



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Bachelorarbeit

Andreas Walter

Aerodynamik für ein Formel- Rennfahrzeug

*Fakultät Technik und Informatik
Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau*

*Faculty of Engineering and Computer Science
Department of Automotive and
Aeronautical Engineering*

Andreas Walter

**Aerodynamik für ein Formel-
Rennfahrzeug**

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung
im Studiengang Fahrzeugbau
am Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

in Zusammenarbeit mit:

HAWKS Racing e.V.
Berliner Tor 9
20099 Hamburg

Erstprüfer: Prof. Stefan Bigalke

Zweitprüfer: Prof. Alexander Piskun, M.Sc.

Abgabedatum: 29.03.2014

Zusammenfassung

Andreas Walter

Thema der Bachelorthesis

Aerodynamik für ein Formel-Rennfahrzeug

Stichworte

Aerodynamik, Motorsport, Formula Student, Antrieb, Widerstand, Flügel, Diffusor, Bodeneffekt, Strömungssimulation, Vorgehensweise, Simulationsprozedur, Auswertungstool.

Kurzzusammenfassung

Die Aerodynamik ist im Motorsport ein wichtiges, wenn nicht das wichtigste Entwicklungsgebiet. Auch die Formula Student Teams schlagen immer öfter diese Route ein. Dabei begegnen ihnen Widrigkeiten bei der Entwicklung eines funktionierenden Aeropackets. Die Entwicklungszeit ist kurz, das Ausgangswissen oft begrenzt und der Einfluss des professionellen Motorsports schränkt die Vielfalt der Konstruktionen ein. Diese Arbeit soll den Einstieg in die erfolgreiche Entwicklung eines Aerodynamikpackets für kleine Formel Rennfahrzeuge erleichtern.

Neben einer Vorstellung der theoretischen Grundlagen der Aerodynamik werden Unterschiede zum professionellen Motorsport und die Besonderheiten der Formula Student erläutert. Anhand eines Beispiels wird die Entwicklung eines Aeropackets beschrieben. Die dafür benötigten Methoden werden entwickelt und ausführlich vorgestellt.

Abstract

Andreas Walter

Title of Thesis

Aerodynamics for an open wheel race car

Key words

Aerodynamics, motorsports, formula student, downforce, drag, wings, diffuser, ground effect, computational fluid dynamics, how-to guide, simulation procedure, verification tool

Abstract

Aerodynamics is the most important field of investigation in motorsports. More and more Formula Student teams implement aerodynamics into their vehicles. They are facing several problems during the development of aerodynamics. The time schedule is tight and the knowledge is limited in most cases. It is further influenced by the development in professional motorsport, which decreases the variety of designs. This thesis gives an introduction to a successful development of aerodynamics for an open wheel race car.

After an introduction of the theory behind aerodynamics, differences between professional motorsports and the specific needs of Formula student cars are shown. The process of the development is described with an example. The needed tools and methods are described in detail.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
2 Aerodynamische Grundlagen.....	2
2.1 Auftrieb und Widerstand.....	2
2.2 Strömungsarten	4
2.3 Grenzschicht	6
3 Aerodynamik im Motorsport.....	8
3.1 Fahrdynamik	9
3.2 Abstimmung	14
3.3 Balance	16
4 Entwicklungen im Motorsport	19
4.1 Spoiler.....	21
4.2 Flügel	22
4.2.1 Terminologie von Flügelprofilen.....	24
4.2.2 Einfluss des Anstellwinkels.....	25
4.2.3 Einfluss der Krümmung	26
4.2.4 Einfluss der Dicke.....	27
4.2.5 Einfluss des Seitenverhältnisses	28
4.2.6 Einfluss des Bodenabstands	30
4.2.7 Gurney Flaps	31
4.2.8 Mehrteilige Flügel	32
4.2.9 Mehrstöckige Flügel	35
4.3 Fahrzeugform	36
4.3.1 Ebene Unterböden	38
4.3.2 Flügelautos.....	39
4.3.3 Diffusoren	41
4.3.4 Luftleitelemente	43
4.3.4.1 Vortexgeneratoren.....	43
4.3.4.2 Tauchplatten.....	44

5 Visualisierungs- und Validierungsmethoden	46
5.1 Testfahrten.....	46
5.2 Windkanal	48
5.3 Strömungssimulation.....	49
5.3.1 Berechnungsgrundlagen	50
5.3.2 Turbulenzmodelle	51
5.3.2.1 Reynolds-gemittelte Navier-Stockes-Gleichungen	52
5.3.2.2 Grobstruktursimulation	54
5.3.3 Ablauf einer Simulation.....	55
6 Formula Student	58
6.1 Der Wettbewerb	58
6.1.1 Statische Disziplinen	59
6.1.1.1 Engineering Design	60
6.1.1.2 Cost & Manufacturing Event.....	60
6.1.1.3 Business Plan Presentation.....	60
6.1.2 Dynamische Disziplinen	61
6.1.2.1 Skid Pad.....	61
6.1.2.2 Acceleration.....	62
6.1.2.3 Autocross.....	62
6.1.2.4 Endurance	62
6.1.2.5 Fuel Efficiency	63
6.2 Aerodynamik in der Formula Student.....	64
7 Unterschiede zu professionellen Rennserien	72
7.1 Geschwindigkeit.....	72
7.2 Fahrzeuggröße	74
7.3 Reglement.....	78
8 Entwicklung Simulationsprozedur	84
8.1 Auswahl Software	85
8.2 Geometrie	86

8.3 Vernetzung.....	89
8.4 Randbedingungen.....	90
8.5 Solver.....	94
8.6 Postprozessor.....	95
9 Entwicklung Aerodynamikpaket	96
9.1 H08	96
9.1.1 Analyse H08	98
9.1.2 Fazit H08	105
9.2 Entwicklung fortschrittliches Aeropaket	106
9.2.1 Chassis.....	106
9.2.2 Frontflügel	109
9.2.3 Heckflügel.....	115
9.2.4 Unterboden.....	118
9.2.5 Gesamtfahrzeugsimulation.....	124
9.2.6 Iterationsschritte	128
10 Fazit	132
11 Quellenverzeichnis.....	xv
Anhang A Klickanleitung	A
Anhang B Ergebnisse H08.....	B
Anhang C Ergebnisse Gesamtfahrzeug 1	C
Anhang D Ergebnisse Gesamtfahrzeug 2	D
Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung	letzte Seite

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Reynoldszahlen	7
Tabelle 2 Haftbeiwerte	11
Tabelle 3 Werte für den Wirkungsgrad	13
Tabelle 4 Terminologie des Flügelprofils	24
Tabelle 5 Vergleich Simulation mit Experiment	54
Tabelle 6 Auswertung der Teams in Hockenheim 2010 bis 2013	68
Tabelle 7 Entwicklung der Rundenzeit beim Autocross	69
Tabelle 8 Spezifische Fahrzeugparameter H08	99
Tabelle 9 Simulationsergebnisse der Frontflügelvarianten	114
Tabelle 10 Simulationsergebnisse der Heckflügelvarianten	117
Tabelle 11 Simulationsergebnisse der Unterbodenvarianten	121

Formelverzeichnis

Gleichung 1 Bernoullische Druckgleichung	2
Gleichung 2 Abtriebskraft	3
Gleichung 3 Widerstandskraft	3
Gleichung 4 Reynoldszahl	7
Gleichung 5 Haftreibungszahl	10
Gleichung 6 Vertikale Last	10
Gleichung 7 Kurvengeschwindigkeit	11
Gleichung 8 Querbesehleunigung	12
Gleichung 9 H6chstgeschwindigkeit	12

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1 Umströmung eines Flügelprofils	3
Abb. 2 Druckverteilung an einem Flügelprofil	3
Abb. 3 Laminare und turbulente Strömung	4
Abb. 4 Geschwindigkeitsverteilung an einer gekrümmten Wand	5
Abb. 5 Wirbel hinter einer abrupten Geometrieänderung	5
Abb. 6 Grenzschichtströmung und ihre Bestandteile	6
Abb. 7 Querbesehleunigung mit und ohne aerodynamischen Abtrieb	8
Abb. 8 Seitenkraft über Schräglaufwinkel	10
Abb. 9 Fahrtwiderstände	13
Abb. 10 Einfluss von Abtriebs- und Widerstandsbeiwerten auf die Rundenzeit	14
Abb. 11 Windschatten	16
Abb. 12 Auto Union Typ C	19
Abb. 13 Porsche Sascha	19
Abb. 14 Karosserieform als Flügelprofil	20
Abb. 15 Flügelähnliche Form des Mercedes Benz CLR	21
Abb. 16 Überschlag eines Mercedes Benz CLR	21
Abb. 17 Lancia Stratos	21
Abb. 18 Jaguar XJ S	21
Abb. 19 Opel RAK2	23
Abb. 20 Porsche 550 Spyder von Michael May	23
Abb. 21 Chaparall 2F	23
Abb. 22 Honda Formel Eins Rennfahrzeug	23
Abb. 23 Größen an einem Flügelprofil	24

Abb. 24 NACA 6412 Profil	25
Abb. 25 Druckverteilungskombination	26
Abb. 26 Abtriebsbeiwert über Anstellwinkel	27
Abb. 27 Abtriebsbeiwert über Profildicke	28
Abb. 28 Effekt von Seitenplatten	29
Abb. 29 Einfluss des Seitenverhältnisses	29
Abb. 30 Einfluss des Bodenabstands	30
Abb. 31 Wirkungsweise eines Gurney Flaps	31
Abb. 32 Flügel mit und ohne Gurney Flap	31
Abb. 33 Aufbau eines mehrteiligen Flügels	33
Abb. 34 Lehrvideo der NACA	34
Abb. 35 Abtriebsbeiwerte von verschiedenen Flügelkombinationen	34
Abb. 36 Fokker Dr.I Dreidecker	35
Abb. 37 VW New Beetle Rally Car	35
Abb. 38 Peugeot 905	36
Abb. 39 Williams FW 15C	36
Abb. 40 Gebrochene Flügelanbindung	37
Abb. 41 Niederdruckgebiet im Totwasser	38
Abb. 42 Chaparall 2J	39
Abb. 43 Brabham BT46	39
Abb. 44 Venturi Tunnel des Lotus 78	40
Abb. 45 Venturi Tunnel des Lotus 79b	40
Abb. 46 Flügelförmige Seitenkästen am March 701	40
Abb. 47 Venturi Tunnel eines Renault RE 30b	40
Abb. 48 Diffusor an einem Indy Car	42

Abb. 49 Komplexer Diffusor am Heck eines Carlsson SLK	42
Abb. 50 Diffusorgeometrie	42
Abb. 51 Abtriebswerte bei verschiedenen Diffusorwinkeln	42
Abb. 52 Vortexgeneratoren am Subaru Impreza	44
Abb. 53 Vortexgeneratoren am Formel E Boliden	44
Abb. 54 Tauchplatten Audi A5 DTM	45
Abb. 55 Tauchplatte BAR Honda F1	45
Abb. 56 Durch Tauchplatten verursachter Wirbel	45
Abb. 57 Wollfäden zur Visualisierung der Oberflächenströmung	47
Abb. 58 Flow Viz Farbe zur Visualisierung der Oberflächenströmung	47
Abb. 59 Messeinrichtung zur Aufnahme der Druckverhältnisse	47
Abb. 60 Windkanalversuch	48
Abb. 61 Strömungsvisualisierung mittels Rauchsonde	48
Abb. 62 Berechnungsgitter	50
Abb. 63 Wandgesetz	53
Abb. 64 Beispiel eines konvergierenden Residuenverlaufs	56
Abb. 65 Visualisierungsmöglichkeiten eines Postprozessors	57
Abb. 66 Tech Sticker	59
Abb. 67 Layout Skid Pad	61
Abb. 68 Punkte bei einem Formula Student Event	63
Abb. 69 Streckenlayout für den Autocross und Endurance	64
Abb. 70 TU Delft	66
Abb. 71 Sooner Racing Team	66
Abb. 72 Freiräume für die Räder	67
Abb. 73 Global Formula Racing Team 2011	70

Abb. 74 AMZ Racing Team 2012	70
Abb. 75 DRS Red Bull	73
Abb. 76 DRS Monash Motorsports Team	73
Abb. 77 Größenvergleich zwischen Formel Eins Formula Student	74
Abb. 78 Lotus ohne Frontflügel	75
Abb. 79 FH Aachen	75
Abb. 80 Global Formula Racing Team Elektro	76
Abb. 81 Strömungen an einem einzelnen, drehenden Rad	77
Abb. 82 Strömungen an einem einzelnen, stehenden Rad	77
Abb. 83 Strömungssimulation eines drehenden Rades	78
Abb. 84 Frontflügel Universität Erlangen	79
Abb. 85 Komplexe Seitenplatten University of Auckland	79
Abb. 86 Komplexer Frontflügel Lotus Renault	80
Abb. 87 Beschädigter Frontflügel Lotus Renault	80
Abb. 88 Radblenden University of Western Australia	81
Abb. 89 University of Alberta	81
Abb. 90 Mitsubishi Lancer	83
Abb. 91 Honda NSX Pike's Peak Hillclimb Race	83
Abb. 92 Suzuki Escudo	83
Abb. 93 A-Mod Fahrzeug	83
Abb. 94 Für die Simulation vereinfachte Geometrie	87
Abb. 95 Windtunnelabmaße für die Simulation	88
Abb. 96 Berechnungsgitter der Simulationsprozedur	89
Abb. 97 Prismenschichten	90
Abb. 98 Viskose Effekte	91

Abb. 99 Chalmers FSAE Team	93
Abb. 100 Druckverteilung eines Frontflügels	95
Abb. 101 H08 in Österreich 2012	96
Abb. 102 Testflügel am 2011er Fahrzeug H07	97
Abb. 103 Seitenansicht des Bugs unter der Nase	97
Abb. 104 Ansichten des H08	98
Abb. 105 Ergebnisse für den H08	101
Abb. 106 Darstellung des H08 von Unten	102
Abb. 107 Nase im 0Y-Schnitt	103
Abb. 108 Druckverteilung auf der Oberfläche des H08	104
Abb. 109 Vom Vorderrad verursachte Wirbel	105
Abb. 110 Platzbedarf Ergonomie, Antriebsstrang und Crashelement	107
Abb. 111 Einstiegstemplate und Fußraumtemplate	107
Abb. 112 Neu konstruiertes Chassis mit erhöhter Nase	108
Abb. 113 Stromlinien in der Mitte des Rades	109
Abb. 114 Vom Rad induzierte Verwirbelungen	109
Abb. 115 Bauraumbegrenzungen	110
Abb. 116 Druckbeiwertplot aus Javafoil	111
Abb. 117 Frontflügel Variante 1	113
Abb. 118 Frontflügel Variante 2	113
Abb. 119 Frontflügel Variante 3	113
Abb. 120 Frontflügel Variante 4	113
Abb. 121 Frontflügel Variante 5	113
Abb. 122 Frontflügel Variante 6	113
Abb. 123 Frontflügel Variante 7	114

Abb. 124 Heckflügel Variante 1	116
Abb. 125 Heckflügel Variante 2	116
Abb. 126 Heckflügel Variante 3	116
Abb. 127 Heckflügel Variante 4	116
Abb. 128 Heckflügel Variante 5	117
Abb. 129 Druckverteilung der Unterbodenvariante 1	119
Abb. 130 Druckverteilung der Unterbodenvariante 2	119
Abb. 131 Druckverteilung der Unterbodenvariante 3	119
Abb. 132 Druckverteilung der Unterbodenvariante 4	119
Abb. 133 Druckverteilung der Unterbodenvariante 5	120
Abb. 134 Druckverteilung der Unterbodenvariante 6	120
Abb. 135 Druckverteilung der Unterbodenvariante 7	120
Abb. 136 Druckverteilung der Unterbodenvariante 8	120
Abb. 137 Zusatzelemente	122
Abb. 138 Radblende vorn	123
Abb. 139 Durch die Radblende verbesserten Anströmung	124
Abb. 140 Kombination aus den besten Einzelkomponenten	125
Abb. 141 Stromlinienplot der vom Frontflügel beeinflussten Strömung	126
Abb. 142 Druckverteilung auf der Oberfläche des Fahrzeugs	126
Abb. 143 Darstellung der Druckverteilung des Heckflügels	127
Abb. 144 Ergebnisse für das Gesamtfahrzeug 1	128
Abb. 145 Geändertes Modell, Gesamtfahrzeug 2	129
Abb. 146 Darstellung der Strömung und Druckverteilung	129
Abb. 147 Ergebnisse für das Gesamtfahrzeug 2	131

1 Einleitung

"...give a driver 10% extra power and he still complains the car is not fast enough. Give him 10% extra downforce and he drives like a hero...."

(Spruch aus dem Motorsport)

Das Thema Aerodynamik ist mit dem Motorsport verbunden wie kaum ein anderes. In der Formula Student wurde es dagegen bis zum Jahr 2011 kaum beachtet. Für die Saison 2011 wurde von den Offiziellen das Reglement hinsichtlich der Begrenzungen für aerodynamische Bauteile geändert. Das hat einen Boom ausgelöst, viele Teams haben Flügel und Unterböden für ihre Fahrzeuge entworfen und so ihre Leistungsfähigkeit deutlich gesteigert.

Allerdings sind die meisten dieser Entwürfe recht simpel gehalten, und die Designs verschiedener Teams beginnen zu konvergieren. Ähnlich verhält es sich mit der Leistungssteigerung innerhalb eines Teams von Saison zu Saison. War der Sprung zwischen einem Fahrzeug ohne aerodynamische Hilfsmittel und einem beflügelten Fahrzeug noch sehr groß, so unterscheiden sich die Leistungsdaten der zweiten aerodynamischen Generation kaum noch von der Ersten.

Es gibt umfangreiche Literatur zum Thema Aerodynamik für den Motorsport, die für die Entwicklung eines Rennfahrzeugs herangezogen werden kann und in der Formula Student auch angewandt wird. Allerdings gibt es kaum Untersuchungen für diesen speziellen Anwendungsfall. Daher sollen in dieser Ausarbeitung die Besonderheiten der Rennserie im Vergleich zum klassischen Motorsport herausgestellt werden. An Hand von verschiedenen, im Motorsport bekannten Konzepten soll die Umsetzbarkeit dieser für ein Formula Student Fahrzeug untersucht und mit den Leistungswerten eines Fahrzeugs der ersten Aerogeneration verglichen werden.

Die Ergebnisse und Methoden dieser Arbeit sollen eine Grundlage für zukünftige Entwicklungen bilden und den Horizont zukünftiger Teams für die Möglichkeiten und Einschränkungen, die in der Aerodynamikentwicklung für die Formula Student vorhanden sind, erweitern.

2 Aerodynamische Grundlagen

2.1 Auftrieb und Widerstand

Bewegt sich ein Körper durch die Luft bzw. strömt die Luft um einen Körper, wirken aerodynamische Kräfte auf diesen. Diese lassen sich unterteilen in eine Widerstandskraft, die der Strömungsrichtung entgegen wirkt und eine Auftriebskraft senkrecht zur Strömung.

Der Widerstand setzt sich zusammen aus dem Reibungs- und dem Druckwiderstand. Dabei entsteht der Reibungswiderstand durch Schubspannungen an den Wänden des umströmten Körpers, die durch das viskose Fluid Luft übertragen werden. Der Druckwiderstand entsteht durch Druckänderungen auf den Oberflächen des Körpers.

Der Auftrieb entsteht ebenfalls durch Druckänderungen auf der Oberfläche des umströmten Körpers und ist abhängig von der Form des Körpers.

Nach Bernoulli¹ ist der Druck neben der Dichte des Fluids auch abhängig von der Geschwindigkeit der Strömung, er sinkt mit zunehmender Strömungsgeschwindigkeit:

Gleichung 1: Bernoullische Druckgleichung

$$p + \frac{\rho}{2} V^2 = konst.$$

mit:

p :	statischer Druck
ρ :	Dichte des Fluids
V :	Strömungsgeschwindigkeit
$\frac{\rho}{2} V^2$:	Term für dynamischen Druck

¹ Daniel Bernoulli, Schweizer Mathematiker und Physiker (1700-1782)

Dieses Prinzip lässt sich am Beispiel eines Flügelprofils anschaulich erklären:

Die Strömung wird durch den Flügel geteilt, dabei muss die Luft oberhalb des Flügels einen kürzeren Weg zurücklegen als unterhalb. Die Strömung oberhalb wird beschleunigt, die Strömung unterhalb verzögert. Dadurch herrscht auf der Oberseite ein Unterdruck und auf der Unterseite ein Überdruck. Beide Druckunterschiede ergeben zusammen mit der Fläche auf die sie wirken die Auftriebskraft. Diese Kraft lässt z.B. Flugzeuge fliegen. Abbildungen 1 und 2 veranschaulichen dieses Prinzip. [WES03]

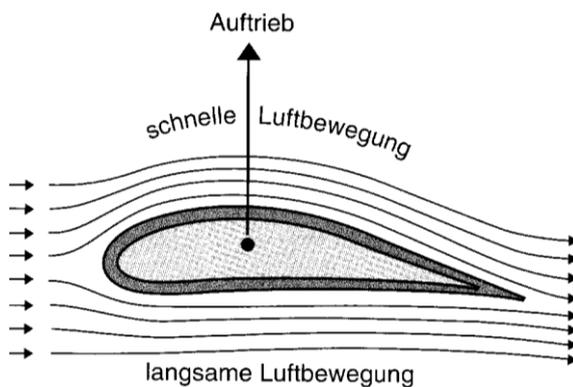


Abb. 1 Symbolische Darstellung der Umströmung eines Flügelprofils [BIN14]

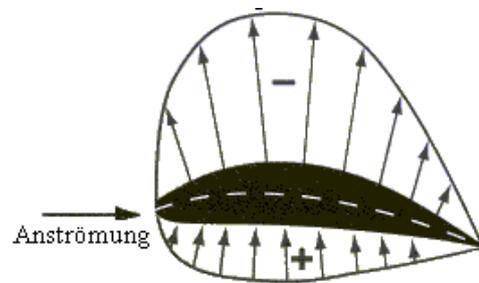


Abb. 2 Druckverteilung an einem Flügelprofil [AVI03]

Wird der Flügel gedreht, entsteht die Abtriebskraft.

Die Kräfte lassen sich mit Abwandlungen der Bernoulli-Gleichung berechnen:

Gleichung 2: Abtriebskraft

$$F_a = C_a \frac{\rho}{2} V^2 A$$

Gleichung 3: Widerstandskraft

$$F_w = C_w \frac{\rho}{2} V^2 A$$

mit:

F_a : Abtriebskraft

F_w : Widerstandskraft

C_a : Abtriebsbeiwert

C_w :	Widerstandsbeiwert
A :	Fläche, auf der der Druck wirkt. Bei stumpfen Körpern wie Fahrzeugen wird die projizierte Fläche aus der Frontansicht herangezogen, bei aerodynamischen Körpern, wie einem Flügel, die aus der Draufsicht.

[MCB98]

2.2 Strömungsarten

Bei Strömungen um Körper wird zwischen zwei Arten unterschieden, der laminaren und der turbulenten Strömung (siehe Abb. 3). Bei der laminaren Strömung bewegen sich alle Teilchen in die gleiche Richtung wie die lokale Gesamtströmung. Bei der turbulenten Strömung entstehen lokale Wirbel in denen der Richtungsvektor der Strömung von der Gesamtströmung abweicht.

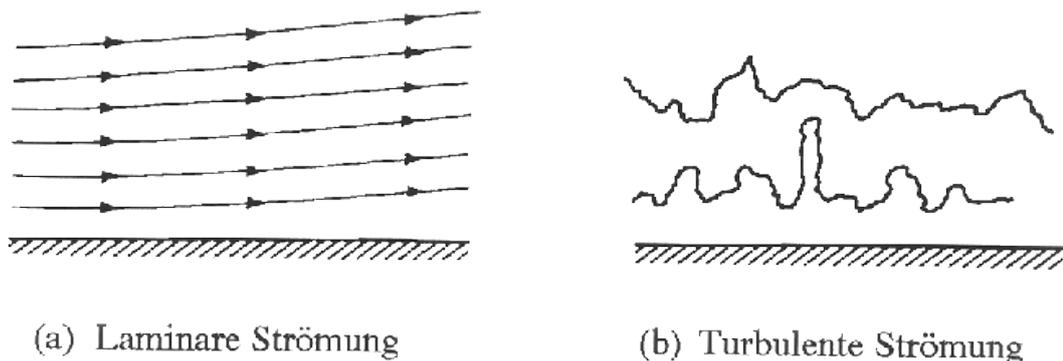


Abb. 3 Darstellung der laminaren Strömung links und der turbulenten Strömung rechts [HSB96]

Folgt die Strömung der Geometrie des Körpers, spricht man von anliegender laminarer Strömung, entstehen lokale Turbulenzen, so spricht man von abgelöster Strömung.

Ablösungen entstehen durch starke Verzögerungen in Wandnähe. Erreicht die Geschwindigkeit den Wert Null, entsteht ein langsamer, der Strömung entgegen drehender Wirbel, der die Gesamtströmung abreißen lässt. Je stärker die Richtungsänderung der Strömung durch die Krümmung der Wand dabei ist, umso früher kommt es zu Ablösungen (siehe Abb.4).

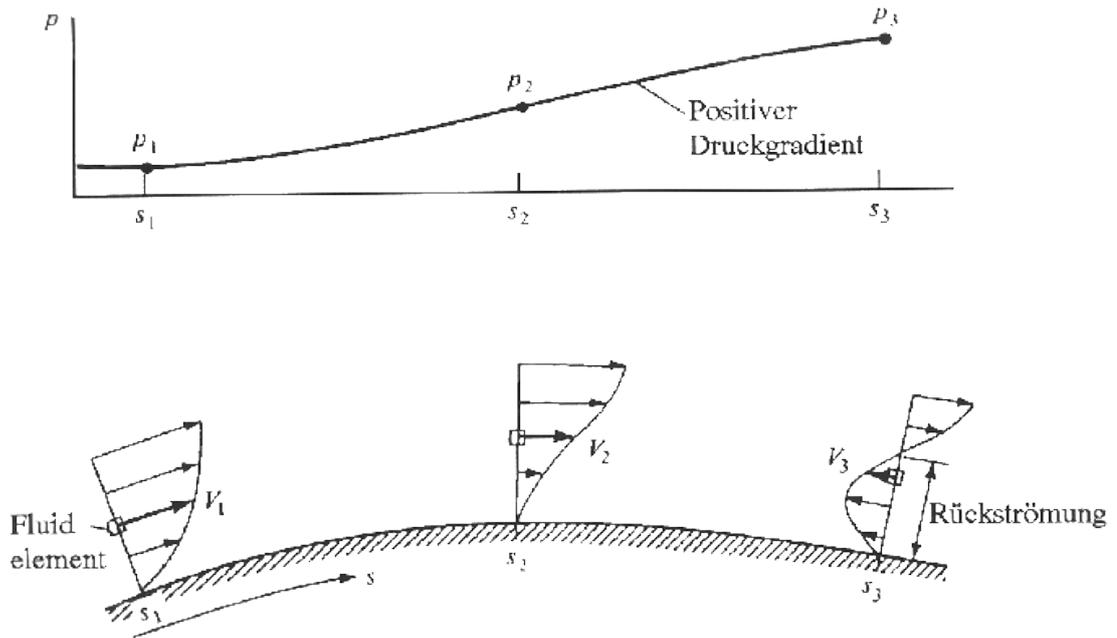


Abb. 4 Darstellung der Geschwindigkeitsverteilung an einer gekrümmten Wand abhängig von der Lauflänge [HSB96]

Es gibt auch geometrieabhängige Ablösungen, diese entstehen, wenn die Strömung der Geometrie nicht folgen kann, z.B. durch eine abrupte Änderung der Geometrie, wie die in Abbildung 5 abgebildete Stufe. Dabei entstehen ebenfalls der Strömung entgegen drehende Wirbel, die die Hauptströmung ablösen. [LES90]

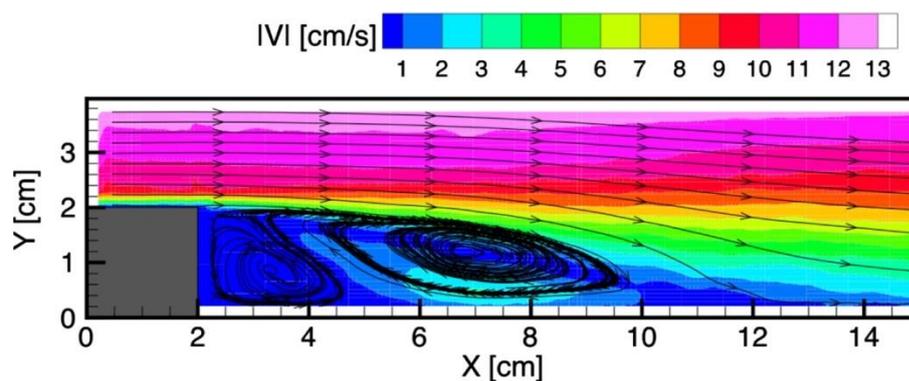


Abb. 5 Darstellung von Wirbeln, die hinter einer abrupten Geometrieänderung entstehen. Hier mit farbigem Geschwindigkeitsfeld und Stromlinien. [SCH08]

2.3 Grenzschicht

Neben der vollausgebildeten Strömung bildet sich eine viskose Grenzschicht unmittelbar an der Oberfläche des umströmten Körpers. Sie ist ein Bereich, in dem sich die Reibung zwischen den Luftpartikeln und der Oberfläche auf die Geschwindigkeit der Strömung auswirkt. Die der Wand am nächsten befindlichen Luftteilchen haben dabei keine Geschwindigkeit und verzögern die darüber strömenden Teilchen. Die Dicke der Grenzschicht wird größer, je länger die Wand ist. Es handelt sich dabei nicht um eine feste Größe, da der Übergang zwischen den einzelnen Schichten ein fließender ist. Die Dicke wird daher als Abstand zwischen Wand und einer Strömung mit 99% der Gesamtgeschwindigkeit bezeichnet.

Die Grenzschicht kann laminar, teilturbulent oder vollturbulent sein. Der Turbulenzgrad ist dabei abhängig von vielen Faktoren wie Strömungsgeschwindigkeit, Oberflächenrauigkeit, Lauflänge und Viskosität. Die möglichen Arten sind in Abbildung 6 dargestellt.

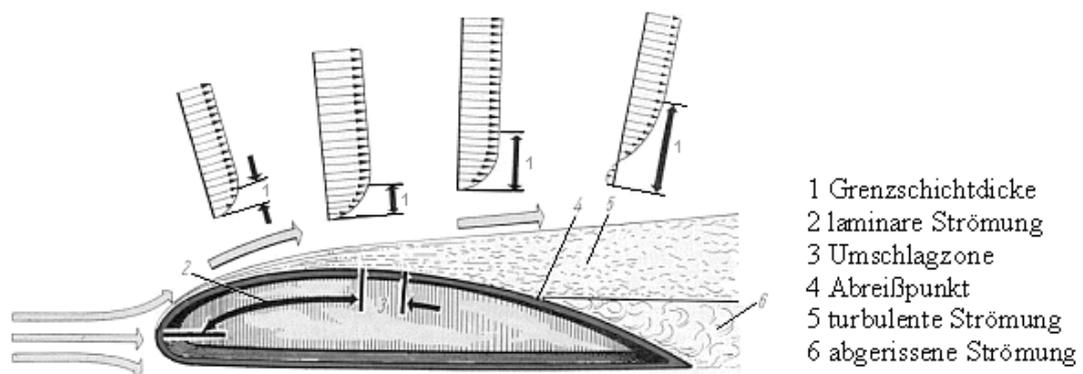


Abb. 6 Darstellung der Grenzschichtströmung und ihren Bestandteilen [AVI03]

Eine laminare Grenzschicht zeichnet sich durch einen geringeren Reibungswiderstand und einer geringeren Dicke im Vergleich zur turbulenten Grenzschicht aus. Durch den größeren Impulsaustausch zwischen den Teilchen in einer turbulenten Grenzschicht besitzt diese dafür mehr kinetische Energie, ist dadurch richtungsstabiler und löst daher deutlich später ab. [SCH06]

Zur Abschätzung der Strömungsart kann die Reynoldszahl² herangezogen werden:

Gleichung 4 : Reynoldszahl

$$Re = V \frac{l}{\nu}$$

Re : Reynoldszahl

V : Strömungsgeschwindigkeit

l : Lauflänge (z.B. die Länge eines Fahrzeugs oder eines Flügelprofils)

ν : kinematische Viskosität des Fluids

Tabelle 1 zeigt die Zuordnung verschiedener Reynoldszahlen den Strömungsarten.

Tabelle 1: Reynoldszahlen mit zugehörigen Strömungsarten [DEM11]

Reynoldszahl	Strömungsart
$Re < 4$	anliegend, laminar
$4 < Re < 40$	anliegend mit Ausbildung von kleinen Wirbeln
$40 < Re < 200$	anliegend mit Ausbildung von Wirbelschleppen
$200 < Re < 3 \cdot 10^5$	abgelöst mit laminarer Grenzschicht
$3 \cdot 10^5 < Re < 3 \cdot 10^6$	abgelöst mit teilturbulenter Grenzschicht
$Re > 3 \cdot 10^6$	abgelöst mit turbulenter Grenzschicht

² Osborne Reynolds, britischer Physiker (1842-1912)

3 Aerodynamik im Motorsport

Die Aerodynamik im Motorsport spielte zu Anfangszeiten eine untergeordnete Rolle. Im Gegensatz dazu ist sie in modernen Rennserien das alles bestimmende Instrument in der Fahrzeugentwicklung und Fahrdynamik. Kein anderes Entwicklungsfeld hat einen so enormen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit eines Rennfahrzeugs wie die Aerodynamik, wie Abbildung 7 zeigt.

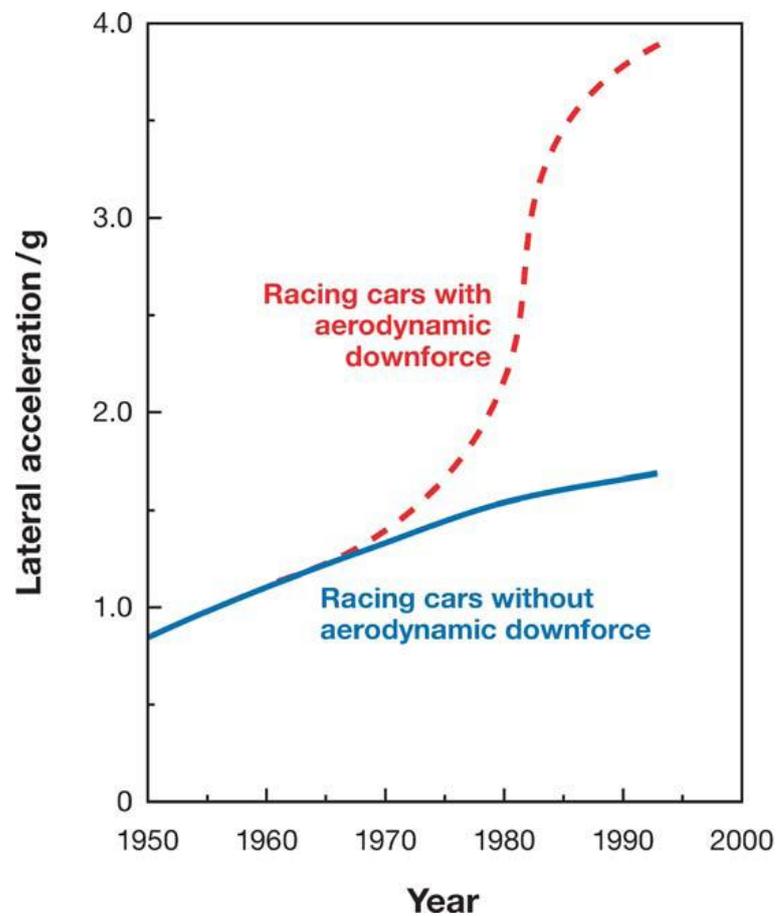


Abb. 7 Verlauf der geschichtlichen Entwicklung der Quereschleunigung von Fahrzeugen mit und ohne aerodynamischen Abtrieb [KAT06]

3.1 Fahrdynamik

Im Motorsport dreht sich alles um das schnellstmögliche Durchfahren von Rennstrecken, Rundstrecken wie z.B. bei Formel Eins Veranstaltungen oder einzelnen Abschnitten wie bei Rallyes und Bergrennen üblich. Eine Rennstrecke besteht meistens aus mehreren Geraden und Kurven. Während der Fahrt können drei Fahrzustände differenziert werden: Beschleunigen, Bremsen und Kurvenfahrt.

Um die Durchschnittsgeschwindigkeit zu maximieren und die benötigte Durchfahrzeit zu minimieren, können verschiedene Maßnahmen getroffen werden.

Um schneller beschleunigen, bremsen und um eine Kurve fahren zu können, kann man die Leistung des Fahrzeugs erhöhen, Getriebeabstufungen und Schaltzeiten optimieren, das Gewicht reduzieren, Fahrwerkskinematiken für eine optimale Stellung des Reifens zur Fahrbahn entwickeln usw. Diesen Entwicklungen sind aber natürliche Grenzen gesetzt, eine stetige Verbesserung ist ab einem bestimmten Punkt nicht mehr möglich und auch nicht rentabel.

Ein weiter Ansatzpunkt ist die Erhöhung der Haftreibung zwischen Reifen und Fahrbahn. Die Reifen sind die einzigen Bauteile des Fahrzeugs, die Kontakt zur Fahrbahn haben und die einzige Möglichkeit, Beschleunigungskräfte zu übertragen.

Ein Reifen kann bei höherer vertikaler Last mehr Längs- und Seitenkräfte übertragen. Diese Charakteristik ist in Abbildung 8 anhand der Seitenführungskraft F_y dargestellt. Das Diagramm zeigt den Seitenkraftverlauf über dem Schräglaufwinkel eines Reifens bei zwei unterschiedlichen vertikalen Lasten. Dabei ist die maximale Seitenführungskraft durch den Reibungskoeffizienten und den Reifenschlupf (Schräglaufwinkel) begrenzt.

In Punkt A ist die Ausgangskonfiguration dargestellt. Erhöht man die vertikale Last, so lässt sich die gleiche Seitenführungskraft mit einem kleineren Schräglaufwinkel und somit weniger Reifenbelastung und -Verschleiß erreichen (Punkt B). Bei gleichem Schräglaufwinkel lässt sich dagegen eine deutlich höhere Seitenführungskraft und somit höhere Querschleunigung und Kurvengeschwindigkeit erreichen. [MIL95] [KAT06]

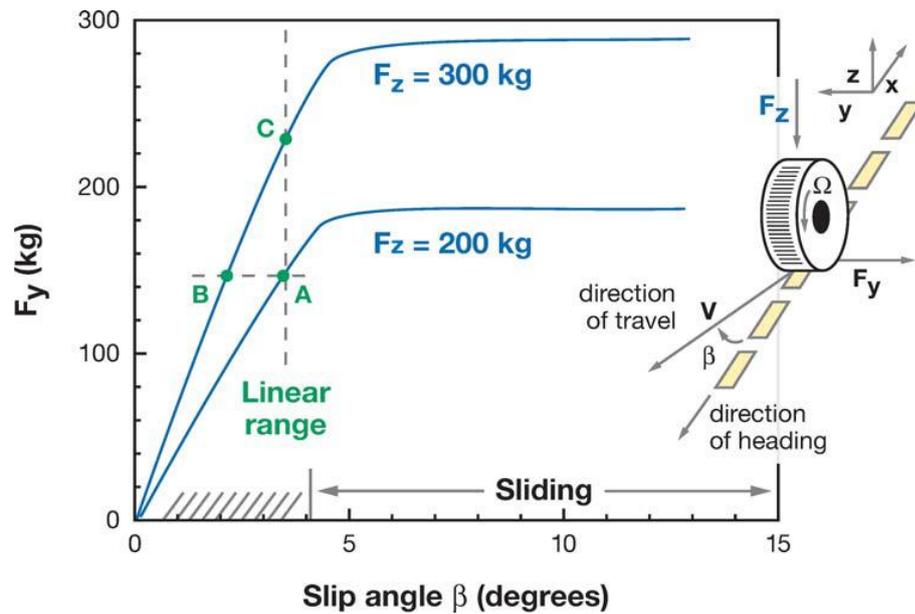


Abb. 8 Darstellung der von einem Reifen übertragbaren Seitenkraft F_y über dem Schräglaufwinkel (Slip Angle) für verschiedene Radlasten. Der Bereich des Schräglaufwinkels über 4° zeigt das Rutschen des Reifens an. [KAT06]

Die Haftreibungskraft zwischen dem Reifen und der Fahrbahn ist wie folgt definiert:

Gleichung 5: Haftreibungskraft

$$F_y = \mu F_z$$

Gleichung 6: Vertikale Last

$$F_z = F_g + F_a = mg \frac{g}{2} V^2 A C a$$

mit

F_y : Seitenkraft

μ : Haftbeiwert, Reibungskoeffizient

F_z : Vertikale Kraft

F_g : Gewichtskraft

F_a : Abtriebskraft

m : Gesamtmasse

g : Erdbeschleunigung

Typische μ -Werte für Reifen auf Asphalt sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 2: Haftbeiwerte μ für verschiedene im Motorsport eingesetzte Reifen [TRE11]

Haftbeiwert μ	Reifen
0,5 bis 0,9	profilierte Straßenreifen
1,2 bis 1,5	profillose Rennreifen
1,5 bis 1,7	Qualifikations- und Bergreifen

Die Erhöhung der vertikalen Last F_z durch ein höheres Fahrzeuggewicht führt leider nicht zum Erfolg, weil die höhere Masse auch die Massenträgheit und somit die Zentripetalkraft erhöht, die der Seitenführungskraft entgegengesetzt ist. Ein schnelleres Durchfahren der Kurve wäre also nicht möglich.

Hier setzt die Aerodynamik an. Durch Abtrieb kann die vertikale Last signifikant erhöht werden ohne das Gewicht des Fahrzeugs nennenswert anzuheben.

Durch die bessere Ausnutzung der Reifen kann ein Fahrzeug schneller Kurven durchfahren, stärker bremsen und stärker beschleunigen und somit die Rundenzeiten erheblich senken. [MIL95]

Die erreichbare Kurvengeschwindigkeit für eine stationäre Kreisfahrt mit dem Radius r wird berechnet mit:

Gleichung 7: Maximale Kurvengeschwindigkeit

$$V_r = \sqrt{\frac{gm\mu}{\frac{m}{r} - \frac{q}{2}CaA\mu}}$$

mit:

V_r : Maximale Kurvengeschwindigkeit

r : Kurvenradius

Die Quereschleunigung beträgt dann:

Gleichung 8: Quereschleunigung

$$a_y = \frac{Vr^2}{r}$$

mit:

a_y : Quereschleunigung

Durch zusätzlichen aerodynamischen Abtrieb entsteht aber auch erhöhter Luftwiderstand, der die auf Geraden erzielbare Höchstgeschwindigkeit negativ beeinflusst. Das Fahrzeug unterliegt verschiedenen Widerständen, die es mit seiner Motorleistung überwinden muss. Abbildung 9 zeigt den Einfluss der Widerstände in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit. Es ist deutlich zu erkennen, wie der Luftwiderstand mit zunehmender Geschwindigkeit ansteigt. Zur Berechnung der Höchstgeschwindigkeit kann folgende Formel herangezogen werden:

Gleichung 9: Höchstgeschwindigkeit

$$V_{max} = \sqrt[3]{\frac{C_w A \frac{\rho}{2} \eta}{P}}$$

mit:

V_{max} : Höchstgeschwindigkeit

P : Motorleistung

η : Wirkungsgrad des Antriebsstrangs

A : Stirnfläche des Fahrzeugs

Typische Werte für den Wirkungsgrad sind in Tabelle 3 aufgelistet.

Tabelle 3: Werte für den Wirkungsgrad des Antriebsstrangs im Motorsport [TRE11]

Wirkungsgrad η	Fahrzeugart
0,91	Kleines, einsitziges Formel-Fahrzeug mit Mittelmotor und kalten oder schmalen Reifen
0,875	Großes, einsitziges Formel- Fahrzeug mit Mittelmotor und warmen und breiten Reifen
0,85	Sportwagen mit Motor über der Antriebsachse
0,82	Rennwagen mit Frontmotor und Heckantrieb

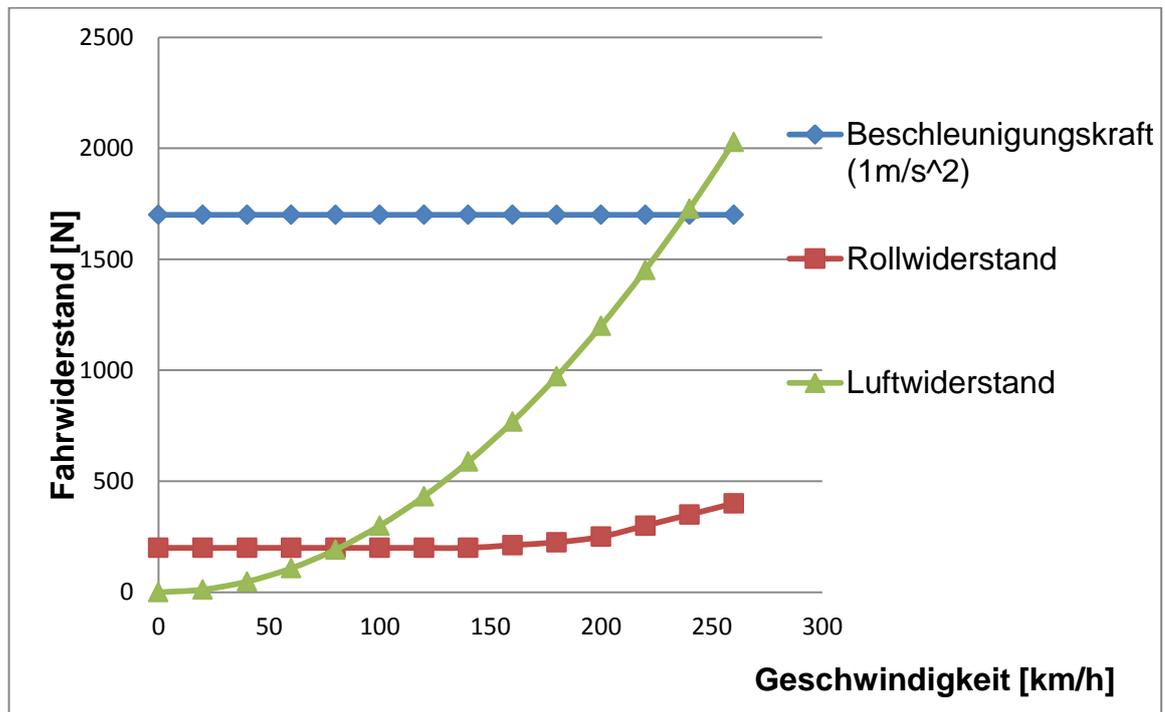


Abb. 9 Entwicklung der verschiedenen Fahrwiderstände abhängig von der Geschwindigkeit [DEM11]

Ein erhöhter Luftwiderstand kann sich neben der erzielbaren Höchstgeschwindigkeit auch negativ auf den Kraftstoffverbrauch auswirken. Gerade bei Langstreckenrennen führt das zu mehr Boxenstopps und damit zu zusätzlichem Zeitverlust durch Standzeit oder zu einem höheren Gesamtgewicht des Fahrzeugs durch einen größeren Tankinhalt. Bei der Auslegung der Aerodynamik ist es daher sehr wichtig, ein möglichst günstiges Verhältnis zwischen Antrieb und Widerstand zu erreichen.

