



AERODYNAMIK BEIM RENNTEAM UNI STUTTGART

Die Entwicklung der Rennfahrzeuge in der Formula Student der letzten Jahre zeigt eine zunehmende Bedeutung der Aerodynamik. So waren in der diesjährigen Gesamtwertung die zehn bestplatzierten Teams mit aerodynamischen Hilfsmitteln wie Flügeln ausgestattet. Unter ihnen findet sich auch das Rennteam Uni Stuttgart, das einen Einblick in seine Aerodynamikentwicklung gibt.



AUTOREN



MICHAEL POST

hat den Bereich Aerodynamik initiiert und ist verantwortlich für die Grundlagenuntersuchungen beim Rennteam Uni Stuttgart.



ARMIN STANGL

ist verantwortlich für Methodenentwicklung und Simulation der Fahrzeugdurchströmung beim Rennteam Uni Stuttgart.



B.SC. ANDRÉ GRASSMUCK

ist verantwortlich für die Auslegung des Aerodynamikpakets und den Aufbau des Windkanalmodells beim Rennteam Uni Stuttgart.

MOTIVATION

Für ein erfolgreiches Abschneiden in der Formula Student lautet die Philosophie des Rennteam Uni Stuttgart (RTUS), ein zuverlässiges Fahrzeug mit einem stimmigen Konzept aus Antriebsstrang, Fahrwerk und Chassis zu bauen.

Darüber hinaus wurde dieses Jahr beim RTUS erstmals auch ein vollständiges Aerodynamikpaket entwickelt und eingesetzt. Die Optimierung der Fahrzeug aerodynamik zielt darauf ab, die fahrdynamische Leistungsfähigkeit zu erhöhen, um somit in den dynamischen Disziplinen besser abzuschneiden.

RUNDENZEITENSIMULATION

Um den Einfluss von Luftwiderstand und Abtrieb in Autocross und Endurance zu eruieren, wurde beim RTUS zunächst eine Rundenzeitsimulation durchgeführt. Diese zeigte, dass sich durch erhöhten Abtrieb die Rundenzeiten deutlich verbessern lassen. Aufgrund der vorhan-

AERODYNAMICS AT RENNTEAM UNI STUTTGART

The development of Formula Student racing cars in recent years has shown the increasing importance of aerodynamics. In this year's overall rankings, the ten best teams utilised aerodynamic aids such as wings. Among them was Rennteam Uni Stuttgart, which gives an insight into its aerodynamic development.

MOTIVATION

In order to compete successfully in Formula Student, the philosophy of Rennteam Uni Stuttgart (RTUS) has always been to build a reliable vehicle with a proven concept for the powertrain, suspension and chassis. Furthermore, a full aerodynamic package was developed and used for the first time this year at RTUS. The optimisation of vehicle aerodynamics aims to increase driving performance in order to perform better in the dynamic disciplines.

LAP TIME SIMULATION

In order to determine the influence of drag and downforce in autocross and endurance, a lap time simulation was performed at RTUS. It showed that it was possible to improve lap times through increased downforce. Based on the available engine power and the underlying track layout, the influence of drag on the lap time is of little importance. In order to reduce fuel consumption it should be as low as possible.

BASIC RESEARCH

Since no experience with the impact of individual aerodynamic components existed at RTUS, basic research was carried out to assess the potential of individual measures as the next step. CFD simulations of various vehicle configurations were performed at FKFS in Stuttgart using Exa Power-Flow. In order to gain reliable results, this research was initially independent of the development cycle of RTUS. As the current CAD model was not completed at the time, these studies were performed on the vehicle model from the previous year. The results obtained by these studies provide a basis for decision

making on future vehicles and had an influence on the current year's concept. Studies investigated various undertrays, diffusers, air control blades, covers, side pods and bow shapes. In addition to the integral coefficients for drag and downforce, the aerodynamic balance and airflow in the area of brake discs and through the engine compartment, as well as the force affecting the drivers' head were all considered. The measures evaluated were used to improve the aerodynamic properties of the vehicle. The drag coefficient c_D was reduced from 0.604 to 0.555, while the lift coefficient c_L was reduced from 0.135 to -0.198. The balance, which results in greater understeering with increasing speed, changed only slightly compared to the original vehicle. The targeted downforce from the results of the lap time simulation was not achieved through these measures.

