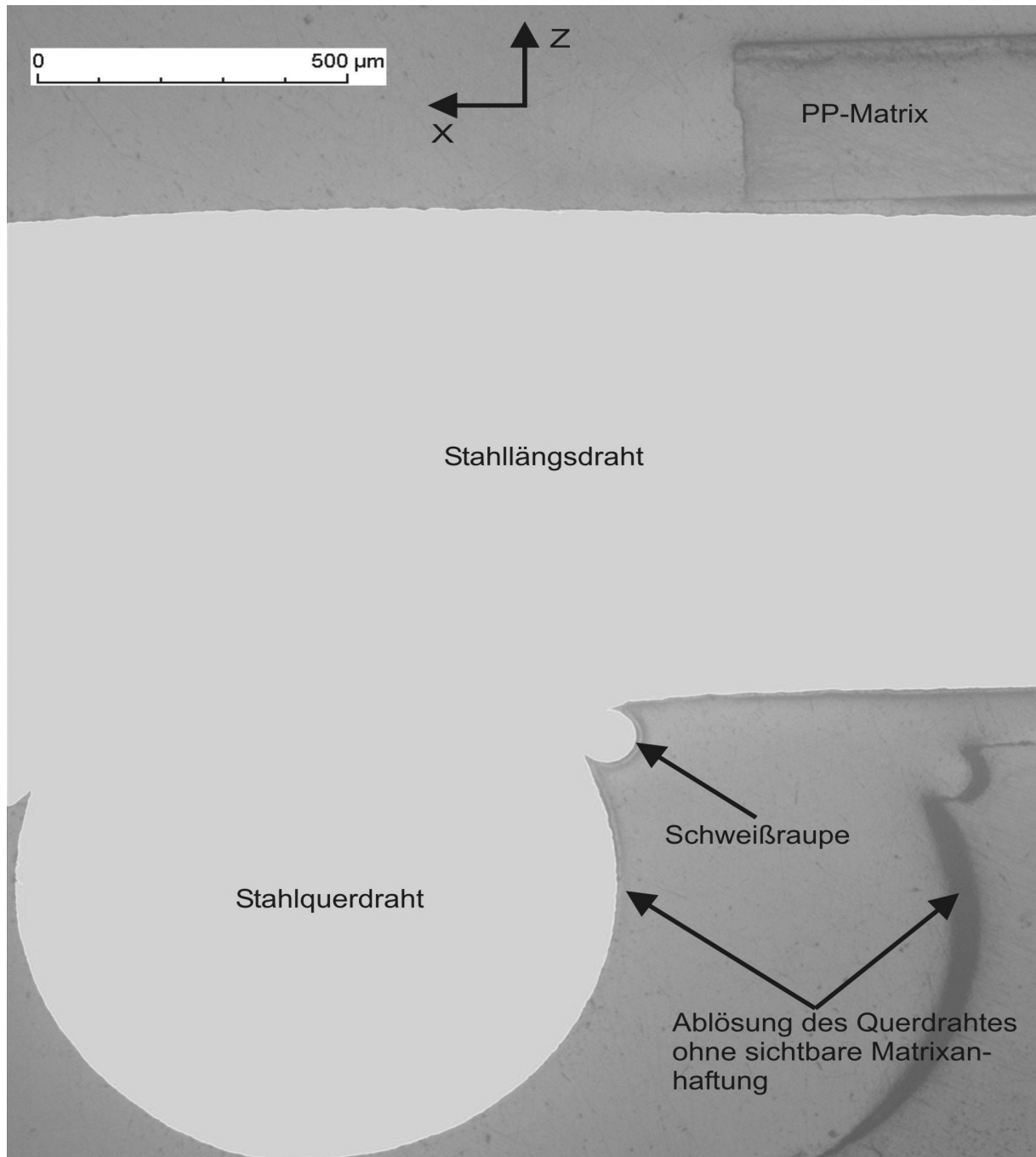


Bild 4.15: Lichtmikroskopische Aufnahme der Bruchfläche eines edelstahlschweißgitterverstärkten PPs [MVM02]

Die Aufnahme verdeutlicht das Ausziehen und Ablösen der Edelstahlschweißgitterverstärkung (hellgrau) infolge Zugbeanspruchung ohne erkennbare Matrixpartikelanhaftungen.

4.2.3 Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen

In diesem Abschnitt wird eine Auswahl von fotografischen Aufnahmen der mittels REM untersuchten Bruchflächenausschnitte von edelstahltextilverstärkten PP- und LFT-Werkstoffen diskutiert.

Bild 4.16 zeigt einen Ausschnitt der Zugbruchfläche eines edelstahlgewebeverstärkten LFT-Werkstoffes.

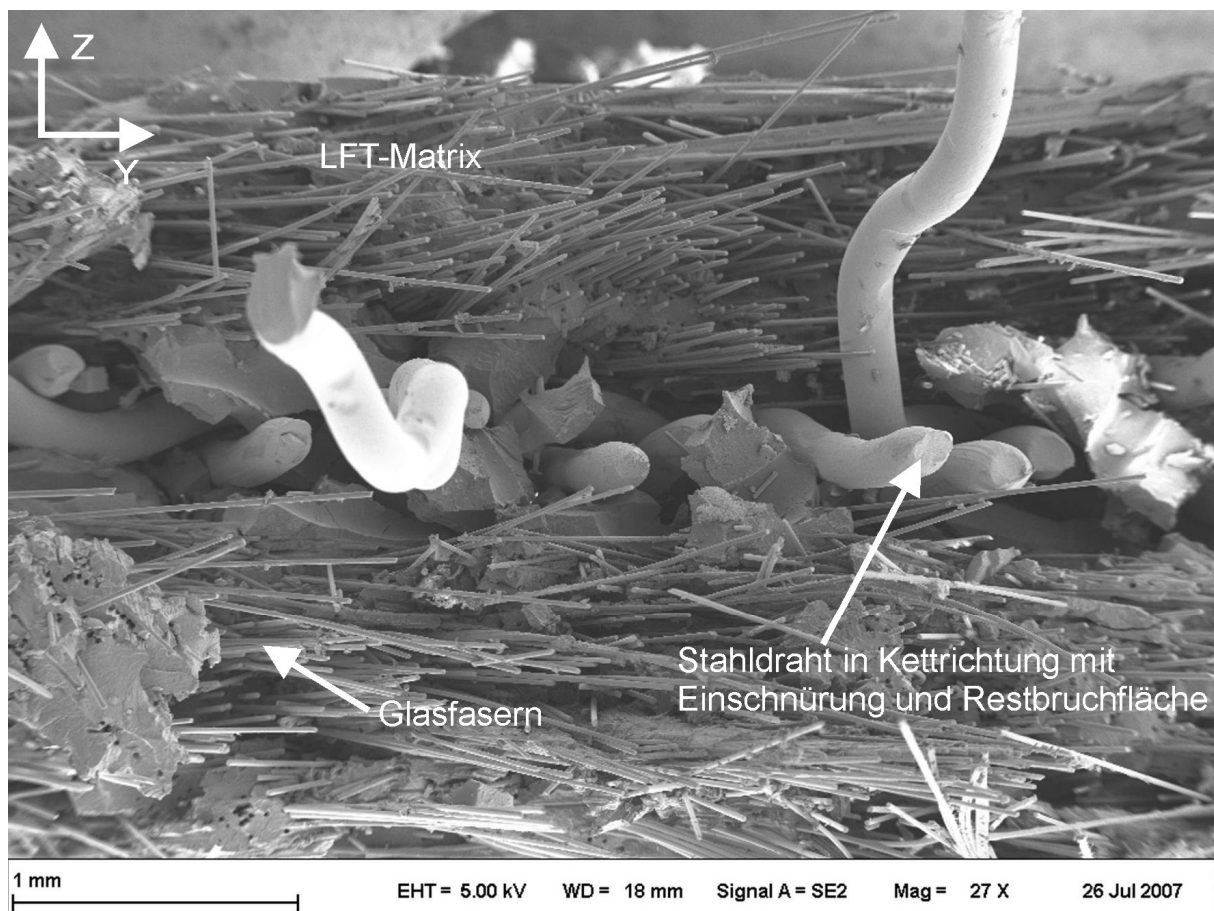


Bild 4.16: REM-Aufnahme der Bruchfläche eines edelstahlgewebeverstärkten LFT-Werkstoffes [MVM02]

Die Aufnahme zeigt die deutlich plastisch deformierten Stahldrähte in Beanspruchungsrichtung (Ketttrichtung) des Gewebes, die zur Erhöhung der Energieaufnahme unter statischer Beanspruchung entscheidend beitragen. Weiterhin sind auch hier wieder die schlechte Stahl-Matrix-Anbindung und der Auszug von Drähten aus der Matrix deutlich zu erkennen.

In Bild 4.17 ist die Rasterelektronenmikroskopaufnahme der Bruchfläche eines edelstahlschweißgitterverstärkten LFT-Werkstoffes dargestellt.

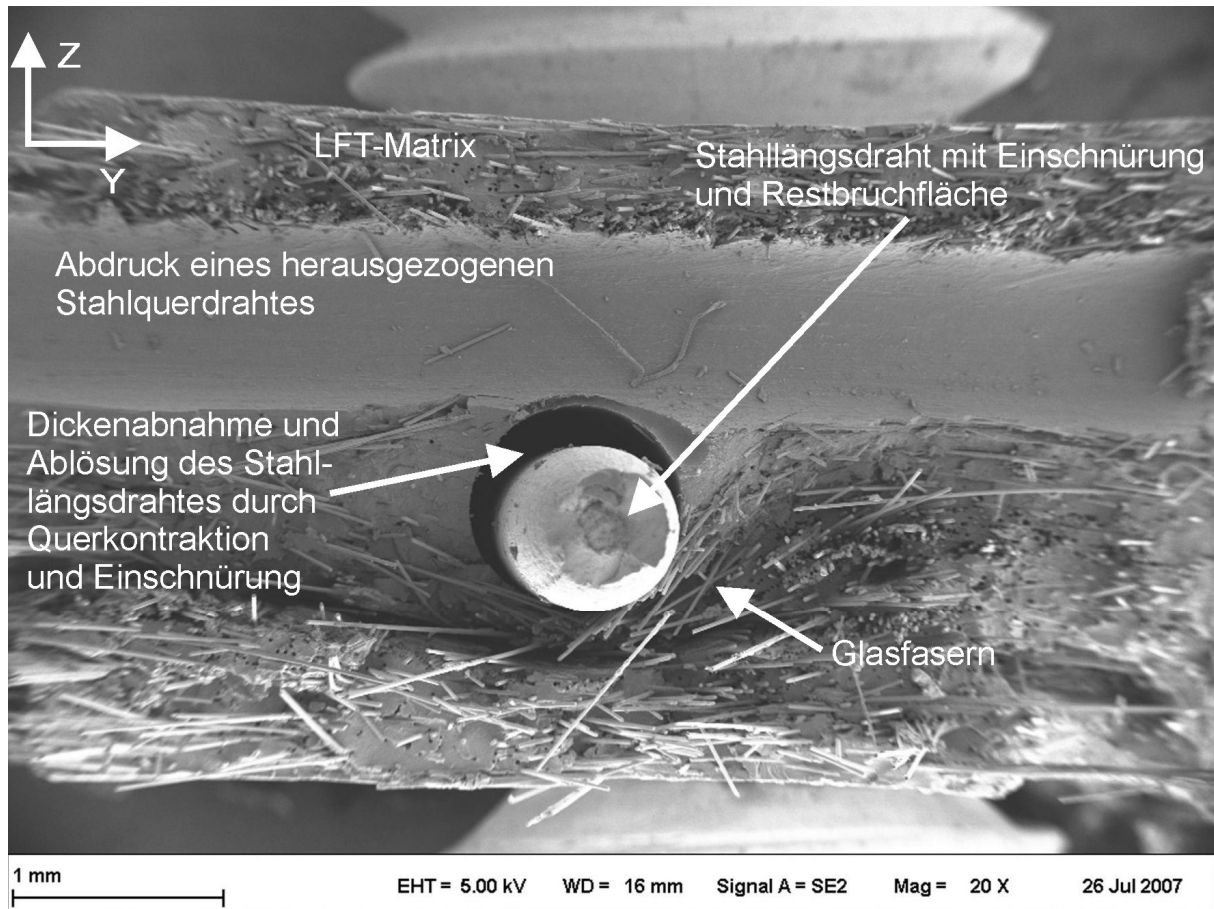


Bild 4.17: REM-Aufnahme der Bruchfläche eines edelstahlschweißgitterverstärkten LFT-Werkstoffes [MVM02]

Deutlich ist im Bild ein gebrochener Stahllängsdraht zu erkennen, der im Bruchbereich eine starke Einschnürung aufweist. Ebenso deutlich ist der Abdruck eines Querdrahtes in der Bruchfläche zu erkennen. Das Bruchbild liefert auch hier den Beweis, dass keine bzw. nur eine sehr geringe Haftung zwischen Stahldraht und PP vorliegt.

In Bild 4.18 wird die Bruchfläche eines Polypropylens mit Edelstahlschweißgitterverstärkung gezeigt.

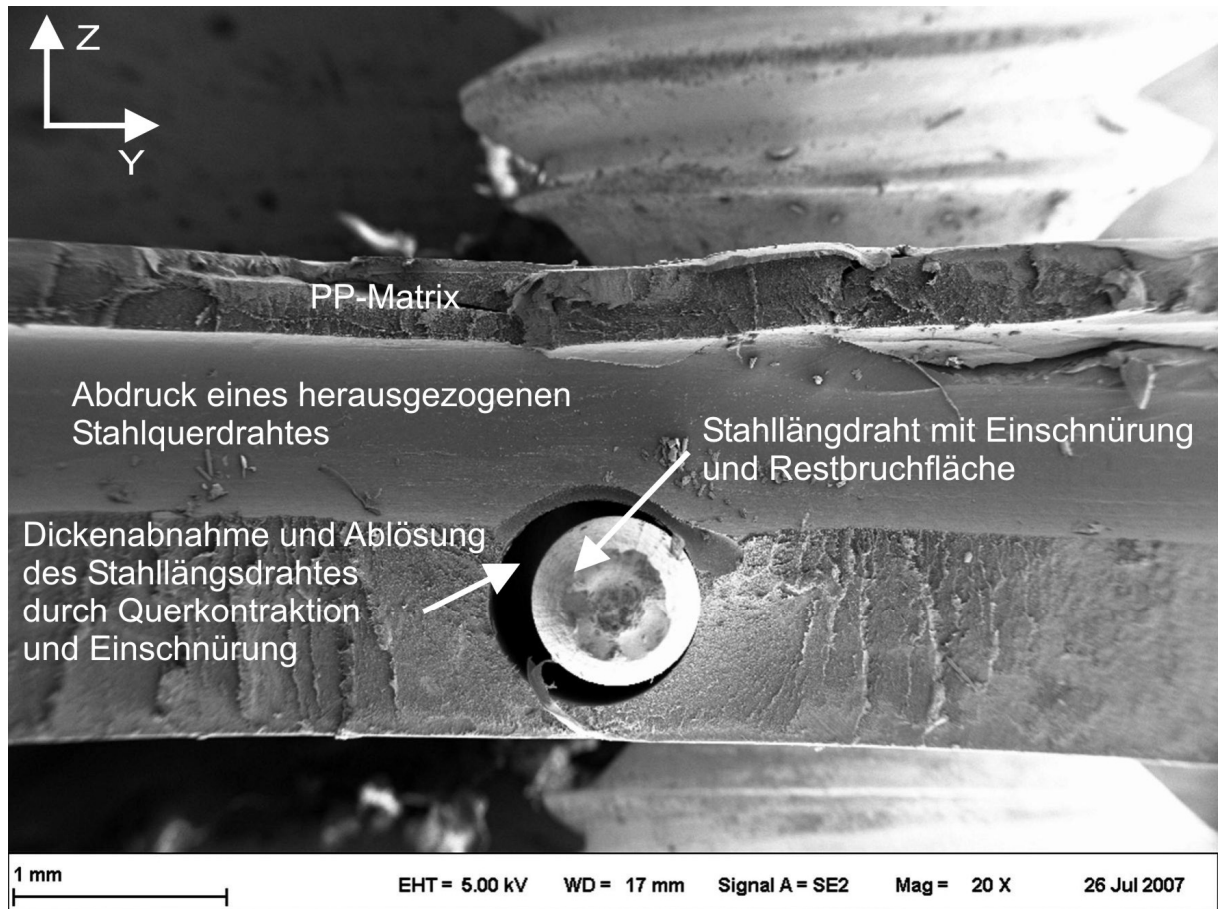


Bild 4.18: REM-Aufnahme der Bruchfläche eines edelstahlschweißgitterverstärkten PPs [MVM02]

Das Bruchbild des Schweißgitter-PPs weist große Ähnlichkeit zu dem im Bild 4.17 dargestellten Schweißgitter-LFT auf. Dies bedeutet im Wesentlichen, dass auch hier eine schlechte Edelstahl-Matrix-Anbindung vorliegt, die Stahldrähte im Bruchbereich stark plastisch deformieren und die Matrix ein ausgeprägtes Spröbruchverhalten aufweist.

4.3 Kombination ausgewählter Materialparameter

4.3.1 Anpassung des Fertigungsprozesses

Der im Kapitel 4.1 vorgestellte Fertigungsprozess wurde zur Realisierung höherer Fließorientierungen in den PP/GF-Plattenelementen angepasst, d. h. der Plastifikatstrang wurde außermittig im Plattenwerkzeug eingelegt (s. Bild 4.19). Dies bedingt

einen höheren Orientierungsgrad durch verlängerte Fließwege und verbesserte mechanische Eigenschaften in Fließrichtung. Jedoch erforderte eine Verlagerung der Einlegeposition eine Erhöhung der Plastifikatdosierlänge von 110 mm auf 150 mm, um ein vorzeitiges Einfrieren der Fließfront und eine vollständige Formfüllung des Werkzeugs sicherzustellen. Letztendlich führte die Erhöhung der Dosierlänge zu einer Dickenzunahme der Plattenhalbzeuge von 1,6 mm auf 1,8-2,0 mm.

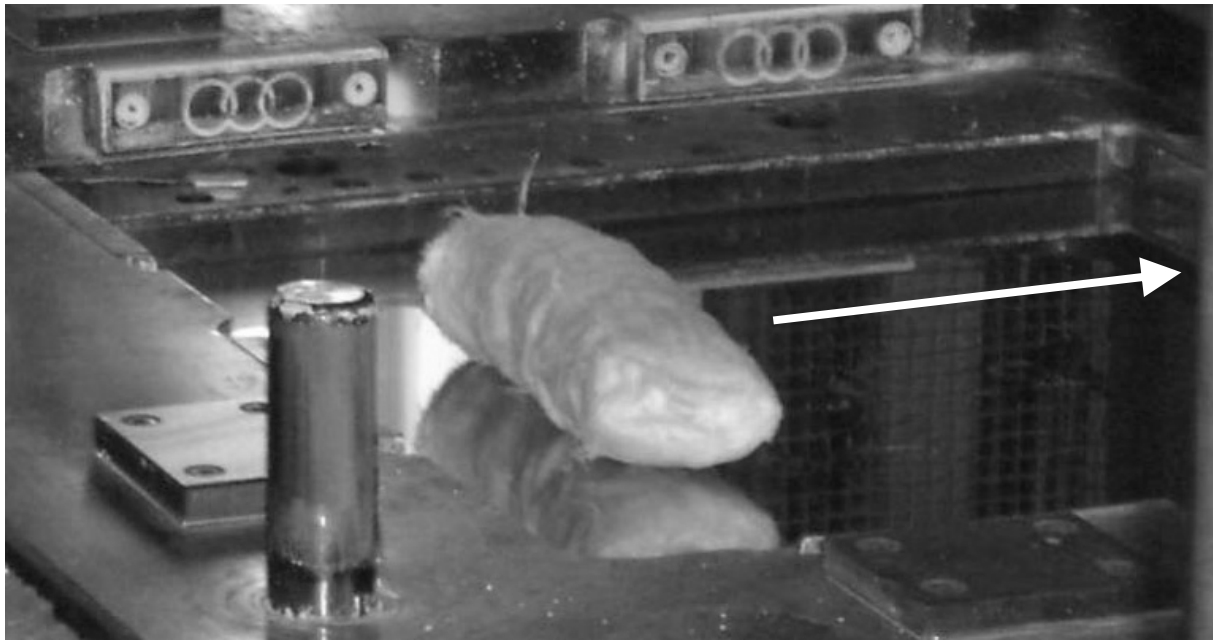


Bild 4.19: Angepasste Plastifikateinlegeposition und Fließrichtung

Das Vorgehen beim Zuschneiden der Plattenhalbzeuge / Verstärkungstextilien, der thermischen Vorbehandlung der Edelstahlverstärkung und dem Verbundaufbau wurden, wie in Kapitel 4.1.2 dargestellt, ohne Änderung beibehalten. Die Zeit zur Ofenerwärmung (230 °C) des Verbundaufbaus auf 205-210 °C wurde aufgrund der Dickenzunahme der Plattenhalbzeuge von 10 auf 14 Minuten erhöht. Die Aufheizzeit wurde mittels Vorversuchen experimentell bestimmt. Die angepassten Fertigungsparameter für die PP- bzw. PP/GF-Plattenelementherstellung sind in der Tabelle 4.4 dargestellt.

Die Herstellung der ETV-Verbunde erfolgte unter Verwendung der in Tabelle 4.3 (s. Kapitel 4.1.4.2) dargestellten geeigneten Fertigungsparameter. Die Werkzeugtemperatur wurde ebenfalls wieder konstant gehalten (s. Tabelle 4.2, Kapitel 4.1.2).