3.2 Abstimmung

Für verschiedene Streckencharakteristiken müssen zudem unterschiedliche Abstimmungen getroffen werden, um den besten Kompromiss und somit die niedrigste Rundenzeit zu erreichen. Dazu werden streckenspezifische Diagramme wie in Abbildung 10 erstellt, in denen die Rundenzeit in Abhängigkeit von Abtriebs- und Widerstandsbeiwert dargestellt ist.

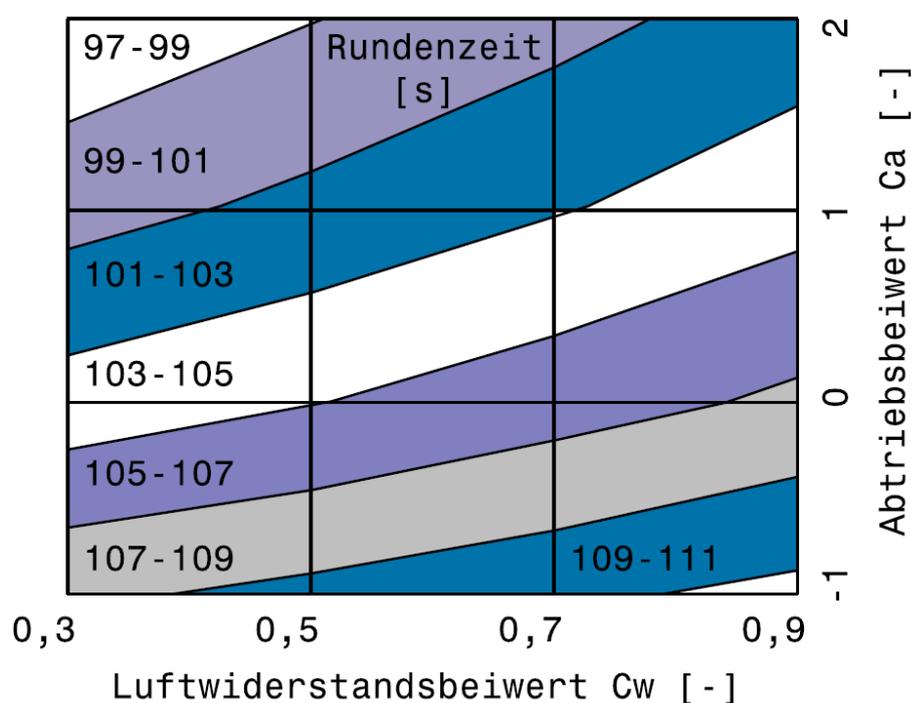


Abb. 10 Diagramm zur Beurteilung der Einflüsse von Abtriebs- und Widerstandsbeiwerten auf die Rundenzeit für eine spezifische Rennstrecke [DEM11]

Weitere Herausforderungen entstehen durch Rennen, bei denen mehrere Fahrzeuge gleichzeitig auf der Strecke um Positionen kämpfen. Die Renntaktik kann hier eine Abstimmung abweichend vom Optimum verlangen.

Ein Fahrzeug erzeugt hinter sich Verwirbelungen, die ein Gebiet niedrigen Druckes entstehen lassen. Je schneller ein Fahrzeug fährt, desto weiter reichen die Einflüsse dieser Verwirbelungen. Man spricht hier von einem Windschatten. [MCB98]

Ist ein Fahrzeug für die niedrigstmögliche Rundenzeit eingestellt, so hat es auch erhöhten Widerstand und somit geringere Höchstgeschwindigkeit. Ein anderes Fahrzeug erfährt im Windschatten des voraus Fahrenen einen deutlich geringeren Widerstand und kann so eine höhere Geschwindigkeit am Ende einer Geraden erreichen und einen Überholvorgang durchführen. [MIL95]

Um dieser Gefahr zu entgehen, kann eine Abstimmung mit weniger Widerstand gewählt werden. Dadurch steigt die Höchstgeschwindigkeit und das Überholen wird erschwert. Die langsameren Kurvengeschwindigkeiten werden in Kauf genommen, da in den Kurven meistens nur die Ideallinie befahrbar ist und der Windschatten mit seinen Wirbeln auch den Abtrieb des Hintermanns negativ beeinflusst, ein Überholvorgang durch ein Fahrzeug mit höherem Abtrieb wäre also nicht möglich.

Bei der amerikanischen Rennserie der NASCAR³, bei der meistens auf Hochgeschwindigkeitsovalen gefahren wird, kann man das Windschattenfahren in Abbildung 11 deutlich erkennen.

Dabei bilden die nah bei einander fahrenden Fahrzeuge aerodynamisch gesehen einen langen Körper, die widerstandverursachenden, turbulenten Wirbel hinter einem Fahrzeug entstehen nur hinter dem letzten Fahrzeug in der Reihe und der Druckwiderstand an der Front nur am vordersten Fahrzeug. Dadurch kann das Trio eine höhere Höchstgeschwindigkeit erreichen als ein einzeln fahrendes Fahrzeug, da es mit der dreifachen Motorleistung nur etwa das Zweifache des Luftwi-

³ National Association for Stock Car Auto Racing, US-amerikanischer Motorsportverband

derstands erfährt und somit mehr Leistung zur Verfügung steht, um die anderen auftretenden Fahrtwiderstände zu überwinden. [NAS12]



Abb. 11 Darstellung des Windschattens anhand der NASCAR Rennserie [NAS12]

3.3 Balance

Die Balance eines Fahrzeugs, das am Limit bewegt wird, ist sehr entscheidend für die erzielbaren Rundenzeiten. Die Reifen können nur eine bestimmte Kraft übertragen. Am schnellsten ist ein Fahrzeug, bei dem alle Reifen gleichzeitig die maximale von ihnen übertragbare Kraft auch übertragen. Dann spricht man von einem ausbalancierten Fahrverhalten.

Wenn die Vorderachse höhere Kräfte übertragen kann als die Hinterachse, spricht man vom Übersteuern. Das Resultat wäre in diesem Fall ein Ausbrechen des Hecks oder, wenn das Limit der Hinterräder nicht erreicht wird, eine geringere Querschleunigung und somit geringere Kurvengeschwindigkeit als mit einem ausbalancierten Fahrzeug möglich wäre. Wenn die Hinterachse höhere Kräfte übertragen kann als die Vorderachse, spricht man vom Untersteuern. Tritt dieses auf, so sind die Folgen wie beim Übersteuern.

Die Balance kann man durch die statische Gewichtsverteilung und Fahrwerkskinematik und -Abstimmung beeinflussen.

Da im Fahrbetrieb Radlastschwankungen durch die dynamische Radlastverteilung auftreten, ist die Balance in jeder Fahrsituation eine andere.

Grundsätzlich wird versucht, das Fahrverhalten in engen und langsamen Kurven leicht übersteuernd zu gestalten, um das Fahrzeug schneller einen Richtungswechsel durchführen zu lassen. In mittelschnellen und langgezogenen Kurven sollte das Fahrverhalten neutral, also ausbalanciert sein, um die maximal mögliche Querbeschleunigung zu erreichen. In schnellen Kurven dagegen ist ein leicht untersteuerndes und somit richtungsstabiles Fahrverhalten von Vorteil. Hier spielt auch die Psyche des Fahrers eine wichtige Rolle. Ein untersteuerndes Fahrverhalten ist leichter zu kontrollieren als ein übersteuerndes. Dadurch traut sich der Fahrer auch bei hohen Geschwindigkeiten ans Limit zu gehen ohne die Gefahr eines Abflugs zu fürchten.

Die Aerodynamik hat auch einen großen Einfluss auf die Balance. Die einzelnen Abtrieb generierenden Bauteile haben einen Hebel bezüglich des Schwerpunktes des Fahrzeugs, der in einer Belastung der Reifen resultiert. So erzeugt der Abtrieb eines Frontflügels, der tief und weit vorn angebaut ist, ein relativ hohes Moment um die Y-Achse, sein Widerstand aber nur ein geringes Moment. Beim Heckflügel, der nicht so weit hinten und deutlich höher als der Frontflügel verbaut ist, ist das Verhältnis ausgeglichener.

Da Abtriebskraft und Widerstandskraft mit zunehmender Geschwindigkeit deutlich zunehmen, ist die Aerobalance von sehr hoher Bedeutung für die Gesamtbalance des Fahrzeugs. Sie ist auch ein weiteres Mittel, um das gewünschte Fahrverhalten geschwindigkeitsabhängig einstellen zu können. So kann die Grundbalance des Fahrzeugs übersteuernd ausgelegt werden, um in langsamen Kurven das gewünschte agile Fahrverhalten zu erreichen. Die Aerobalance würde dann hecklastig ausgeführt werden. Bei geringen Geschwindigkeiten wäre der Einfluss der Aerodynamik gering, das Fahrzeug wäre übersteuernd. Bei mittleren Geschwindigkeiten wäre der Einfluss der Aerodynamik größer, das Fahrverhalten wäre dann neutral. Bei hohen Geschwindigkeiten wäre der Aeroeinfluss dominant, das Fahrverhalten wäre untersteuernd.

Die richtige Balance ist der wichtigste Faktor bei der Auslegung eines Fahrzeugs. Ist die Balance nicht gegeben, nützen auch sehr hohe Abtriebswerte nichts, da das Fahrzeug unfahrbar wäre, nicht am Limit bewegt werden könnte und somit langsam wäre. [MIL95] [WAL13]

4 Entwicklungen im Motorsport

Der Motorsport ist so alt wie das Fahrzeug selbst. Rennen wurden zunächst mit konventionellen Fahrzeugen ausgetragen bevor die Entwicklung von reinen Rennfahrzeugen begann. Das Augenmerk wurde dabei zunächst auf die Motorleistung gelegt und die Entwicklung fast ausschließlich in diese Richtung betrieben. Die Aerodynamik kam in den 1920er Jahren ins Spiel, als keine nennenswerten Verbesserungen bei der Leistung mehr erzielt wurden. Dabei wurde sich ausschließlich auf die Reduzierung des Luftwiderstandes beschränkt und die Karosserien immer stromlinienförmiger ausgeführt (vgl. Abb. 12 und 13). Die Rennstrecken dieser Zeit bestanden hauptsächlich aus langen Geraden mit nur wenigen, langgezogenen Kurven. [MCB98]



Abb. 12 Stromlinienförmige Karosserie des Auto Union Typ C von 1936 [IMA10]

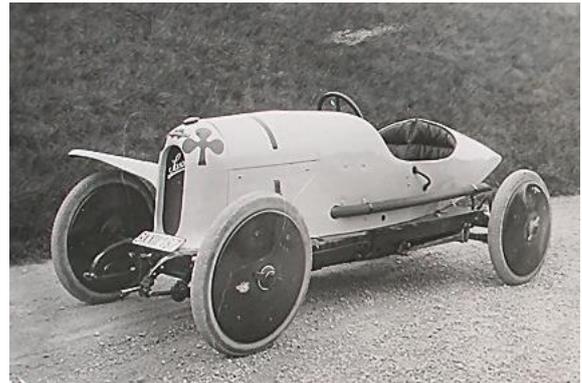


Abb. 13 Stromlinienförmige Karosserie des von Porsche gebauten Sascha Rennwagens von 1920 [PIL09]

Das führte zu deutlich höheren Maximalgeschwindigkeiten. Allerdings kam es auch zu Stabilitätsproblemen, da die Fahrzeuge Auftrieb generierten und dieser mit steigender Geschwindigkeit immer größer wurde. Das liegt daran, dass die Form eines Fahrzeugs im Grunde der eines Flügelprofils gleicht, das wie am Flugzeug Auftrieb produziert (vgl. Abb. 14). [MCB98]

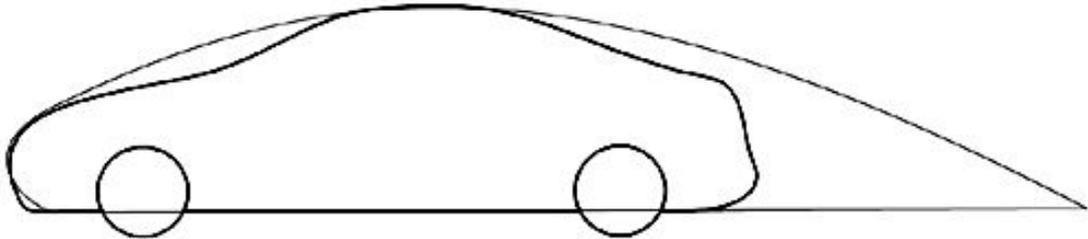


Abb. 14 Symbolischer Vergleich einer Karosserieform mit einem Flügelprofil [ABT10]

Die widerstandsarme Form hatte einen weiteren Nachteil. Um möglichst stromlinienförmig zu sein, wurden die Fahrzeuge sehr lang gestaltet und mit einer geringen Bodenfreiheit ausgestattet. Das führte dazu, dass die Grenzschicht unter dem Fahrzeug entsprechend länger und zum Heck hin dicker wurde. Durch die höheren Geschwindigkeiten wurde diese auch zunehmend turbulent, was die Dicke nochmals erhöhte. Wird die Grenzschicht so dick, dass sie den Untergrund erreicht, kann die Luft nicht mehr unter dem Fahrzeug entlang strömen und es entsteht ein Luftpolster hohen Druckes, das sehr viel Auftrieb erzeugt. Dieses Phänomen kann man an den Unfällen der Mercedes CLR⁴ 1999 in Le Mans⁵ anschaulich beschreiben (siehe Abb.15 und 16), bei denen die verwirbelte Luft des vorausfahrenden Fahrzeugs unter den mit sehr hoher Geschwindigkeit fahrenden CLR gelangte, die Nase anhob und dadurch das Heck zu nah an die Fahrbahn kam. Die Grenzschicht erreichte den Boden, ein Luftpolster bildete sich und die Strömung unterhalb des Fahrzeugs riss ab. Das Fahrzeug hob schlagartig ab und überschlug sich mehrfach. [FUL11]

⁴ GT Rennfahrzeug von Mercedes Benz

⁵ Das 24 Stunden Rennen von Le Mans ist die berühmteste Rennveranstaltung der Welt



Abb. 15 Darstellung der flügelähnlichen Form des Mercedes Benz CLR Rennfahrzeugs von 1999 [FUL11]



Abb. 16 Überschlag eines der drei auf gleiche Weise verunglückten Mercedes Benz CLR beim 24 Stunden Rennen in Le Mans 1999 [FUL11]

4.1 Spoiler

Mit der Zeit wurden die Rennstrecken immer kurviger, sodass es nicht mehr genügte, möglichst schnell geradeaus fahren zu können. Die Fahrzeuge wurden wieder kürzer, um eine bessere Agilität zu gewährleisten. Der Auftrieb verursachte dennoch Probleme. Durch die dadurch reduzierten Radlasten waren die Kurvengeschwindigkeiten gering. Ab ca. 1960 wurden daher erste aerodynamische Bauteile verbaut: Spoiler. [MCB98]



Abb. 17 Heckspoiler an einem Lancia Stratos Rallye Rennfahrzeug von 1971 [WAL14]



Abb. 18 Frontspoiler an einem Jaguar XJ S Rennfahrzeug von 1978 [WRI12]

Spoiler am Heck eines Fahrzeugs wie beim Lancia Stratos in Abbildung 17 sind Abrisskanten, die dafür sorgen, dass die Strömung um das Fahrzeug schneller abreißt.

Durch die dadurch verursachten Wirbel wird die Luft verlangsamt und es entsteht ein Überdruckgebiet über dem Spoiler, das dem Auftrieb entgegenwirkt.

Frontspoiler wie in Abbildung 18 dargestellt, reduzieren den Luftstrom unterhalb des Fahrzeugs, indem sie diese nach oben und zu den Seiten ableiten. Der Spalt zwischen Fahrzeugnase und Untergrund wird verringert, was ein Unterdruckgebiet hinter dem Spoiler erzeugt, das ebenfalls den Auftrieb reduziert.

Spoiler sind beliebte Maßnahmen zur Verbesserung der aerodynamischen Eigenschaften bei Fahrzeugen, die ursprünglich ohne Beachtung des Abtriebs gestaltet wurden, da sie einfach an eine vorhandene Fahrzeugkontur angebracht werden können. Diese Maßnahmen sind in ihrer Wirkung begrenzt, so lässt sich der Abtriebsbeiwert eines Fahrzeugs durch Spoiler nur um einen Wert von bis zu ca. 0,4 verbessern. [KAT06]

4.2 Flügel

Um mehr Abtrieb zu erreichen, als es mit Spoilern möglich war, wurden umgedrehte Flügel an Rennfahrzeugen angebracht. Die Idee war einfach: wenn schwere Flugzeuge nur durch ihre Flügel in der Luft gehalten werden, können diese Flügel, umgekehrt angebracht, auch Abtrieb und somit mehr Bodenhaftung für ein Rennfahrzeug produzieren. [MCB98]

Im Folgenden wird der Begriff Flügel für einen umgedrehten Flügel verwendet, auch wenn Abbildungen Auftrieb generierende Profile aus dem Flugzeugbau darstellen sollten.

Die Ersten Versuche mit Flügeln wurden bereits sehr früh in der Automobilgeschichte gemacht. So wies bereits der Opel RAK2 (Abb. 19), ein Rekordfahrzeug mit Raketenantrieb von 1928, Flügel zur Stabilisierung auf. Dieses Konzept wurde

zunächst nicht weiterverfolgt, bis Michael May es 1956 für seinen Porsche 550 Spyder wieder aufgriff (Abb. 20).

May war mit seinem Fahrzeug schneller als die werkseitig eingesetzten Porsche 550 ohne den Flügel, was Porsche dazu brachte, ein generelles Verbot von Flügeln bei den Offiziellen durchzusetzen. [TYP13]

Zehn Jahre später tauchte der Chaparral 2F (Abb. 21) mit einem Heckflügel auf und kurz darauf wurde das Konzept von der Formel Eins aufgegriffen (Abb. 22) und fand anschließend seinen Weg in die meisten Rennklassen. [FOR14]

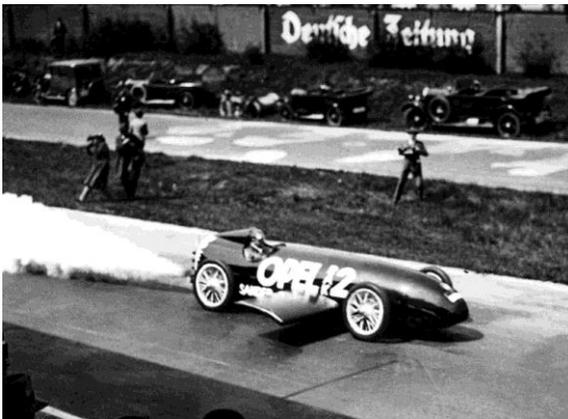


Abb. 19 Flügel am Opel RAK2 Rekordfahrzeug von 1928 [AUT12]



Abb. 20 Zentraler, umgedrehter Flügel am Porsche 550 Spyder von Michael May von 1956 [TYP13]



Abb. 21 Heckflügel am Chaparral 2F Rennfahrzeug von 1966 [WIK13]



Abb. 22 Heckflügel am Honda Formel Eins Rennfahrzeug von 1968 [FAV13]

4.2.1 Terminologie von Flügelprofilen

Das Prinzip eines Flügels zur Erzeugung von Antrieb wurde bereits unter 2.1 behandelt. Um die Abtriebs- und Widerstandswerte quantifizieren zu können, müssen die in Abbildung 23 aufgeführten Größen genauer definiert werden (siehe Tabelle 4).

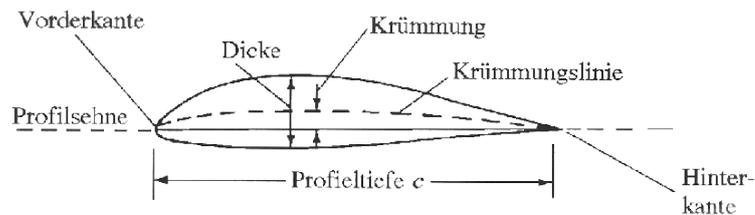


Abb. 23 Darstellung der Größen an einem Flügelprofil [HSB96]

Tabelle 4: Terminologie des Flügelprofils

Bezeichnung	Symbol	Beschreibung
Profil	-	Y-Schnitt durch einen Flügel
Sehne	c	Verbindungsline zwischen Vorder- und Hinterkante
Anstellwinkel	α	Winkel zwischen Strömungsrichtung und Sehne
Krümmungslinie	-	Mittellinie des Profils
Krümmung	k	Abstand der Krümmungslinie von der Sehne
Dicke	t	Maximale Dicke des Flügels
Spannweite	b	Breite des Flügels
Seitenverhältnis	-	Verhältnis Spannweite zur Sehnenlänge, b/c

4.2.2 Einfluss des Anstellwinkels

Der Anstellwinkel ist der wirksamste Parameter zur Beeinflussung der Beiwerte eines Profils. Im Allgemeinen gilt, je größer der Winkel, umso höher sind Abtriebs- und Widerstandsbeiwert. Allerdings existiert für jedes Profil für unterschiedliche Reynoldszahlen ein individueller Maximalwert für den Anstellwinkel. Wird dieser überschritten, reißt die Strömung um das Profil ab, der Antrieb sinkt ab und der Widerstand erhöht sich drastisch (Vergleich 2.2). Abbildung 24 zeigt als Beispiel den Auftriebsbeiwert eines NACA⁶ 6412 Profils über den Anstellwinkel für verschiedene Reynoldszahlen. Der maximale Anstellwinkel beträgt für eine Reynoldszahl von 10^5 13° . Bei geringeren Reynoldszahlen, verursacht durch z.B. eine langsamere Strömungsgeschwindigkeit, ist der maximale Anstellwinkel geringer. Das liegt an der Grenzschicht, die bei hohen Reynoldszahlen turbulent und richtungsstabil, bei niedrigen Reynoldszahlen teilturbulent oder laminar ist, was früher zu Ablösungen führt. [MCB98] [SCH06]

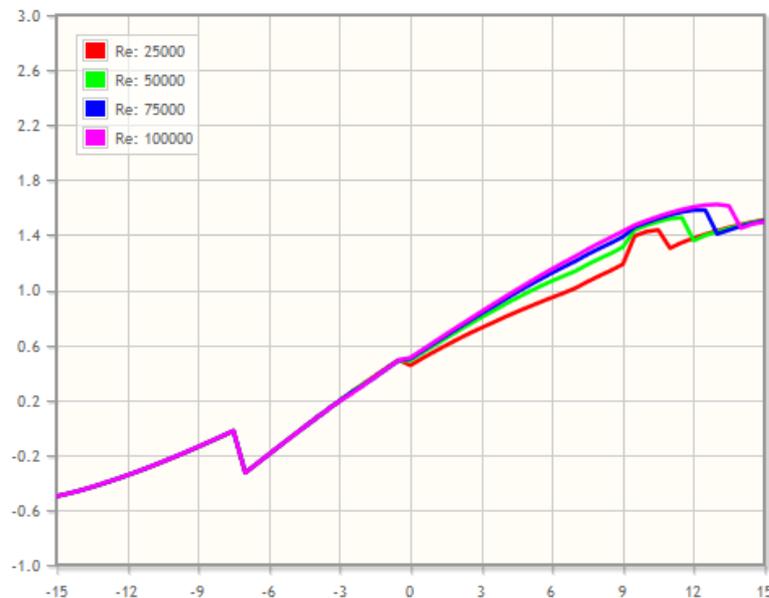


Abb. 24 Darstellung der Auftriebsbeiwerte eines NACA 6412 Profils in Abhängigkeit von Anstellwinkel und Reynoldszahl [AIR13]

⁶ National Advisory Committee for Aeronautics, US-amerikanische Organisation, die sich mit der Grundlagenforschung in der Luftfahrt beschäftigte. Unter anderem wurden verschiedene aerodynamische Profile und weitere Formen auf ihre Eigenschaften untersucht und katalogisiert.

4.2.3 Einfluss der Krümmung

Die Geometrie eines Profils kann symmetrisch (die Krümmung ist in diesem Fall 0) oder gekrümmt sein. Dabei kann ein gekrümmtes Profil bereits bei einem Anstellwinkel von 0° Abtrieb erzeugen. Bei einem symmetrischen Profil ist zur Erzeugung einer vertikalen Kraftkomponente ein Anstellwinkel notwendig.

Ein gekrümmtes Profil kann mehr Abtrieb produzieren, da die Druckverteilung auf Ober- und Unterseite homogener ausgebildet wird und damit ein insgesamt niedrigerer Unterdruck auf der Unterseite und eine höherer Druck auf der Oberseite entsteht.

Zur Verbildlichung ist in Abbildung 25 die Druckverteilung eines symmetrischen Profils unter einem bestimmten Anstellwinkel, einer gekrümmten Platte ohne Anstellwinkel und einem kombinierten Profil aus den beiden Geometrien dargestellt.

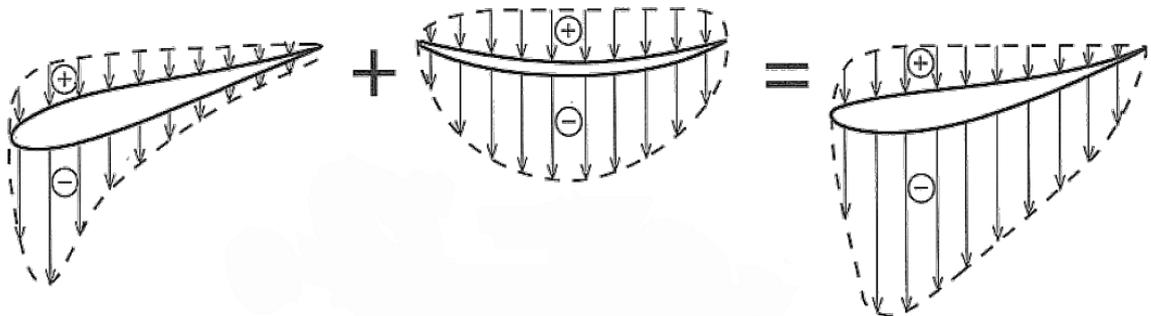


Abb. 25 Druckverteilung auf symmetrischem Profil, einer gekrümmten Platte und der Kombination der beiden Geometrien [KAT06]

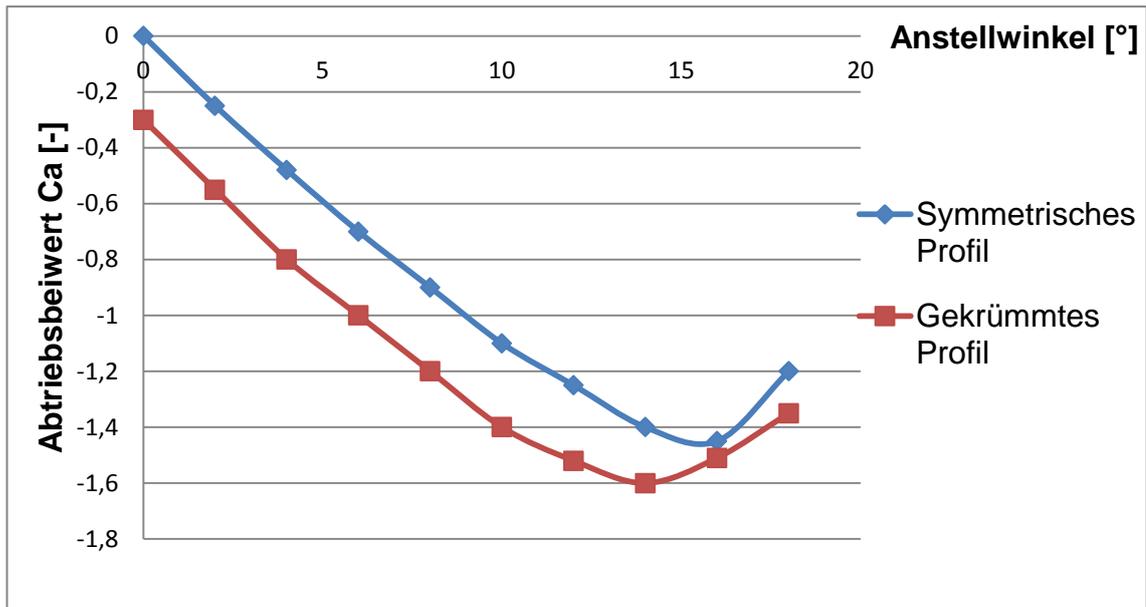


Abb. 26 Darstellung des Abtriebsbeiwerts über den Anstellwinkel für ein symmetrisches und ein gekrümmtes Profil [MCB98]

Allerdings kann eine zu starke Krümmung einen Strömungsabriss bei geringeren Anstellwinkeln im Vergleich zu einem symmetrischen Profil verursachen. Die Druckverhältnisse ändern sich in diesem Fall stark über die Sehnenlänge, was zu einem Wirbel und somit zum Strömungsabriss führen kann (Siehe 2.2). [MCB98] [KAT06]

4.2.4 Einfluss der Dicke

Ein dickeres Profil erzeugt mehr Antrieb als ein dünnes bis zu einer Dicke von ca. 12%. Stellt man sich ein symmetrisches Profil unter einem bestimmten Anstellwinkel vor, so ist der Unterschied bei dem Weg, den die Luft auf der Ober- bzw. Unterseite zurücklegen muss, bei einem dickeren Profil größer. Das resultiert in einem höheren Druckunterschied und somit höherer vertikaler Kraft. Ab einer Dicke größer als 12% weicht die Profilform zu sehr von der eines Stromlinienkörpers ab und die Dicke wirkt sich negativ aus.

Dickere Profile sind anfälliger bei Änderungen der Reynoldszahl, wie sie z.B. durch den Einsatz bei unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten auftreten. [KAT06]

Abbildung 27 zeigt diese Zusammenhänge.

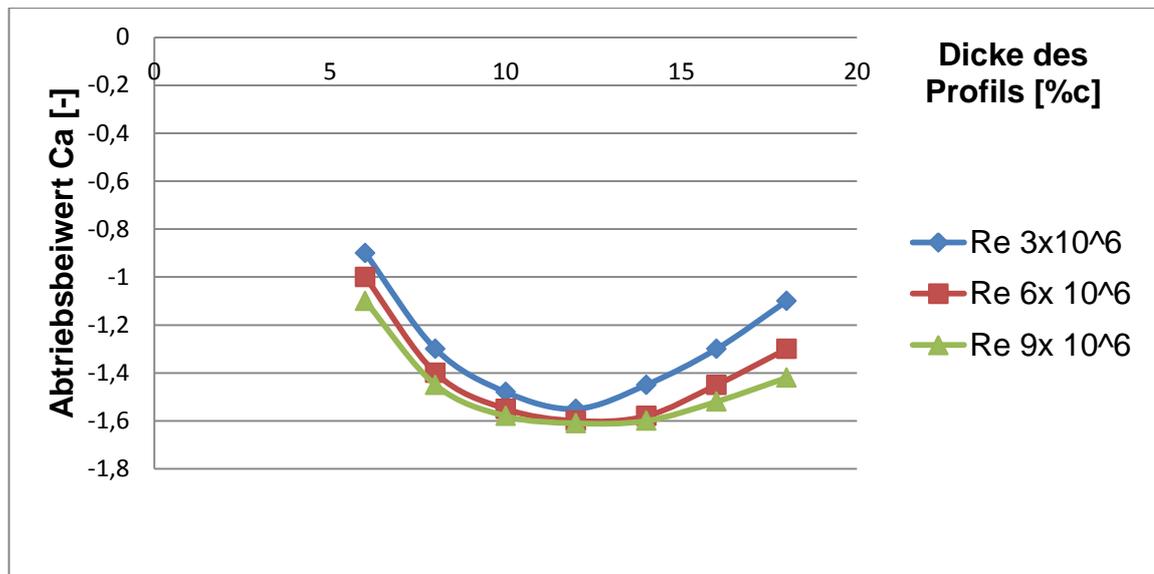


Abb. 27 Darstellung des Abtriebsbeiwerts über die Profildicke für verschiedene Reynoldszahlen [KAT06]

4.2.5 Einfluss des Seitenverhältnisses

Die obigen Eigenschaften und Berechnungen gelten für den zweidimensionalen Fall bzw. einen unendlich breiten Flügel. Reale Flügel sind in ihrer Breite dagegen begrenzt. An den Enden eines Flügels entstehen Wirbelschleppen durch den Druckunterschied zwischen Flügeloberseite und Unterseite. Die Luft strömt dabei von Bereichen hohen Druckes zu Bereichen niedrigen Druckes. Das Zusammenströmen der Ober- und Unterströmung hat dabei einen negativen Effekt auf den Abtrieb, da der Druckausgleich am Flügel nicht nur an den unmittelbaren Enden stattfindet, sondern bereits auf den Oberflächen und dadurch die Druckkraft in diesen Bereichen abnimmt. Die Zusammenströmung kann durch den Einsatz von Seitenplatten unterbunden bzw. hinter den Flügel verlegt werden (Abb. 28),

wodurch aber andere, weniger negative Einflüsse wie zusätzliche Reibung an den Seitenplatten und somit Verlangsamung der Strömung einhergehen.

Die Größe der Seitenplatten hängt von dem Druckunterschied zwischen Flügeloberseite und –Unterseite ab.

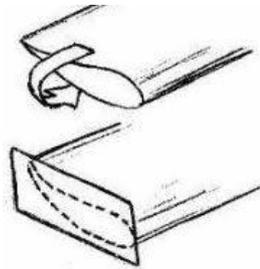


Abb. 28 Effekt der Seitenplatten auf die Strömung an einem Flügel. Oben kann die Strömung frei von der Oberseite zur Unterseite strömen, unten wird diese Strömung durch die Seitenplatte unterbunden. [GRA14]

Das Seitenverhältnis bleibt auch mit Seitenplatten ein wichtiges Kriterium, je größer es ist, desto größer ist der Anteil der Flügelbreite, der dem idealen, zweidimensionalen Fall entspricht, wie Abbildung 29 zeigt. Allerdings ist anzumerken, dass kleine Seitenverhältnisse den maximalen Anstellwinkel erhöhen können da durch die Wirbelschleppen die Strömung mehr kinetische Energie aufweist, was sie richtungsstabiler macht. [MCB98] [TRE11]

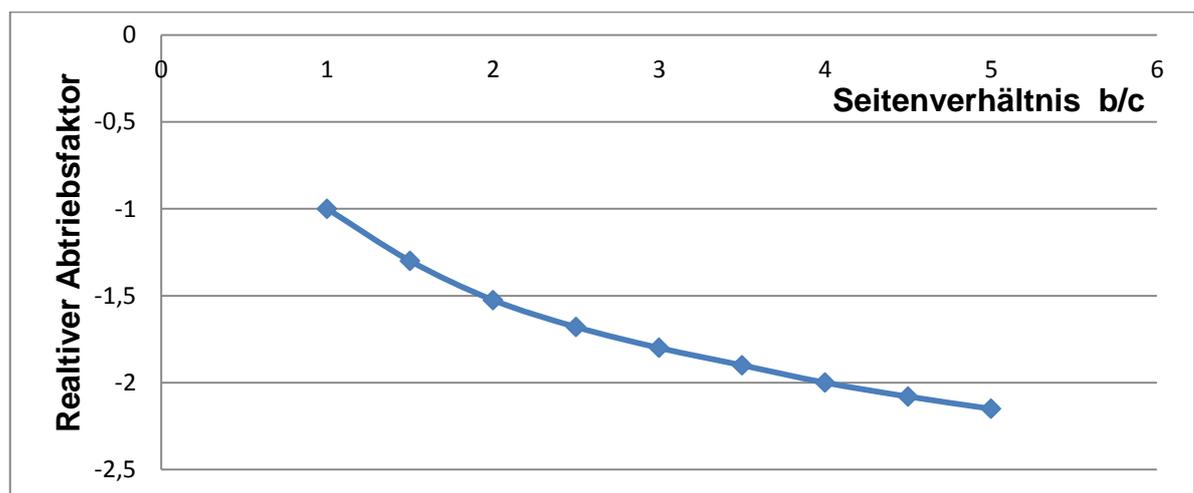


Abb. 29 Einfluss des Seitenverhältnisses [MCB98]

4.2.6 Einfluss des Bodenabstands

Ist ein Flügel nahe am Boden angebracht, so wie der Frontflügel eines Formelfahrzeugs, hat das positiven Einfluss auf seinen Abtrieb. Durch die Nähe zum Boden entsteht eine Düse zwischen der gekrümmten Unterseite des Flügels und der Fahrbahnoberfläche. Durch die Verengung wird die Strömung nach dem Venturi⁷ Prinzip⁸ zusätzlich zur Beschleunigung durch die Profilform beschleunigt. Der Druck unterhalb des Flügels sinkt somit weiter ab und der Abtrieb erhöht sich.

Der Widerstand wird allerdings auch größer, da die schnellere Luft mehr Reibung produziert. Diese Zusammenhänge sind in Abbildung 30 aufgeführt. [KAT06]

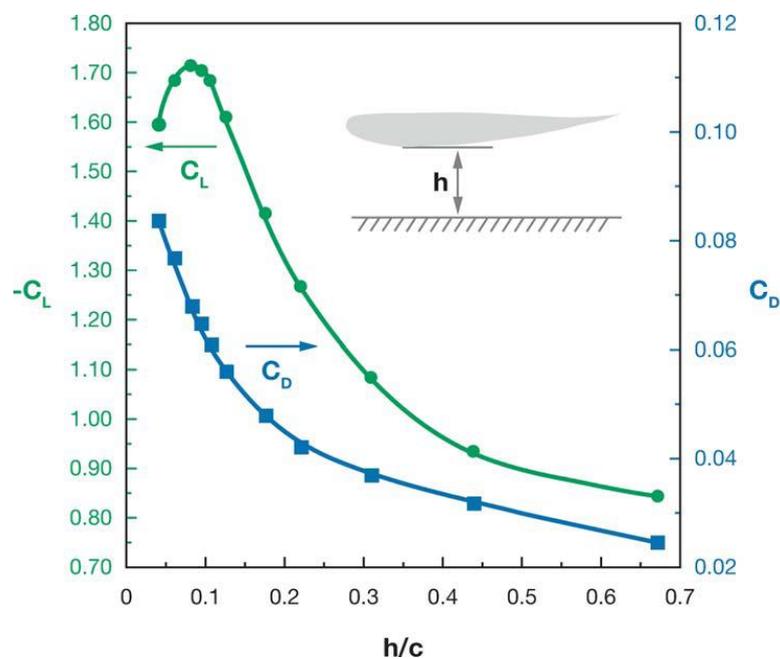


Abb. 30 Darstellung des Einflusses des Bodenabstands auf Abtriebs- und Widerstandsbeiwerte. - C_L und C_D sind hier die englischen Bezeichnungen für C_a und C_w , h steht für den Bodenabstand und c für die Sehnenlänge des Profils [KAT06]

⁷ Giovanni Battista Venturi, italienischer Physiker (1746-1822)

⁸ Die Geschwindigkeit eines inkompressiblen Fluids, das durch ein Rohr fließt, verhält sich umgekehrt proportional zum Rohrquerschnitt, großer Querschnitt – geringe Geschwindigkeit, kleiner Querschnitt – hohe Geschwindigkeit

4.2.7 Gurney Flaps

Gurney⁹ Flaps sind Abrisskanten, die senkrecht zur Profilschneide an der Hinterkante eines Flügelprofils angebracht werden. Hinter dieser Kante entstehen kleine, lokale, gegenläufige Wirbel, die die Hauptströmung nach oben ableiten (Abb. 31) und somit für eine zusätzliche vertikale Kraftkomponente sorgen und mehr Abtrieb generieren (Abb.32).

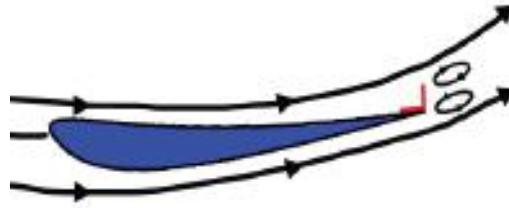


Abb. 31 Schematische Darstellung der Wirkungsweise eines Gurney Flaps [LOM12]

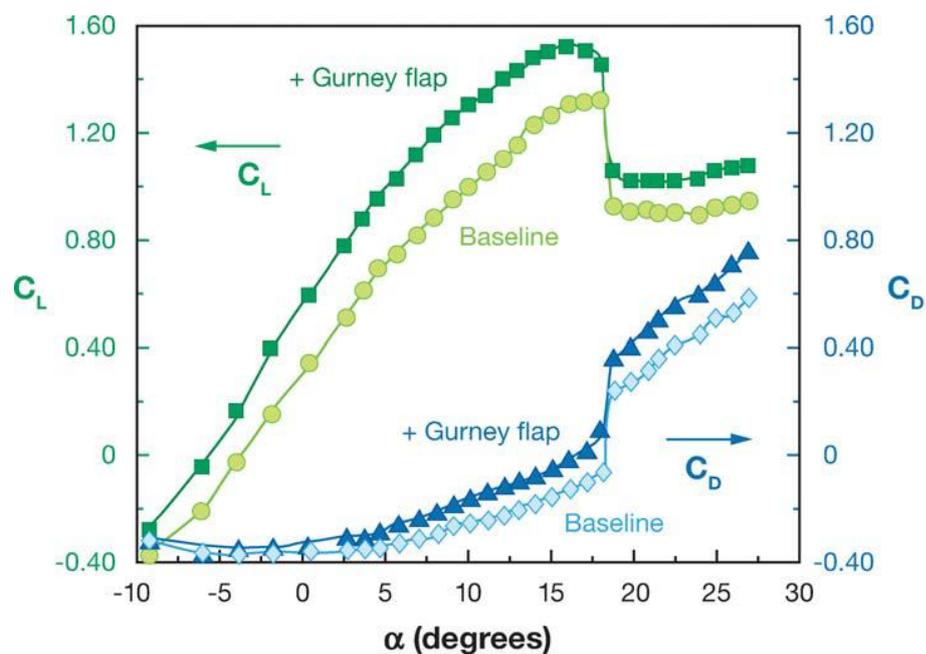


Abb. 32 Abtriebs- und Widerstandsbeiwerte eines Flügels mit Gurney Flap und eines Flügels ohne, hier als Baseline bezeichnet, über den Anstellwinkel α . C_L und C_D sind hier die englischen Bezeichnungen für C_a und C_w . [KAT06]

⁹ Dan Gurney, US-amerikanischer Rennfahrer und Rennteambesitzer, geb. 1931

Strömungstechnisch haben sie den gleichen Effekt wie eine stärkere Krümmung des Profils, allerdings ohne die Gefahr eines Strömungsabrisses. Sie produzieren auch weniger Widerstand als ein stärker gekrümmtes Profil, da die eigentliche Oberfläche des Flügels und somit die Reibung nicht geändert wird, es kommt lediglich zusätzliche viskose Reibung zwischen den Wirbeln und der Hauptströmung hinzu.

Die Wirkung der Flaps ist allerdings begrenzt, ab einer Höhe von ca. 5% der Sehnenlänge verursachen sie deutlich mehr Widerstand und können zum Strömungsabriss führen.

Gurney Flaps werden eingesetzt, um Feineinstellungen in der Balance realisieren zu können und / oder um den Abtriebswert eines vorhandenen bzw. in seinen Abmaßen begrenzten Flügels zu maximieren. [MCB98] [KAT06]

4.2.8 Mehrteilige Flügel

Mehrteilige Flügel bestehen aus mehreren Profilen, die hintereinander angeordnet sind. Abbildung 33 zeigt ein typisches Layout. Die Form eines solchen Flügels entspricht damit einem stark gekrümmten Profil mit Spalten zwischen den einzelnen Segmenten. Die Sehnenlänge ist in diesem Fall definiert als die Verbindung zwischen der Vorderkante des vorderen Profils und der Hinterkante des hinteren Profils. Die Spaltgröße und Überlappung der Segmente ist dabei stark von der Geometrie der einzelnen Profile und des Bodenabstands abhängig, sollte aber in einstelligem Prozentbereich der Sehnenlänge liegen. [MCB98]

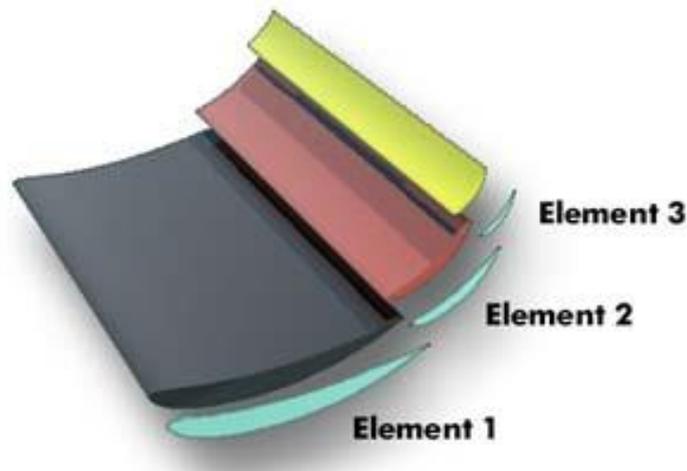


Abb. 33 Aufbau eines mehrteiligen Flügels [HEP06]

Ein mehrteiliger Aufbau erzeugt höhere Abtriebswerte als ein einteiliger Flügel gleicher Größe und Krümmung, da ein deutlich höherer Anstellwinkel verwendet werden kann. Durch die Spalte wird dabei die Luft von oberhalb des davor befindlichen Profils auf die Unterseite des dahinter liegenden Profils geleitet. Der Spalt sollte dabei konvergierend gestaltet sein, um die Strömung von der Oberseite zu beschleunigen bevor sie auf die schnelle Strömung auf der Unterseite trifft. Die Strömung im Spalt sollte schneller sein als die Strömung auf der Unterseite. Durch diese beschleunigte Strömung wird zusätzliche kinetische Energie in den Luftstrom unterhalb des Flügels eingeleitet, was einem Strömungsabriss entgegenwirkt. Außerdem wirkt der niedrigere Druck unterhalb der hinteren Profile wie eine Absaugung für die vorderen, wodurch der Unterdruck und somit der Abtrieb erhöht wird. [NAC28]

Das Prinzip ist bereits seit Anfang des 20. Jahrhunderts im Flugzeugbau bekannt. In einem Lehrvideo der NACA von 1928 (Abb. 34) werden die Zusammenhänge anhand eines Windkanalversuchs sehr anschaulich verdeutlicht.

