

# FUNKTIONSINTEGRIERTE DUROMERE FASERVERBUNDWERKSTOFFE FÜR NEUE ANWENDUNGEN

Steigende Anforderungen aus Politik und Gesellschaft hinsichtlich der Reduktion von Kraftstoffverbrauch und Emissionen von Fahrzeugen sind die wesentlichen Triebkräfte für Leichtbaustراتيجien im Automobilbau. Der zielgerichtete Einsatz von Faserverbundwerkstoffen ermöglicht dabei eine signifikante Reduktion des Fahrzeuggewichtes bei teilweise auch gesteigerter Funktionsintegration. Im folgenden Beitrag werden vier aktuelle Projekte vorgestellt, die duromere Faserverbundwerkstoffe im Bereich von Karosseriekomponenten und im Antriebsstrang zum Einsatz bringen.

## Lokale Endlosfaserverstärkung von Sheet Molding Compound für den Einsatz im Automobilbau

Ein Beitrag von P. Griesbaum und S. Ilinzeer

### Motivation und Zielsetzung

Die Verarbeitung von SMC im Fließpressprozess ermöglicht die Abbildung komplexer Geometrien, wodurch SMC Designfreiheit und ein hohes Maß an Funktionsintegration bei der Gestaltung von Bauteilen ermöglicht. Neben kurzen Zykluszeiten und vielfältig einstellbaren Materialeigenschaften bietet SMC zudem relativ geringe Materialkosten. Allerdings sind die mechanischen Eigenschaften von herkömmlichem SMC aufgrund der diskontinuierlichen Faserverstärkung begrenzt, insbesondere im direkten Vergleich zu endlosfaserverstärkten Kompositen [1]. Diese weisen überlegene mechanische Eigenschaften auf, sind aber mit hohen Materialkosten verbunden und lassen sich nur in Bauteilen niedriger Komplexität verarbeiten. Um den Einsatz von SMC in strukturellen Anwendungen zu ermöglichen bietet sich eine gezielte Kombination von SMC mit einer Endlosfaserverstärkung an, wodurch sowohl die hohe Designfreiheit des SMC als auch die guten spezifischen mechanischen Eigenschaften der Endlosfaserverstärkung zum Tragen kommen. Das Co-molding von diskontinuierlich verstärktem SMC mit kontinuierlich verstärktem Prepreg bietet damit ein hohes Leichtbaupotential in strukturellen Anwendungen, ist aber auch mit Herausforderungen hinsichtlich der Harzformulierung und Prozessführung verbunden [2].

### Der Co-molding Prozess

Die Herstellung von herkömmlichen SMC-Bauteilen lässt sich im Wesentlichen auf zwei Prozessschritte

reduzieren: Das SMC-Halbzeug wird zunächst auf einer Flachbahnanlage hergestellt bevor es anschließend in einem Fließpressprozess unter relativ hohen Temperaturen und Drücken zu Bauteilen verarbeitet wird. Zwischen den beiden Prozessschritten liegt typischerweise die Materialreifung. Dabei steigt zunächst die Viskosität des Harzes kontinuierlich bevor sich in der sogenannten B-stage ein nahezu stabiles Viskositätsniveau einstellt [3]. Bei Kontakt zwischen Material und der heißen Werkzeugoberfläche im Pressprozess sinkt die Harzviskosität zunächst wieder. Das Material wird fließfähig und füllt die Werkzeugkavität, bevor es durch die räumliche Vernetzung der Polymerketten aushärtet.