AIRFLOW THROUGH THE RADIATOR

Particular attention was paid to the airflow through the heat exchangers in the side pods. In the event that the vehicle stops after driving at full load for a long period of time, the cooling system may overheat. Due to thermal inertia, heat will continue to be conducted into the cooling water, and thus must be dissipated out to the environment. For this purpose, a fan is located behind the radiator. Commonly used axial fans have a circular cross-section, whereas the radiator is rectangular. An inhomogeneous flow through the radiator is thus caused by both the fan hub and the edges of the radiator which are not overlapped by the fan blades. A mass flow at discrete points can then be determined by measurements or CFD simulations. The inhomogeneity is a measure of the quality of the airflow. If the inhomogeneity is in

the range of 50 %, the heat dissipation of the radiator may be reduced by 10 % [1]. This is due to the nonlinear dependence of the specific radiator characteristic line. Since the heat input of the current engine load point is shifted slightly to the cooling system due to thermal inertia, the radiator has to dissipate a lot of heat when the car brakes to lower speeds. At low speeds, the fan creates an unequal distribution of the mass flow through the radiator. Therefore, the inhomogeneity in the design of the cooling system is not negligible in Formula Student with its tight bends and resulting speeds of about 30 km/h. For two differently sized cooling fans, which are arranged directly behind the radiator, an inhomogeneity of 45 and 50 % could be determined. As a result, a reduced cooling capacity has been considered in the design of the cooling system. Increasing driving speed raises the pressure in front of the radiator, which leads to a more uniform flow, thereby reducing the losses due to inhomogeneity in heat dissipation, ①. At 100 km/h, the fan currently in operation at RTUS shows an inhomogeneity of about 12 %.

AUTHORS

MICHAEL POST

launched the scope of aerodynamics at Rennteam Uni Stuttgart and is responsible for basic research.

ARMIN STANGL

is responsible for the development of methods and simulation of the vehicle's airflow at Rennteam Uni Stuttgart.

B.SC. ANDRÉ GRASSMUCK

is responsible for the aerodynamic package and created the model of the wind tunnel at Rennteam Uni Stuttgart.

denen Motorleistung und des zugrunde gelegten Streckenprofils ist der Einfluss des Luftwiderstands auf die Rundenzeit von geringer Bedeutung. Um den Kraftstoffverbrauch zu reduzieren, sollte er möglichst gering sein.

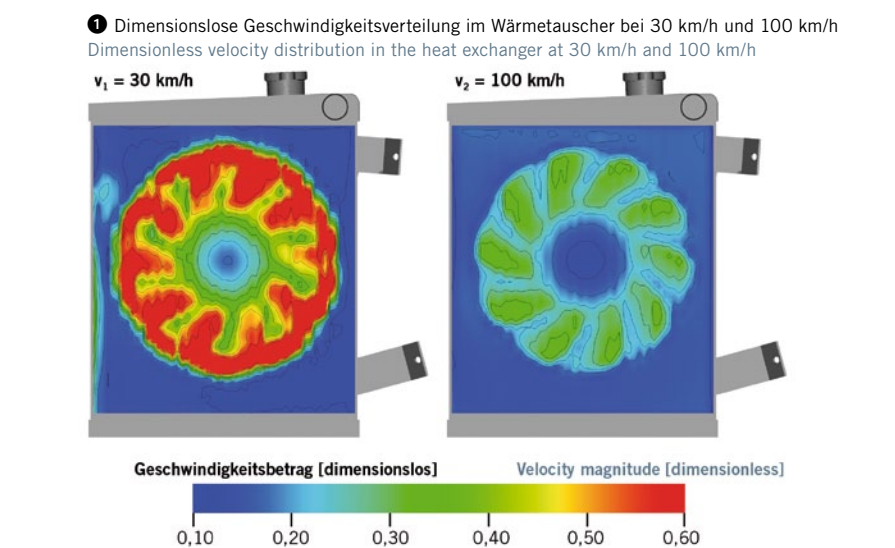
GRUNDLAGENUNTERSUCHUNGEN

Da es beim RTUS bisher keine Erfahrungswerte zum Einfluss einzelner aerodynamischer Bauteile gab, wurden im nächsten Schritt Grundlagenuntersuchungen durchgeführt, um Potenziale einzelner Maßnahmen abzuschätzen. Dazu wurden am FKFS in Stuttgart CFD-Simulationen diverser Fahrzeugkonfigurationen unter der Verwendung von Exa Power-Flow durchgeführt. Um ausreichend belastbare Ergebnisse zu gewinnen, fanden diese Untersuchungen zunächst unabhängig vom Entwicklungszyklus beim RTUS statt. Da zu diesem Zeitpunkt noch kein aktuelles CAD-Modell vorhanden war, wurden diese Untersuchungen an dem Modell eines Vorjahresfahrzeugs durchgeführt. Die so gewonnenen Ergebnisse bieten eine Entscheidungsgrundlage auch für zukünftige Fahrzeuge und fließen in die Konzeption ein.