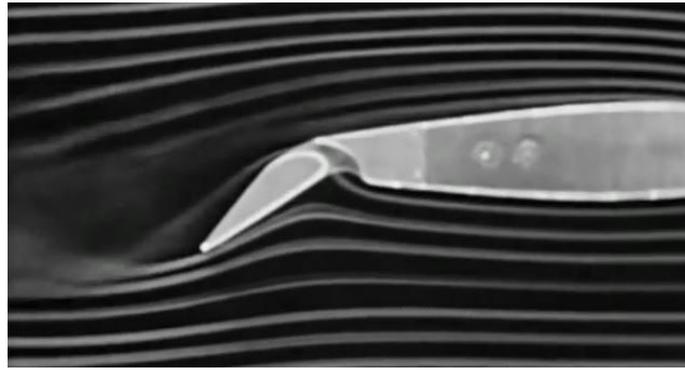


Abb. 34 Screenshot aus einem Lehrvideo der NACA. [NAC28]
Zu finden ist es unter http://www.youtube.com/watch?v=q_eMQvDoDWk. Hier trägt es den Titel „Aerodynamics: Airfoil Camber, Flaps, Slots-Slats & Drag“

Die Größe der zusätzlichen Profile hat auch einen Einfluss auf die erreichbaren Abtriebswerte. Je größer die hinteren Profile im Vergleich zum vordersten sind, umso größer kann die Krümmung des „Gesamtprofils“ werden und somit den Abtrieb erhöhen. [MCB98]

Die Anzahl der Profile kann beliebig groß gewählt werden, allerdings verringert sich der nutzbare Einstellbereich des Anstellwinkels deutlich mit zunehmender Anzahl der Profile, wie Abbildung 35 zeigt.

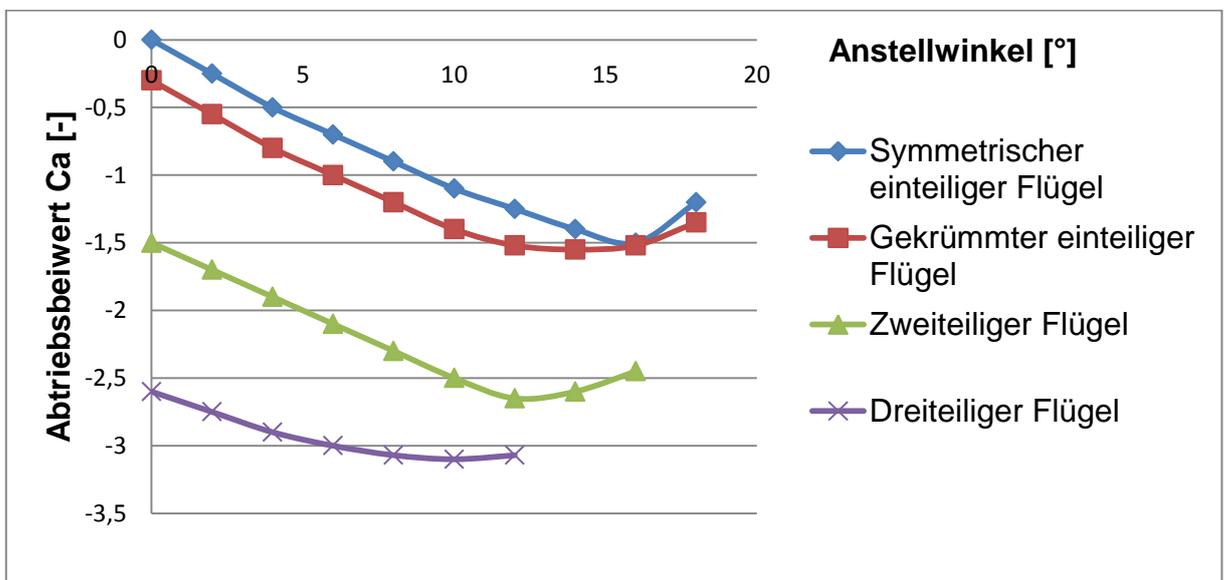


Abb. 35 Darstellung der Abtriebsbeiwerte von verschiedenen Flügelkombinationen über den Anstellwinkel [MCB98]

4.2.9 Mehrstöckige Flügel

Stellen die mehrteiligen Flügel im Prinzip einen großen Flügel mit besonderen Eigenschaften dar, so wirken bei den mehrstöckigen Flügeln mehrere Flügel zusammen. Das Prinzip ist nicht neu, bereits im ersten Weltkrieg gab es Flugzeuge mit mehreren Flügeln übereinander, wie den Dreidecker in Abbildung 36.



Abb. 36 Fokker Dr.I Dreidecker von 1918 [SKY08]



Abb. 37 Mehrstöckiger Heckflügel am VW New Beetle Rally Car [SUB14]

Dabei beeinflussen sich die einzelnen Ebenen zunächst negativ. Die Unterdruckseite des oberen Flügels reduziert den Überdruck auf der Oberseite des unteren Flügels und umgekehrt. Der negative Einfluss verringert sich mit zunehmendem Abstand der Flügel, sodass beide Elemente zusammen mehr Abtrieb generieren können als nur ein einzelnes. Um mit zwei Elementen doppelt so viel Abtrieb zu generieren wie mit einem, müsste der Abstand allerdings mehr als das zehnfache der Sehnenlänge betragen. [KAT06]

Mehrstöckige Flügel werden auch benutzt, um Interaktionen mit anderen Teilen des Fahrzeugs hervorzurufen und zu nutzen. So erzeugt z.B. die Interaktion des unteren Flügelements des Peugeot 905 (Abb. 38) mit dem Unterboden mehr Abtrieb als am oberen Element verloren geht. Ein solcher Flügel wird Beam Wing genannt, seine Unterseite beschleunigt die Luft am Ausgang des Unterbodens und macht diesen effektiver. [FUL11]

Allgemein gilt, dass ein zusätzliches Element den Widerstand zusätzlich erhöht, eine Erhöhung des Auftriebs kann aber nicht vorausgesetzt werden.

Es sind auch andere Positionen von Flügeln möglich und auch bekannt, wie Abbildung 40 demonstriert. Die Interaktionen kann man aber nicht pauschal beschreiben, sie hängen von vielen Faktoren wie Stellung zu einander, Stellung zum restlichen Fahrzeug und Elementgeometrie ab und ihre Vor- und Nachteile müssen für jeden Anwendungsfall einzeln abgewogen werden.



Abb. 38 Peugeot 905 Sportwagen von 1993 [BAS11]



Abb. 39 Die Flügel am Heck des Formel Eins Fahrzeugs Williams FW 15C von 1993 sind hintereinander angeordnet [MOR13]

4.3 Fahrzeugform

Nach dem sich die umgedrehten Flügel im Motorsport gerade etabliert hatten, wurde bereits Kritik an Ihnen laut. Da sich der Abtrieb mit zunehmender Geschwindigkeit quadratisch erhöht, stießen die Fahrwerke der damaligen Rennfahrzeuge, allen voran die der Formel Eins, an Ihre Grenzen. Durch die hohen vertikalen Lasten mussten stärkere Federn verbaut werden, um ein Aufsetzen zu verhindern. Das führte aber zu sehr unkontrollierbarem Fahrverhalten. Um diesem zu entgehen, haben die Ingenieure damit begonnen, die Flügel direkt an die ungefederten Massen zu koppeln. Dabei müssen die Flügelanbindungen die Bewegun-

gen des Fahrwerks mitgehen bzw. kompensieren. Da die Konstruktionen zunächst nicht ausgereift waren, brachen viele dieser Flügel und es kam zu teilweise sehr schweren Unfällen (Abb. 40). Das hat die Offiziellen dazu bewegt, bewegliche Flügel zu verbieten und die Dimensionen einzuschränken. [FOR14]



Abb. 40 Gebrochene Flügelanbindung am Brabham Formel Eins Fahrzeug von 1968 [FOR14]

Flügel hatten auch den Nachteil, relativ hohen Widerstand zu produzieren. Die Ingenieure begannen damit, das Chassis an sich als Abtrieb generierendes Teil auszulegen.

Die aerodynamische Nutzung der Unterseite eines Fahrzeugs hat einige Vorteile. Zunächst ist die Fläche eines Unterbodens im Vergleich mit der eines Flügels sehr viel größer, sodass bereits kleine Druckunterschiede zum Umgebungsdruck bzw. Fahrzeugoberseite große Kräfte nach sich ziehen können.

Des Weiteren trägt ein Unterboden kaum zur Vergrößerung der Stirnfläche und somit zum Widerstand eines Fahrzeugs bei. [MCB98]

4.3.1 Ebene Unterböden

Die ersten Versuche, Abtrieb mit dem Fahrzeugkörper zu generieren, nutzten den niedrigen Druck, der sich in den Wirbeln hinter einem Fahrzeug bildet.



Abb. 41 Darstellung des Niederdruckgebiets im Totwasser hinter einem Fahrzeug anhand eines Windkanalversuchs mit Rauchlinien [SPE14]

Durch Begrenzung des Zuflusses durch unter 4.1 vorgestellte Spoiler und zusätzliche seitliche Abschirmungen kann der niedrige Druck im Totwasser hinter dem Fahrzeug (Abb. 41) die Luft unterhalb des Fahrzeugbodens absaugen und somit Abtrieb generieren. [MCB98]

Eine weitere Maßnahme ist eine unterschiedliche Bodenfreiheit an Front und Heck des Fahrzeugs, wobei der hintere Abstand höher ist als der vordere. Durch diesen Winkel, Rake genannt, lässt sich die Abbremsung der Strömung durch die nach hinten dicker werdende Grenzschicht ausgleichen. Die Luft kann unterhalb des Fahrzeugs frei strömen und reduziert dabei den Auftrieb deutlich. Ist der Winkel höher als der zum Ausgleich der Grenzschicht benötigte, wird die Luft unterhalb des Fahrzeugs zusätzlich beschleunigt und Abtrieb wird generiert. [KAT06]

Extreme Entwicklungen in dieser Richtung setzten Vakuumgebläse zum Absaugen der Luft unterhalb des Fahrzeugs ab. Der Unterboden wurde durch flexible Dichtelemente, sogenannte Schürzen, die bis zur Fahrbahn reichten, von der Umgebungsluft abgeschirmt (Abb. 42 und 43). Der Vorteil dieser Methode war ein von

der Geschwindigkeit unabhängiger Antrieb, der die Kurvengeschwindigkeiten auch in sehr engen und somit langsamen Kurven deutlich steigern konnte. [MCB98]



Abb. 42 Chaparral 2J mit Gebläse am Heck und Gummischürzen [CLO13]



Abb. 43 Brabham BT46 von 1978 mit Gebläse im Heck [MUK13]

Die Entwicklungen wurden bald durch das Reglement verboten.

4.3.2 Flügelautos

Die Eigenschaft eines Flügels zur Generierung von mehr Antrieb durch geringeren Bodenabstand kann auch auf das Chassis angewendet werden. Hierbei sind die Seitenkästen wie ein Flügelprofil gestaltet (Abb. 44 und 45). Durch die Nähe zum Boden wird auch der unter 4.2.6 vorgestellte Bodeneffekt wirksam und vergrößert den Antrieb zusätzlich. Durch die sehr große Fläche dieser Flügel entsteht ein großes Unterdruckgebiet, das sehr viel Antrieb bei nur wenig Widerstand generiert. Die Breite wird dabei durch die Fahrzeugbreite und Breite des Chassis, das aus Gründen des Packages und des Schwerpunktes meistens nicht angehoben werden kann, bestimmt. [MCB98]

Zunächst wurden echte Flügelprofile verwendet (Abb. 46), später kamen seitliche Platten zur Vermeidung des Druckausgleichs zwischen der Ober- und Unterseite. Aus diesen entstanden dann die für die 1980er Jahre typischen Tunnel unter den

Seitenkästen, die nach dem Venturi Prinzip mit einem Einlass, einer Verengung des Querschnitts und einem Auslass, dem Diffusor funktionieren. Noch höhere Abtriebswerte lassen sich durch die Verwendung von Schürzen erzielen (Abb. 47), die einen Druckausgleich zwischen dem niedrigen Druck unter dem Fahrzeug und dem Umgebungsdruck verhindern. [KAT06] [FUL11]

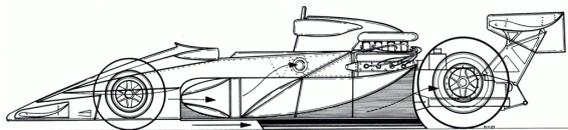


Abb. 44 Schematische Darstellung der Venturi Tunnel des Lotus 78 [RAC12]

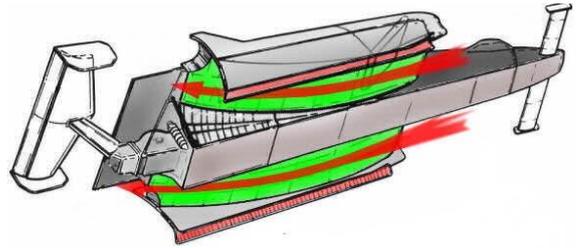


Abb. 45 Schematische Darstellung der Venturi Tunnel des Lotus 79b [FOR14]



Abb. 46 Flügelartige Seitenkästen am March 701 von 1970 [F1F13]



Abb. 47 Blick von hinten in den rechten Venturi Tunnel eines Renault RE 30b. Rechts ist die Schürze und ihre Aufnahme gut zu erkennen [COL12]

Diese Unterböden gelten als die wirksamste Form der passiven Abtriebserzeugung. Die damit ausgerüsteten Fahrzeuge der Formel Eins und der Sportwagen Prototypen erreichten Querbeschleunigungen jenseits des fünffachen der Erdanziehungskraft, was teilweise zu Bewusstlosigkeit der Fahrer führte. Der Widerstand wurde dagegen kaum erhöht, da ein solches Fahrzeug sehr stromlinienförmig gestaltet ist und eine deutlich kleinere Stirnfläche im Vergleich zu einem Fahrzeug mit Flügeln aufweist.

Durch die hohen Kurvengeschwindigkeiten bestand erhöhte Gefahr für schwere Unfälle nach Abflügen, außerdem reduzierte sich der Anpressdruck schlagartig bei einer Änderung der Bodenfreiheit bei z.B. Überfahren von Randsteinen, was zu einem Verbot von Schürzen und später von gekrümmten Unterböden führte. [FOR14]

4.3.3 Diffusoren

Diffusoren kommen zum Einsatz, wenn der Unterboden eines Fahrzeugs aus Package- oder Reglementgründen teilweise eben sein muss und Venturi Tunnel nicht anwendbar sind (Abb. 48 und 49). Die Funktionsweise eines Diffusors ist der der Tunnel ähnlich, wobei der eigentliche Einlass entfällt und der Spalt zwischen der Bodenplatte und dem Untergrund als Einlass dient. Während der Fahrt entweicht das Luftvolumen im Diffusor nach hinten und es muss wieder aufgefüllt werden. Das Auffüllen geschieht durch Ansaugen der Luft unterhalb des ebenen Teils des Unterbodens, wodurch die Strömung beschleunigt wird und dadurch der Druck abfällt. Der Diffusor verlangsamt die beschleunigte Luft unter dem Fahrzeug wieder, in diesem Teil des Unterbodens wird kein Abtrieb generiert. Länge und Winkel des Diffusors werden so ausgelegt, dass eine maximale Saugwirkung erzeugt wird, ohne einen Strömungsabriss zu verursachen und die aus dem Auslass entweichende Luft der Geschwindigkeit der umgebenden Strömung entspricht. Die Saugwirkung kann verstärkt werden durch ein Unterdruckgebiet hinter dem Diffusor, das durch Einsatz eines Beam Wings oder durch Nutzen des Totwassers hinter dem stumpfen Heck eines Fahrzeugs erzeugt wird. [MCB98] [KAT06]



Abb. 48 Diffusor an einem Indy Car hinter einem ebenen Boden [PIC10]



Abb. 49 Komplexer Diffusor am Heck eines Carlsson SLK [AUT14]

Ein Diffusor ist umso wirksamer, je geringer der Luftzufluss von der Umgebungsluft ist. Daher weisen die meisten Diffusoren seitlich senkrechte Platten und ebene Elemente auf.

Es gibt drei Grundvarianten für die Gestaltung des Diffusors, gerade, konvex oder konkav (Abb. 50). [F1T11]

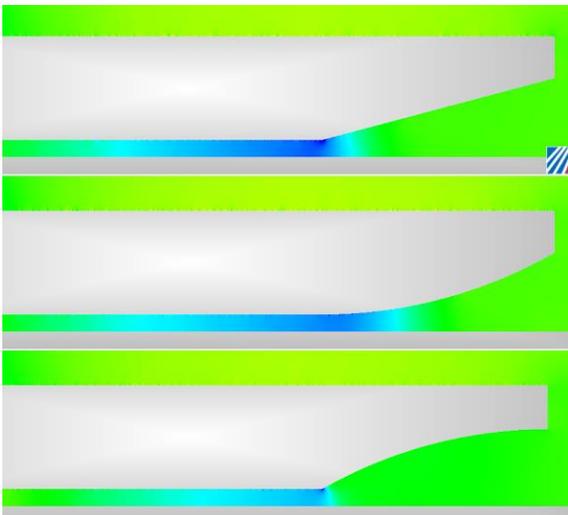


Abb. 50 Druckbeiwertplot der drei Varianten einer Diffusorgeometrie. Oben: Gerade, Mitte: Konvex, Unten: Konkav [F1T11]

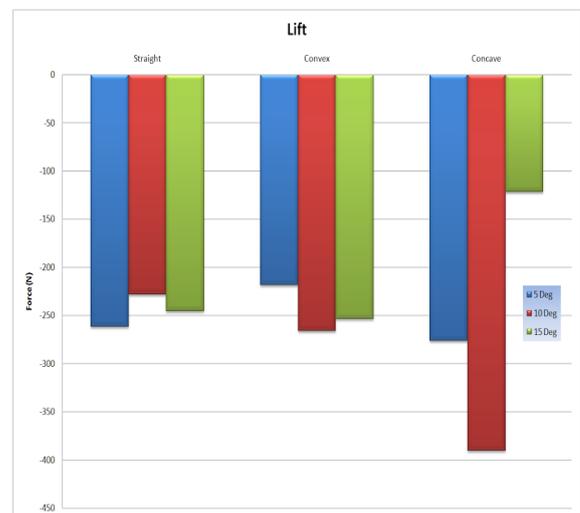


Abb. 51 Qualitative Abtriebswerte für die drei Geometrien bei verschiedenen Diffusorwinkeln. Links: Gerade, Mitte: Konvex, Rechts: Konkav. Blau: 5°, Rot: 10°, Grün: 15° [F1T11]

Abbildung 51 zeigt, dass bei kleinen Diffusorwinkeln nur geringe Unterschiede beim Abtriebsbeiwert zwischen den Varianten bestehen. Jedoch bildet die konve-

xe Variante ein größeres Unterdruckgebiet aus, was es anfälliger für mögliche Störungen, z.B. seitliche Zuströmungen, macht. Die konkave Variante kann bei bestimmten Winkeln mehr Abtrieb produzieren, ist allerdings sehr empfindlich gegenüber Störungen, Bodenabstand und Winkeländerungen zum Boden, wie sie z.B. durch Bewegungen des Fahrzeugaufbaus entstehen können. Bei dieser Variante entsteht am Übergang zwischen dem ebenen Teil des Unterbodens und des Diffusors ein Wirbel, der die Strömung lokal zusätzlich beschleunigt. Kann sich dieser aus den oben genannten Gründen nicht entfalten oder erhalten, so entsteht ein Strömungsabriss, der die Wirksamkeit des Diffusors stark herabsetzt. Das kann zu plötzlichem Abtriebs- und somit Stabilitätsverlust führen.

Diffusoren können und werden auch an der Fahrzeugfront eingesetzt, wo sie als erweiterter Frontspoiler funktionieren.

4.3.4 Luftleitelemente

Neben der eigentlichen Form des Fahrzeugs können zusätzliche Leitelemente zur Steigerung der Leistungsfähigkeit oder der Effizienz¹⁰ eines Fahrzeugs montiert werden. Es gibt eine Vielzahl verschiedener Formen und Bauweisen für die unterschiedlichsten Effekte und Auswirkungen. Nur die wichtigsten werden nachstehend vorgestellt.

4.3.4.1 Vortexgeneratoren

Vortexgeneratoren¹¹ sind Bauteile, die gezielt zur Erzeugung von lokalen, drehenden Wirbeln eingesetzt werden. Die entstehenden Wirbel sind reich an kinetischer Energie und dadurch richtungsstabil. Mit ihnen kann die Gesamtströmung beein-

¹⁰ Verhältnis von Abtrieb zu Widerstand. Je höher dieses ist, umso effizienter ist die Aerodynamik eines Körpers oder Fahrzeugs

¹¹ Als Vortex (Kreiswirbel) werden in der Strömungslehre Kreisströmungen eines Fluids bezeichnet

flusst werden. Sie können z.B. dazu eingesetzt werden, eine laminare Grenzschicht in eine turbulente umzuwandeln und damit globale Ablösungen verhindern oder um einen Unterboden seitlich abzuschirmen, ähnlich einer Schürze.

Als Vortexgeneratoren können flächenhafte (Abb. 52) oder flügelähnliche Elemente (Abb. 53) eingesetzt werden, wobei letztere die Wirbel durch das Zusammenströmen von Ober- und Unterströmung am Flügelende bilden. [KAT06]



Abb. 52 Spitze Vortexgeneratoren an der Dachhinterkante eines Subaru Impreza. Die Vortexgeneratoren reichern die Strömung mit kinetischer Energie an, damit diese an der Karosserie anliegt und den Heckflügel effizienter macht [NAS09]



Abb. 53 Flügelförmige Vortexgeneratoren an der Seite eines Formel E Boliden. Die Profile sind wie an einem Flugzeug angeordnet und produzieren an sich Auftrieb. Durch das Fehlen einer Seitenplatte entsteht ein Wirbel an der Flügelspitze, der den Unterboden, bzw. den Heckflügel verbessern soll [TZM14]

4.3.4.2 Tauchplatten

Tauchplatten sind flächenhafte, oft gekrümmte Abweiser, die zur Steigerung des Abtriebs genutzt werden können. Ihre Form ähnelt der eines sehr dünnen Flügelprofils und entsprechend ist ihre Funktionsweise. Da der Widerstand dieser Elemente im Vergleich zum Abtrieb sehr hoch ist, kommen meistens nur kleine Exemplare zum Einsatz, mit denen die Feinabstimmung der Aerobalance vorgenommen werden kann (Abb. 54). Sie kommen in größeren Varianten als Windabweiser zum Einsatz, um z.B. den Widerstand eines frei stehenden Rades zu verkleinern und dabei ein wenig Abtrieb zu generieren (Abb. 55). [MCB11]



Abb. 54 Tauchplatten (gelb) an der Front eines Audi A5 DTM [RAC13]



Abb. 55 Große Tauchplatte vor den Hinterrädern des BAR Honda F1 zur Reduzierung des Widerstands der Hinterräder und Produktion von Abtrieb [ULT07]

Da sie ohne Seitenplatten starke Wirbel bilden, können sie auch als Vortexgeneratoren fungieren und als Barriere zwischen dem Überdruck auf der Fahrzeugoberseite und dem Unterdruck auf der Unterseite den Gesamtabtrieb steigern. [FOR14]



Abb. 56 Durch Tauchplatten verursachter Wirbel zur Unterdrückung des Druckausgleichs zwischen Fahrzeugoberseite und -Unterseite [FOR14]

5 Visualisierungs- und Validierungsmethoden

Da das Strömungsfeld um ein Fahrzeug sehr komplex ist und es viele Interaktionen zwischen den verschiedenen Teilen gibt, kann die aerodynamische Entwicklung nicht als rein rechnerische Wissenschaft betrachtet werden. Die theoretisch erarbeiteten Daten müssen validiert werden. Da das arbeitende Medium, die Luft, nicht sichtbar ist, müssen Mittel und Wege gefunden werden, um sie zu visualisieren. Um die aerodynamischen Eigenschaften einer Konstruktion überprüfen und bewerten zu können, stehen dem Ingenieur verschiedene Verfahren zur Verfügung.

5.1 Testfahrten

Bei Testfahrten auf einem Testgelände können die Auswirkungen der Konstruktion auf die Fahreigenschaften durch Messen der Rundenzeit, der Querbeschleunigung, Höchstgeschwindigkeit usw. durch Sensoren sehr genau ermittelt werden. Testfahrten sind sehr wichtig, da sie den eigentlichen Einsatzzweck, die Rennstrecke, am realistischsten nachbilden können.

Die Beurteilung der Strömungsverhältnisse gestaltet sich allerdings schwierig. Die Oberflächenströmung kann durch Wollfäden (Abb. 57) oder Flow-Viz Farben¹² (Abb. 58) oder einfach durch Schmutz dargestellt und ausgewertet werden.

[MCB11]

¹² Flow-Viz Farbe: ein Gemisch aus Öl, Wasser und kontrastreichen Pigmenten, die in flüssiger Form auf die zu Untersuchenden Fahrzeugteile oder Bereiche vor dem Beginn einer Testfahrt aufgetragen wird. Während der Fahrt wird die Farbe von der Strömung entlang der Oberfläche verteilt. Die Farbe trocknet und es können anhand der Farbverteilung Rückschlüsse auf die während der Fahrt vorliegenden Strömungsverhältnisse auf der Oberfläche gebildet werden.



Abb. 57 Wolffäden zur Visualisierung der Oberflächenströmung [ECO13]



Abb. 58 Flow-Viz Farbe (neongrün) am Seitenkasten zur Visualisierung der Oberflächenströmung [MOT14]

Das Aufnehmen von Druckverhältnissen und Strömungsgeschwindigkeiten sowie Strömungsverhältnissen abseits der Oberfläche lässt sich gar nicht oder nur unter hohem technischen Aufwand durchführen. Abbildung 59 zeigt eine technisch hoch aufwendige Methode.



Abb. 59 Komplexe Messeinrichtung zur Aufnahme der Druckverhältnisse im oberflächenfernen Bereich [MOT14]

Der größte Nachteil von Testfahrten ist die Notwendigkeit eines fahrbereiten Prototyps. Die Herstellungskosten und vor allem die benötigte Fertigungszeit sind zu hoch, um Testfahrten am Anfang der Entwicklung oder während der Konzeptsondierungsphase durchführen zu können. Zudem ist der Testbetrieb kostenaufwändig und die Testbedingungen unterliegen Schwankungen z.B. durch Witterungseinflüsse.

5.2 Windkanal

Ein Windkanal ist ein Testlabor, in dem durch ein oder mehrere Gebläse und Gleichrichter ein laminares Strömungsfeld erzeugt werden kann. In einem Windkanal können unter stationären und wiederholbaren Testbedingungen Daten auch zur Gesamtströmung aufgenommen werden. Neben den bei Testfahrten zum Einsatz kommenden Sensoren lassen sich Kräfte und Momente durch Waagen (Abb. 60) aufnehmen und das Strömungsfeld kann auch in großem Abstand von der Oberfläche durch Faden- oder Rauchsonden (Abb. 61) visualisiert werden. [MCB11]



Abb. 60 Windkanalversuch mit dem Modell eines Rennfahrzeugs. Das Modell ist an einem Messarm (rot dargestellt) aufgehängt, der Kräfte und Momente bezüglich der drei Achsen des Schwerpunkts aufnimmt. Der Boden ist beweglich ausgeführt und die Räder drehend [AUT10]



Abb. 61 Strömungsvisualisierung mittels Rauchsonde im Windkanal [AUT10]

Die Notwendigkeit eines fahrbereiten Prototyps entfällt, es genügt ein Modell das deutlich weniger Zeitaufwand bei der Fertigung benötigt. Um realistische Ergebnisse zu erhalten, muss dennoch erhöhter technischer Aufwand betrieben werden, so bedarf es zur korrekten Darstellung des Bodeneffekts eines bewegten Bodens und drehender Reifen. Die Auswirkungen von Abtrieb wie das Zusammendrücken der Fahrwerksfedern und Reifen und der dadurch veränderte Bodenabstand müssen ebenfalls nachgebildet werden können. [MCB11]

Der Betrieb eines Windkanals ist kostenintensiv, die Kosten sind von der Größe der Anlage abhängig. Werden verkleinerte Modelle in einem kleinen Windkanal verwendet, muss auf die Reynoldszahl geachtet werden. Zudem hat die Architektur der Anlage Einfluss auf die Messwerte. Durch Interaktionen mit den Wänden entsteht eine von der Realität abweichende Strömung. Durch die Gebläse und Gleichrichter ist die Strömung zudem nur quasi-laminar. Die Luftteilchen bewegen sich zwar in eine Richtung, durch den höchst turbulenten Beschleunigungsprozess im Gebläse ist aber die Strömung energiereicher und somit richtungsstabiler als stehende Luft, durch die ein Fahrzeug fährt. Deshalb existiert für nahezu alle Windkanäle eine charakteristische Korrekturformel. Die Ergebnisse sind daher interpretationsbedürftig.

5.3 Strömungssimulation

Neben Versuchen und physischen Tests kann die Strömung um einen Körper auch virtuell durch die numerische Strömungssimulation nachgebildet werden. Durch die fortschreitende Entwicklung in der Computertechnologie sowie entsprechender Software haben CFD¹³ Programme an Bedeutung bei der Lösung von Ingenieursproblemen gewonnen.

¹³ Computational Fluid Dynamics

5.3.1 Berechnungsgrundlagen

Bei der Berechnung von Strömungen handelt es sich um ein numerisches Lösungsverfahren zur Lösung von Bewegungs- und Transportgleichungen, das aus Differentialgleichungen für Massen-, Impuls-, und Energieerhaltung und Randbedingungen besteht. Ziel dabei ist es, aus den Differentialgleichungen durch die Auswahl geeigneter Diskretisierungsmethoden algebraische Gleichungen zu erhalten. Die häufigsten Diskretisierungsmethoden sind die Finite-Volumen-Methode, Finite-Differenzen-Methode und die Finite-Elemente-Methode. Entsprechend der Diskretisierungsmethode wird ein Berechnungsgitter erstellt, welches die Diskretisierung auf die zu untersuchende Geometrie bezieht (Abb. 62). Dieses Berechnungsgitter führt zu einer endlichen Anzahl von Elementen des Berechnungsgebiets. Es entsteht das Netz.

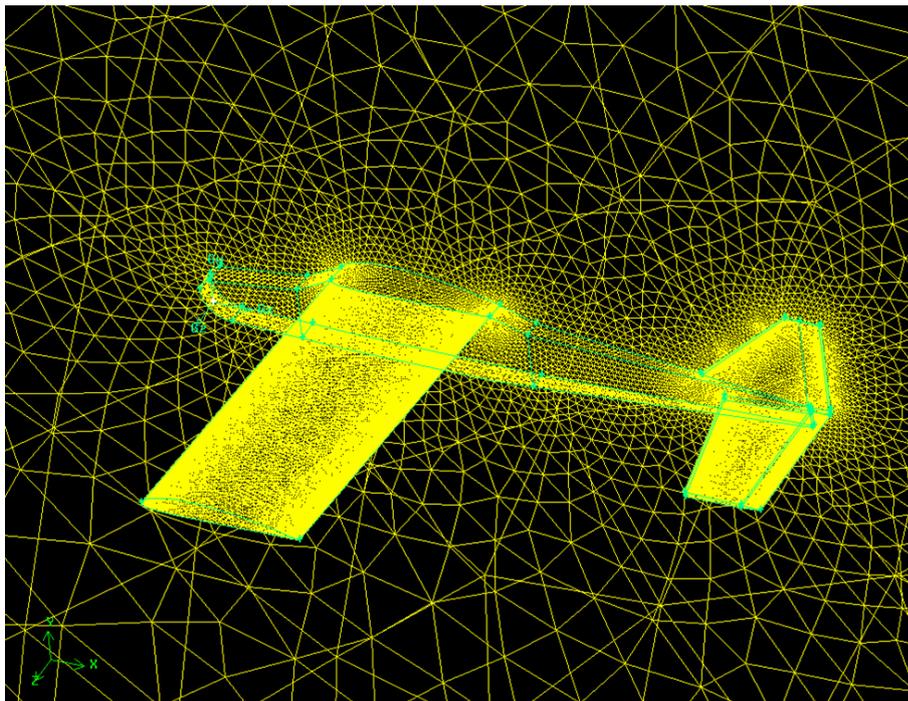


Abb. 62 Darstellung des Berechnungsgitters für die Strömungssimulation eines Kleinflugzeugs [CAL13]

Nach der Auswahl eines Netzes müssen, abhängig von der Diskretisierungsmethode, Randbedingungen definiert werden, die das physikalische Verhalten zwischen den einzelnen Elementen des Netzes wiedergeben. Bei Verwendung der

Finite-Elemente-Methode muss z.B. eine Ansatzfunktion gewählt werden, die aus Form- und Wichtungsfunktionen besteht. Für das aufgestellte Gleichungssystem muss nun ein geeignetes Lösungsverfahren gewählt und Konvergenzkriterien definiert werden.

Für newtonsche Fluide¹⁴, wie sie in dieser Arbeit behandelt werden, stellen die Navier¹⁵-Stokes¹⁶-Gleichungen die wichtigsten Gleichungen dar. Sie bestehen aus Impulsgleichungen und der Stokes Hypothese, die einen Zusammenhang zwischen der dynamische Viskosität und der Druckviskosität des Fluids herstellt. Für die Stokes Hypothese existiert kein physikalischer Beweis, allerdings konnte ihre Richtigkeit durch verschiedene Experimente bestätigt werden.

Zusammen mit der Kontinuitätsgleichung bilden die Navier-Stokes-Gleichungen das zu lösende Gleichungssystem. Die direkte Lösung dieser Gleichungen ist nur für bestimmte Sonderfälle möglich, daher müssen für allgemeine Problemstellungen Näherungslösungen gefunden werden. [FER99]

5.3.2 Turbulenzmodelle

Um turbulente Strömungen, wie sie im Strömungsfeld um ein Fahrzeug vorliegen, berechnen zu können, bedarf es eines Turbulenzmodells. Ohne ein Turbulenzmodell lässt sich eine genaue Abbildung der Wirbelstrukturen nur mit direkter numerischer Simulation erreichen, die eine sehr feine Diskretisierung des Berechnungsgitters, und insbesondere in Bereichen der Grenzschicht erfordert. Diese Methode erfordert umfangreiche Rechenleistung und eine sehr lange Berechnungsdauer. Sie ist daher für die meisten Ingenieuraufgaben nicht einsetzbar. Aus diesem Grund wurden verschiedene Berechnungsmodelle zur vereinfachten Be-

¹⁴ Newtonsche Fluide (z.B. Luft, Wasser) weisen einen proportionalen Zusammenhang zwischen Schubspannungen und Schergeschwindigkeiten auf. Sie sind demnach durch belastungsunabhängige Viskosität charakterisiert.

¹⁵ Claude Louis Marie Henri Navier, französischer Mathematiker und Physiker (1785-1863)

¹⁶ Sir George Gabriel Stokes, irischer Mathematiker und Physiker (1819-1903)

rechnung der Turbulenzen entwickelt. Dabei unterscheiden sich die Methoden in der Anzahl der direkt zu berechnenden Wirbelstrukturen. [FRE13]

5.3.2.1 Reynolds-gemittelte Navier-Stockes-Gleichungen

Für viele Anwendungen ist die Kenntnis der genauen Druck- und Geschwindigkeitsschwankungen in den Wirbeln nicht notwendig und es genügt die Kenntnis der gemittelten Strömung. Bei den Reynolds-gemittelten Gleichungen kommt eine statistische Betrachtung der Turbulenzen zum Tragen, die Strömung wird dabei in Mittelwert und Schwankungswert aufgeteilt. Durch diese zusätzlichen Variablen für die Schwankungsbewegungen ist das Gleichungssystem der Navier-Stockes-Gleichungen nicht mehr geschlossen und muss mit Hilfe von meist empirisch gewonnenen Turbulenzmodellen erweitert werden.

Die Turbulenzmodelle haben dabei die Aufgabe, die Auswirkungen einer turbulenten Strömung auf die Hauptströmung abzubilden und nicht die genauen Vorgänge in den Wirbeln. Dadurch lassen sich ausreichend genaue Abbildungen der Strömungsverhältnisse für viele relevante Aufgaben bei geringem und somit wirtschaftlichem Zeit- und Kostenaufwand realisieren. Die für Ingenieuraufgaben am häufigsten benutzten Modelle werden hier vorgestellt. [FRE13]

k - ϵ Modell

Das k - ϵ Modell verwendet zur Bestimmung der turbulenten Viskosität die turbulente kinetische Energie k und ihre Dissipationsrate ϵ aus Transportgleichungen.

Es ist nur für vollturbulente Strömungen gültig, was zu Problemen bei der Berechnung der Grenzschicht in Wandnähe führen kann. Um diese Probleme zu minimieren, wird das Modell um ein logarithmisches Wandgesetz erweitert, das einen nicht linearen Zusammenhang zwischen Geschwindigkeitsgradient und Geschwindigkeit herstellt. In diesem Wandgesetz können zudem Wandrauigkeiten berücksichtigt werden. Dieses Wandgesetz ermöglicht eine geringere Anzahl an Elementen im Berechnungsgitter und verringert somit den Rechenaufwand deutlich, wie Abbildung 63 verdeutlicht. [LAN05] [COM12]

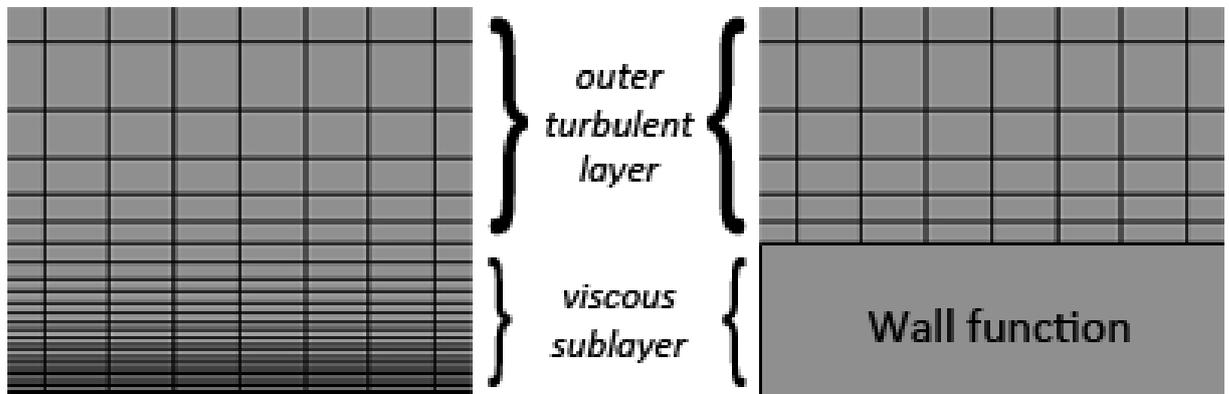


Abb. 63 Darstellung eines vollständigen Berechnungsgitters links und eines durch ein Wandgesetz vereinfachten rechts [CHA11]

Das $k - \epsilon$ Modell ist das am häufigsten eingesetzte Turbulenzmodell, da es für viele Anwendungen sehr gute Ergebnisse bei geringem Rechenleistungsbedarf liefert. Es wird besonders häufig zur Simulation der Strömung um stumpfe Körper, wie einem Fahrzeug, verwendet.

Darüber hinaus ist es unempfindlich gegenüber Eingangswerten wie der Feinheit und Aufbau des Berechnungsgitters.

Es ist nicht für stark drallbehaftete und ausgeprägte Staupunktströmungen wie sie z.B. in Turbinen vorkommen, geeignet.

Da nur vollturbulente Grenzschichten abgebildet werden und diese durch ein Wandgesetz approximiert werden, wird gerade der Reibungswiderstand inkorrekt berechnet, was einen um etwa 3% abweichenden Gesamtwiderstand ergibt. Beim Abtrieb weichen die Werte dagegen nur um wenige Prozent von Experimenten ab. Tabelle 5 vergleicht einige Simulationsergebnisse mit experimentell ermittelten Werten.

Tabelle 5: Vergleich Simulation mit Experiment [LAN05] [CHA11] [COM12]

	Serienfahrzeug		Rad		Ahmed Body	
	Sim	Exp	Sim	Exp	Sim	Exp
Cw	0,328	0,321	0,671	0,69	0,282	0,285
Abweichnung	-2,13%		2,83%		1,06%	

17

k - ω Modell

Das k - ω Modell ähnelt dem k - ϵ Modell, es kann aber zusätzlich laminisierende Grenzschichten abbilden, indem es statt der Dissipationsrate ϵ die spezifische turbulente Dissipationsrate ω zur Berechnung verwendet.

Die Verwendung dieses Modells benötigt deutlich mehr Rechenressourcen und es ist deutlich empfindlicher bezüglich den Eingangswerten. [COM12]

5.3.2.2 Grobstruktursimulation

Die Grobstruktursimulation bildet einen Mittelweg zwischen Direkter Numerischer Simulation und gemittelter, statistischer Vereinfachung. Dabei wird die Hauptströmung weiterhin gemittelt berechnet, einzelne Wirbel werden davon aber abgelöst und direkt berechnet. Es gibt zwei Unterscheidungen bei den Verfahren, die Very-Large-Eddy¹⁸-Simulation VLES und die Large-Eddy-Simulation LES. Bei VLES werden große, von der Geometrie induzierte Wirbel direkt berechnet, bei LES kleinere, energiereiche Wirbel.

¹⁷ Ahmed Body ist ein stumpfer Körper, dessen aerodynamische Eigenschaften sehr genau im Windkanal untersucht wurden. Es wird oft für die Validierung von CFD Programmen und deren Einstellungen herangezogen.

¹⁸ Als Large Eddy werden im Englischen große Wirbel bezeichnet

Die Grobstruktursimulation benötigt im Vergleich zu den Reynolds-gemittelten Navier-Stokes-Gleichungen deutlich höhere Rechenleistung, angesichts der schnellen Entwicklung der Computertechnologie kann sie aber in naher Zukunft wirtschaftlich zur Lösung von Ingenieurproblemen verwendet werden. [FER99]

5.3.3 Ablauf einer Simulation

Die Vorgehensweise bei einer CFD Simulation beginnt mit der Erstellung der zu untersuchenden Geometrie. Meist liegen diese Daten als CAD¹⁹ Datensatz bereits vor. Die Geometrie muss eventuell bereinigt werden, Elemente, die keinen oder einen vernachlässigbaren Einfluss auf die zu untersuchenden Werte haben werden dabei entfernt oder vereinfacht (z.B. Karosseriefugen, Antennen etc.). Sie müssen nicht entfernt oder bearbeitet werden, erschweren aber die Erstellung eines Berechnungsgitters und resultieren in einer deutlich höheren Anzahl an Elementen, was zu längeren Rechenzeiten und einer höheren benötigten Rechenleistung führt.

Die so aufbereiteten Daten werden in ein Vernetzungsprogramm geladen, in dem abhängig von der Geometrie das Berechnungsgitter erstellt wird. Dabei ist die Qualität der Ergebnisse von der Anzahl und Art der Elemente im Netz abhängig.

Mit einem Präprozessor wird das Berechnungsgitter in Bereiche unterteilt und diese mit Randbedingungen versehen, z.B. Materialeigenschaften des Fluids, Flächen als feste Wände, Einlässe und Auslässe definiert etc. Im Präprozessor werden zudem Berechnungs- und Ausgabeparameter wie das zu verwendende Berechnungsverfahren, Turbulenzmodell und Ausgabe der Kräfte und Momente bezüglich eines bestimmten Punktes definiert.

Die Daten des Berechnungsgitters und des Präprozessors werden in das eigentliche Berechnungsprogramm, den Solver, geladen und die Berechnung findet statt. Da die Navier-Stokes-Gleichungen numerisch gelöst werden, entstehen Residuen, die durch mehrere Iterationen berechnet werden. Ein Residuum ist in der Numerik

¹⁹ Computer Aided Design

diejenige Größe, um die eine Gleichung nicht erfüllt ist, also die Abweichung vom Ergebnis. Die Berechnung führt so viele Iterationen durch, bis die vorher definierten Residuenziele, die zulässigen Abweichungen, erreicht sind. Es ist wichtig, dass die Residuenverläufe über die Iterationenanzahl konvergieren (Abb. 64). Tun sie es nicht, liegt ein Fehler in den Eingangswerten vor und die Simulation bleibt ergebnislos bzw. endet mit fehlerhaften Ergebnissen. Der Solver schreibt eine Ergebnisdatei, die in tabellarischer Form ausgewertet werden kann.

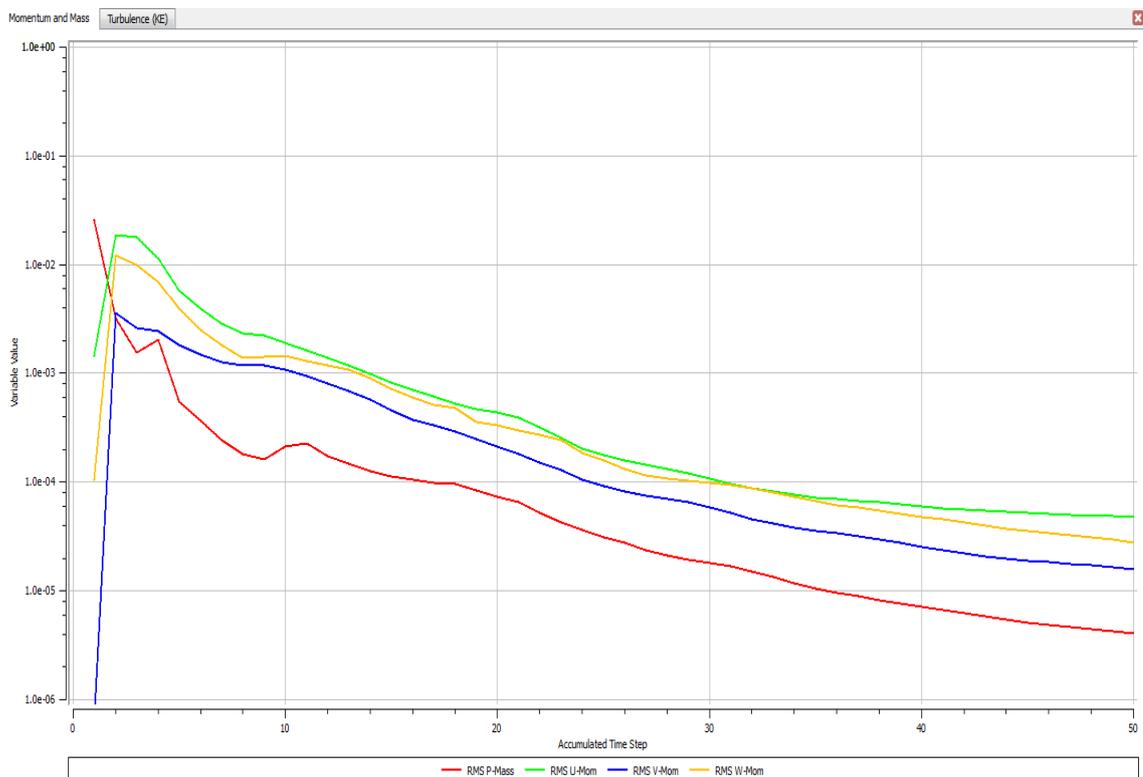


Abb. 64 Beispiel eines konvergierenden Residuenverlaufs

Da die Daten bei einer dreidimensionalen Berechnung sehr umfangreich sind, können sie auch in einen Postprozessor geladen werden, in dem die Ergebnisse grafisch dargestellt und anhand der Bilder wie Abbildung 65 einfach analysiert werden können. [COM12] [ANS11] [ANS09]

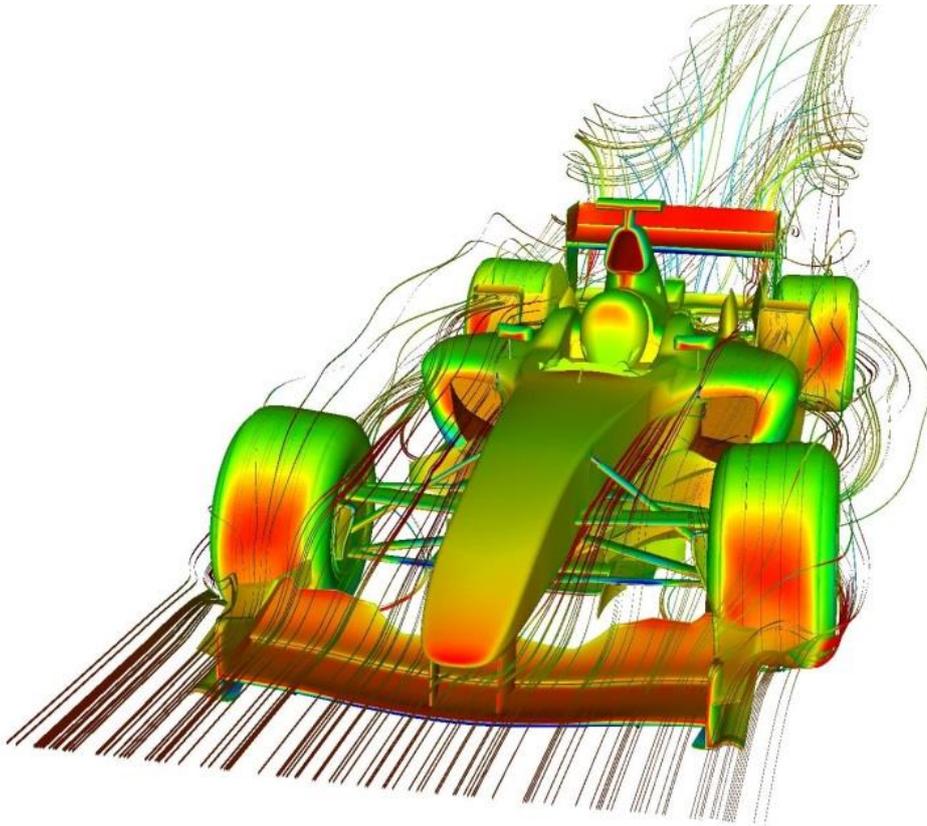


Abb. 65 Beispiel der Visualisierungsmöglichkeiten eines Postprozessors. Hier sind Stromlinien und die Druckverteilung auf der Oberfläche eines Formel Eins Rennfahrzeugs dargestellt [DAL06]

6 Formula Student

6.1 Der Wettbewerb

Die Formula Student bzw. Formula SAE ist ein internationaler Konstruktionswettbewerb für Studenten von Hochschulen. 1984 wurde er zum ersten Mal in den USA ausgetragen. In den vergangenen Jahren sind weltweit zahlreiche Wettbewerbe, Events genannt, hinzugekommen. So wird der Wettbewerb jährlich in Michigan, USA, Lincoln, USA, Großbritannien, Deutschland, Österreich, Spanien, Ungarn, Italien, Japan, Russland, Brasilien, Australien, China und Indien ausgetragen. Hinzu kommen zahlreiche kleine, regionale, nichtoffizielle Wettbewerbe.