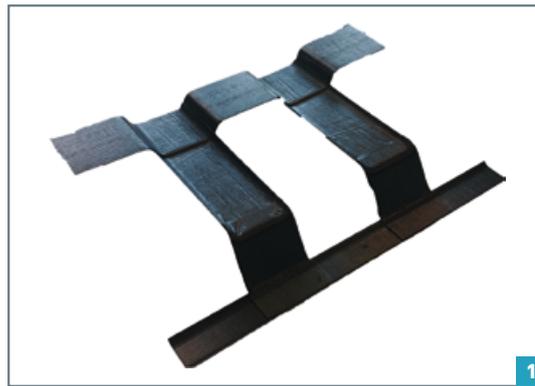
Die zentrale Herausforderung bei der Entwicklung eines Prozesses für das Co-molding von SMC mit kontinuierlich verstärktem Prepreg liegt in den gegensätzlichen Anforderungen an das Fließverhalten der beiden Komponenten. Das SMC muss fließfähig sein um eine vollständige Formfüllung zu gewährleisten. Die Endlosfaserverstärkung muss hingegen möglichst steif und hochviskos sein um einer Verschiebung bzw. Deformation durch die beim Fließen des SMCs wirkenden Kräfte widerstehen zu können. Auch müssen die Harzkomponenten der beiden Materialien kompatibel sein um eine gute Anbindung zu gewährleisten. Um diese Anforderungen zu erfüllen wird am Fraunhofer ICT ein hybrides Harzsystem eingesetzt welches zwei unterschiedliche chemische Mechanismen für die Viskositätssteigerung während der Reifung und für die Vernetzung während der Aushärtung nutzt. Sowohl das SMC als auch das Prepreg basieren auf diesem Harzsystem, wobei die Harzformulierungen bei den beiden Materialien sich unterscheiden. So wurde für das Pre-

preg eine Formulierung entwickelt die in Kombination mit einer erhöhten Prozesstemperatur während der Halbzeugherstellung in einer sehr hochviskosen B-Stage resultiert. Dieses Prepreg kann unmittelbar nach der Halbzeugherstellung zugeschnitten, gestapelt und umgeformt werden um stabile, steife Preforms zu erhalten. Die Formulierung des SMCs ist hingegen so angepasst, dass ein Fließen durch einen temperaturbedingten Viskositätsabfall in der Presse stattfindet. Die Preforms werden beim Pressprozess in die untere Werkzeughälfte an die gewünschte Position eingelegt. Anschließend wird die SMC Charge mittig in die Kavität eingelegt. Während dem Pressen fließt das SMC und füllt die Kavität aus, die kontinuierliche Verstärkung verbleibt hingegen in der vorgesehenen Bauteilregion [4].

### Anwendungen

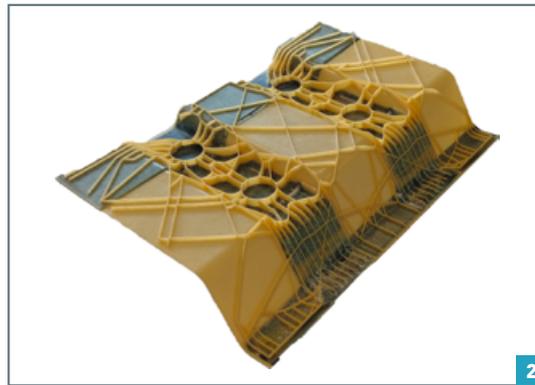
Im Forschungscluster MAI Carbon wurde im Rahmen des Forschungsprojektes MAI Q-fast der eingangs erläuterte Prozess zur Herstellung von strukturellen Bauteilen aus lokal kontinuierlich verstärkten SMC eingesetzt. Als Demonstrator wurde ein generischer Fahrzeugunterboden mit topologieoptimierter Rippenstruktur genutzt. Für die lokale Verstärkung wurde ein optimierter Lagenaufbau gewählt. Die einzelnen Prepreg-Streifen wurden zunächst automatisiert mit einem Präzisionsschneidtisch zugeschnitten, im gewünschten Lagenaufbau gestapelt und einem beheizten Preformwerkzeug drapiert. Dadurch konnte ein konturnahes Prepreg hergestellt werden, welches formstabil und gut handhabbar war, siehe **Abb. 1**. Das Prepreg wurde im nachfolgenden Pressprozess im Werkzeug positioniert, anschließend das SMC eingelegt und beides gleichzeitig verpresst. Im Laufe des Projekts wurde sowohl kohlenstofffaser- als auch glasfaserverstärktes SMC zur Herstellung von Bauteilen eingesetzt. Das auf dieser Prozessroute produzierte Bauteil ist in **Abb. 2** dargestellt. Durch die gezielte Verstärkung der SMC Struktur konnten in diesem Projekt exzellente mechanische Eigenschaften erreicht werden, welches einen Einsatz von SMC in strukturellen Anwendungen ermöglicht.