Gegenstand dieser Untersuchungen waren unter anderem verschiedene Unterböden, Diffusoren, Luftleitelemente, Abdeckungen, Seitenkästen sowie Bugformen. Neben den integralen Beiwerten für Luftwiderstand und Abtrieb wurden auch die aerodynamische Balance, die Strömung im Bereich der Bremsscheiben und im Motorraum sowie die Kraft auf den Kopf des Fahrers betrachtet. Durch die untersuchten Bereiche konnten die aerodynamischen Eigenschaften des Fahrzeugs verbessert werden. Der Luftwiderstandsbeiwert c_w konnte von 0,604 auf 0,555 gesenkt werden, während der Auftriebsbeiwert c_A von 0,135 auf -0,198 gesenkt wurde. Die Balance, welche bei steigender Geschwindigkeit zu einem stärker untersteuernden Fahrverhalten führt, wurde gegenüber dem Ausgangsfahrzeug nur geringfügig verändert. Der aus den Ergebnissen der Rundenzeitsimulation angestrebte Abtriebswert wurde jedoch mit diesen Maßnahmen nicht erreicht.

DURCHSTRÖMUNG DES KÜHLERS

Besondere Aufmerksamkeit wurde auch der Durchströmung der Wärmetauscher



in den Seitenkästen gewidmet. Befindet sich ein Fahrzeug nach einer längeren Volllastphase im Stillstand, besteht die Möglichkeit, dass das Kühlsystem überhitzt. Aufgrund der thermischen Trägheit wird weiterhin Wärme in das Kühlwasser eingeleitet, welche an die Umgebung abgeführt werden muss. Hierfür wird hinter dem Wasserkühler ein Lüfter angeordnet, der einen Luftstrom erzwingt. Die infrage kommenden Axiallüfter haben dabei einen runden Querschnitt, der Kühler ist hingegen rechteckig. Durch die Lüfternabe und die nicht von den Lüfterschaukeln überdeckten Ecken der Kühlermatrix wird somit eine inhomogene Durchströmung des Kühlers hervorgerufen.

Aus Messungen oder CFD-Simulationen lässt sich der Massenstrom an diskreten Punkten ermitteln. Die Inhomogenität ist dabei ein Maß für die Güte der Durchströmung. Liegt diese in einem Bereich von 50 %, kann von einer etwa um 10 % verminderten Wärmeabgabe am Kühler ausgegangen werden [1]. Dies begründet sich im nichtlinearen Verlauf der spezifischen Kühlerkennlinie. Da der Wärmeeintrag in das Kühlsystem durch thermische Trägheit zum aktuellen Motorlastpunkt leicht verschoben ist, muss der Kühler insbesondere nach einer Abbremsung aus Volllast bei niedriger Geschwindigkeit viel Wärme abführen können. Aber gerade bei niedriger Geschwindigkeit liegt durch den Lüfter eine hohe Ungleichverteilung des Massenstroms über der Kühlermatrix vor. Daher ist die Inhomogenität bei der Auslegung des Kühlsystems in der Formula Stu-

dent mit deren engen Kurven und daraus resultierenden Fahrgeschwindigkeiten von etwa 30 km/h nicht zu vernachlässigen.

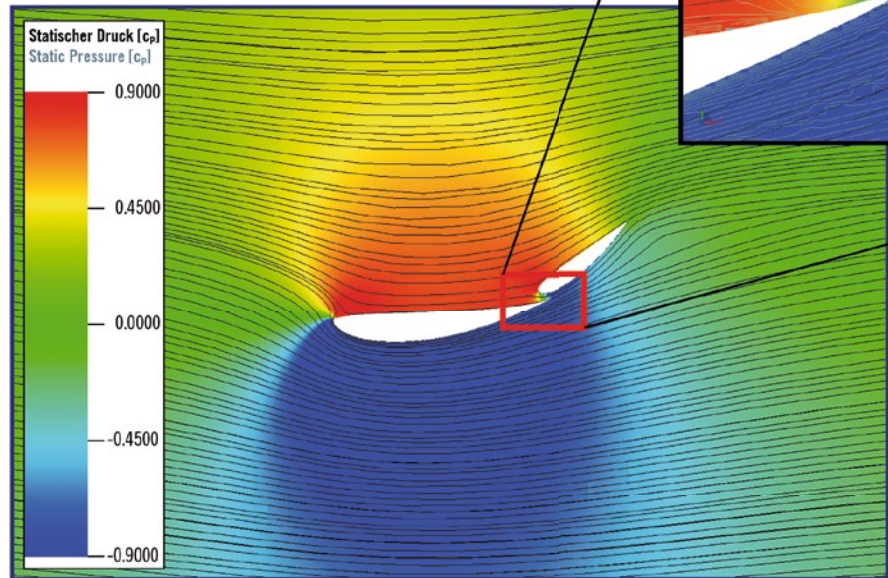
Für zwei unterschiedlich große und leistungsfähige Lüfter, welche direkt hinter dem Kühler angeordnet sind, konnte bei 30 km/h eine Inhomogenität von 45 % beziehungsweise 50 % ermittelt werden. Daher wurde bei der Auslegung des Kühlsystems eine Minderung der zunächst berechneten Kühlleistung berücksichtigt. Bei steigender Fahrgeschwindigkeit führt der dadurch ansteigende Druck vor dem Kühler zu einer gleichmäßigeren Durchströmung, wodurch sich die durch Inhomogenität bedingten Verluste bei der Wärmeabgabe wieder verringern, ①. Der im RTUS aktuell im Einsatz befindliche Lüfter weist bei 100 km/h eine Inhomogenität von nur noch etwa 12 % auf.

