

SIMULATION VON ALUMINIUM-CFK-KLEBUNGEN

Hybride Strukturen einfach und effizient berechnen

Die detaillierte simulative Abbildung von Klebverbindungen stellt den Konstrukteur in Hinblick auf Modellkomplexität und Rechenzeit zumeist vor große Herausforderungen. Vereinfachte und effiziente Simulationsverfahren erlauben den wirtschaftlichen Einsatz rechnerunterstützter Auslegungsmethoden bereits in frühen Phasen der Produktentwicklung – ohne Ergebniseinbußen hinnehmen zu müssen.

CHRISTIAN WITZGALL, MARKUS
KELLERMEYER, SANDRO WARTZACK

Der gemeinsame Einsatz so verschiedener Werkstoffe wie Aluminium und kohlenfaserverstärkter Kunststoffe (CFK) bringt durch optimale Materialausnutzung einerseits großes Potential für Leichtbauanwendungen, andererseits aber auch zahlreiche Problemstellungen für den Konstrukteur mit sich. Die genannte Materialpaarung kann beispielsweise in Leichtbautürmodulen (Bild 1) angetroffen werden, wo Anbauteile wie Fensterheberschienen aus Aluminium auf ein Modul aus CFK montiert werden. Die Auslegung und vereinfachte numerische Simulation solcher zumeist geklebter Fügeverbindungen ist das Ziel eines öffentlich geförderten Forschungsprojekts, das von den Unternehmen Brose, Cadfem, Dynardo und dem Lehrstuhl für Konstruktionstechnik der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg bearbeitet wird.

Um den Einsatz der Simulation zur Absicherung der Produkteigenschaften bereits in frühen Phasen der Produktentwicklung zu ermöglichen, muss die Waage zwischen Ergebnisgüte und Modellierungsaufwand gehalten werden. Dazu wird eine Methodik generiert, die die Verwendung vereinfachter, auf

Metamodellen basierender Simulationsverfahren erlaubt. Die grundsätzlichen Arbeitsschritte zeigt Bild 2: Zunächst werden die zu untersuchenden Parameter und ein Versuchsplan festgelegt sowie ein Prüfaufbau konstruiert. Aus diesem ist ein detailliertes, parametrisches Simulationsmodell zu erstellen, das den gesamten Versuchsraum abdecken soll. Die Ergebnisse der experimentellen und virtuellen Charakterisierung werden verglichen, um das Simulationsmodell möglichst exakt zu kalibrieren. Aus dem kalibrierten Detailmodell wird in einer Vielzahl von Simulationen ein Metamodell optimaler Prognosefähigkeit generiert, das die Basis für die vereinfachte Simulation darstellt. In dieser werden zur Modellierung der Klebverbindung Kontaktelemente verwendet, die auf die Da-



Bild 1: Brose-Leichtbautür

tenbasis des Metamodells zugreifen und den Modellierungsaufwand der Detailsimulation einsparen. Auf die einzelnen Schritte zur Generierung eines vereinfachten Simulationsmodells, insbesondere der experimentellen und virtuellen Charakterisierung der Klebverbindung sowie auch der abschließenden Validierung des Simulationsverfahrens soll im Folgenden näher eingegangen werden.

Versuchsaufbau

Zur Charakterisierung der Klebverbindung wird eine modifizierte KS2-Probe verwendet, wie sie in Bild 3 dargestellt ist. Mit ihr können im einachsigen Zugversuch innerhalb der Klebfuge überlagerte Spannungszustände aus Normal- und Schubspannungen erzeugt werden. Geprüft wird eine Klebraupe aus semi-strukturellem Polyurethanklebstoff von 40 x 8 mm zwischen Aluminium- und CFK-Plättchen, der seriennah bei Raumtemperatur verarbeitet und ausgehärtet wird. Die Prozessrandbedingungen des Klebens sind so konstant wie möglich zu halten.