Tabelle 4.4: Angepasste Fertigungsparameter für die PP- bzw. PP/GF-Plattenelementherstellung

Masstemperatur [°C]	Werkzeugtemperatur oben/unten [°C]	Dosierlänge [mm]	Werkzeuginnendruck [MPa]	Pressenschließgeschwindigkeit [mm/s]
245-250	70/80	150	20	10

4.3.2 Eingesetzte Matrix- bzw. Einbettungswerkstoffe und Edelstahlverstärkungstextilien

Im Rahmen dieser Untersuchungen wurden fünf verschiedenen Edelstahlverstärkungen verwendet (s. Kapitel 2 und 3), wobei das Spektrum von fein bis grob strukturiert abgedeckt werden sollte. Die eingesetzten Textilien sind zur Veranschaulichung in Bild 4.20 dargestellt.

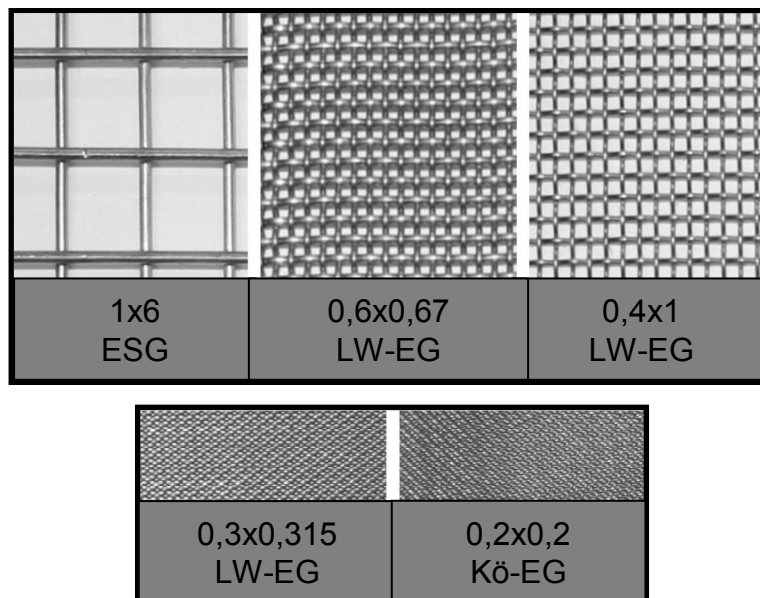


Bild 4.20: Verwendete Textilien

Der erste Zahlenwert der Textilbezeichnungen in Bild 4.20 gibt den Drahtdurchmesser, der zweite Wert die Maschenweite in Millimetern an.

Die Textilien weisen folgende Bindungsarten auf:

- Kö-EG → Edeldstahlgewebe mit Köperbindung
- LW-EG → Edeldstahlgewebe mit Leinwandbindung
- ESG → Edeldstahlschweißgitter (Verschweißung an den Kreuzungspunkten)

Weiterhin wurde für die weiteren Versuche ein Matrixwechsel vom spröden PP-Homopolymer (Moplen HP 500V) zum duktilen PP-Copolymer (Moplen EP 340K, kurz: **CP**) durchgeführt, um die Energieabsorptions- und Formänderungseigenschaften der ETV-Verbunde matrixseitig zu verbessern. Als PP/GF-Konzentrat wurde weiterhin das Material der Firma FACT (Typ FACTOR ADD PP-LGF 60/30 N25) verwendet und entsprechend mit Moplen EP 340K auf 40- oder 20-Fasergew.-% abgemischt und als Einbettungsverbund genutzt. Weiterhin wurde das PP-Copolymer auch ohne Langglasfaserverstärkung als Matrixwerkstoff verwendet.

Die genannten Matrix- bzw. Einbettungswerkstoffe (PP (CP), PP/GF 20 (CP), PP/GF 40 (CP)) wurden mit den fünf verschiedenen Edeldstahltextilverstärkungen kombiniert und zu ETV-Verbundwerkstoffen verarbeitet. Diese ETV-Verbunde wurden anschließend einer mechanischen Charakterisierung im Zug- und Durchstoßversuch unterzogen, deren Ergebnisse in den folgenden Kapiteln 4.3.3 und 4.3.4 dargestellt sind.

4.3.3 Mechanische Charakterisierung der neuartigen ETV-Verbundwerkstoffe im Zugversuch

4.3.3.1 Probenvorbereitung und Versuchsdurchführung

Die Zugprüfung dieser neuartigen Verbundwerkstoffe wurde in Anlehnung an die Norm DIN EN ISO 527-4 durchgeführt (s. Kapitel 3.7). Die Probenentnahme erfolgte in Fließrichtung (0°) in der ETV-Verbundplattenmitte, wobei aufgrund der veränderten Werkstoffherstellung der Einlegebereich nicht mehr im Entnahmebereich liegt (Kapitel 3.6). Dies bedeutet, dass Proben mit sehr hoher Fließorientierung in Belastungsrichtung geprüft wurden und somit sehr gute mechanische Zugeigenschaften aufweisen. Das Ziel der Prüfung bestand in der Ermittlung des Deformations-, Bruchverhaltens, der absoluten und dichtespezifischen Zug-E-Moduli und Zugfestigkeiten.

4.3.3.2 Ergebnisse und Diskussion

Spannungs-Dehnungs- und Bruchverhalten

In Bild 4.21 sind typische Spannungs-Dehnungs-Verläufe ausgewählter ETV-Verbunde mit PP-Matrix (CP) dargestellt.

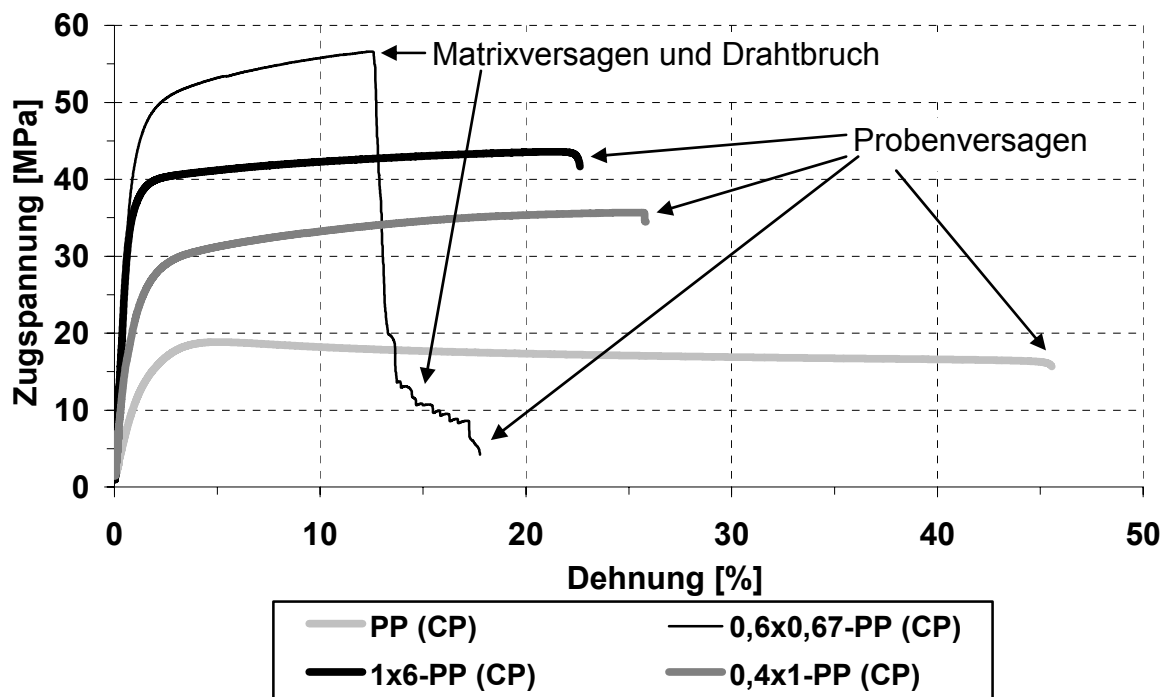


Bild 4.21: Typische technische Spannungs-Dehnungs-Verläufe ausgewählter ETV-Verbunde mit PP-Matrix (CP)

Aus Bild 4.21 wird ersichtlich, dass die Verstärkung des PP mit Edelstahltextilien zu einer Erhöhung der Zugsteifigkeit und Zugfestigkeit führt. Weiterhin wird deutlich, dass mit Steigerung des Metallvolumenanteils (dieser liegt im Bereich von ca. 7 % bei 0,4x1-PP(CP) über ca. 7,5 % bei 1x6-PP (CP) bis rund 19 % bei 0,6x0,67-PP (CP)) die mechanischen Kennwerte erhöht werden. Eine Vergrößerung des Drahtdurchmessers und eine Verringerung der Maschenweite im Textil führt zu einer Erhöhung der inneren Kerbwirkung (mikroskopisch) im Verbundwerkstoff und somit zu einer Reduktion der Bruchdehnung bzw. einer „Versprödung“ der PP-Matrix (makroskopisch).

Im Folgenden werden in Bild 4.22 typische Spannungs-Dehnungs-Verläufe von den ETV-Verbunden 0,2x0,2-PP (CP), 0,2x0,2-PP/GF 20 (CP) und 0,2x0,2-PP/GF 40 (CP) dargestellt.

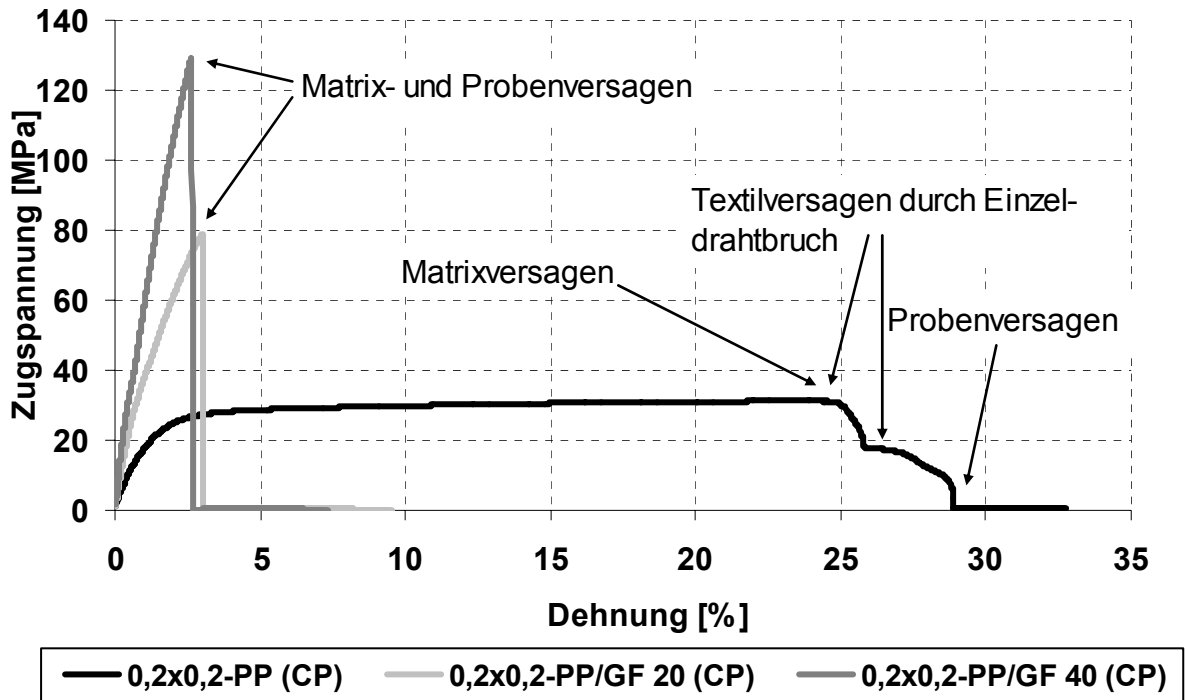


Bild 4.22: Typische technische Spannungs-Dehnungs-Verläufe von Verbunden mit einer 0,2x0,2-Köpergewebeverstärkung und verschiedenen Matrix- bzw. Einbettungswerkstoffen

Im Wesentlichen wird in Bild 4.22 deutlich, dass eine Langglasfaserverstärkung des äußerst duktilen Polypropylencopolymers zu einer starken Verringerung der Bruchdehnung und Versprödung führt. Die Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften erfahren hingegen durch die Verstärkung mit Langglasfasern eine Verbesserung. Weiterhin wird noch ersichtlich, dass eine vollständige Ausnutzung der plastischen Deformation des Edelstahltextils nur im Falle der PP-Matrix erfolgt, da erst ab etwa 25 % Dehnung ein Drahtversagen eintritt (s. schwarze Kurve). Dagegen tritt bei den untersuchten ETV-Composites mit PP/GF (LFT) Einbettung bei etwa 2-3 % Dehnung Matrixversagen ein, was ebenfalls aufgrund des hohen Spannungsniveaus im Rissbereich zum schlagartigen Bruch des Textils und zum Totalversagen der Probe führt.

In Bild 4.23 sind ausgewählte typische Bruchbilder von ETV-Verbunden mit PP-Matrix dargestellt.

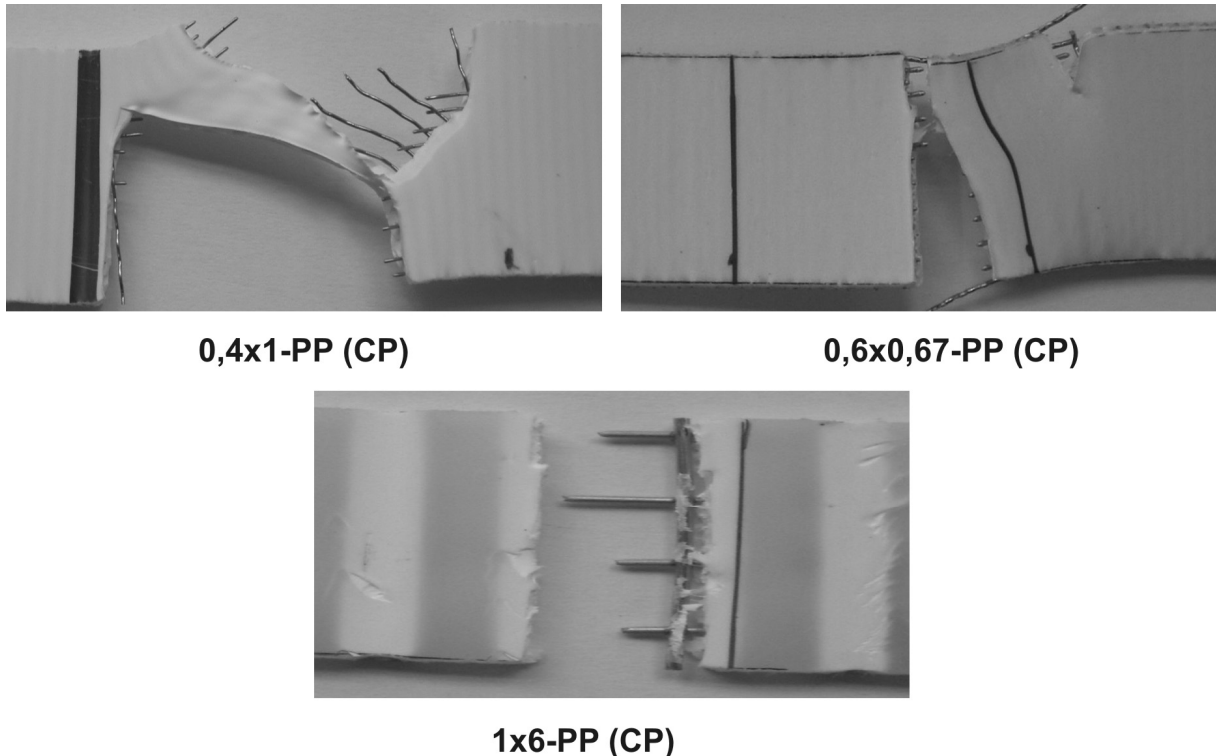


Bild 4.23: Typische Bruchbilder ausgewählter ETV-Werkstoffe mit PP-Matrix

Die Bruchbilder zeigen das duktile Versagensverhalten der verwendeten PP-Copolymermatrix. Die sehr guten plastischen Deformationseigenschaften des Edelstahl werden ebenfalls in Bild 4.23 deutlich. Eine Erhöhung der Energieaufnahme im statischen Beanspruchungsfall wird vor allem bei den gewebeverstärkten PP-Verbunden durch den Stahldrahtauszug realisiert. Auf eine Darstellung von Zugbruchbildern von ETV-Werkstoffen mit einer PP/GF-Einbettung wird verzichtet, da sie eine große Ähnlichkeit zu den Bruchbildern im Kapitel 4.1.3.2 (s. Bild 4.4) aufweisen.

Absolute und dichtetpezifische Zugfestigkeiten und Zug-E-Moduli

Innerhalb dieses Abschnitts werden die im Versuch ermittelten statischen Zugkennwerte dargestellt und diskutiert. Zusätzlich zur bekannten Darstellung der Absolutwerte wird eine dichtetpezifische Darstellung vorgenommen, um eine Aussage über die Leichtbaueigenschaften dieser neuartigen Verbundwerkstoffe treffen zu können.

Bild 4.24 zeigt die absoluten Zugfestigkeiten der 18 untersuchten Werkstoffe.

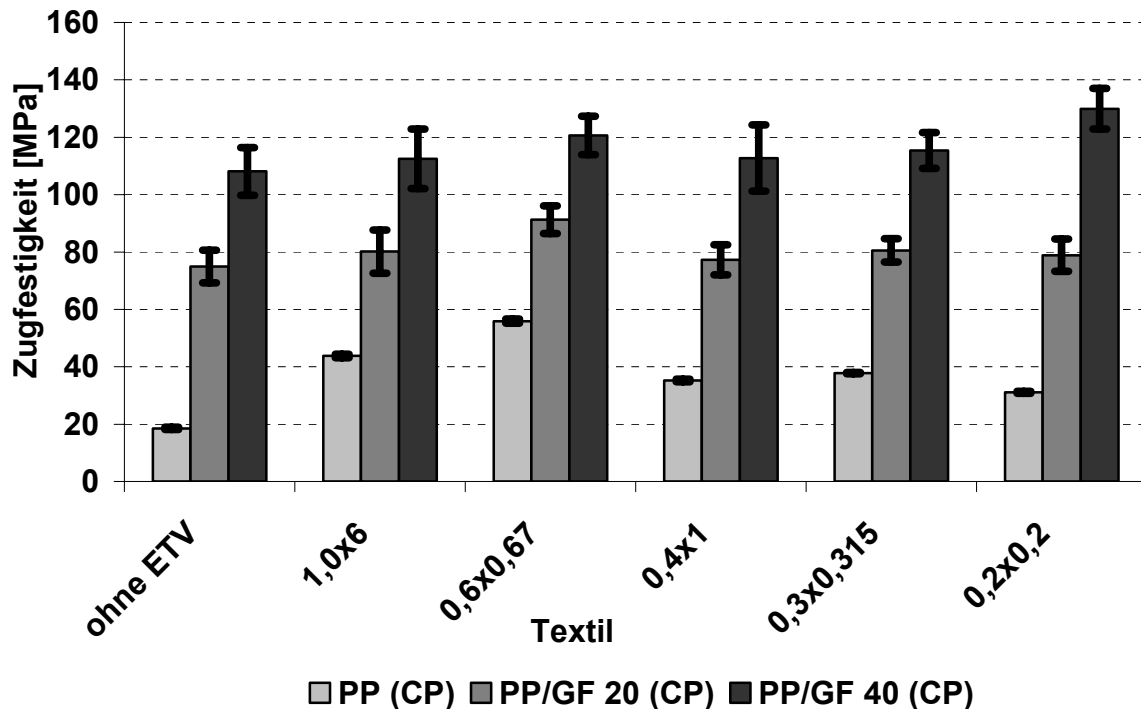


Bild 4.24: Absolute Zugfestigkeiten

Mittels Bild 4.24 wird deutlich, dass sich vor allem bei den ETV-Verbundwerkstoffen mit PP-Matrix die Textilverstärkung besonders positiv auf die Festigkeitseigenschaften auswirkt. Aufgrund des großen Festigkeitsunterschieds zwischen Polypropylen und X5CrNi1810 fällt die Verstärkungswirkung sehr deutlich aus. Der größte Festigkeitszuwachs wird bei 0,6x0,67-PP (CP) aufgrund des höchsten Flächengewichts der Verstärkung erreicht. Bei den ETV-Verbunden mit PP/GF-Einbettung sind nur kleine bis mittlere Festigkeitssteigerungen zu verzeichnen. Dies wird durch das frühe Matrixversagen bei ca. 2-3 % Dehnung bei diesen Werkstoffen bedingt. Die Zugfestigkeit der Stahltextilien wird aber erst bei höheren Dehnungen erreicht (größer 3 %), d. h. eine signifikante Verstärkungswirkung kann mit PP/GF-Einbettung nicht realisiert werden.

Die größte Festigkeitssteigerung wurde bei einer 0,6x0,67-Leinwandverstärkung mit PP/GF 20-Einbettung erzielt. Dieser Verbund weist einen großen Stahlvolumenanteil (ca. 17 %) auf. Im Vergleich dazu wurde bei den ETV-Verbundwerkstoffen mit einer sehr spröden PP/GF 40-Einbettung die höchste Festigkeit unter Verwendung einer 0,2x0,2-Köpergewebeverstärkung realisiert. Dieser Werkstoff besitzt einen ver-

gleichsweise geringen Stahlvolumengehalt (ca. 6 %), er erzeugt aber aufgrund seiner feinen Struktur nur eine geringe innere Kerbwirkung in der Einbettung. Dadurch werden die Bruchdehnung und die Festigkeit erhöht.

Im folgenden Bild 4.25 werden die dichtetespezifischen Zugfestigkeiten aller untersuchten Verbundwerkstoffe zur Beurteilung der Leichtbaugüte dargestellt.