VERGLEICH HALBSEITIGE – GANZSEITIGE FAHRZEUGSIMULATION

Die Genauigkeit der Simulationsergebnisse hängt maßgeblich von der Modellbildung, also von der Qualität des Diskretisierungsgitters und der Wahl der Rand- und Anfangsbedingungen, ab. Viele CFD-Untersuchungen an einem Fahrzeug lassen sich auch mithilfe eines halbseitigen Modells durchführen. Ziel dabei ist, den Berechnungsaufwand zu reduzieren und somit die Rechenzeit zu minimieren. Vereinfachend wird eine Symmetrie des Fahrzeugs angenommen. Bei den bisherigen Fahrzeugen des RTUS ist diese Symmetrie nicht gegeben.

Der Kühler mit Lüfter befindet sich im linken Seitenkasten und die Abgasanlage mit dem Endschalldämpfer im rechten Seitenkasten. Die unterschiedlichen Luftwiderstände der Komponenten wirken sich dabei auch auf die Fahrzeugumströmung aus, sodass bei einer halbseitigen Strömungssimulation die aerodynamischen Beiwerte nicht einfach verdoppelt werden können. Am Rennwagen des RTUS von 2011 verursachte der Kühler mit Lüfter bei 100 km/h einen 24 Punkte höheren Luftwiderstand als die Abgasanlage. Während Kühler und Lüfter den Querschnitt des Seitenkastens vollständig ausfüllen, kann die Luft am Endschalldämpfer vorbeiströmen. Durch die unterschiedliche Durchströmung der Seitenkästen entstehen an diesen unterschiedliche Auftriebe. Dieser zusätzliche Auftrieb ist auf der Seite der Abgasanlage um 31 Punkte höher. Eine verlässliche Ermittlung der aerodynamischen Beiwerte muss daher an einem Gesamtfahrzeugmodell vorgenommen werden.

② 2-D-Simulation der Flügeldurchströmung
2-D simulation of the airflow through the wing



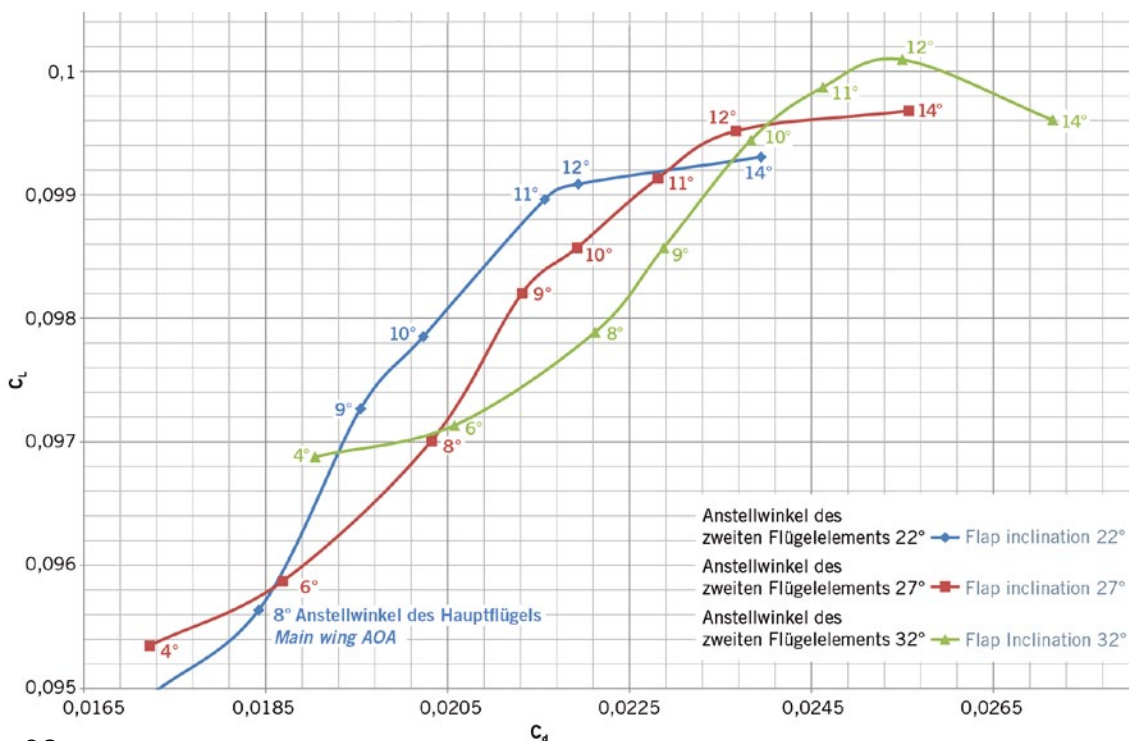
ENTWICKLUNG DES AKTUELLEN AERODYNAMIKPAKETS