Die Versuchsdurchführung erfolgt auf einer servohydraulisch betriebenen Schnellzerreißanlage (Bild 4), die den erforderlichen Geschwindigkeitsbereich zur Abdeckung der Crashlastfälle abdeckt. Zur Durchführung der Hoch- und Tieftemperaturversuche steht eine in den Prüfstand integrierte Temperaturkammer zur Verfügung. Aufgenom-

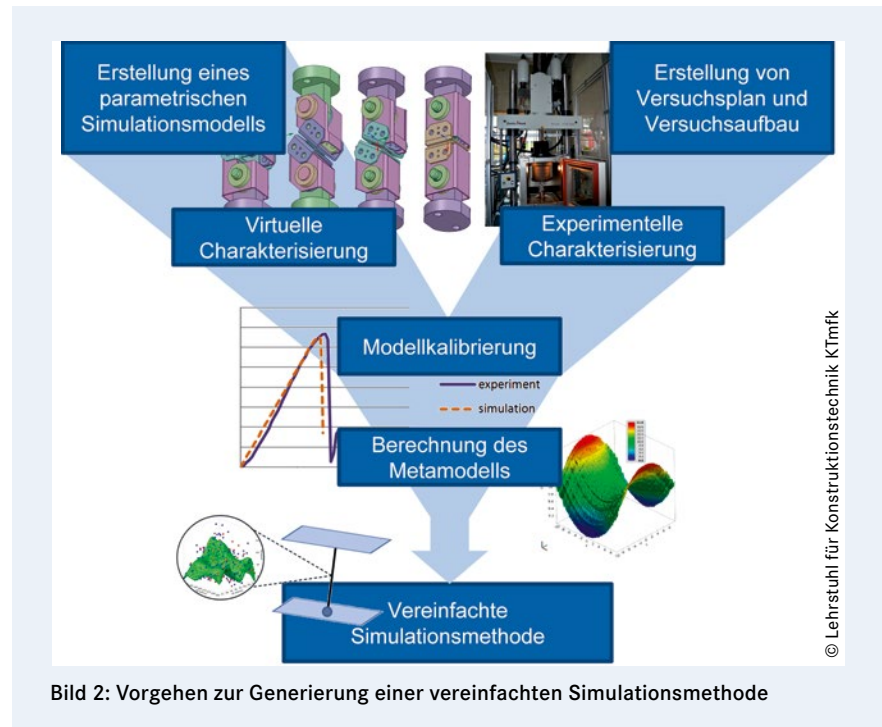


Bild 2: Vorgehen zur Generierung einer vereinfachten Simulationsmethode

men werden Kraft-Weg-Kurven, die die Basis für den späteren Abgleich mit der Simulation bilden.

Parameterraum

Als relevante Parameter zum Nachbilden verschiedener Lastszenarien werden der Anstellwinkel gegenüber der Zugrichtung, die Versuchsgeschwindigkeit und -temperatur sowie das Spaltmaß der Klebnaht und der Lagenaufbau des CFK-Laminats variiert. Aus den Parametern und ihren verschiedenen Stufen ergibt sich der Parameterraum, wie

er in Bild 5 exemplarisch für drei Parameter dargestellt ist.

Mit den durchgeführten Experimenten werden gemäß D-optimaler Versuchsplanung bevorzugt die Grenzpunkte sowie einige innenliegende Versuchspunkte des Parameterraums geprüft. Die einzelnen Versuchspunkte unterscheiden sich dabei in einer möglichst großen Anzahl von Parameterausprägungen. Durch die hohe Anzahl der Parameter und Parameterstufen ist eine vollständige Raumabdeckung durch Experimente allein jedoch nicht möglich.

**Reinhardt
Technik**

Dosiertechnik in neuen Dimensionen
Überzeugen Sie sich!



