



1	Einleitung und Zielsetzung.....	1
2	Grundlagen.....	3
2.1	Faserverbundkunststoffe im Automobilbau.....	3
2.2	Thermoplastische Faserverbundwerkstoffe.....	5
2.3	Herstellung endlosfaserverstärkter thermoplastischer Kunststoffbauteile	7
2.3.1	Halbzeugherstellung und Weiterverarbeitung.....	8
2.3.2	Einstufige Bauteilherstellung.....	12
2.3.3	Aufheizstrategien von Werkzeugen und Halbzeugen.....	14
2.3.4	Das In-Mould-Impregnation-Verfahren	16
2.4	Kohlenstofffasern und textile Strukturen	18
2.4.1	Aufbau von Kohlenstofffasern.....	18
2.4.2	Textile Strukturen aus Kohlenstofffasern	21
2.4.3	Thermoelektrische Eigenschaften von Kohlenstofffasern	22
2.4.4	Thermoelektrische Eigenschaften textiler Strukturen	25
2.4.5	Widerstandserwärmung von Kohlenstofffasern	27
2.5	Wärmehaushalt von stromdurchflossenen Leitern	30
2.5.1	Grundlagen zur Betrachtung des Wärmehaushaltes.....	30
2.5.2	Elektrische Widerstandserwärmung	32
2.6	Zusammenfassende Bewertung des Kenntnisstandes.....	35
3	Untersuchte Werkstoffe und Anlagentechnik	37
3.1	Werkstoffe.....	37
3.1.1	Kohlenstofffasern und textile Strukturen.....	37
3.1.2	Matrixsystem	40
3.2	Anlagentechnik.....	41
3.2.1	Messaufbau zur Widerstandsbestimmung.....	42
3.2.2	Aufheizprüfstand	44
3.2.3	Probekörperwerkzeug und Spritzgussmaschine	45
4	Versuchsdurchführung und –auswertung	48
4.1	Elektrische Eigenschaften von Kohlenstofffasern	48
4.1.1	Widerstandsmessungen	48
4.1.2	Bestimmung des elektrischen Übergangswiderstands.....	50
4.2	Thermoanalytische Untersuchungen	51
4.2.1	Thermogravimetrische Analyse (TGA)	52
4.2.2	Bestimmung der Wärmekapazität.....	52
4.2.3	Laser-Flash-Messungen	53
4.2.4	Hot-Disk Messungen.....	54
4.2.5	Thermografie an Einzelrovings und textilen Strukturen	55
4.3	Simulation des Wärmehaushalts.....	59
4.3.1	Kennwerte für die Simulation des Wärmehaushalts	59
4.3.2	Modellbildung für die FEM-Simulation	61
4.3.3	Parametervariation in der Simulation.....	63
4.4	Analyse des Imprägniergrades	64



4.4.1	Faserarchitekturen	64
4.4.2	Parameter zur Herstellung von Probekörpern	64
4.4.3	Methodik zur Beurteilung des Imprägniergrades	65
5	Untersuchungsergebnisse	68
5.1	Kennwertermittlung an Kohlenstofffasern	68
5.1.1	Elektrische Widerstandsmessungen	68
5.1.2	Thermophysikalische Eigenschaften	71
5.2	Experimente zum Aufheizverhalten	74
5.2.1	Aufheizverhalten einzelner Rovings	74
5.2.2	Aufheizverhalten textiler Strukturen	79
5.3	Simulation des Aufheizverhaltens	85
5.3.1	Simulation einzelner Rovings	85
5.3.2	Simulation textiler Strukturen	89
5.3.3	Parametervariation in der Simulation	92
5.4	Einflüsse auf den Imprägniergrad	96
5.4.1	Variation der Faserarchitektur	97
5.4.2	Variation des Prägeprogramms	99
6	Bewertung der Untersuchungsergebnisse	103
6.1	Temperatur- und druckabhängige Eigenschaften der Kohlenstofffaser	103
6.2	Aufheizverhalten von Kohlenstofffasern und textilen Strukturen	105
6.3	Vergleich von Simulation und Aufheizversuchen	110
6.4	Zusammenhang zwischen Aufheizverhalten und Imprägniergrad	114
6.4.1	Einfluss der Faserarchitektur	114
6.4.2	Korrelation der Prozessparameter	116
6.5	Prozessfenster der In-Mould-Impregnation	117
7	Zusammenfassung	120
8	Literaturverzeichnis	122
9	Liste der Formelzeichen und Abkürzungen	134
10	Anhang	136



