



© Rennteam Uni Stuttgart

## Entwicklung der Aerodynamik beim Rennteam Uni Stuttgart

Der 0711-11 ist der elfte Prototyp des Rennteams Uni Stuttgart. Der Formula-Student-Rennwagen verfügt über ein Aerodynamikpaket, um die Performance des Fahrzeugs in jeder Rennsituation zu optimieren. Erstmals wurden aktive Aerodynamikelemente zur Optimierung der aerodynamischen Balance verwendet.

AUTOR



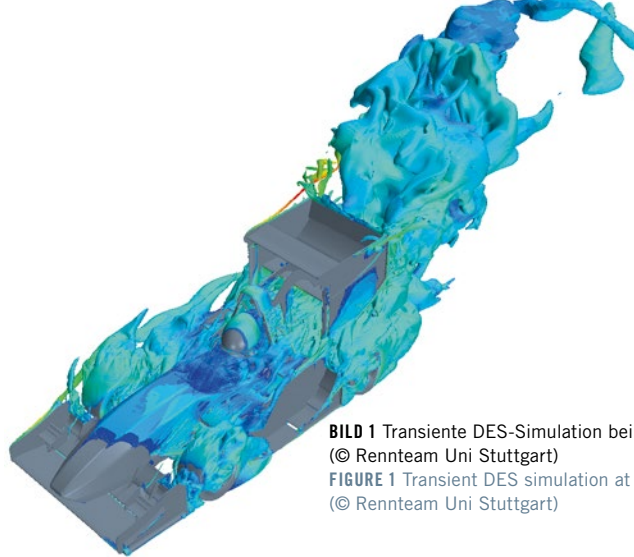
**Sandro Göbel**

ist verantwortlich für numerische Simulation und deren Automatisierung auf Superrechnern sowie Präsentation der aerodynamischen Entwicklungsarbeit beim Rennteam Uni Stuttgart.

### AUFBAU DER RUNDEN- ZEITSIMULATION

Grundsätzlich verbessert ein Aerodynamikpaket die Fahreigenschaften eines Rennwagens. Dadurch können höhere Kurvengeschwindigkeiten erreicht werden, die zu schnelleren Rundenzeiten und mehr Punkten in den dynamischen Disziplinen des Wettbewerbs führen [1]. Dabei müssen auch der erzeugte Luftwiderstand sowie die Masse der Anbauteile berücksichtigt werden, um die schnellstmögliche Rundenzeit zu erzielen.

Zur Ermittlung der Sensitivität der Rundenzeit auf die aerodynamischen Parameter – Luftwiderstand und Abtrieb – wurde beim Rennteam Uni Stuttgart eine Rundenzeitsimulation aufgebaut. Die aerodynamischen Kenngrößen sind allerdings nicht konstant. Denn sie sind abhängig von Bodenfreiheit, Nickwinkel, Rollwinkel, Lenkwinkel und dem Winkel der Anströmung. Für eine ideale Auslegung der Aerodynamik sollte sich die Entwicklung in den Fahrzuständen abspielen, in denen sie den größten Einfluss auf die Run-



**BILD 1** Transiente DES-Simulation bei 10° Schräganströmung  
(© Rennteam Uni Stuttgart)  
**FIGURE 1** Transient DES simulation at 10° inclined flow  
(© Rennteam Uni Stuttgart)

Motorkühlung umgesetzt. Außerdem wurde ein Unterboden mit optimiertem Diffusor eingesetzt. Im Entwicklungsprozess wurde dabei stets auch auf den Luftwiderstand sowie das Gewicht der Bauteile geachtet. Die Vorauslegung der Flügelgeometrien wurde zweidimensional mit Exa Powerflow bewerkstelligt. Mithilfe des Clusters des Höchstleistungsrechenzentrums der Universität Stuttgart (HLRS) wurden 3-D-Gesamtfahrzeugsimulationen mithilfe von StarCCM+ durchgeführt, **BILD 1**.