ContiPro™



Conti Flow Vario



LSR ELA



PRODUCTRONICA
München, 40 Jahre
10. - 13. November
Halle A4, Stand 315



eZbot™



FAKUMA 24
Friedrichshafen
13. - 17. Oktober
Halle A3, Stand 3101

WAGNER GROUP

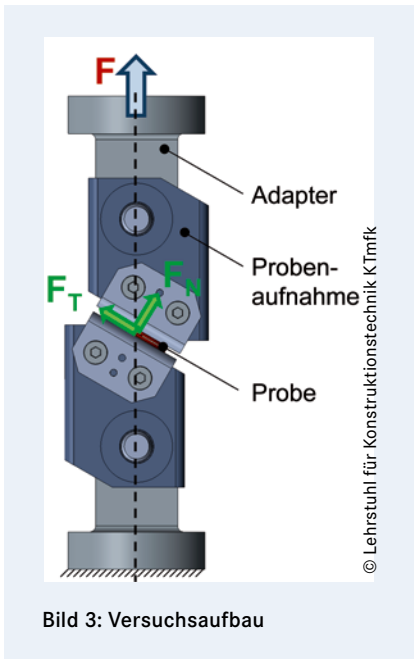


Bild 3: Versuchsaufbau



Bild 4: Servohydraulische Hochgeschwindigkeitsprüfanlage mit Temperaturkammer

Detailsimulation

Anhand der experimentell ermittelten Ergebnisse zur Charakterisierung der Fügeverbindungen wird deshalb ein detailliertes Simulationsmodell erstellt und kalibriert, mit dessen Hilfe weitere Punkte des Versuchsraumes abgedeckt werden können. Damit kann der Umfang der zur Verfügung stehenden Daten weiter vergrößert werden. Die Ergebnisse der durchgeführten Experimente dienen als Anforderungen an

die Modellierung der Detailsimulation. Diese muss die in der Praxis auftretenden Versagensarten abbilden können, wie in Bild 6 dargestellt: adhäsives Versagen der Klebverbindung auf der Aluminium-Oberfläche, kohäsives Versagen innerhalb der Klebschicht und Delamination des CFK-Schichtaufbaus.

Das Simulationsmodell basiert auf einem parametrisierten Geometriemodell, in dem die Winkel des eingespannten Probestücks sowie die Dicke der

Klebschicht variiert werden können. Die Geometrie liegt immer in der Schwereachse. Würde also das Modell im starren Zustand gezogen werden, so stellen sich keine Querkräfte ein. Es sind Winkelvariationen von 0° bis 90° gegenüber der Zugachse sowie Klebschichtdicken von 0,3 bis 1,0 mm möglich. Für die Klebschicht wurde ein viskoelastisches Materialverhalten verwendet, das bei Veränderung der Temperatur unterschiedliches Verhalten zeigt.

Zur Abbildung des adhäsiven Versagens auf der Aluminiumoberfläche und der Delamination im CFK-Schichtaufbau werden im Simulationsmodell Kontaktelemente mit sogenanntem Kohäsivzonen-Ansätzen verwendet. Dabei werden jene Trennschichten mit diesen Kontaktelementen ausgestattet, die auch im Versuch zu einem Versagen geführt haben. Die numerisch sensible Berechnung dieser Kontakte erfolgt mit einem impliziten Lösungsverfahren und muss robust für alle zu berechnenden Versuchspunkte ausgelegt werden. Da das auszuwertende Spaltmaß im Verhältnis zur Gesamtdeformation sehr klein ist, muss eine sehr feine Vernetzung gewählt werden, um eine gute Elementqualität zu gewährleisten. Diese ist in Bild 7 dargestellt: Die einzelnen