1 Einleitung und Zielsetzung

Steigende Benzinpreise und striktere Umweltauflagen haben dazu geführt, dass der Leichtbau im Automobil bei der Entwicklung neuer Fahrzeuge in der Vergangenheit zunehmend an Bedeutung gewonnen hat. Konventionelle Werkstoffe werden dabei immer häufiger durch alternative Werkstoffe wie Aluminium, höchstfeste Stähle oder faserverstärkte Kunststoffe ersetzt. Ein wesentlicher Vorteil von faserverstärkten Kunststoffen ist dabei eine hohe Designfreiheit und mögliche Funktionsintegration bei gleichzeitig hohen spezifischen Festigkeiten und Steifigkeiten. Je nach Anwendungsfall kann durch Leichtbau mit Kohlenstofffasern bis zu 80 % Gewicht gegenüber Stahl und bis zu 50 % gegenüber Aluminium eingespart werden [1].

Der derzeitige Einsatz von Faserverbundwerkstoffen im Automobilbau beschränkt sich bisher jedoch vorwiegend auf Baureihen mit kleinen Stückzahlen. Grund dafür sind einerseits die noch hohen Herstellungskosten durch lange Zykluszeiten und energieintensive Prozessrouten, sowie andererseits ein hoher Materialpreis für das Ausgangsmaterial der Kohlenstofffasern. Ein wichtiger Hebel, um einen höheren Anteil von Faserverbundwerkstoffen im Automobilbau zu ermöglichen, sind demnach Verbesserungen der Prozesstechnologien und die Entwicklung neuer Prozessrouten zur Herstellung von Faserverbundbauteilen. [2, 3]

Im Zuge der zunehmend strikteren CO₂-Gesetzgebung und dem damit einhergehenden Trend zur Elektromobilität wird zukünftig nicht mehr nur das reine Fahrzeuggewicht entscheidend für die Darstellung der Umweltauswirkungen sein. Bei der Betrachtung der ganzheitlichen Umweltbilanz (auch Ökobilanz oder LCA – Life Cycle Assessment) eines Fahrzeugs werden diese Veränderungen besonders deutlich. So entfallen für ein Fahrzeug der Kompaktklasse mit einem konventionellen Ottomotor bei einer Laufleistung von 200.000 km etwa 80 % der CO₂-Emissionen auf die Nutzung und etwa 20 % auf die Herstellung des Fahrzeugs. Bei einem batteriebetriebenen Fahrzeug, welches mit Strom aus regenerativen Quellen betrieben wird, entstehen hingegen 95 % der CO₂-Emissionen während der Herstellung und lediglich etwa 5 % während der Nutzung des Fahrzeugs. [4]

Dieser Vergleich macht deutlich, dass mit zunehmendem Grad der Elektrifizierung von Fahrzeugen nicht mehr nur das reine Fahrzeuggewicht, sondern auch die Effizienz der Herstellungsprozesse von Fahrzeugen in den Vordergrund rückt. Um langfristig einen umweltfreundlichen Einsatz von Faserverbundwerkstoffen im Automobilbau zu ermöglichen, müssen demnach auch die Herstellungsprozesse möglichst energieeffizient ausgelegt werden.