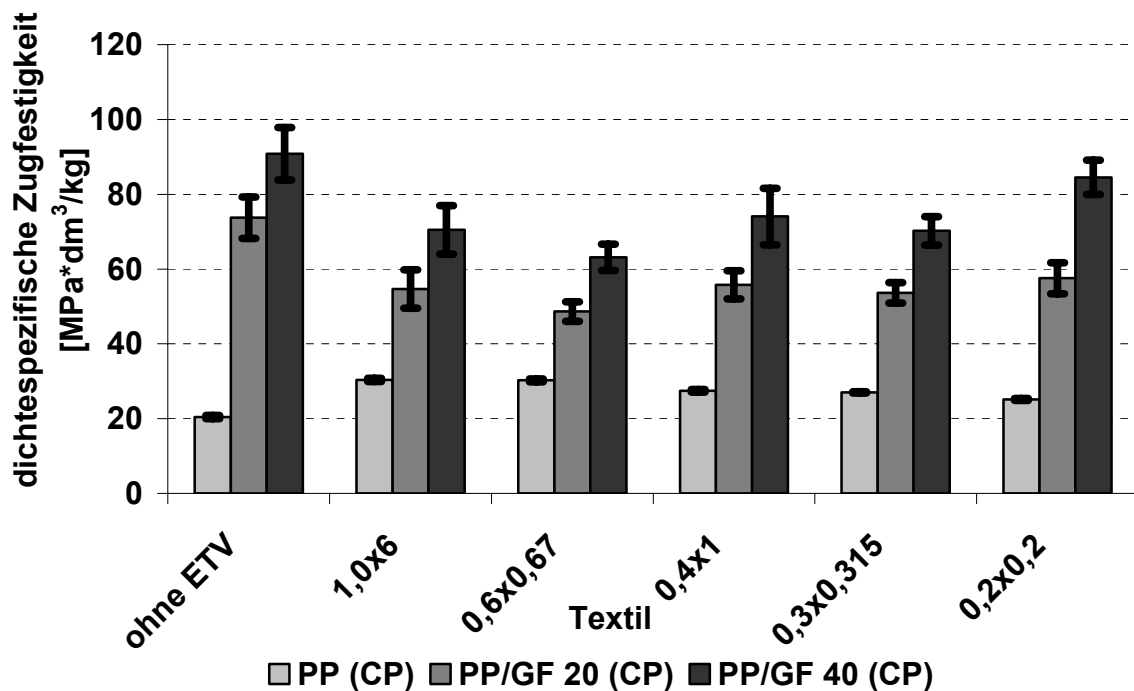


Bild 4.25: Dichtetespezifische Zugfestigkeiten

Mittels Bild 4.25 wird ersichtlich, dass nur bei PP durch eine Edelstahltextilverstärkung eine Verbesserung der dichtetespezifischen Zugfestigkeit erreicht werden konnte. Eine Verstärkung der PP/GF-Einbettung mit Edelstahltextilien führt in beiden Fällen zu einer Reduktion der dichtetespezifischen Zugfestigkeit. Dies wird durch die deutliche Dichteerhöhung bei den ETV-Verbunden durch die Verstärkung mit Edelstahl und einer nur geringen absoluten Festigkeitszunahme bedingt (s. Bild 4.24). Die kleinsten dichtetespezifischen Festigkeiten mit PP/GF-Einbettung wurden mit der 0,6x0,67-Leinwandgewebeverstärkung realisiert. Diese Verbunde wiesen mit Abstand die größten Dichten im Vergleich auf (ca. 1,9 kg/dm³). Die dichtetespezifische Festigkeit der anderen ETV-Verbunde mit PP/GF-Einbettung liegt nahezu auf identischem Niveau, da ihre Dichten und absoluten Festigkeiten etwa die gleiche quantitative Größenordnung besitzen. Abschließend kann zusammenfassend festgestellt

werden, dass in diesem Falle nur bei dem PP durch eine gezielte Edelstahltextilverstärkung die dichtespezifische Festigkeit gesteigert werden konnte.

Im Folgenden wird in Bild 4.26 der von allen geprüften Werkstoffen ermittelte absolute Zug-E-Modul gezeigt.

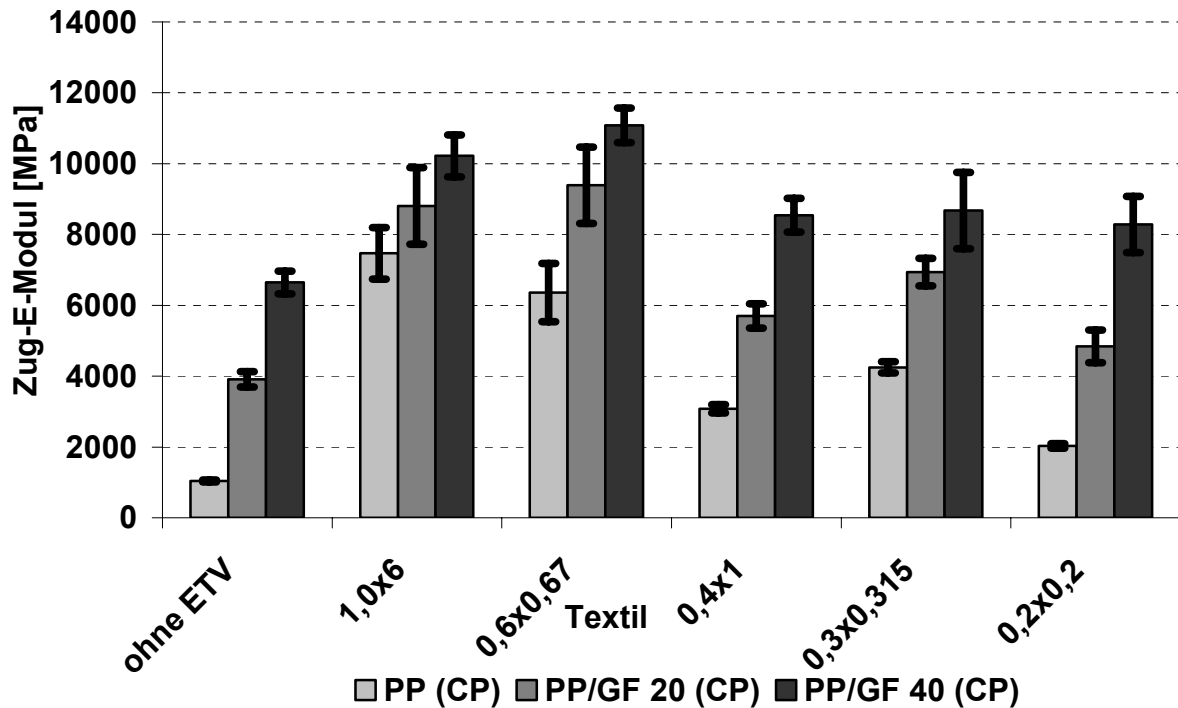


Bild 4.26: Absolute Zug-E-Moduli

Bei Betrachtung der absoluten Zug-E-Moduli wird in Analogie zu Bild 4.24 ersichtlich, dass die Verstärkungswirkung bei PP-Matrix und niedrig langglasfasergefülltem PP (PP/GF 20-Einbettung) sehr groß ist. Dies wird durch den großen Steifigkeitsunterschied zwischen PP bzw. PP/GF 20 und dem jeweiligen Stahltextil bedingt. Die deutlichsten Steifigkeitszuwächse (bis ca. Faktor 7 bei 1,0x6-PP (CP) im Vergleich zu reinem PP (CP)) werden bei Verwendung der Textilien mit dem höchsten Flächengewicht realisiert. Bei einer Verstärkung der Matrix- bzw. Einbettungswerkstoffe mit den „feinen und leichten“ Edelstahltextilien sind nur kleinere Steifigkeitssteigerungen zu erzielen (minimal bei 0,2x0,2-PP/GF 20 (CP) um den Faktor 1,2 im Vergleich zu unverstärktem PP/GF 20 (CP)).

Im Gegensatz zu den absoluten Zugfestigkeiten führt aber eine textile Edelstahlverstärkung bei allen geprüften Verbundwerkstoffen zu einer signifikanten Erhöhung der absoluten Zugsteifigkeit.

Im Weiteren werden in Bild 4.27 die dichtetpezifischen Zug-E-Moduli aller geprüften Werkstoffe gezeigt.

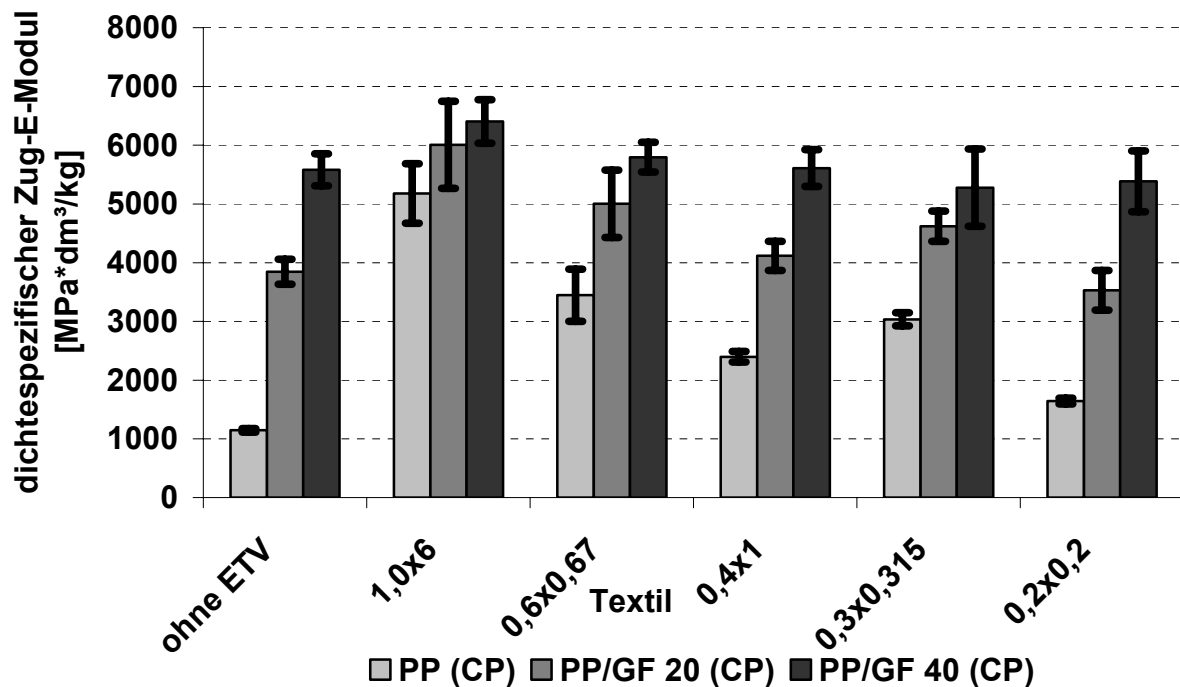


Bild 4.27: Dichtetpezifische Zug-E-Moduli

Bei Betrachtung der dichtetpezifischen Zug-E-Moduli wird ersichtlich, dass eine deutliche Erhöhung dieses Leichtbaukennwertes nur in Kombination von PP (CP) und textiler Edelstahlverstärkung möglich ist. Mittlere Zugsteifigkeitszunahmen bis hin zu Zug-E-Modul-Reduzierungen sind vor allem bei Kombination von PP/GF-Einbettungsverbunden mit den verschiedenen Edelstahltextilien zu beobachten. Die Gründe sind hierfür ähnlich geartet, wie sie schon am Beispiel der dichtetpezifischen Zugfestigkeiten erläutert wurden:

- bei PP/GF-Einbettung geringer absoluter Steifigkeitszuwachs aber erhebliche Dichtezunahme (um bis ca. 60 %) durch metallische Verstärkung
- bei PP-Matrix sehr große Zugsteifigkeitsvergrößerung (absolut) bei ebenfalls signifikanter Dichteerhöhung, daraus folgt eine Verstärkungswirkung bleibt dennoch erhalten

Generell sehr gute dichtetpezifische Steifigkeitseigenschaften werden bei allen ETV-Verbunden mit einer 1,0x6-Verstärkung erzielt. Der Grund hierfür liegt in der Struktur

des Verstärkungstextils. Das Schweißgitter besitzt keine Ondulationen, die erst verstreckt werden müssen. Die hohe Zugsteifigkeit des Stahls ist von Anbeginn des Versuchs bzw. der Deformation vorhanden (s. Kapitel 3.2.2).

4.3.4 Mechanische Charakterisierung der neuartigen ETV-Verbundwerkstoffe im hochdynamischen Durchstoßversuch

4.3.4.1 Probenvorbereitung und Versuchsdurchführung

Wichtige Versuchseinstellungen und -parameter sind in Tabelle 4.5 abgebildet.

Tabelle 4.5: Versuchseinstellungen und -parameter beim Durchstoßversuch

Prüfkörperabmessungen: Länge x Breite x Dicke [mm ³]	80 x 80 x 2,8-4,1
Spannvorrichtung [-]	pneumatisch
Spannkraft [kN]	3
Impaktordurchmesser [mm]	20
Impaktmasse [kg]	7,357
Impaktenergie [J]	125 (PP (CP) und PP-Matrix ETV-Verbunde, außer mit 0,6x0,67-Verstärkung) 175 (alle übrigen ETV-Verbunde, außer mit 0,6x0,67-Verstärkung) 200 (alle ETV-Verbunde mit 0,6x0,67-Verstärkung)
Impaktgeschwindigkeit [m/s]	125J=5,8; 175J=6,9; 200J=7,4
Fallhöhe [m]	125J=1,73; 175J=2,43; 200J=2,77
Federkompression [mm]	125J=41,4; 175J=57,8; 200J=64,4

Mit Hilfe dieser mechanischen Charakterisierung sollen die Kraft-Deformations-Verläufe, das Bruchverhalten und die absorbierte absolute bzw. die absorbierte dichtespezifische Impaktenergie derartig neuer Verbundwerkstoffe bestimmt werden. Ein weiteres Ziel dieser Prüfung ist die Festlegung von zwei Werkstoffen für eine weiterführende mechanische Charakterisierung. Die Auswahlgröße für die weitere Charakterisierung wird die dichtespezifisch absorbierte Impaktenergie sein. Die Versuche wurden in Anlehnung an die Norm DIN EN ISO 6603-2 durchgeführt. Als Versuchseinrichtung wurde die Minifallturmanlage Fractovis der Firma Ceast verwendet. Die Anpassung der Versuchseinstellungen (Impaktenergie etc., s. Tabelle 4.5) wurde durchgeführt, um einen vollständigen Versuchskörperdurchstoß sicherstellen zu können.

4.3.4.2 Ergebnisse und Diskussion

Kraft-Deformations-Verläufe und Bruchverhalten

In Bild 4.28 (s. folgende Seite) werden typische Kraft-Deformations-Verläufe von ETV-Verbundwerkstoffen mit einer PP/GF 40 (CP)-Einbettung und zum Vergleich PP/GF 40 (CP) ohne Verstärkung dargestellt. Bei der Betrachtung von Bild 4.28 wird deutlich, dass eine Verstärkung von PP/GF 40 (CP) mit textilen Flächengebilden aus X5CrNi1810 für jeden untersuchten Fall zu einer ausgeprägten Erhöhung der Deformation und des Kraftniveaus führt. Letztendlich wird auch die Größe der absorbierten Impaktenergie dadurch positiv beeinflusst. Bei einer Verstärkung von LFT 40 (CP) mit den „schweren“ Textilien (Schweißgitter-1x6 und Leinwandgewebe-0,6x0,67) werden mit Abstand die höchsten Kraftwerte erzielt.

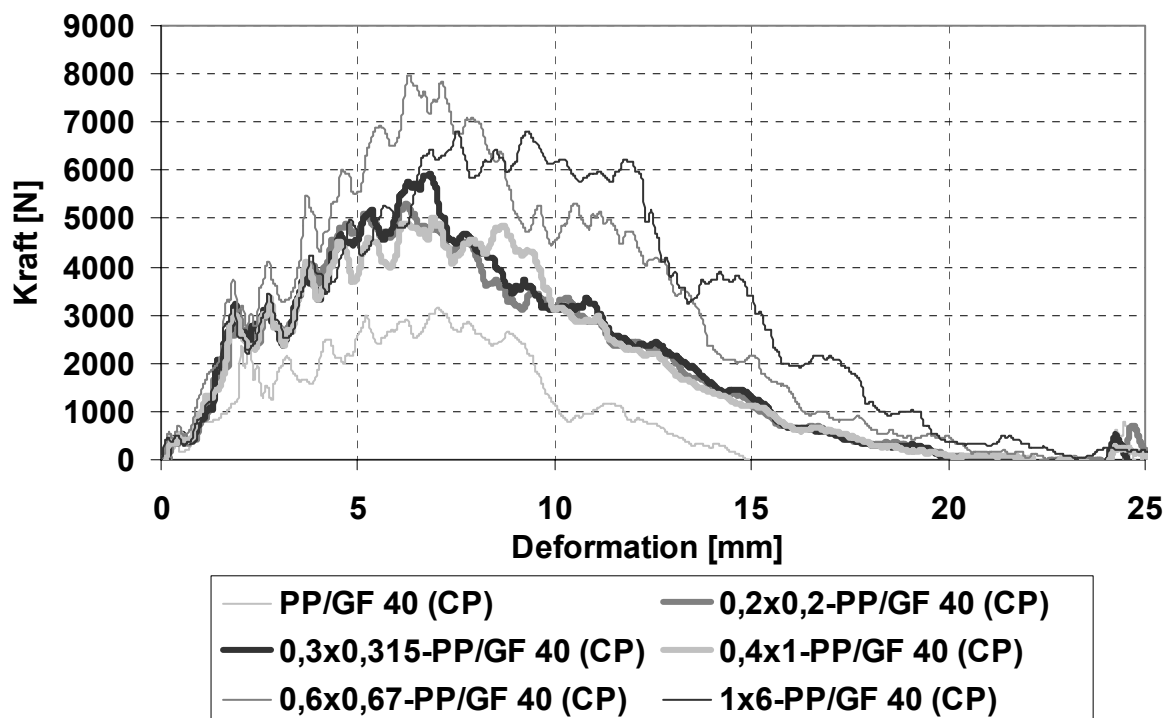


Bild 4.28: Typische Kraft-Deformations-Verläufe von Verbunden mit PP/GF 40-Einbettung und PP/GF 40 ohne Verstärkung

Werden die drei Gewebe (0,4x1, 0,3x0,315 und 0,2x0,2) mit einem nahezu identischem Flächengewicht (1,3 bis 1,45 kg/m²) in PP/GF 40 (CP) eingebettet, zeigen demzufolge auch die Kraft-Deformations-Kurven eine stark ausgeprägte Ähnlichkeit.

In der folgenden grafischen Darstellung (Bild 4.29) werden drei typische Kraft-Deformations-Kurven von 0,6x0,67-leinwandgewebeverstärkten Verbundwerkstoffen mit verschiedenen Matrix- bzw. Einbettungsmaterialien dargestellt. Mit Hilfe des Bildes soll der Einfluss der Matrix bzw. Einbettung auf die Impakteigenschaften verdeutlicht werden. Durch eine Verstärkung des PPs mit Langglasfasern wird die Durchstoßkraft ca. um dem Faktor 1,5 bei PP/GF 20 (CP) erhöht bzw. fast verdoppelt bei PP/GF 40 (CP). Dies bedeutet ferner, dass die Durchstoßfestigkeit durch eine Langglasverstärkung des Polypropylens in positiver Weise beeinflusst werden kann. Die Erhöhung der Durchstoßfestigkeit resultiert daraus, dass neben der plastischen Deformation der Edelstahlverstärkung bis zum Bruch bei reinem PP noch zusätzlich sehr steife und feste Langglasfasern ausgezogen und zerstört werden müssen (s. Bild 4.30).

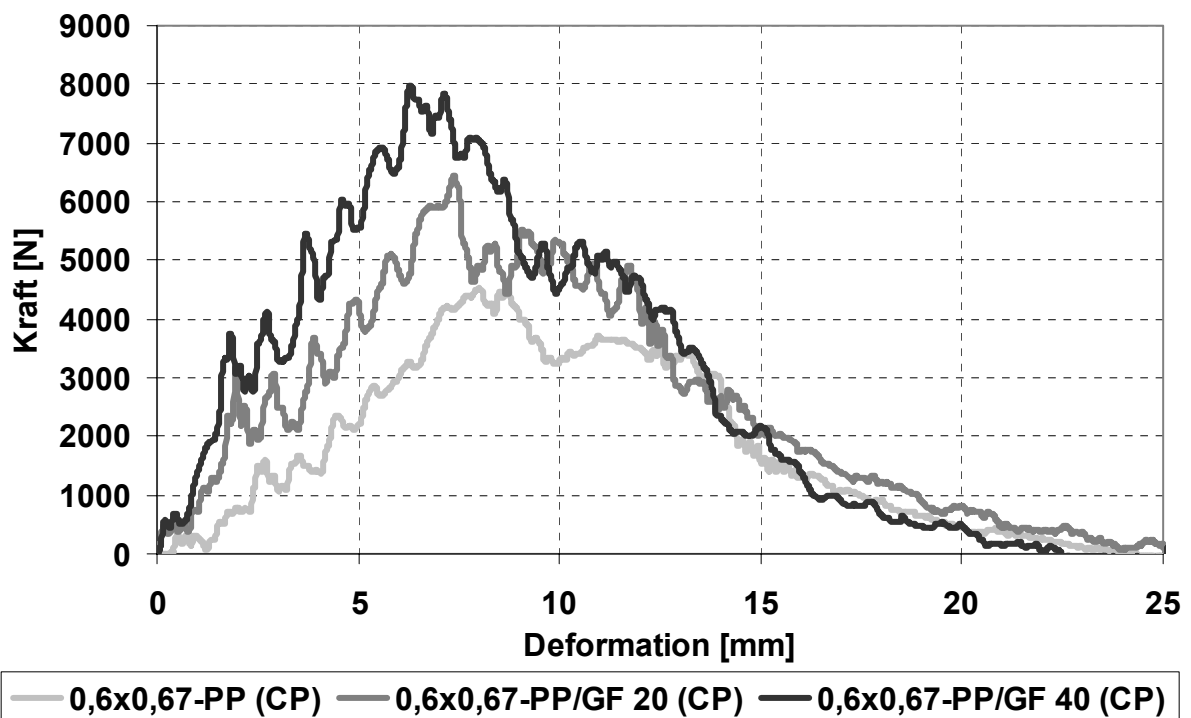


Bild 4.29: Typische Kraft-Deformations-Verläufe einer 0,6x0,67-Verstärkung mit unterschiedlichen Matrix- bzw. Einbettungsmaterialien

Weiterhin wird ersichtlich, dass ab etwa 12,5 mm Deformation die Kraft-Verformungs-Kurven in etwa aufeinander liegen. Die in allen drei Fällen erzielte Probenverformung ist mit rund 20 mm ebenfalls nahezu gleich.