Die einzelnen Wettbewerbe werden nur für sich gewertet, es gibt also keine Meisterschaft. Trotz der hohen Anzahl an Wettbewerben nehmen die meisten Teams aus Kostengründen an nur einem Wettbewerb im Jahr teil. Europäische Teams und Teams mit einem hohen Budget nehmen oft auch an drei bis vier Events teil.

Da es mittlerweile mehr als 500 Teams auf der ganzen Welt gibt und nicht alle Teams an allen Wettbewerben gegeneinander antreten, wurde von inoffizieller Seite aus eine Weltrangliste ins Leben gerufen, die aus den einzelnen Ergebnissen nach einem Algorithmus eine Reihenfolge ermittelt und so eine gewisse Vergleichbarkeit ermöglicht. Die Weltrangliste ist im Internet unter <http://mazur-events.de/fs-world/> zu finden.

Ziel des Wettbewerbs ist es, ein einsitziges Formel Fahrzeug nach dem technischen Reglement der Formula Student zu konstruieren, herzustellen und gegen andere Universitäten anzutreten. Dabei soll das Team ein Unternehmen simulieren, das den Auftrag bekommen hat, den Prototypen eines Rennfahrzeugs zu entwickeln, das für Amateurrennfahrer geeignet ist und in einer Stückzahl von 1000 Einheiten pro Jahr gebaut werden soll.

Die Gesamtwertung setzt sich aus verschiedenen statischen und dynamischen Disziplinen zusammen. Die maximal erreichbare Punktzahl beträgt 1000 Punkte. Abbildung 68 zeigt die Punktezusammensetzung am Beispiel der Formula Student Germany.

Die Gesamtplatzierungen werden aus der Summe der in den Einzeldisziplinen erreichten Punkte abzüglich möglicher Strafen gebildet. [FSG13] [SAE13] [WAL13]

6.1.1 Statische Disziplinen

Bei der technischen Abnahme wird von offizieller Seite überprüft, ob das Fahrzeug den technischen Regularien entspricht. Das sogenannte Scrutineering gliedert sich dabei in vier Bereiche:

Als erstes erfolgt eine Sichtprüfung und eine Überprüfung der einzureichenden Dokumente, wie zum Beispiel einem Nachweis über das Bestehen eines Crashversuchs.

Als nächstes wird auf dem Tilt Table überprüft, ob das Fahrzeug in einer Kurvenfahrt kippen oder Flüssigkeiten verlieren könnte. Dazu wird es auf einen Tisch gestellt, der um 60 Grad um die Fahrzeuglängsachse angestellt wird. Das Fahrzeug muss hierfür mit allen Betriebsflüssigkeiten befüllt werden und der Fahrer muss im Fahrzeug sitzen. Hier wird auch das offizielle Gesamtgewicht ermittelt.

Als nächstes wird die Lautstärke des Motors gemessen. Diese darf 110 dB nicht überschreiten.

Zum Schluss erfolgt ein Bremstest, bei dem alle vier Räder blockieren müssen, ohne dass das Fahrzeug dabei ausbricht.

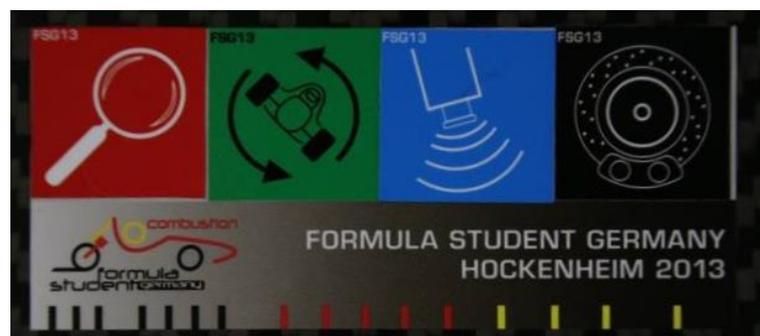


Abb. 66 Der Tech Sticker wird bei bestandener technischer Abnahme auf das Fahrzeug geklebt [FSG13]

Für das Scrutineering gibt es zwar keine Punkte, das Bestehen aller Tests ist aber Voraussetzung für die Teilnahme an den dynamischen Disziplinen und wird mit dem Tech Sticker (Abb. 66) am Fahrzeug angezeigt.

6.1.1.1 Engineering Design

Beim Engineering Design Event wird die Konstruktion des Fahrzeugs von Juroren aus Industrie und Motorsport begutachtet und bewertet. In einer kurzen Präsentation stellen die Studenten ihre Teilbereiche vor, bevor es dann zur Diskussionsrunde mit den Juroren kommt. Dabei werden sowohl das Fachwissen der jeweiligen Studenten als auch die Umsetzung dieses auf das Fahrzeug und das gesamte Projekt bewertet. Maximal sind 150 Punkte zu erreichen.

6.1.1.2 Cost & Manufacturing Event

Beim Cost Event wird überprüft, inwieweit die Studenten wirtschaftliche Aspekte bei der Konstruktion und Fertigung beachtet haben. Neben den reinen Herstellungskosten des Fahrzeugs wird in einer Präsentation auch das allgemeine Wirtschaftswissen anhand eines Real Case Szenarios abgefragt: So müssen die Student z.B. die Großserienfertigung eines bestimmten Bauteils mit Hinblick auf Kosten durchplanen und vorstellen. Die maximale Punktzahl beträgt 100 Punkte.

6.1.1.3 Business Plan Presentation

Bei der Business Plan Präsentation wird die Vermarktungsstrategie von den Studenten präsentiert. Die Präsentation soll einen möglichen Investor überzeugen, in die Produktion von 1000 Fahrzeugen zu investieren. Die maximale Punktzahl beträgt hier 75 Punkte

6.1.2 Dynamische Disziplinen

6.1.2.1 Skid Pad

Beim Skid Pad wird das Fahrverhalten des Fahrzeugs in der konstanten Kreisfahrt überprüft. Die Strecke besteht aus einer liegenden Acht, jeder der Kreise hat einen Innendurchmesser von 15,25m, die Streckenbreite beträgt 3m (Abb. 67). Es wird zunächst eine Einlaufrunde rechtsherum gefahren, dann eine gezeitete Runde rechtsherum. Direkt aus dieser fährt man in die Einlaufrunde linksherum und anschließend in die Gewertete. Die Gesamtzeit setzt sich zusammen aus den beiden gewerteten Runden. Der Skid Pad wird von zwei Fahren mit je zwei Versuchen gefahren. Die maximale Punktzahl beträgt 75 Punkte.

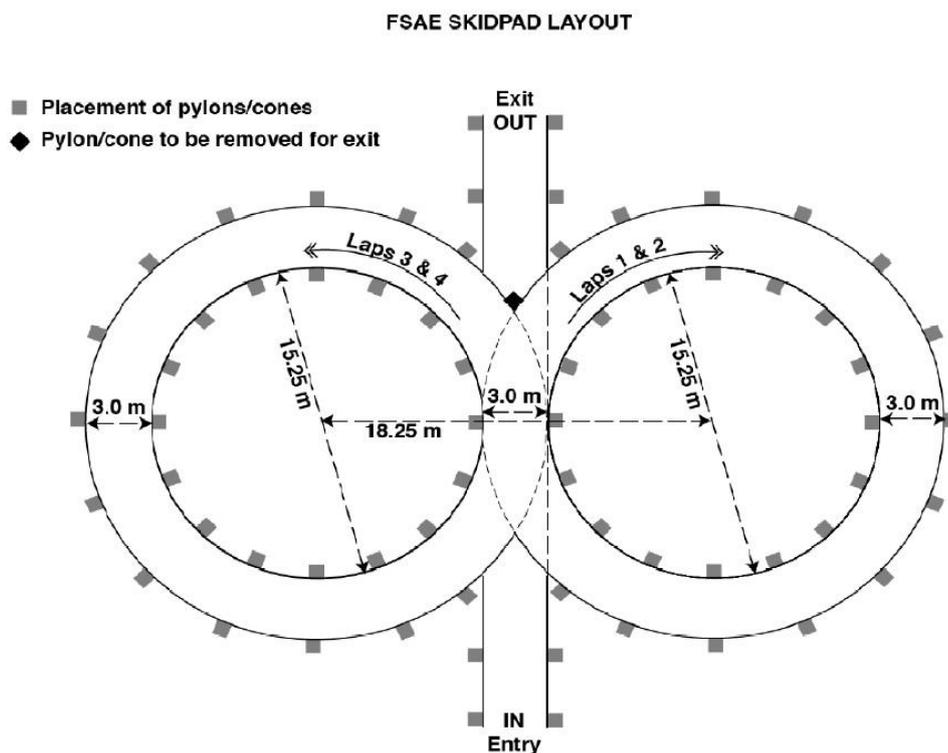


Abb. 67 Layout Skid Pad [SAE13]

6.1.2.2 Acceleration

Das Acceleration ist das Beschleunigungsrennen. Das Fahrzeug muss aus dem Stand heraus in möglichst kurzer Zeit eine 75m lange Gerade durchfahren. Diese Disziplin wird wie beim Skid Pad von zwei Fahrern gefahren, jeder hat zwei Versuche sodass jedes Team maximal vier Läufe fahren kann. Die maximale Punktzahl beträgt 75 Punkte.

6.1.2.3 Autocross

In dieser Disziplin muss ein ca. 1000m langer, durch Pylonen abgesteckter Rundkurs durchfahren werden. Hier wird das dynamische Fahrverhalten des Fahrzeugs bei verschiedenen, aufeinander folgenden Fahrmanövern bewertet. Dabei ist nur ein Fahrzeug auf der Strecke. Es wird stehend gestartet, die Anzahl der Versuche beträgt wieder vier, zwei Fahrer mit je zwei Versuchen. Die schnellste Einzelrunde wird gewertet, die maximale Punkteanzahl beträgt 100 Punkte.

6.1.2.4 Endurance

Das Endurance ist das Ausdauerrennen. Hier wird die Zuverlässigkeit des Fahrzeugs auf einer Gesamtdistanz von ca. 22km bewertet. Nach der Hälfte der Distanz ist ein Fahrerwechsel durchzuführen, bei dem der Motor abgestellt werden muss. Die Strecke ist mit der des Autocross nahezu identisch, da sich mehrere Fahrzeuge auf der Strecke befinden, werden Überholzonen eingebaut. Rad an Rad Rennen sind verboten, das zu überholende Fahrzeug wird durch ein Flaggensignal in eine Überholzone geschickt, in der es verlangsamen muss während das schnellere Fahrzeug auf der Strecke überholt. Die Startreihenfolge erfolgt nach dem Ergebnis des Autocross, die schnellsten Fahrzeuge starten meistens zuletzt. Die Maximale Punktzahl beträgt 325 Punkte.

Bei allen dynamischen Disziplinen wird die schnellste Zeit mit der Maximalpunktzahl bewertet, die restlichen Positionen und dazugehörigen Punkte werden nach einem bestimmten Schlüssel errechnet. Die Gesamtzeit kann mit Strafen belegt werden, für eine umgefahrene Pylone werden zwei Sekunden addiert, für ein Verlassen der Strecke 20 und für das Nichteinhalten der Startreihenfolge beim Endurance 120 Sekunden.

6.1.2.5 Fuel Efficiency

Bei der Fuel Efficiency wird der Kraftstoffverbrauch bewertet. Vor dem Endurance wird das Fahrzeug voll betankt, die Kraftstoffmenge wird in einem Steigrohr markiert. Nach dem Endurance wird der verbrauchte Kraftstoff wieder aufgefüllt und die Menge notiert. Für die Wertung wird die verbrauchte Menge mit der Gesamtzeit des Endurance nach einem Schlüssel verrechnet. Es wird also nicht der niedrigste Verbrauch, sondern das effizienteste Fahrzeug bewertet. Die maximale Punktzahl beträgt 100 Punkte.

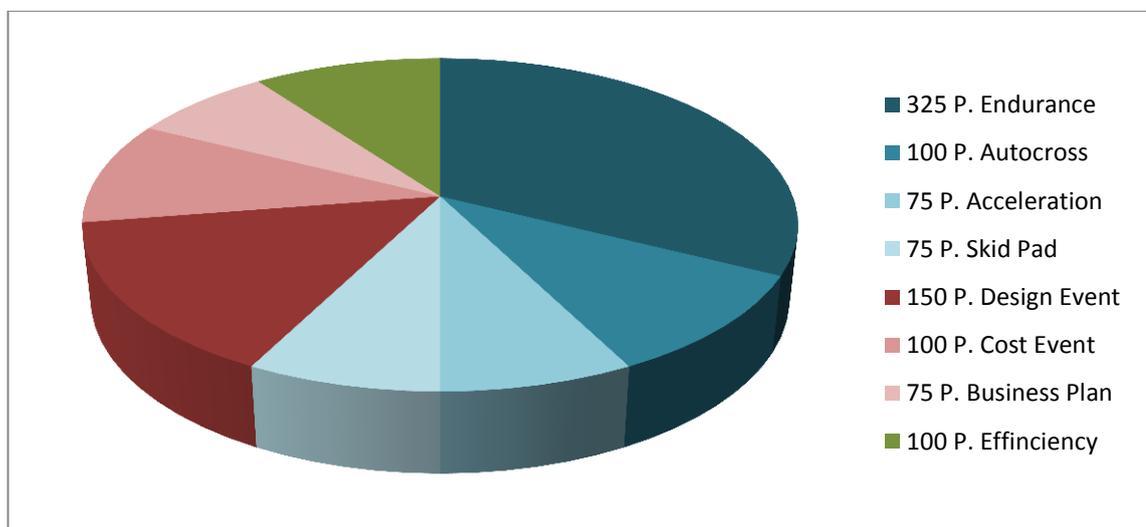


Abb. 68 Zusammensetzung der Punkte bei einem Formula Student Event

6.2 Aerodynamik in der Formula Student

Das Thema Aerodynamik in der Formula Student war lange Zeit ein umstrittenes.

Als Hauptgrund gegen den Bau und Einsatz von aerodynamischen Bauteilen wurde die, verglichen mit anderen, klassischen Rennserien, geringe Durchschnittsgeschwindigkeit auf den Strecken genannt, sie beträgt je nach Kurslayout etwa 50 bis 60 km/h. Die Geraden sind reglementbedingt maximal 75m lang, die Kurse bestehen somit hauptsächlich aus meist engen Kurven und einigen Slalompässagen. Die Streckenbreite beträgt zwischen 3,5 und 4,5m (vgl. Abb. 69).

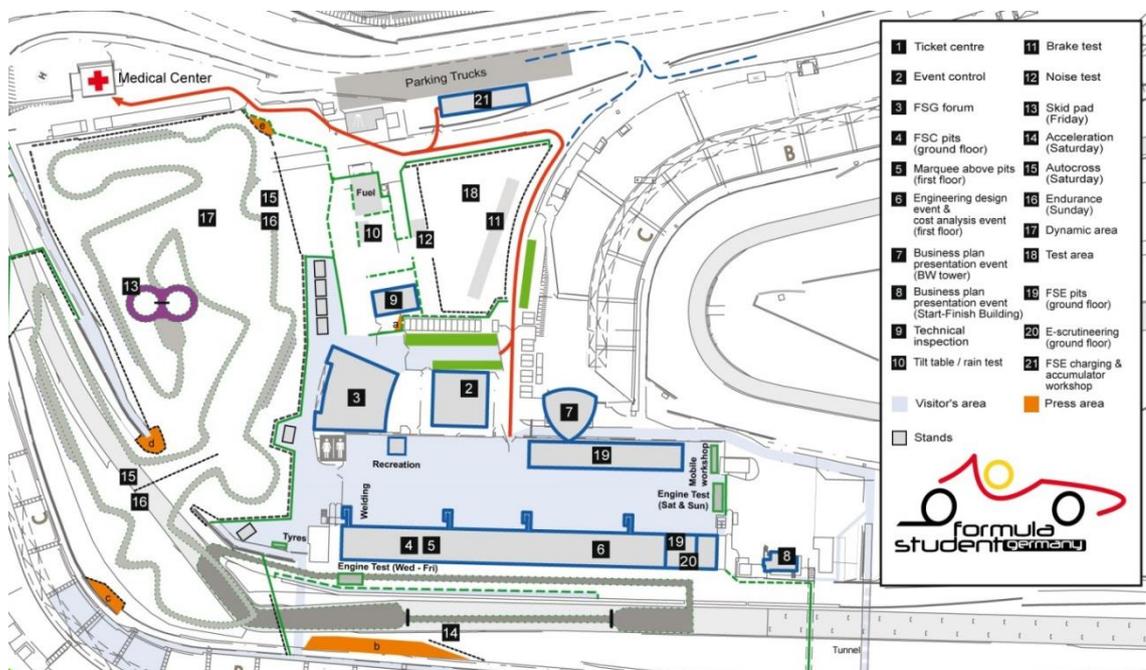


Abb. 69 Darstellung des Streckenlayouts für den Autocross und Endurance als grau hinterlegte Linie links im Bild. Zum Größenvergleich ist rechts eine mittelschnelle Kurve des Hockenheimrings zu erkennen, die von Rennserien wie Formel Eins oder DTM befahren wird [FSG13]

Um die Fahrzeuge auf diesen winkligen und schmalen Strecken trotzdem schnell und agil zu bekommen, wurden diese entsprechend kompakt und leicht gebaut. Im Durchschnitt beträgt die Spurweite eines typischen Formula Student Fahrzeugs aus dem Jahr 2010 ca. 1200mm, der Radstand ca. 1650mm, das Gewicht inklusi-

ve Fahrer ca. 280 kg. Durch die kompakten Abmessungen entsteht ein sehr enges Package, in das der Fahrer, Antriebsstrang, Fahrwerk und Sicherheitszelle untergebracht werden müssen. Diese Baugruppen unterscheiden sich in ihren Dimensionen nicht sonderlich von anderen Rennfahrzeugen, sodass vergleichsweise wenig Raum zur Verfügung steht, um aerodynamische Bauteile wie Flügel und Unterböden zu implementieren.

Hinzu kam, dass das Reglement diese Bauräume und auch die Bauformen für aerodynamische Bauteile stark begrenzte. So durften diese nur 460mm über die Vorderräder nach vorn, nicht hinter die Hinterräder hinausragen und nicht breiter als die breitere Achse sein. Die minimalen Radien der vorderen Kanten von Flügeln mussten aus Gründen des Fussgängerschutzes mindestens 12,7mm betragen, die Radien von Seitenblechen mindestens 3mm. Die minimale Bodenfreiheit betrug 25mm. [SAE10]

All das führte dazu, dass der Fokus bei der Konstruktion der Fahrzeuge auf ein niedriges Gewicht, eine kompakte Bauweise und ausgeklügelte Fahrwerkssysteme gelegt wurde.

Aerodynamik wurde vernachlässigt, da die Meinung bestand, dass unter den gegebenen Restriktionen nur kleine und ineffektive aerodynamische Bauteile realisierbar und somit bei den geringen Geschwindigkeiten nur geringe Abtriebswerte erreichbar sind. Die Möglichkeiten eine deutliche Verbesserung der Gesamtperformance zu erzielen wurden als sehr gering angesehen. Oft wurde auch argumentiert, dass die Nachteile eines höheren Gesamtgewichts, einer höheren Schwerpunktlage und zusätzlichen Luftwiderstandes eines Fahrzeugs mit Flügeln die Vorteile des Abtriebs aufheben oder sogar übertreffen würden.

Als Resultat waren zumindest die erfolgreichen Fahrzeuge sehr minimalistisch gestaltet (Abb. 70).



Abb. 70 2007er Fahrzeug der TU Delft, mehrfacher Gesamtsieger [DUT13]



Abb. 71 Fahrzeug des Sooner Racing Teams aus Oklahoma, USA [SOO13]

Ein weiterer wichtiger Punkt sind die in einem Formula Student Team begrenzten Ressourcen. Der Mehraufwand, der zur Entwicklung eines Aerodynamikpaketes notwendig ist, ist nicht zu vernachlässigen. Es ist eine weitere Baugruppe, die zusätzliche Mitarbeiter benötigt, zusätzliche Entwicklung erfordert und bei der Fertigung zusätzlichen Zeit- und Materialaufwand bedeutet. Zudem müssen die anderen Baugruppen mit weiteren Parametern arbeiten, zusätzliche Einflüsse auf Fahrdynamik, weitere Lastfälle für die Strukturbauteile des Chassis usw. müssen bestimmt und verarbeitet werden.

Dieser Mehraufwand wurde oft als nicht rentabel angesehen und auch nicht betrieben. Waren zusätzliche Ressourcen vorhanden, wurden sie zur Verbesserung bestehender Systeme eingesetzt anstatt in das für die meisten neue und unerforschte Gebiet zu investieren.

Außerdem waren Fahrzeuge mit Flügeln als weniger ästhetisch angesehen.

Diese Meinung war unter den Teams, aber auch unter den Juroren und Offiziellen über einen langen Zeitraum weit verbreitet. Angesichts dieser Vorbehalte haben nur wenige Teams auf Aerodynamik gesetzt. Ihre Ergebnisse auf den Events waren nicht überragend, meist blieb es bei kleineren Ausrufezeichen ohne vordere Gesamtplatzierungen. Auch beim Design Event wurde Aerodynamik mit Negativpunkten bewertet. Meist waren es kleinere Teams mit eingeschränkten Ressourcen und Problemen im Projektmanagement, die das Experiment wagten (Abb. 71)

Da sie nie an die Erfolge der traditionell konstruierten Fahrzeuge ankommen konnten, wurde der Irrglaube, Aerodynamik funktioniert in der Formula Student nicht,

zusätzlich verstärkt. Der Spruch „Wings don't work“ wurde nach und nach zu einem geflügelten Begriff.

Für das Jahr 2011 und folgende wurde das Reglement hinsichtlich der Aerodynamikregeln überarbeitet und entschärft. So wurden die erlaubten Dimensionen von aerodynamischen Bauteilen vergrößert. Flügel und Unterböden durften nun bis zu 762mm über die Vorderräder und 305mm über die Hinterräder hinausragen und die minimalen Radien wurden auf 1,5mm herabgesetzt. Außerdem wurde die vorgeschriebene Bodenfreiheit von 25mm aus dem Regelwerk gestrichen. Die Regel, nach der kein Teil des Fahrzeugs außer den Reifen unter keinen Umständen den Boden berühren darf, wurde jedoch beibehalten. Für die Saison 2013 wurde der Bauraum durch gewisse Abstände zu den Rädern ein wenig eingeschränkt (Abb. 72). So muss um ein Rad ein radialer Freiraum von ca. 70 mm freibleiben und die oberen 180° des Rades dürfen bis zu einer Höhe von 100mm über dem Reifen nicht zugebaut werden. [SAE13]

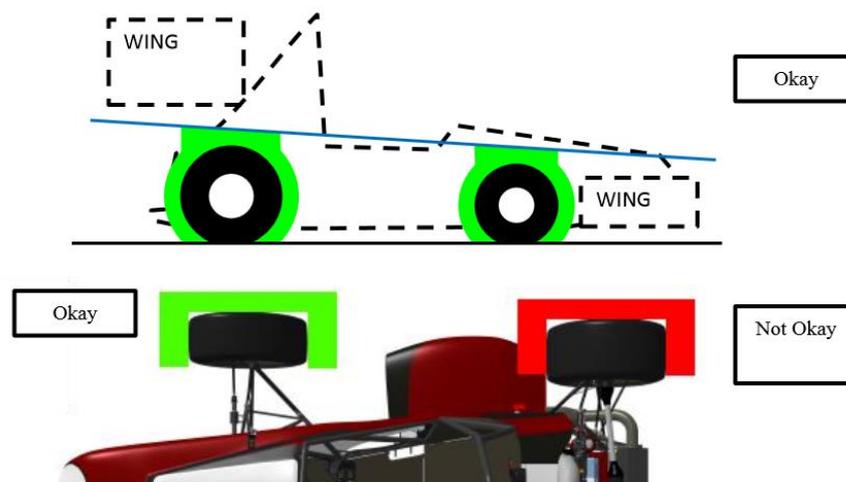


Abb. 72 Vom Reglement vorgeschriebene Freiräume für die Räder [SAE13]

Die Änderungen waren an sich gering, führten aber dazu, dass einige Teams ihre Konstruktionen aus einem anderen Blickwinkel betrachten und die neuen Möglichkeiten zumindest geprüft haben. [WAL13]

Im Laufe der nächsten Jahre haben viele Teams mit der Entwicklung von aerodynamischen Komponenten begonnen. Dabei haben sich einige Tendenzen gezeigt: die meisten Teams, die auf Aerodynamik gesetzt haben, haben zunächst einen Unterboden mit Venturi Tunneln und Diffusoren gebaut, ohne bedeutend schneller zu werden. Tabelle 6 zeigt die steigende Anzahl der Teams beim Event in Deutschland mit Aerodynamik.

Als Beispiel sei hier das Formula Student Team der HAW Hamburg genannt: 2011 wurde ein Unterboden entwickelt, der bei Messfahrten den Auftrieb von 50N bei 72 km/h an der Hinterachse um ca. 100 N herabsetzte und somit 50N Abtrieb brachte. Bei dynamischen Vergleichsfahrten konnte aber kein Unterschied in der Rundenzeit oder Fahreigenschaften zum Fahrzeug ohne Unterboden festgestellt werden.

Für die darauf folgende Saison wurde ein vollständiges Aerodynamikpaket mit Front- und Heckflügel entwickelt, das sehr große Auswirkungen auf die Leistungsfähigkeit hatte, so stieg die Querbesehleunigung beim HAWKS Racing Team von 1,6g auf 2,3g. [WAL13]

Für die dritte Generation haben die Teams diese Entwicklungsstufe beibehalten, Änderungen gab es hauptsächlich bei der Flügelgröße. Eine Leistungssteigerung war zwischen der ersten und zweiten Aerogeneration allerdings kaum vorhanden, wie Tabelle 7 zeigt.

Tabelle 6: Auswertung der Teams, die 2010 bis 2013 Aerodynamik beim Event in Deutschland eingesetzt haben, mit Unterteilung nach Art der aerodynamischen Bauteile und in Prozent der Anzahl aller teilnehmenden Teams [FSG13]

	Ohne Aero	%	Unterboden	%	Flügel	%	Komplett	%	Fahrzeuge Gesamt	% Aero
2010	85	94,4	4	4,4	0	0	1	1,1	90	5,6
2011	94	91,3	8	7,8	0	0	1	1,0	103	8,7
2012	81	74,3	15	13,8	3	2,8	10	9,2	109	25,7
2013	56	50,9	19	17,3	11	10	29	26,4	110	49,1

Tabelle 7: Auswertung der Entwicklung der Rundenzeit beim Autocross des Events in Deutschland von 2012 zu 2013 anhand einiger Top Teams mit Verweis auf die Änderungen ihrer Aerokonfiguration [FSG13]

	2012	2013	Diff	Kommentar
OSU	76,918	76,908	-0,01	Weiterentwicklung
HAWKS	78,141	79,207	1,066	Weiterentwicklung
Esslingen	77,861	82,076	4,215	Weiterentwicklung
KIT	80,734	77,457	-3,277	Weiterentwicklung
Chalmers	80,118	78,881	-1,237	Weiterentwicklung
TU München	79,527	77,456	-2,071	Neuentwicklung
Stuttgart	79,127	79,127	0	Neuentwicklung

Erläuterungen der Kürzel für die Teams:

OSU:	Global Formula Racing Team, Oregon State University, USA
HAWKS:	HAWKS Racing e.V., HAW Hamburg, DE
Esslingen:	Rennstall Esslingen, Hochschule Esslingen, DE
KIT:	KA Racing Team, Technische Universität Karlsruhe, DE
Chalmers:	Chalmers FSAE Team, Chalmers University of Technology, SE
Stuttgart:	Rennteam Stuttgart, Universität Stuttgart, DE

Ein Vergleich der Aerodynamik zwischen den Jahren ist zwar nur bedingt möglich, da die Teams viele andere Parameter des Fahrzeugs ändern und es lässt sich nicht genau sagen, was davon ein Fahrzeug schneller und was langsamer gemacht hat. Zudem sind die Rundenzeiten auch abhängig vom Streckenzustand, Fahrer, Fahrzeugabstimmung und möglichen technischen Problemen, die bei diesen Prototypen häufig auftreten. Leistungssteigerungen wie die zwischen Fahrzeugen ohne Aerodynamik und der ersten Aerogeneration wären aber so signifikant, dass man sie erkennen würde, wie das Beispiel TU München zeigt.

Eine weitere Auffälligkeit betrifft die Konvergenz der Konstruktionen vieler Teams, es lässt sich erkennen, dass erfolgreiche aerodynamische Konzepte aus der Vorsaison von anderen Teams übernommen werden. Abbildungen 73 und 74 zeigen

zwei sehr ähnliche Aerodynamikpakete an zwei verschiedenen Fahrzeugen aus unterschiedlichen Jahren.



Abb. 73 Erstes Aerodynamikpaket des Global Formula Racing Teams 2011 [FSG13]



Abb. 74 Sehr ähnliches erstes Aerodynamikpaket des AMZ Racing Teams 2012 [FSG13]

Als Randnotiz sei angemerkt, dass das AMZ Racing Team angekündigt hat, den in Abbildung 80 dargestellten Unterboden des 2013er Fahrzeugs des Global Formula Racing Teams für ihr 2014er Fahrzeug zu adaptieren. Gleichzeitig verwendet das DART Racing Team der TU Darmstadt 2014 einen Unterboden, der dem 2013er Unterboden des AMZ Racing Teams zum Verwechseln ähnlich sieht...

Das hat dazu geführt, dass die Aerofahrzeuge sich sehr ähnlich sehen, sowohl innerhalb eines Teams als auch innerhalb des Feldes. Unterschiede gibt es hauptsächlich bei der Anzahl der Profile und dem Design der Endplatten.

Die Gründe für diese Stagnation in der Entwicklung sind die knappe Zeit und das geringe Ausgangswissen, mit dem die Teams in jeder Saison konfrontiert werden. Die Konstruktionsphase dauert in der Regel vier Monate. In dieser Zeit muss sich ein Aerokonstrukteur, der als junger Student in der Regel keine Erfahrung mit Aerodynamik, Simulation und Auswirkungen der Aerodynamik auf die Fahrdynamik hat, sich in die Theorie einarbeiten, den Umgang mit einer Simulationssoftware erlernen, die Konstruktion abschließen und die Fertigung vorbereiten. Da es kaum Literatur für den konkreten Anwendungsfall Formula Student, weder zum Thema Theorie noch zur Simulation gibt, bleibt einfach wenig Zeit, um Konzepte und Ideen zu vergleichen und zu validieren. Als Wissensquelle wird einschlägige Lite-

ratur zur allgemeinen Fahrzeugaerodynamik, zur Aerodynamik von Rennfahrzeugen wie Formel Eins oder Sportwagen und zur allgemeinen Strömungssimulation herangezogen. Deutschsprachige Literatur ist so gut wie gar nicht vorhanden, was bei mangelnden Englischkenntnissen eine zusätzlich Hürde darstellt. Der Aufbau dieses Basiswissens benötigt so viel Zeit, dass für die eigentlichen Entwicklungsaufgaben zu wenig davon übrig bleibt. Da dieses Wissen zudem stark von den in den Medien verbreiteten höchsten Rennsportklassen geprägt ist, ähneln die Konstruktionen oft diesen Rennsportklassen, ohne dass Formula Student spezifische Eigenheiten berücksichtigt werden.

Da der Leistungsdruck dennoch hoch ist, schließlich soll das eigene Team einen Vorteil, zumindest aber keinen Nachteil gegenüber den Konkurrenten haben, wird das nachgebaut, was seine Vorzüge bereits beweisen konnte, ob in anderen Formula Student Teams oder sonstigen Rennserien.

7 Unterschiede zu professionellen Rennserien

Viele Teams lassen sich bei der Konstruktion ihrer Aerodynamikpakete von Rennserien wie der Formel Eins inspirieren ohne zu hinterfragen, warum die Fahrzeuge dieser Rennserie aussehen wie sie aussehen. Mangelnde Erfahrung und Wissen auf dem Bereich der Aerodynamik und die Darstellung der hohen Klassen im Motorsport als die technisch und besonders aerodynamisch am weitesten entwickelten Rennfahrzeuge in den Medien sind die Gründe dafür. In den folgenden Kapiteln sollen diese Unterschiede erläutert werden und mittels Strömungssimulation überprüft werden.

7.1 Geschwindigkeit

Die Formula Student unterscheidet sich auf vielfältige Weise von Rennserien wie der Formel Eins. So liegt die Durchschnittsgeschwindigkeit mit ca. 60 km/h deutlich unter den 200 km/h, die in der Formel Eins üblich sind. [MOT14] Das hat große Auswirkungen auf die Aerodynamik. So ist die langsame Luft deutlich ärmer an kinetischer Energie, wodurch geringere Reynoldszahlen resultieren. Das hat Auswirkungen z.B. bei der Profilgestaltung, die stark gekrümmten Profile der Formel Eins Flügel wären in der Formula Student ineffektiv, da sie Ablösungen verursachen würden: Bei hohen Geschwindigkeiten ist die Grenzschicht stark turbulent, bei geringen Geschwindigkeiten ist diese teilweise laminar und dadurch weniger richtungsstabil.

Vortexgeneratoren sind ebenfalls deutlich weniger wirkungsvoll, bei den geringen Geschwindigkeiten lassen sich nur große und kurze Wirbel mit wenig Energie realisieren, die z.B. zur Abschirmung des Unterbodens kaum beitragen können.

Durch die geringe Geschwindigkeit spielt auch der Widerstand in der Formula Student eine untergeordnete Rolle. Es ist ausreichend Motorleistung vorhanden um auf den kurzen Geraden trotz hohem Widerstand keinen Nachteil zu erleiden. Durch den Abtrieb kann ein Formula Student Fahrzeug schneller durch eine Kurve fahren und diese Geschwindigkeit auf die Gerade mitnehmen. Die Beschleunigung

im schlupfbegrenzten Bereich am Kurvenausgang ist stärker durch die höhere Bodenhaftung. Auf der Geraden ist die Beschleunigung auf Grund des erhöhten Widerstands zwar geringer als bei einem Fahrzeug ohne aerodynamische Hilfsmittel, kann aber über eine längere Strecke erfolgen, da durch die erhöhte Bodenhaftung ein stärkeres und somit späteres Abbremsen möglich ist. Diese Vorteile führen häufig dazu, dass ein Formula Student Fahrzeug mit Flügeln eine höhere Geschwindigkeit auf der Geraden erreicht, als eines ohne Flügel.

Dass solche Untersuchungen nicht gemacht werden und die Teams ihre Konstruktion an die Formel Eins anlehnen, zeigen die Entwicklungen von verstellbaren Flügeln, die auf den Geraden flacher gestellt werden um den Luftwiderstand zu reduzieren (Abb. 75 und 76). Dieses Hilfsmittel ist in der Formel Eins vorgeschrieben, es dient der Erhöhung der Geschwindigkeit und soll mehr Überholvorgänge und somit ein spannenderes Renngeschehen für die Zuschauer ermöglichen. [FIA13] Aus diesem Grund darf nur das hinterher fahrende Fahrzeug dieses DRS (Drag Reduction System) benutzen.



Abb. 75 Mit DRS geöffneter Heckflügel eines Red Bull Formel Eins Fahrzeugs [WIK11]



Abb. 76 DRS am Heckflügel des Monash Motorsports Teams der Monash University in Melbourne, AUS [MON14]

In der Formula Student gibt es keine Überholvorgänge, die Geraden sind kurz, die Geschwindigkeiten und somit der Widerstand gering und die Motorleistung ausreichend, die Auswirkungen auf die Rundenzeit sind also minimal und der Entwicklungsaufwand eines solch komplizierten Systems nicht lohnenswert.

7.2 Fahrzeuggröße

Bedingt durch die engen Stecken sind Formula Student Fahrzeuge sehr kompakt gebaut und somit deutlich kleiner als z.B. Formel Eins Boliden; wie Abbildung 77 anschaulich demonstriert.



Abb. 77 Größenvergleich zwischen einem Williams Formel Eins Fahrzeugs und dem Formula Student Fahrzeug der University of Bath, UK [BAT14]

Aerodynamisch gesehen ergeben sich dadurch einige Nachteile. Da die Größe geringer ist, ist auch die für die Abtriebserzeugung zur Verfügung stehende Fläche geringer. Als Beispiel kann hier die Vorliebe der Formula Student Teams für Unterböden mit Bodeneffekt herangesogen werden (Vergleich 4.3.2 und 6.2). Diese gelten als das wirksamste Konzept zur Erzeugung von sehr viel Abtrieb bei kaum mehr Widerstand. Die allgemeine Meinung lautet, dass der Abtrieb in der Formel Eins dieser Ära so hoch gewesen ist, dass die Fahrzeuge ohne Flügel auskamen (Abb. 78).



Abb. 78 Lotus Formel Eins Fahrzeug mit Venturi Tunneln und ohne Frontflügel [FOR14]

Tatsächlich waren die Reifen der Grund für den Verzicht auf die Flügel, da diese bereits durch den Abtrieb des Unterbodens über ihr Limit hinaus belastet waren und durch die hohe Querbelastung teilweise sogar von den Felgen sprangen. Zusätzlicher Abtrieb von Flügeln wäre nicht in schnellere Rundenzeiten umsetzbar gewesen und hätte nur zusätzlichen Widerstand verursacht.

Diese Annahmen und die Tatsache, dass dieses Konzept verboten wurde, weil es zu schnell war, lässt viele Teams glauben, dass es sich für die Formula Student genauso eignet wie für die Formel Eins (Abb. 79 und 80).



Abb. 79 Flache, schmale Venturi Tunnel am Formula Student Fahrzeug der FH Aachen, DE [FSG13]



Abb. 80 Flügelseitenkästen am Elektrofahrzeug des Global Formula Racing Teams. Bei diesem Elektrofahrzeug entfallen Kühler und Abgaskrümmen in den Seitenkästen. [FSG13]

Dabei kann ein einfaches Rechenbeispiel belegen, dass dem nicht so ist:

Der oben abgebildete Lotus 79 erreichte einen Abtrieb von ca. 10kN bei einer Geschwindigkeit von 200km/h. Die Fläche der Tunnel bzw. der Flügel-Seitenkästen betrug $1,77 \text{ m}^2$. Damit ergibt sich nach Einsetzen der Werte in Gleichung 2 und Umstellung ein Abtriebsbeiwert von 2,98. [PAU12]

Ein Formula Student Fahrzeug hat eine nutzbare Fläche von ca. $0,5 \text{ m}^2$, da das Chassis ähnlich breit ist wie das des Lotus, Länge und Breite des Fahrzeugs dagegen deutlich geringer sind. Die Geschwindigkeit von 60km/h ist ebenfalls deutlich geringer als die Durchschnittsgeschwindigkeit der Formel Eins.

Setzt man diese Werte in Gleichung 2 ein, erhält man eine mögliche Abtriebskraft von lediglich 254,5N. Der Abtriebsbeiwert des Lotus 79 ist allerdings nicht auf die Formula Student übertragbar, da hier die auf dem Boden schleifenden Schürzen verboten sind. Somit würde der Abtriebsbeiwert bei etwa 2,3 liegen, was eine Abtriebskraft von 196,5N ergeben würde.

Da bei Testfahrten 100N Abtrieb sich nicht merkbar auf die Leistungsfähigkeit ausgewirkt haben, ist davon auszugehen, dass 200N wenn, dann nur einen geringen Vorteil bringen.

In den meisten Fällen ist eine Strömung oberhalb des Unterbodens, die vorteilhaft für den Abtrieb ist, nicht möglich, da das breite Chassis und die verhältnismäßig großen Seitenkästen diese unterbinden und die Effizienz des Unterbodens weiter verringern (vgl. Abb. 79).

Der Abtriebswert des Unterbodens wird zusätzlich verringert durch die Räder. Bei einem typischen Formula Student Fahrzeug beträgt der Radstand ca. 1650mm, die Spurweite 1200mm, Raddurchmesser 500mm und die Reifenbreite 200mm. Im Vergleich dazu beträgt der Radstand des Lotus 79 2748mm, die Spurweite 1748mm vorn und 1670mm hinten, der Raddurchmesser 520mm vorn und 640mm hinten, die Reifenbreite 320mm vorn und 500mm hinten. [FSG13] [PAU12]

Damit sind die Räder eines Formula Student Fahrzeugs im Verhältnis zum Chassis deutlich größer und stehen enger zusammen. Die Nachteile entstehen durch die Wirbel, die ein drehendes Rad produziert. Diese unterscheiden sich von einem stehenden Rad, was bei Nichtbeachtung zu fehlerhaften Ergebnissen bei Messungen oder Simulationen führen kann. [MCM06]

Abbildungen 81, 82 und 83 zeigen die entstehenden Wirbel und ihr Einflussgebiet.

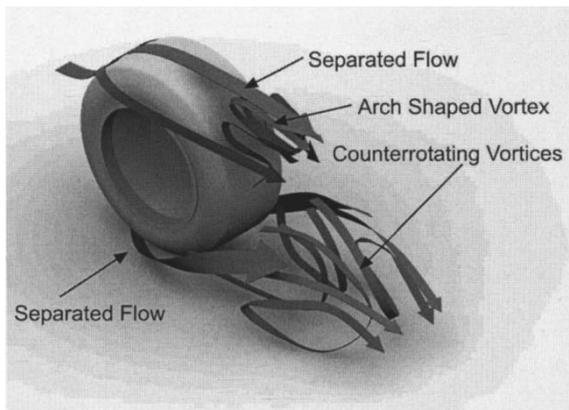


Abb. 81 Strömungen an einem einzelnen, drehenden Rad [MCM06]

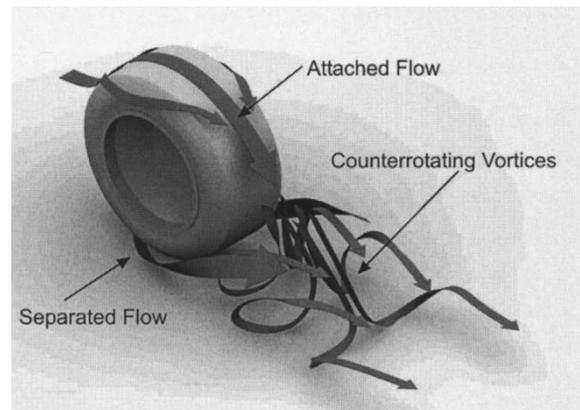


Abb. 82 Strömungen an einem einzelnen, stehenden Rad [MCM06]

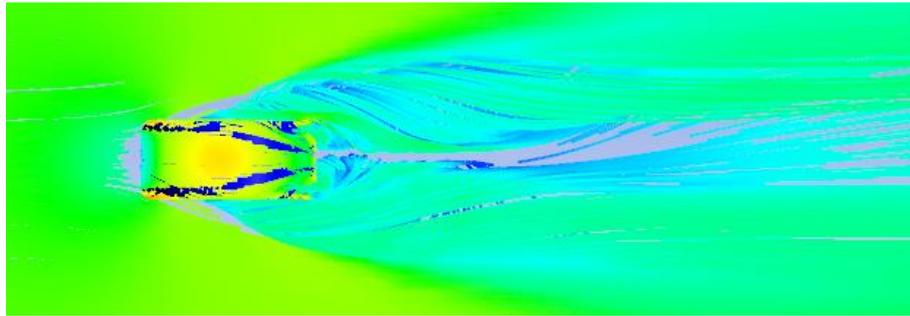


Abb. 83 Postprozessorresultat einer Strömungssimulation eines drehenden Rades. Dargestellt ist die Draufsicht, die Strömungsrichtung ist von links nach rechts. Es ist zu erkennen, wie nachhaltig das Rad die Strömung hinter sich stört

Diese Wirbel reichen weit hinter die Räder und beeinflussen die Strömung am Unterboden. Das vordere Rad stört dabei besonders die Strömung am Einlass des Unterbodens, das hintere Rad die Strömung entlang des Unterbodens im hinteren Bereich.

Somit ist die erfolgreiche Implementierung eines Unterbodens zum Zweck der Abtriebsgewinnung kaum umzusetzen und erschwert zusätzlich das Package von Kühler und Abgaskrümmern, die meistens in den Seitenkästen untergebracht sind, und der Fahrwerkskomponenten.