Ziel dieser Arbeit ist es, auf Basis des Stands der Technik ein neuartiges Herstellungsverfahren für endlosfaserverstärkte thermoplastische Faserverbundbauteile, das so genannte In-Mould-Impregnation-Verfahren, hinsichtlich seiner wesentlichen geometrischen, werkstofflichen und prozesstechnischen Wirkzusammenhänge zu erfassen. Darauf aufbauend soll anschließend eine Empfehlung für ein optimales Verarbeitungsfenster abgegeben werden.

Das In-Mould-Impregnation-Verfahren wurde bei der Neue Materialien Fürth GmbH in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Kunststofftechnik an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg im Rahmen eines vom Bayrischen Wirtschaftsministerium geförderten Projekts „CFK-Großserie“ erforscht und im Jahr 2012 mit dem AVK Innovation Award ausgezeichnet. Dadurch, dass beim In-Mould-Impregnation-Verfahren die Prozessschritte *Aufheizen*, *Imprägnierung* und *Umformen* in einem Werkzeug zusammengefasst werden, ergeben sich große Einsparpotenziale hinsichtlich des Energieverbrauchs bei der Herstellung von Faserverbundbauteilen.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden zunächst die elektrischen Eigenschaften der Kohlenstofffaser näher betrachtet und insbesondere die Einflussgrößen auf den elektrischen Widerstand untersucht. Anschließend wird das Verhalten der Kohlenstofffasern während des In-Mould-Impregnation-Verfahrens durch thermoanalytische Untersuchungen und anhand von Aufheizversuchen mit direkter Widerstandserwärmung analysiert. Dazu werden verschiedene flächige Textilien aus Kohlenstofffasern aufgeheizt und die Homogenität der Erwärmung dieser Textilien bewertet.

Die Erkenntnisse aus den thermoanalytischen Untersuchungen sowie den Aufheizversuchen fließen schließlich in ein Simulationsmodell zur Abbildung des Aufheizverhaltens ein. Anhand dieses Simulationsmodells sollen die wesentlichen Einflussgrößen der Widerstandserwärmung identifiziert und der Wärmehaushalt während des In-Mould-Impregnation-Verfahrens abgeschätzt werden.

Abschließend werden charakteristische textile Aufbauten in einem Probekörperwerkzeug durch das In-Mould-Impregnation-Verfahren imprägniert und eine mögliche Korrelation zwischen dem Aufheizverhalten und der Imprägnierqualität im fertigen Bauteil geprüft. Auf Grundlage dieser Ergebnisse soll eine Empfehlung für eine optimale Prozessführung der In-Mould-Impregnation abgegeben werden.



2 Grundlagen

Faserverbundkunststoffe bilden eine besondere Werkstoffgruppe, da ihre Eigenschaften in Abhängigkeit ihres Herstellungsverfahrens über ein sehr breites Leistungsspektrum eingestellt und beeinflusst werden können. So bewegen sich beispielsweise die Festigkeiten im Bereich von 50 MPa bis 3000 MPa, während Steifigkeiten von 5 GPa bis 500 GPa einstellbar sind [1]. Dieses breite Eigenschaftsprofil hat unter anderem auch zur Folge, dass die Herstellungskosten ebenfalls in einem sehr weiten Bereich streuen. Eine der entscheidenden Voraussetzungen zur weiteren Verbreitung der faserverstärkten Kunststoffe ist die belastungsgerechte Herstellung faserverstärkter Kunststoffbauteile zu akzeptablen Kosten. Dabei wird nach einer Studie von Roland Berger das größte Einsparpotenzial mit bis zu 40 % durch Prozessverbesserungen bei den Herstellungsverfahren für Faserverbundbauteile gesehen [2].

2.1 Faserverbundkunststoffe im Automobilbau

Die Luftfahrtindustrie hat bei der Entwicklung der faserverstärkten Kunststoffe im 20. Jahrhundert eine ausgeprägte Vorreiterrolle eingenommen und ist nach wie vor Treiber auf vielen Forschungsthemen im Bereich der Faserverbundkunststoffe. In der Automobilindustrie führt das vorhandene Leichtbaupotenzial dagegen nur selten zu ähnlichen Produktwertsteigerungen, so dass für einen flächendeckenden Einsatz von Faserverbundkunststoffen im Automobil noch weitere Verbesserungen zur Wirtschaftlichkeit der Herstellungsprozesse gefordert sind [1].