Das schon an Bild 4.29 kurz erläuterte Schädigungs- und Bruchverhalten wird mittels Bild 4.30 noch weiter diskutiert. In diesem Bild sind typische Bruchbilder von ETV-Werkstoffen mit verschiedenen Matrices bzw. Einbettungen und verschiedenen Verstärkungstextilien dargestellt.

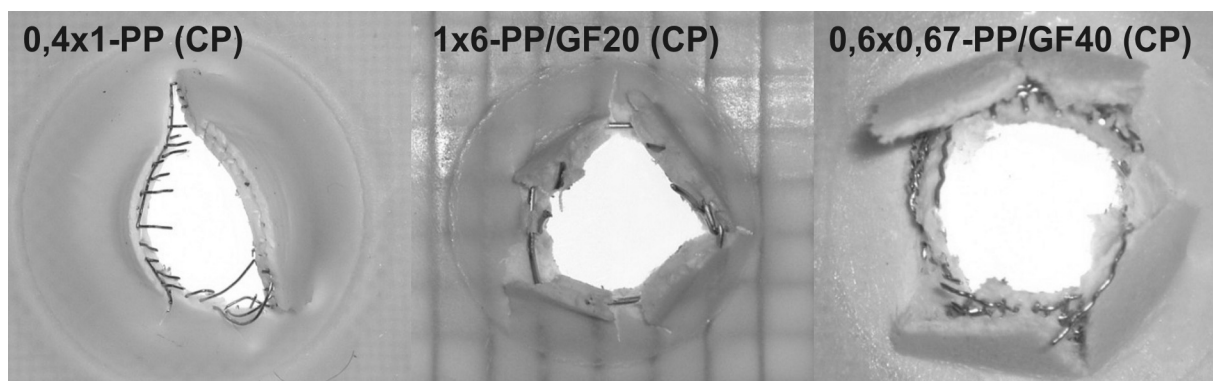


Bild 4.30: Typische Bruchbilder des Durchstoßversuchs

In Bild 4.30 wird die hohe Duktilität des PP-Copolymers bei hochdynamischer Impaktbelastung deutlich, die somit im Vergleich zu dem spröden PP-Homopolymer (s. Kapitel 4.1) schon zu einer deutlichen Verbesserung der Energieaufnahme führt. Zudem wird in Bild 4.30 wieder die Versprödung der PP-Matrix durch die Füllung mit Langglasfasern ersichtlich. Das sehr gute plastische Formänderungsvermögen der Edelstahltextilien ist in Bild 4.30 ebenfalls erkennbar. Ein Herausziehen von Stahldrähten beim Durchstoßen der Probe kann vor allem am Beispiel des Werkstoffs 0,4x1-PP (CP) verdeutlicht werden, was die Impakteigenschaften dieser neuartigen Verbunde positiv beeinflusst. Ein Teil der Glasfasern im Eindringbereich wird, wie schon dargestellt wurde, ebenfalls aus der Matrix herausgezogen und verhindert zusammen mit der textilen Verstärkung eine Fragmentierung des Probekörpers, die Strukturintegrität und die Energieabsorption wird dadurch erhöht. Abschließend ist noch festzustellen, dass zwischen PP und Edelstahltextil keine Haftung besteht (s. Kapitel 4.2). Dies wird daran sichtbar, dass an den Stahldrähten keine Matrixpartikel haften bleiben und speziell bei PP/GF-Einbettungen die Bruchstücke und die Bruchfläche eine Schichtstruktur aufweisen.

Absolute und dichtespezifische absorbierte Impaktenergien und Auswahl zweier ETV-Verbunde auf Basis der Ergebnisse für eine weiterführende mechanische Charakterisierung

Im Folgenden wird in Bild 4.31 die absolute absorbierte Impaktenergie von allen geprüften textilverstärkten und unverstärkten Werkstoffen dargestellt und diskutiert. Mit Hilfe des Bildes wird das generell sehr gute Energieabsorptionsverhalten des PP-Copolymers deutlich. Die Verstärkung dieses duktilen Polypropylencopolymers mit Edelstahltextilien führt bei zwei untersuchten ETV-PP-Verbunden zu einer Reduzierung der Energieaufnahme. Als Grund hierfür wurde eine innere Schädigung des Verbundes durch ein früher als das PP versagendes Verstärkungstextil in Betracht gezogen, d. h. die umgebende PP-Matrix wird durch ein bereits zerstörtes und scharfkantiges Verstärkungstextil geschädigt. Weiterhin wird die innerhalb dieses Kapitels schon angedeutete Versprödung der PP-Matrix durch das Einbringen der Langglasfasern ersichtlich. Sehr kleine Energieabsorptionswerte werden mit PP/GF 20 (CP) realisiert, da aufgrund der Glasfaserverstärkung die Durchstoßkraft

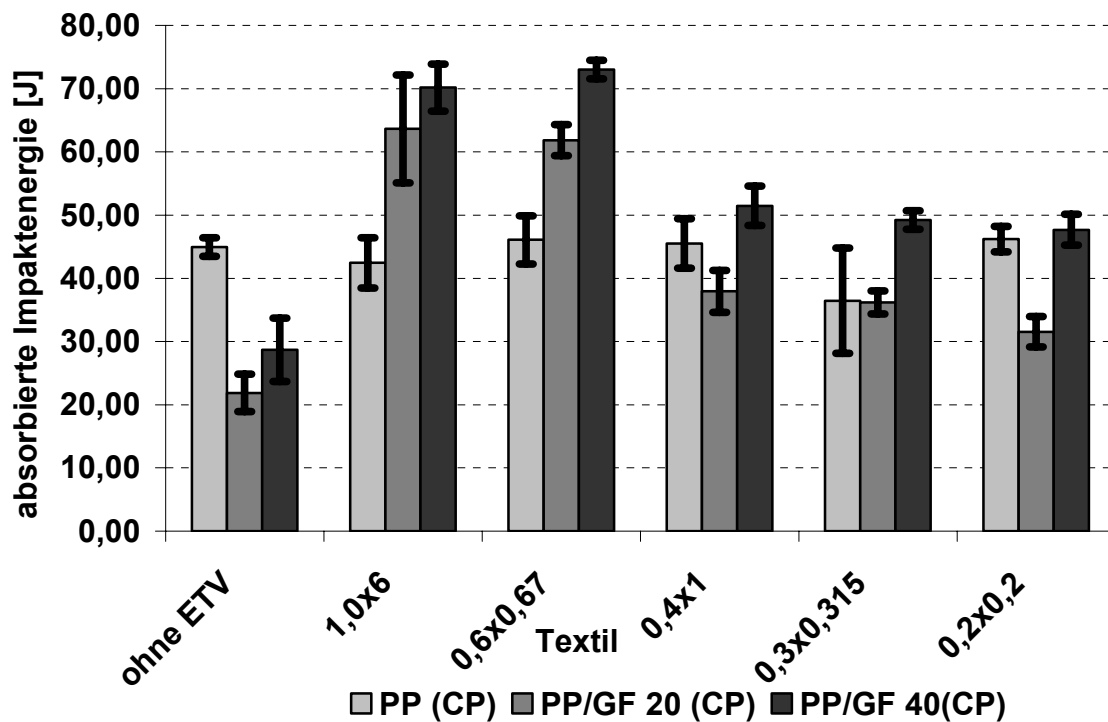


Bild 4.31: Absolute Impaktenergien

ansteigt, gleichzeitig die Deformation durch die Matrixversprödung aber wesentlich abnimmt. Insgesamt betrachtet, führt eine Verstärkung von PP/GF (LFT) mit Edelstahltextilien immer zu einer signifikanten Verbesserung der Energieabsorption. Besonders deutlich ist die Erhöhung der Energieaufnahme bei PP/GF 20 (CP) und der Verwendung der „schweren“ Verstärkungen (ca. Faktor 3). Werden die drei Textilien mit einem ähnlichen Flächengewicht in PP/GF eingebettet, so werden auch nahezu gleiche Absorptionswerte erzielt.

In der folgenden Grafik (Bild 4.32) wird die auf die Werkstoffdichte normierte Impaktenergie dargestellt (absorbierte dichtespezifische Impaktenergie).

Wie schon bei der Diskussion von Bild 4.31 erläutert wurde, weist das PP ohne Verstärkung exzellente Absorptionseigenschaften auf, die durch die Normierung auf die Dichte des Werkstoffs noch mehr in den Vordergrund treten, daraus folgt, dass eine Verstärkung des Polypropylencopolymeres mit Edelstahltextilien nicht zielführend ist. Eine Verbesserung der dichtespezifischen Energieaufnahme kann nur für die ETV-Verbunde mit PP/GF-Einbettung erreicht werden, obwohl eine z. T. erhebliche Dichtezunahme vorliegt.

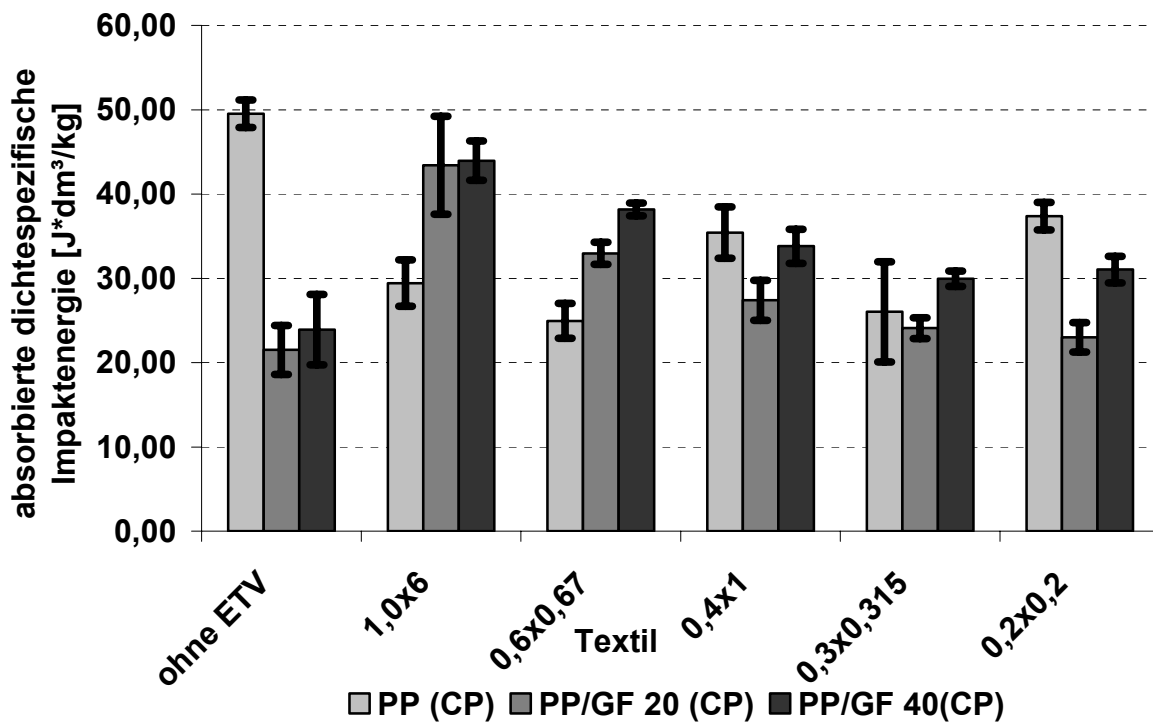


Bild 4.32: Dichtespezifische Impaktenergien

Die beste spezifische Energieaufnahme der untersuchten ETV-Verbunde zeigen die PP/GF-Werkstoffe mit einer Schweißgitterverstärkung (1,0x6), da sie eine mittlere Dichte (ca. $1,5 \text{ kg/dm}^3$) und sehr gute absolute Absorptionswerte aufweisen. Ebenfalls sehr gute Absorptionseigenschaften weisen im Versuch die Verbundwerkstoffe mit einer 0,6x0,67-Verstärkung und PP/GF-Einbettung trotz sehr hoher Dichte auf ($1,9 \text{ kg/dm}^3$). Die ETV-Werkstoffe mit einer „leichten“ textilen Verstärkung zeigen ein ähnliches Absorptionsverhalten.

Abschließend wird mittels Bild 4.32 eine Auswahl von zwei ETV-Verbundwerkstoffen getroffen, die einer Haftungsoptimierung und einer weiterführenden mechanischen Charakterisierung zugeführt werden sollen. Wie schon erläutert wurde, ist das Auswahlkriterium die dichtespezifisch absorbierte Impaktenergie, da diese Leichtbaueigenschaft von zentraler Bedeutung für einen möglichen Einsatz in crashrelevanten Teilen und Komponenten der Fahrzeugindustrie sein kann (sehr gute Energieaufnahme und Ressourcenschonung). Von den 15 untersuchten ETV-Verbunden weisen 1,0x6- und 0,6x0,67-edelstahltextilverstärkte PP/GF 40 (CP)-Werkstoffe die höchsten Absorptionswerte auf und werden deshalb weiterführenden Materialprüfun-

gen und einer Haftungsoptimierung unterzogen (s. folgendes Kapitel), um einen Überblick über die mechanischen Eigenschaften derartig neuer FKV zu erhalten.

5 Haftungsoptimierung und weiterführende Charakterisierung von ETV-Verbunden mit sehr guten Impakteigenschaften

5.1 Haftungsoptimierung mittels Druckluftstrahlen

Wie bereits im Abschnitt „Stand der Technik“ dargestellt wurde, ist die Haftung zwischen Faser und polymerer Matrix von essentieller Bedeutung für die mechanischen Eigenschaften des Verbundwerkstoffs [Ros01]. Weiterhin ist aber an den mikroskopischen Aufnahmen in Kapitel 4 dieser neuartigen ETV-Verbundwerkstoffe deutlich geworden, dass bei den Verbunden nahezu keine Edelstahldraht/PP-Anbindung vorliegt. Es ist deshalb davon auszugehen, dass insbesondere die in Kapitel 4 bestimmten Zugeigenschaften nur im unteren Bereich des Werkstoffpotentials liegen. So wurde in Anlehnung an die Dissertation von Velthuis [Vel01] eine mechanische Vorbehandlung der Edelstahltextilien zur Haftungserhöhung vorgenommen. Das Vorgehen bei der Vorbehandlung und die verwendeten Textilien (nach Auswahl in Kapitel 4) sind in der Tabelle 5.1 abgebildet.

Tabelle 5.1: Vorgehen bei der Vorbehandlung und verwendete Textilien

Textil	Vorbehandlung (VB)
ESG – 1x6	<ol style="list-style-type: none"> 1. Reinigen mit Isopropanol 2. Druckluftstrahlen (Korund, Körnung 0,25-0,5 mm) 3. Reinigen mit Isopropanol
EG – 0,6x0,67	<ol style="list-style-type: none"> 1. Reinigen mit Isopropanol 2. Druckluftstrahlen (Korund, Körnung 0,25-0,5 mm) 3. Reinigen mit Isopropanol

Die auf dem dargestellten Weg vorbehandelten Textilien wurden anschließend nach dem in Kapitel 4.3 vorgestellten Fertigungsprozess zu ETV-Verbunden weiterverarbeitet.

5.2 Einfluss der Vorbehandlung auf die quasistatischen Zugeigenschaften der ETV-Verbundwerkstoffe

5.2.1 Grundsätzliches

Die Zugversuche wurden ebenfalls nach dem in Kapitel 3 und 4 beschriebenen Vorgehen und unter Verwendung der gleichen Versuchs- / Auswertetechnik durchgeführt. Jedoch wurde der Schwerpunkt dieser Untersuchungen auf eine Betrachtung der Verbesserung des mechanischen Eigenschaftsprofils dieser neuartigen FKV unter einachsiger Zugbeanspruchung durch eine gezielte Vorbehandlung der Verstärkung zur Haftungverbesserung gelegt.

5.2.2 Ergebnisse und Diskussion

In Bild 5.1 sind im Folgenden zum Vergleich die Zug-E-Moduli von PP/GF 40 (CP)-Werkstoffen mit vorbehandelten (VB) bzw. unbehandelten Verstärkungselementen dargestellt.

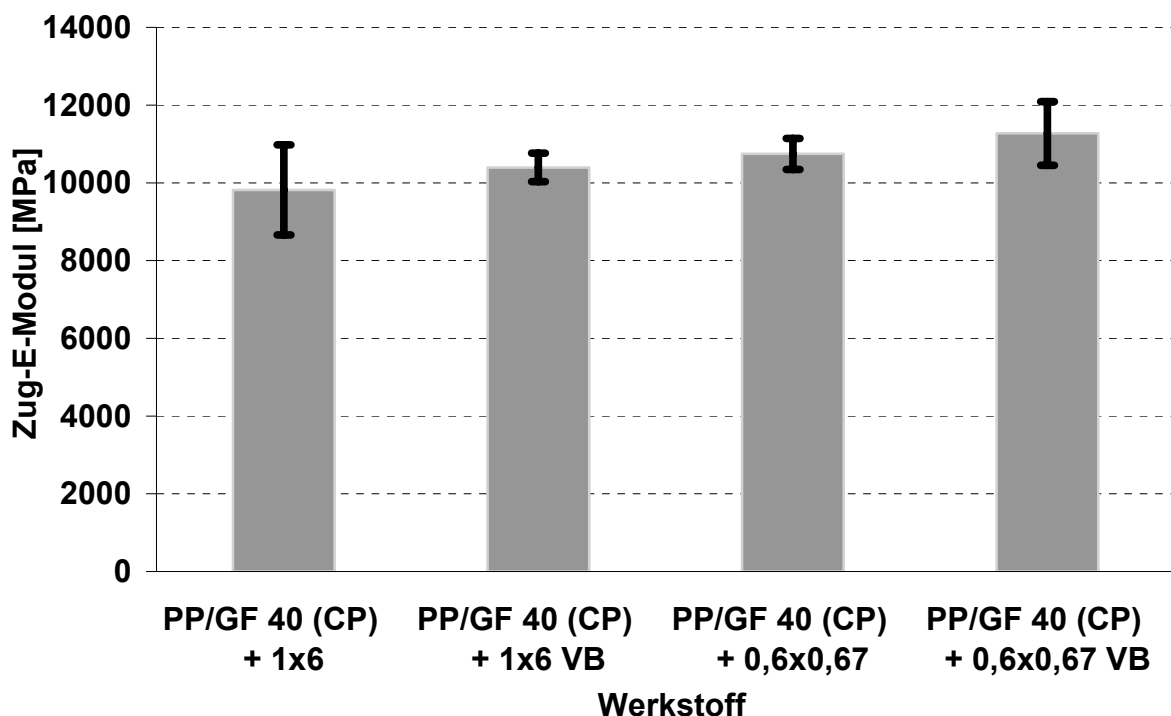


Bild 5.1: Zug-E-Moduli im Vergleich

Mittels Bild 5.1 wird verdeutlicht, dass durch die Vorbehandlung (VB) der entsprechenden Textilien im Mittel eine Zugsteifigkeitserhöhung von ca. 5 bis 6 % erzielt werden konnte. Generell wird aber ebenfalls wieder die relativ große Streuung der Kennwerte deutlich, was aus der Inhomogenität des Einbettungswerkstoffs resultiert.

Im folgenden Bild 5.2 sind die Zugfestigkeitswerte der vier untersuchten Werkstoffe zum Vergleich dargestellt.

