

# MIT DEM WERKSTOFF DENKEN EXPLOITING MATERIAL INGENUITY

Ergebnisse aus MAI Design: Faser- und fertigungsgerechte Bauweisen und Auslegung von Bauteilen aus Hochleistungsverbundwerkstoffen

**Das Projekt MAI Design aus dem Spitzencluster MAI Carbon im Carbon Composites eV (CCeV) erarbeitete entlang der gesamten CFK-Design- und -Herstellprozesskette ein Material- und Struktur-Verständnis, das auf den optimalen Einsatz des Werkstoffs ausgerichtet ist. Mit Partnern aus Automobil- und Luftfahrtindustrie, Maschinenbau, Ingenieursdienstleistern, Softwarefirmen sowie Forschungseinrichtungen wurden die Grundlagen auf breiter Basis erhoben und die Anwendbarkeit demonstriert.**

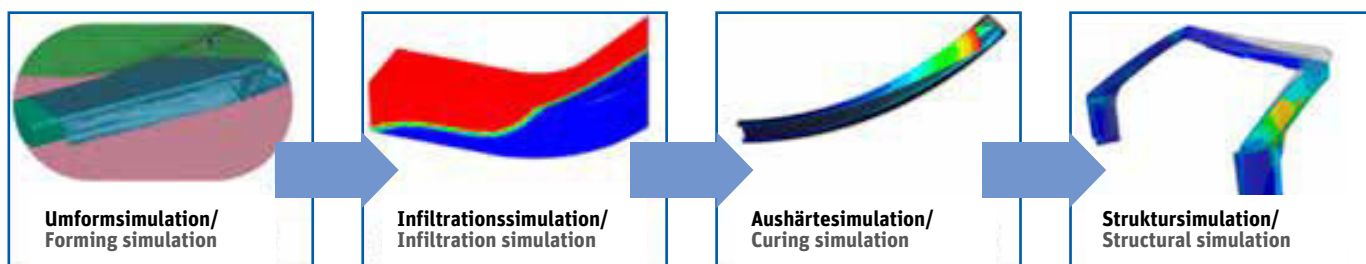
Für Luft- und Raumfahrt, Automobilbau und im Maschinenbau ist der Leichtbau hochinteressant. Allerdings wird derzeit – noch – der Herstellungsprozess des FVW nur sehr bedingt in der Bauteilkonstruktion und -auslegung berücksichtigt.

## Aufgabe für MAI Design

Eine durchgängige Prozesssimulation trägt entscheidend zur effizienten Entwicklung der automatisierten Fertigungsprozesse bei. Im Verbundprojekt MAI Design sollten folgende drei Fertigungsschritte simuliert werden: 1) der Ablege- und Umformprozess von Halbzeugen wie etwa trockenen Fasergelegen, 2) der anschließende Füllprozess mit Harz und 3) der Aushärteprozess, der nach dem Abkühlen von bis zu 180° C auf Raumtemperatur zu Eigenspannungen im Bauteil und zu Verformungen führt.

Die Verbindung zwischen einzelnen Fertigungssimulationsbereichen, also die Integration in eine Simulationskette bzw. Plattform, war ein wichtiger Punkt (Abb. 1). Im Sinne einer ganzheitlichen Nachweisphilosophie wurde die Integration auf die Bauteilauslegung erweitert, um Fertigungseinflüsse direkt mit einbinden zu können. Auch wurde im Hinblick auf zunehmende Großvolumenfertigung ein Ansatz zur Auswahl von faser- und fertigungsgerechten Composite-Bauweisen erarbeitet.

Abb. 1: Beispielhafte Abfolge Prozesssimulationskette [TUM – LCC]  
Fig. 1: Exemplary process simulation sequence [TUM – LCC]



Results from MAI Design: Design to manufacturing and design to fiber for high performance composite materials

**Within the project MAI Design from the cluster MAI Carbon embedded in the Carbon Composites eV (CCeV), a unique material and structure understanding has been developed covering the entire design and manufacturing process chain of carbon fiber reinforced plastics (CFRP), dedicated to the optimal use of the material. A collaboration of partners from the automotive and aerospace industries, mechanical engineering, engineering service providers, software companies as well as academia consolidated the fundamentals to a broad basis and proved industrial applicability.**

Lightweight construction is highly relevant for aerospace, automotive and mechanical engineering. Due to increasing capabilities for large-scale production of composite structures, the design to fiber of the component is emphasized. To date, consideration of the composite manufacturing process is very limited in component analysis and design. A continuous production simulation chain for composites up to component layout is – yet – not available.