Der derzeit noch deutlich größere Anteil faserverstärkter Kunststoffe im Automobilbau wird durch die glasfaserverstärkten Kunststoffe abgedeckt. Dabei verzeichneten in der Vergangenheit insbesondere die duroplastischen SMC-Pressmassen (Sheet Moulding Compound) sowie glasmattenverstärkte Thermoplaste (GMT) und langfaserverstärkte Thermoplaste (LFT) ein überdurchschnittliches Marktwachstum [1]. Darüber hinaus findet das duroplastische Resin Transfer Moulding (RTM) durch Entwicklung schnell aushärtender Harzsysteme und Verbesserungen in der Preformherstellung zunehmend auch Einzug in die Serienfertigung größerer Stückzahlen in der Automobilindustrie [5].

Endlosfaserverstärkte thermoplastische Faserverbundbauteile wurden insbesondere in den letzten zehn Jahren verstärkt für die Automobilindustrie entwickelt. In Bild 2.1 links ist eine Sitzschale der Adam Opel AG aus endlosglasfaserverstärktem Polyamid dargestellt. Im Vergleich zum Vorgängerbauteil konnte durch den Einsatz des Faserverbundkunststoffs eine Gewichtseinsparung von 45 % erreicht werden [6]. Bild 2.1 rechts zeigt einen Infotainmenthalter der AUDI AG. Das Bauteil besteht aus zwei endlosglasfaserverstärkten Polyamid-6-Faserverbundeinlegern und einem Spritzgussanteil mit 30 % Kurzglasfasern verstärktem Polyamid 6. Gegenüber der Stahlvariante wiegt diese Ausführung ca. 50 % weniger [7].

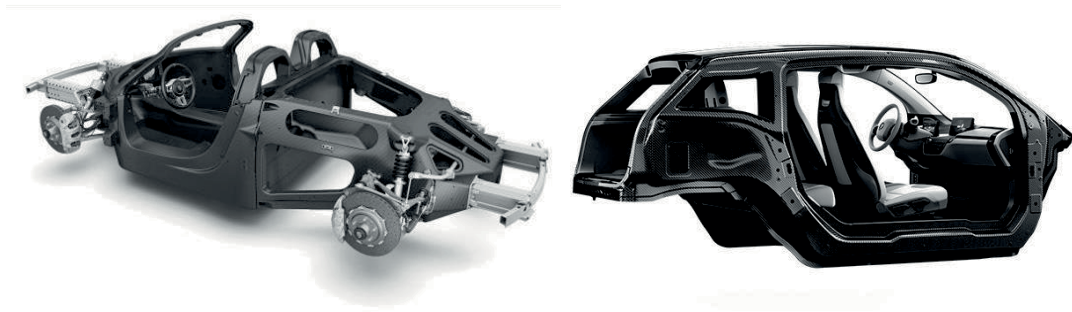


*Bild 2.1: Bauteile aus endlosglasfaserverstärktem Kunststoff (umspritzte Organobleche)
links: Sitzschale der Adam Opel AG (Opel Astra OPC) [6]
rechts: Infotainmenthalter der AUDI AG (Audi A6/A7) [7]*

Im Gegensatz zu Glasfasern werden Kohlenstofffasern als Verstärkung für den Automobilbau bisher vorwiegend nur in Kleinserien wie beispielsweise im Sportwagenbereich eingesetzt. Derzeit liegt der Fahrzeugbau hinter der Luftfahrt, der Windenergie sowie Sport & Freizeit erst an vierter Stelle der Umsatzzahlen mit Kohlenstofffasern. Bis 2020 wird allerdings ein so starker Zuwachs prognostiziert, dass der Fahrzeugbau hinter der Luftfahrt das zweitwichtigste Segment für Kohlenstofffasern werden soll. [8]