Ein Unterboden kann aber durch seine glatte Unterseite den Widerstand deutlich verringern. Werden Tunnel und Diffusoren, die das sonstige Package nicht beeinflussen, implementiert, kann das den Auftrieb des Chassis reduzieren und sollte in Betracht gezogen werden.

7.3 Reglement

Die technischen Bestimmungen der Formula Student unterscheiden sich grundlegend von den Regularien in den höchsten Klassen des Motorsports. Bis auf Begrenzungen des Bauraums, des Verbotes von Bodenberührung und des Verbotes von aktiven Absaugungen der Luft unterhalb des Fahrzeugs ist in der Formula Student aerodynamisch gesehen alles erlaubt. Trotzdem sehen die meisten Fahr-

zeuge den Formel Boliden aus professionellen Motorsportklassen ähnlich, sie verfügen über einen Frontflügel, einen Heckflügel und einen Unterboden. Dass dieses Layout in den professionellen Klassen vorgeschrieben ist, wird außer Acht gelassen. So sind in der Formel Eins genaue Bestimmungen für Dimensionen und Anzahl der Flügel und deren Elemente gegeben. Auch die Unterböden dürfen auf nur sehr kleiner Fläche von einer ebenen Platte abweichen. [FIA13]

Diese Regularien wurden seit der Ära der Flügelautos immer strenger formuliert um die Geschwindigkeiten der Fahrzeuge zu senken. Dadurch sind aerodynamisch gesehen sehr ineffektive Fahrzeuge entstanden, die durch hohen technischen Aufwand versuchen, aus den sehr begrenzten Ausgangsbedingungen des Reglements möglichst viel Leistung herauszuholen. Nahezu alle Formel Klassen neben der Formel Eins werden mit Einheitsfahrzeugen bestritten, bei denen die Fahrzeugentwicklung nur wenig auf maximale Leistungsfähigkeit und dafür mehr auf Kosteneffizienz abzielt.

Trotz des offensichtlich schlechten Vorbilds Formel Eins beginnt die Entwicklung der Formula Student Fahrzeuge in diese Richtung zu gehen. So sind bei den Fahrzeugen der dritten Generation neben der Konzentration auf Unterböden komplizierte Seitenplattendesigns zu finden (Abb. 84 und 85).

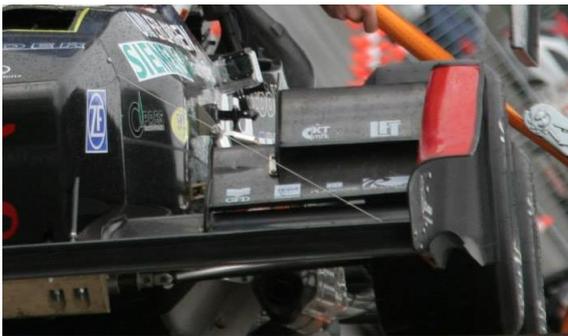


Abb. 84 Komplexe Seitenplatten des Frontflügels am Fahrzeug der Universität Erlangen, DE [FSG13]

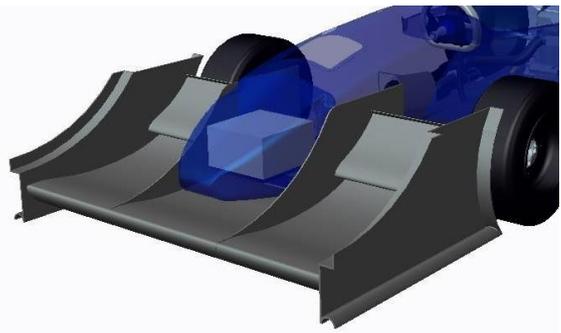


Abb. 85 Komplexe Seitenplatten auch am Fahrzeug der University of Auckland, AUS [AUC14]

Die Formel Eins verfügt über sehr komplexe Frontflügel- und Seitenplattenkonstruktionen (vgl. Abb. 86). Da das Reglement den Abtrieb stark limitiert, wird versucht, mit verschiedenen Leitelementen und Vortexgeneratoren die Strömung um das Fahrzeug selbst möglichst widerstandsarm und gerichtet zu gestalten, um aus den noch vorhandenen Möglichkeiten das meiste an Abtrieb zu gewinnen.

Dass diese Komplexität nur sehr geringen Einfluss auf die Gesamtleistungsfähigkeit des Fahrzeugs hat, lässt sich sehr anschaulich am Beispiel des Großen Preises von China 2013 verdeutlichen.

Zu Beginn des Rennens kollidierte der Lotus des Fahrers Kimi Räikkönen mit einem anderen Fahrzeug, so dass die komplexen Bauteile seines Frontflügels abfielen (vgl. Abb. 87). Übrig blieb ein fast klassischer, dreiteiliger Frontflügel. [RCE13]



Abb. 86 Komplexer Frontflügel des Lotus Renault Formel Eins Fahrzeugs von 2013 [RCE13]



Abb. 87 Beschädigter Frontflügel des Lotus Renault Formel Eins Fahrzeugs beim Großen Preis von China 2013 [RCE13]

Der Flügel wurde nicht getauscht und der Fahrer konnte weiterhin Rundenzeiten auf dem Niveau von vor der Kollision fahren. Da ein kleines Teil dieser Konstruktion die Bremsbelüftung verstopfte, fiel er gegen Rennende durch Bremsprobleme auf den 8. Rang zurück.

Hier kann man deutlich sehen, dass der betriebene Entwicklungs- und Fertigungsaufwand nur einen sehr kleinen Benefit bringt. Für die Formel Eins mag es lohnenswert sein, da hier die Unterschiede bei der Rundenzeit zwischen den Fahrzeugen sehr gering sind. So liegen ca. 0,03 Sekunden pro Kilometer zwischen zwei aufeinanderfolgenden Fahrzeugen. [MOT14] Der Wert für die Formula Stu-

dent liegt bei ca. 0,6 Sekunden pro Kilometer. Bei den langsamen Geschwindigkeiten der Formula Student würde solche Entwicklungen zudem weniger wirkungsvoll ausfallen. Eine Verbesserung um wenige Tausendstelsekunden würde nichts an der Position im Klassement ändern. Da der Flügel nicht breiter sein darf als die breitere Achse, verkleinern solche Konstruktionen die wirksame Fläche des Flügels und somit seine Abtriebskraft und wirken sich dadurch sogar negativ auf die Performance aus.

Ein weiterer Unterschied zu professionellen Rennserien ist die Notwendigkeit, die Konstruktion im Engineering Design Event Juroren vorzustellen und von diesen bewerten zu lassen. Da diese Juroren gerade beim Thema Aerodynamik ebenfalls nur die Kenntnisse aus der einschlägigen Literatur beherrschen, bewerten sie Konstruktionen, die von der Norm abweichen, mit weniger Punkten. Einige Teams haben für die Formula Student außergewöhnliche Designs vorgestellt (vgl. Abb. 88), doch die Offiziellen bewerteten diese schlecht oder erklärten sie für illegal. Das ist möglich, da im Gegensatz zu den genauen und harten Regeln im professionellen Motorsport in den Formula Student Regularien festgehalten ist, dass ein Regelverstoß vorliegt, wenn die Absicht einer Regel verletzt ist. Die Offiziellen vor Ort können daher die Regeln anders interpretieren als das Team es getan hat.



Abb. 88 Innovative, aber als illegal deklarierte Radblenden vor den Vorderrädern am Fahrzeug der University of Western Australia, AUS [UWA13]



Abb. 89 Typisches und Aussehen eines Formula Student Fahrzeugs mit Aeropacket am Beispiel der University of Alberta, USA [FSG13]

Dadurch werden die Teams zusätzlich verunsichert und die Konstruktionen bleiben auf einem Niveau.

Ein besseres Vorbild bzw. Inspirationsquelle stellen die Amateurklassen der Berg- und Slalommeisterschaften dar (Abb. 90 bis 93). Hier gibt es einige Klassen, in denen neben sicherheitsrelevanten Vorgaben kaum Beschränkungen existieren. Rhys Millen²⁰, ein Fahrer beim Pike`s Peak Hillclimb²¹ hat das treffend formuliert: „There are no rules, bring what you can!“ Entsprechend radikal sind die Fahrzeuge konstruiert.

Diese Veranstaltungen haben deutlich mehr mit der Formula Student gemeinsam, da hier auf engen, kurvigen und kurzen Streckenabschnitten von bis zu 20 km ohne weitere Fahrzeuge auf der Strecke gefahren wird. Widerstand spielt keine Rolle, da die Geschwindigkeiten durch die kurvigen Strecken gering und die Motorleistung mehr als ausreichend ist.

Die hier antretenden Fahrzeuge sind von Amateuren entwickelt, was viele studentische Teammitglieder für nicht professionell genug halten, um sie als Denkanstöße für die eigenen Entwicklungen anzusehen. Außerdem finden einige dieser Veranstaltungen auf losem Untergrund statt und sind zudem kaum in den Medien vertreten, sodass ihre Relevanz nicht wahrgenommen wird.

²⁰ US-amerikanischer Rennfahrer und bis 2013 Rekordhalter beim Pike`s Peak Hillclimb

²¹ Bergrennveranstaltung im US-amerikanischen Bundesstaat Colorado. Es gilt als das anspruchsvollste.



Abb. 90 Auf maximalen Abtrieb ausgelegter Mitsubishi Lancer. Man beachte den hochangebrachten Frontflügel [IMP14]



Abb. 91 Ein Honda NSX umgebaut für den Einsatz beim Pike's Peak Hillclimb. Die Größe und Anzahl der Flügel und Diffusoren ist enorm. [FUE12]



Abb. 92 Suzuki Escudo, ebenfalls ein Fahrzeug für das Pike's Peak Hillclimb mit extremer Aerodynamik [CON14]



Abb. 93 A-Mod Fahrzeug für die Solo Nationals der SCCA, eine Rennveranstaltung für Amateure auf engen, mit Pylonen abgesteckten Kursen. Neben den großen Flügeln verfügt dieses Fahrzeug über Venturi Tunnel und flexible Schürzen [F1T14] SCCA steht für Sports Car Club of America und ist Veranstalter diverser Amateurrennveranstaltungen.

8 Entwicklung Simulationsprozedur

Um die vielen Möglichkeiten, die sich bei der Entwicklung eines Aeropackets für die Formula Student bieten, innerhalb des zu Verfügung stehenden Zeitrahmens gegeneinander abwägen zu können, bedarf es einer Validierungsprozedur, die schnell und zuverlässig Ergebnisse liefert. Im Folgenden wird die Entwicklung einer solchen Prozedur beschrieben. Dabei soll die Berechnungsdauer möglichst kurz sein und die Abweichungen für den Abtrieb bei 5% und für den Widerstand bei 10% gegenüber Versuchsergebnissen liegen. Dadurch lassen sich viele verschiedene Konzepte und mögliche Änderungen innerhalb kurzer Zeit überprüfen und vergleichen. Auch die Erstellung einer Aero Map²², bei der die aerodynamischen Größen in Abhängigkeit verschiedener Werte von Parametern wie Bodenfreiheit, Wank-, Nick- und Schwimmwinkeln etc. kann mit geringem Zeitaufwand erfolgen.

Die im Folgenden vorgestellte Vorgehensweise und Einstellungen erreichen die Abweichungsziele und liefern Ergebnisse, die sehr gut miteinander verglichen werden können. Die Berechnungszeiten lagen dabei zwischen ca. 30 min für einzelne Bauteile wie Flügel oder Räder und ca. 200 min für ein komplettes Fahrzeug bei einer Rechenleistung von vier Prozessorkernen mit 2,6 GHz und einem Arbeitsspeicher von 4 GB. Mit einem Leistungsstärkeren Rechner können die Berechnungszeiten deutlich gesenkt oder falls gewünscht, die Genauigkeit gesteigert werden.

Eine detaillierte Anleitung zu den verwendeten Parametern und Einstellungen des Programms befindet sich im Anhang A dieser Arbeit.

²² Eine Aero Map wird zur Rundenzeitensimulation benötigt. Hier wird das Zusammenwirken von Fahrwerk, Reifen, Antrieb und Aerodynamik simuliert, um Rundenzeiten vorhersagen zu können und Änderungen der Konstruktion oder Einstellungen zu überprüfen.

8.1 Auswahl Software

Die Strömungssimulation eignet sich am besten zur Überprüfung von verschiedenen Konstruktionen auf ihre Funktionalität. Der Bau von Modellen für Windkanalversuche oder Prototypen für die Teststrecke ist zu ressourcenaufwändig für ein Formula Student Team. Außerdem ist die Verfügbarkeit eines Windkanals oder einer Teststrecke stark eingeschränkt.

Es gibt viele verschiedene Simulationsprogramme von verschiedenen Herstellern. Das Hauptauswahlkriterium für diese Arbeit war die Verfügbarkeit eines zur dreidimensionalen Simulation fähigen Programms. Weitere Kriterien waren das Vorhandensein von Vernetzter und Prä- und Postprozessor, Stabilität des Solvers, niedrige Anforderungen an Rechenleistung, kurze Rechenzeit, Anwenderfreundlichkeit und Begleitliteratur zum schnellen Erlernen des Umgangs mit dem Programm.

Die Software ANSYS CFX passt am besten zu diesen Kriterien. Dabei handelt es sich um einen kommerziellen Code der Firma ANSYS Inc. der Bestandteil des Softwarepackets ANSYS Workbench ist. Innerhalb der ANSYS Workbench sind alle Elemente zur Durchführung einer Simulation vorhanden und mit einander verknüpft.

Es beinhaltet den Design Modeller, ein Programm zur Erstellung und Aufbereitung der Geometrie, den Mesher zum Erstellen des Berechnungsgitters, den CFX Präprozessor zum Definieren der Randbedingungen, den CFX Solver zur Berechnung und den CFX Postprozessor zur Analyse und Visualisierung der Ergebnisse. Das Programm ist das am häufigsten eingesetzte Tool zur Strömungssimulation im Fahrzeugbereich. Es gilt als sehr stabil, das bedeutet, es ist wenig empfindlich gegenüber imperfekten Eingangswerten wie zu feinen Netzen. Außerdem gilt es als ressourcenschonend und da es vielfältig verwendet wird, existiert umfangreiche Literatur zur Handhabung des Programms. Durch die sehr intuitive Benutzeroberfläche ist es auch für Anfänger schnell beherrschbar. ANSYS Workbench und CFX ist zudem in den Laborräumen des Rechenzentrums Berliner Tor der HAW Hamburg vorhanden und ist bis in die späten Abendstunden und auch samstags

für Studenten der HAW Hamburg zugänglich. Ein sehr wichtiges Kriterium, da die Formula Student ein freiwilliges Projekt ist, das die Teilnehmer neben dem Studium betreiben.

8.2 Geometrie

Die Geometrie sollte in einem CAD Programm wie CATIA V5 erstellt und aufbereitet werden, da der Design Modeller ein sehr einfaches Programm darstellt und die Bedienung für erfahrene CATIA V5 Nutzer gewöhnungsbedürftig ist.

Da hier die Außenumströmung des Gesamtfahrzeugs zu untersuchen ist, sollten kleinere Details, die keinen oder einen geringen Einfluss auf die Strömung haben, zugunsten einer kürzeren Berechnungsdauer entfernt werden. Außerdem sollten Öffnungen wie z.B. Fugen und andere irrelevante Öffnungen geschlossen werden. Flächenhafte Konstruktionen wie die der Verkleidung sollten auf mindestens 5mm aufgedickt werden. Räder sollten als Zylinder ausgeführt sein, da nur deren Einfluss auf die Gesamtumströmung von Bedeutung ist. Eine Besonderheit gilt es bei der Gestaltung der Innenräume der Seitenkästen zu beachten. Hier sind meistens der Kühler und der Abgaskrümmen untergebracht. Da beides sehr komplexe Gebilde sind, deren Einfluss für die Gesamtaerodynamik jedoch nur einen verminderten Durchfluss durch die Seitenkästen und zusätzliche Verwirbelungen durch ihre Geometrie bedeutet, müssen diese nicht ausdetailliert werden. Es hat sich gezeigt, dass eine Schottwand im Seitenkasten mit einer runden Öffnung von 100mm Durchmesser ausreichend ist, um den aerodynamischen Einfluss von Kühler und Abgasanlage abzubilden. In einschlägiger Literatur wird empfohlen, Kühler durch ein poröses Medium nachzubilden, dem ein Druckverlustbeiwert zugeordnet wird. Dieser vermindert zwar den Druck der durch den Kühler strömenden Luft, ändert aber nichts an Richtung und Turbulenzgrad der Strömung. Diese Approximation ist für Serienfahrzeuge zulässig, in der Formula Student beeinflusst die Strömung hinter dem Kühler bzw. Seitenkasten aber in hohem Maße die Anströmung des Unterbodens und eventuell des Heckflügels. Setzt man dieses poröse Medium ein, so können deutlich bessere Ergebnisse für den Unterboden und

Heckflügel herauskommen als dies wirklich der Fall ist. Abbildung 94 zeigt den Vergleich zwischen der Ausgangsgeometrie und der für die Simulation aufbereiteten Geometrie. [LAN05]

Allgemein gilt für den Detaillierungsgrad der Grundsatz: Je detailreicher die Geometrie ist, umso genauer werden die Ergebnisse sein, und umso mehr Rechenleistung und Rechenzeit wird erforderlich sein, da das Netz feiner ist und somit mehr Elemente aufweist.

Das Modell sollte seinen Koordinatenursprung im Schwerpunkt haben, da sich die später errechneten Werte auf dieses Koordinatensystem beziehen. Alternativ können andere Koordinatensysteme definiert und die Werte bezüglich dieser ausgegeben werden.

Anschließend sollte das Modell als Volumenmodell im STP. Format abgespeichert werden. Diese STP. Datei kann im Design Modeller importiert werden.

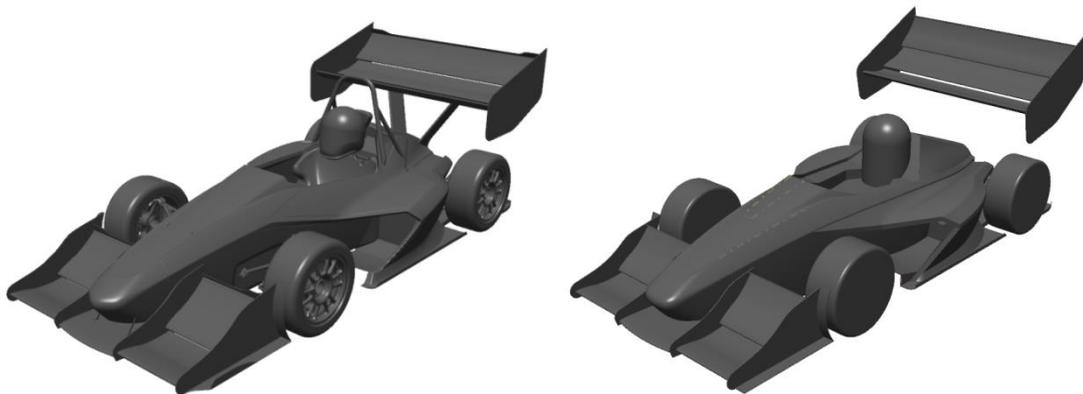


Abb. 94 Links: Originale, detailreiche Geometrie aus dem CAD, rechts: für die Simulation vereinfachte Geometrie

Für Fahrzeugumströmungen bietet sich die Verwendung eines quaderförmigen Windtunnels an, dessen Wände später mit Randbedingungen versehen werden. Dieser sollte in seinen Dimensionen deutlich größer sein als das zu Untersuchende Objekt, um die Ergebnisse nicht durch Interaktionen der Strömung mit den Wänden zu beeinflussen. Für die Größe eines Formula Student Fahrzeugs hat

sich folgende Windtunnelgröße als ausreichend gezeigt²³: vom Koordinatenursprung (Schwerpunkt des Fahrzeugs) 4m nach vorn, zu den Seiten und nach oben und 12m nach hinten. Die untere Fläche dieses Quaders stellt dabei die Fahrbahnoberfläche dar. Durch den langen Überhang hinten können die vom Fahrzeug gebildeten Wirbel sich komplett entfalten. Abbildung 95 zeigt den hier verwendeten Windtunnel. [COM12]

Ein größerer Windtunnel beinhaltet mehr Netzelemente und erhöht die Rechenressourcen ohne die Ergebnisse zu beeinflussen. Ein weiteres Mittel zur Reduzierung der Netzgröße ist die Verwendung einer Symmetrieebene entlang der Fahrzeuglängsachse. Dadurch lässt sich die Elementenanzahl halbieren. Bei einer Anströmung in Richtung der Längsachse und bei einer weitestgehend symmetrischen Geometrie ist dies zulässig und wird oft angewandt. Sollten Untersuchungen mit schräger Anströmung, wie bei der Simulation einer Kurvenfahrt, vorgenommen werden, so ist ein vollständiges Modell zu verwenden.

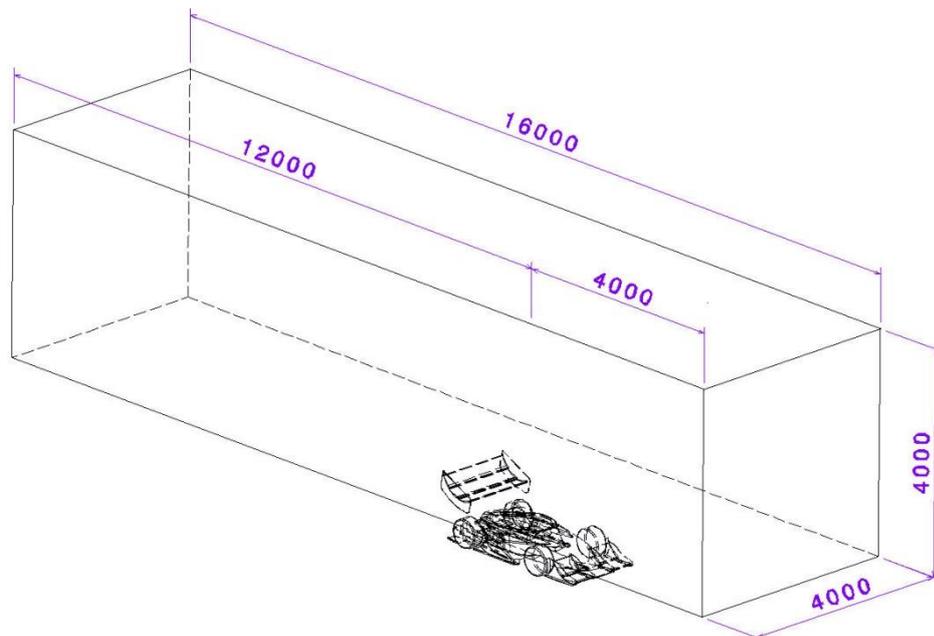


Abb. 95 Windtunnelabmaße für die Simulation

²³ Die Ermittlung der Größe erfolgte iterativ durch Variation der Dimensionen. Dabei wird die Größe solange verändert, bis die Ergebnisse der Berechnung nicht mehr von der Größe des Windtunnels abhängig sind.

Der Quader kann sehr komfortabel im Design Modeller erstellt werden. Die importierte Geometrie des Fahrzeugs wird mittels Boolescher Operationen vom Quader abgezogen, sodass nur das Luftvolumen des Windtunnels übrig bleibt.

8.3 Vernetzung

Bei der Vernetzung wird das eigentliche Berechnungsgitter anhand der zuvor definierten Geometrie erstellt. Als Elementtyp sollten Tetraeder Elemente gewählt werden, da diese eine deutlich einfachere Netzerstellung erlauben. Die Erstellung kann automatisch anhand von vordefinierten Werten erfolgen, was aber zu einem zu groben Netz und somit zu ungenauen Ergebnissen führt. Generell sollte das Netz in der Nähe der Fahrzeugoberfläche möglichst fein sein um auch kleine, von der Geometrie induzierte Einflüsse auf die Strömung abbilden zu können. In weiterer Entfernung können die Elemente größer werden ohne die Ergebnisse negativ zu beeinflussen. Eine Elementgröße an der Oberfläche des Fahrzeugs von 10mm, eine Wachstumsrate von 20% und die Maximalgröße für Elemente von 250mm haben sich als ausreichend fein gezeigt um die Ziele bei der Abweichung der Werte zu erreichen²⁴. Abbildung 96 zeigt das hier verwendete Netz.

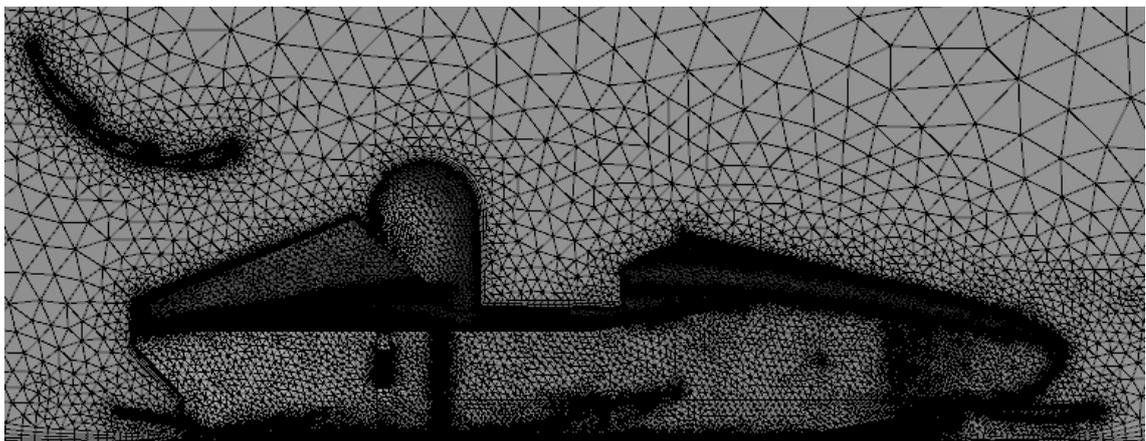


Abb. 96 Berechnungsgitter der Simulationsprozedur mit feiner Auflösung der Elemente an der Oberfläche der Geometrie und gröber werdendem Netz mit zunehmendem Abstand

²⁴ Die Netzeigenschaften wurden wie die Größe des Windtunnels iterativ bestimmt.

Zur besseren Abbildung der Grenzschicht werden Prismenelemente an der Oberfläche aller Wände eingesetzt (vgl. Abb. 97). Diese besitzen mehr Kontaktflächen und sind physikalisch gesehen weicher als die Tetraeder und erlauben daher genauere Berechnungen der in der Grenzschicht ablaufenden Vorgänge, benötigen aber deutlich mehr Rechenressourcen. Eine Anzahl von fünf Prismenschichten hat sich als ausreichend gezeigt. [LAN05] [STU08] [ANS11]

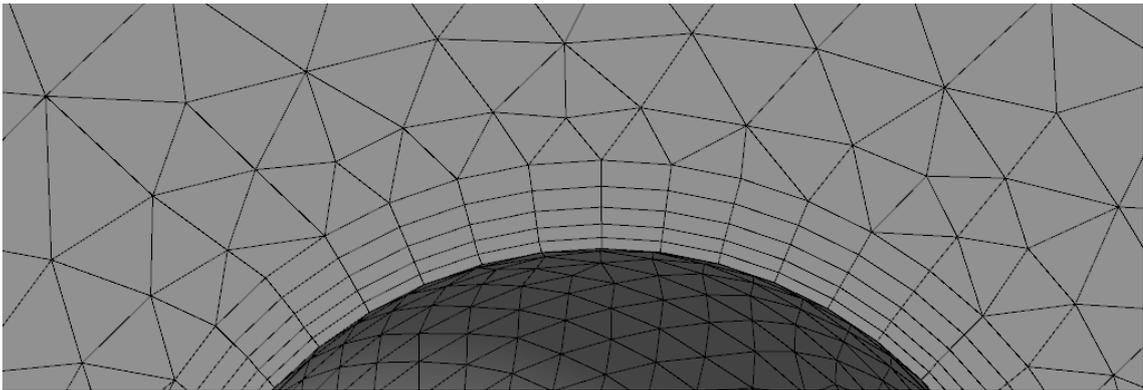


Abb. 97 Darstellung der Prismenschichten an der Oberfläche zur besseren Abbildung der Grenzschicht

Mit den oben aufgeführten Einstellungen lassen sich für den Anwendungsfall Formula Student Netzgrößen von 7 bis 10 Mio. Elementen realisieren, was ausreicht, um die gesetzten Ziele bei der Genauigkeit mit vergleichsweise kurzer Berechnungszeit zu erreichen.

8.4 Randbedingungen

Im Präprozessor wird zunächst die Art der Simulation festgelegt. Zur Untersuchung der aerodynamischen Eigenschaften eines Fahrzeugs ist eine vollausgebildete Strömung notwendig. Daher wird die Option für Steady State angewählt. Es ist auch möglich im Zeitbereich zu simulieren und die Entstehung und Ausbildung der Strömungsverhältnisse zu untersuchen. Für vergleichbare Resultate müssten dabei so viele Zeitschritte berechnet werden, dass die Strömung voll ausgebildet ist, was deutlich höhere Rechenressourcen und vor allem Zeit benötigen würde.

Als Material wird Luft als ideales Gas ausgewählt. Ideales Gas bedeutet, dass die Luft als inkompressibel betrachtet wird und ihre Dichte nur von der Temperatur abhängig ist. Luft kann als inkompressibel bis zu einer Machzahl von 0,3 betrachtet werden. Die Machzahl mit dem Wert 1 steht für die Schallgeschwindigkeit in einem Medium, sie ist von der Temperatur des Mediums abhängig. Für Luft bei 25° C beträgt die Schallgeschwindigkeit 346 m/s. Die Luft kann also bis Geschwindigkeiten von 104 m/s als inkompressibel betrachtet werden. Dabei zählt nicht die Anströmgeschwindigkeit, sondern die maximal auftretende Geschwindigkeit, wie sie durch Druckunterschiede unterhalb eines Flügels zustande kommen kann. Da die Höchstgeschwindigkeit von Formula Student Fahrzeugen bei 120 km/h bzw. 33,3 m/s liegt und im Rahmen dieser Arbeit keine Berechnungen bei einer höheren Geschwindigkeit durchgeführt werden, sind keine Geschwindigkeiten von mehr als 70 m/s zu erwarten und die Luft kann als inkompressibel betrachtet werden. Bei höheren Geschwindigkeiten entstehen Kompressibilitätseffekte, die einen hohen Widerstand verursachen. Dass sie z.B. bei Formel Eins Fahrzeugen, die bis zu 100 m/s und lokal noch höhere Geschwindigkeiten erreichen, beobachtet werden können, zeigt, dass auch hier mit inkompressibler Luft gerechnet wird (Abb. 98). [ANS11] [KAT06]



Abb. 98 Bei hohen Geschwindigkeiten auftretende, viskose Effekte, bei denen der Druck so niedrig ist, dass die Luftfeuchtigkeit sichtbar kondensiert. [PIS09] [SCA11]

Da ANSYS CFX die Reynolds-gemittelten-Navier-Stokes Gleichungen verwendet, muss der Berechnung ein Turbulenzmodell hinzugefügt werden. Hier wird das $k - \epsilon$ Modell (Vgl. 5.3.2.1) aufgrund seiner guten Eignung, Stabilität und der ausreichend hohen Genauigkeit der Ergebnisse ausgewählt. [ANS09] [COM12]

Randbedingungen für die Geometrie müssen ebenfalls festgelegt werden. Hier zeigt sich die sehr ausgereifte Bedienoberfläche von ANSYS CFX, da alle Einstellungen mit wenigen Mausklicks vorgenommen werden können.

Die vordere Fläche des Quaders wird als Einlass mit einer Strömungsgeschwindigkeit und niedrigem Turbulenzgrad deklariert. Da hier die freie Fahrt durch stehende Luft simuliert wird, muss die Strömung am Eingang als wenig turbulent angegeben werden. Sollen Windkanalversuche nachgebildet werden, bei denen die Strömung durch die drehenden Gebläse quasi-laminar ist, ist ein entsprechender anlagenspezifischer Turbulenzgrad anzugeben.

Der hinteren Fläche des Quaders wird der Auslass mit dem statischen Umgebungsdruck zugewiesen, dadurch wirkt sich der Auslass nicht auf die Strömung aus.

Die Seiten und die obere Fläche des Quaders werden als Symmetrieebenen deklariert. Eine Symmetrieebene bedeutet in diesem Zusammenhang, dass es eine Wand ohne Haftbedingung darstellt.

Der Untergrund wird häufig ebenfalls als Wand ohne Haftbedingung deklariert, da davon ausgegangen wird, dass die anströmende Luft und der Untergrund sich relativ zum Fahrzeug in die gleiche Richtung mit gleicher Geschwindigkeit bewegen und somit keine Reibung zwischen ihnen entsteht. Diese Annahme ist für Serien-PKW zulässig, da sie mit ihrer meistens großen Bodenfreiheit nur wenige Auswirkungen des Bodeneffekts erfahren. Da ein Formula Student Fahrzeug wie die meisten anderen Rennfahrzeuge eine geringe Bodenfreiheit aufweisen und ihre Form die Strömung zwischen Unterboden und Untergrund beeinflusst, ist dieses ressourcenschonende Vorgehen nicht zulässig. Die Strömung wird z.B. unterhalb des Frontflügels beschleunigt, was zu einer Relativgeschwindigkeit zum Boden und somit zu Reibungsverlusten führt. Ändert die Strömung ihre Richtung, z.B. bei der Umströmung eines Reifens, kommt es zu weiteren Interaktionen mit dem Boden. Diese Effekte würden ohne eine Haftbedingung nicht erfasst werden und die Ergebnisse wären fehlerhaft.

Stattdessen muss der Untergrund als reibungsbehaftete und sich bewegende Wand mit einer Geschwindigkeit entsprechend der Strömungsgeschwindigkeit modelliert und der höhere Rechenaufwand in Kauf genommen werden.

Der Fehler wird in der Formula Student häufig gerade von Teams, die zum ersten Mal Aerodynamik einsetzen, gemacht (vgl. Abb. 99). Neben der Unwissenheit der beschriebenen Vorgänge ist die Modellierung eines bewegten Unterbodens anders als in ANSYS CFX in vielen Simulationsprogrammen schwierig. Es wird daher darauf verzichtet, was Auswirkungen auf die Balance der Fahrzeuge hat. So ist der Bodeneffekt und somit der Abtrieb des Frontflügels deutlich stärker ausgeprägt, wenn die Reibung zwischen der beschleunigten Luft und dem Boden nicht beachtet wird. Die fehlende Balance wird durch unterschiedliche Einstellungen der Front- und Heckflügel ausgeglichen, was die Einstellmöglichkeiten und somit das Potenzial des Aeropackets deutlich einschränkt.



Abb. 99 Beispiel für die Unterschätzung der Wichtigkeit eines bewegten Bodens für eine Simulation. Das Chalmers FSAE Team musste in ihrem ersten Jahr mit Aerodynamik mit einem deutlich steiler angestellten Frontflügel im Vergleich zum Heckflügel fahren, um die Balance im fahrbaren Bereich zu halten [FSG13]

Das Fahrzeug und die Räder werden als Wände mit Haftbedingung deklariert. Den Rädern muss zusätzlich eine Rotationsbewegung zugeordnet werden, da wie unter 7.2 bereits beschrieben, die Strömungsverhältnisse um ein drehendes Rad andere sind als um ein stehendes. Die Zuordnung einer Drehbewegung ist in ANSYS CFX sehr ebenfalls einfach umzusetzen.

Als weiteren Schritt werden die Einstellungen für den Solver vorgenommen. Hier kann die Ordnung für die Berechnung eingestellt werden. Je höher die Ordnung, umso genauer sind die Ergebnisse und umso höher ist der Rechenaufwand. Für die gesteckten Genauigkeitsziele reicht aber die Berechnung 1. Ordnung aus. Weiterhin können Konvergenzkriterien für die Residuen festgelegt werden. Dabei hat sich ein Residuenziel in der Größenordnung von 10^{-4} sowie die Einstellung für gemittelte Residuen als ausreichend genau herausgestellt. Für höhere Genauigkeiten der Ergebnisse kann ein kleineres Residuenziel und die Einstellung für Maximale Residuen sowie eine Berechnung mit höherer Ordnung gewählt werden.

Auch die Anzahl der Iterationen kann hier begrenzt werden. Um brauchbare und vergleichbare Ergebnisse zu erhalten, muss die Berechnung das definierte Residuenziel erreichen.

Zuletzt können die Inhalte der Ausgabedatei bestimmt werden. Neben Kräften und Momenten können hier auch Statistiken über den Berechnungsablauf ausgegeben werden. [ANS09]

8.5 Solver

Mit den definierten Randbedingungen kann nun der Solver und somit die eigentliche Berechnung beginnen. Der CFX Solver basiert auf der Finite-Volumen-Methode mit einem gekoppelten Multigrid-Solver, der ohne weitere Betreuung durch den Anwender arbeitet. Der Multigrid-Solver ermöglicht eine simultane Lösung des Gleichungssystems, und somit eine deutliche Rechenzeitverkürzung. Außerdem ist der Solver parallelisierbar, das bedeutet, dass das Berechnungsmodell in mehrere Teile zerlegt und auf mehreren Prozessorkernen gleichzeitig berechnet werden kann. Durch die Ausnutzung der vorhandenen Rechenleistung kann die Berechnungsdauer weiterhin verkürzt werden. Die Einstellungen für die parallelen Berechnungen werden je nach verfügbarer Rechenleistung direkt im Solver vor der Berechnung vorgenommen. [ANS09]

8.6 Postprozessor

Der Postprozessor stellt sehr benutzerfreundlich verschiedene Mittel zur Erstellung der Visualisierung und Auswertung der Ergebnisse zur Verfügung (vgl. Abb. 100).

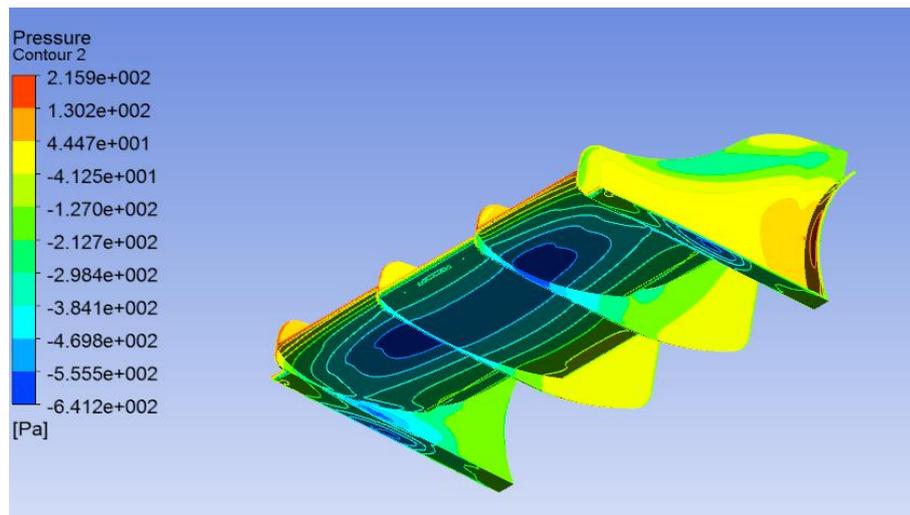


Abb. 100 Visualisierung der Druckverteilung auf der Oberfläche eines Frontflügels mit dem Postprozessor

9 Entwicklung Aerodynamikpaket

Bevor ein Aerodynamikpaket entwickelt wird, wird eine Ausgangssituation vorgestellt, auf der die weiteren Konstruktionen beruhen. Als Basis steht dabei das Formula Student Fahrzeug H08 des HAWKS Racing Teams aus der Saison 2012 zu Verfügung. Dieses wird mit der unter 8 erarbeiteten Simulationsprozedur berechnet und analysiert. Anhand der Ergebnisse können Schwachstellen und Potentiale aufgedeckt werden, anhand deren ein weiterführendes Aerodynamikpaket entwickelt wird.

9.1 H08



Abb. 101 H08 als fertiges Fahrzeug beim Event in Österreich 2012 [HAW12]

Der H08 (Abb. 101) ist das achte Fahrzeug des HAWKS Racing Teams und das erste mit einem vollständigen Aerodynamikpaket. Bei der Entwicklung wurde aus Mangel an Zeit und Erfahrung in der Aerodynamik sowie Simulation eine praxisorientierte Vorgehensweise gewählt, die den Bau von Testflügeln (Abb. 102) für das Vorjahresfahrzeug beinhaltete. Mit diesen Flügeln wurden Test- und Messfahrten sowie Versuche in einem improvisierten Windkanal unternommen. Durch die Analyse der Versuche entstand dann das endgültige Aeropaket bestehend aus einem zweiteiligen Front-, einem dreiteiligen Heckflügel sowie einem Unterboden mit Venturi Tunneln und zusätzlichen Diffusoren im Heck. Zum besseren Package des Frontflügels wies die Unterseite der Front einen Bug auf, der es erlaubte, das mittlere Segment des Frontflügels effizienter zu gestalten (Abb. 103). Die Seitenplatten des Frontflügels wiesen zur besseren Blockade der Zusammen-

führung von Ober- und Unterströmung und zur Leitung der Strömung um die Vorderräder zum Kühler an ihren unteren und hinteren Kanten einen 50mm langen Gurney Flap auf (siehe Abb. 104).



Abb. 102 Testflügel am 2011er Fahrzeug H07 [HAW12]

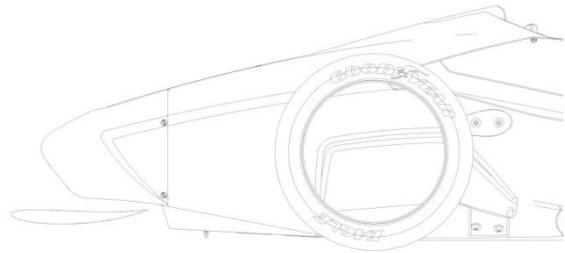


Abb. 103 Seitenansicht des Bugs unter der Nase [WAL13]

Das Fahrzeug wies deutlich gesteigerte Leistungswerte im Vergleich zum Vorjahresfahrzeug ohne Aerodynamik auf und versetzte das Team zum ersten Mal in seiner Geschichte in die Lage, bei den Events um den Gesamtsieg mitzukämpfen. Mit steil angestellten Flügeln (12° Anstellwinkel gegenüber Konstruktionslage) produzierte das Fahrzeug einen Abtrieb von ca. 600N bei 60 km/h, dadurch konnte die maximale Querbesehleunigung von 1,6g auf 2,3g gesteigert werden. Daten zum Widerstand konnten nicht gesammelt werden, der erhöhte Widerstand im Vergleich zum Vorjahresfahrzeug ist aber weder bei der Höchstgeschwindigkeit noch bei den Verbrauchswerten negativ aufgefallen. Die Balance verhielt sich wie erwartet und wurde mit zunehmender Geschwindigkeit hecklastiger. [WAL13]

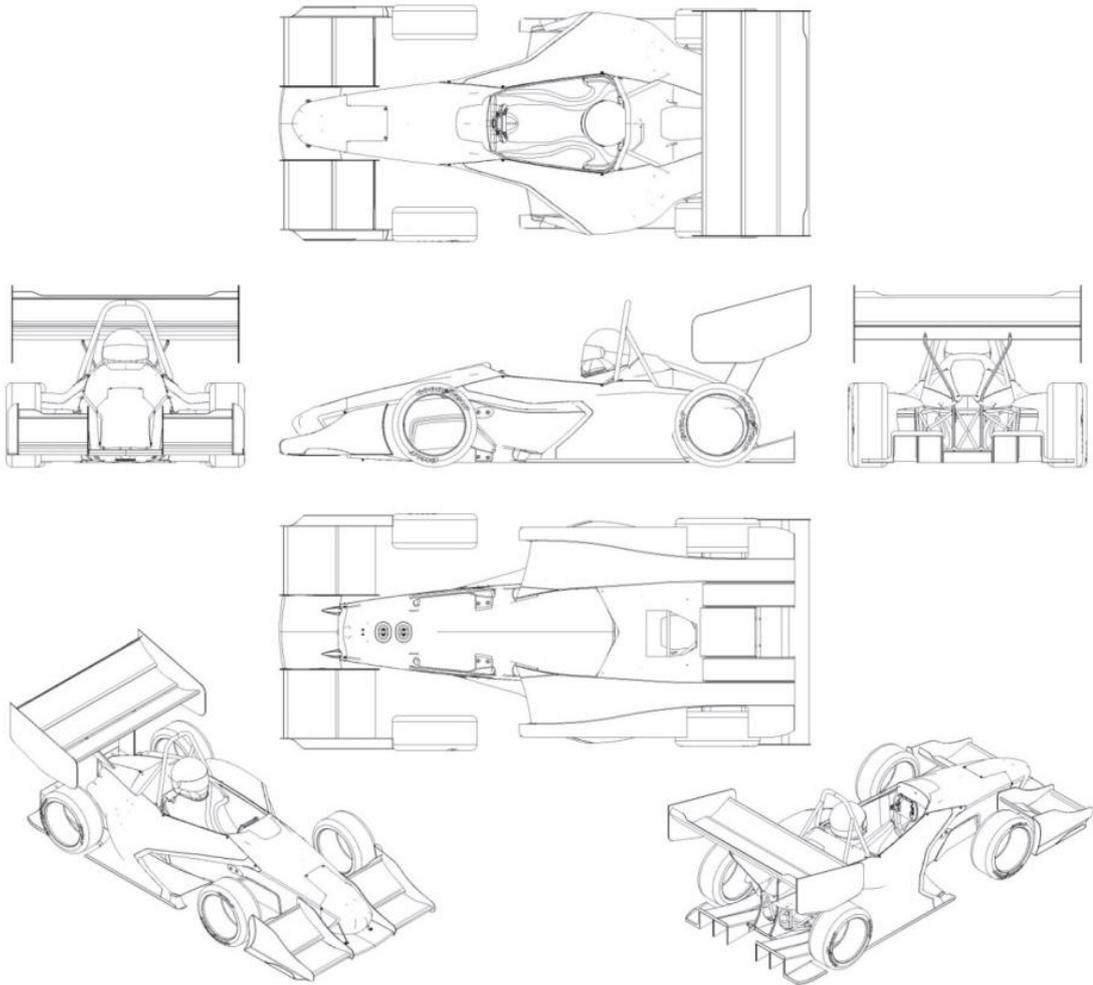


Abb. 104 Ansichten des H08 [WAL13]

9.1.1 Analyse H08

Der H08 wurde mit der unter 8 vorgestellten Prozedur simuliert. Die Geometrie wurde um folgende Aspekte vereinfacht:

Querlenker, Überrollbügel und Flügelanbindungen wurden zugunsten einer schnelleren Berechnung entfernt, da diese schlanken Bauteile die Gesamtergebnisse nur unwesentlich beeinflussen. Der Motorraum wurde geschlossen und der Kühler im Seitenkasten durch die bereits beschriebene Platte mit rundem Durch-

gangsloch ersetzt. Ferner wurde eine Fahrerattrappe hinzugefügt und Öffnungen und Spalte in der Karosserie geschlossen. Die Räder wurden als Zylinder mit verrundeten Kanten dargestellt und die Bodenfreiheit betrug 30mm.

Zur Beurteilung der Entwicklung der Balance über die Geschwindigkeit wurden drei verschiedenen Geschwindigkeiten gewählt, 30 km/h (entspricht Skid Pad Geschwindigkeit), 60km/h (entspricht Durchschnittsgeschwindigkeit) und 120 km/h (entspricht der von der Getriebeübersetzung begrenzten Höchstgeschwindigkeit).