## The task within MAI Design

Process simulation contributes significantly to the efficient development of automated production processes. The following three production steps should be simulated: 1) the deposition and forming process of semi-finished products, such as dry fiber layers, 2) the subsequent filling process with resin and 3) the curing process, which results in residual stress and deformation after cooling to room temperature from up to 180°C.

The interconnection between individual process simulation steps, i.e. the integration into a simulation chain or platform, was a core point in the MAI Design project (Fig. 1). In this way, the manufacturing effects can be directly linked to structural the sense of a holistic substantiation philosophy. Additionally, an approach to selecting a fiber and production suitable composite design was developed against the background of the increasing production volume.

MAI Design unterstützte als „Enabler“-Projekt die Cluster-Ziele Zykluszeit, Prozesskosten, Automatisierungsgrad und Reduktion der Ausschussquote über den gesamten Prozess.

## Am Beispiel lernen

Es wurden zwei globale Demonstratoren für alle Arbeitspakete definiert:

- Lintel (Türsturz) eines Flugzeugrumpfes von Premium Aerotec (Abb. 2)
- A-Säule des Roding Roadster (Abb. 3): Um den Fertigungseinfluss auf die Bauweise zu bestimmen, wurden Prepregablage mit Autoklavaushärtung und Preformherstellung durch Umformung von Multiaxialgelegen oder durch Flechten mit anschließendem RTM zur Harzinfiltration und Aushärtung untersucht, ebenso die Fertigung mit endlosfaserverstärktem Thermoplast (Fiberforge, Pressumformen der Halbzeuge, Verkleben oder Verschweißen der Elemente). Die Geflechtbauteile wurden einem quasistatischen Strukturversuch (Dacheindrücktest) unterzogen.

Daneben gab es weitere Demonstratoren innerhalb der jeweiligen Arbeitspakete, zum Beispiel projektübergreifend zwischen MAI Plast und MAI Design die Umformung eines endlosfaserverstärkten Thermoplasthalbzeugs an einer Schikanengeometrie oder der Klammer zur Befestigung der A-Säule am CFK-Monocoque des Roding Roadster.

As an enabler project, MAI Design supported the cluster goals cycle time, process cost, automation level and reduction of the scrap rate over the entire process.

## Learning by Doing

Two global use cases have been defined across all work packages:

- Lintel (Türsturz) of a fuselage from Premium Aerotec (Fig. 2): Study of the whole production chain utilizing the simulation platform up to structural analysis.
- A-pillar of the Roding Roadster (Fig. 3): In order to determine the effect of the manufacturing process on the design, prepreg deposition combined with autoclave cure, preforming by transforming multiaxial layers (non-crimp fabrics, NCF) or braiding technique with subsequent resin transfer molding (RTM) method for resin infiltration and curing has been investigated, as well as the production with continuous fiber reinforced thermoplastics (fiberforge process with subsequent bonding or welding of the elements). The braided components were subjected to a quasi-static structural test (roof penetration test).

In addition, individual use cases have been chosen for each work package. For instance, the forming of a continuous fiber reinforced semi-finished thermoplastic part on a chicane geometry was consi-