Ein weiterer Innovationsschub für den Einsatz von Kohlenstofffasern im Automobilbau zeichnet sich durch den Trend zur Elektromobilität ab. Mit der Produktion der Modelle BMW i3 und i8 hat die Verwendung von Kohlenstofffasern im Automobilbau mittlerweile größere Stückzahlen erreicht und nimmt damit auch einen größeren Anteil am Weltmarkt ein [9]. Laut dem Kohlenstofffaserproduzenten SGL liegen die prognostizierten Wachstumsraten des Kohlenstofffaserbedarfs für Automobilteile zwischen 2016 und 2020 jährlich bei ca. 34 % und sind damit mit Abstand die am stärksten wachsende Industrieanwendung für Kohlenstofffasern [1, 10].

Bild 2.2 zeigt zwei aktuelle Anwendungen von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen im Automobilbau. In beiden Fällen wird die Fahrgastzelle vollständig durch im (Hochdruck)-RTM-Prozess hergestellte CFK-Strukturen mit duroplastischer Matrix hergestellt. Dabei werden die unterschiedlichen CFK-Einzelteile in separaten Prozessschritten miteinander verklebt. Während der Porsche 918 Spyder noch zu den Kleinserienfahrzeugen gezählt wird, wurden von Januar bis September 2015 über 20.000 Modelle der BMW i-Reihe mit CFK-Struktur ausgeliefert [11].



*Bild 2.2: Anwendung von kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff im Automobilbau
links: CFK Monocoque des Porsche 918 Spyder [12]
rechts: CFK Fahrgastzelle des BMW i3 [13]*

Diverse Untersuchungen der letzten Jahre haben die Einsatzmöglichkeiten und das Potenzial für faserverstärkte Kunststoffe im Automobilbau aufgezeigt und ermöglichen bereits in der Planungsphase des Fahrzeugs die Beurteilung einer faserverbundspezifischen Bauteileignung mit dem Ziel der Gewichtssenkung [14]. Steht eine Verringerung des Kraftstoffverbrauchs bei der Gewichtseinsparung im Vordergrund, sollte die angepeilte Gewichtssenkung in jedem Fall so groß sein, dass auch sekundäre Vorteile wie beispielsweise eine Übersetzungsänderung oder eine Hubraumverkleinerung genutzt werden können, so dass das Gesamtgewicht des Fahrzeugs weiter sinkt [15]. Ein großes Potenzial, um die Kosten für den Einsatz von Faserverbundbauteilen gering zu halten, besteht in der möglichen Funktionsintegration von Kunststoffbauteilen. Dabei muss allerdings beachtet werden, dass sich eine Fahrzeugstruktur immer aus einem Mix unterschiedlichster Materialien zusammensetzt und eine Struktur komplett aus Kohlenstofffaserbauteilen nur selten wirtschaftlich sinnvoll darstellbar ist [14]. So besteht beispielsweise ein Konzept für eine hinsichtlich des Leichtbaus optimierte Rohbaukarosse aus knapp 20 Gewichtsprozent Faserverbundwerkstoffen und weiterhin noch zu einem Massenanteil von 70 Gewichtsprozent Aluminium sowie 7 Gewichtsprozent aus Stahl [16].

2.2 Thermoplastische Faserverbundwerkstoffe

Während die ersten technischen Anwendungen faserverstärkter Kunststoffe zum größten Teil mit duroplastischen Matrices realisiert wurden, halten Anwendungen mit thermoplastischer Matrix in den vergangenen Jahren zunehmend Einzug in größere Industriezweige [17]. Für kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe hat sich die Aufteilung zwischen duroplastischer und thermoplastischer Matrixwerkstoffe von 2010 bis 2014 von 90 % Duroplasten und 10 % Thermoplasten bereits auf 76 % Duroplaste und 24 % Thermoplaste verschoben [8, 18]. Vorteile einer thermoplastischen gegenüber einer duroplastischen Matrix ergeben sich beispielsweise durch kürzere Zykluszeiten, einer einfacheren Weiterverarbeitung durch Schweißprozesse oder Umspritzung, einer unbegrenzten Lagerzeit der Halbzeuge, einer höheren Schlagzähigkeit und Bruchdehnung



sowie durch bessere Recyclingmöglichkeiten [1, 17, 19]. Das höhere Automatisierungspotenzial der thermoplastischen Faserverbundwerkstoffe ermöglicht zudem eine wirtschaftliche Fertigung von Bauteilen in großen Stückzahlen [20, 21].