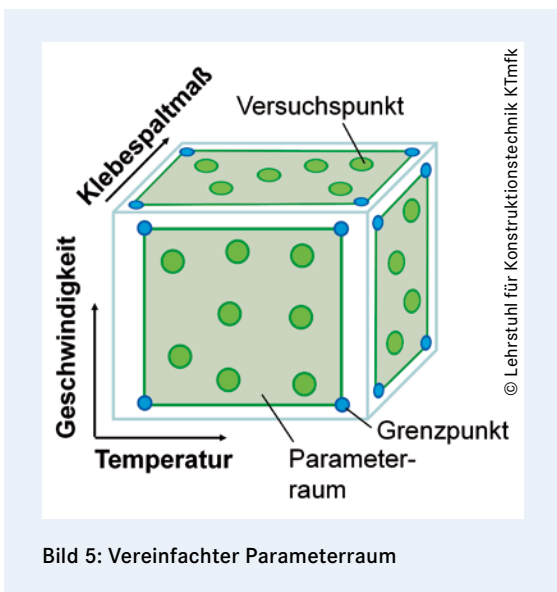


Bild 5: Vereinfachter Parameterraum

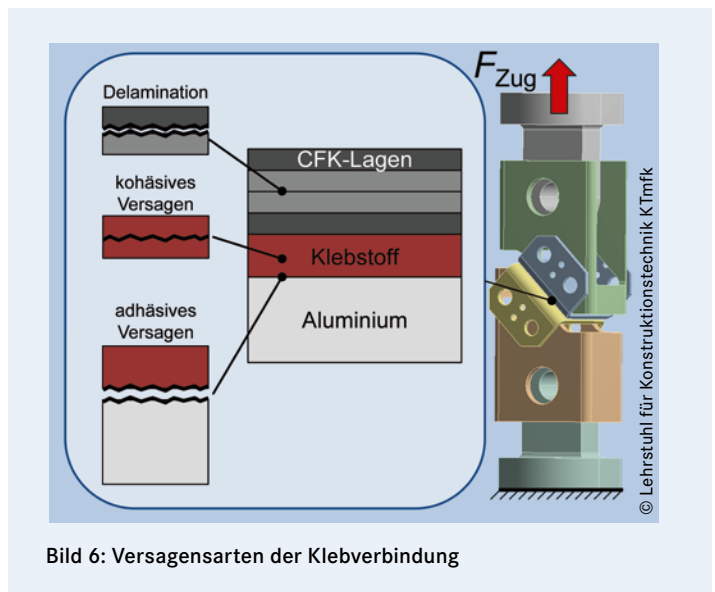


Bild 6: Versagensarten der Klebverbindung

Laminatschichten des CFK werden ihrer Schichtdicke und ihrer Faserorientierung entsprechend mit jeweils einer Lage dreidimensionaler Elemente vernetzt, um die Zwischenschichtdelamination abbilden zu können. Klebstoff und Aluminium werden ebenfalls mit je zwei dreidimensionalen Elementen über die Dicke modelliert und mit den entsprechenden Materialkennwerten belegt. Die Analyse erfolgt in zwei Schritten: In einem ersten Schritt wird das Modell quasistatisch erhitzt bzw. abgekühlt. Dabei wird eine thermische Ausdehnung der Versuchsvorrichtung nicht behindert. Die Kraftreaktion an der Einspannstelle ist Null. Im zweiten Schritt wird das Modell anschließend mit der definierten Geschwindigkeit gezogen, bis eines der beschriebenen Versagen eintritt. Das

Verhalten der Trennschichten und die Dämpfungsparameter sind zunächst unbekannt, sie müssen mittels Parameteridentifizierung bestimmt werden.

Modellkalibrierung

Das vollständig parametrisierte Berechnungsmodell kann durch Dämpfungsparameter und die definierten Kohäsivzonen-Parameter auf die Versuchsergebnisse kalibriert werden. Diese Parameter umfassen die maximale Kontakt-Normalspannung, die kritische Bruchenergiegedichte in Normalenrichtung (flächenbezogene Energie), die maximale äquivalente Kontakt-Tangentialspannung sowie die kritische Bruchenergiegedichte in Tangentialrichtung. Die Berechnung wird nach Erreichen des auszuwertenden Zeitpunkts sowie dem vollständigen Ablösen

gestoppt und automatisch ausgewertet. Dabei wird eine Kraft-Weg-Kurve, so wie sie im Versuch ermittelt wurde, aus dem Simulationsmodell abgeleitet.

