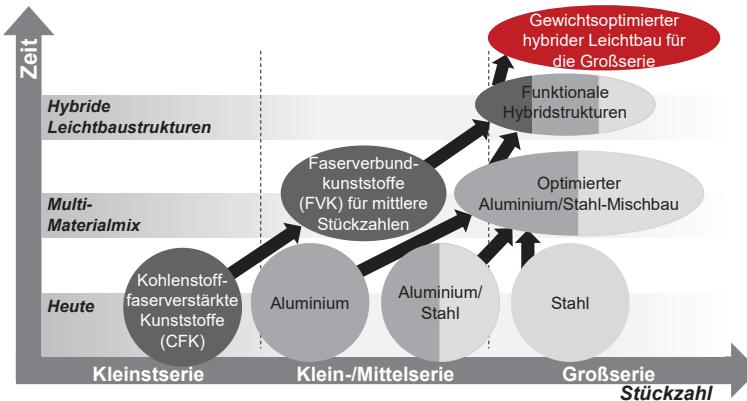


# 1 Einleitung

Mit voranschreitender Entwicklung der Industriegesellschaft seit Mitte des 19. Jahrhunderts nimmt auch der globale Transportverkehr stetig zu. Folglich wachsen kontinuierlich der Bedarf und die Nutzung an bzw. von fossilen Energieträgern für Produktion und Betrieb motorisierter Transportmittel. Die bei der Verbrennung entstehenden Emissionen belasten die Umwelt und treiben den Klimawandel voran. Prognosen gehen davon aus, dass die durch den Transport induzierten CO<sub>2</sub>-Emissionen um 60 % bis 2050 steigen werden [INTE17, S. 33]. Dies belegt, dass explizit das wachsende Verkehrsaufkommen hierbei einen entscheidenden Beitrag an den entstehenden Treibhausgasen in der Atmosphäre liefert, auch wenn bereits heute fast ein Viertel des jährlichen globalen CO<sub>2</sub>-Ausstoßes nur durch den Straßenverkehr verursacht wird [LOES17, S. 11]. Um diesem Trend entgegenzuwirken, werden national und international gesetzliche Vorgaben erlassen. So wurde in einer europäischen Verordnung 2009 festgelegt, dass für die Neuwagenflotte bis 2020 der CO<sub>2</sub>-Emissionsdurchschnitt von 95 g CO<sub>2</sub>/km eingehalten werden muss. [EURO09, S. 4f.] Aus diesem Grund rückt neben der Verbesserung der Motoren- und der Elektrifizierung des Antriebstranges vor allem die Reduktion der Fahrzeugmasse zunehmend in den Entwicklungsfokus der Automobilbranche. Letztere unterstützt die Reduktion der Fahrwiderstände und senkt so den fossilen Kraftstoffverbrauch, führt aber auch bei der Elektromobilität zu einer Erhöhung der möglichen Reichweiten. So kann eine Massenreduktion von 100 kg des Fahrzeuggewichts den Verbrauch eines elektrifizierten Autos um ca. 1 kWh bei gefahrenen 100 km senken. Dies entspricht einem eingesparten Benzinverbrauch von 0,6 l und bedeutet unter Berücksichtigung der Lieferkette, dass insgesamt ca. 2 kg weniger CO<sub>2</sub> in die Atmosphäre gelangt [KOET18; VETT17]. Bei einem konventionell angetriebenen Fahrzeug lässt sich das gleiche Energieeinsparungspotenzial bei einer geringeren Fahrzeugmassenreduktion von 40 kg erreichen [ERNS12, S. 131].