Während der Saison konnten aufgrund einer vollen Simulationsautomatisierung über 600 Design-Iterationen am Gesamtfahrzeugmodell durchgeführt werden. Jede Woche wurde eine neue Entwicklungsgrundlage entschieden. Darauf aufbauend wurde nur ein aerodynamisch wichtiges Element hinzugefügt oder in seiner Geometrie verändert, um stets vergleichbare Simulationsergebnisse hervorbringen. Durch konsequente Entwicklung in Kurvenfahrzuständen konnte der Abtrieb in Kurven gegenüber dem letztjährigen Boliden um durchschnittlich 35 % gesteigert werden.

#### AKTIVE AERODYNAMIK

In den letzten Jahren wurden aktive Flügелеlemente immer wieder von Formula-Student-Teams genutzt, um den Luftwiderstand, den ein Aerodynamikpaket mit sich bringt, zu verringern. Auch das Rennteam Uni Stuttgart nutzt am Heckflügel ein elektrisch angesteuertes Drag Reduction System (DRS), um eine kombinierte Effizienz – dem Quotienten aus Abtrieb in Kurvenfahrt und Luftwiderstand mit DRS in Geradeausfahrt – von  $E=3,2$  zu erreichen. Vom Fahrer gesteuert sinkt dabei der Luftwiderstand bei einer Aktuationszeit von 0,2 s um 30 %. Dies verspricht ein optimiertes Beschleu-

nigungsverhalten und Spitzengeschwindigkeiten auf gerader Strecke.

Außer der Steigerung der Effizienz ist auch die aerodynamische Balance des Fahrzeugs ein relevanter Aspekt. Weil einige Elemente des Aerodynamikpakets im Bodeneffekt arbeiten, kommt es mit steigender Geschwindigkeit, der resultierenden Anpresskraft und der damit niedrigeren Bodenfreiheit zu einer Veränderung der Balance zur Front des Fahrzeugs. Dies impliziert ein sich änderndes Fahrverhalten hin zu einem Übersteuern des Fahrzeugs bei hohen Geschwindigkeiten. Da in der Formula Student nur Amateurfahrer zugelassen sind, die mit relativ wenig Fahrertraining optimal auf den Wettbewerb vorzubereiten sind und ein untersteuerndes Auto bei hohen Geschwindigkeiten leichter zu kontrollieren ist als ein übersteuerndes, entwickelte das Rennteam Uni Stuttgart dieses Jahr ein aktives Aerobalance-Verstellungssystem. Dieses ermöglicht durch eine Veränderung des Anstellwinkels eines Teils des Frontflügels eine Balanceverstellung von 20 %. Die Verstellung findet über die Geschwindigkeit des Fahrzeugs statt und kann direkt am Lenkrad vom Fahrer auf dessen Bedürfnisse angepasst werden. Die Verbesserung der Balance spiegelt sich direkt im Fahrverhalten des Fahrzeugs wider. Das Ergebnis ist ein agiles Fahrzeug bei niedrigen Geschwindigkeiten und ein stabiles und sicheres Fahrverhalten bei hohen Geschwindigkeiten.

#### KÜHLUNG OPTIMIERT

Wo Energie umgesetzt wird, entsteht Hitze. Diese muss durch ein Medium abgeführt werden. Da Luft in unbegrenztem Maße verfügbar ist, wurde für die Bremsenkühlung ein direkter Luftstrom, für die Motorkühlung ein Luft-Wasser-Wärmetauscher verwendet. Hier

denzeit hat. Hierzu wurde die Rundenzeitsimulation derart erweitert, um eine Aussage über die Sensitivität des Abtriebs auf die Rundenzeit bei verschiedenen Fahrzuständen zu erlangen. Mithilfe der Simulationsergebnisse und einer Auswertung von Messdaten aus dem Fahrzeug wurden Punkte festgelegt, die für die weiteren Aerodynamikentwicklungen ausschlaggebend sind. Bei den kurvenreichen Strecken in der Formula Student ist besonders der Abtrieb bei Kurvenfahrt entscheidend für ein schnelles Fahrzeug.