Anhand dieser Ergebnisse wurde das aktuelle Aerodynamikpaket, bestehend aus Diffusor, Front- und Heckflügel, entwickelt. Dabei wurde besonders auf die Anströmung temperaturkritischer Kom-

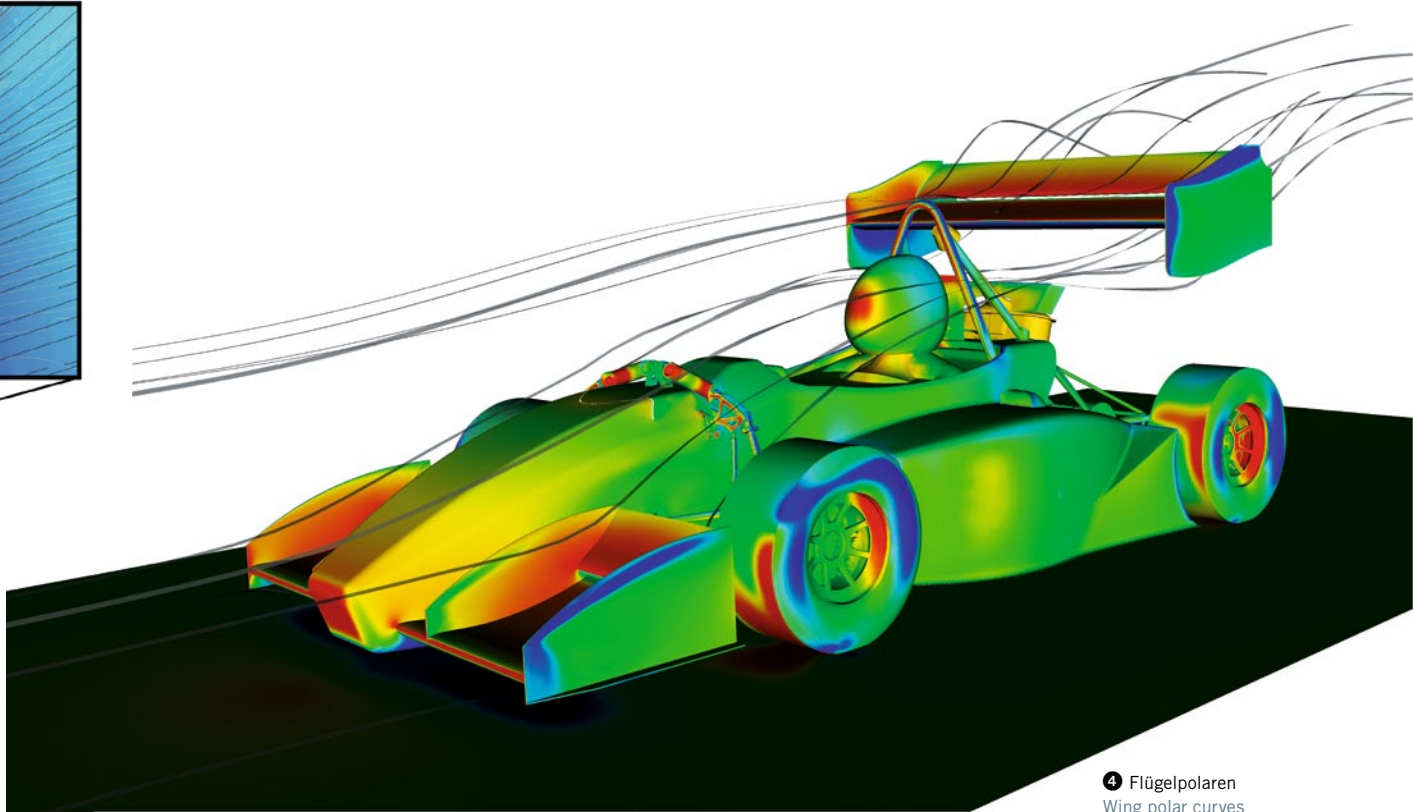
ponenten wie Bremse, Wasser- und Ölkühler geachtet.