Aktuell wird der Prozess in einem Projekt im Rahmen der Profilregion Mobilitätssysteme Karlsruhe genutzt und weiterentwickelt. Im Projekt „Entwicklung von zukunftsfähigen Leichtbaubatteriesystemen“ wird eine komplexe Gehäusestruktur mit lokal kontinuierlicher Verstärkung konzipiert. **Abb. 3** zeigt ein Demonstratorbauteil mit skelettartiger Faserverstärkung, welches als Entwicklungsträger dient. Besondere Schwerpunkte des Projekts sind die Themen Flammenschutz, elektromagnetische Verträglichkeit und die Kombination der kontinuierlichen Verstärkungen mit Lasteinleitungselementen.



1

**Abb. 1:** Formstabile Preform für die lokale Verstärkung des MAI Q-fast Unterbodens



2

**Abb. 2:** MAI Q-fast Unterboden aus SMC mit lokaler Verstärkung



3

**Abb. 3:** Profilregion Batteriebox aus SMC mit skelettartiger Endlosfaserverstärkung

Der Einsatz des Co-Molding-Prozesses erlaubt die Verwendung von kostengünstigem Glasfaser-SMC bei gleichzeitig struktureller Funktion des Gehäuses durch das kontinuierliche Kohlenstofffaser-skelett. Die hohe Komplexität und Funktionsintegration des SMC-Deckels ermöglicht außerdem die Verwendung einer relativ einfachen Sandwichstruktur als Gehäuseboden.

### Danksagung

Die vorgestellten Arbeiten zur verstärkten SMC Unterbodenstruktur wurden im Projekt „MAI Q-fast“ im Rahmen des Clusters MAI Carbon durchgeführt. Projektpartner sind das Fraunhofer ICT, die Audi AG, BASF SE sowie die BMW AG. Dem BMBF gebührt Dank für die finanzielle Förderung des Projektes.

Die Profilregion Mobilitätssysteme Karlsruhe ist der Zusammenschluss der Karlsruher Institutionen für Forschung, Lehre und Innovation im Bereich Mobilitätssysteme. Die Partner im Projekt Leichtbaubatteriesysteme sind das Fraunhofer ICT und das Karlsruher Institut für Technologie. Besonderer Dank gilt auch unseren Partnern aus der Wirtschaft, Hengrui Corporation, Huntsman Advanced Materials und ARRK Engineering. Ebenso möchten wir den Förderträgern danken, dem Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst und dem Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Wohnungsbau des Landes Baden-Württemberg.

### Leichtbau im Antriebsstrang durch die Verwendung von duromeren, faserverstärkten Formmassen

Ein Beitrag von M. Laux und R. Maertens

#### Motivation und Zielsetzung

Im Gegensatz zum Strukturleichtbau mit seinen primär mechanischen Anforderungen haben Bauteile im Antriebsstrang ein vielfältiges Anforderungsprofil. Neben Festigkeits- und Steifigkeitsforderungen stehen hier insbesondere Temperatur- und Medienbeständigkeit sowie die Maßhaltigkeit der Bauteile im Vordergrund [5].

Aufgrund ihrer hervorragenden thermomechanischen Eigenschaften sowie ihrer wirtschaftlichen und endkonturnahen Fertigung im Spritzgießverfahren sind faserverstärkte duromere Formmassen sehr gut für Leichtbauanwendungen im Antriebsstrang geeignet [6]. Im Folgenden werden Beispiele aus aktuellen Forschungsprojekten im Bereich der Elektromobilität und der konventionellen Verbrennungsmotoren vorgestellt.

### Entwicklung und Validierung eines direktgekühlten Elektromotors in Kunststoffbauweise für Traktionsanwendungen

Der elektrische Antriebsstrang bildet ein zentrales Element einer umweltfreundlichen und nachhaltigen Mobilität. Aufgrund des hohen Gewichts der Traktionsbatterie werden aktuell Leichtbauansätze für alle Elemente des Antriebsstrangs verfolgt. Zugleich besteht ein hoher Kostendruck für alle Komponenten des Elektrofahrzeugs, um wettbewerbsfähig zu verbrennungsmotorisch betriebenen Fahrzeugen zu sein und somit die Technologie einer breiten Bevölkerungsschicht zugänglich zu machen. Zur gleichzeitigen Optimierung von Leistungsgewicht, Effizienz und Kosten von Elektromotoren für Traktionsanwendungen wird ein neuer Ansatz präsentiert, der sich durch eine direkte Kühlung von Stator und Rotor auszeichnet. Durch das gewählte Kühlkonzept wird die Verlustwärme direkt im Motor nahe dem Ort der Entstehung abgeführt, wodurch der Einsatz von Kunststoffen in strukturellen Motorkomponenten ermöglicht wird.