#### ENTWICKLUNG DES AERODYNAMIKPAKETS

Anhand der gewonnenen Daten aus der Rundenzeitsimulation wurde das Aerodynamikkonzept gezielt auf die Kurvenzustände des Fahrzeugs hin entwickelt. Dabei wurden Front- und Heckflügel optimiert sowie erstmals ein Seitenflügel mit integrierten Wasserkühlern für die



# Development of Aerodynamics in Rennteam Uni Stuttgart

The F0711-11 is the 11<sup>th</sup> iteration built by the Rennteam Uni Stuttgart. This new Formula Student racing car is equipped with an aerodynamic package to optimise the vehicle's performance in every racing situation. The implementation of active wing elements to optimise the aerodynamic balance was used for the first time.

## CONSTRUCTION OF THE LAP TIME SIMULATION

In general, an aerodynamics package improves the vehicle's driving characteristics. By doing so, higher cornering speeds can be reached, which lead to faster lap times and thereby to more points in the dynamic disciplines of the various competitions [1]. One has to consider aerodynamic drag and the mass of the components in order to attain the best lap times possible.

To determine the lap time's sensitivity to the aerodynamic parameters – aerodynamic drag and downforce – a lap time simulation was constructed by the Rennteam of the University of Stuttgart. However, the aerodynamic characteristic values aren't constant. They depend on ride height, pitch-, roll- and steering angle, as well as inclined flow. For an optimum aerodynamic package design, the development has to focus on the various driving situations in which the aerodynamics of the car has the most influence on the lap times. Therefore, the lap time simulation was extended in such a way that an assertion about the downforce's sensitivity towards the lap time, at various driving situations, could be acquired. By means of simulation results and an evaluation of the vehicle's measuring data points were determined which are essential for further development of the aerodynamics package. It is plausible that the downforce at turning manoeuvres is especially crucial for a fast car since the tracks in Formula Student are winding.

## DEVELOPING THE AERODYNAMIC PACKAGE

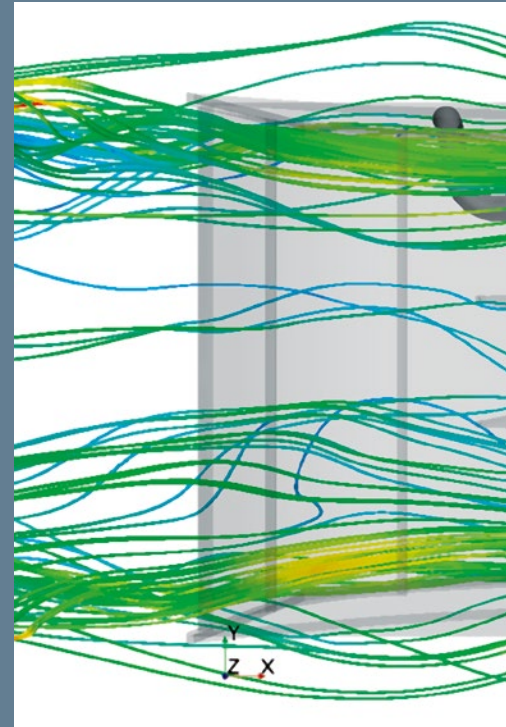
The aerodynamic package concept of the vehicle was developed based on the

data attained by the lap time simulation targeting the various curving situations of the vehicle. The front- and rear wing have been optimised, as well as, for the first time, side wings with integrated water coolers for engine cooling have been implemented. Furthermore, an undertray with an optimised diffuser was set in. During the development process the aerodynamic drag and the weight of the components were always considered. The preliminary design of the wing geometry was contrived two-dimensionally in Exa Powerflow. With the help of the High Performance Computing Center Stuttgart (HLRS) of the University of Stuttgart and StarCCM+ 3-D simulations of the complete vehicle could be conducted, **FIGURE 1**.

Due to a completely automated simulation over 600 design iterations of the complete vehicle model could be run throughout the season. A new design basis was determined every week. Building on that only one aerodynamically important element was either added or an already existing element's geometry was changed in order to bring forth comparable simulation results. Through consequent development in curving situations, the downforce in corners was increased by 35 % in comparison to the last year's racing car.