Für die Modellkalibrierung werden aus einem Simulationsmodell mit Hilfe von fünf Parametern 30 Modelle erstellt, welche dem zuvor definierten Versuchsplan entsprechen. Weitere 25 Parameter werden mittels Optimierungsalgorithmus angepasst, um für die 30 Modelle eine möglichst gute Übereinstimmung mit den Versuchen zu erzielen.

Sensitivitätsanalyse und Modellabstraktion

Auf Basis der berechneten Parameterkonfigurationen erfolgt anschließend eine Sensitivitätsanalyse, um wichtige Eingangsparameter für die vereinfach-

+++ news +++ news +++ news +++ news +++

**TOP-NEWS aus der Welt
der Klebtechnik
per E-Mail!**

Bestellen Sie jetzt!

www.adhaesion.com

+++ news +++ news +++ news +++ news +++

Leimauftragsmaschine
auch für Öle, Wachse, Lacke...
Dosierbar 3 g/m² bis 400 g/m²
Edelstahl!



Axel Wirth Maschinen GmbH
D-73447 Oberkochen · Tel. 0049(0)7364/8580 · Fax 6457
Internet: www.axel-wirth-maschinen.de
e-Mail: info@axel-wirth-maschinen.de



ViscoTec Dosiertechnologie

Überlassen Sie die Qualität in der Dosierung nicht dem Zufall. Höchste Mengengenauigkeit und Zuverlässigkeit in Ihren Prozessen - auch bei hochviskosen oder schersensitiven Medien - sind die wichtigsten Faktoren für eine ausgereifte Dosieranwendung. Perfekt dosiert mit ViscoTec!

Die Firma ViscoTec beschäftigt sich als Premiumanbieter mit anspruchsvollen Dosieraufgaben und setzt mit einem ausgereiften Produktportfolio sowie umfangreichem Prozess-Knowhow in der Dosiertechnologie vielfach neue Maßstäbe. Wir bieten für jede Aufgabenstellung eine umfassende Beratung und können mit unseren Kunden im firmeneigenen Technikum Prozesse gemeinsam entwickeln und qualifizieren. Wir verbessern unsere Produkte kontinuierlich, bringen neue Ideen auf den Markt und legen höchsten Wert auf Qualität und Service.



Dosiertechnik in Perfektion!
www.viscotec.de

ten Berechnungsmodelle zu identifizieren. Dabei wird das Metamodell optimaler Prognosefähigkeit (MOP) in Kombination mit einer varianzbasierten Sensitivitätsanalyse eingesetzt, um auch stark nichtlineare und gekoppelte Zusammenhänge zu erkennen. Das Wissen um den quantitativen Einfluss der verschiedenen Parameter auf das Verhalten der Fügeverbindung bildet die Grundlage für die angestrebte Abstraktion des Berechnungsmodells. Als dominierende Haupteffekte lassen sich die Versuchsgeschwindigkeit und die Temperatur identifizieren.

Das abstrahierte Ersatzmodell wird als finites Element in ein implizites und explizites Simulationswerkzeug integriert und anhand von Lastverschiebungsbeziehungen mit dem Detailmodell abgeglichen. Dabei kann auf das gebildete Metamodell zugegriffen werden, das die Beziehung zwischen den Eingangsgrößen und der Kontaktsteifigkeit kontinuierlich beschreibt.