Die Automobilindustrie reagiert auf die Anforderungen zur Reduktion des Fahrzeuggewichts mit der Umsetzung von strukturellen Leichtbaukomponenten in aktuellen Fahrzeugentwicklungen. Wesentlicher Stellhebel ist hierbei der Einsatz von Leichtbauwerkstoffen. Faserverbundkunststoffe (FVK) eröffnen durch ihre hervorragenden gewichtsspezifischen anisotropen Materialeigenschaften ein hohes Leichtbaupotenzial. Speziell bei dem Einsatz von thermoplastischen Matrices können diese auch in großserientauglichen Fertigungsverfahren wirtschaftlich verarbeitet werden und bilden u. a. auch aufgrund der Möglichkeit zum stofflichen Recycling eine attraktive Werkstoffalternative für die Automobilindustrie. Trotz dieser Vorteile werden wegen der hohen Werkstoffpreise – speziell bei Verwendung von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen (CFK) – durch den immensen Kostendruck in der Mittel- und Großserie weiterhin Leichtmetalle und vor allem Stahlwerkstoffe eingesetzt. Allen voran werden Bleche mit gesteigerter Festigkeit eingesetzt, sodass hochfester Stahl immer noch das am weitesten verbreitete Leichtbaumaterial im Automobilbau ist. Der konsequente Einsatz von CFK bleibt auf die Kleinserie beschränkt. Angestrebtes Mittel, um das Fahrzeuggewicht der Metallbauweise bei akzeptierter Kostenstruktur zu senken, ist der Einsatz von Hybridbauweisen in der Fahrzeugstruktur (vgl. Bild 1-1). Durch die Kombination von Metall

und FVK in großserientauglicher Leichtbaufertigung kann das Fahrzeuggewicht um bis zu 33% gesenkt werden. Hierbei entstehen rechnerisch 4 € Zusatzkosten pro eingespartem Kilogramm, die seitens der Hersteller akzeptiert werden [HEUS12, S. 14].



**Bild 1-1: Erwartete Entwicklung des werkstofflichen Karosserieleichtbaus**  
[PLAT14, S. 18]

*Development of lightweight design for car bodies*

Faserverstärkte Thermoplaste bieten aufgrund ihrer Schmelzbarkeit die Möglichkeit, in einem thermischen Fügeprozess ohne Einsatz von zusätzlichen mechanischen Verbindungslementen oder Klebstoffen mit Metall zu Hybridbauweisen gefügt zu werden. Technische Herausforderungen bei diesem Fügeprozess liegen in erster Linie in der Erzeugung einer dauerhaften fehlstellenfreien Verbindung, die ausreichende Kräfte übertragen können muss. Jedoch stellen auch die unterschiedlichen thermophysikalischen, optischen und mechanischen Materialeigenschaften, allen voran die unterschiedliche thermische Ausdehnungscharakteristik, die Prozessführung wie auch die Bauteilauslegung im Hinblick auf eine verzugsminimierte Fügung mit hohen Verbundfestigkeiten vor Herausforderungen.

Das thermische Fügen unidirektional endlosfaserverstärkter Thermoplasttapes (UD Tapes) auf laserstrukturierten hochfesten Stahlblechbauteilen durch das laserbasierte Tapelegen zeigt in dieser Arbeit Lösungen für diese prozesstechnischen Herausforderungen auf. Die entwickelten und experimentell validierten Modelle dienen dazu, die Systemtechnik für das laserbasierte Tapelegen weiterzuentwickeln und eine in-situ Konsolidierung auf vorbearbeiteten Blechwerkstoffen zu erzeugen. Der wissenschaftliche Forschungsprozess der vorliegenden Arbeit zielt darauf ab, eine Antwort auf die übergeordnete Forschungsfrage zu liefern:

*Ermöglichen prozess- und maschinenseitige Entwicklungen sowie Material-optimierungen, dass sich hybride Bauteile – bestehend aus Metallblech mit lokaler Verstärkung aus UD Tape – bei unmittelbarer Fügung auf die Metalloberfläche mit dem laserbasierten Tapelegen bei hoher Bauteil- und Verbindungsqualität herstellen lassen?*