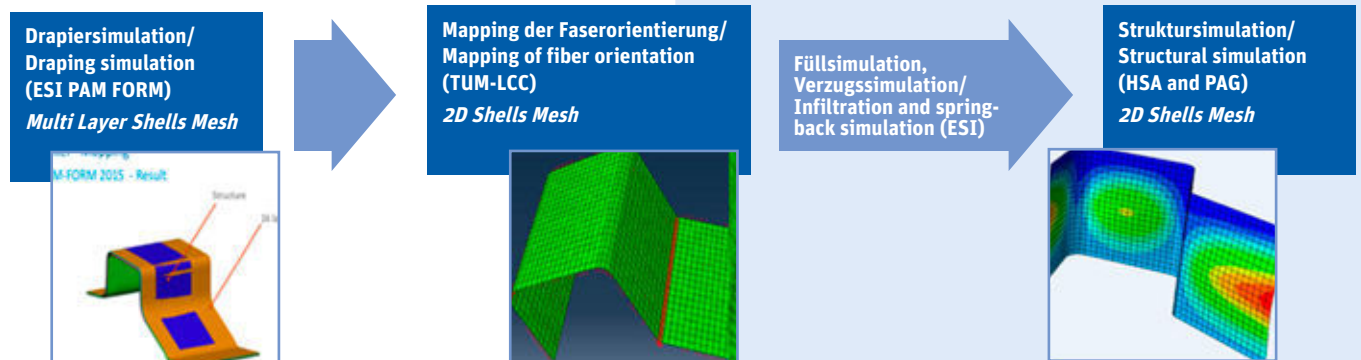


Abb. 2: Simulationsplattform am Beispiel eines Lintel (Türsturz)

Fig. 2: Simulation platform applied on a lintel

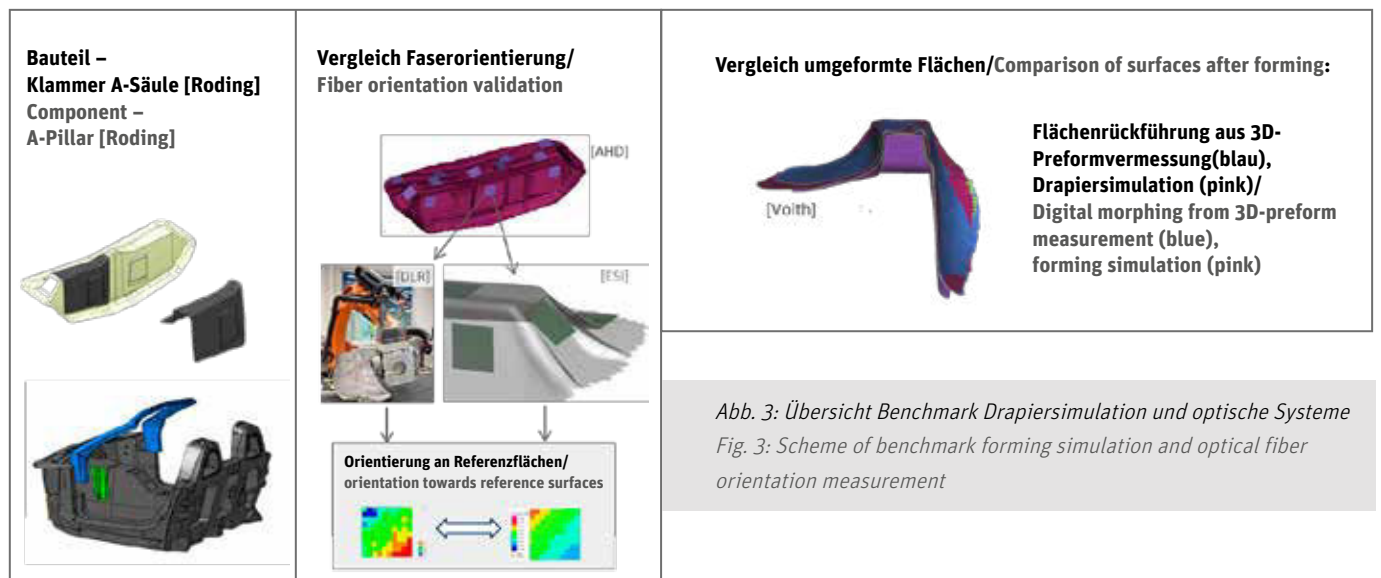


Abb. 3: Übersicht Benchmark Drapiersimulation und optische Systeme  
Fig. 3: Scheme of benchmark forming simulation and optical fiber orientation measurement

Für die Umformung der Multiaxialgelege werden unterschiedlicher FE basierte Ansätze auf Meso- und Makroebene (Abb. 4) und kinematische Simulationsansätze untersucht sowie verschiedene optische Messtechniksysteme (EuroPass, Pro-Factor, Automation W&R) zur Ermittlung der Faserorientierung und Validierung der Simulationsergebnisse verglichen.