## ACTIVE AERODYNAMICS

In the last years active aerodynamic wing elements have been frequently used by the Formula Student teams in order to decrease drag, which comes with an aerodynamic package. The Rennteam Uni Stuttgart also has implemented an electrically driven Drag Reduction System (DRS) to attain a combined efficiency of  $E=3.2$ . The efficiency consists of the downforce during curving and the straight line drag

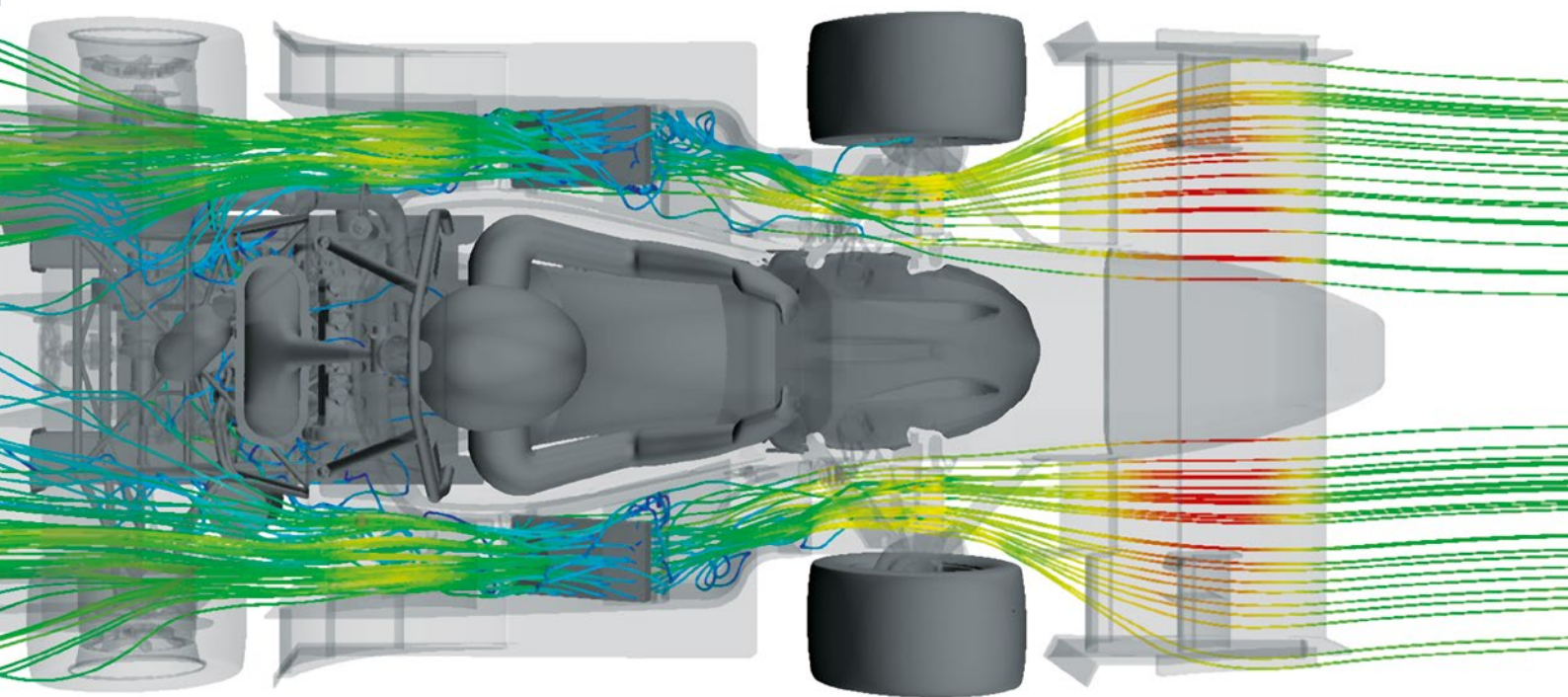


with an open DRS. Activated by the driver, the drag decreases by 30 % with an actuation time of 0.2 s. This leads to an optimised acceleration behaviour and higher top speeds in straight lines.