Zur Analyse der Ergebnisse wurde ein Auswertungstool in MS Excel erstellt. In dieses werden Fahrzeugparameter und Ergebnisse aus der Ausgabedatei der Simulation eingetragen und mit diesen aerodynamische Beiwerte, Verhalten der Balance und Leistungsdaten wie die maximal erreichbare Höchstgeschwindigkeit sowie die erreichbare Querschleunigung abhängig vom Kurvenradius errechnet.

Die Fahrzeugparameter für den H08 sind in Tabelle 8 zusammengefasst.

Tabelle 8: Spezifische Fahrzeugparameter H08

Parameter	Wert	Einheit
Gesamtgewicht inkl. Fahrer	300	[kg]
Radstand	16700	[mm]
Spurweite	1200	[mm]
Motorleistung	60	[kW]
Stirnfläche	1,216	[m ²]
Wirkungsgrad Antriebsstrang	0,875	[-]
Gewichtsverteilung zwischen den Achsen	50:50	[-]

Neben den Fahrzeugparametern werden zusätzlich folgende Umgebungswerte eingegeben:

- Dichte Luft bei 25° C 1,184 [kg/m³]
- Haftbeiwert der Reifen 1,4 [-]
- Kurvenradius 36 [m], Variabel

Schließlich werden die Kräfte und Momente aus der Berechnung eingegeben. Da ein Halffahrzeugmodell simuliert wurde, müssen die Werte verdoppelt werden.

Die Simulation ergab, dass der H08 bei 30 km/h 153N, bei 60 km/h 619N und bei 120 km/h 2059N Abtrieb produzierte. Das stimmt mit den Messwerten überein und ist ein Beleg für die Qualität der Simulation. Der Widerstand betrug 71N bei 30 km/h, 287N bei 60 km/h und 1168N bei 120 km/h. Auffällig ist, dass das Chassis mit Unterboden Auftrieb produziert (vgl. Abb. 105 und Tabelle im Anhang B).

Mit den errechneten Werten lassen sich der Abtriebs- und Widerstandsbeiwert berechnen zu einem C_a von -3,1 und einem C_w von 1,44. Die damit erreichbare Höchstgeschwindigkeit bei gegebener Leistung und Wirkungsgrad des Antriebsstranges beträgt 133 km/h. Diese Geschwindigkeit wurde während der Saison nicht erreicht, daher fiel der Widerstand nicht negativ auf.

Eine Querschleunigung von 2,3g wird bei 103 km/h in einer Kurve mit 36m Radius erreicht. Auch dieser, vereinfacht berechnete Wert (das Fahrzeug wird dabei als Massenpunkt betrachtet), stimmt gut mit den Datenaufzeichnungen während der Saison überein.

Fahrzeug		H08									
Setup		Beide Flügel 12° angestellt									
Eingangsdaten		Einheit	Wert	2. Einheit	Wert	Ausgabedaten		Einheit	Wert	2. Einheit	Wert
Fahrzeuggewicht mit Fahrer	kg	300		N	2943	Abtriebsbeiwert Ca	-	-3,10	-	-	-
Radstand	mm	1670		m	1,67	Widerstandsbeiwert Cw	-	1,44	-	-	-
Spurweite	mm	1200		m	1,2	Höchstgeschwindigkeit	m/s	36,97	km/h	133,11	
Leistung	kW	60		W	60000	Kurvengeschwindigkeit	m/s	28,50	km/h	102,58	
Stirnfläche	m ²	1,216		-	-	Querbeschleunigung	m/s ²	22,56	g	2,30	
Spantfläche	m ²	3,6		-	-	Balance 30 km/h	%HA	50,42	-	-	
Wirkungsgrad Antriebsstrang	-	0,875		-	-	Balance 60 km/h	%HA	51,42	-	-	
Lage S in X, Grundbalance	mm	835		% HA	50	Balance 120 km/h	%HA	53,53	-	-	
Dichte Luft 25° C	kg/m ³	1,184		-	-						
Kurveninnenradius	m	36		-	-						
Haftbeiwert Reifen-Boden	-	1,4		-	-						

Simulationsergebnisse				Simulationsergebnisse				Simulationsergebnisse						
Geschwindigkeit	km/h	30	m/s	8,3	Geschwindigkeit	km/h	60	m/s	16,7	Geschwindigkeit	km/h	120	m/s	33,3
Fahrzeugkörper/Unterboden	FZ	1,54	14,64	-2,60	Fahrzeugkörper/Unterboden	FZ	11,02	59,95	-12,52	Fahrzeugkörper/Unterboden	FZ	63,90	246,10	-59,52
Frontflügel	FX	-66,00	16,92	-99,80	Frontflügel	FX	-268,46	67,98	-405,64	Frontflügel	FX	-1099,42	274,34	-1661,66
Heckflügel	MY	-99,00	36,84	127,20	Heckflügel	MY	-402,84	148,95	516,80	Heckflügel	MY	-1639,74	607,04	2105,20
Vorderräder		3,28	-0,62	2,66	Vorderräder		12,52	-3,20	10,16	Vorderräder		46,98	-16,60	38,16
Hinterräder		7,04	3,68	-5,98	Hinterräder		28,94	13,84	-24,58	Hinterräder		119,08	57,86	-100,94
Sonstige 1		0,00	0,00	0,00	Sonstige 1		0,00	0,00	0,00	Sonstige 1		0,00	0,00	0,00
Sonstige 2		0,00	0,00	0,00	Sonstige 2		0,00	0,00	0,00	Sonstige 2		0,00	0,00	0,00
Sonstige 3		0,00	0,00	0,00	Sonstige 3		0,00	0,00	0,00	Sonstige 3		0,00	0,00	0,00
Abtriebskraft gesamt [N]		-153,14			Abtriebskraft gesamt [N]		-618,82			Abtriebskraft gesamt [N]		-2509,20		
Widerstand gesamt [N]			71,46		Widerstand gesamt [N]			287,53		Widerstand gesamt [N]			1168,74	
Moment um Y gesamt [Nm]				21,48	Moment um Y gesamt [Nm]				84,22	Moment um Y gesamt [Nm]				321,24
Ca1		-3,06			Ca2		-3,09			Ca3		-3,14		
Cw1			1,43		Cw2			1,44		Cw3			1,46	
X-Abstand S - P [m]				0,14	X-Abstand S - P [m]				0,14	X-Abstand S - P [m]				0,13
Aerolast HA [N]				-89,43	Aerolast HA [N]				-359,84	Aerolast HA [N]				-1446,96
Aerolast VA [N]	HA/VA		1,40	-63,71	Aerolast VA [N]	HA/VA		1,39	-258,98	Aerolast VA [N]	HA/VA		1,36	-1062,24
Gesamtlast HA [N]				1560,93	Gesamtlast HA [N]				1831,34	Gesamtlast HA [N]				2918,46
Gesamtlast VA [N]	HA/VA		1,02	1535,21	Gesamtlast VA [N]	HA/VA		1,06	1730,48	Gesamtlast VA [N]	HA/VA		1,15	2533,74
Gesamtlast [N]				3096,14	Gesamtlast [N]				3561,82	Gesamtlast [N]				5452,20
Gesamtlast [kg]				315,611	Gesamtlast [kg]				363,08	Gesamtlast [kg]				555,78

Abb. 105 Auswertungstool mit den Ergebnissen für den H08. Ein größerer Ausdruck befindet sich unter Anhang B.

Auffällig ist die Änderung der Balance mit der Geschwindigkeit. Der für jede Geschwindigkeit charakteristische aerodynamische Druckmittelpunkt wandert dabei nach vorn. Da der Druckpunkt ausreichend weit hinter den Schwerpunkt gesetzt wurde, ist die Auswirkung auf die Gesamtbalance nicht negativ. Durch die mit zunehmender Geschwindigkeit zunehmende Aerolast verlagert sich die Gesamtbalance aus Gewichts- und Abtriebskraftverteilung dennoch nach hinten, von 50,4% bei 30 km/h zu 53,5% bei 120 km/h. Dieses Verhalten wurde ebenfalls während der Fahrten beobachtet.

Der Grund für die Verlagerung der Aerobalance nach vorn ist der überproportional ansteigende Auftrieb des Chassis mit Unterboden. Während die Flügel und die Reifen mit Verdoppeln der Geschwindigkeit wie erwartet in etwa das Vierfache an Abtrieb bzw. Auftrieb erzeugen, steigt der Auftrieb des Chassis mit Unterboden deutlich stärker an. Da der Druckmittelpunkt des Chassis hinter dem Schwerpunkt

liegt, verschiebt der erhöhte Auftrieb die Lage des Gesamtdruckpunktes in Richtung Vorderachse.

Die genauen Ursachen lassen sich durch Analyse des Strömungsfeldes im Postprozessor finden (vgl. Abb. 106).

An der Druckverteilung lässt sich erkennen, dass die Venturi Tunnel nahezu wirkungslos bleiben. Sie produzieren sogar Auftrieb, was an den orange gekennzeichneten Gebieten erhöhten Druckes zu sehen ist. Grund dafür sind die vom Vorderrad induzierten Wirbel, die nur wenig gerichtete Strömung in die Einlässe des Unterbodens gelangen lassen. Das Hinterrad verursacht im Auslass der Tunnel weitere Wirbel, die die Strömung weiter behindern. Dieser Effekt verstärkt sich mit zunehmender Geschwindigkeit, da die Wirbel des Vorderades an kinetischer Energie gewinnen. Das macht die Tunnel mit zunehmender Geschwindigkeit immer wirkungsloser.

Die Diffusoren in der Mitte des Hecks funktionieren dagegen gut, was am grün gekennzeichneten Bereich niedrigen Druckes zu erkennen ist.

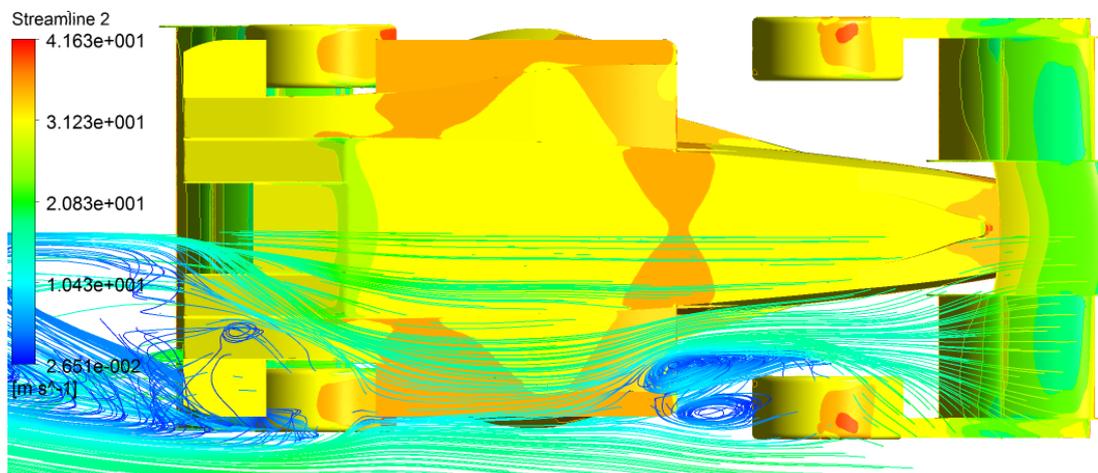


Abb. 106 Darstellung des H08 von Unten. Die Strömungsrichtung ist von rechts nach links. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Wirbel hinter dem Vorderrad zu einem Überdruckgebiet im vorderen Teil des Unterbodens führen.

An der Druckverteilung des mittleren Elements des Frontflügels kann man erkennen, dass dieser nicht gut funktioniert. Im hinteren Bereich liegt ein höherer Druck

als erwartet vor. Das liegt an der Nähe der Hinterkante zum Bug und zur Fahrzeugnase (Abb. 107), wodurch Strömung oberhalb des Flügels stark nach unten abgelenkt wird. Dadurch bilden sich Ablösungen im hinteren Bereich des Profils und seine Wirksamkeit wird vermindert.

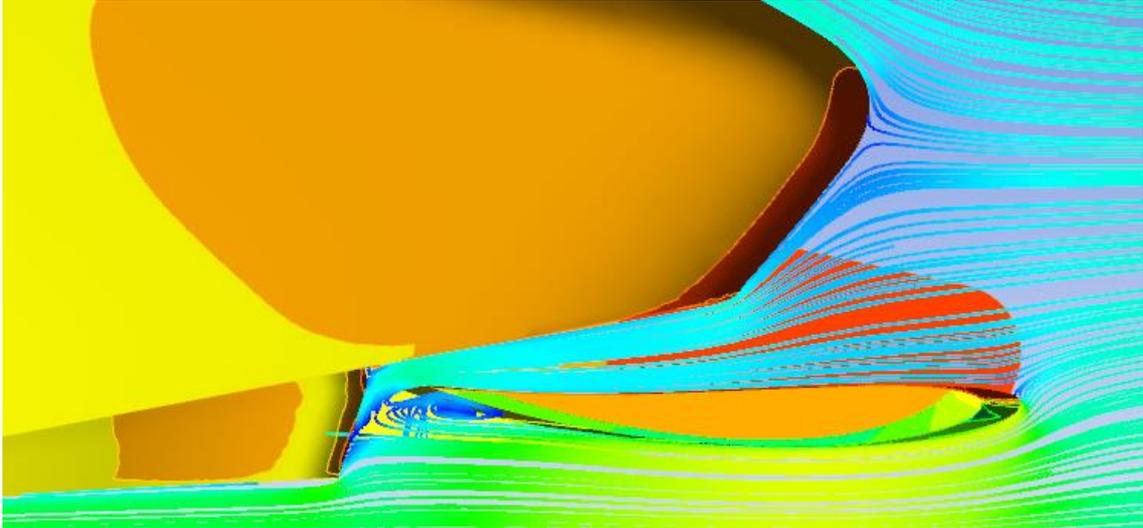


Abb. 107 Darstellung der Nase im 0Y-Schnitt. Strömungsrichtung ist von rechts nach links. Man erkennt die Ablösungen am Profil verursacht durch die starke Krümmung der Strömung durch den Bug direkt hinter dem Profil

Ferner ist an der homogenen Druckverteilung zu erkennen, dass der Heckflügel und die äußeren Bereiche des Frontflügels sehr gut funktionieren und dass die Form des Chassis keine Unterdruckregionen auf seiner Oberfläche bildet und somit keinen unnötigen Auftrieb erzeugt (Abb. 108). Die Seitenplatten sind in ihrer Größe und Form gut ausgewählt gewesen, auch wenn die hinteren Seitenplatten weiter nach unten hätten aufbauen können. An den Niederdruckgebieten an den oberen Kanten lässt sich erkennen, dass hier bereits relativ weit vorn ein energiereicher Wirbel gebildet wird, der die Zusammenströmung von Ober- und Unterströmung an der Flügeloberfläche unterbindet. Auch positiv fällt die Umlenkung der Strömung von der Oberseite des Frontflügels zur Unterseite des Heckflügels auf, was vom Chassis induzierte Störungen vom Heckflügel fernhält und diesen somit effizienter macht.

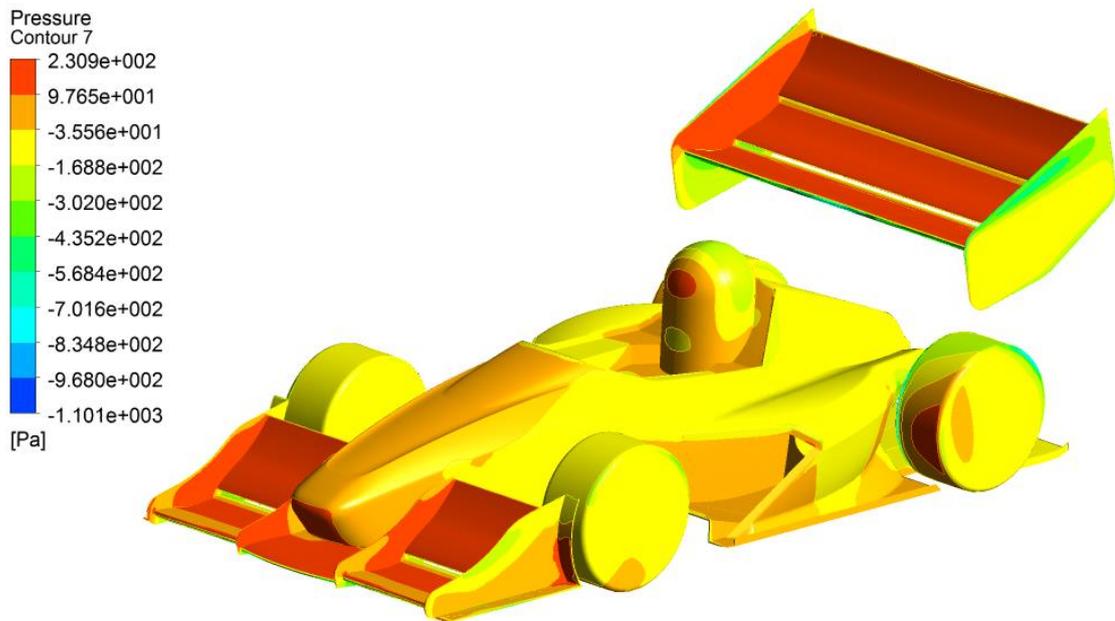


Abb. 108 Darstellung der Druckverteilung auf der Oberfläche des H08. Die dunkelorange markierten Bereiche hohen Druckes sind ein Anzeichen für die gute Leistung der Flügel

An weiteren Stromlinienplots ist zu erkennen, dass die seitlichen Gurney Flaps des Frontflügel zur Umleitung der Strömung um den Vorderreifen zwar funktionieren, die meiste Luft, die in den Seitenkästen und zum Kühler gelangt, aber durch einen Wirbel an den inneren Seitenplatten zwischen Frontflügel und Nase entsteht. Die Gurney Flaps sind also nicht notwendig gewesen, hier wurde Flügelfläche und somit Abtrieb verschwendet.

Zudem sind die Einlässe zu den Seitenkästen zu groß gewählt, da nicht alle Luft durch den Seitenkasten geführt wird. Stattdessen bildet sich ein stehender Wirbel vor dem Kühler, der die Zufuhr von Kühler Luft behindert.

Die Auswirkungen der drehenden Räder sind überraschen hoch (vgl. Abb. 109). Die gebildeten Wirbel verursachen ein deutlich größeres Totwassergebiet, dass die Strömung nicht nur unter dem Fahrzeug, sondern auch an den Seiten stark beeinträchtigt.

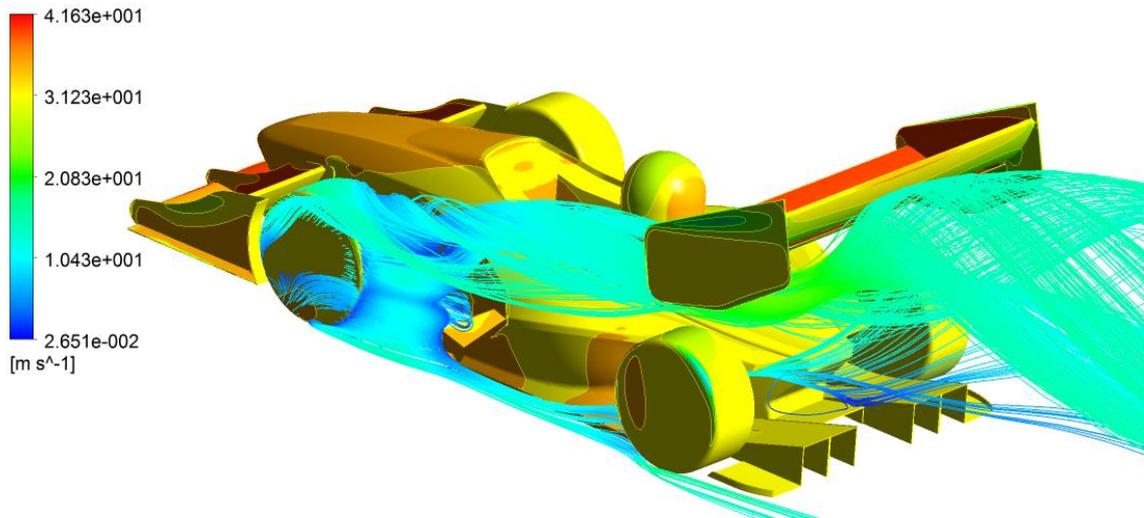


Abb. 109 Darstellung der vom Vorderrad verursachten Wirbel durch Stromlinien

9.1.2 Fazit H08

Als Fazit lässt sich sagen, dass die Flügel und Profile sehr gut funktioniert haben. Der Frontflügel bleibt in seinen Dimensionen unterhalb der vom Reglement erlaubten Größe und hat demnach noch viel Potenzial. Negativ fällt die Nähe des Frontflügels zur Fahrzeugnase und der durch die Reifenwirbel nahezu wirkungslose Unterboden auf. Da der H08 bereits sehr konkurrenzfähig war, könnte ein Fahrzeug ohne seine Schwächen eine deutlich bessere Performance aufweisen.

9.2 Entwicklung fortschrittliches Aeropacket

Der Ablauf der Entwicklung beginnt damit, den zur Verfügung stehenden Bauraum in Abhängigkeit von Package und Reglementbestimmungen für aerodynamische Bauteile zu bestimmen. Anhand dieses Bauraumes werden verschiedene Konzepte für Frontflügel, Heckflügel und Unterböden erstellt, berechnet und mit einander verglichen. Anschließend werden die Interaktionen der einzelnen Elemente anhand von Gesamtfahrzeugsimulationen untersucht und gegebenenfalls Änderungen und Modifikationen vorgenommen.

9.2.1 Chassis

Das Layout des Chassis wird durch die Ergonomie, das Crashelement an der Fahrzeugfront, dem Package von Motor und Antriebsstrang, dem Körper des Fahrers sowie den Regularien bezüglich des Fußraum- und Einstiegstemplates bestimmt. Die Templates sind Schablonen, die in die Fahrerzelle eingesetzt werden und waagrecht bis 100mm vor die Pedalerie im Falle des Fußraumtemplates sowie senkrecht bis 350mm über Boden im Falle des Einstiegstemplates geführt werden (vgl. Abb. 111). Diese Regel soll einen ausreichend großen Überlebensraum für den Fahrer sicherstellen.

In Anlehnung an die aktuellen Entwicklungen des HAWKS Racing Teams wurde ein Radstand von 1650mm und eine Spurweite von 1170mm vorn und 1138mm hinten für die Konstruktion festgelegt. Dadurch wird die Fläche zur Erzeugung von Abtrieb zwar verkleinert, die kompakteren Abmaße sollen sich aber positiv auf die Agilität des Fahrzeugs auswirken. Abbildung 110 zeigt das Bauraumbegrenzende Package.

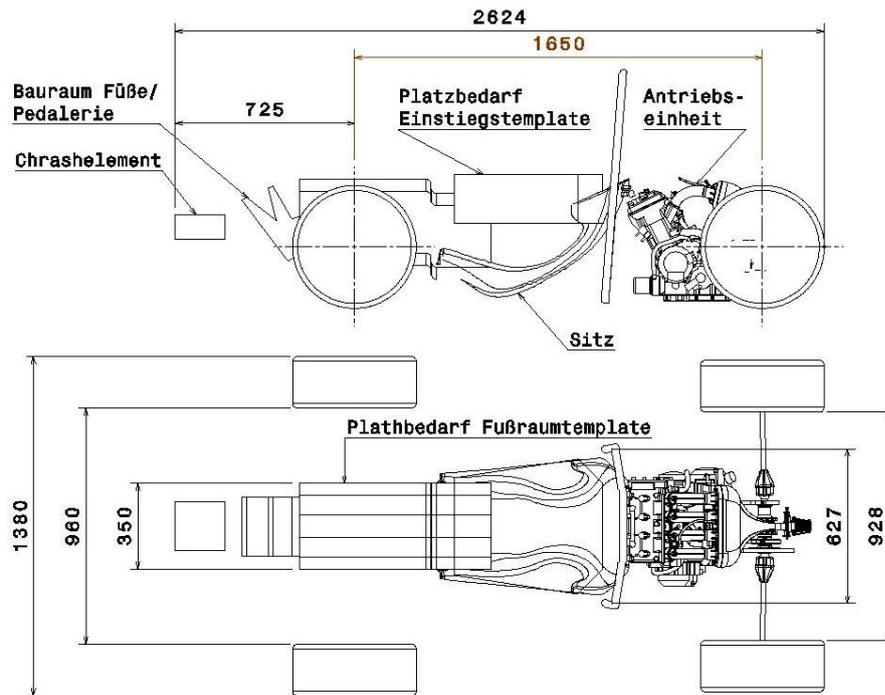


Abb. 110 Platzbedarf Ergonomie, Antriebsstrang und Crashelement

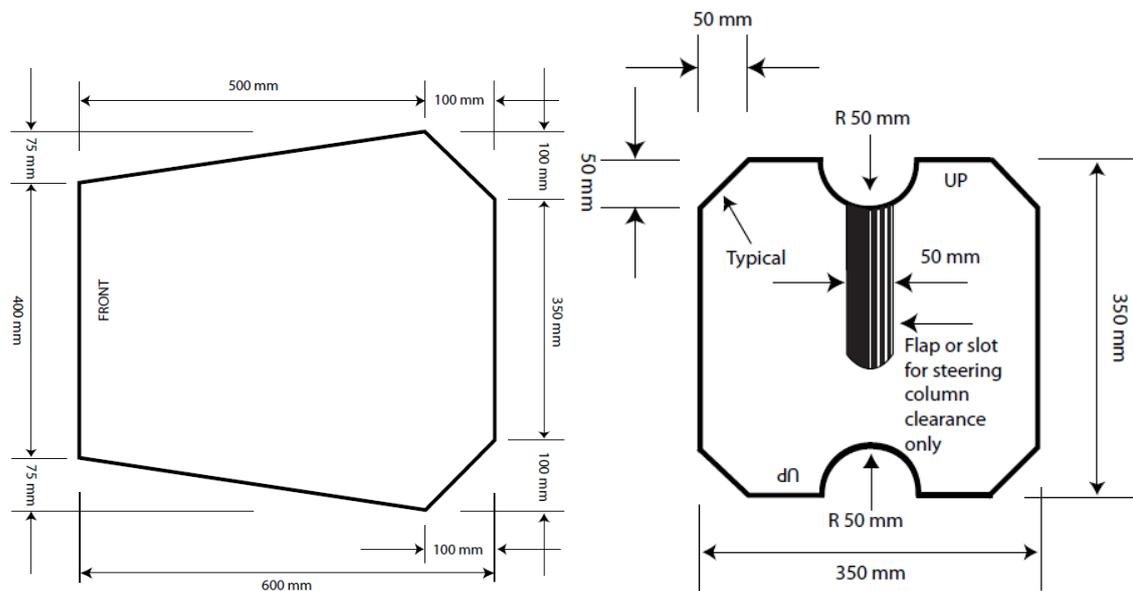


Abb. 111 Links: Einstiegstemplate, es wird senkrecht von oben bis zu einer Höhe von 350mm über der Fahrbahn in den Einstieg des Fahrzeugs geführt.

Rechts: Fußraumtemplate, es wird hochkant gehalten senkrecht in den Einstieg des Fahrzeugs eingeführt und anschließend waagrecht bis 100mm vor die Pedale durch den Fußraum geführt. Dabei darf kein Bauteil die Bewegung der Templates behindern.

Die Seitenkästen müssen Platz für einen rechteckigen Kühler mit einer Fläche von ca. 0.075m^2 auf der linken Seite und einen Abgaskrümmter auf der rechten Seite bereithalten. Dabei ist die Größe und Position des Kühlers entscheidend für die Gestalt des Seitenkastens, da der Krümmer mit seinen zahlreichen Rohrbögen besser den Platzverhältnissen angepasst werden kann.

Es wurde ein Chassis konstruiert, das möglichst eng an diesen Vorgaben verläuft, um möglichst viel Bauraum für die Aeobauteile zu erhalten. Abbildung 112 zeigt das neue Chassis. Um die Probleme, die beim H08 durch die Nähe des mittleren Profils des Frontflügels zu vermeiden und um mehr Raum für die Unterbringung eines größeren Profils zu schaffen, wurde die Fahrzeugnase auf einer Länge von 1130mm um 100mm angehoben. Die Ergonomie wurde entsprechend angepasst.

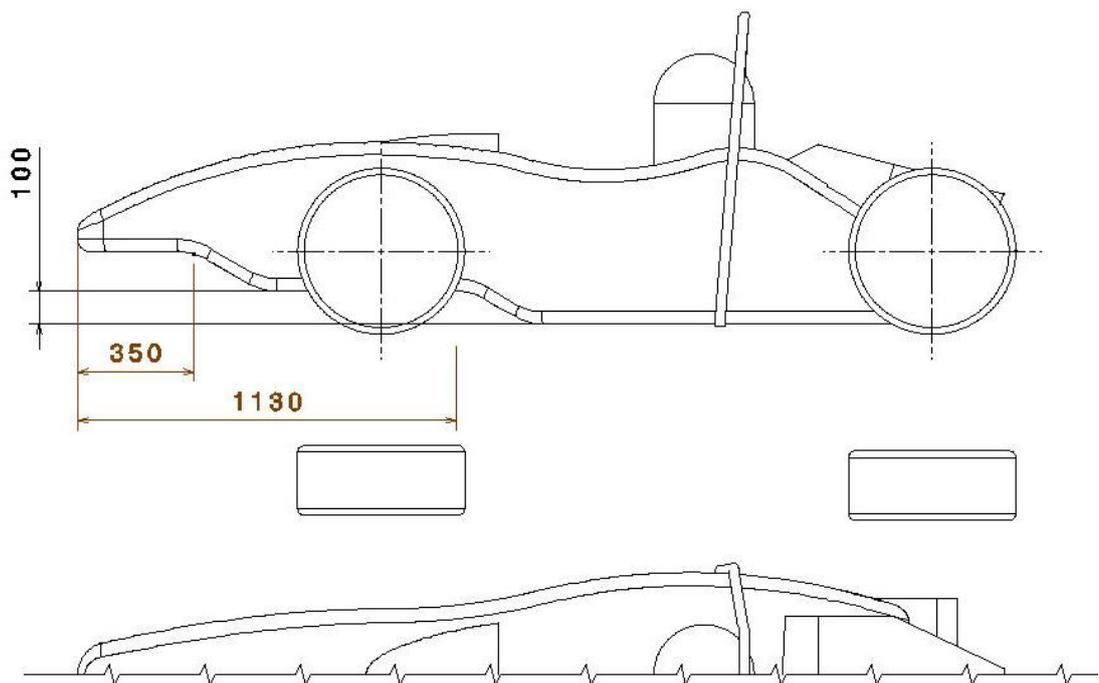


Abb. 112 Neu konstruiertes Chassis mit erhöhter Nase

Um den Einfluss der Räder beurteilen zu können, wurde zunächst ein drehendes Rad mit einem Durchmesser von 500mm und einer Breite von 210mm einzeln simuliert.

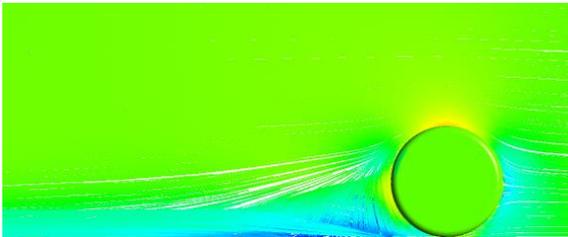


Abb. 113 Darstellung der Stromlinien in der Mitte des Rades zur Beurteilung der Tragweite der Störungen in X und in Z Richtung, die Strömungsrichtung verläuft von rechts nach links

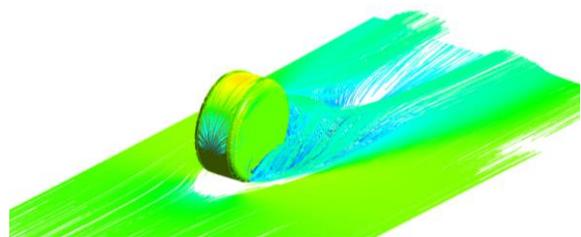


Abb. 114 Isometrische Darstellung der bodennahen Stromlinien zur Beurteilung der vom Rad induzierten Verwirbelungen in Y Richtung. Die Strömungsrichtung verläuft von links nach rechts

Man kann erkennen, dass die vom Rad verursachten Wirbel sowohl in der Breite als auch in der Höhe große Auswirkungen auf die Strömung haben (vgl. Abb. 113 und 114). Die Erkenntnisse fließen in die Konstruktion des Chassis und des Unterbodens ein.

9.2.2 Frontflügel

Zur Entwicklung eines Aeropackets ist es sinnvoll, mit dem Frontflügel zu beginnen, da sein Bauraum vom Reglement am meisten begrenzt ist. Abbildung 115 zeigt neben den Begrenzungen durch das Package auch die Reglementbedingten Begrenzungen sowie durch Fahrzeugbewegungen benötigte Freiräume.

Der Antrieb des Fronflügels ist entscheidend für den Gesamtabtrieb, da der Heckflügel mit seinem Abtrieb das Moment des Frontflügels um den Schwerpunkt ausgleicht. Da bei der Gestaltung des Heckflügels deutlich mehr Freiheiten vorhanden sind, kann er auf die Abtriebswerte des Frontflügels einfacher angepasst werden als umgekehrt.

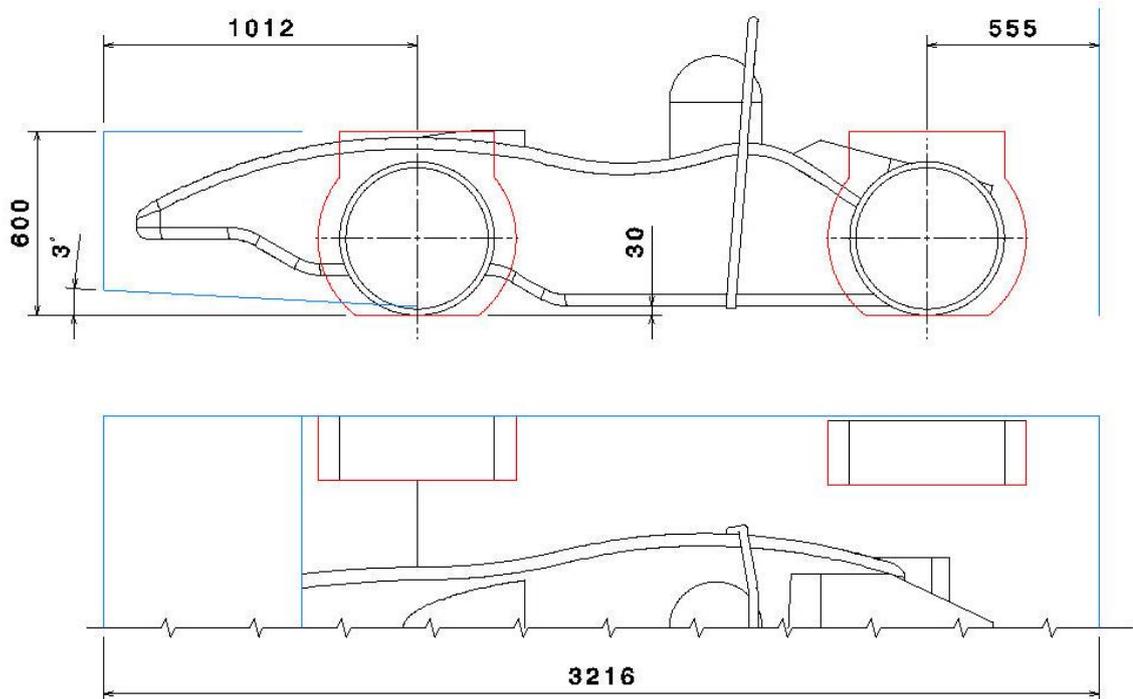


Abb. 115 Bauraumbegrenzungen durch Reglement und Fahrzeugbewegungen. Die 3°- Schräge soll bei Nickbewegungen des Fahrzeugs ein Berühren des Bodens durch den Frontflügel verhindern

Zudem ist es hier sinnvoll, nicht mit Abtriebs- und Widerstandsbeiwerten zu rechnen, sondern mit den tatsächlichen Kraftkomponenten, da ein Flügel mit einem günstigen C_a -Wert durch seine Form nicht optimal in den Bauraum passen und somit eine kleinere Fläche haben und damit einen geringeren Abtrieb erzeugen kann als ein Flügel mit einem niedrigeren C_a -Wert bei besserer Raumausnutzung.

Zunächst müssen die Profile bestimmt werden. Auf Profildatenbanken wie www.airfoildb.com sind viele empirisch untersuchte Profile aus dem Flugzeugbau hinterlegt und können unter anderem als DAT Datei heruntergeladen und verarbeitet werden.

Für die schnelle Profilauswahl, auch von mehrteiligen Flügeln, eignet sich das frei verfügbare Java Tool Javafoil, zu finden unter www.mhaerotools.de. Dabei handelt es sich um ein einfaches, zweidimensionales Programm zur Analyse von Flügelprofilen. Hier kann man die Profile aus der Datenbank laden, in Form, Position und

Konstellation bearbeiten und berechnen (vgl. Abb. 116). Das Programm liefert zuverlässige Abtriebs- und Widerstandsbeiwerte für verschiedene Reynoldszahlen. Die hier erstellten Profile lassen sich im DXF Format abspeichern und in einem CAD Programm als Konstruktionsgrundlage verwenden.

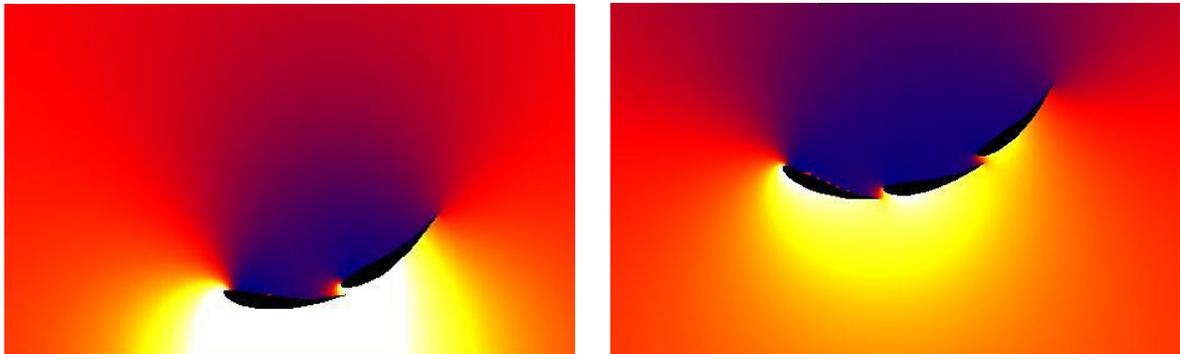


Abb. 116 Druckbeiwertplot aus Javafoil für ein zweiteiliges Profillayout unter Einfluss des Bodeneffekts (links) und eines dreiteiligen Layouts in freier Strömung (rechts). Blau steht hier für hohen Druck, gelb bis weiß für niedrigen Druck. [WAL13]

Die meisten Teams in der Formula Student verwenden zwei- oder dreiteilige Frontflügel. Hier sind zweiteilige Flügel die besseren, da ein dreiteiliger Aufbau die Größe des untersten Elements verringert und somit der Bodeneffekt weniger zum Tragen kommt. Wählt man ein großes unteres Profil, so lässt sich eine geringere Gesamtkrümmung des Flügels mit zwei kleineren Zusatzprofilen erreichen als es der Fall mit nur einem Zusatzelement wäre. Beim H08 war die Druckverteilung auf dem zweiteiligen Flügel bereits homogen und es entstanden keine Ablösungen, sodass kein weiterer Spalt benötigt wurde.

Im Folgenden werden verschiedene Frontflügelkonfigurationen und die entsprechenden Simulationsergebnisse verglichen. Die Profile sind durch ein iteratives Verfahren mit Hilfe der Datenbank und Javafoil ausgewählt worden. Die Profile sollten folgende Kriterien erfüllen:

- Hoher C_a -Wert des einzelnen Profils
- Eignung zum mehrteiligen Zusammenbau
- Möglichst niedrige Bauweise für ein einfacheres Package

Anhand dieser Kriterien wurden leicht modifizierte NACA 6412 Profile mit einer geringeren Dicke und erhöhter Krümmung verwendet.

Dabei sind alle Flügel in ihren Dimensionen am Maximum des erlaubten konstruiert, um eine möglichst große Fläche und somit Abtrieb zu erreichen. Zur korrekten Darstellung des Bodeneffekts wurde der Fahrbahnboden als bewegliches Element deklariert. Die Frontflügel wurden einzeln, ohne das restliche Fahrzeug simuliert, das ist zugunsten einer schnelleren Konzeptauswahl durch verkürzte Berechnungszeiten zulässig, da die Folgen von Interaktionen mit anderen Fahrzeugteilen gering und für alle Konfigurationen gleich sind. Allerdings ist eine Simulation mit dem ganzen Fahrzeug sehr wichtig, da der Frontflügel große und auch negative Auswirkungen auf die Anströmung des Heckflügels und somit den Gesamtabtrieb und Gesamtwiderstand haben kann.

Zum Vergleich wurden folgende Varianten konstruiert und bei einer Strömungsgeschwindigkeit von 19m/s berechnet (vgl. Abb. 117 bis 123):

- Variante 1: H08 Flügel als Benchmark
- Variante 2: Zweiteiliger Flügel mit maximal erlaubten Dimensionen und seitlichen Gurney Flaps zur besseren Abschirmung von Ober- und Unterströmung
- Variante 3: Dreiteiliger Flügel zur Überprüfung der oben aufgestellten Behauptung
- Variante 4: Zweiteiliger Flügel mit maximaler Breite und geraden Endplatten zur Überprüfung der Notwendigkeit einer Abschirmung auf Kosten der Fläche wie bei Variante 2
- Variante 5: Zweiteiliger Flügel mit maximaler Breite und angehobenen Enden zur Abschirmung unter Beibehalten der maximalen Fläche
- Variante 6: Zweiteiliger Flügel mit zusätzlichen Tauchplatten zur Überprüfung ihrer Wirksamkeit
- Variante 7: Zweiteiliger Flügel mit zusätzlichen Profilen zur Überprüfung ihrer Wirksamkeit

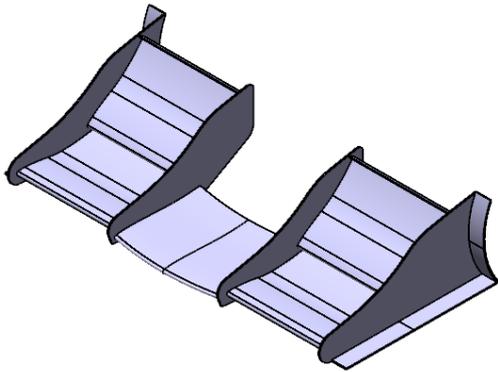


Abb. 117 Frontflügel Variante 1

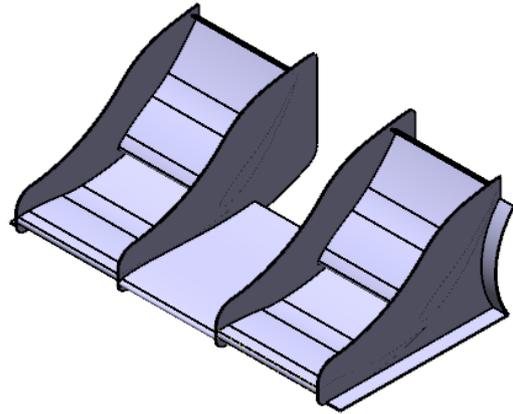


Abb. 118 Frontflügel Variante 2

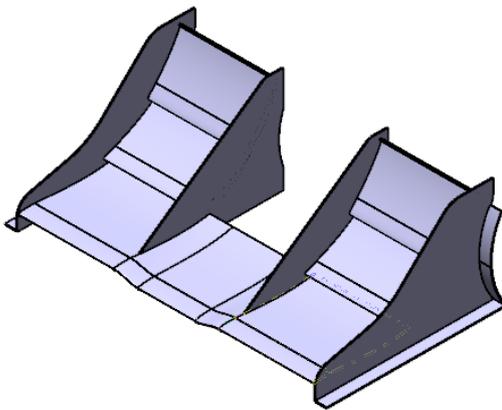


Abb. 119 Frontflügel Variante 3

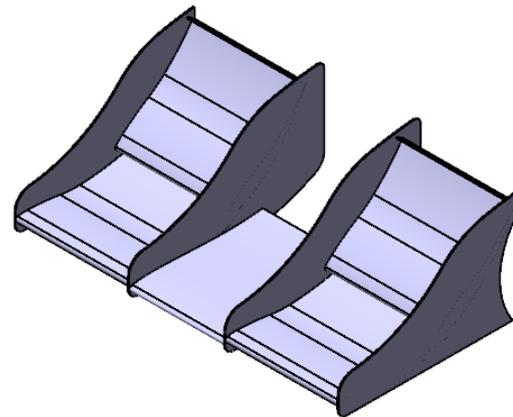


Abb. 120 Frontflügel Variante 4

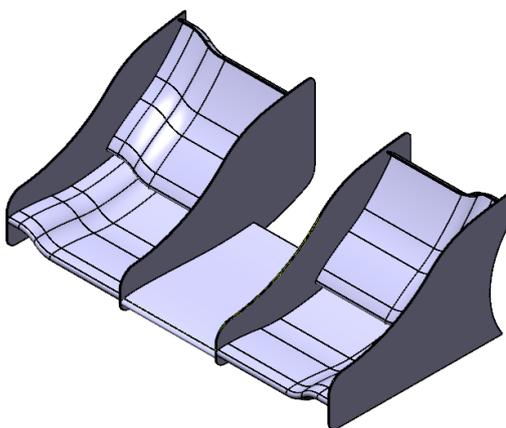


Abb. 121 Frontflügel Variante 5

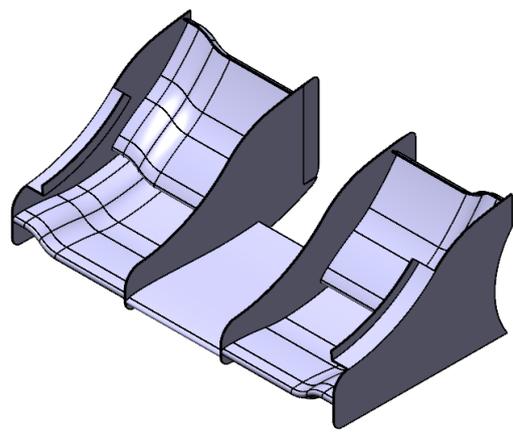


Abb. 122 Frontflügel Variante 6

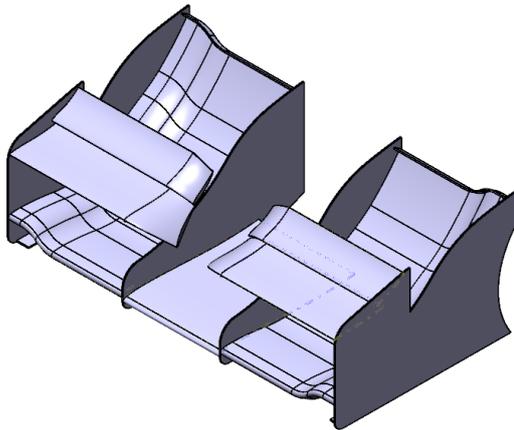


Abb. 123 Frontflügel Variante 7

Die Abtriebs- und Widerstandswerte für alle Varianten und deren Verhältnis zum H08 sind in Tabelle 9 zusammen gefasst.