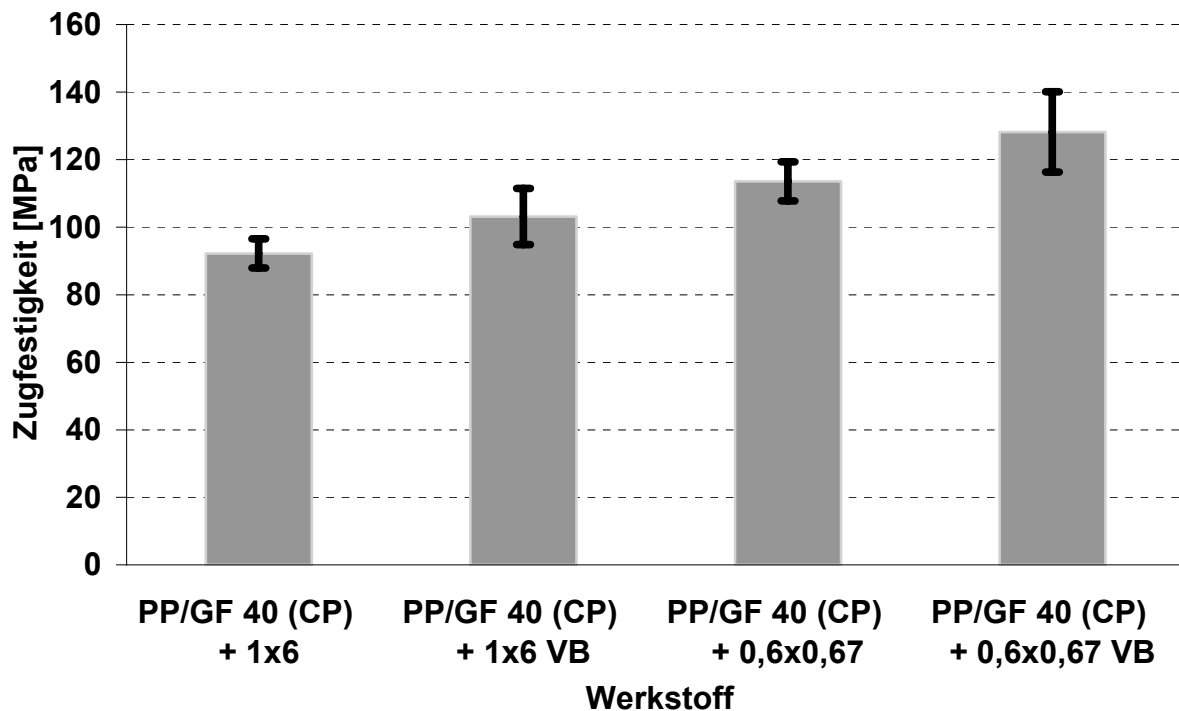


Bild 5.2: Zugfestigkeiten im Vergleich

Wie in Bild 5.2 dargestellt, lassen sich signifikante Festigkeitssteigerungen durch die Vorbehandlung der Verstärkungstextilien erzielen. Bei dem PP/GF 40 (CP) mit Schweißgitterverstärkung (1x6) wird eine Festigkeitssteigerung um ca. 12 % durch die Vorbehandlung erreicht. Wenn nun der LFT-Werkstoff mit Gewebeverstärkung betrachtet wird, beträgt die Festigkeitssteigerung etwa 13 %. Der Festigkeitsanstieg tritt bei der Gewebeverstärkung deutlicher in Erscheinung, da ein Ablösen zwischen Draht und Matrix aufgrund der Aufrauung der Drahtoberfläche (s. Kapitel 5.3) in Bereiche höherer Grenzflächenbeanspruchungen verschoben wird, d. h. die Grenzflächenschubfestigkeit wurde gesteigert und die Drähte lassen sich nur mit erhöhtem Kraftaufwand in Richtung der Beanspruchung aus der PP-Matrix herausziehen. Diese Effekte sind für die Schweißgitterverstärkung nicht von so großer Bedeutung, weil

ein Ablösen von Draht und Matrix stattfinden, aber weiter eine Lasteinleitung von der Matrix in das stoffschlüssig verschweißte Gitter erfolgen kann und ein Herausziehen der Drähte in Belastungsrichtung nicht möglich ist. Generell werden auch im Falle der experimentellen Zugfestigkeitswerte die z. T. erheblichen Streuungen deutlich.

5.3 Rasterelektronenmikroskopie an Zugbruchflächen behandelter und unbehandelter Proben

Die Probenpräparation und die REM wurden in gleicher Weise wie in Kapitel 4.2.1 dargestellt angewendet.

Das Bild 5.3 zeigt eine Zugbruchfläche eines PP/GF 40 (CP)-Werkstoffs mit einer unbehandelten 0,6x0,67-Leinwandgewebeverstärkung.

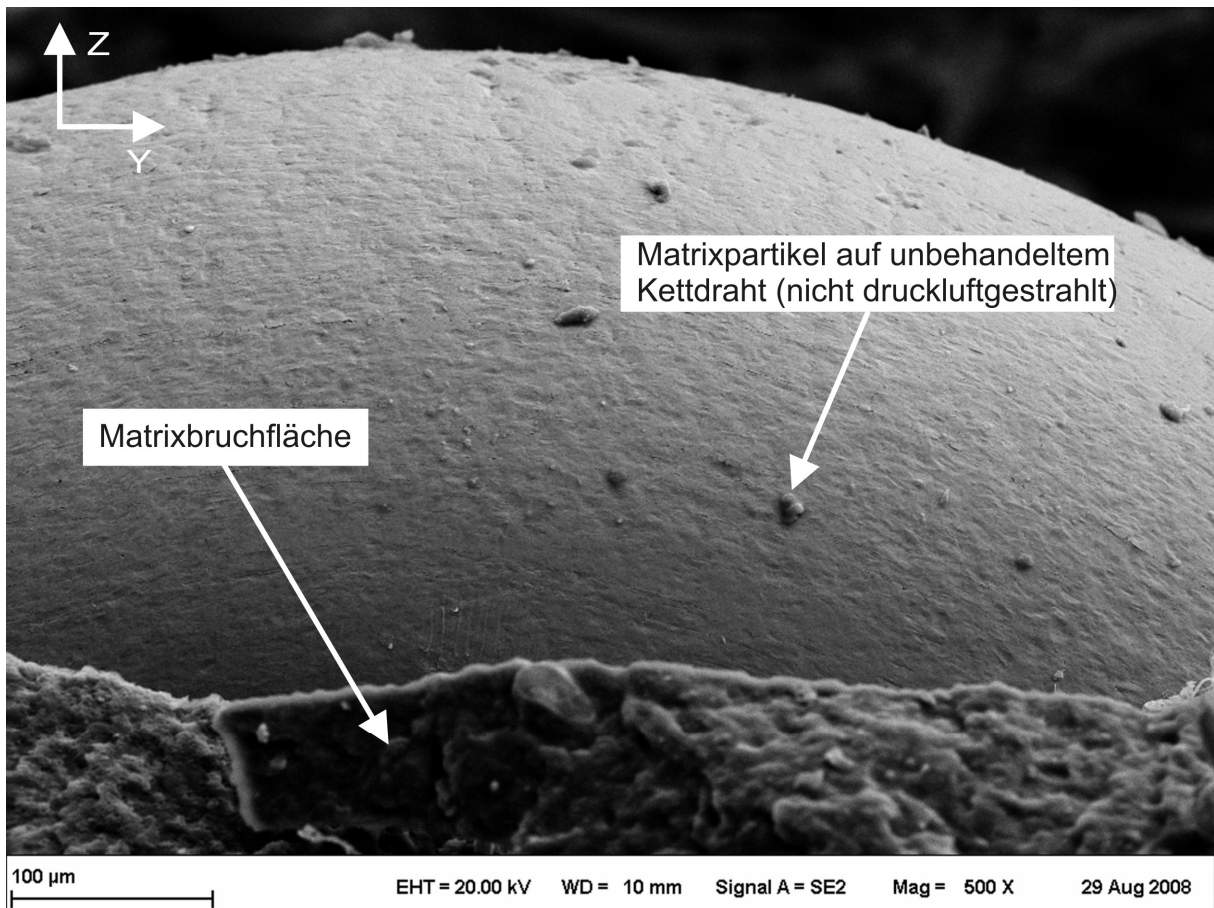


Bild 5.3: REM-Aufnahme einer Zugbruchfläche eines PP/GF 40 (CP)-Werkstoffs mit einer unbehandelten 0,6x0,67-Leinwandgewebeverstärkung

In Analogie zu den Ergebnissen der REM in Kapitel 4.2.3 ist wieder die sehr schlechte PP-/Stahldrahtanbindung in Bild 5.3 ersichtlich. Nach dem Bruch verbleiben nahezu kaum Matrixpartikel auf dem relativ glatten Kettdraht. Die Matrix weist im Vergleich zu Kapitel 4.2.3 eher ein duktilen Versagen auf.

Ein ebenfalls duktilen Matrixbruchverhalten weist die Zugbruchfläche des untersuchten PP/GF 40 (CP)-Verbunds mit vorbehandelter 0,6x0,67-Verstärkung auf (Bild 5.4).

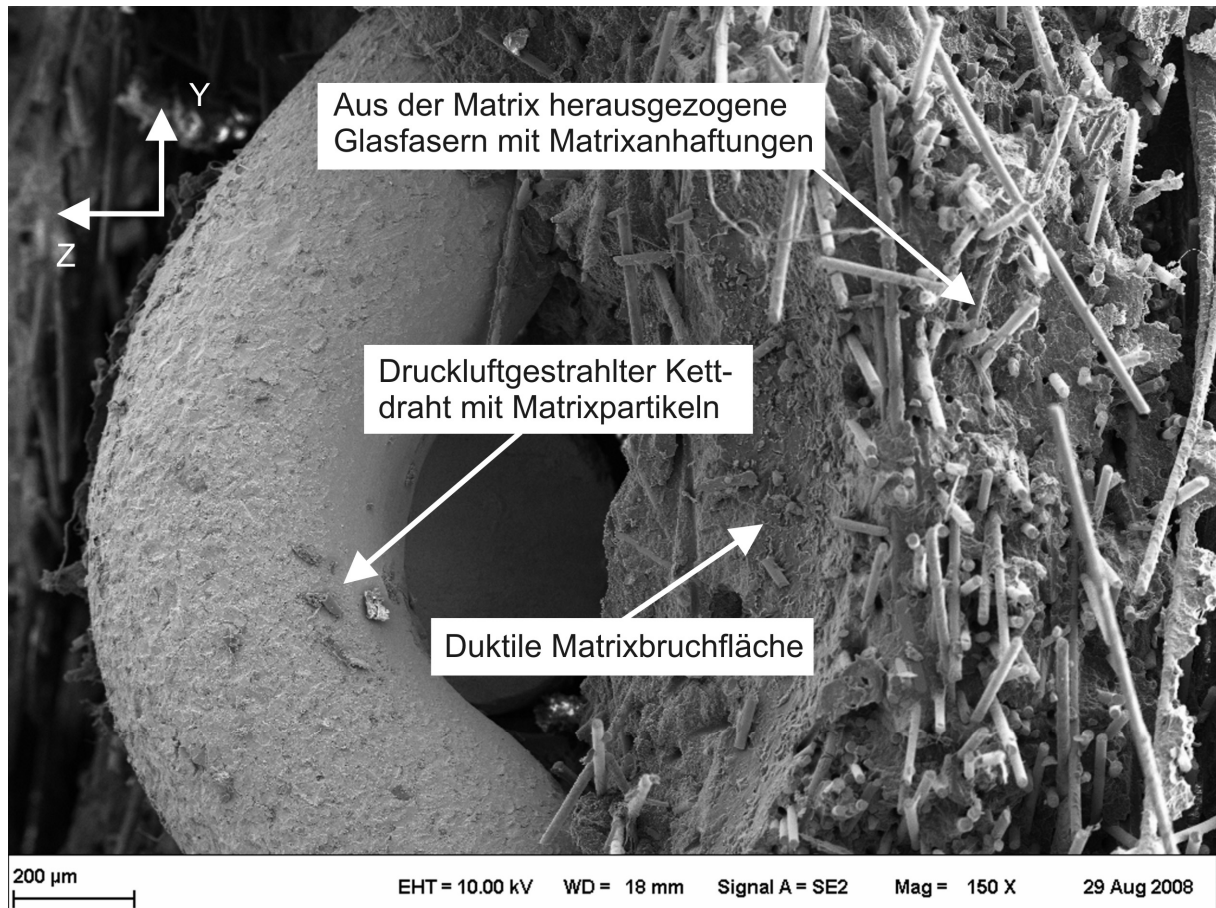


Bild 5.4: REM-Aufnahme einer Zugbruchfläche eines PP/GF 40 (CP)-Werkstoffs mit einer vorbehandelten 0,6x0,67-Leinwandgewebeverstärkung

Die Haftung zwischen Glasfasern und dem PP-Copolymer ist deutlich ausgeprägter als zwischen den Glasfasern und dem PP-Homopolymer in Kapitel 4.2.3. Weiterhin zeigt der Kettdraht in Bild 5.4 durch das Druckluftstrahlen eine ausgeprägte Oberflächenstruktur. Aufgrund dieser Oberflächentopographie kommt es zum Formschluss zwischen dem PP und dem Stahldraht. Dies bedingt wiederum eine Erhöhung der Drahtauszugkraft bzw. der interlaminaren Scherfestigkeit und letztendlich auch der Zugfestigkeit des ETV-Verbundwerkstoffes.

5.4 Einfluss der Vorbehandlung auf die interlaminare Scherfestigkeit der ETV-Verbundwerkstoffe

5.4.1 Probenvorbereitung und Versuchsdurchführung

Die interlaminare Scherfestigkeit wird mittels Kurzbiegeprüfung bestimmt. Dabei handelt es sich um eine Dreipunktbiegeprüfung mit verkürztem Auflagerabstand. Ziel dieser Prüfung ist die Bestimmung des Widerstands gegen Scherbeanspruchung in faserparallelen Lagen eines Laminats. Im klassischen Sinne handelt es sich bei dieser Spannung um die maximale Scherspannung in der neutralen Faser eines Laminats bei Versagensbeginn. Die interlaminare Scherfestigkeit wird mit folgender Gleichung berechnet:

$$\tau_{\text{ILS}} = \frac{3}{4} \cdot \frac{F_{\text{KBmax}}}{B_{\text{KB}} \cdot D_{\text{KB}}} \quad (5.1)$$

Mit Hilfe der Scherfestigkeit lassen sich Aussagen zur Güte der Faser-Matrix-Haftung treffen. Die Prüfungen wurden in Anlehnung an die Norm DIN EN 2563 [Nor05] vorgenommen. Tabelle 5.2 zeigt wesentliche Versuchsparameter.

Tabelle 5.2: Versuchsparameter der Kurzbiegeprüfung

Prüfparameter	Zwick 1474
Prüfkörperabmessungen; Kurzbiegeprobe Länge x Breite x Dicke [mm ³]	40 x 20 x 3,7-4,2
Kraftaufnehmer [kN]	10
Vorkraft [N]	5
Auflagerabstand / Dicke [-]	5
Prüfgeschwindigkeit [mm/min]	1

Abschließend ist noch festzustellen, dass es sich bei den zu prüfenden neuartigen ETV-Verbunden nicht um klassische 16-lagige Laminats mit 0°- oder +/- 45°- Faserausrichtung handelt, für die dieser Versuch zur Qualitätssicherung vorgesehen ist. In diesem speziellen Fall wird mit der Prüfung der Einfluss der Vorbehandlung auf

den Widerstand gegen das Abgleiten des steifen Verstärkungstextils vom PP/GF 40 (CP) durch Scherbelastung untersucht.

5.4.2 Ergebnisse und Diskussion

Bild 5.5 zeigt im Folgenden typische Kraft-Deformations-Verläufe der vier untersuchten Verbundwerkstoffe.

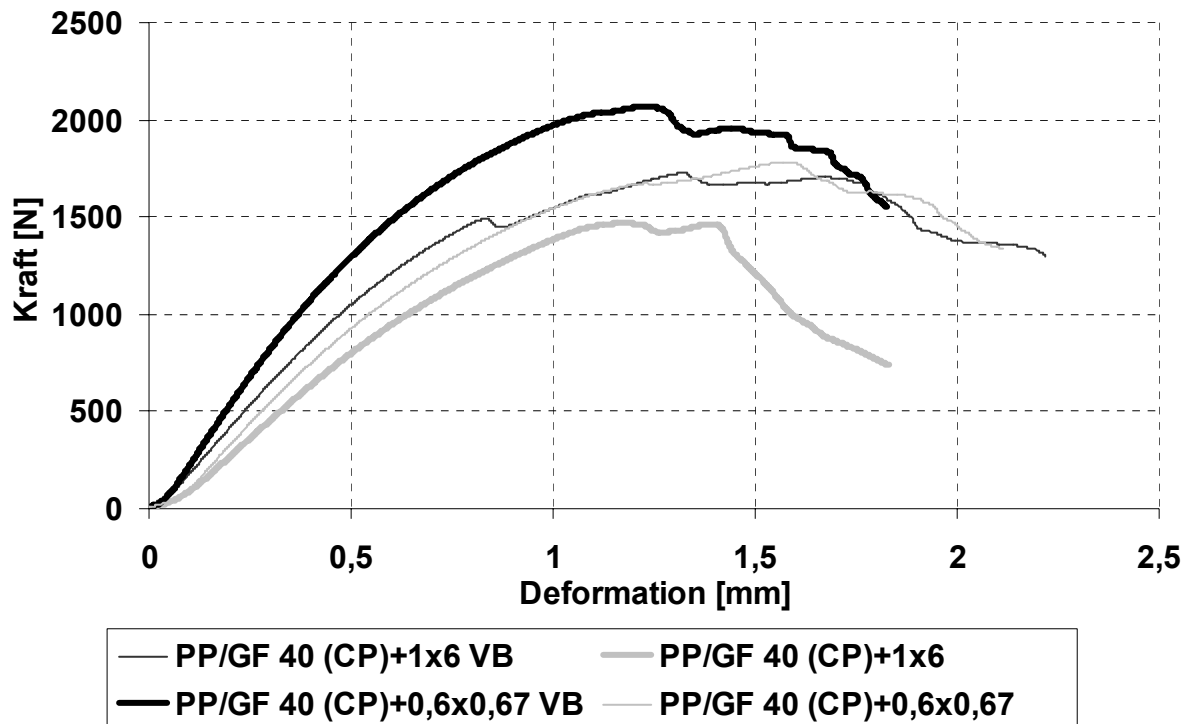


Bild 5.5: Typische Kraft-Deformations-Verläufe der untersuchten Verbunde

In Analogie zum Kapitel 5.2 wird eine Erhöhung des Kraftniveaus und somit eine Verbesserung der Grenzflächenscherfestigkeit durch die Vorbehandlung der Verstärkungstextilien erzielt. Die Vorbehandlung bewirkt eine Aufrauung der Verstärkungsdrähte. Dies führt dazu, dass zwischen PP und Verstärkung eine formschlüssige Verbindung entstehen kann und somit ein Abgleiten von Textil und PP in Bereiche höherer Beanspruchungen verschoben wird. Den deutlicheren Einfluss auf das Kraftniveau zeigt die gewählte Vorbehandlungsmethode bei der Leinwandgewebeverstärkung. Aufgrund der höheren Flächendichte der Verstärkungsdrähte bzw. der größeren Grenzfläche zwischen Drähten und PP ist der Einfluss der Vorbehandlung auf die interlaminae Scherfestigkeit bei der Leinwandgewebeverstärkung äußerst signifikant.

Die mittels Bild 5.5 getroffenen Aussagen werden anhand der interlaminaren Scherfestigkeiten nochmals bestätigt (Bild 5.6).

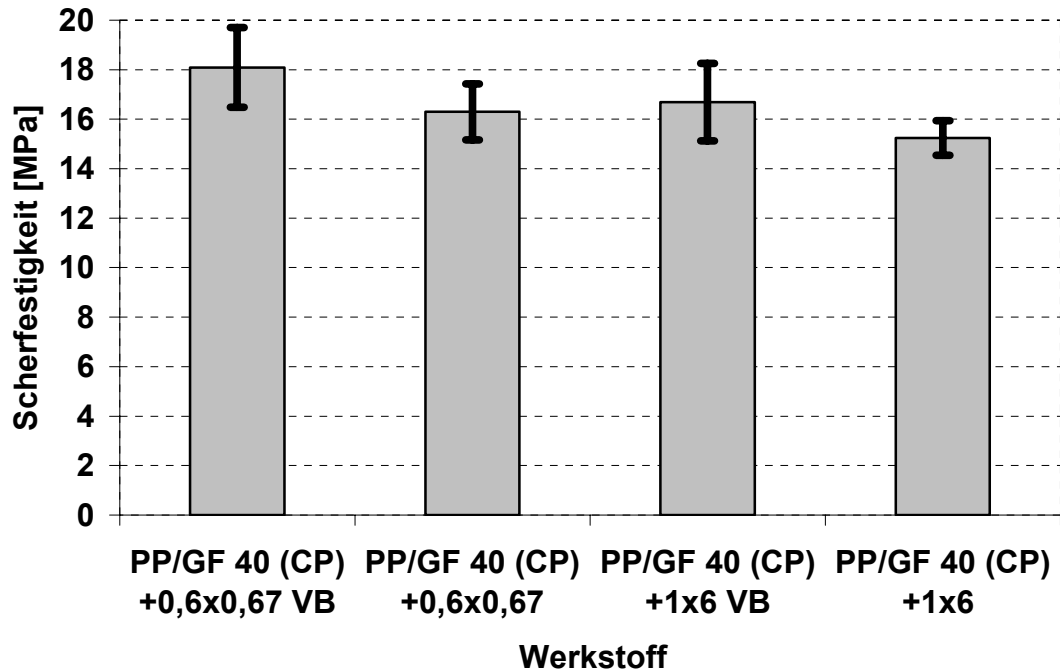


Bild 5.6: Interlaminare Scherfestigkeiten

So konnte die Scherfestigkeit bei Verwendung der Leinwandgewebeverstärkung durch das Druckluftstrahlen um 11 % erhöht werden. Weiterhin ist der Einfluss der Vorbehandlungsmaßnahmen, wie schon dargestellt wurde, im Fall der Schweißgitterverstärkung nicht so deutlich ausgeprägt. Dort beträgt die Erhöhung der Scherfestigkeit etwa 10 %, wobei die Scherfestigkeiten des PP/GF 40 (CP) mit der unbehandelten Gewebeverstärkung ähnliche Werte erzielen wie das LFT mit vorbehandeltem Schweißgitter, obwohl die Flächendichte des Textils geringer ist. Generell betrachtet, unterliegen die ermittelten Kennwerte wieder starken Streuungen.

6 Berechnung des Zug-E-Moduls von ETV-PP- und ETV-PP/GF-Werkstoffen mittels mikromechanischer Modelle

6.1 Modellierungsansätze und Simulation

Ausgehend von den im Kapitel 4.3.3 untersuchten 15 verschiedenen ETV-Verbundwerkstoffen wurden unter Ausnutzung vorhandener Symmetrien der textilen Verstärkungselemente mikromechanische Werkstoffmodelle abgeleitet. Bild 6.1 zeigt eine solche Ableitung eines ETV-Verbundmikromodells mit Leinwandverstärkung aus der Zugprüfkörpergeometrie.