Da eine Zunahme der Abtriebskraft meist mit einem steigenden Luftwiderstand verknüpft ist, sollte jede Komponente auf eine spezielle Aufgabe ausgelegt werden. So wurden Frontflügel und Diffusor auf maximal möglichen

Abtrieb ausgelegt, da diese durch Ausnutzung der Bodennähe ein gutes Verhältnis von Abtrieb zu Luftwiderstand aufweisen [2]. Der Heckflügel wird als Balanceelement eingesetzt und wurde auf hohe Effektivität ausgelegt, da dieser einen großen Beitrag zum Widerstand des Fahrzeugs leistet.



③ Polardiagramm des Frontflügels
Front wing polar curve



Es wurden unterschiedliche Profile zu verschiedenen mehrteiligen Flügeln kombiniert. Diese Flügel wurden anschließend mittels 2-D-Simulation auf ihr Potenzial bezüglich der entsprechenden Aufgabe untersucht, ❷. Vielversprechende Varianten wurden in Bezug auf den Spalt zwischen den Flügelteilen und Größenrelation

dieser zueinander optimiert. Anschließend wurden die Polaren der Flügel erstellt, um deren Einstellbereich festzulegen, ❸. Insgesamt wurden für die Erstellung der Flügelprofile über 200 Simulationen durchgeführt. Die Resultate dieser Simulationen wurden als Basis für die weitere Entwicklung mittels 3-D-Simula-

tion genutzt, ❹. In dieser wurden die endgültige Form und Position der Flügel, des Diffusors sowie der Seitenkästen und aller Kühlluftführungselemente festgelegt.

Bei der Entwicklung von abtrieberzeugenden Aerodynamikbauteilen muss die Beeinflussung der Fahrdynamik berücksichtigt werden. Hierbei spielen

Als Ingenieur souverän Kundenkontakte meistern



springer-gabler.de



Dirk Preußners
Sicher auftreten im Technischen Vertrieb
 So überzeugen Sie Ihre Kunden
 3. Aufl. 2012. 210 S. Br. EUR 34,95
 ISBN 978-3-8349-3220-4

 **Springer Gabler**

Einfach bestellen: SpringerDE-service@springer.com
 Telefon +49 (0) 6221 / 3 45 – 4301

Änderungen vorbehalten.
 Erhältlich im Buchhandel oder beim Verlag.

COMPARISON OF HALF-VEHICLE AND COMPLETE-VEHICLE SIMULATION

The accuracy of the simulations is largely dependent on the modelling, i.e. the quality of the mesh and choice of initial and boundary conditions. Many CFD studies on a vehicle can be performed using a half-vehicle model. The aim is to reduce the computational effort and thereby minimise computing time. For such a half-vehicle model, symmetry of the vehicle is assumed.

For previous vehicles from RTUS, this symmetry does not exist. The radiator, including the fan, is located in the left side pod, and the exhaust with the muffler is located in the right side pod. The different air resistances of the components affect the total vehicle airflow. Thus, the aerodynamic coefficients of a half-vehicle flow simulation may not simply be doubled. On the 2011 RTUS racing car, the radiator caused a 24-point higher air resistance at 100 km/h than the exhaust system. While the radiator and fan completely fill the cross-section of the side pod, the airflow can pass between the silencer and side pod, causing different lift on each side. This additional lift was 31 points higher on the side with the exhaust system. A determination of the aerodynamic coefficients must therefore be carried out on a complete-vehicle model.

DEVELOPMENT OF THE CURRENT AERODYNAMIC PACKAGE

From these results, the aerodynamic package, including the diffuser and the front and rear wings, was designed. In this process, the incoming flow on temperature-critical components such as brakes, water radiators and oil coolers was kept in mind.

Since a rise in downforce mostly results in an increase in drag, every component should be designed for a special task. For this reason, the front wing and diffuser were designed to provide maximum downforce, as they have a good lift-to-drag ratio aided by ground

effects [2]. The rear wing is used as a balancing element and should have high efficiency, as it has a high influence on the drag of the car. Various airfoil profiles were combined into several multi-part wings. These wings were then analysed using 2-D simulations for their potential regarding their special task, ②. The best variants were optimised with respect to the gap and the chord lengths of the different parts of the wing. Furthermore, the polar curves of the wings were determined in order to define their adjustment range, ③. Over 200 simulations were carried out during the design phase of the wings. These results formed the basis for 3-D simulations, ④, which were used to find the final position and form of the wings, diffuser, side pods and cooling air conductors.