Tabelle 9: Auswertung und Vergleich der Simulationsergebnisse der Frontflügelvarianten. Dabei ist in den letzten beiden Spalten ein Prozentanteil zur Benchmark H08 angegeben.

Var.	Bezeichnung	Abtrieb [N]	W.stand [N]	A/W	% H08 A	%H08 W
1	H08	283	74	3,82	100,0	100,0
2	2-teilig	370	116	3,19	130,7	156,8
3	3-teilig	380	128,4	2,96	134,3	173,5
4	2-teilig max. Breite	392	126,6	3,10	138,5	171,1
5	2-teilig hohe Enden	444	136,6	3,25	156,9	184,6
6	2-teilig Tauchplatten	438	141,4	3,10	154,8	191,1
7	2-teilig Zusatzprofil	506	152	3,33	178,8	205,4

Die Auswertung ergab, dass die seitlichen Gurney Flaps die Abschirmung zwar verbesserten, allerdings wiegt der Nachteil der kleineren Flügelfläche schwerer. Dass eine Abschirmung dennoch notwendig ist, zeigen die besseren Werte des Flügels mit angehobenen Enden (Variante 5). Zusätzliche Tauchplatten haben keine Verbesserungen, sondern leichte Verschlechterungen beim Abtrieb und Widerstand gebracht. Variante 7 mit zusätzlichen Profilen erreichte die höchsten Abtriebswerte. Auch das Verhältnis von Abtrieb zu Widerstand und somit die Effizienz ist von den untersuchten Varianten am günstigsten. An die Effizienz des H08

kommt keine Variante heran. Das liegt am Seitenverhältnis. Die Profile am H08 waren kleiner, die Flügelbreite aber genauso groß wie bei den untersuchten Varianten und damit das Seitenverhältnis günstiger.

Die Zusatzprofile können ungünstige Auswirkungen auf die restlichen Bauteile des Fahrzeugs haben, was noch zu überprüfen ist.

Die Ergebnisse des dreiteiligen Flügels haben die weiter oben aufgestellten Behauptungen untermauert. Durch die geringere Fläche, die den Bodeneffekt nutzt, ist der Abtrieb dieses Flügels gering, bei einem vergleichbaren Widerstand.

9.2.3 Heckflügel

Bei der Auslegung des Heckflügels kann ein drei- oder vierteiliger Aufbau gewählt werden, da der Bodeneffekt wie beim Frontflügel fehlt. Zudem ist der Bauraum weniger reglementiert, so sind die Höhe und die Länge des Flügels frei wählbar. Durch den mehrteiligen Aufbau kann eine stärkere Krümmung und somit höhere Abtriebsbeiwerte realisiert werden. Für den Heckflügel wurden die gleichen Profile wie für den Frontflügel verwendet, hier aber im dreiteiligen Layout.

Für die Position des Heckflügels ist es ratsam, ihn so weit wie möglich hinter dem Schwerpunkt des Fahrzeugs zu setzen. Der Frontflügel hat einen deutlich größeren Hebel bezüglich des Schwerpunkts. Um dieses Moment auszugleichen und für ein ausbalanciertes Fahrverhalten zu sorgen, muss der Heckflügel dem Hebelverhältnis entsprechend mehr Abtrieb produzieren. Ist der Flügel nicht maximal weit hinten, muss dieser um mehr Abtrieb zu produzieren, größer werden, was den Widerstand unnötig erhöht. Die Seitenplatten sollten hinter die Profile ragen, um die Zusammenführung von Ober- und Unterströmung hinter den Flügel zu verlagern und so die Wirksamkeit des Flügels steigern. Hier entsteht ein Zielkonflikt, da das Reglement den maximalen Überhang nach hinten mit 305mm begrenzt. Als Kompromiss wurden die Enden der Flügel nach vorne gezogen, so befindet sich der Großteil des Flügels in maximaler Entfernung zum Schwerpunkt ohne durch zu kurze Seitenplatten an Effizienz zu verlieren.

Es wurden verschiedene Konfigurationen konstruiert, bei 19 m/s berechnet und mit einander verglichen (vgl. Abb. 124 bis 128).

Variante 1: H08 Heckflügel als Benchmark

Variante 2: Vergrößerte Variante

Variante 3: Variante mit zusätzlichen Tauchplatten

Variante 4: Variante mit weiter nach unten gezogenen Seitenplatten

Variante 5: Variante mit zusätzlichem Profil

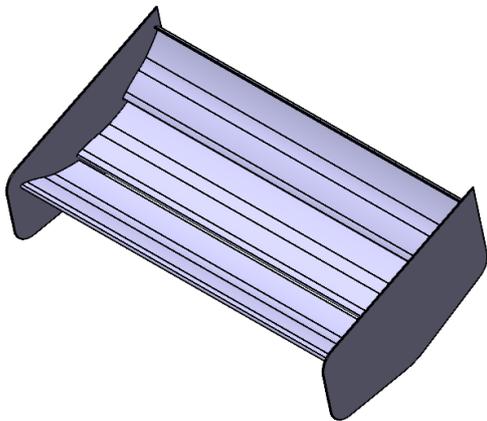


Abb. 124 Heckflügel Variante 1

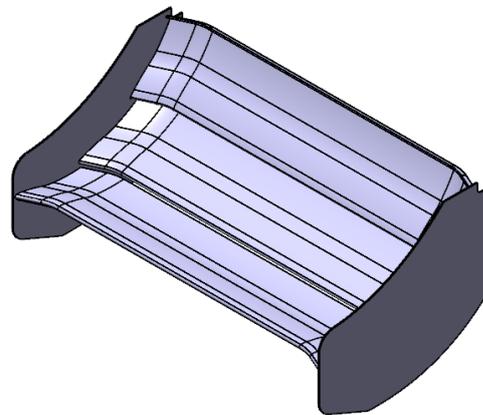


Abb. 125 Heckflügel Variante 2

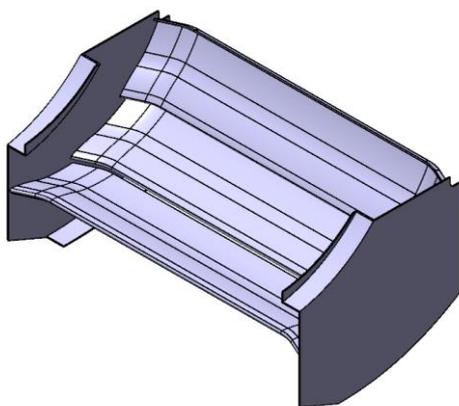


Abb. 126 Heckflügel Variante 3

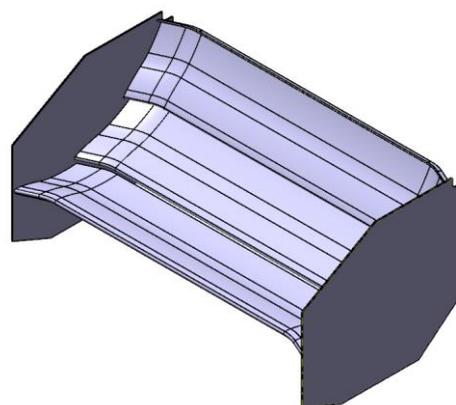


Abb. 127 Heckflügel Variante 4

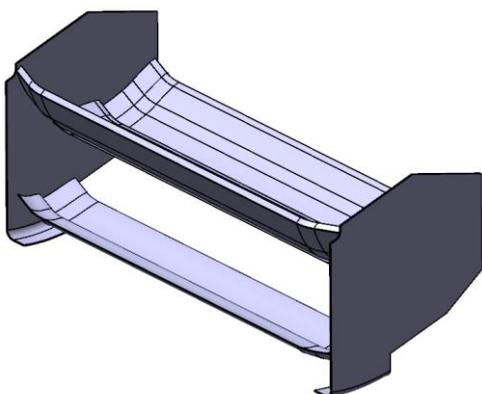


Abb. 128 Heckflügel Variante 5

Die Abtriebs- und Widerstandswerte für alle Varianten und deren Verhältnis zum H08 sind in Tabelle 10 zusammen gefasst:

Tabelle 10: Auswertung und Vergleich der Simulationsergebnisse der Heckflügelvarianten. Dabei ist in den letzten beiden Spalten ein Prozentanteil zur Benchmark H08 angegeben

Var.	Bezeichnung	Abtrieb [N]	W.stand [N]	A/W	% H08 A	%H08 W
1	H08	448	150,8	2,97	100	100
2	3-teilig	560	194	2,89	125	128,6
3	3-teilig Tauchplatten	564	195,3	2,89	125,9	129,5
4	3-teilig Große S.Platten	580	192,8	3,01	129,5	127,9
5	3-teilig Zusatzprofil	622	215,2	2,89	138,8	142,7

Die Auswertung ergab, dass der Flügel mit Zusatzprofil am meisten Abtrieb aufwies. Die Interaktionen, die das Zusatzprofil hervorrufen kann, müssen aber noch untersucht werden. Die Tauchplatten der Variante 3 hatten nur sehr kleine positive Auswirkungen auf den Abtrieb. Der Flügel mit den vergrößerten Seitenplatten (Variante 4) weist neben dem besten Abtriebswert auch das günstigste Verhältnis von Abtrieb zu Widerstand auf.

Die endgültige Größe und Position des Flügels bedarf einer Gesamtfahrzeugsimulation zur Untersuchung der Interaktionen zwischen den einzelnen Bauteilen des Fahrzeugs. Da der Heckflügel das hinterste Teil des Fahrzeugs darstellt, sind die Strömungsverhältnisse für diesen am schwersten voraus zu sagen.

9.2.4 Unterboden

Zur Beurteilung der Funktion des Unterbodens wurde zunächst eine ebene Platte als Unterboden erstellt. Diese soll als Vergleich dienen, da es zu erwarten ist, dass das Chassis Auftrieb erzeugen wird.

Der beengte Bauraum für den Unterboden erlaubt nur schmale Tunnel und Diffusoren. Ein breiter Einlass wäre zwar möglich, ist aber nach den Erkenntnissen aus der Simulation des H08 durch den Einfluss der Räder nicht sinnvoll. Der Winkel der Diffusoren ist zudem durch die hinteren Querlenker begrenzt. Eine Durchführung der beweglichen Fahrwerkskomponenten durch einen hohen Tunnel wäre mit Öffnungen in den Wänden und somit durch zusätzliche Störungen der ohnehin schon schwierigen Strömungsverhältnissen verbunden. Es bleibt also nur wenig Raum, um den Unterboden zu krümmen und ihn so Abtrieb produzieren zu lassen.

Es wurden folgende Varianten konstruiert und mit einem bewegten Fahrbahnboden sowie drehenden Rädern berechnet:

Variante 1: H08 Chassis und Unterboden als Benchmark

Variante 2: Chassis mit ebenem Unterboden zur Bewertung der Ausgangsbasis

Variante 3: Ebener Unterboden mit Diffusor

Variante 4: Unterboden mit Venturi Tunnel und Mitteldiffusor

Variante 5: Unterboden mit Venturi Tunnel und Mitteldiffusor und einem spitzen Abweiser unterhalb der Fahrzeugnase zur Leitung der Luft in die Tunnel

Variante 6: Wie Variante 3, nur mit ovalem Abweiser

Variante 7: Kurzer Unterboden zwischen den Rädern

Variante 8: Erhöhter kurzer Unterboden mit Diffusor im Heck und Verkleidungen der Hinterräder und Radblenden hinter den Hinterrädern

Die Abbildungen 129 bis 136 zeigen die Druckverteilung auf der Ober- und Unterseite der verschiedenen Varianten.

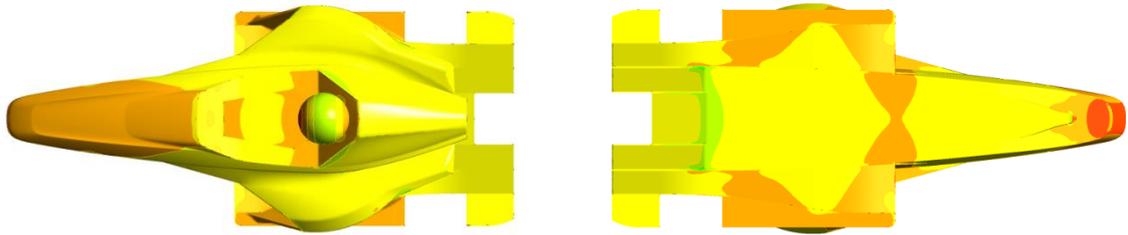


Abb. 129 Druckverteilung der Variante 1 für die Oberseite (links) und die Unterseite (rechts)

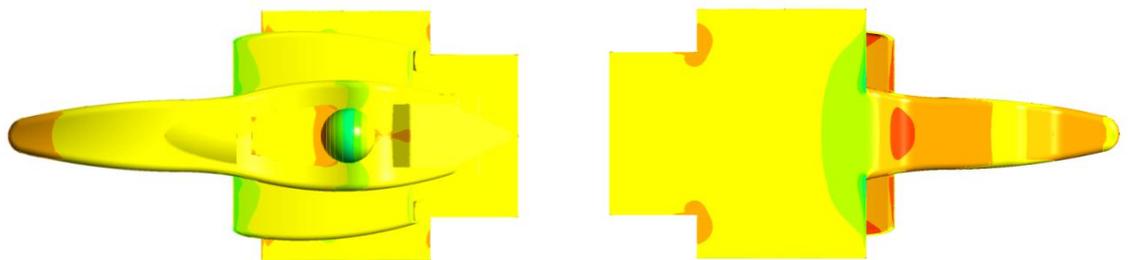


Abb. 130 Druckverteilung der Variante 1 für die Oberseite (links) und die Unterseite (rechts)

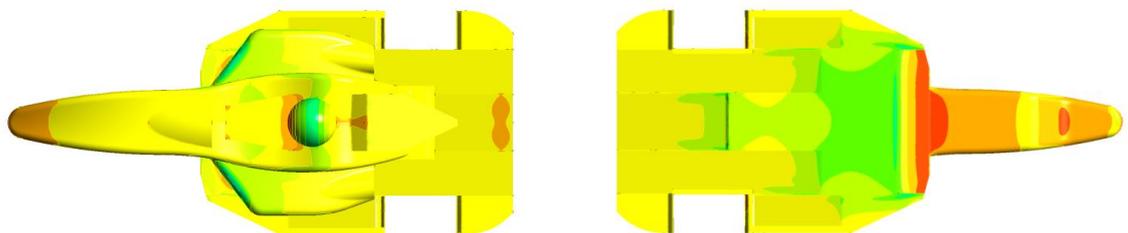


Abb. 131 Druckverteilung der Variante 1 für die Oberseite (links) und die Unterseite (rechts)

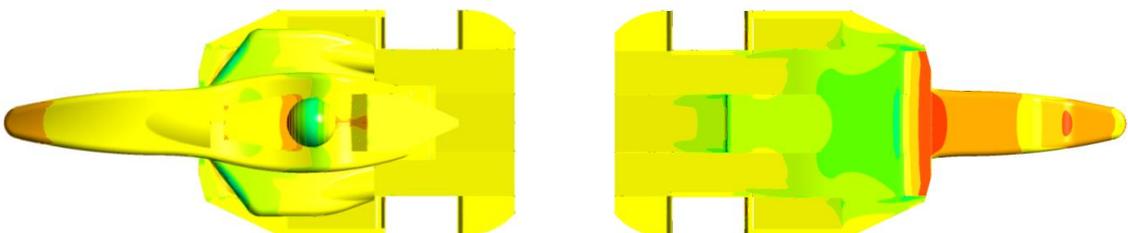


Abb. 132 Druckverteilung der Variante 1 für die Oberseite (links) und die Unterseite (rechts)

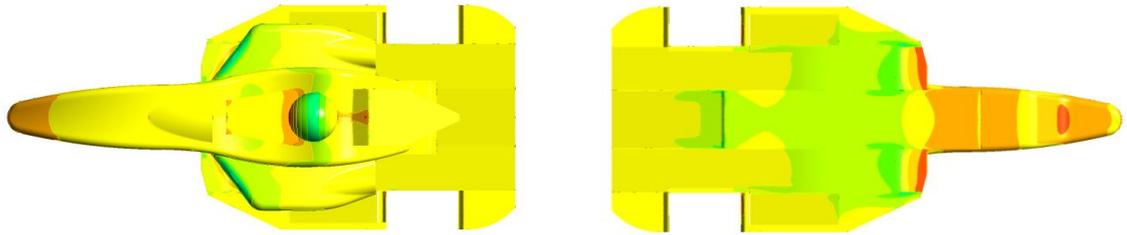


Abb. 133 Druckverteilung der Variante 1 für die Oberseite (links) und die Unterseite (rechts)

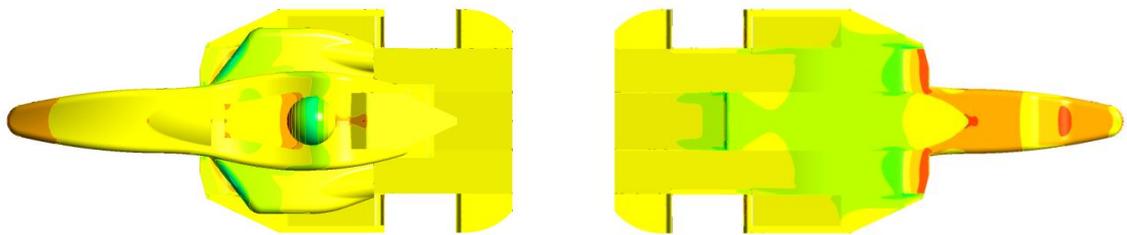


Abb. 134 Druckverteilung der Variante 1 für die Oberseite (links) und die Unterseite (rechts)

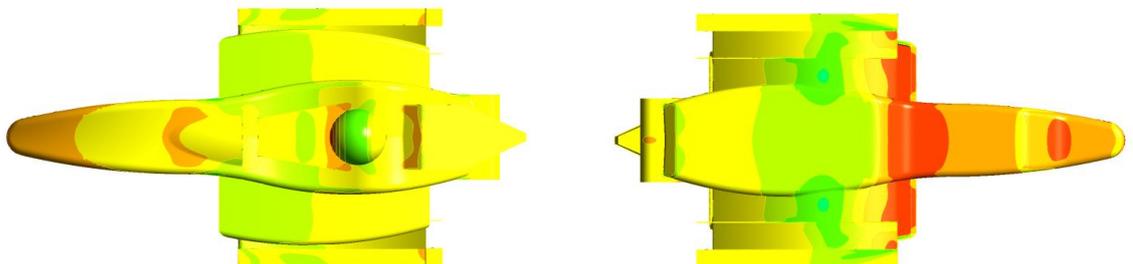


Abb. 135 Druckverteilung der Variante 1 für die Oberseite (links) und die Unterseite (rechts)

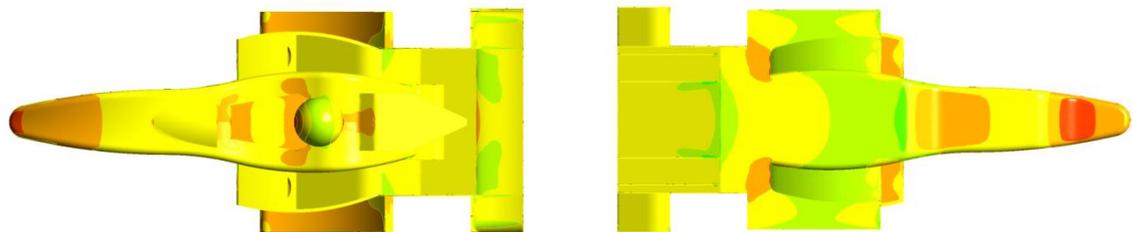


Abb. 136 Druckverteilung der Variante 1 für die Oberseite (links) und die Unterseite (rechts)

Die Abtriebs- und Widerstandswerte sind in Tabelle 10 zusammengefasst:

Tabelle 11: Auswertung und Vergleich der Simulationsergebnisse der Unterbodenvarianten. Dabei sind in den letzten beiden Spalten ein Prozentanteil zur Benchmark H08 angegeben.

Var.	Bezeichnung	Abtrieb [N]	W.stand [N]	A/W	% H08 A	%H08 W
1	H08	-11	60	-0,18	100,0	100,0
2	Ebener Unterboden	-70	57,2	-1,22	636,4	95,3
3	Eben mit Diffusor	41,5	37,5	1,11	-377,3	62,5
4	Tunnel + Diffusor	51,6	38,4	1,34	-469,1	64,0
5	Spitzer Abweiser	39,8	38,9	1,02	-361,8	64,8
6	Ovaler Abweiser	37,4	39	0,96	-340,0	65,0
7	Kurzer Unterboden	18,5	66,4	0,28	-168,2	110,7
8	Flügelunterboden	88,3	73,4	1,20	-802,7	122,3

Der Vergleich des neu konstruierten Chassis mit dem H08 zeigt, dass durch die Höherlegung der Nase bereits Abtrieb entsteht. Durch die Stufe zwischen der Unterseite der Nase und des Fahrzeugbodens entsteht ein Einlass, der die Luft unterhalb des Fahrzeugs beschleunigt und somit den Druck mindert.

Das Chassis an sich produziert wie erwartet Auftrieb. Die Verwendung von Tunneln und Diffusoren im Heck (Variante 4) reduziert den Auftrieb und erzeugt 51,6N Abtrieb. Wenn man den Auftrieb rausrechnet, entwickelt der Unterboden einen Abtrieb von 131,6. Die Variante 3, bei der der Unterboden aus einer ebenen Platte und Diffusoren im Heck besteht, erreicht mit 121,5N fast die gleichen Werte, wirkt sich nicht auf das Package von Kühler und Abgaskrümmen aus und ist deutlich weniger aufwendig in der Fertigung.

Die Verwendung von Abweisern vor den Tunneln bei Variante 5 und 6 mit dem Zweck, mehr Luft in die Tunnel zu leiten und damit eine höhere Geschwindigkeit und somit Unterdruck in den Tunneln zu erzeugen, funktioniert zwar, erzeugt aber weniger Abtrieb als die Variante ohne einen Abweiser. Das liegt daran, dass die Stufe im Chassis durch den Abweiser verdeckt wird und ihre Wirkung nicht entfalten kann.

Die Variante 7 mit kurzen Tunneln unter den Seitenkästen erweist sich als wenig wirksam. Hier fehlt die Saugwirkung, die durch die hinteren Diffusoren entsteht, die wiederum von den Turbulenzen mit niedrigem Druck hinter dem Fahrzeug „abgesaugt“ werden. Beide Effekte treten nicht auf bzw. wirken sich nicht auf die Tunnel aus, sodass die an sich gut funktionierenden kurzen Tunnel nur wenig Abtrieb produzieren.

Während die Varianten 4 bis 7 sehr niedrige Tunnel zur Ausnutzung des Bodeneffekts aufweisen, weist die Variante 8 um 100mm erhöhte und stärker gekrümmte Tunnel unterhalb der Seitenkästen und einen breiten Diffusor im Heckbereich auf. Die Erhöhung hat den Zweck, die Unterseite des Unterbodens weiter von den Wirbeln, die die Vorderräder verursachen, zu entfernen. Des Weiteren wurden bei dieser Variante Abweiser vor den Hinterrädern verwendet, um die Luft über das Rad zu leiten und durch die geschwungene Form dieser Abweiser Abtrieb zu erzeugen. An der Innenseite des Hinterräder wurde eine Schottwand eingefügt, um die Verwirbelungen des Rades und somit die störenden Auswirkungen auf die Abströmung der Tunnel und auf die Anströmung des Diffusors zu unterbinden. Hinter den Hinterrädern wurden Radblenden verwendet mit dem Ziel, durch die geschwungenen Lamellen die Wirbel vom Hinterrad abzusaugen und ihre negative Wirkung in den Bereich hinter dem Fahrzeug zu verlegen. Dadurch lässt sich auch der Widerstand leicht reduzieren (Abb. 137).

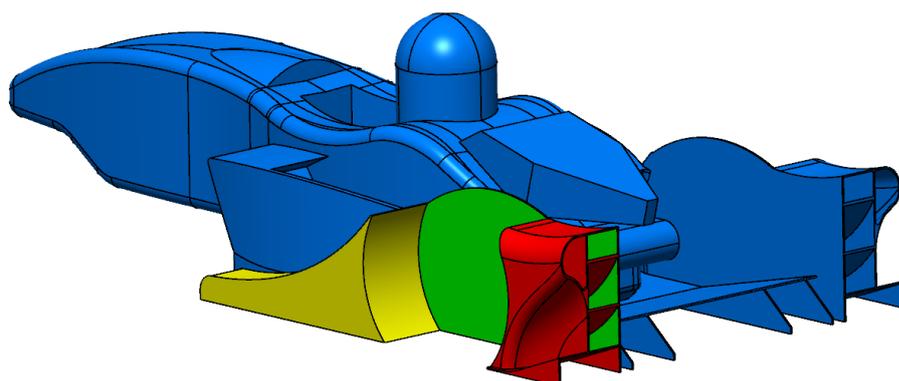


Abb. 137 Darstellung der Zusatzelemente zur Verminderung der Störungen durch das Hinterrad. Gelb: Abweiser vor dem Rad, Grün: Schottwand an der Innenseite des Rads, Rot: Radblende mit Lamellen hinter dem Rad

Das funktioniert auch gut, die Unterseite der Tunnel weist einen niedrigen Druck auf, die Oberfläche der Abdeckungen für die Hinterräder auf der Oberseite zusätzlich Überdruck. Die Schottwand und die Lamellen der Radblende reduzieren die Turbulenzen zwischen den Rädern deutlich. Dadurch können Diffusor und Tunnel besser angeströmt werden und erzeugen mehr Abtrieb als die anderen Varianten.

Dies ist die wirkungsvollste der untersuchten Varianten, sie erschwert aber deutlich das Package für Kühler und Abgaskrümmen. Angesichts des deutlich höheren Fertigungsaufwands und des im Vergleich zu den Abtriebswerten der Flügel geringen 158,3N Abtrieb (auftriebsbereinigt), sollte die Umsetzung dieser Konstruktion für den konkreten Anwendungsfall diskutiert werden.

Die allgemeine und für viele Formula Student Konstrukteure ernüchternde Erkenntnis lautet, dass Unterböden in der Formula Student bei weitem nicht so effektiv sind wie in anderen Rennserien. Die Geschwindigkeit ist einfach zu gering und der Einfluss der Reifen auf die Anströmung der Unterböden zu negativ.

Um diesen etwas abzuschwächen, wurden Radblenden für die Vorderachse entworfen (Abb. 138). Diese sollen direkt am Radträger befestigt werden somit eine Bodenfreiheit von nur wenigen Millimetern aufweisen um so die Wirbel der Reifen nach außen und weg vom Einlass des Unterbodens zu führen.

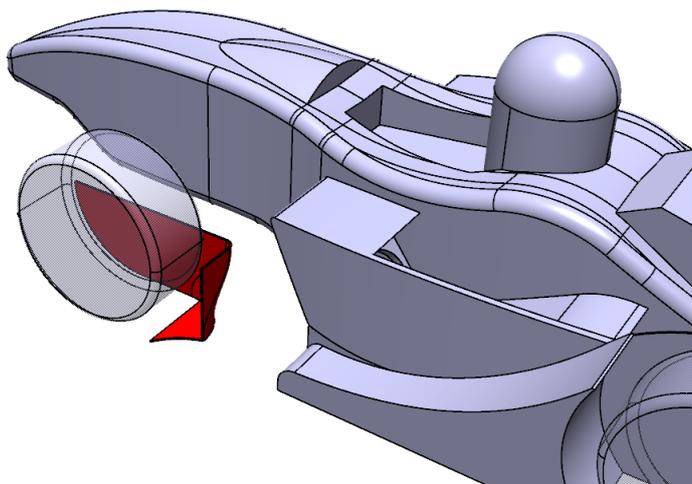


Abb. 138 Darstellung der am Vorderrad befestigten Radblende (rot) zur Verminderung der Störungen durch das Vorderrad

Die Werte für die Unterböden verbesserten sich dadurch um ca. 8% was an den geringen Abtriebswerten der Unterböden aber nicht viel ändert (Abb. 139). Die Radblenden könnten effektiver gestaltet werden, wenn sie nah am Reifen anliegen würden, allerdings verbietet das Reglement Bauteile die sich näher als 70mm an der Lauffläche des Reifens befinden. Durch den Abstand können die Blenden nur begrenzt geformt werden, da sie sonst beim Einlenken des Rades mit dem Chassis kollidieren würden. Feste, am Chassis verbaute Blenden dürften bei Federbewegungen des Fahrzeugs nicht den Boden berühren und müssten eine entsprechende Bodenfreiheit aufweisen, was sie wieder weniger effektiv machen würde.

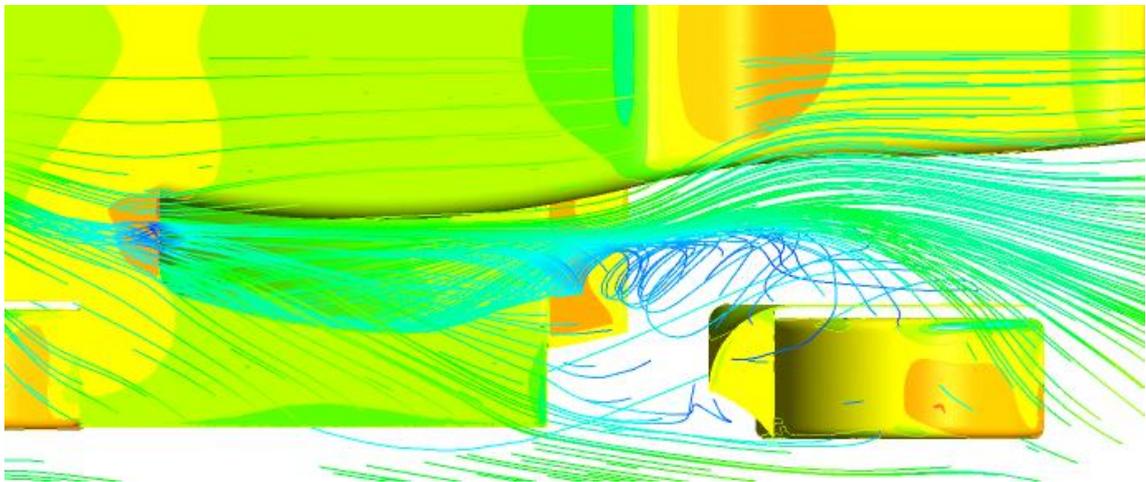


Abb. 139 Darstellungen der durch die Radblende verbesserten Anströmung des Unterbodens. Zu sehen ist hier das linke Vorderrad, die Radblende und der Einlass zum Unterboden. Ansicht von unten, Strömungsrichtung von rechts nach links

9.2.5 Gesamtfahrzeugsimulation

Zur Überprüfung der Funktion aller erstellten Elemente wurde eine Gesamtfahrzeugsimulation mit den besten Varianten für Front- und Heckflügel sowie Chassis mit Unterboden durchgeführt. Dabei wurden für den Frontflügel die Variante 7, für den Heckflügel die Variante 5 und für das Chassis mit Unterboden die Variante 8 zusammengefügt und anschließend mit einem bewegten Fahrbahnboden und drehenden Rädern bei 60 km/h Strömungsgeschwindigkeit berechnet (Abb. 140).

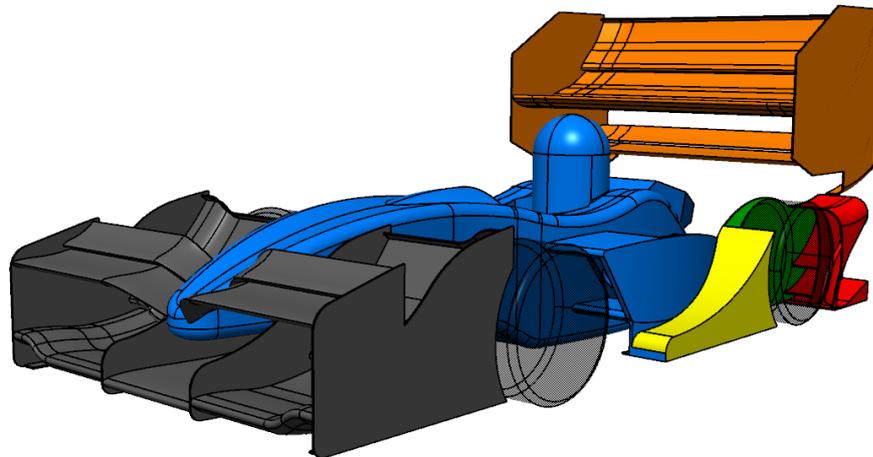


Abb. 140 Darstellung der Kombination aus den besten Einzelkomponenten, Gesamtfahrzeug 1

Bei der Auswertung der Abtriebswerte der einzelnen Komponenten fällt auf, dass der Frontflügel wie auch das Chassis mit Unterboden die Werte aus den Einzelsimulationen bestätigen. Das Chassis erzeugt im Gegensatz zum H08 Abtrieb und dazu ein positives Moment um den Schwerpunkt, das anders als beim H08 sich positiv auf die erwünschte, hecklastige Balance auswirkt. Der Heckflügel dagegen erreicht mit 261N nur rund ein Drittel der ursprünglich berechneten Werte.

Eine Analyse der Stromlinien (Abb. 141, 142) zeigt warum dies der Fall ist. Der Frontflügel funktioniert sehr gut und erzeugt ein großes Unterdruckgebiet unter und hinter sich. Dabei leitet er die Luft so weit nach oben, dass sie auf den Heckflügel trifft. Die stark verwirbelte Luft reduziert die Effizienz des Heckflügels deutlich, da es hier durch die unterschiedlichen Strömungsrichtungen lokal zu Ablösungen und somit zu Abtriebsverlust kommt. Die schlechte Performance des Heckflügels schlägt sich in einer frontlastigen Balance nieder, was zu einem immer mehr übersteuernden Fahrverhalten mit zunehmender Geschwindigkeit führt. Im Vergleich zum H08 erzeugt das hier vorgestellte Fahrzeug aber deutlich mehr Abtrieb. Die gute Balance des H08 verdankt er seinem kleinen Frontflügel und der Entwicklung im Windkanal, bei der die Höhe des Heckflügels anhand der Wirbel des Frontflügels ermittelt wurde.

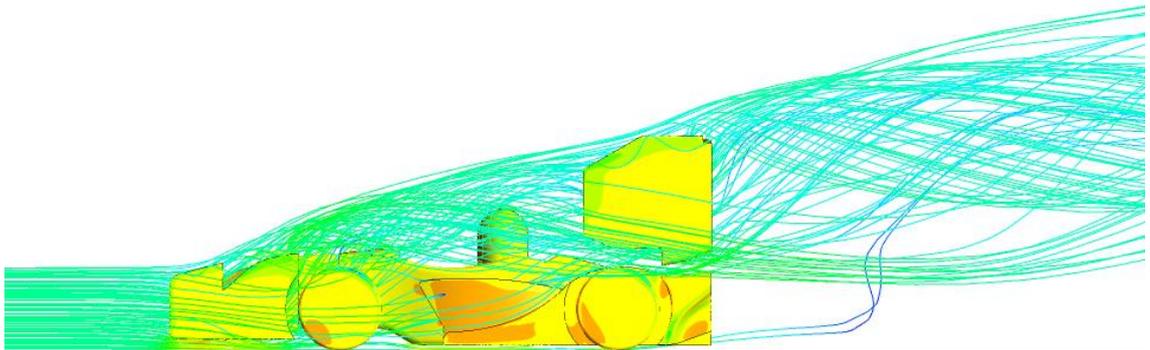


Abb. 141 Stromlinienplot der vom Frontflügel beeinflussten Strömung. Es ist zu erkennen, dass der Heckflügel direkt im Einflussgebiet des Frontflügels liegt. Strömungsrichtung ist von links nach rechts.

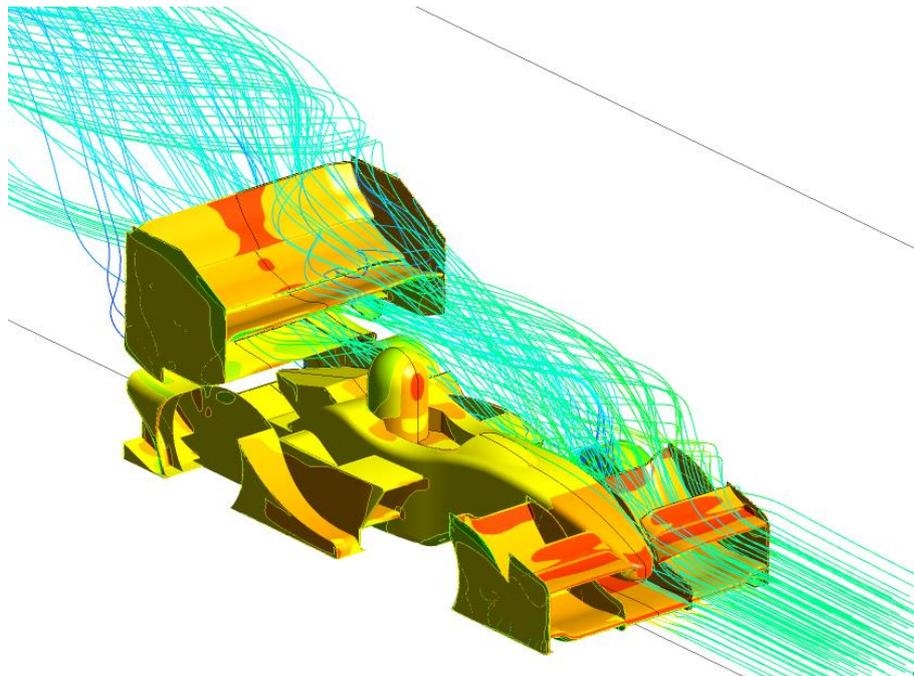


Abb. 142 Darstellung der Druckverteilung auf der Oberfläche des Fahrzeugs. An der hellen Einfärbung des Heckflügels ist zu erkennen, dass der Druck auf seiner Oberseite zu gering ist, diese Fläche wäre sonst dunkelorange eingefärbt gewesen.

Ein weiterer Grund für die schlechte Performance des Heckflügels ist die Unwirksamkeit des Zusatzelements. Druckplots (Abb. 143) zeigen, dass dieses auf seiner Oberseite Unterdruck und auf der Unterseite Überdruck aufweist. Das kommt

durch einen positiven Umstand: Der Unterboden und besonders die Tunnel unter den Seitenkästen funktioniert sehr gut, was Stromlinienplots zeigen. Allerdings leitet er die Luft in einem hohen Winkel auf das Zusatzelement des Heckflügels, wodurch zumindest an den Außenbereichen des Zusatzelements Ablösungen entstehen und somit Auftrieb erzeugt wird.

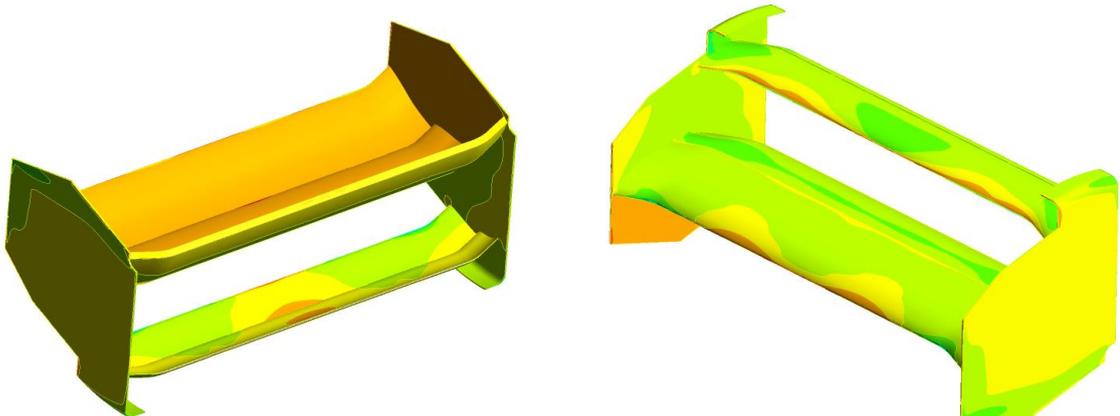


Abb. 143 Darstellung der Druckverteilung des Heckflügels. Links: Ansicht von hinten-oben, rechts: Ansicht von vorn-unten.

Einen positiven Effekt auf den Heckflügel dagegen haben die Radblenden hinter den Hinterrädern. Diese vermindern nicht nur den Einfluss der Hinterräder im Bereich zwischen den Rädern, sondern leiten einen großen Teil der von den Rädern verursachten Verwirbelungen auch von der Unterseite des Heckflügels weg.

Die Auswertung mit dem Excel Tool (Abb. 144) ergibt einen Abtrieb von 183N bei 30 km/h, 733N bei 60 km/h und 2933N bei 120 km/h. Der Widerstand beträgt 86N bei 30 km/h, 343N bei 60 km/ und 1374N bei 120 km/h. Damit ergibt sich ein Abtriebsbeiwert von -2,98 und ein Widerstandsbeiwert von 1,4. Der Abtriebsbeiwert liegt damit unter dem des H08, der Widerstandsbeiwert aber auch. Es ergibt sich eine mögliche Höchstgeschwindigkeit von 125 km/h, die um 8 km/h geringer ist als beim H08. Die Kurvengeschwindigkeit in einer Kurve mit 36m Radius beträgt 109 km/h und liegt damit 6,5 km/h über der des H08. Die maximale Querbeschleunigung liegt bei 2,6g, was eine Verbesserung von 0,3g gegenüber dem H08 ist.

Allerdings wird diese nicht zu erreichen sein, da die Balance durch den schlechten Heckflügel mit nur 48,8% bei 30 km/h, 45,8% bei 60 km/h und 39,4% bei 120 km/h der Gesamtlast auf der Hinterachse deutlich frontlastig ist.

Fahrzeug		HOX_AWA_1								
Setup		Frontflügel Variante 7, Heckflügel Variante 5, Chassis und Unterboden Variante 8								
Eingangsdaten		Einheit	Wert	2. Einheit	Wert	Ausgabedaten				
		Einheit	Wert	2. Einheit	Wert	Einheit	Wert	2. Einheit	Wert	
Fahrzeuggewicht mit Fahrer	kg	300		N	2943	Abtriebsbeiwert Ca	-	-2,98	-	-
Radstand	mm	1650		m	1,65	Widerstandsbeiwert Cw	-	1,40	-	-
Spurweite	mm	1170		m	1,17	Höchstgeschwindigkeit	m/s	34,88	km/h	125,57
Leistung	kW	60		W	60000	Kurvengeschwindigkeit	m/s	30,24	km/h	108,87
Stirnfläche	m ²	1,497		-	-	Querbeschleunigung	m/s ²	25,41	g	2,59
Spanfläche	m ²	3,6		-	-	Balance 30 km/h	%HA	48,76	-	-
Wirkungsgrad Antriebsstrang	-	0,875		-	-	Balance 60 km/h	%HA	45,77	-	-
Lage S in X, Grundbalance	mm	825		% HA	50	Balance 120 km/h	%HA	39,43	-	-
Dichte Luft 25° C	kg/m ³	1,184		-	-					
Kurveninnenradius	m	36		-	-					
Haftbeiwert Reifen-Boden	-	1,4		-	-					

Simulationsergebnisse					Simulationsergebnisse					Simulationsergebnisse							
Geschwindigkeit		km/h	30	m/s	8,3	Geschwindigkeit		km/h	60	m/s	16,7	Geschwindigkeit		km/h	120	m/s	33,3
		FZ	FX	MY				FZ	FX	MY				FZ	FX	MY	
Fahrzeugkörper/Unterboden		-22,08	18,35	4,81		Fahrzeugkörper/Unterboden		-88,30	73,40	19,25		Fahrzeugkörper/Unterboden		-353,20	293,60	77,00	
Frontflügel		-109,50	34,90	-165,10		Frontflügel		-438,00	139,60	-660,38		Frontflügel		-1752,00	558,40	-2641,52	
Heckflügel		-65,25	31,06	93,57		Heckflügel		-261,54	124,25	374,28		Heckflügel		-1046,16	497,00	1497,12	
Vorderräder		8,56	-0,78	6,92		Vorderräder		34,23	-3,10	27,66		Vorderräder		136,92	-12,40	110,64	
Hinterräder		5,06	2,38	-4,28		Hinterräder		20,24	9,50	-17,14		Hinterräder		80,96	38,00	-68,56	
Sonstige 1		0,00	0,00	0,00		Sonstige 1		0,00	0,00	0,00		Sonstige 1		0,00	0,00	0,00	
Sonstige 2		0,00	0,00	0,00		Sonstige 2		0,00	0,00	0,00		Sonstige 2		0,00	0,00	0,00	
Sonstige 3		0,00	0,00	0,00		Sonstige 3		0,00	0,00	0,00		Sonstige 3		0,00	0,00	0,00	

Abtriebskraft gesamt [N]		-183,21				Abtriebskraft gesamt [N]		-733,37				Abtriebskraft gesamt [N]		-2933,48			
Widerstand gesamt [N]			85,91			Widerstand gesamt [N]			343,65			Widerstand gesamt [N]			1374,60		
Moment um Y gesamt [Nm]				-64,08		Moment um Y gesamt [Nm]				-256,33		Moment um Y gesamt [Nm]				-1025,32	
Ca1		-2,98				Ca2		-2,98				Ca3		-2,98			
Cw1			1,40			Cw2			1,40			Cw3			1,40		
X-Abstand S - P [m]				-0,35		X-Abstand S - P [m]				-0,35		X-Abstand S - P [m]				-0,35	
Aerolast HA [N]				-52,77		Aerolast HA [N]				-211,33		Aerolast HA [N]				-845,33	
Aerolast VA [N]	HA/VA	0,40		-130,44		Aerolast VA [N]	HA/VA	0,40		-522,04		Aerolast VA [N]	HA/VA	0,40		-2088,15	
Gesamtlast HA [N]				1524,27		Gesamtlast HA [N]				1682,83		Gesamtlast HA [N]				2316,83	
Gesamtlast VA [N]	HA/VA	0,95		1601,94		Gesamtlast VA [N]	HA/VA	0,84		1993,54		Gesamtlast VA [N]	HA/VA	0,65		3559,65	
Gesamtlast [N]				3126,21		Gesamtlast [N]				3676,37		Gesamtlast [N]				5876,48	
Gesamtlast [kg]				318,676		Gesamtlast [kg]				374,76		Gesamtlast [kg]				599,03	

Abb. 144 Auswertungstool mit den Ergebnissen für das Gesamtfahrzeug 1. Ein größerer Ausdruck befindet sich unter Anhang C.

9.2.6 Iterationsschritte

Nachdem festgestellt wurde, dass der Heckflügel durch den Frontflügel beeinträchtigt wird und die Auswirkungen auf die Balance negativ sind, wurden einige Maßnahmen getroffen, um dem entgegen zu wirken.