### Fertigungseffekte umfassend verstehen

Weiteres Forschungsziel war ein Optimierungsansatz für die fertigungsgerechte Auslegung von Bauteilen unter Berücksichtigung von Fertigungsrandbedingungen bei Flechten, AFP und Pultrusion. Dazu wurde gesammeltes Expertenwissen zur Modellierung bzw. Quantifizierung von Fertigungsaufwänden via Inferenzlogik in quantitative Modelle überführt. Die Integration dieser Modelle in den Optimierungsprozess zusammen mit Aspekten der Strukturmechanik führte zu einer ganzheitlichen modellgestützten Entwurfsoptimierung.

### Nachhaltiges Leuchtturm-Projekt

Das gemeinsame Ziel, die Effizienz von Faserverbundstrukturen durch die Entwicklung und Validierung einer virtuellen Produkt- und Prozessentwicklungsplattform zu steigern, wurde durch eine bisher einzigartige branchenübergreifende und interdisziplinäre Zusammenarbeit selbst zwischen verschiedenen Automobilherstellern erreicht. Aus der Sondierung des technologischen Iststands in Herstellprozess- und Struktursimulation mit Fokus auf aktuelle und zukünftige Anwendbarkeit im industriellen Umfeld konnten zudem relevante neue wissenschaftliche Fragestellungen abgeleitet und in Anschlussprojekten adressiert werden.

Beispielsweise wurden die gefundenen Lücken in der Materialmodellierung und bei der Entwicklung von Charakterisierungsmethoden erfolgreich im Projekt MAIForm geschlossen. Die Vorhersage des Bauteilverzugs scheidet oft noch an der fehlenden Integration in den Produktentwicklungsprozess. Im Rahmen von MAI-TAI wurden die notwendige und die verfügbare Informationstiefe in Konzept-, Vor- und Detailentwurfphase mit diversen Ansätzen zur Verzugsvorhersage zusammengeführt. Strategien zur effizienten Erstellung der Simulationsmodelle reduzierten die Feedback-Zeiten zusätzlich. Die Ergebnisse aus der Materialmodellierung flossen in die Projekte MAI Last und MAI Hiras sowie in Folgeprojekte in Lufo 5.2 ein.

Zahlreiche Workshops und Veranstaltungen auf nationaler wie internationaler Ebene, z.B. gemeinsam mit Prof. Ramesh Talreja und Prof. Stephen Tsai, trugen die Ideen von MAI Design in die Breite von Forschung und Anwendung. Dies gipfelte in der von MAI Carbon und MAI Design sowie der TUM mitveranstalteten „17<sup>th</sup> European Conference on Composite Materials“ (ECCM17) mit über 1.250 Teilnehmern.

Das entstandene Netzwerk wirkt zudem in den Unterarbeitsgruppen des CCeV nach, beispielsweise in „Herstellprozesssimulation“ oder „Engineering“, und führt dort Themen und Inhalte rund um Faserverbundsimulation fort.

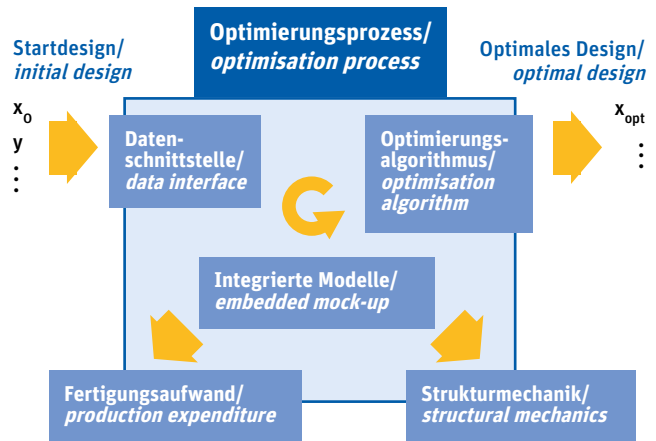


Abb. 4: Design-Optimierungsprozess

Fig. 4: Design optimisation scheme

dered across the two projects MAI Plast and MAI Design. Another example is the bracket to attach the A-pillar to the CFRP mono-coque of the Roding Roadster: Forming of the NCFs has been modeled utilizing different finite element (FE) based approaches on meso level und macro level as well as using kinematic approaches. Various optical measurement systems (EuroPass, Pro-Factor, Automation W & R) to determine the fiber orientation distribution were benchmarked and used to validate the simulation results.