## Introduction

Due to the progressive development of the industrial society since the middle of the 19<sup>th</sup> century global transportation is steadily increasing. Therefore, the need for and the use of fossil energy sources for the production and operation of motorized vehicles is continuously growing, too. The emissions resulting from combustion pollute the environment and drive climate change. Existing forecasts assume that the CO<sub>2</sub> emissions caused by transport will increase by about 60 % by 2050 [INTE17, p. 33]. This statement proves that the steadily growing traffic decisively contributes to the emerging greenhouse gases in the atmosphere. Even today, road traffic causes a quarter of the global annual CO<sub>2</sub>-emissions [LOES17, p. 11]. In order to counteract these trends national and international laws and regulations have been passed. Thus, the a European regulation from 2009 stipulates that new car fleets must comply the defined average CO<sub>2</sub> emission target of 95 g CO<sub>2</sub>/km by 2020. [EURO09, p. 4f.] For this reason automotive industry is not only conducting research to enhance the combustion engine technology in order to become more efficient and is investing excessively in the electrification of the powertrain but also is trying to reduce the weight of the vehicles. Reducing the mass of a vehicle decreases driving resistances and reduces fuel consumption in operation. For electrical cars mass reduction leads to increased driving ranges. Thus, mass reduction of 300 kg reduces the electricity consumption of an electrical car by about 1 kWh at a driving distance of 100 km. This corresponds to 0,6 l savings in fuel consumption. If the entire supply chain is also taken into account, this means that roughly 2 kg less CO<sub>2</sub> is discharged into the atmosphere [KOET18; VETT17]. In a conventional vehicle with combustion engine the same energy saving potential can be achieved with a lower vehicle mass reduction of about 40 kg [ERNS12, p. 131].

Automotive industry reacts to the demand of mass reduction for its current vehicle developments by conducting research and implementing structural lightweight design. For enabling this lightweight design, the use of lightweight materials is one of the essential solutions. Fiber reinforced plastics (FRP) offer a tremendous potential for enabling lightweight design due to their excellent weight-specific anisotropic material properties. Specifically, FRP with thermoplastic matrices can be processed economically in manufacturing processes which are suited for mass production and offer the possibility for recycling. Therefore, these materials are attractive alternatives to substitute conventional materials in automotive engineering. Despite these advantages, light metals and steel materials are still the dominating materials to be used in medium and large automotive series due to the high cost pressure as the prices for FRP and especially for carbon fiber reinforced plastics (CFRP) are not competitive. Above all, steel sheet metal with increased strengths is used. Thus, high-strengths steel still remains the most widely used lightweight design material in automotive engineering. The consistent use of CFRP remains limited to small series and prototypes. The desired means of reducing the weight of vehicles made of metal at an accepted cost structure is the use of hybrid design methods. The combination of metal and FRP to a hybrid design

enables a lightweight design which is suited for mass production and facilitates to reduce the mass of cars up to 33 %. Additionally, using this approach of material combination within one part, the industries' cost target of 4 € extra costs per kilogram saved weight can be met.

Due to their melting ability fiber reinforced thermoplastics offer the potential to be joined to metal using thermal joining processes without the need for additional joining elements or extra adhesives. This way, hybrid designs can be realized. Technical challenges in these joining processes can primarily be found in the creation of a permanent connection between the metal and the FRP without any voids or defects. This connection must be able to transmit sufficiently high forces. However, the different thermal-physical, optical and mechanical properties as well as the differences in the thermal expansion characteristics of the joining materials and finally the process control as well as the part design pose challenges with regard to the realization of hybrid designs with minimized distortion and high bond strength.

This thesis shows solutions for these highlighted technical process challenges by parts using the production technology of laser-based tape placement for the thermal joining of unidirectional continuous fiber reinforced thermoplastic tapes (UD tapes) onto laser-textured high-strength steel parts. The developed and experimentally validated models serve to further develop the system technology for laser-based tape placement as well as to generate an in-situ consolidation on the pre-processed sheet metals. The scientific research process of the present work aims at providing an answer to the overall research question:

*Will systematic process and machine developments as well as material and process optimizations enable the production of hybrid designs – which are consisting of sheet metal with local reinforcement of UD tape – with a high component and joint quality if the UD tape is directly joined to the metal surface using the laser-based tape placement production technology?*