Except the increase of efficiency, what also has to be taken into consideration is the aerodynamic balance of the vehicle, which is a relevant aspect. Due to the fact that some elements of the aerodynamic package work in ground effect at increasing speeds, with results in a higher pressing force and a lower front ride height, which then causes the aerodynamic balance to shift to the front of the vehicle. This implies that the driving behaviour is constantly changing to an oversteering vehicle when in high speeds. Because the Formula Student only allows amateur drivers, the Rennteam Uni Stuttgart has developed an active aerodynamic balance system to optimise the drivers little training time in order to ensure the driver has better control over the vehicle at higher

## AUTHOR

**Sandro Göbel** is responsible for numeric simulation and its automation on supercomputers, as well as the presentation of the aerodynamic development work at the Rennteam Uni Stuttgart (Germany).



**BILD 2** Weg der Kühlerdurchströmung durch das Fahrzeug (© Rennteam Uni Stuttgart)  
**FIGURE 2** Path of the cooling flow through the vehicle (© Rennteam Uni Stuttgart)

entschied sich das Rennteam Uni Stuttgart in der Saison 2015/2016 für ein symmetrisches Konzept mit zwei Wasserkühlern, um Motorkühlprobleme selbst bei tropischen Temperaturen ausschließen zu können, **BILD 2**. Die Abgasanlage wurde dadurch im Hinter-

wagen platziert. Dabei wurde die gesamte Motorperipherie kompakter gestaltet, um mehr Freiraum für eine gute Umströmung des Fahrzeugs zu erreichen. Kühler sowie Lüfter wurden auf Prüfständen vermessen und die Kennlinien in die Simulation imple-

mentiert, um eine gezielte Verbesserung der Luftführung im Bereich der Kühler zu verwirklichen. Dadurch konnte im Verlauf der Entwicklung der Luftmassenstrom durch den Wasserkühler um 30 % erhöht werden. Im Bereich der Bremsenküh-

## Antriebs- und Fahrzeugtechnik im Gespräch.



**ATZ** live

**FACHKONFERENZEN  
FÜR FAHRZEUG- UND  
MOTORENINGENIEURE**

- Gesamtfahrzeug
- Motor und Antriebsstrang
- Chassis und Fahrerassistenz
- Karosserie und Akustik
- Elektromobilität

**Aktuelle Tagungsprogramme: [www.ATZlive.de](http://www.ATZlive.de)**



speeds, where understeering vehicle are easier to control than oversteering ones. The system allows a balance adaption of 20 %, by changing the angle of attack of a front wing's part. The aerodynamic balance is adjusted by the speed of the car and can be finely adjusted to the driver's needs directly on the steering wheel. The improvement of the balance is directly reflected in the driving behaviour of the vehicle. The result is an agile vehicle at low speeds and a stable and safe driving behaviour at high speeds.

## OPTIMISED COOLING SYSTEM

Whenever energy is converted, heat is produced. This heat has to be disposed via a medium. Air is an unlimited source; therefore a direct cooling air flow is used to cool the brakes. For the engine cooling an air-water heat exchanger was implemented. In the season 2015/2016 the Rennteam Uni Stuttgart opted to utilise a symmetric concept with two water coolers to get rid of engine cooling issues even in tropical weather conditions, **FIGURE 2**. Due to that the team placed the exhaust system nearby the rear frame. In order to gain more flow dynamics, the team designed a more compact engine periphery. The radiator and fans were measured at test benches and the characteristic lines were implemented into the aerodynamic simulation to realise an optimised air flow into the radiators. During the development of the air mass flow through the radiators, the team was able to increase it by 30 %. In regards to the cooling of the brakes, a 20 % increase of air mass flow without increasing influences on the aerodynamic efficiency was achieved.

## SELF-DEVELOPED COMPONENTS

In order to keep the weight of the car as low as possible, all aerodynamic components were self-developed and built out of a sandwich structured CFRP and foam as its core. The half shells consist of 0.2 mm thick CFRP outer layer, 1 to 2 mm thick foam core and another 0.2 mm thick CFRP inner layer. An elaborate inner structure of ribs and spar further strengthens the structure as a whole. Through this type of production, the team was able to keep the weight of the aerodynamic package with all its 32 individual wing elements, its add-on

components like endplates and air control elements under 15 kg. At a top speed of 125 km/h this package produces and carries approximately 300 kg of downforce, which is 20 times its weight.