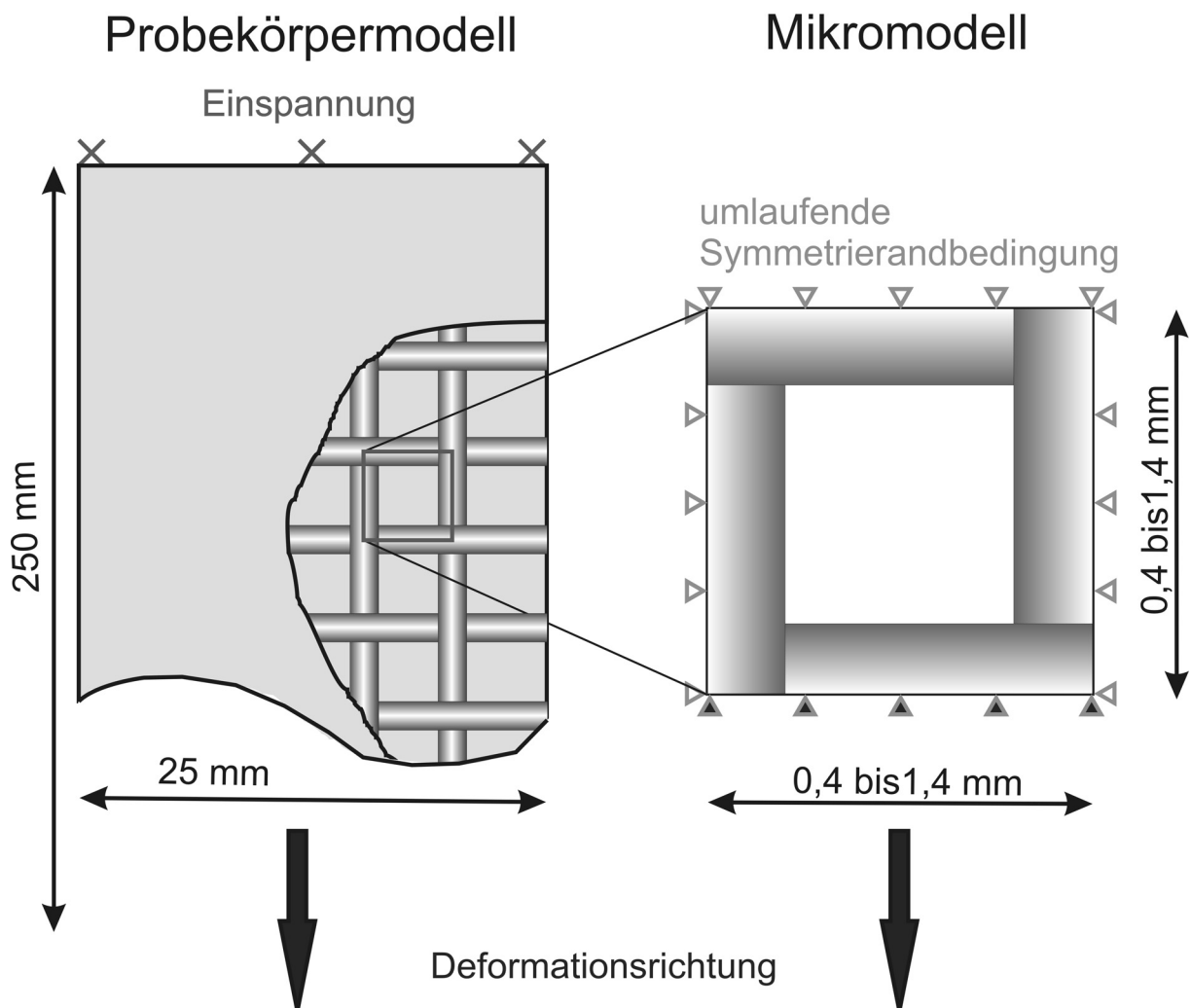


Bild 6.1: Ableitung eines Mikromodells mit Leinwandgewebeverstärkung

Die Mikromodellableitung der ETV-Werkstoffe mit Schweißgitterverstärkung ist ergänzend in Anhang A7 dargestellt.

Weiterhin sind in Bild 6.1 die wesentlichen Last- (Deformationsrichtung) und Randbedingungen des Probekörpers und des Mikromodells (Einspannung und Symmetrien) dargestellt.

Das Pre- und Postprocessing sowie die FE-Berechnung wurden mit dem Programmpaket ABAQUS durchgeführt. Hierzu wurden CAD-Mikromodelle in die CAE-Umgebung von ABAQUS importiert. Während des Preprocessings wurden auch die Materialkarten für die Edelstahltextilverstärkungen, die PP (CP)-Matrix bzw. die PP/GF 20 / 40 (CP)-Einbettungswerkstoffe generiert. Die Materialeigenschaften der Komponenten wurden experimentell in Zugversuchen bestimmt (s. Kapitel 4 und Tabelle 6.1).

Tabelle 6.1: Materialkennwerte für die Simulation

Werkstoff	Zug-E-Modul (isotrop)	Querkontraktionszahl (isotrop)
X5CrNi1810	200000 MPa	0,3
PP (CP)	1040 MPa	0,4
PP/GF 20 (CP)	3912 MPa	0,4
PP/GF 40 (CP)	6644 MPa	0,4

Bei den angegebenen Zug-E-Moduli der PP- bzw. PP/GF-Werkstoffe handelt es sich um die Werte in Plastifikatfließrichtung (0° - oder 1-Richtung).

Die CAD-Modelle wurden mit linearen Tetraederelementen vernetzt und mit den entsprechenden Symmetrierandbedingungen (Bild 6.2) versehen.

Als Verschiebungsrandbedingung wurde die im Versuch verwendete Grenzdehnung von 0,25 % zur Ermittlung des E-Moduls nach DIN EN ISO 527-4 definiert (Bild 6.2).

Im Weiteren erfolgte, entsprechend den Mikroskopieergebnissen aus Kapitel 4, keine Modellierung von Haftung zwischen Edelstahl und PP, d. h. mittels einer Kontaktbedingung (hard contact) wird eine Durchdringung verhindert, eine Relativbewegung zwischen Draht und angrenzender Matrix bleibt weiterhin möglich.

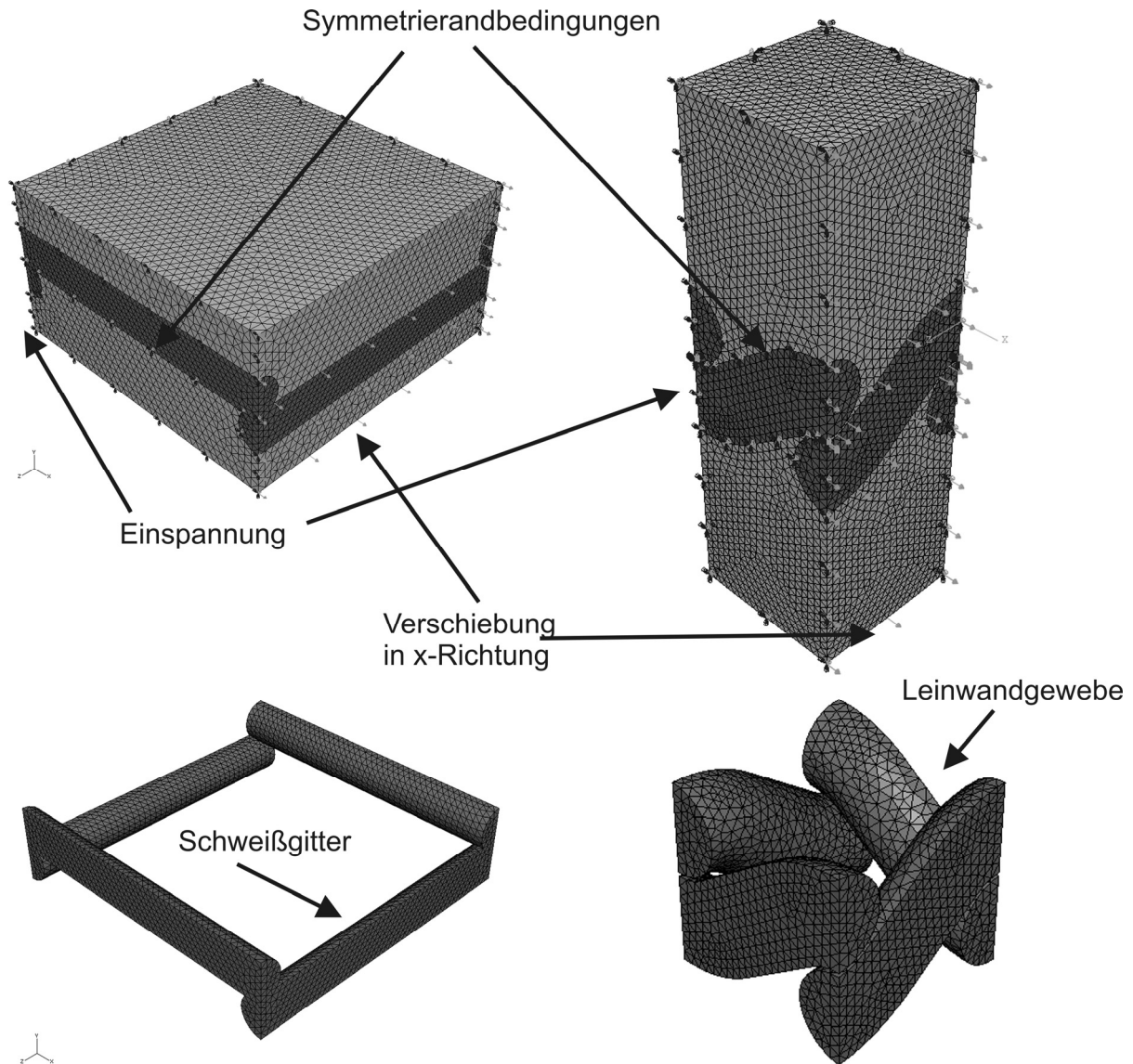


Bild 6.2: FE-Modelle mit Schweißgitter- (links) und Leinwandgewebeverstärkung (rechts) mit Last- und Randbedingungen (exemplarisch)

Abschließend ist noch festzustellen, dass bei Erstellung des FE-Werkstoffsystems eine Vielzahl von Vereinfachungen gegenüber dem realen Werkstoff vorgenommen wurden, um die Komplexität der Modelle deutlich reduzieren zu können:

- keine Berücksichtigung von fertigungsbedingten Eigenspannungen
- Drahtschädigungen durch den Webprozess bzw. Punktschweißen sind nicht berücksichtigt
- der Einfluss der z. T. lokal zulässigen erheblichen Fertigungstoleranzen [Nor06, Nor07] auf den Zug-E-Modul ist nicht untersucht worden

- es erfolgte keine Implementierung der Orthotropie des LFTs in die Materialkarten
- Streuungen in den Werkstoffeigenschaften wurden nicht berücksichtigt
- Berechnung des Zug-E-Moduls bei der 0,2x0,2-Körpergewebeverstärkung durch Leinwandgewebeersatzmodell
- Berücksichtigungen von Materialnichtlinearitäten erfolgten nicht

Die durchgeführten FEM-Simulationen lieferten letztendlich Ergebnisse in Form von Spannungs- und Dehnungsplots sowie Reaktionskräften in den Knoten der Einspannflächen. Mit Hilfe der Knotenreaktionskräfte konnten unter Nutzung einfacher mathematischer Zusammenhänge die Zug-E-Moduli der verschiedenen ETV-Verbunde berechnet werden. So konnte mit Gl. (6.1) aus den einzelnen Knotenkräften in die Beanspruchungsrichtung die Gesamtreaktionskraft in der Einspannfläche bestimmt werden.

$$R_{F1} = \sum_i R_{FK_i,1} \quad (6.1)$$

Mit: $R_{FK_i,1}$ = Reaktionskraft am i-ten Knoten in 1-Richtung (Belastungsrichtung)

R_{F1} = Gesamtreaktionskraft in der Einspannfläche in 1-Richtung

Mittels Gl. (6.2) erfolgte die Berechnung der Zug-E-Moduli (E_1) der ETV-Verbundwerkstoffe aus den Gesamtreaktionskräften.

$$E_1 = \frac{R_{F1}}{\frac{A_{R_{F1}}}{\frac{\Delta l_{MM}}{l_{0MM}}}} = \frac{\sigma_{R_{F1}}}{\varepsilon_{11MM}} = \frac{\sigma_{R_{F1}}}{0,0025} \quad (6.2)$$

Mit: $A_{R_{F1}}$ = Größe der Einspannfläche

l_{0MM} = Ausgangslänge des Mikromodells

Δl_{MM} = axiale Verlängerung des Mikromodells durch Zugbeanspruchung in 1-Richtung

ε_{11MM} = axiale Dehnung des Mikromodells in Belastungsrichtung (wurde mit 0,25 % als Verschiebungsrandbedingung an den Modellen aufgebracht)

$\sigma_{R_{F1}}$ = Reaktionsspannung in der Einspannung in 1-Richtung

Die berechneten und im Versuch bestimmten Zugsteifigkeiten werden im folgenden Kapitel 6.2 diskutiert.

6.2 Ergebnisse und Diskussion

Bild 6.3 zeigt einen grafischen Vergleich von experimentellen und numerisch ermittelten Zug-E-Moduli in die 1-Richtung (Fließ- und Beanspruchungsrichtung) der in Kapitel 4.3 untersuchten ETV-Werkstoffe.

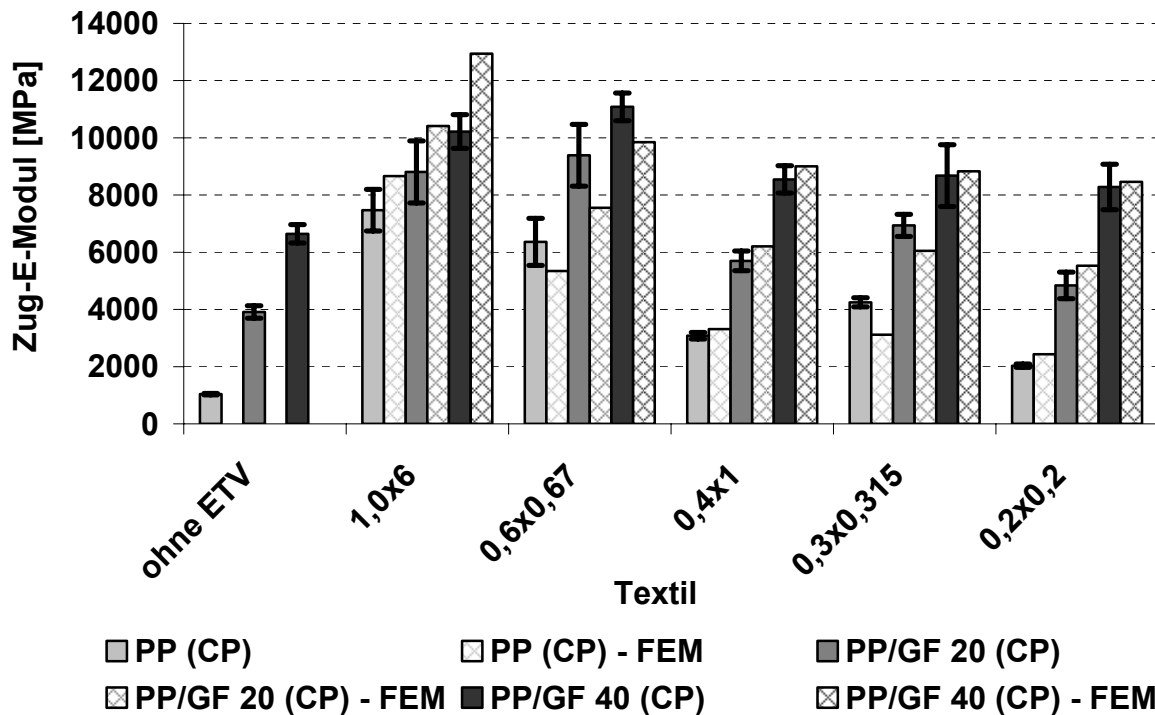


Bild 6.3: Vergleich von experimentell und numerisch ermittelten Zug-E-Moduli unterschiedlicher ETV-Werkstoffe

Relativ geringe Abweichungen (ca. 5 bis 9 %) zwischen den numerisch und experimentell bestimmten Zug-E-Moduli wurden bei den ETV-Verbunden mit 0,4x1-Verstärkungen festgestellt. Deshalb wird angenommen, dass nahezu keine geometrischen Abweichungen und somit keine signifikanten Unterschiede im Stahlvolumengehalt zwischen Probekörperwerkstoff und FE-Modell bestehen. Deutlichere

Abweichungen wurden für die anderen ETV-Werkstoffe verzeichnet. Die Abweichungen von numerischem zu experimentellem Zug-E-Modul liegen für diese Verbundwerkstoffe im Bereich von ca. -27 bis +27 %. Bei diesen Werkstoffen liegen mit hoher Wahrscheinlichkeit lokal größere geometrische Toleranzen im Verstärkungstextil vor, welche im FE-Modell nicht berücksichtigt worden sind [Nor06, Nor07]. Die Folge ist ein Stahldrahtvolumenanteilunterschied zwischen Probekörper und Mikromodell. Dies bedingt stärker abweichende Zug-E-Modulkennwerte zwischen Versuch und Simulation. Abschließend kann festgestellt werden, dass eine ausreichend genaue Vorausberechnung der Zug-E-Moduli von weiteren ETV-Werkstoffkonfigurationen mittels derartig stark vereinfachter Mikromodelle möglich ist.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Langfaserverstärkte Thermoplaste (LFT) haben sich aufgrund ihrer guten Leichtbaueigenschaften und großserientauglichen Verarbeitungsverfahren insbesondere in der Automobilindustrie bei semistrukturellen Anwendungen wie z.B. Unterböden, Frontends, Geräuschkapseln, Instrumententafelträgern usw. durchgesetzt. Bei Impact- und Crashbeanspruchung zeigen diese Verbundwerkstoffe ein sprödes Bruchverhalten, das Bauteil wird zu Bruchstücken fragmentiert und verliert seine strukturelle Integrität. Um eine Verbesserung der mechanischen Eigenschaften, insbesondere der Impact- und Crasheigenschaften, von langglasfaserverstärkten Thermoplasten (LFT) zu erreichen, werden diese Composites zusätzlich mit Edelstahltextilien verstärkt.

Die inhaltlichen Schwerpunkte der durchgeführten Untersuchungen lagen in der Herstellung, mechanischen Charakterisierung, Modellierung und Simulation dieser neuartigen edelstahltextilverstärkten Verbundwerkstoffe (ETV-Verbunde).

Im Rahmen der Untersuchungen wurde zuerst ein Verarbeitungsverfahren im Labormaßstab zur Herstellung von edelstahltextilverstärkten Polypropylen- (ETV-PP) und Langglasfaserthermoplastwerkstoffen (ETV-PP/GF) auf Basis von Polypropylenmatrizes erarbeitet. Dieses Herstellungsverfahren basiert auf einer Kombination von zwei bekannten FKV-Verarbeitungsverfahren (Fließpressen und Film-Stacking-Verfahren), wie es in der Zielsetzung der Arbeit gefordert wurde, um ein modulares Gesamtverfahren zu erhalten. Nach Einführung der zweistufigen Fertigungstechnik wurden ausgewählte Fertigungsparameter (Pressenschließgeschwindigkeit und Werkzeuginnendruck) variiert, um geeignete Parameter zur Verbesserung der Impact- und Energieabsorptionseigenschaften bei Crashbelastung dieser neuartigen Verbundwerkstoffe zu identifizieren. Hierbei wurde festgestellt, dass für ETV-PP-Werkstoffe nahezu keine Abhängigkeit von den variierten Fertigungsparametern besteht. Bei den untersuchten ETV-PP/GF-Verbunden wurde hingegen eine deutliche Abhängigkeit festgestellt. Zwei weitere wichtige Erkenntnisse sind, dass zum einen die Neigung zur Fragmentierung bei Impactbelastung von spröden PP-Matrixsystemen durch die Edelstahltextilverstärkung erheblich verringert und zum anderen die Energieaufnahme deutlich verbessert werden konnte. Neben der Bestimmung der Eigenschaften bei kurzzeitdynamischer Beanspruchung wurden auch

quasistatische Eigenschaften untersucht. Dabei wurde deutlich, dass eine Verstärkung mit Edelstahltextilien zu einer deutlichen Steigerung des Verbund-Zug-E-Moduls führte. Die Verbundzugfestigkeiten konnten für einige ETV-Werkstoffe geringfügig über das Niveau der unverstärkten Matrixwerkstoffe gesteigert werden. Oftmals zeigte die Variation der Fertigungsparameter im Falle der quasistatischen Eigenschaften auch keine eindeutige Abhängigkeit von der variierten Prozessgröße.

Auf Basis der empirisch bestimmten Herstellungsparameter zur Verbesserung des Impaktverhaltens wurde eine Fertigungsprozessanpassung und eine Materialparametervariation vorgenommen, d. h. verschiedene Matrixmaterialien (verschiedene Glasfasergewichtsanteile im PP) wurden mit unterschiedlichen textilen Edelstahlflächengebilden (unterschiedliche Bindungsarten, Drahtdurchmesser, Maschenweiten und Flächengewichte) kombiniert. Die Materialparametervariation lieferte als wesentliche Erkenntnis, dass bei einer Verstärkung von PP/GF 40 mit den Textilien mit den höchsten Flächengewichten absolut wie auch gewichtsspezifisch die besten Energieabsorptionseigenschaften aller untersuchten Werkstoffkombinationen erzielt werden konnten. Die ergänzend durchgeführten quasistatischen Zugversuche lieferten ähnliche Ergebnisse wie sie schon im Rahmen der Fertigungsparametervariation dargestellt wurden (Erhöhung des Zug-E-Moduls und in den meisten Fällen Reduktion der Zugfestigkeit).

Parallel zur mechanischen Charakterisierung wurden an Zugbruchflächen Struktur-Eigenschafts-Analysen mittels Licht- und Rasterelektronenmikroskopie (REM) durchgeführt. Hierbei zeigte sich, dass zwischen Polypropylen und Glasfasern eine nicht optimale Anhaftung vorliegt. Weiterhin wurde festgestellt, dass eine Stahldraht/PP-Anbindung nahezu nicht existent ist.