Validierung des Abstraktionsmodells

Nachweisen lässt sich die Validität des vereinfachten Simulationsansatzes abschließend durch den Vergleich des ge-

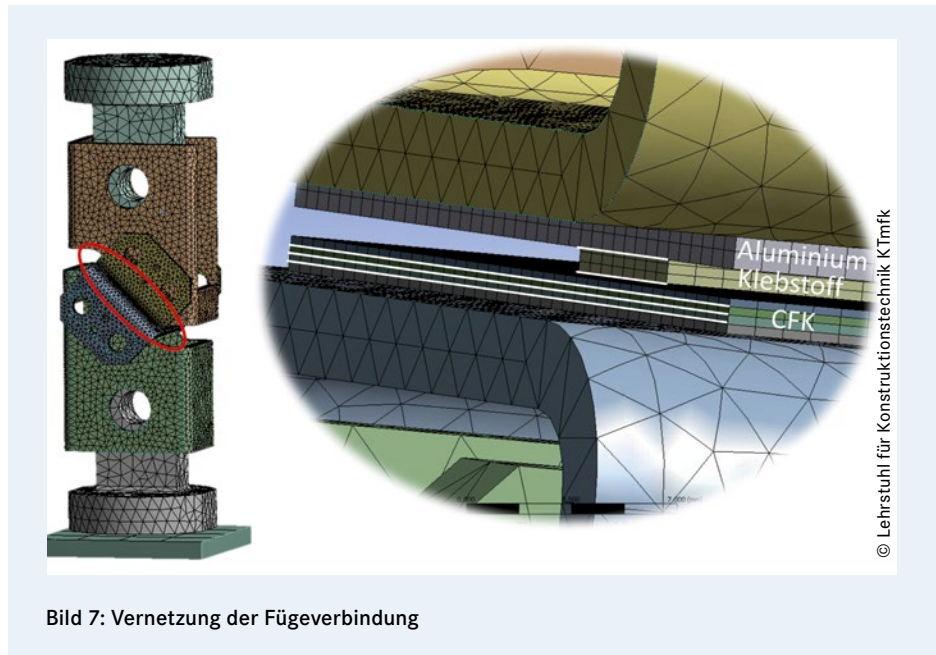


Bild 7: Vernetzung der Fügeverbindung

schaffenen Software-Demonstrators für statische und hochdynamische Lastfälle mit Komponententests an Fahrzeugtüren. Zur Ermittlung der Rahmensteifigkeit wird die Fahrzeugtür am Türrahmen mit einer horizontal ausgerichteten Last beaufschlagt. Die Kraftangriffspunkte liegen am oberen Rahmen nahe der B-Säule sowie in der Rahmenmitte (Bild 8 a und b). Dieser Lastfall entspricht der nach außen gerichteten Sogwirkung einer Fahrzeugtür bei hohen Fahrgeschwindigkeiten. Die vertikale Steifigkeit wird im Lastfall Türab-

senkung ermittelt, wobei im Schlossbereich eine vertikal nach unten gerichtete Kraft eingeleitet wird. Dadurch sollen im Vorfeld hohe Verformungen ausgeschlossen werden, um sicherstellen zu können, dass das Schloss beim Schließen der Fahrzeugtür den Schließbügel trifft (Bild 8 c). Bei beiden zuvor genannten Lastfällen hängt die Systemsteifigkeit deutlich von der Auslegung der Fügeverbindung ab. Zur Berücksichtigung hochdynamischer Lastfälle werden Versuche durchgeführt, die ein Unfallszenario nachbilden sollen. Solche Seiten-