#### Konzept der direkten Kühlung

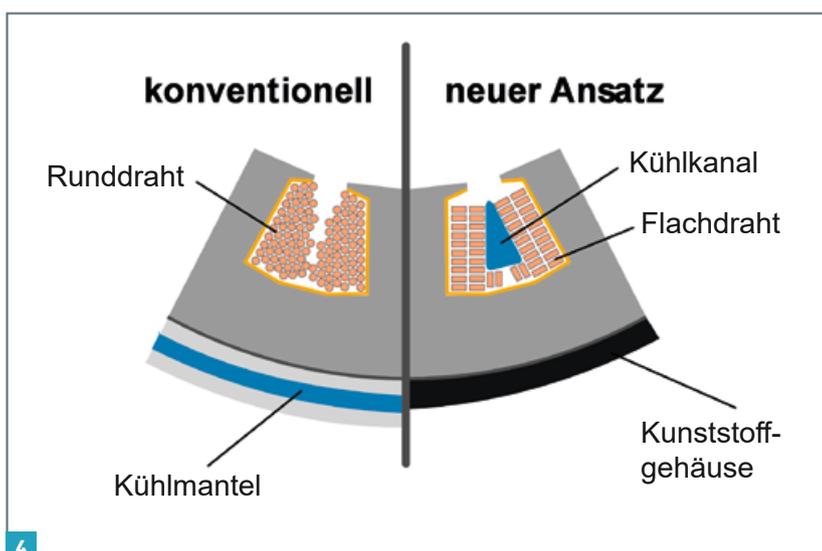
Eine zentrale Herausforderung beim Einsatz von Kunststoffen im Elektromotor ist das Thermomanagement, da aufgrund der im Vergleich zu Aluminium deutlich geringeren Wärmeleitfähigkeit ein neues Kühlkonzept entwickelt werden muss. Typischerweise besitzen Elektromotoren für Traktionsanwendungen einen Kühlmantel um den Stator, in welchem die Verlustwärme abgeführt wird. Im vorgestellten Konzept wird die Wärmeabfuhr durch innenliegenden Kühlkanäle erzielt, siehe **Abb. 4**.

Durch die Verwendung eines Flachdrahts anstelle des konventionellen Runddrahts wird zwischen zwei benachbarten Statorzähnen ein Freiraum gebildet, der zur Ausformung eines Kühlkanals genutzt wird. Somit kann die Verlustwärme direkt neben den Wicklungen abgeführt werden, sodass keine Wärmeleitung nach außen erforderlich ist. Die elektrische Isolation zwischen den Wicklungen und dem Kühlwasser wird durch eine dünne Schicht Kunststoff gewährleistet, sodass kein direkter Kontakt zwischen Wasser und Kupfer auftritt. An den beiden Stirnseiten des Motors wird das Kühlwasser über ringförmige Kanäle für Vor- und Rücklauf auf die die zwölf Nuten des Stators verteilt bzw. umgeleitet, siehe **Abb. 5**.

#### Fertigungstechnologien und Zusammenbau

Die gesamte Statorbaugruppe, bestehend aus den bewickelten und elektrisch verschalteten Einzelzähnen sowie mehreren Temperatursensoren, wird im Transfer-Molding-Verfahren mit einer hoch wär-

**Abb. 4:** Vergleich zwischen konventionellem Kühlkonzept (links) und neuem Ansatz (rechts)



meleitfähigen Epoxidharz-Formmasse umspritzt, wobei die Kühlkanäle durch Werkzeugkerne gebildet werden. Zwischen den Werkzeugkernen und der hochpräzise gefertigten Wicklung befindet sich beim Einlegen ein kleiner Luftspalt von ca. 0,5 mm, welcher während der Formfüllung von der Formmasse gefüllt wird, sodass die Isolation zwischen Kupfer und Kühlwasser gewährleistet ist. Da die Kerne im Werkzeug verbleiben, ist keine Nacharbeit am Bauteil erforderlich.