Aufgrund dessen wurde, basierend auf Erkenntnissen aus der Füge- und Klebtechnik, eine mechanische Vorbehandlung mittels Druckluftstrahlen an den Verstärkungselementen vorgenommen, um die Haftung zu verbessern. Für diese Untersuchungen wurden die zwei ETV-Verbundwerkstoffe mit der (Kapitel 4) höchsten spezifischen Impaktenergieabsorption ausgewählt (PP/GF 40-1x6 und PP/GF 40-0,6x0,67). Anschließend wurden diese ETV-Werkstoffe mit un- und vorbehandelten Verstärkungstextilien einer weiterführenden mechanischen Charakterisierung unterzogen, d. h. es wurden quasistatische Zug- und Kurzbiegeversuche zur Bestimmung

der interlaminaren Scherfestigkeit durchgeführt. Die weiterführende mechanische Charakterisierung lieferte als wesentliche Ergebnisse, dass sich mit Hilfe der Textilverbehandlung die Zugsteifigkeit und vor allem die Zugfestigkeit und die interlaminare Scherfestigkeit von edelstahltextilverstärkten Verbundwerkstoffen signifikant steigern lässt. Die durch das Druckluftstrahlen aufgerauten Drahtoberflächen führen zu einer besseren Haftung von PP und Draht und somit zu einer Erhöhung der mechanischen Kennwerte.

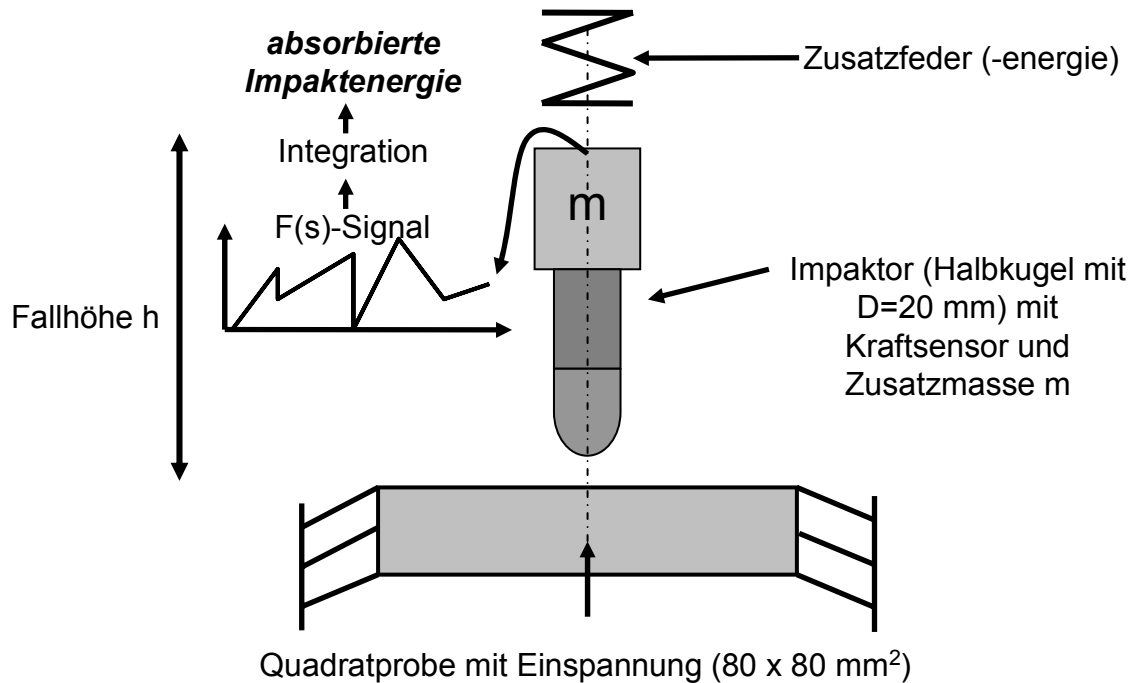
Die im Rahmen der Untersuchungen aufgezeigten Ansätze zur Modellierung und Simulation des Zug-E-Moduls der im Kapitel 4.3 untersuchten ETV-Verbunde tragen zum besseren Verständnis der Verstärkungs- und Deformationsmechanismen bei. Die Simulationsergebnisse wurden mittels experimenteller Daten verifiziert und validiert.

In weiterführenden Forschungsvorhaben sollte das erarbeitete Herstellungsverfahren von der labormaßstäblichen Fertigung in ein Serienverfahren überführt werden, um es für Anwendungen zum Beispiel in der Automobilherstellung wirtschaftlich zu gestalten. Dies könnte über eine Verkürzung der zweistufigen Prozesskette auf eine Stufe gelingen, indem die Matrix in-situ mit dem Textil zum Verbund verpresst wird.

Weiterhin müssen die Erkenntnisse über das mechanische Verhalten und das Versagensverhalten deutlich erweitert werden. Dies kann mittels weiterer statischer und dynamischer Versuche, wie zum Beispiel Druck, Schub, Biegung oder auch DMTA geschehen.

Die Erweiterung der experimentellen Datenbasis ist notwendig, um die Modellierung und Simulation solcher neuartiger Werkstoffe weiterzuentwickeln, zum Beispiel durch Implementierung von Schädigung, um damit prognosefähige Simulationswerkzeuge für die Bauteilentwicklung zur Verfügung zu stellen.

8 Anhang



A 0: Funktionsprinzip der Durchstoßprüfung [MVM02]

C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]	Ni [%]	N
$\leq 0,07$	$\leq 1,00$	$\leq 2,00$	$\leq 0,045$	$\leq 0,0155$	17,5 - 19,5	8,00 - 10,5	$\leq 0,11$
Härte [HB]		Zugfestigkeit [N/mm²]			Dichte [kg/dm³]		
195 – 215		500 – 700			7,85		

A 1: Chemische Zusammensetzung und physikalische Eigenschaften von X5CrNi1810 [Int04]

Typical Properties	Method	Value	Unit
Physical			
Density	ISO 1183	0.91	g/cm ³
Melt flow rate (MFR) (230°C/2.16Kg)	ISO 1133	120	g/10 min
Mechanical			
Tensile Modulus (1 mm/min in/min)	ISO 527-1, -2	1450	MPa
Tensile Stress at Yield (v = 50 mm/min in/min)	ISO 527-1, -2	35	MPa
Tensile Strain at Break (50 in/min)	ISO 527-1, -2	20	%
Tensile Strain at Yield (v = 50 mm/min in/min)	ISO 527-1, -2	7	%
Impact			
Charpy unnotched impact strength (23 °C)	ISO 179	75	kJ/m ²
Notched izod impact strength (23 °C)	ISO 180	3.0	kJ/m ²
Thermal			
Melting temperature		163	°C
Heat deflection temperature B (0.45 MPa) Unannealed	ISO 75B-1, -2	90	°C
Vicat softening temperature (A50 (50°C/h 10N) °C)	ISO 306	154	°C

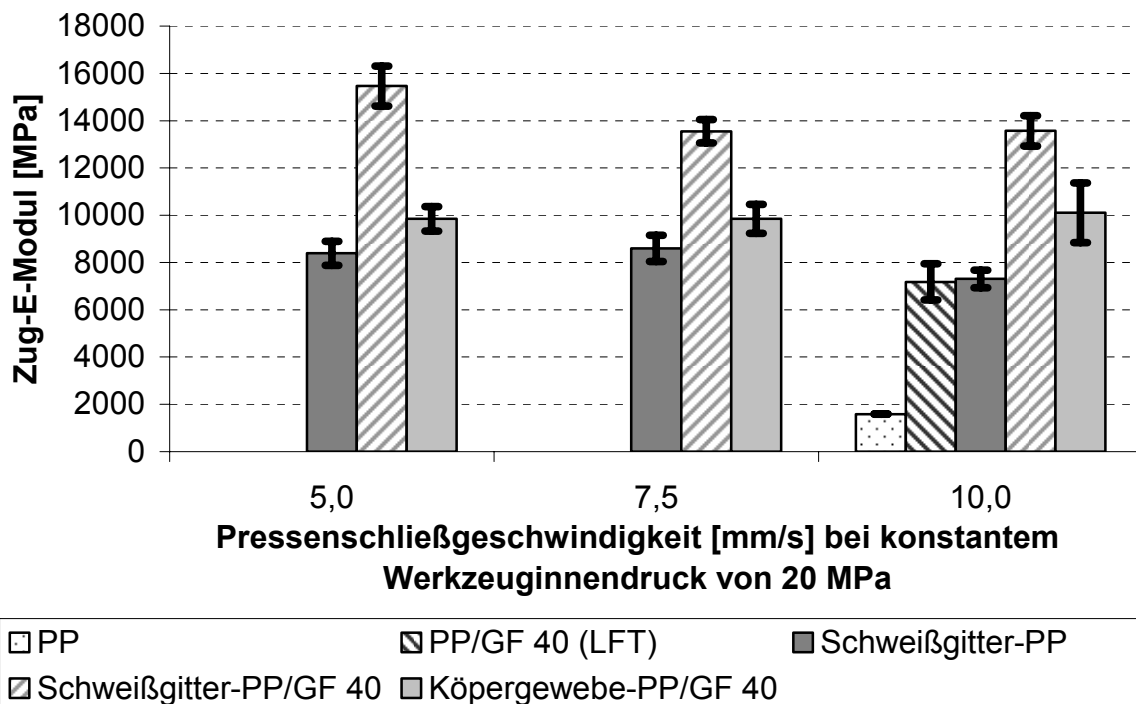
A 2: Eigenschaften von Moplen HP 500V [Int05]

Typical Properties	Method	Value	Unit
Physical			
Density	ISO 1183	0.900	g/cm ³
Melt flow rate (MFR) (230°C/2.16Kg)	ISO 1133	4	g/10 min
Melt volume flow rate (230°C/2.16Kg)	ISO 1133	5.4	cm ³ /10min
Mechanical			
Tensile Modulus	ISO 527-1, -2	1100	MPa
Tensile Stress at Yield	ISO 527-1, -2	20	MPa
Tensile Strain at Break	ISO 527-1, -2	>50	%
Tensile Strain at Yield	ISO 527-1, -2	5	%
Impact			
Charpy unnotched impact strength (23 °C, Type 1, Edgewise)	ISO 179	No Break	kJ/m ²
(0 °C, Type 1, Edgewise)		No Break	kJ/m ²
(-20 °C, Type 1, Edgewise)		230	kJ/m ²
Charpy notched impact strength (23 °C, Type 1, Edgewise, Notch A)	ISO 179	66	kJ/m ²
(0 °C, Type 1, Edgewise, Notch A)		13	kJ/m ²
(-20 °C, Type 1, Edgewise, Notch A)		7	kJ/m ²
Ductile/Brittle transition temperature	ISO 6603-2	-57	°C
Thermal			
Heat deflection temperature B (0.45 MPa) Unannealed	ISO 75B-1, -2	85	°C
Vicat softening temperature (A50 (50°C/h 10N))	ISO 306	140	°C
(B50 (50°C/h 50N))		52	°C

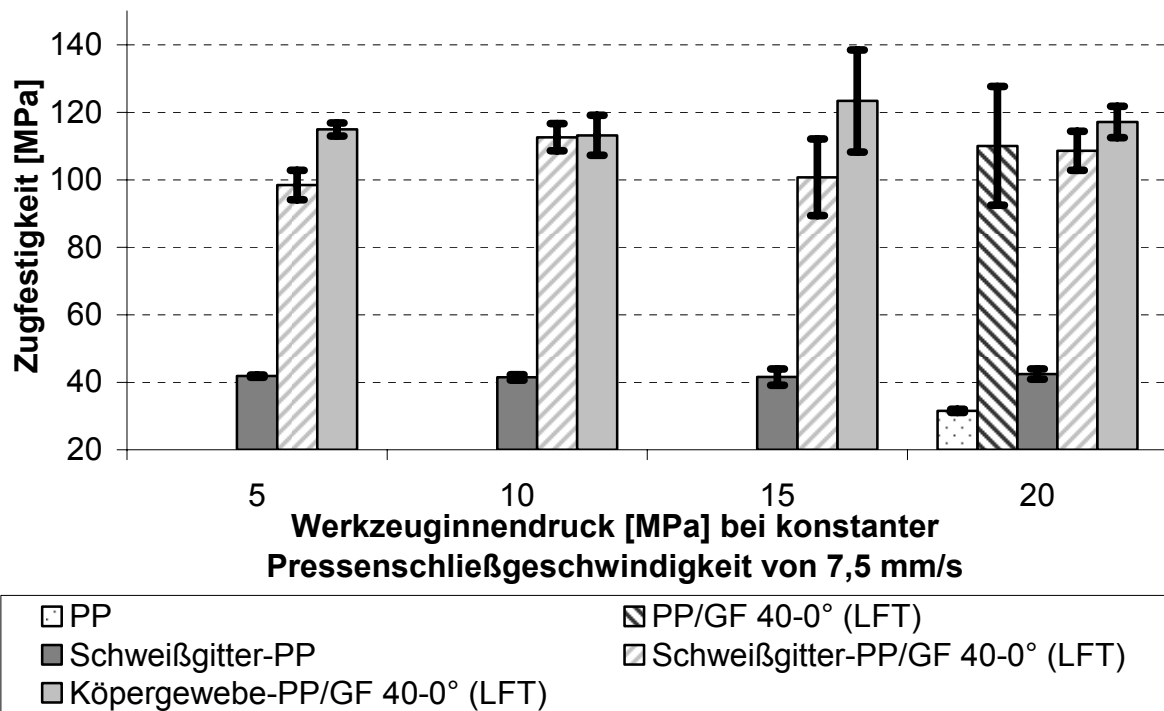
A 3: Eigenschaften von Moplen EP 340K (Auszug) [Int06]

Versuchsdaten							
Pressversuche vom:				Projekt:		Versuchsmaterial:	
2006 - 2008				A.Meichsner		PP: MOPLEN EP 340K/MOPLEN HP 500V	
				Proj.Nr.:		PP/GF: FACTOR ADD PP-LGF 60/30 N25	
Daten Dieffenbacherpresse							
Fahrprogramm: Tauchkantenwerkzeug				Werkzeug: Tauchkantenwerkzeug			
Presskraft: 6000 kN				WKz. Temperaturen			
Weg / Schließgeschwindigkeit		25 mm	30 mm/s	oben		70/75	Grad C
		15 mm	15 mm/s	unten		80/85	Grad C
		10 mm	10 mm/s				
Daten Plastifizierer KMH60							
Temperaturen: "Trichter" Zone 6	195	Grad C					
Zone 5	205	Grad C					
Zone 4	205	Grad C					
Zone 3	205	Grad C					
Zone 2	205	Grad C					
"Kopf" Zone 1	230	Grad C					
Plastifikatlänge lt. Skala:	150/110	mm					
Staudruck:	50	bar					
Drehzahl Schnecke:	10	U/min					
Massetemperatur:	245-250/220	Grad C					
Düsen Durchmesser	55	mm					
Bemerkungen:							
- keine							

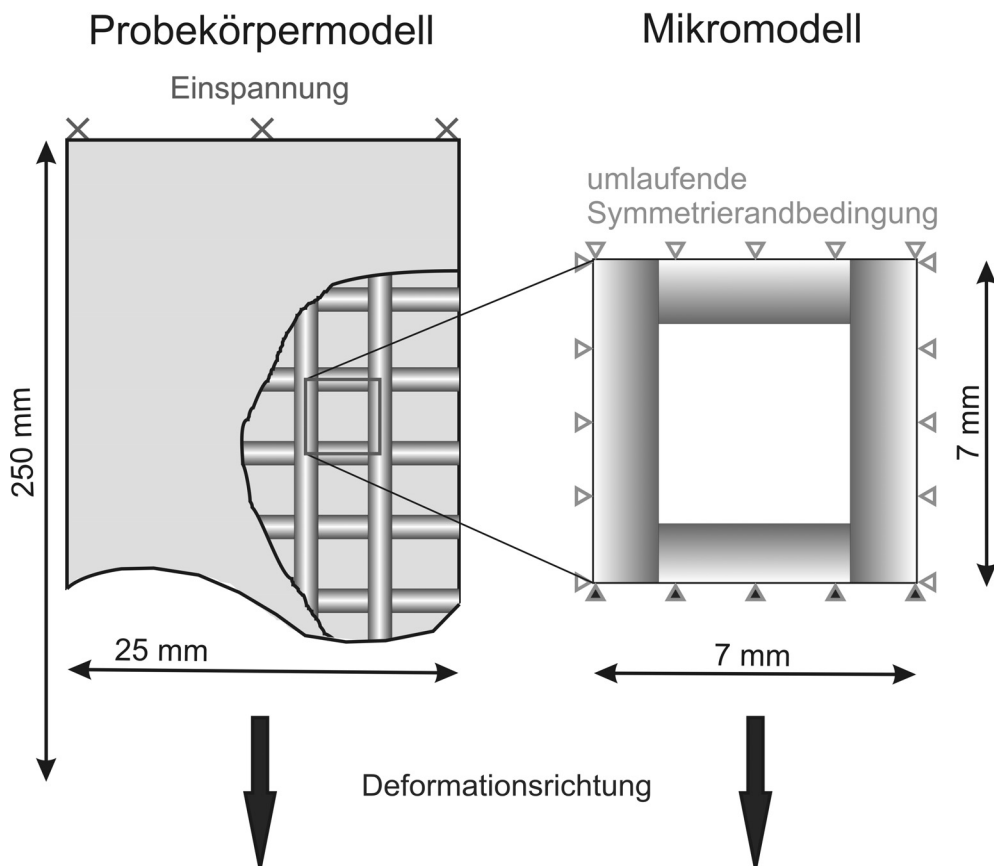
A 4: Herstellungsprotokoll der PP- und LFT-Plastifikate



A 5: Zug-E-Modul als Funktion der variierten Pressenschließgeschwindigkeit



A 6: Zugfestigkeit als Funktion des variierten Werkzeuginnendrucks



A 7: Ableitung eines Mikromodells mit Schweißgitterverstärkung

9 Literaturverzeichnis

- [AB01] Ahmed, T.; Bersee, H.: Metal Mesh Layers for Improving the Impact Behavior of Polymer Composites. In: Proceedings of the 28th International Conference of the Society for the Advancement of Materials and Process Engineering, Paris, 02nd – 04th April 2007. Paris, France: 2007, S. 605-610
- [Ali01] Ali, W. Y.: Frictional Behaviour of Composite Materials. Metall - Internationale Zeitschrift für Technik und Wirtschaft, Bd. 51, Heft 6 (1997), S. 324-329
- [BE01] Brockmann, W.; Emrich, S.: Wie lange halten vorbehandelte Aluminiumklebungen? (Teil 2). Adhäsion, 7-8 (2002), S. 34-41
- [BEB01] Borth, O.; Eckardt, J.; Busch, M.: Praxisgerechte Werkstoffcharakteristik für die Auslegung von Bauteilen aus Langfaser-Thermoplasten. Halle, Fraunhofer Institut für Werkstoffmechanik, S. 1-8
- [BGK01] Brockmann, W. et al.: Klebtechnik, Klebstoffe, Anwendungen und Verfahren. Weinheim: Wiley-VCH, 2005
- [BH01] Brockmann, W.; Hennemann, O. D.: Eine andere Modellvorstellung über die Adhäsion in Polymer / Metall-Verbunden. Adhäsion, 11 (1989), S. 33-35
- [Bis01] Bischof, C.: ND-Plasmatechnik im Umfeld der Haftungsproblematik bei Metall-Polymer-Verbunden. Mat.-wiss. u. Werkstofftech., 24 (1993), S. 33-41
- [BJ01] Bowen, S.T.; Johnson, P.H.: Langfaserverstärkte Thermoplaste für das Spritzgießverfahren. In: Tagungshandbuch zur 23. AVK-Tagung, Mainz, 1990, S. A15-1-A15-6
- [BM01] Brast, K.; Michaeli, W.: New Methods of Compression Moulding – Glass Reinforced Thermoplastics (GRT) Offer New Concepts in Automotive Fields. ISATA, International Symposium on Automotive Technology & Automation, Bd. 31 (1998), S. 385-401

- [BM02] Brast, K.; Michaeli, W.: The Direct Strand-Deposition Process – New Methods in Compression Moulding of Long-Fiber Reinforced Thermoplastics. In: Proceedings of the 45th International SAMPE Symposium, Long Beach, CA, USA, 2000, S. 2357-2368
- [Bra01] Brast, K.: Verarbeitung von langfaserverstärkten Thermoplasten im direkten Plastifizier-/Pressverfahren. Aachen, RWTH, Institut für Kunststoffverarbeitung, Diss., 2001
- [Bro01] Brockmann, W.: Durability of Adhesion Between Metals and Polymers. J. Adhesion, Vol. 29 (1989), S. 53-61
- [BS01] Bargel, H.-J.; Schulze, G (Hrsg.): Werkstoffkunde. 7., Aufl., Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 2000
- [CC01] Carrillo, J. G.; Cantwell, W. J.: Scaling Effects in the Low Velocity Impact Response of Fiber-Metal Laminates. Journal of Reinforced Plastics and Composites, Vol. 27, No. 9 (2008), S. 893-907
- [CKH01] Chan, C.-M.; Ko, T.-M.; Hiraoka, H.: Polymer Surface Modification by Plasmas and Photons. Surface Science Reports, 24 (1996), S. 1-54
- [CMX01] Comyn, J. et al.: Plasma-treatment of polyetheretherketone (PEEK) for adhesive bonding. Int. J. Adhesion and Adhesives, Vol. 16, No. 2 (1996), S. 97-104
- [CRG01] Chaudhari, R. et al.: KTL-fähige langfaserverstärkte Thermoplaste (LFT) für Strukturanwendungen im Automobil. In: Handbuch zur 11. Internationalen AVK-Tagung, Essen, 22.-23. September, 2008. Essen: 2008, B4, (Daten-CD, B4)
- [Den01] Denisov, E. T.: The Role and Reactions of Nitroxyl Radicals in Hindered Piperidine Light Stabilization. Poly. Deg. Stab., Vol. 34, No. 1-3 (1991), S. 325-332
- [DMM01] D'Orazio, L. et al.: Polypropylene/Ethylene-Co-Propylene Blends: Influence of Molecular Structure and Composition of EPR on Melt Rheology, Morphology and Impact Properties of Injection Moulded Samples. Polymer, Vol. 32, No. 7 (1991), S. 1186-1194