## VALIDATION ON THE REAL VEHICLE

Due to a stationary development in the simulation with the help of RANS turbulence models and the resulting residual errors, the results were validated on the real vehicle. Since last year, the FKFS offers the team the five belt full scale wind tunnel for some hours of validation. Because the wheelbase of the racing car is too small to place every wheel onto a belt for rotation, only the front wheels could be placed on belts. On the stationary rear wheels, which have a lower aerodynamic relevance, gurney flaps were placed onto the wheels to simulate the flow field in the wake better. Starting at a Reynolds series, many tests were done with attachment parts as well as adaption of the angle of attack of wing elements measured and evaluated. The active aerodynamic balance system was also evaluated and compared to the results of the simulation as well as the analysis of the damper potentiometers on rolling attempts, **FIGURE 3**. It reached a very good congruency with the system function.

The stationary simulation predicted 10 % more downforce in conclusion to the wind tunnel; the transient Detached Eddy Simulation (DES) had a 3 % deviation. Production inaccuracies, simplifications within the simulation and unprecise boundary conditions in the wind tunnel were the reason for the deviation.

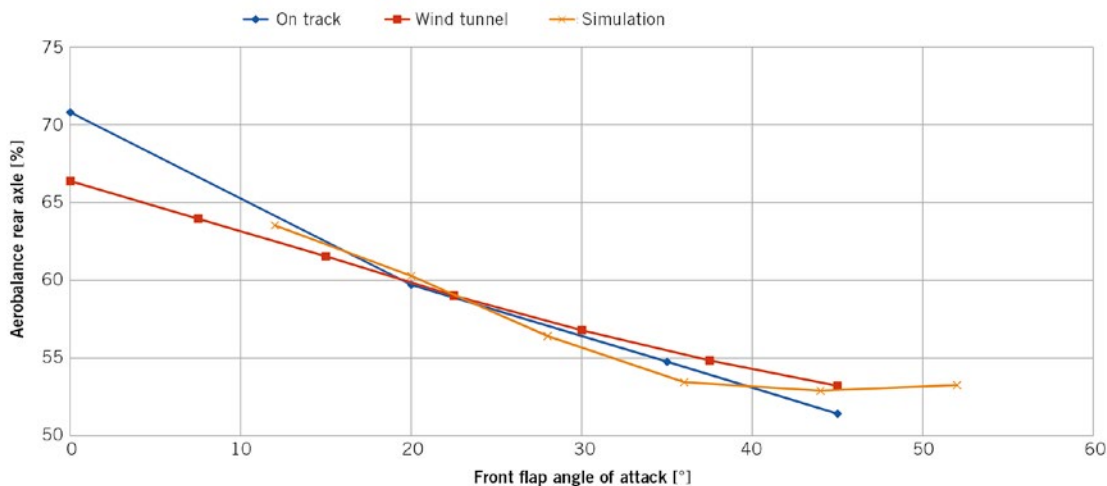
## AERODYNAMICS LEADS TO SUCCESS

At the moment the Rennteam Uni Stuttgart is looking back at the most successful season in the history of the team. The aerodynamic package of the 0711-11, **FIGURE 4**, was one of the major improvements in comparison with the last season's car. The implementation of active wing elements for optimisation of the aerodynamic balance was used for the first time. In conjunction with improved driving dynamics and better reliability the team was able to develop a competitive race car, which is able to stand its own against strong competition. This forms a solid pillar for the further development of an ever growing fleet of successful race cars of the Rennteam Uni Stuttgart.

## REFERENCE

[1] Aerodynamics at Rennteam Uni Stuttgart. In: ATZextra Formula Student Germany 2013, Springer Fachmedien, 2013, p. 34-41





**BILD 3** Validierung des aktiven Aerobalance-Verstellsystems (© Rennteam Uni Stuttgart)  
**FIGURE 3** Validation of active aerobalance system (© Rennteam Uni Stuttgart)

lung wurde ein zwanzigprozentiger Zuwachs des Massenstroms ohne steigenden Einfluss auf die aerodynamische Effizienz ermöglicht.