Im Vergleich zu den duroplastischen Matrixsystemen ist die Viskosität der thermoplastischen Schmelze um den Faktor 10 bis 1000 höher, so dass die Imprägnierung der Verstärkungsfasern mit einer thermoplastischen Matrix eine besondere Herausforderung darstellt [17]. Häufig wird daher bei der Bauteilherstellung mit thermoplastischen Matrixsystemen die Imprägnierung in einem vorgelagerten Schritt vor der Umformung zum Bauteil durchgeführt und auf vorimprägnierte Halbzeuge zurückgegriffen. Weiterhin werden zunehmend besonders niedrigviskose Thermoplaste für die Anwendung im Faserverbundbereich entwickelt und auf den Markt gebracht, um die Imprägnierung zu vereinfachen [22]. Im folgenden Kapitel 2.3 wird auf die unterschiedlichen Herstellungsrouten noch näher eingegangen.

Die Verstärkung thermoplastischer Kunststoffe mit Hilfe von Kurzfasern wird bereits seit längerer Zeit in verschiedenen Spritzgussverfahren angewendet [20]. Dabei werden dem Thermoplast zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften Glas- oder Kohlenstofffasern zwischen 0,1 mm bis 1 mm Länge und einem Gewichtsanteil von bis zu 60 % zugesetzt [23]. Allerdings werden kurzfaserverstärkte Thermoplaste auf Grund ihrer sehr kurzen Faserlänge und den daraus resultierenden Eigenschaften üblicherweise nicht zur Gruppe der faserverstärkten Kunststoffe gezählt [23].

Eine der ersten industriellen Anwendungen thermoplastischer faserverstärkter Kunststoffe waren die so genannten Glasmattenverstärkte Thermoplaste (GMT). Dabei handelt es sich um thermoplastisch vorimprägnierte Glasfasermatten mit einer Faserlänge von 20 bis 30 mm und einer Dicke von 2 mm bis 4 mm. Die Glasfasern werden in einem Nadelprozess durch Widerhaken miteinander verschlauft, wodurch die Fasern in einer zufälligen Orientierung vorliegen. Anschließend werden die Glasfasermatten in einer Schmelztränkung mit dem Thermoplast imprägniert und unter Druck konsolidiert. Üblicherweise kommt dabei aus Kostengründen Polypropylen als Matrixwerkstoff zum Einsatz. Die so hergestellten GMT-Matten sind dann als plattenförmiges Halbzeug praktisch unbegrenzt lagerfähig. Zur weiteren Verarbeitung werden die hergestellten GMT-Matten über die Schmelztemperatur der thermoplastischen Matrix erwärmt und können dann in Presswerkzeugen in einem Fließpressvorgang umgeformt werden. [1, 23, 24]

Eine weitere Gruppe der thermoplastischen Faserverbundwerkstoffe wird durch die Langfaserverstärkten Thermoplaste (LFT) gebildet. LFT werden im Gegensatz zu den GMT-Matten üblicherweise als stäbchenförmiges Granulat im Plastifizierungsprozess verarbeitet. Die Faserlänge des Ausgangsmaterials liegt zu Beginn zwischen 12 mm und 25 mm. Diese Ausgangslänge wird allerdings im Laufe der Verarbeitung bis zum fertigen Bauteil durch Abrasion während des Plastifizierens im Spritzaggregat deutlich reduziert. Vorteilhaft bei den