### Extensive understanding of production effects

A further research objective was the implementation of an optimization approach for the design to manufacturing taking into account production boundary conditions. This involved the processes of braiding, automated fiber placement (AFP) and pultrusion. In a first step, the expert knowledge on the modeling as well as a quantification of production efforts was collected and converted into quantitative models via inference logic. The integration of these models into the optimization process together with aspects of structural mechanics led to a holistic model-based design optimization scheme.

### Sustainable Lighthouse-project

The common goal of increasing the efficiency of composite structures through the development and validation of a virtual product and process development platform has been achieved by a unique, cross-sectoral and interdisciplinary collaboration even between different automotive manufacturers. From the comprehensive exploration of the technological status quo in the individual aspects of manufacturing process and structural simulation with a focus on current and future applicability in an industrial setting, very relevant new scientific questions popped up and were addressed in follow-up projects.

For example, the benchmark carried out with various draping simulation approaches revealed gaps in both material modeling and the development of characterization methods, which were success-

fully addressed and bridged in the MAIForm project. A limiting factor for the effective use of approaches for predicting spring-in is high preprocessing efforts, e.g. on meshing and material assignment. By developing strategies for the efficient generation of the simulation models within the project MAI-TAI, the feedback times were significantly reduced and the integration of the spring-back analysis in the product development process was significantly improved.

The results from activities in the field of material modeling and mechanical analysis were transferred into the projects MAI Last and MAI Hiras and beyond the MAI Carbon framework in follow-up projects such as Lufo 5.2.

Numerous workshops and events at national and international level, e.g. together with Prof. Ramesh Talreja and Prof. Stephen Tsai, spread the ideas of MAI Design into the breadth of research and application. This culminated in the "17<sup>th</sup> European Conference on Composite Materials" (ECCM17) co-hosted by MAI Carbon / TUM-LCC and MAI Design, with over 1,250 participants.

Enhancements of simulation building blocks within the framework of the MAI Design project as well as the utilization in the form of guidelines and the associated increase in the degree of maturity has made a major contribution to the direct transfer of research output into technological innovation. The formed network of individuals sustains in the subgroups of the CCeV, for example the group "manufacturing process simulation" and "engineering", and is there continued as an exchange platform on composite simulation topics.

**Weitere Informationen/Further information:**

**Dipl.-Ing. Dr. techn. Roland Hinterhölzl**

Projektkoordinator MAI Design, Technische Universität München, zzt. Professur für Composites FH OÖ/  
Project coordinator MAI Design for Technical University of Munich, current: Professorship for Composites, FH OÖ Campus Wels, +43 (0)5 0804 / 445 50, roland.hinterhoelzl@fh-wels.at

**Dr.-Ing. Mathias Hartmann,**

Technische Universität München, Lehrstuhl für Carbon Composites (LCC)/Technical University of Munich, Chair of Carbon Composites, +49 (0)89 289 10313, hartmann@lcc.mw.tum.de

**Projektpartner MAI Design/Project partners within MAI Design**

Aerostruktur Faserverbundtechnik GmbH, Airbus Group Innovations, Airbus Helicopters Deutschland GmbH, Audi AG, Automation W+R GmbH, BMW AG, CADCON Ingenieurgesellschaft mbH & Co. KG, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V., ESI Engineering System International GmbH, Fraunhofer-Einrichtung für Gießerei-, Composite- und Verarbeitungstechnik IGCV, Hochschule für angewandte Wissenschaften Augsburg, KSB AG, Premium AEROTEC GmbH, Roding Automobile GmbH, TU München – Lehrstuhl für Carbon Composites, TU München – Lehrstuhl für Leichtbau, Universität der Bundeswehr München, Voith Composites GmbH & Co. KG

CCOR

leichtbau ist  
unser antrieb.

entwicklung und herstellung  
von leichtbaukomponenten  
aus faserkunststoffverbund

- Marinesysteme
- Windenergie
- Automotive
- Maschinen- und Anlagenbau
- Sonderanwendungen

**:CCOR**  
lightweight  
components

Durchmesser bis  
**1.500 mm**

Länge bis  
**13.000 mm**

Gewicht bis  
**20 t**

Lastübertragung bis  
**10.000 kNm**

design  
engineering  
herstellung



by Schäfer MWN GmbH  
Reinlingen (Germany)