When aerodynamic components to improve downforce are designed, the influence on vehicle dynamics must be kept in mind. Therefore, not only the balance of the car over the driving speed – i.e. the centre of attack of all aerodynamic forces – but also dynamic factors have to be considered. The behaviour of components which utilise ground effects, in situations such as pitching or rolling of the car, has to be analysed. An incorrect design for one of these components could destabilise the vehicle. The aerodynamic package was examined and optimised for these effects, and now enhances the handling of the car.

VALIDATION OF THE RESULTS

Due to the simplification and general shortcomings of CFD and numerical simulation, validation of the aerodynamic package is crucial. Downforce and drag were measured in straight-line tests, ⑤, using strain gauges mounted on the pushrods. This testing confirmed the lift coefficient $c_L = -1.85$ with a precision of 4 % and the drag coefficient $c_D = 1.01$ with a precision of 3 %.

In order to gather further information on the vehicle's air flow, wind tunnel experiments are often performed. A highly realistic reproduction of racetrack conditions is required. The rotation of

THANKS

Special thanks go to FKFS, in particular to Dr.-Ing. Timo Kuthada, and to Exa GmbH, which made the analysis possible by supporting with the supply of hardware and software.

the wheels and the relative movement between the car and the road have to be simulated. In today's state-of-the-art wind tunnels, this is achieved by a five-belt system [3]. As the track width of the car is too small for the 1:1 aero acoustic wind tunnel at Stuttgart University, a 1:3 car model was built to perform test runs in the model wind tunnel at the university, which also offers a five-belt system to simulate the road. With this set-up, non-static values could also be measured within a short time. The model had a modular structure in order to be able to test other aerodynamic packages. This also makes the use of later-generation cars possible, thus guaranteeing further development of the aerodynamics of the RTUS.

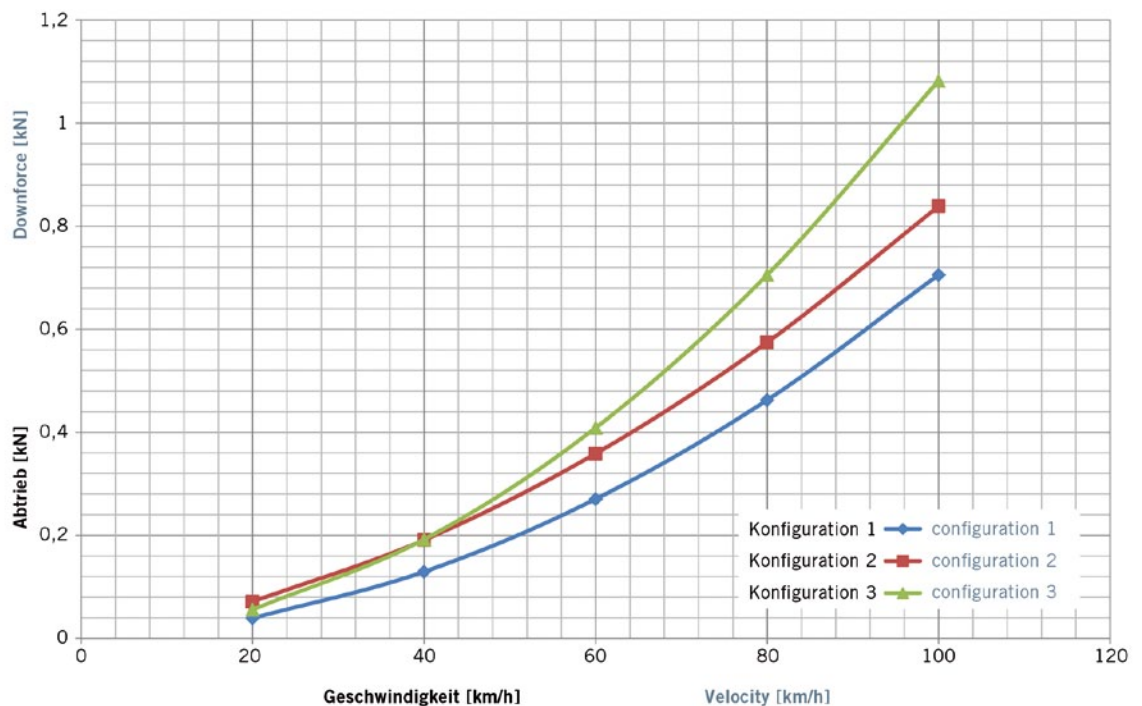
CONCLUSION AND OUTLOOK

The benefit of aerodynamics has been proven in a comparative run with the previous year's car. In this comparison, a 5 % faster lap time was measured. These results show the potential for aerodynamics in Formula Student and provide a baseline for future development at RTUS.