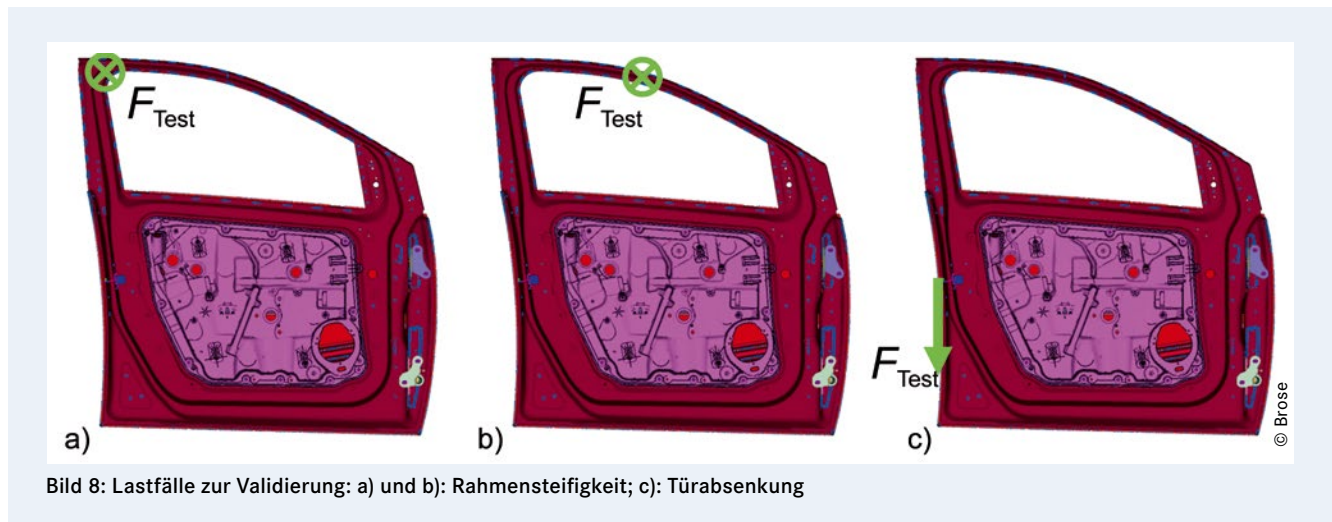


Bild 8: Lastfälle zur Validierung: a) und b): Rahmensteifigkeit; c): Türabsenkung

aufpralltests an Fahrzeugtüren werden analog automobiltypischer Lastenheftanforderungen durchgeführt und ausgewertet.

Zusammenfassung

Mit der metamodelgestützten vereinfachten Simulation der Klebverbindungen ist es möglich, den Berechnungsaufwand für die erste Absicherung der Produkteigenschaften in frühen Phasen der Entwicklung erheblich zu reduzieren. Das vorgestellte Verfahren ist prinzipiell als allgemeingültig zu betrachten und kann auch für andere Arten von Fügepartnern, Klebstof-

fen oder sogar andere Fügeverfahren wie Nieten eingesetzt werden. Die Datenbasis der gebildeten Metamodelle muss dann jedoch durch jeweils neue Versuche für die Verbindung gefüllt werden. ■

Dank

Gedankt sei dem Projektträger im DLR Berlin für die Betreuung und dem Bundesministerium für Bildung und Forschung für die Förderung des Forschungsprojekts Real4Hybrid (Förderkennzeichen 01|S13009D) sowie allen Projektpartnern für die fruchtbare Zusammenarbeit.

Die Autoren

Christian Witzgall (Tel: +49 (0)9131/85-23216, witzgall@mfk.fau.de) ist an der Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Konstruktionstechnik, als wissenschaftlicher Mitarbeiter tätig. Markus Kellermeyer arbeitet bei Cadfem in Grafing als Berechnungsingenieur. Prof. Sandro Wartzack ist Inhaber des Lehrstuhls für Konstruktionstechnik an der Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg.



Leichter dichten.

Leichter vorwärts kommen.

Merbenit® E20

Weniger Gewicht bedeutet weniger Energieverbrauch und geringere Schadstoffemissionen. Und damit bessere Umweltverträglichkeit und mehr Nachhaltigkeit.

Merbenit E20 ist genau so leistungsfähig wie herkömmliche elastische Dicht- und Klebstoffe, aber nur halb so schwer: Pro Quadratmeter Klebefläche kann damit über ein Kilogramm Gewicht eingespart werden.

Merbenit E20: besonders leicht – um leichter vorwärtszukommen.

Mehr Informationen jetzt unter www.merbenit.ch

Bondexpo Besuchen Sie uns an der Bondexpo in Stuttgart vom 5. bis 8. Oktober 2015. Halle 9, Stand 9200



merz+benteli ag
more than bonding