- [EBB01] Eckardt, J. et al.: An improved characterisation of long-fibre thermoplastics for numerical simulation of components. Halle, Fraunhofer Institut für Werkstoffmechanik, S. 1-4
- [Ede01] Edelmann, K.: Prozessintegrierte Analyse des Fließverhaltens von faserverstärkten thermoplastischen Pressmassen für die Serienfertigung. Kaiserslautern, Technische Universität, IVW GmbH, Diss., 2001
- [Erk01] Erkendirici, Ö. F. et al.: Fatigue and Fracture Behavior of Woven Steel Reinforced Polyethylene Composite. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 27 (2008), S. 1545-1557
- [Ewe01] Ewen, J. A.: Mechanisms of Stereochemical Control in Propylene Polymerizations with Soluble Group 4B Metallocene/Methylalumoxane Catalysts. *J. Am. Chem. Soc.*, Vol. 106, No. 21 (1984), S. 6355-6364
- [GBN01] Galli, P.; Barbè, P. C.; Noristi, L.: High Yield Catalysts in Olefin Polymerization. General Outlook on Theoretical Aspects and Industrial Uses. *Angew. Makromol. Chem.*, Vol. 120, No. 1 (1984), S. 73-90
- [GGP01] González, A.; Graciani, E.; Paris, F.: Prediction of In-Plane Stiffness Properties of Non-Crimp Fabric Laminates by Means of 3D Finite Element Analysis. *Composites Science and Technology*, Bd. 68, Heft 1 (2008), S. 121-131
- [GH01] Galli, P.; Haylock, J. C.: Continuing Initiator System Developments Provide a New Horizon for Polyolefin Quality and Properties. *Prog. Polym. Sci.*, Vol. 16, No. 2-3 (1991), S. 443-462
- [GKD01] GKD-Gebr. Kufferath AG (Blank, R.): Persönliche Mitteilung. GKD-Gebr. Kufferath AG, Business Unit Solid Weave, 20. April 2009
- [GMM01] Greco, R. et al.: Polyolefin Blends: 2. Effect of EPR Composition on Structure, Morphology and Mechanical Properties of iPP/EPR Alloys. *Polymer*, Vol. 28, No. 11 (1987), S. 1929-1936
- [Gob01] Gobrecht, J.: *Werkstofftechnik Metalle*. München, Wien: Oldenbourg-Verlag, 2001

- [Goo01] Goodall, B. L.: Transition Metal Catalyzed Polymerization, Alkenes and Dienes. Part A, Quirk, R. P., Ed., Harwood Academic Publishers, New York, 1983
- [Got01] Gottstein, G.: Physikalische Grundlagen der Materialkunde. 2., Aufl., Berlin-Heidelberg-New York: Springer-Verlag, 2001
- [Gri01] Gries, T.: Vorlesung FVW I – Werkstoffe I, Vorlesungsskript. Aachen, RWTH, Institut für Textiltechnik (ITA)
- [GS01] Grellmann, W.; Seidler, S. (Hrsg.): Kunststoffprüfung. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 2005
- [Har01] Harmia, T.: Aufbau, mechanische Eigenschaften und Bruchverhalten von unverstärkten, kurzfaserverstärkten und diskontinuierlich langfaserverstärkten Polymeren und Blends. Kaiserslautern, Technische Universität, IVW GmbH, Diss., 1996
- [Hod01] Hodgeman, D. K. C.: Developments in Polymer Degradation – 4, Grassie, N. (Ed.), Applied Science Publishers, 1982
- [Hor01] Hornbogen, E.: Werkstoffe, Aufbau und Eigenschaften. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1973
- [HT01] Huang, H.; Talreja, R.: Effects of Void Geometry on Elastic Properties of Unidirectional Fiber Reinforced Composites. Composites Science and Technology, Vol. 65, No. 13 (2005), S. 1964-1981
- [Int01] FU Berlin, Fakultät für Chemie (PP): Kunststoffe zum Kennenlernen: Polypropylen, <http://www.chemie.fuberlin.de/chemistry/kunststoffe/polypropylen.htm> (09.01.2009)
- [Int02] Universität Duisburg-Essen (Haftung): Kapitel 1: Einführung in die Klebetechnik, <http://duepublico.uni-duisburgessen.de/servlets/DerivateServlet/Derivate-5206/Kap1.pdf> (17.01.2009)
- [Int03] Fraunhofer ICT (Hrsg.) (Faserverbundwerkstoffe): Faserverbundwerkstoffe, http://www.ict.fraunhofer.de/fhg/Images/faser_deutsch__tcm137-89466.pdf (22.01.2009)

- [Int04] Abrams, Premium Stahl (Hrsg.) (X5CrNi 1810): Datenblatt zu X5CrNi 1810, <http://www.premium-stahl.de/1.4301.pdf> (26.01.2009)
- [Int05] Lyondellbasell (Hrsg.) (PP): Datenblatt zu Moplen HP 500V, <http://www.basell.de/portal/binary/com.vignette.vps.basell.productgrade.ProductGradeFileDisplay?id=815884b40c337010VgnVCM100000646f3c14RCRD&type=iso> (29.01.2009)
- [Int06] Lyondellbasell (Hrsg.) (PP): Datenblatt zu Moplen EP 340K, <http://polymers.lyondellbasell.com/portal/binary/com.vignette.vps.basell.productgrade.ProductGradeFileDisplay?id=6dee2c2fe6337010VgnVCM100000646f3c14RCRD&type=iso> (29.01.2009)
- [Int07] Bayerisches Online-Materialinformationssystem M-Line 2 (Hrsg.) (X5CrNi1810), <http://www.format.mwn.de/Werkstoffe/werkMechanischDetails.do;jsessionid=C163ABD0B356224978E01ADF52E73489?werkid=2844> (29.01.2009)
- [IS01] Ilchner, B.; Singer, R. F.: Werkstoffwissenschaften und Fertigungstechnik, Eigenschaften, Vorgänge und Technologien. 3., Aufl., Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 2002
- [JSH01] Jansen, I. et al.: Aluminium Pretreatment and the Properties of Adhesively Bonded Joints. *Macromol. Symp.*, Vol. 164, No. 1 (2001), S. 465-478
- [JUV01] Jang, B. Z.; Uhlmann D. R.; Van der Sande, J. B.: Rubber-Toughening in Polypropylene. *Appl. Polym. Sci.*, Vol. 30, No. 6 (1985), S. 2485-2504
- [Kap01] Kapfer, K.: Compounding on Co-rotating Twin Screws: New Developments. In: *Proceedings WorldCompounding Congress WCC 2000*, Kapitel Compounding Technology. Neuss/Düsseldorf, 2000
- [Kar01] Karger-Kocsis, J. (Ed.): *Polypropylene, An A-Z Reference*, Dordrecht-Boston-London: Kluwer Academic Publishers, 1999
- [Kar02] Karger-Kocsis, J. (Ed.): *Polypropylene. Structure, Blends and Composites*. London: Chapman and Hall, 1995

- [KDO01] van Koert et al.: An Upgraded GMT-Material for Energy Absorbing Structures. In: Handbuch zur 11. Internationalen AVK-Tagung, Essen, 22.-23. September, 2008. Essen: 2008, B2/1, (Daten-CD, B2)
- [KHT01] Krause, W. et al.: LFT-D – A Process Technology for Large Scale Production of Fiber Reinforced Thermoplastic Components. Journal of Thermoplastic Composite Materials, Vol. 16 (2003), S. 289-302
- [KKS01] Karger-Kocsis, J. et al.: Morphological Study on the Effect of Elastomeric Impact Modifiers in Polypropylene Systems. Polymer, Vol. 20, No. 1 (1979), S. 37-43
- [KKW01] Kinloch, A. J.; Kodokian, G. K. A.; Watts, J. F.: Relationships Between the Surface Free Energies and Surface Chemical Compositions of Thermoplastic Fibre Composites and Adhesive Joint Strengths. Journal of Materials Science Letters, Vol. 10, No. 14 (1991), S. 815-818
- [LC01] Lin, L.; Chung, D. D. L.: Electrical and Mechanical Properties of Electrically Conductive Polyethersulfone Composites. Composites, Bd. 25, Heft 3 (1994), S. 215-224
- [Lom01] Lomov, S. V. et al.: FE Simulations of Textile Composites on Unit Cell Level: Validation with Full-Field Strain Measurements. In: SAMPE EUROPE, International Conference, Paris, 2005. Paris, France: 2005, S. 28-33
- [Lua01] Lua, J.: Thermal-Mechanical Cell Model for Unbalanced Plain Weave Woven Fabric Composites. Composites, Part A, 38 (2007), S. 1019-1037
- [Lüc01] Lücke, A.: Spezial Compounds: Neuentwicklungen und Märkte. Kels-terbach, 1997, Teil C
- [Mic01] Michaeli, W.: Einführung in die Kunststoffverarbeitung. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 1992
- [Mie01] Mier, N.: Persönliche Mitteilung. Haver & Boecker OHG, Drahtweberei, Vertrieb Inland, 04. Februar 2009

- [MM01] Meichsner, A.; Maier, M.: Optimierung des Herstellungsprozesses von metallfaserverstärkten Kunststoffen (MFK). In: Technomer 2007 - Fachbeiträge, Chemnitz, 15.-17. November, 2007. Chemnitz: 2007, S. 39, (Daten-CD, FVV5)
- [Moo01] Moore, E. P. Jr., (Ed.): Polypropylene Handbook, Munich-Vienna-New York: Hanser Publishers, 1996
- [MS01] Malke, R.; Schmitt-Thomas, K. G.: Verbesserung der elektrischen und thermischen Leitfähigkeit bei kurzfaserverstärkten Thermoplasten. Düsseldorf: VDI-Verlag, VDI-Berichte, Bd. 1151, 1995, S. 545-548
- [MVM01] Meichsner, A.; Voll, N.; Maier, M.: Innovative edelstahltextilverstärkte Verbundwerkstoffe – Herstellung, Charakterisierung und Simulation - . In: Handbuch zur 11. Internationalen AVK-Tagung, Essen, 22.-23. September, 2008. Essen: 2008, B3/1, (Daten-CD, B3)
- [MVM02] Meichsner, A.; Voll, N.; Maier, M.: Experimentelle und numerische Untersuchung des Deformations- und Bruchverhaltens von edelstahltextilverstärkten Kunststoffen und LFT-Werkstoffen. Zeitschrift Kunststofftechnik, Journal of Plastics Technology, Vol. 5, Nr. 1 (2009), S. 48-70
- [Neb01] Nebel, T.: Verformungsverhalten und Mikrostruktur zyklisch beanspruchter metastabiler austenitischer Stähle. Kaiserslautern, Technische Universität, Lehrstuhl für Werkstoffkunde, Diss., 2002
- [NN01] N. N.: Langfaserverstärkte Polymere, Celstran, Compel, Fiberod. Produktinformation der Firma Ticona GmbH, Frankfurt, 1998
- [NN02] N. N.: Long glass fiber thermoplastics. Material classification and characterisation. http://www.eatc-online.org/media/schemme-material_classification.pdf (06.09.2009)
- [NN03] Haver & Boecker Drahtweberei und Maschinenfabrik: Drahtgewebe – Terminologie, Webarten und Maschenformen, Information. Oelde, 2006 – Firmenschrift
- [Nor01] Norm DIN EN 10002 Teil 1 12.01
- [Nor02] Norm DIN EN ISO 13934 Teil 1 04.99

- [Nor03] Norm DIN EN ISO 6603 Teil 2 04.02
- [Nor04] Norm DIN EN ISO 527 Teil 4 04.97
- [Nor05] Norm DIN EN 2563 03.97
- [Nor06] Norm DIN ISO 9044 09.01
- [Nor07] Norm DIN ISO 4782 10.93
- [NP01] Natta, G.; Pasquon, I.: The Kinetics of the Stereospecific Polymerization of α -Olefins. Adv. Catal., Vol. 11 (1959), S. 1-66
- [NPZ01] Natta, G. et al.: Dependence of the Melting Point of Isotactic Polypropylenes on Their Molecular Weight and Degree of Stereospecificity of Different Catalytic Systems. Makromol. Chem., Vol. 70, No. 1 (1964), S. 191-205
- [Oel01] Oelgarth, A.: Analyse und Charakterisierung des Fließverhaltens langfaserverstärkter Pressmassen. Aachen, RWTH, Diss., 1997
- [Pos01] Pospisil, J.: Mechanistic Action of Phenolic Antioxidants in Polymers - a Review. Poly. Deg. Stab., Vol. 20, No. 3-4 (1988), S. 181-202
- [PRH01] Pflug, G.; Reinemann, S.; Hungsberg, A.; Gruetzmann, D.: Verbesserte elektromagnetische Abschirmung elektrisch leitfähiger Kunststoffverbunde. Gummi Fasern Kunststoffe, Bd. 58, Heft 8 (2005), S. 505-513
- [RHE01] Radtke, A.; Henning, F.; Eyerer, P.: Modellierung und Charakterisierung von LFT-D-Strukturen mit lokalen Verstärkungen. Pfinztal-Berghausen, Fraunhofer Institut für Chemische Technologie
- [RK01] Reyes, G.; Kang, H.: Mechanical Behavior of Lightweight Thermoplastic Fiber-Metal Laminates. Journal of Materials Processing Technology, Bd. 186, Heft 1-3 (2007), S. 284-290
- [RM01] Roos, E.; Maile, K.: Werkstoffkunde für Ingenieure. 2., Aufl., Berlin-Heidelberg-New York: Springer-Verlag, 2005
- [Ros01] Rosso, P.: Erfassung und Bewertung von Grenzschichteffekten in neuartigen kohlenstofffaserverstärkten Polymeren. Kaiserslautern: Technische Universität, Fakultät für Maschinenbau, IVW GmbH, Diss., 2005

- [Rot01] Roth, S.: Spritzgegossene Abschirmgehäuse aus stahlfasergefüllten Thermoplasten – Materialeigenschaften, Verarbeitung und Gestaltung. Chemnitz: Technische Universität, Fakultät für Maschinenbau, Diss., 2007
- [RRS01] Reichhold, J.; Rüegg, A.; Schijve, W.: Langfaserverstärkte Thermoplaste (LFT) –Eigenschaften richtig charakterisiert. 10. Internationale AVK-Tagung, Tagungsband, (2007), A11
- [RSS01] Renz, R.; Stelzer, G.; Szymikowski, R.: Untersuchungen zum mechanischen Verhalten von Direkt-LFT. 7. Internationale AVK-Tagung, Tagungsband, (2004), A14
- [RTD01] Ramani, K. et al.: Thermoplastic Bonding for Structural Applications: “The Role of Processing”. In: Proceedings of ICCM-10, Volume III: Processing and Manufacturing, Whistler, B. C., Canada, August 1995. Whistler: o. V., 1995
- [Sch01] Schemme, M.: Verfahrens- und Anwendungstechnik langfaserverstärkter Thermoplaste (LFT). Würzburg, Fachtagung „Langfaserverstärkte Thermoplaste in der Automobilindustrie“, 08./09.12.2004
- [Sch02] Schüller, T.: Entwurf und Optimierung neuer Versuchsanordnungen zur Charakterisierung der Haftung an Grenzflächen. Kaiserslautern, Technische Universität, IVW GmbH, Diss., 2004
- [Sch03] Schatt, W. (Hrsg.): Werkstoffe des Maschinen-, Anlagen- und Apparatebaues. 4., Aufl., Leipzig: Dt. Verl. für Grundstoffindustrie, 1991
- [SE01] Steinbichler, G.; Egger, P.: Fibernelt, Verarbeitung von Langfaserthermoplasten, Technische Information, TB-E65-d-08/2000, Engel Vertriebsgesellschaft m. b. H.. Schwertberg, Austria, 2000 - Firmenschrift
- [Sei01] Seidel, W.: Werkstofftechnik, Werkstoffe-Eigenschaften-Prüfung-Anwendung. 7., Aufl., München, Wien: Carl Hanser Verlag, 2007

- [SFR01] Schlarb, A. K.; Floeck, M.; Rosso, P.: Steel Fiber Reinforced Polypropylene. Part 1: On the Influence of Maleic Anhydride on the Fiber/Matrix-Adhesion. Zeitschrift Kunststofftechnik / Journal of Plastics Technology, Vol. 2, No. 6 (2006), S. 1-13
- [SH01] Schmidt, H.; Himmel, N.: Einheitszellenmodell zur Abschätzung mechanischer Eigenschaften von in Dickenrichtung vernähten / strukturell vernähten Multiaxialgelege-Laminaten. In: IVW-Kolloquium 2008, IVW-Schriftenreihe Band 80, Prof. Dr.-Ing. Alois K. Schlarb (Hrsg.), Kaiserslautern, 16.-17. September 2008. Kaiserslautern: 2008, S. 181-182
- [Sma01] Smaga, M.: Experimentelle Untersuchung der Mikrostruktur sowie des Verformungs- und Umwandlungsverhaltens zyklisch beanspruchter metastabiler austenitischer Stähle. Kaiserslautern, Technische Universität, Lehrstuhl für Werkstoffkunde, Diss., 2005
- [Som01] Sommer, M. M.: Eigenschaftserweiterung von langfaserverstärkten thermoplastischen Fließpresshalbzeugen. Kaiserslautern, Technische Universität, IVW GmbH, Diss., 2006
- [Spe01] Sperber, P.: Automatisierung von Pressenumfeldern bei der Fertigung hochtechnischer Kunststoffteile, In: Tagungshandbuch zur Internationalen Fachtagung „GFK im Fahrzeugbau“, Mainz, 1988, S. 8-1 ff.
- [Sta01] Starke, J.: Beiträge zum Pressen langfaserverstärkter Kunststoffe. Aachen, RWTH, Diss., 1997
- [SV01] Sun, C. T.; Vaidya, R. S.: Prediction of Composite Properties from a Representative Volume Element. Composites Science and Technology, Vol. 56, No. 2 (1996), S. 171-179
- [Uph01] Uphus, R.: Wärmetransport im Extruderkanal für die Strömung hochviskoser nicht-Newtonischer Fluide. Hannover, Universität, Diss., 1993
- [VdA01] Van den Abeele, F.: Impact Damage Models for Steel Fiber Reinforced Composite Materials. Gent, Belgium: University, Laboratory for Mechanical Construction & Production, PhD Thesis, 2006

- [Vel01] Velthuis, R.: Induction Welding of Fiber Reinforced Thermoplastic Polymer Composites to Metals. Kaiserslautern, Technische Universität, IVW GmbH, Diss., 2007
- [Ver01] Vermeeren, C. A. J. R.: An Historic Overview of the Development of Fibre Metal Laminates. Applied Composite Materials, Bd. 10, Heft 4-5 (2003), S. 189-205
- [Wei01] Weißbach, W.: Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung. 9., Aufl., Braunschweig, Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn, 1988
- [Wit01] Witten, E.: Der Composites-Markt Europa: Marktentwicklung, Herausforderungen und Chancen. In: Handbuch zur 11. Internationalen AVK-Tagung, Essen, 22.-23. September, 2008. Essen: 2008, P2, (Daten-CD, P2)
- [Wol01] Wolf, H. J.: Zum Einfluss der Schneckenplastifizierung auf die Faserstruktur diskontinuierlich langglasfasergefüllter Thermoplaste. Darmstadt, Technische Hochschule, Diss., 1996
- [WS01] Wu, H. F.; Sun, C. T.: Impact Damage Characterization of Aramid Aluminum Laminates. In: ICCM 9, Proceedings of the 9th International Conference on Composite Materials, Vol. IV, Composites Design, Madrid, ES, 12-16 Jul 1993. Abington: Woodhead Publ., 1993, S. 157-165

Liste der Publikationen

1. Meichsner, A.; Maier, M.: Optimierung des Herstellungsprozesses von metallfaserverstärkten Kunststoffen (MFK). In: Technomer 2007 - Fachbeiträge, Chemnitz, 15.-17. November, 2007. Chemnitz: 2007, S. 39, (Daten-CD, FVV5)
2. Voll, N.; Meichsner, A.; Maier, M.: Edelstahltextilverstärkte Verbundwerkstoffe - Experiment und Simulation -. IVW-Kolloquium 2008, IVW-Schriftenreihe Band 80, Prof. Dr.-Ing. Alois K. Schlarb (Hrsg.), Kaiserslautern, 16.-17. September 2008. Kaiserslautern: 2008, S. 183-184
3. Meichsner, A.; Voll, N.; Maier, M.: Innovative edelstahltextilverstärkte Verbundwerkstoffe – Herstellung, Charakterisierung und Simulation - . In: Handbuch zur 11. Internationalen AVK-Tagung, Essen, 22.-23. September, 2008. Essen: 2008, S. B3/1 ff., (Daten-CD, B3)
4. Meichsner, A.; Voll, N.; Maier, M.: Experimentelle und numerische Untersuchung des Deformations- und Bruchverhaltens von edelstahltextilverstärkten Kunststoffen und LFT-Werkstoffen. Zeitschrift Kunststofftechnik, Journal of Plastics Technology, Vol. 5, Nr. 1 (2009), S. 48 ff.

Liste der betreuten Studien- und Diplomarbeiten

1. Arendt, R.: Mechanische Charakterisierung von metallfaserverstärkten Kunststoffen. Studienarbeit, 2007
2. Weissenberger, V.: Mechanische Charakterisierung von Edelstahltextilien für die Herstellung von metallfaserverstärkten Kunststoffen (MFK). Studienarbeit, 2008
3. Pfaff, F.: Mechanische Charakterisierung von metalltextilverstärkten Kunststoffen mit variierten Materialparametern. Studienarbeit, 2008
4. Dimitrova, Stoycheva, A.: Statische und Dynamische Charakterisierung von metalltextilverstärkten Kunststoffen. Diplomarbeit, 2008