REFERENCES

- [1] Emmenthal, K.-D.: Verfahren zur Auslegung des Wasserkühlsystems von Kraftfahrzeugen. RWTH Aachen, dissertation, 1975
- [2] Katz, J.: Race Car Aerodynamics. Cambridge (USA): R. Bentley, 1995
- [3] Potthoff, J.; Wiedemann, J.: Die Straßenfahrt-Simulation in den IVK-Windkanälen – Ausführung und erste Ergebnisse. In: Bargende, M.; Wiedemann, J. (Hrsg.): 5th Stuttgart International Symposium. Proceedings, Renningen: Expert-Verlag, 2003

⑤ Abtriebskraft aus den Ausrollversuchen (drei Kombinationen für die Anstellwinkel der Flügelemente)
Downforce from the straight-line tests (three combinations of the flap inclination)



neben der Balance des Fahrzeugs über der Geschwindigkeit, also die Schwerpunkt-lage aller aerodynamischen Kräfte, auch dynamische Faktoren eine Rolle. So muss bei Teilen, die bei der Erzeugung von Abtrieb den Bodeneffekt nutzen, der Einfluss von Fahrzeugbewegungen wie Nicken oder Wanken untersucht werden. Durch eine falsche Auslegung könnte hier sonst eine Destabilisierung des Fahrzeugs hervorgerufen werden. Das Aerodynamikpaket wurde bei der Entwicklung mittels Simulation auf solche Effekte hin untersucht, optimiert und trägt nun zum Handling des Fahrzeugs bei.

VALIDIERUNG DER SIMULATIONSERGEBNISSE

Aufgrund der Vereinfachungen bei der Simulation und numerischer Fehler ist eine Validierung der Ergebnisse notwendig. Dazu wurden Messungen der Abtriebs- und Widerstandskräfte im Ausrollversuch durchgeführt, ⑤. Hierbei wurden die Kräfte in den Pushrods mittels Dehnmessstreifen erfasst. Durch dieses Verfahren konnten der simulierte Abtriebsbeiwert $c_A = -1,853$ mit einer Abweichung von 3 % und der Widerstandsbeiwert $c_W = 1,017$ mit einer Abweichung von 4 % bestätigt werden.

Um weitere Informationen über die Fahrzeugumströmung zu bekommen,

werden häufig auch Windkanalversuche durchgeführt. Dabei ist auf eine möglichst exakte Abbildung der Situation auf der Straße zu achten. Dazu muss die Rotation der Räder sowie die Relativbewegung zwischen Fahrzeug und Fahrbahn nachgebildet werden. Dies wird in heutigen Standard-Technik-Windkanälen durch ein Fünf-Band-System realisiert [3]. Da das Fahrzeug aufgrund der geringen Spurweite nicht im 1:1-Aeroakustik-Windkanal der Universität Stuttgart untersucht werden kann, wurde ein 1:3-Fahrzeugmodell für Untersuchungen im Modellwindkanal der Universität Stuttgart, der ebenfalls mit einem Fünf-Band-Straßenfahrtsimulationssystem ausgestattet ist, aufgebaut. Mit dessen Hilfe können auch nicht statische Werte, wie die Veränderung der Lage des Druckschwerpunktes über die Geschwindigkeit, in kürzester Zeit ermittelt werden. Das Modell ist modular aufgebaut, um verschiedene Varianten von aerodynamischen Anbauteilen testen zu können. Dadurch ist zusätzlich eine Verwendung für Fahrzeuge der nächsten Generationen möglich, wodurch eine nahtlose Weiterentwicklung der Aerodynamik beim RTUS gewährleistet ist.

FAZIT UND AUSBLICK

Der Nutzen der Aerodynamik konnte durch Vergleichsfahrten mit dem Vor-

gängerfahrzeug bestätigt werden. In diesem Vergleich wurde eine 5 % schnellere Rundenzeit gemessen. Diese Resultate bestätigen das Potenzial der Aerodynamik in der Formula Student und zeigen damit auch eine Richtung für zukünftige Entwicklungen des RTUS.

LITERATURHINWEISE

- [1] Emmenthal, K.-D.: Verfahren zur Auslegung des Wasserkühlsystems von Kraftfahrzeugen. RWTH Aachen, Dissertation, 1975
- [2] Katz, J.: Race Car Aerodynamics. Cambridge (USA): R. Bentley, 1995
- [3] Potthoff, J.; Wiedemann, J.: Die Straßenfahrt-Simulation in den IVK-Windkanälen - Ausführung und erste Ergebnisse. In: Bargende, M.; Wiedemann, J. (Hrsg.): 5. Internationales Stuttgarter Symposium Kraftfahrwesen und Verbrennungsmotoren. Tagungsband, Renningen: Expert-Verlag, 2003

DANKE

Großer Dank gilt dem Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart FKFS, dabei insbesondere Dr.-Ing. Timo Kuthada, sowie der Firma Exa, welche die Untersuchungen durch die Bereitstellung von Hard- und Software ermöglicht haben.