#### ANBAUTEILE IN EIGENREGIE

Um das Gewicht des Aerodynamikpakets so gering wie möglich zu halten, wurden alle aerodynamischen Anbauteile in Eigenregie aus einem Sandwich aus kohlefaserverstärktem Kunststoff und einem Schaumkern aufgebaut. Die Flügelschalen sind aus einer 0,2 mm

starken CFK-Außenlage, einem 1 bis 2 mm dickem Schaumkern und einer weiteren 0,2 mm starken CFK-Innenlage aufgebaut. Eine aufwendige Innenstruktur aus Rippen und Holm verstärkt diese Struktur weiter. Hierdurch wiegt das komplette Aerodynamikpaket, das aus 32 einzelnen Flügelementen und weiteren Anbauteilen wie Endplatten und Luftleitelementen aufgebaut ist, weniger als 15 kg. Bei einer Höchstgeschwindigkeit von 125 km/h erzeugt und trägt dieses Paket jedoch ungefähr 300 kg an Abtrieb, also das zwanzigfache seines Eigengewichts.

cesystem untersucht und Vergleiche zur Simulation sowie Auswertungen der Dämpferpotentiometer aus Rollversuchen durchgeführt, **BILD 3**. Es zeigten sich sehr gute Übereinkünfte der Funktion des Systems.

Die stationäre Simulation sagte 10 % höhere Abtriebswerte im Vergleich zum Windkanal voraus, die transiente Detached-Eddy-Simulation ergab 3 % Abweichung. Diese Ungenauigkeiten sind den Vereinfachungen in der Simulation und den nicht exakt nachgebildeten Randbedingungen im Windkanal geschuldet.

#### VALIDIERUNG AM REALEN FAHRZEUG

Aufgrund der stationären Entwicklung in der Simulation mithilfe von RANS-Turbulenzmodellen und dem dabei entstehenden numerischen Restfehler, wurden die Ergebnisse am realen Fahrzeug validiert. Das FKFS stellt dem Rennteam Uni Stuttgart seit 2015 für einige Stunden ihren Fünfband-Windkanal zu Verfügung, um die Validierung zu betreiben. Da der Radstand des Rennwagens zu klein ist, um alle Räder auf den Radbändern rotieren zu lassen, wurden die Vorderräder auf den Bändern platziert und auf den weniger aerodynamisch relevanten Hinterrädern eine Abrisskante positioniert, um das Strömungsfeld im Radnachlauf besser zu simulieren. Von einer Reynoldsreihe ausgehend wurden einige Tests mit verschiedenen Anbauteilen sowie die Adaption des Anstellwinkels von Flügelementen gemessen und ausgewertet. Auch wurde das aktive Balan-

#### AERODYNAMIK FÜHRT ZU ERFOLGEN

Im Moment blickt das Rennteam Uni Stuttgart auf seine bislang erfolgreichste Saison zurück. Das Aerodynamikpaket des 0711-11, **BILD 4**, war eine der größten Verbesserungen im Vergleich zum Vorgängerfahrzeug. Erstmals wurden aktive Aerodynamikelemente zur Optimierung der aerodynamischen Balance verwendet. In Verbindung mit einer Verbesserung der Fahrdynamik und der Zuverlässigkeit konnte ein wettbewerbsfähiger Rennwagen entwickelt werden, der gegen die starke Konkurrenz im Wettbewerb bestehen kann. Dies legt einen soliden Grundstein für die künftige Weiterentwicklung einer immer größer werdenden Flotte erfolgreicher Rennboliden des Teams.

#### LITERATURHINWEIS

[1] Aerodynamik beim Rennteam Uni Stuttgart. In: ATZextra Formula Student Germany 2013, Springer Fachmedien, 2013, S. 34-41



**BILD 4** Der 0711-11 ist der elfte Prototyp des Rennteams (© Rennteam Uni Stuttgart)  
**FIGURE 4** The F0711-11 is the 11<sup>th</sup> iteration built by the team (© Rennteam Uni Stuttgart)