In einem separaten Spritzgießprozess wird parallel das äußere Gehäuse aus einer strukturellen Phenolharz-Formmasse hergestellt. Während die Epoxidharz-Formmasse für die Elektronikumspritzung hinsichtlich der Wärmeleitfähigkeit und ihres niedrigviskosen Formfüllverhaltens optimiert ist, zeichnet sich die Phenolharz-Formmasse des Gehäuses aufgrund ihrer Glasfaserfüllung durch eine sehr gute Steifigkeit und Festigkeit aus. Somit gewährleistet sie die strukturelle Integrität des Motors und ermöglicht die Abstützung des Drehmoments.

Zudem hat das Rotorlager seinen Sitz direkt im Kunststoff – eine konstruktive Ausführung, die erst aufgrund der hohen Dimensionsstabilität der Formmasse möglich wird. Durch die Montage der umspritzten Statorbaugruppe in das äußere Gehäuse werden die ringförmigen Verteilerkanäle gebildet. Die Abdichtung zum Gehäuse und zum Luftspalt erfolgt durch eingelegte Dichtringe.

#### Entwicklung eines Hybrid-Kurbelgehäuses bestehend aus additiv gefertigten metallischen Komponenten und faserverstärkten Kunststoffbauteilen

Im Verbundprojekt „LeiMot – Leichtbaumotor“ entwickelt das Fraunhofer ICT gemeinsam mit zahlreichen Projektpartnern einen Vierzylinder-Verbrennungsmotor in einer Hybridbauweise bestehend aus additiv gefertigten metallischen Komponenten und faserverstärkten Kunststoffbauteilen [7]. Ziel ist ein um 30 % geringeres Motorgewicht, bei verbessertem Betriebswirkungsgrad, Betriebsverhalten, Thermomanagement und reduzierter Geräuschentwicklung.

Bereits in der Vergangenheit konnte am Fraunhofer ICT die erfolgreiche Substitution von Aluminium durch Phenolharz-Formmassen am Beispiel des Zylindergehäuses eines Einzylindermotors demonstriert [8] werden, siehe Abb. 6. Hier wurde bei gleichem Leistungsniveau eine Gewichtseinsparung von 20 % gegenüber dem Aluminium-Referenzbauteil erzielt. Zudem wurden durch die Verwendung des Kunststoffs das Thermomanagement und das Geräuschverhalten verbessert [9].



Abb. 5:  
Kühlwasserkreislauf  
im Stator

#### Konzept des hybriden Kurbelgehäuses

Als Vergleichsbasis für das „LeiMot“-Projekt dient ein aktueller turboaufgeladener Dieselmotor der Volkswagen AG. Aufgrund der hohen mechanischen Beanspruchung des Dieselmotors lässt sich das im Vorhaben entwickelte Motorkonzept auf andere Brennverfahren wie den Otto- oder auch den Gasbetrieb mit Aufladung übertragen.

Das Kurbelgehäuse des Leichtbaumotors wird als hybrides Konzept umgesetzt, bestehen aus einer metallischen offenen Tragstruktur und medienführenden Seitenabdeckungen aus hochgefüllten Phenolharz-Formmassen. Die innere metallische Tragstruktur beinhaltet die mechanisch und thermisch hochbelasteten Bereiche wie Brennräume, Lagersitze sowie die Ölversorgung. Hergestellt mittels selektiven Laserschmelzen (SLM-Verfahren) bleibt die

Abb. 6:  
Einzylinder  
Forschungsmotor





**Abb. 7:**  
Hybrides Kurbelgehäuse:  
bestehend aus einer  
SLM-Tragstruktur (Mitte)  
und zwei Phenolharz Side-  
Covern

