

## Kurzfassung

Ziel dieser Arbeit ist es, einen Beitrag zur Steigerung der Nutzung von SMC als Werkstoff für Strukturbauteile in Pkw zu leisten. Zunächst wird der Stand des Wissens der SMC-Technologie dargestellt. Ebenso sind der aktuelle Stand der Crashsimulation aufgearbeitet und die verfügbaren Tools zur Berechnung des Verhaltens von Faserverbundkunststoffen beschrieben.

Aus diesem Zusammenhang erfolgt die Ableitung des Entwicklungsbedarfs zur Nutzung von SMC als Werkstoff für Strukturbauteile. Zunächst werden das Crashverhalten und das Energieabsorptionsvermögen von SMC-Materialien verschiedener Hersteller und unterschiedlicher Konfiguration untersucht: Standard-SMC-Materialien, SMC mit unidirektionaler Faserverstärkung, Leicht-SMC, Recyclat-SMC, flexibles SMC. Dabei werden verschiedene Probengeometrien (Rechteckrohr mit/ohne Flansch) bei unterschiedlichen Aufprallgeschwindigkeiten geprüft und die Ergebnisse analysiert. Diese Untersuchungen belegen, dass sich mit SMC Energieabsorptionskennwerte erreichen lassen, die über den Kennwerten klassischer Stähle liegen.

Als Fügeverfahren ist für Faserverbundstrukturen die Klebtechnik anzustreben. Aufgrund der Empfindlichkeit von Klebeverbindungen gegen schlagartige Beanspruchung und der Bestätigung dieses Sachverhaltes bei den durchgeführten Crashversuchen wurden die Klebeverbindungen der Rechteckrohrproben mit Flansch detailliert untersucht. Da das Crashverhalten einer solchen Probe in starkem Maße von der Festigkeit der Verbindung abhängt, wurde eine Methode entwickelt, um die Crashtaughigkeit mit einem einfachen Versuch zu prüfen. Das Gesamtsystem (Fügepartner und Klebstoff) wurde hinsichtlich seiner Crasheignung bewertet.

Im Rahmen der Arbeiten zur Erstellung eines Modells zur numerischen Beschreibung des Materialverhaltens von SMC wurde ausgehend von Materialmodell MT54 in LS-DYNA ein modifiziertes Materialmodell für diesen Werkstoff entwickelt. Dazu erfolgte die Anpassung sowohl des Versagenskriteriums als auch des Nachversagensverhaltens für SMC. Die Modellierung der Proben geschah nach Richtlinien, die auch zukünftig bei größeren Strukturen Anwendung finden können. Die Validierung des Materialmodells erfolgte anhand einfacher Rohrproben unter axialer Crashbelastung durch den Vergleich mit experimentellen Ergebnissen. In den typischen Energieabsorptionskennwerten wurde eine gute Übereinstimmung zwischen Experiment und Simulation erreicht. Im Folgenden wurden die Anwendbarkeit des Modells im Rahmen der Crashanalyse eines SMC-Längsträgers getestet und Richtlinien zur Auslegung von crashoptimierten Bauteilen aus SMC abgeleitet. Im letzten Kapitel werden die Ergebnisse der Arbeit zusammengefasst.

## Abstract

The aim of this thesis is the experimental investigation and numerical simulation of the crash behaviour of Sheet Moulding Compound (SMC) structures. The report is organised in three sections. The first section focuses on the experimental investigation of the crash behaviour of rectangular SMC tubes with and without flange. The second section presents a test method to estimate the crash performance of adhesive joints of SMC. The third section deals with the development and use of a material model established for the crash simulation of SMC structures. All aspects focus on the fulfilment of typical requirements expected for materials with use in structural application of vehicles.

The experimental investigation included the measurement of standard material properties and crash properties of eleven different SMC materials: six standard types with different fibre content, SMC with unidirectional reinforcement, flexible SMC, low density SMC, natural fibre SMC and SMC with included recycled material. The crash specimen were rectangular tubes with and without flange with the following geometric data: length 250 mm, wall thickness 3 mm, cross section of the tube 50x50 mm (with flange) or 50x25 mm (without flange). Both parts of each specimen were bonded with two different adhesives: a flexible PUR and a brittle EP adhesive. These adhesives were chosen in accordance with the pre-testing results. All crash specimens were tested in quasistatic (100 mm/min) and dynamic (10 m/s) experimental set-up. All of them failed by progressive crushing with very homogeneous force-deformation curves. The energy absorption reached values up to 30 kJ/kg, which is a higher level than standard metals are able to provide. Special tests with a non axial impact demonstrated the crash capability of a non-optimised specimen up to a slope of 10°. Temperature and humidity reduce the crash performance with a maximum amount of about 17 % compared to vehicle specific boundary conditions.

The crash tests demonstrated the importance of a high quality bonding. The progressive crushing of the rectangular tubes with flange is mainly influenced by the quality of the bonding areas. Some tests of these tubes - performed with other adhesives - led to a global and sudden failure of the whole bonding area. This experience led to the development of a new testing method for bonded fibre reinforced polymers (FRP). Literature study led to a transfer of the double cantilever beam testing of FRP to bonding testing of SMC. The state-of-the-art focuses on quasistatic testing. The method is extended to dynamic testing in a drop tower in experimental and theoretical aspects, which allows to observe the crack growth in the adhesive joint while the specimen is under load. The analysis of the test results led to information about the crack-growth velocity, crack initiation energy and energy release rate. The comparison of test results allows a ranking of adhesives concerning their capability for crash

application. Different adhesives were included in this investigation. The results supported the former choice of the fixed adhesives.

As mentioned before, today's design process requires the use of standard CAE methods such as crash simulation. The available simulation tools were not capable to consider any FRP-typical material properties. They focus on FRP laminates and need an alignment for each application of the tool. To improve the SMC crash simulation a standard material model (MT54 of LS-DYNA) was modified and adapted to SMC. The material is considered to be isotropic in plane. The maximum stress criterion proved to be valid for SMC failure in an axial loaded crash structure. The post failure behaviour is adapted to SMC under consideration of numerical based element deletion. The simulation results correspond very well with the test data from experiments with rectangular tube with and without flange. The force-deformation curves are quite similar. The used input parameters gave the same accuracy of results for all SMC with randomly distributed glass fibres. The modified simulation tool was verified by the simulation of a longitudinal crash member made of SMC. This conical structure showed in the experiment an increase of the load level during progressive crushing. For the crash simulation of this structure the identical material set up was used as for the rectangular tubes. The results correspond very well with the experimental data. To support future development of crash loaded SMC parts an overview of rules to optimise such structures is given in a short summary.

A final conclusion in relation to the requirements for structural SMC parts leads to the following statements: SMC reaches a specific energy absorption level higher than standard metals. The developed test method allows the ranking of bonded SMC specimen concerning their crash performance. The new material model for the crash simulation of axial loaded SMC structures leads to a high level of conformity to experimental data and appears to be very useful to design realistic structures.