## LITERATUR

1. Nicolais, L., Orgéas, L. u. Dumont, P.: Wiley Encyclopedia of Composites. Kapitel: Sheet Molding Compounds. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc 2011
2. Wulfsberg, J., Herrmann, A., Ziegmann, G., Lonsdorfer, G., Stöß, N. u. Fette, M.: Combination of Carbon Fibre Sheet Moulding Compound and Prepreg Compression Moulding in Aerospace Industry. *Procedia Engineering* 81 (2014), S. 1601–1607
3. Kia, H. G. (Hrsg.): Sheet molding compounds. Science and technology. München: Hanser 1993
4. Bücheler, D. u. Henning, F.: Hybrid resin improves position and alignment of continuously reinforced prepreg during co-molding with sheet molding compound. 17th European Conference on Composite Materials, München. 2016
5. Friedrich, H. E. (Hrsg.): Leichtbau in der Fahrzeugtechnik. Wiesbaden: Springer Vieweg 2013
6. Gehde, M., Englich, S., Hülder, G. u. Höer, M.: Schlummerndes Potenzial für den Leichtbau. *Plastverarbeiter* 63 (2012) 63, S. 80–83
7. Bey, R.: New approach for light weight design of combustion engines for passender car applications. 9. Internationale Duroplasttagung. Iserlohn 2019
8. Stemmler, J.: Ein Einblick in Material und Anwendung für Leichtbau im Antriebsstrang mit technischen Duroplasten. 8. Internationale Duroplasttagung. Iserlohn 2015
9. Berg, L. F. u. Kollmeier, H.-P.: Gewichtsreduktion und verbesserte Akustik – Mögliche Vorteile eines Zylindergehäuses aus Faserverbundwerkstoff. In: Rottengruber, H., Henze, W. u. Luft, T. (Hrsg.): 9. Magdeburger Symposium Motor- und Aggregate-Akustik. Magdeburg: Otto-von-Guericke-Universität 2016

## KONTAKT

**FRAUNHOFER-INSTITUT  
FÜR CHEMISCHE TECHNOLOGIE ICT**  
Ansprechpartner: Patrick Griesbaum M. Sc.  
Joseph-von-Fraunhofer-Straße 7  
D-76327 Pfinztal  
Tel.: +49 (0)721 4640-753  
patrick.griesbaum@ict.fraunhofer.de  
www.ict.fraunhofer.de

von der Firma FEV entwickelte innere Tragstruktur zunächst frei von Herstellungsrestriktionen wie sie üblicherweise aufgrund der Gusstechnik im Motorenbau existieren.

Faserverbundkunststoffe (FVK) kommen am hybriden Kurbelgehäuse dort zum Einsatz, wo ihre Materialeigenschaften von Vorteil sind. Die offene SLM-Tragstruktur wird dazu an der Ein- und Auslassseite durch Kunststoff Seitenabdeckungen aus duromeren Phenolharz-Formmassen verschlossen, siehe **Abb. 7**. Die Side-Cover bestehen jeweils aus zwei verschiedenen Schalenbauteilen, die im Spritzguss gefertigt und über einen silikonbasierten Klebstoff miteinander verbunden sowie gedichtet werden.

In das Cover der Einlassseite wurden das Gehäuse der Wasserpumpe, sowie die Zuläufe der Zylinderkopf- und Zylinderkühlung integriert. Auf der Auslassseite beinhaltet das Cover die Rückführungen der Zylinderkopfkühlung. Beide Kunststoff-Cover werden an der Aluminium-Tragstruktur verschraubt und mit einer elastischen Silikondichtung gegen den Aluminiumblock abgedichtet sowie zwecks verbessertem NVH entkoppelt.

Aufgrund der gegenüber dem Aluminium deutlich geringeren Wärmeleitfähigkeit des Phenolharzes soll durch diese Schalenbauweise ein deutlich verbessertes Warmlaufverhalten und Thermomanagement erreicht werden.

### Danksagung

Die vorgestellte Entwicklung des Elektromotors werden im Projekt „DEMiL – Direktgekühlter Elektromotor mit integralem Leichtbaugehäuse“ durchgeführt. Projektpartner sind das Fraunhofer ICT, das Elektrotechnischen Institut (ETI) sowie das Institut für Fahrzeugsystemtechnik (FAST) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) sowie die Firma SBHPP Vyncolit. Das Vorhaben wird durch die Vector-Stiftung gefördert.

Das Projekt „LeiMot – Leichtbaumotor“ wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie gefördert. Folgende Partner sind daran beteiligt: FEV Europe GmbH, VKA (RWTH Aachen), Fraunhofer Gesellschaft, FH Aachen, Volkswagen AG, INPECA, WFS GmbH