Der Frontflügel wurde durch die Variante 5 ersetzt, da durch das Zusatzprofil der Variante 7 die Wirbel hinter dem Frontflügel höher ausfielen. Der Heckflügel wurde durch die Variante 4 ersetzt, da das Zusatzprofil der Variante 5 wirkungslos blieb und sogar Auftrieb produziert hat. Zudem wurde der Heckflügel um 15% vergrößert, um zusätzlichen Abtrieb durch die größere Fläche zu erreichen und um

100mm nach oben versetzt, um mehr Distanz zu den Wirbeln des Fronflügels zu schaffen.

Die so entstandene zweite Variante des Gesamtfahrzeugs wurde wieder bei 60 km/h berechnet (Abb. 145).

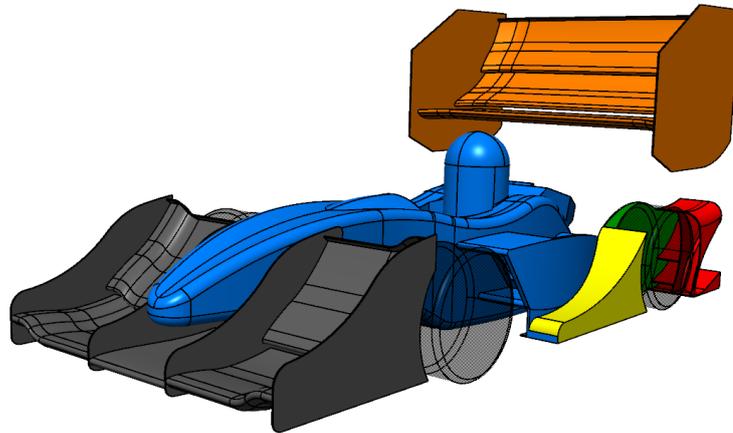


Abb. 145 Geändertes Modell, Gesamtfahrzeug 2

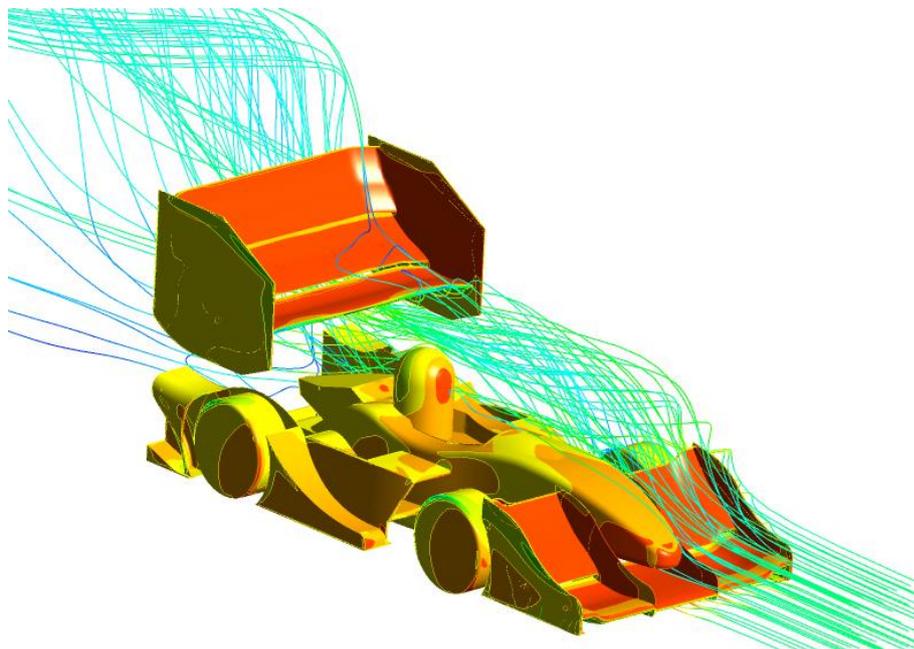


Abb. 146 Darstellung der vom Frontflügel beeinflussten Strömung und der Druckverteilung auf der Oberfläche des Fahrzeugs. Es ist zu erkennen, dass die getroffenen Maßnahmen Wirkung gezeigt haben. Die vom Frontflügel beeinflusste Strömung verläuft nun niedriger und nahezu vollständig unter dem Heckflügel. Die homogene Druckverteilung auf der Oberseite des Heckflügels ist Anzeichen für seine Wirksamkeit.

Die Auswertung der Druckverteilung und Stromlinien (Abb. 146) ergab, dass die Maßnahmen in die richtige Richtung gingen. Eine gleichmäßige Druckverteilung auf der Oberfläche des Heckflügels ist ein Zeichen für eine bessere Anströmung. Die Stromlinien zeigen einen besseren Verlauf, sie führen ähnlich wie beim H08 an der Unterseite des Heckflügels entlang.

Die Auswertung der Werte ergab ein positiveres Bild als bei der ersten Variante des Gesamtfahrzeugs. Die Balance ist zwar immer noch frontlastig, allerdings ist die Verteilung der Gesamtlast mit 49,9% bei 30 km/h, 49,65% bei 60 km/h und 49,2% bei 120 km/h auf der Hinterachse deutlich verbessert worden.

Auch die Leistungswerte konnten deutlich gegenüber dem H08 gesteigert werden (Abb. 147). So beträgt der Gesamtabtrieb 211N bei 30 km/h, 846N bei 60 km/h und 3386N bei 120 km/h. Der Widerstand beträgt 107N bei 30 km/h, 427N bei 60 km/h und 1710N bei 120 km/h. Damit ergibt sich ein Abtriebsbeiwert von -3,31 und der Widerstandsbeiwert von 1,67. Damit lässt sich eine Höchstgeschwindigkeit von 116 km/h erreichen. In einer Kurve mit 36m Radius lässt sich eine Geschwindigkeit von ebenfalls 116 km/h bei einer Querschleunigung von 2,97g erreichen. Damit ist die Kurvengeschwindigkeit gegenüber dem H08 um 13 km/h höher und die Querschleunigung um 0,6g. Das entspricht der Steigerung, die der H08 gegenüber seinem Vorgänger ohne Aerodynamik hatte. Somit wurde ein etwa doppelt so wirksames Aerodynamikpaket kreiert.

Fahrzeug	HOX_AWA_2													
Setup	Frontflügel Variante 6, Heckflügel Variante 4, um 15% vergrößert, 100mm höher, Chassis und Unterboden Variante 8													
Eingangsdaten														
	Einheit	Wert	2. Einheit	Wert	Ausgabedaten	Einheit	Wert	2. Einheit	Wert					
Fahrzeuggewicht mit Fahrer	kg	300	N	2943	Abtriebsbeiwert Ca	-	-3,31	-	-					
Radstand	mm	1650	m	1,65	Widerstandsbeiwert Cw	-	1,67	-	-					
Spurweite	mm	1170	m	1,17	Höchstgeschwindigkeit	m/s	32,43	km/h	116,76					
Leistung	kW	60	W	60000	Kurvengeschwindigkeit	m/s	32,36	km/h	116,51					
Stirnfläche	m²	1,553	-	-	Querbeschleunigung	m/s²	29,09	g	2,97					
Spantfläche	m²	3,6	-	-	Balance 30 km/h	%HA	49,90	-	-					
Wirkungsgrad Antriebsstrang	-	0,875	-	-	Balance 60 km/h	%HA	49,65	-	-					
Lage S in X, Grundbalance	mm	825	% HA	50	Balance 120 km/h	%HA	49,17	-	-					
Dichte Luft 25° C	kg/m³	1,184	-	-										
Kurveninnenradius	m	36	-	-										
Haftbeiwert Reifen-Boden	-	1,4	-	-										
Simulationsergebnisse														
Simulationsergebnisse			Simulationsergebnisse			Simulationsergebnisse								
Geschwindigkeit	km/h	30	m/s	8,3	Geschwindigkeit	km/h	60	m/s	16,7	Geschwindigkeit	km/h	120	m/s	33,3
	FZ	FX	MY			FZ	FX	MY			FZ	FX	MY	
Fahrzeugkörper/Unterboden	-20,59	22,48	2,27		Fahrzeugkörper/Unterboden	-82,34	89,91	9,07		Fahrzeugkörper/Unterboden	-329,36	359,65	36,28	
Frontflügel	-103,98	31,06	-155,47		Frontflügel	-415,92	124,25	-621,86		Frontflügel	-1663,68	497,00	-2487,44	
Heckflügel	-100,35	51,81	146,71		Heckflügel	-401,38	207,24	586,82		Heckflügel	-1605,52	828,96	2347,28	
Vorderräder	7,44	-0,35	6,00		Vorderräder	29,74	-1,41	24,00		Vorderräder	118,96	-5,64	96,00	
Hinterräder	5,86	1,85	-4,95		Hinterräder	23,42	7,40	-19,80		Hinterräder	93,68	29,60	-79,20	
Sonstige 1	0,00	0,00	0,00		Sonstige 1	0,00	0,00	0,00		Sonstige 1	0,00	0,00	0,00	
Sonstige 2	0,00	0,00	0,00		Sonstige 2	0,00	0,00	0,00		Sonstige 2	0,00	0,00	0,00	
Sonstige 3	0,00	0,00	0,00		Sonstige 3	0,00	0,00	0,00		Sonstige 3	0,00	0,00	0,00	
Abtriebskraft gesamt [N]	-211,62				Abtriebskraft gesamt [N]	-846,48				Abtriebskraft gesamt [N]	-3385,92			
Widerstand gesamt [N]		106,85			Widerstand gesamt [N]		427,39			Widerstand gesamt [N]		1709,57		
Moment um Y gesamt [Nm]			-5,44		Moment um Y gesamt [Nm]			-21,77		Moment um Y gesamt [Nm]			-87,08	
Ca1	-3,31				Ca2	-3,31				Ca3	-3,31			
Cw1		1,67			Cw2		1,67			Ca3		1,67		
X-Abstand S - P [m]			-0,03		X-Abstand S - P [m]			-0,03		X-Abstand S - P [m]			-0,03	
Aerolast HA [N]			-102,51		Aerolast HA [N]			-410,05		Aerolast HA [N]			-1640,18	
Aerolast VA [N]	HA/VA	0,94	-109,11		Aerolast VA [N]	HA/VA	0,94	-436,43		Aerolast VA [N]	HA/VA	0,94	-1745,74	
Gesamtlast HA [N]			1574,01		Gesamtlast HA [N]			1881,55		Gesamtlast HA [N]			3111,68	
Gesamtlast VA [N]	HA/VA	1,00	1580,61		Gesamtlast VA [N]	HA/VA	0,99	1907,93		Gesamtlast VA [N]	HA/VA	0,97	3217,24	
Gesamtlast [N]			3154,62		Gesamtlast [N]			3789,48		Gesamtlast [N]			6328,92	
Gesamtlast [kg]			321,572		Gesamtlast [kg]			386,29		Gesamtlast [kg]			645,15	

Abb. 147 Auswertungstool mit den Ergebnissen für das Gesamtfahrzeug 2. Ein größerer Ausdruck befindet sich unter Anhang D.

Durch weitere Iterationen können die Leistungswerte noch weiter gesteigert werden, und die Balance in den gewünschten, hecklastigen Bereich verschoben werden. Durch Änderungen der Anstellwinkel der Flügel, der Höhen der Gurney Flaps, Montage von zusätzlichen Luftleitelementen wie Tauchplatten kann die Aerobalance beeinflusst werden. Leider würden weitere Variationen der Konstruktion und deren Berechnung den zeitlichen Rahmen dieser Arbeit sprengen.

Sobald die Simulationen mit zufriedenstellenden Ergebnissen abgeschlossen sind, sollte ein Prototyp gefertigt und bei Testfahrten validiert werden. Auch wenn die hier vorgestellten Simulationen und Berechnungen sehr genau sind, so bleiben es Simulationen der Realität. Und nichts kann die Realität besser simulieren, als die Realität selbst.

10 Fazit

Die Aerodynamik ist für den Motorsport ein sehr wichtiges Entwicklungsfeld. Selbst bei sehr langsamen Geschwindigkeiten, wie sie in der Formula Student vorkommen, kann sie große Leistungssteigerungen der Fahrzeuge bewirken. Allerdings ist die Aerodynamik keine reine Rechenwissenschaft, das Verständnis der ablaufenden Vorgänge bedarf einer aufgeschlossenen, kreativen und abstrakten Denkweise. Die Wahl der eingesetzten Mittel ist für jeden Einsatzzweck eine andere. Was im professionellen Motorsport funktioniert, muss nicht für kleinere Rennsportklassen gelten, das gleiche gilt auch anders herum.

Sie ist eine sehr komplexe Wissenschaft, was die Entwicklung eines Aeropackets gerade für unerfahrene Anwender vor eine sehr große Aufgabe stellt, noch mehr, wenn die Entwicklungszeit wie in der Formula Student nur kurz ist.

Diese Arbeit soll daher einen roten Faden für unerfahrene Konstrukteure bilden. Mit der Vorstellung der theoretischen Grundlagen, der geschichtlichen und technischen Entwicklung im Motorsport wird ein Grundstein für das Verständnis der ablaufenden Vorgänge und Mechanismen gelegt. Die Beleuchtung des speziellen Anwendungsfalls legt die Besonderheiten der Formula Student offen und soll das Auge für das Wesentliche schärfen. Die hier vorgestellte Entwicklung stellt eine mögliche Vorgehensweise zur Entwicklung eines Aeropackets dar. Selbst wenn die hier aufgestellten Behauptungen und Erkenntnisse in Frage gestellt werden oder z.B. durch Reglementänderungen nicht mehr gelten, erlaubt die in dieser Arbeit entwickelte Simulationsprozedur, in kurzer Zeit verschiedene Konzepte und Ideen, von denen ein unerfahrener aber ambitionierter Konstrukteur sehr viele haben kann, auf ihre Funktionalität zu prüfen und mit einander zu vergleichen. Die Prozedur ist auf die schnelle Beschaffung von ausreichend realistischen Ergebnissen und Daten ausgelegt, die Klickanleitung bietet aber auch die Möglichkeit, die Genauigkeit der Ergebnisse auf Kosten der Berechnungsdauer zu erhöhen. Mit dem Auswertungstool können zudem aus den berechneten Daten einfach und anschaulich die Auswirkungen der Konstruktion auf die Fahrleistungen eines konkreten Fahrzeugs ermittelt werden.

Es ist viel Fachliteratur und viele Arbeiten zur Entwicklungen in der Aerodynamik für den allgemeinen Motorsport, zur Strömungsuntersuchungen und zu einzelnen aerodynamischen Aspekten in der Formula Student vorhanden und auch zugänglich. Literatur zum gesamten Ablauf der Entwicklung für die Formula Student existiert dagegen nicht. Diese Arbeit schließt diese Lücke und stellt eine Grundlage für zukünftige Entwicklungen des Formula Student Projekts der HAW Hamburg dar.

11 Quellenverzeichnis

- [ABT10] **<http://www.abtrieb.com>**. 2010. [Online]. [Zitat vom 01.03.2014]
<http://www.abtrieb.com/content/media/Image/abtrieb/limo-500.jpg>
- [AIR13] **<http://www.airfoildb.com>**. 2013. [Online]. [Zitat vom 04.03.2014].
<http://www.airfoildb.com/foils/335>
- [ANS09] **ANSYS Inc..** *ANSYS CFX - Solver Modeling Guide*. ANSYS Inc.. 2009
- [ANS11] **ANSYS Inc..** *ANSYS FLUENT Tutorial Guide*. ANSYS Inc.. 2011.
- [AUC14] **University of Auckland Formula SAE Team**. 2014. [Online]. [Zitat vom 26.03.2014]. <https://www.facebook.com/UoAfsae>
- [AUT10] **<http://www.autoevolution.com>**. 2010. [Online]. [Zitat vom 18.03.2014]. <http://www.autoevolution.com/news-image/automotive-wind-tunnels-making-aerodynamic-cars-23250-2.html>
- [AUT12] **www.autoviva.com**. 2012. [Online]. [Zitat vom 02.03.2014].
http://www.autoviva.com/img/photos/275/big_98275.jpg
- [AUT14] **<http://autoreader.net>**. 2014. [Online]. [Zitat vom 20.03.2014].
<http://autoreader.net/pictures/carlsson-mercedes-benz-slk-race-car/carlsson-mercedes-benz-slk-race-car-wallpaper-03.html>
- [AVI03] **www.aviation4u.de**. 2003. [Online]. [Zitat vom 23.02.2014].
<http://www.aviation4u.de/school>
- [BAS11] **Andrew Basterfield**. 2011. [Online]. [Zitat vom 15.03.2014].
http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Peugeot_905_Evo_1B_-_Flickr_-_andrewbasterfield.jpg
- [BAT14] **Team Bath Racing**. 2014. [Online]. [Zitat vom 15.03.2014].
<https://www.facebook.com/teambathr>
- [BIN14] BINE Informationsdienst. 2014. [Online]. [Zitat vom 23.02.2014].
http://www.bine.info/fileadmin/content/Publikationen/Basis_Energie/Basis_Energie_Nr._02/BasisEnergie02_1999_04.gif

- [CAL13] **Alan Ko.** *Unmanned Aerial Vehicle Platform*. California State University, Los Angeles. 2013. [Online]. [Zitat vom 22.03.2014]. <http://www.calstatela.edu/sites/default/files/centers/aic/aic/images/autopilot02.png>
- [CHA11] **Soheil Bashirinia, Nino Katadzic, Kristian Malbakken, Erik Stendal, William Ullgren.** *PANS simulations of the flow around a rotating wheel*. Chalmers University of Technology. 2011
- [CLO12] **<http://cloudlakes.com>.** 2013. [Online]. [Zitat vom 15.03.2014]. <http://cloudlakes.com/gallery/2692024-chaparral-2j.html>
- [COL12] **Keith Collantine.** 2012. [Online]. [Zitat vom 16.03.2014]. <http://cloudlakes.com/gallery/2692024-chaparral-2j.html>
- [COM12] **Comsol Multiphysics GmbH.** *Airflow Over an Ahmed Body*. COMSOL. 2012.
- [CON14] **<http://www.conceptcarz.com>.** 2014. [Online]. [Zitat vom 19.03.2014]. http://www.conceptcarz.com/view/photo/245166,1355/1996-Suzuki-Escudo-Pikes-Peak-Version_photo.aspx
- [DAL06] **DALCO AG Switzerland.** 2006. [Online]. [Zitat vom 22.03.2014]. [http://www.dalco.ch/news/pictures/albert_sup2/?tx_gooffotoboek_pi1\[fid\]=10](http://www.dalco.ch/news/pictures/albert_sup2/?tx_gooffotoboek_pi1[fid]=10)
- [DEM11] **Dr.-Ing. Rainer Demuth.** *Aerodynamik von Hochleistungsfahrzeugen Vorlesungsskript*. TU München. 2011
- [DUT13] **DUT Racing Team.** 2013. [Online]. [Zitat vom 10.03.2014]. www.dutracing.nl
- [ECO13] **<http://ecomodder.com>.** 2013. [Online]. [Zitat vom 18.03.2014]. <http://ecomodder.com/forum/showthread.php/random-wind-tunnel-smoke-pictures-thread-26678-4.html>

- [F1F13] **<http://www.f1fanatic.co.uk>**. 2013. [Online]. [Zitat vom 16.03.2014]. <http://www.f1fanatic.co.uk/2012/07/01/1970s-f1-cars-2012-goodwood-festival-speed/marc-701-good-2012-1/>
- [F1T11] **<http://www.f1technical.net>**. 2011. [Online]. [Zitat vom 10.03.2014]. <http://www.f1technical.net/forum/viewtopic.php?f=6&t=10943&start=90>
- [F1T14] **<http://www.f1technical.net>**. 2014. [Online]. [Zitat vom 19.03.2014]. <http://www.f1technical.net/forum/viewtopic.php?f=6&t=16453&start=90>
- [FAV13] **<http://www.favcars.com>**. 2013. [Online]. [Zitat vom 02.03.2014]. http://img.favcars.com/honda/formula-1/wallpapers_honda_formula_1_1968_1.jpg
- [FER99] **Joel H. Ferziger, Milovan Peric**. *Computational Methods for Fluid Dynamics*. Springer. 1999
- [FIA13] **Federation Internationale de l'Automobile**. *2013 Formula One Technical Regulations*. FIA. 2013
- [FOR14] **www.formula1-dictionary.net**. 2014. [Online]. [Zitat vom 02.03.2014]. <http://www.formula1-dictionary.net>
- [FRE13] **Walter Frei, COMSOL**. *Which Turbulence Model Should I Choose for my CFD Application?*. COMSOL. 2014
- [FSG13] **Formula Student Germany**. 2013. [Online]. [Zitat vom 10.03.2014]. www.formulastudent.de
- [FUE12] **<http://fuel-community.com>**. 2012. [Online]. [Zitat vom 20.03.2014]. <http://fuel-community.com/?q=node/98>
- [FUL11] **Michael J. Fuller**. *Mulsannes Corner Prototype Technical*. 2011. [Online]. <http://www.mulsannescorner.com/>
- [GRA14] **Will Gray**. *Formula One Technical Analysis*. 2014. [Online]. [Zitat vom 12.03.2014]. <http://atlasf1.autosport.com/2000/feb23/gray.html>
- [HAW12] **HAWKS Racing Team**. 2012

- [HEP06] **Martin Hepperle.** *Aerodynamics of Model Aircraft.* 2006. [Online]. [Zitat vom 12.03.2014]. <http://www.mhaerotools.de/airfoils/javafoil>
- [HSB96] **Hochschule Bremen.** *Aspekte reibungsbehafteter Strömungen.* Hochschule Bremen. 1996. [Online]. [Zitat vom 23.02.2014]. <http://homepages.hs-bremen.de>
- [IMA10] **www.imagenesygraficos.com.** 2010. [Online]. [Zitat vom 27.02.2014]. www.imagenesygraficos.com/fondos-escritorio/data/media/24/1936-auto-union-type-c-streamline-geneve2009-0412.jpg
- [IMP14] **http://www.importtuner.com.** 2014. [Online]. [Zitat vom 19.03.2014]. http://www.importtuner.com/features/1310_gta_super_lap_battle/photo_09.html
- [KAT06] **Joseph Katz.** *Race Car Aerodynamics.* Bentley Publishers. 2006
- [LAN05] **Marco Lanfrit.** *Best Practice Guidelines For Handling Automotive External Aerodynamics With FLUENT.* Fluent Deutschland GmbH. 2005
- [LES90] **Marcel Lesieur.** *Turbulence in Fluids - Stochastic and Numerical Modelling.* Kluwer Academic Publishers. 1990
- [LOM12] **Frank Lombardi.** *Tail Feathers and the Gurney Flap.* 2012. [Online]. [Zitat vom 06.03.2014]. http://www.aviationtoday.com/rw/services/other/Tail-Feathers-and-the-Gurney-Flap_76081.html#.UzRip1cSBmo
- [MCB98] **Simon McBeath.** *Competition Car Downforce.* Haynes Publishing. 1998
- [MCB11] **Simon McBeath.** *Competition Car Aerodynamics.* Haynes Publishing. 2011

- [MCM06] **James McManus, Xin Zhang.** *A Computational Study of the Flow Around an Isolated Wheel in Contact With the Ground.* University of Southampton. 2006
- [MIL95] **William F. Milliken, Douglas L. Milliken.** *Race Car Vehicle Dynamics.* SAE International. 1995
- [MON14] **Monash Motorsport.** 2014. [Online]. [Zitat vom 15.03.2014]. <https://www.facebook.com/monashmotorsport>
- [MOR13] **Morio.** 2013. [Online]. [Zitat vom 15.03.2014]. http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Williams_FW15C_rear_wing_Donington_Grand_Prix_Collection.jpg
- [MOT14] **<http://motorsport-total.com>.** 2014. [Online]. [Zitat vom 17.03.2014]. http://www.motorsport-total.com/f1/news/2012/06/Formel-1-Teams_im_dreifachen_Entwicklungsstress_12062506.html
- [MUK13] **Subhayan Mukerjee.** 2013. [Online]. [Zitat vom 15.03.2014]. <http://epic-formula1.blogspot.de/2013/06/brabhams-fancar-anderstorp-1978.html>
- [NAC28] **National Advisory Committee for Aeronautics.** 1928. [Online]. [Zitat vom 08.03.2014]. http://www.youtube.com/watch?v=q_eMQvDoDWk
- [NAS09] **<http://forums.nasioc.com>.** 2014. [Online]. [Zitat vom 15.03.2014]. <http://forums.nasioc.com/forums/showthread.php?t=1801272>
- [NAS12] **www.nascarnation.us.** 2012. [Online]. [Zitat vom 26.02.2014]. http://api.ning.com/files/135amrXFp4W9vL-UKzwRaHA*5s-uRMWhI7t4yOlrXDddxpMV3xdG6fTabZtQXY34jUnKrWVUdyO7CMJ0fIY4nL6sHRlj4p5w/aerodraft.png
- [PAU12] **PaulsF1.** *Lotus 79 Construction Report Part 1.* 2012. [Online]. <http://paulsf1.wordpress.com/2012/03/03/lotus-79-construction-report-part-1/>

- [PIC10] **<http://pickle92.wordpress.com>**. 2010. [Online]. [Zitat vom 12.03.2014].
http://pickle92.files.wordpress.com/2010/06/ept_sports_nascar_marbles-518590235-12752559051.jpg
- [PIL09] **<http://www.pilles.at>**. 2009. [Online]. [Zitat vom 27.02.2014].
http://www.pilles.at/comenius/2007/images/sascha_race_car.jpg
- [PIS09] **<http://www.pistonheads.com>**. 2009. [Online]. [Zitat vom 19.03.2014].
http://i116.photobucket.com/albums/o37/SchumiFan777/Cool%20Motorsport%20PH/65719_87ES-B177_122_86lo.jpg
- [RAC12] **<http://racingengineering.tumblr.com>**. 2012. [Online]. [Zitat vom 14.03.2014].
<http://racingengineering.tumblr.com/post/26239061046/lotus78-79>
- [RAC13] **<http://www.racingblog.de>**. 2013. [Online]. [Zitat vom 15.03.2014].
<http://www.racingblog.de/2013/06/17/dtm-analyse-lausitzring-2013/>
- [RCE13] **Race Car Engineering**. *Lotus E21*. 2013. [Online].
<http://www.racecar-engineering.com/cars/lotus-e21/>
- [SAE10] **SAE International**. *FSAE Rules 2010*. SAE International. 2010
- [SAE13] **SAE International**. *FSAE Rules 2013*. SAE International. 2013
- [SCA11] **<http://scarbsf1.com>**. 2011. [Online]. [Zitat vom 19.03.2014].
<http://scarbsf1.com/blog1/2011/08/08/analysis-mclarens-rear-wing-vapour-trails/>
- [SCH06] **Hermann Schlichting, Klaus Gersten**. *Grenzschicht-Theorie*. Springer. 2006
- [SCH08] **F. F. J. Schrijer, F. Scarano**. *Effect of predictor–corrector filtering on the stability and spatial resolution of iterative PIV interrogation*. Springer. 2008
- [SKY08] **<http://www.skytamer.com>**. 2008. [Online]. [Zitat vom 13.03.2014].
<http://www.skytamer.com/1.2/2000/0511.jpg>

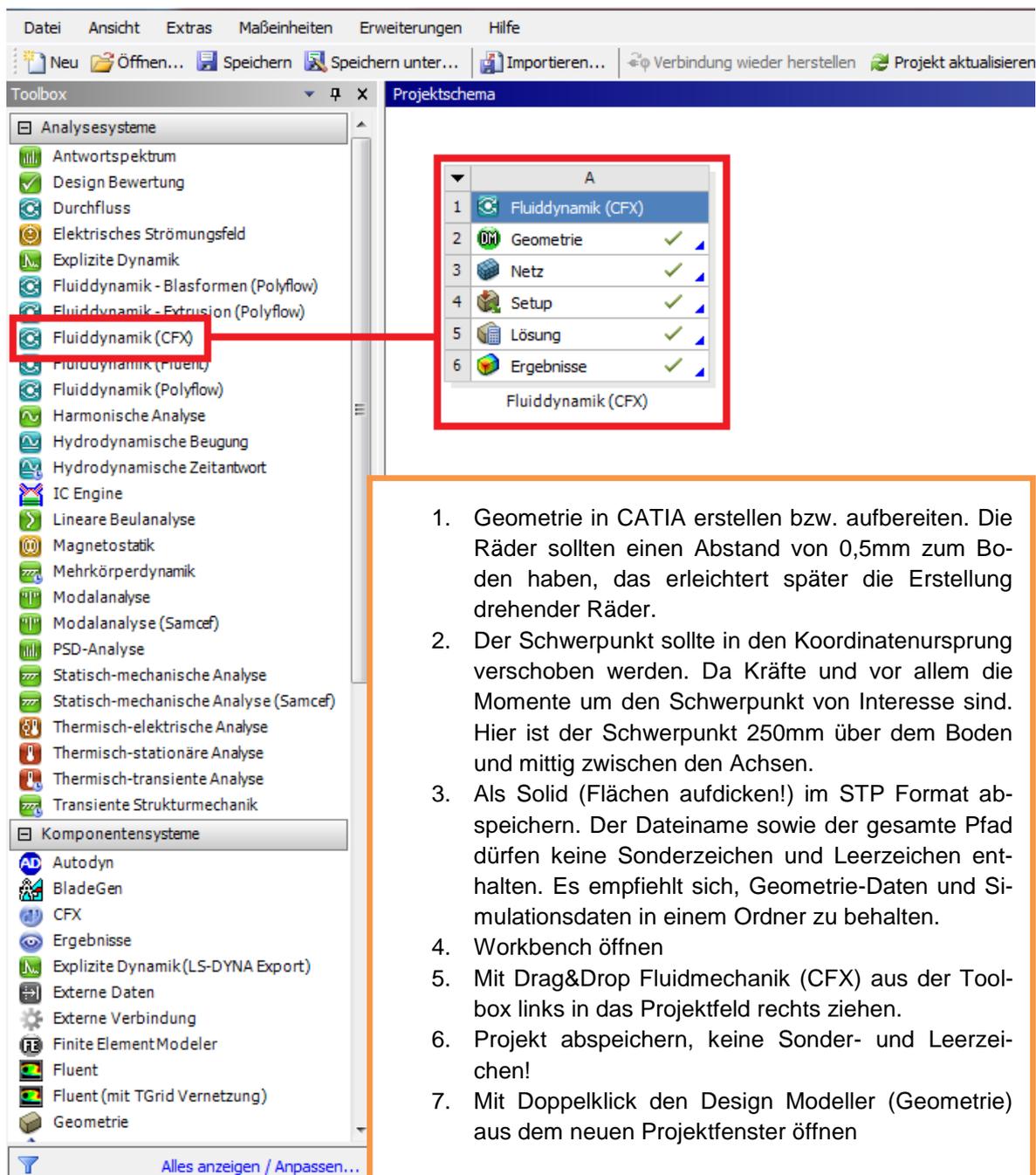
- [SOO13] **Sooner Racing Team.** 2013. [Online]. [Zitat vom 10.03.2014].
www.sae.ou.edu
- [SPE14] **<http://www.speedcreed.net>.** 2014. [Online]. [Zitat vom 15.03.2014].
<http://www.speedcreed.net/forums/t945/>
- [STU08] **Gordon D. Stublely.** *ANSYS CFX Student User Manual.* University of Waterloo. 2008
- [SUB14] **<http://www.sub5zero.com>.** 2014. [Online]. [Zitat vom 13.03.2014].
<http://www.sub5zero.com/volkswagen-beetle-global-rallycross-bound-andretti-autosport/>
- [TRE11] **Michael Trzesniowski.** *Rennwagentechnik.* Springer. 2011
- [TYP13] **www.type550.com.** 2013. [Online]. [Zitat vom 02.03.2014].
<http://type550.com/wp/wp-content/uploads/2009/10/PICT5936.jpg>
- [TZM14] **TZ München.** 2014. [Online]. [Zitat vom 20.03.2014].
<http://www.tz.de/sport/mehr/das-sind-flitzer-neuen-formel-e-zr-3302695.html>
- [ULT07] **<http://www.ultimatecarpage.com>.** 2007. [Online]. [Zitat vom 18.03.2014].
http://www.ultimatecarpage.com/pic/1882/BAR-006-Honda_10.html
- [UWA13] **UWA Motorsport Team.** 2013. [Online]. [Zitat vom 14.03.2014].
<https://www.facebook.com/uwamotorsport>
- [WAL09] **<http://wall4all.me>.** 2009. [Online]. [Zitat vom 02.03.2014].
<http://wall4all.me/walls/cars/lancia-lancia-stratos-lancia-stratos-914370-3872x2592.jpg>
- [WAL13] **Andreas Walter.** *Entwurf eines Aeropackets für ein Formula Student Fahrzeug.* HAW Hamburg. 2013
- [WES03] **Gerhard Wesp.** *Auftrieb und Widerstand.* 2003
- [WIK11] **<http://de.wikipedia.org>.** 2011. [Online]. [Zitat vom 15.03.2014].
http://de.wikipedia.org/wiki/Drag_Reduction_System

- [WIK13] **<http://en.wikipedia.org>**. 2013. [Online]. [Zitat vom 02.03.2014].
http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/2d/Chaparral_2F_-_Mike_Spence_-_1967.jpg
- [WRI12] **Simon Wright. Classic and Competition Car**. 2012. [Online].
www.simonwrightphotos.com

Anhang A

Klickanleitung für die Simulationsprozedur

1 Projekt starten



The screenshot shows the CATIA software interface. On the left is the 'Toolbox' with a list of analysis systems. 'Fluidodynamik (CFX)' is highlighted with a red box. On the right is the 'Projektschema' (Project Scheme) window, which shows a sequence of steps: 1. Fluidodynamik (CFX), 2. Geometrie, 3. Netz, 4. Setup, 5. Lösung, 6. Ergebnisse. The first step is also highlighted with a red box. A red arrow points from the highlighted 'Fluidodynamik (CFX)' in the toolbox to the highlighted 'Fluidodynamik (CFX)' in the project schema.

1. Geometrie in CATIA erstellen bzw. aufbereiten. Die Räder sollten einen Abstand von 0,5mm zum Boden haben, das erleichtert später die Erstellung drehender Räder.
2. Der Schwerpunkt sollte in den Koordinatenursprung verschoben werden. Da Kräfte und vor allem die Momente um den Schwerpunkt von Interesse sind. Hier ist der Schwerpunkt 250mm über dem Boden und mittig zwischen den Achsen.
3. Als Solid (Flächen aufdicken!) im STP Format abspeichern. Der Dateiname sowie der gesamte Pfad dürfen keine Sonderzeichen und Leerzeichen enthalten. Es empfiehlt sich, Geometrie-Daten und Simulationsdaten in einem Ordner zu behalten.
4. Workbench öffnen
5. Mit Drag&Drop Fluidmechanik (CFX) aus der Toolbox links in das Projektfeld rechts ziehen.
6. Projekt abspeichern, keine Sonder- und Leerzeichen!
7. Mit Doppelklick den Design Modeller (Geometrie) aus dem neuen Projektfenster öffnen

2 Geometrie erstellen

2.1 Windtunnel definieren

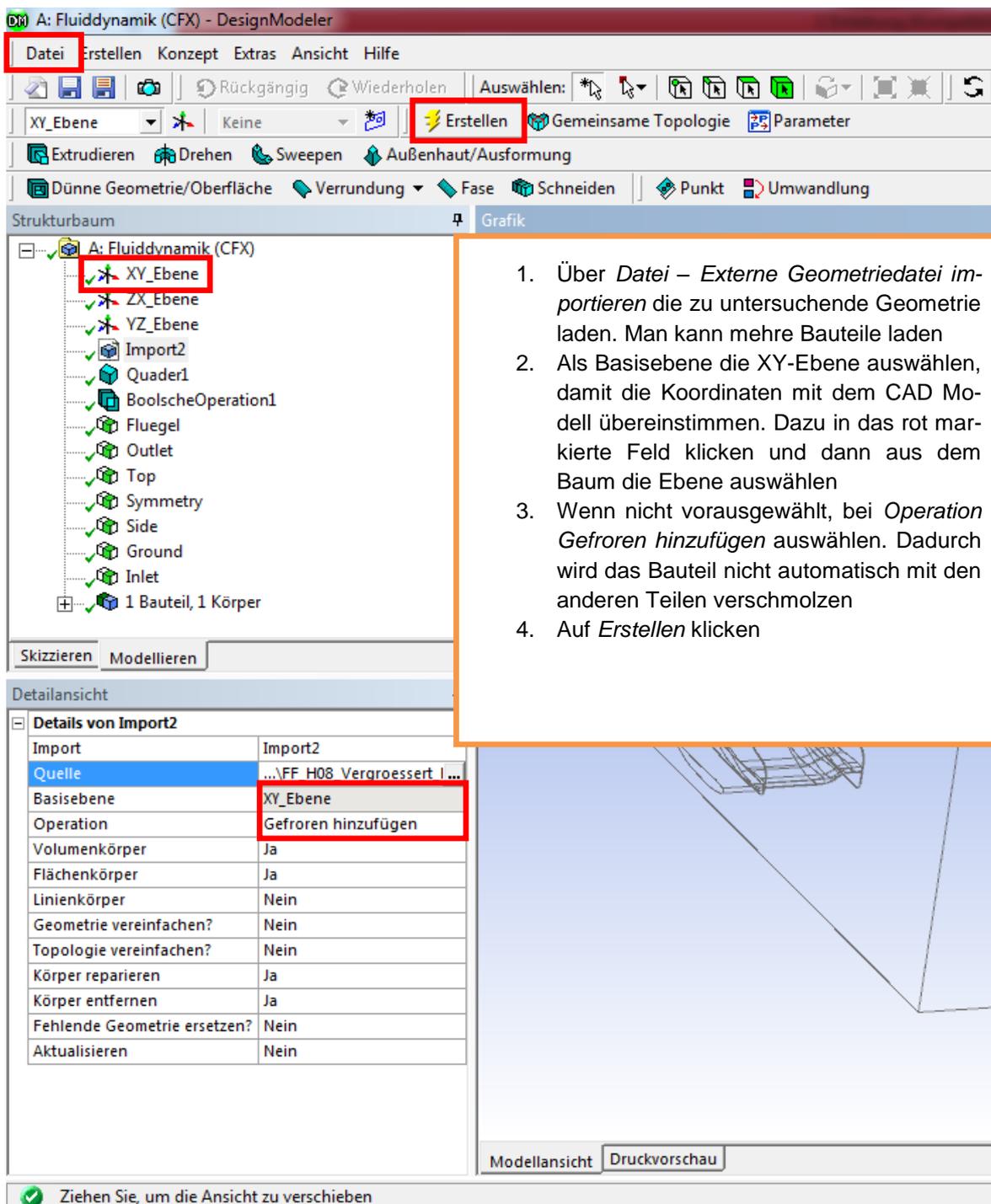
The screenshot shows the SolidWorks Design Modeler interface for a fluid dynamics simulation. The 'Erstellen' (Create) button is highlighted in the ribbon. The 'Strukturbaum' (Structure Tree) shows a 'Quader1' (Box1) feature. The 'Details von Quader1' table is shown below, with the Z-coordinate of the bottom point highlighted in red.

Details von Quader1	
Quader	Quader1
Basisebene	XY_Ebene
Operation	Material hinzufügen
Quadertyp	Von einem Punkt und Diagonale
Definition Punkt 1	Koordinaten
<input type="checkbox"/> FD3, Punkt 1 X-Koordinate	-4000 mm
<input type="checkbox"/> FD4, Punkt 1 Y-Koordinate	-4000 mm
<input type="checkbox"/> FD5, Punkt 1 Z-Koordinate	-250 mm
Definition Diagonale	Komponenten
<input type="checkbox"/> FD6, Diagonale X-Komponente	12000 mm
<input type="checkbox"/> FD7, Diagonale Y-Komponente	4000 mm
<input type="checkbox"/> FD8, Diagonale Z-Komponente	4000 mm
Als dünne Geometrie/Oberfläche?	Nein

1. Über *Erstellen* – *Grundelemente-Quader* einen Quader erstellen. Die Werte wie in der roten Box eintragen, hier ist der Schwerpunkt 250mm über dem Boden, daher ist beim Z-Wert (kleine rote Box) - 250 mm eingetragen.

2. Auf *Erstellen* klicken

2.2 Geometrie importieren



The screenshot shows the ANSYS DesignModeler interface. The 'Datei' menu is highlighted in red. The 'Erstellen' button in the toolbar is also highlighted in red. The 'Strukturbaum' (Structure Tree) on the left shows a list of objects, with 'XY_Ebene' highlighted in red. The 'Detailansicht' (Detail View) for 'Import2' is shown below, with the 'Basisebene' (Base Plane) set to 'XY_Ebene' and the 'Operation' set to 'Gefroren hinzufügen' (Frozen to add), both highlighted in red.

1. Über *Datei* – *Externe Geometriedatei importieren* die zu untersuchende Geometrie laden. Man kann mehrere Bauteile laden

2. Als Basisebene die XY-Ebene auswählen, damit die Koordinaten mit dem CAD Modell übereinstimmen. Dazu in das rot markierte Feld klicken und dann aus dem Baum die Ebene auswählen

3. Wenn nicht vorausgewählt, bei *Operation Gefroren hinzufügen* auswählen. Dadurch wird das Bauteil nicht automatisch mit den anderen Teilen verschmolzen

4. Auf *Erstellen* klicken

Details von Import2	
Import	Import2
Quelle	...:\FF H08 Vergroessert I...
Basisebene	XY_Ebene
Operation	Gefroren hinzufügen
Volumenkörper	Ja
Flächenkörper	Ja
Linienkörper	Nein
Geometrie vereinfachen?	Nein
Topologie vereinfachen?	Nein
Körper reparieren	Ja
Körper entfernen	Ja
Fehlende Geometrie ersetzen?	Nein
Aktualisieren	Nein

Ziehen Sie, um die Ansicht zu verschieben

2.3 Geometrie vereinigen

Strukturbaum

- A: Fluiddynamik (CFX)
 - XY_Ebene
 - ZX_Ebene
 - YZ_Ebene
 - Import2
 - Quader1
 - BoolescheOperation1
 - Fluegel
 - Outlet
 - Top
 - Symmetry
 - Side
 - Ground
 - Inlet
 - 2 Bauteile, 2 Körper
 - Part2
 - Volumenkörper

Details von BoolescheOperation1

Boolesche Operation	BoolescheOperation1
Operation	Subtraktion
Zielkörper	1 Körper
Tool-Körper	1 Körper
Tool-Körper beibehalten?	Nein

1. Über Erstellen – Boolesche Operation
Boolesche Operationen auswählen

2. Unter Operation Subtraktion auswählen

3. In das Feld Zielkörper klicken und den Volumenkörper (Quader) auswählen

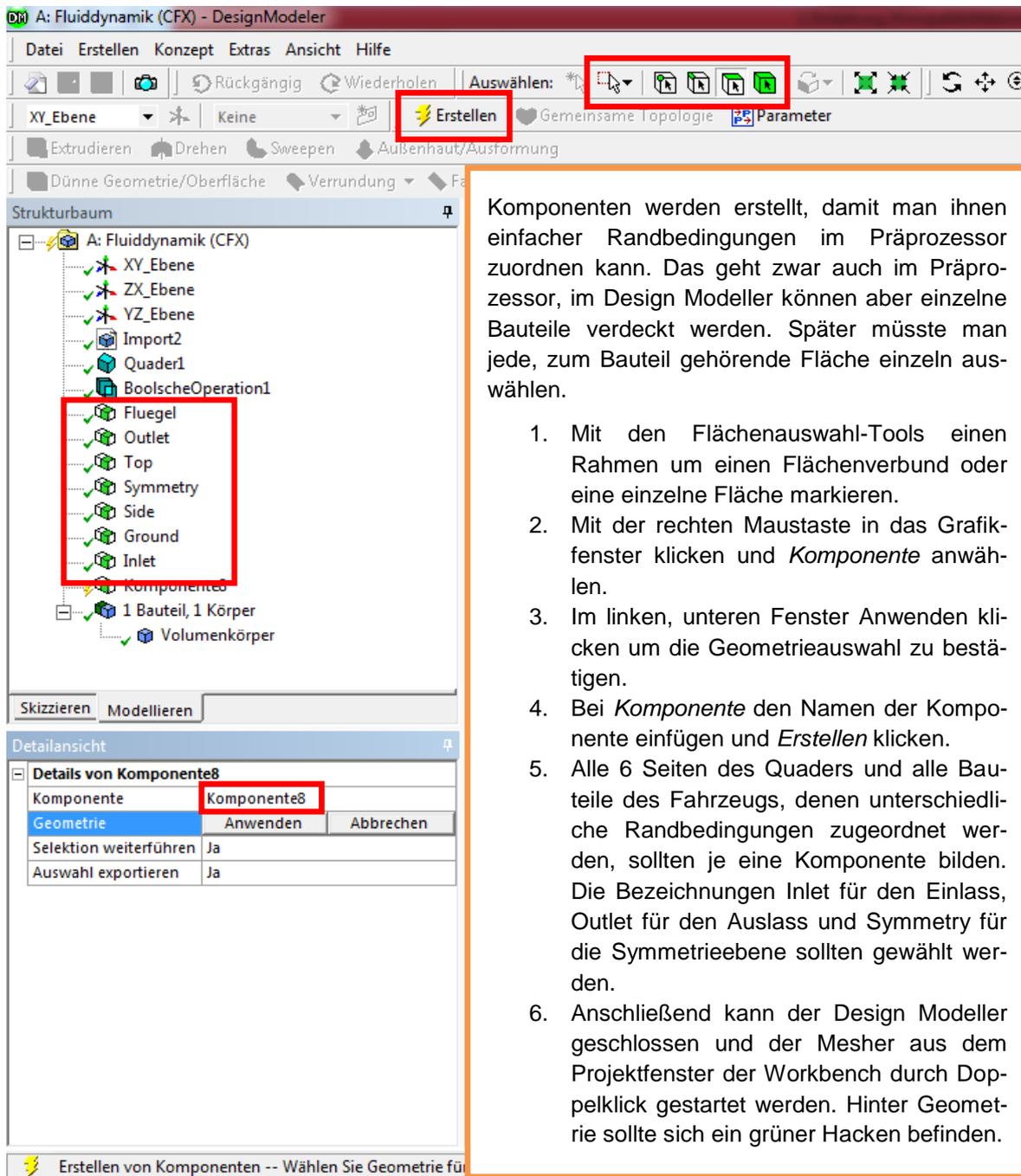
4. In das Feld Tool-Körper klicken und den Flügel (Part2) auswählen

5. Auf Erstellen klicken

6. Jetzt ist das Flügelvolumen vom Quadervolumen abgezogen und der Windtunnel ist fertig

Boolesche Operation auswählen

2.4 Komponenten erstellen



The screenshot shows the Design Modeler software interface. The 'Erstellen' (Create) tool is highlighted in the toolbar. The 'Strukturbaum' (Structure Tree) shows a list of components, with 'Komponenten' selected and its sub-items (Fluegel, Outlet, Top, Symmetry, Side, Ground, Inlet) highlighted. The 'Details von Komponente8' (Details of Component 8) dialog box is open, showing the 'Komponente' field with 'Komponente8' entered, and the 'Geometrie' field with 'Anwenden' (Apply) and 'Abbrechen' (Cancel) buttons. The 'Selektion weiterführen' (Continue Selection) and 'Auswahl exportieren' (Export Selection) fields are both set to 'Ja' (Yes).

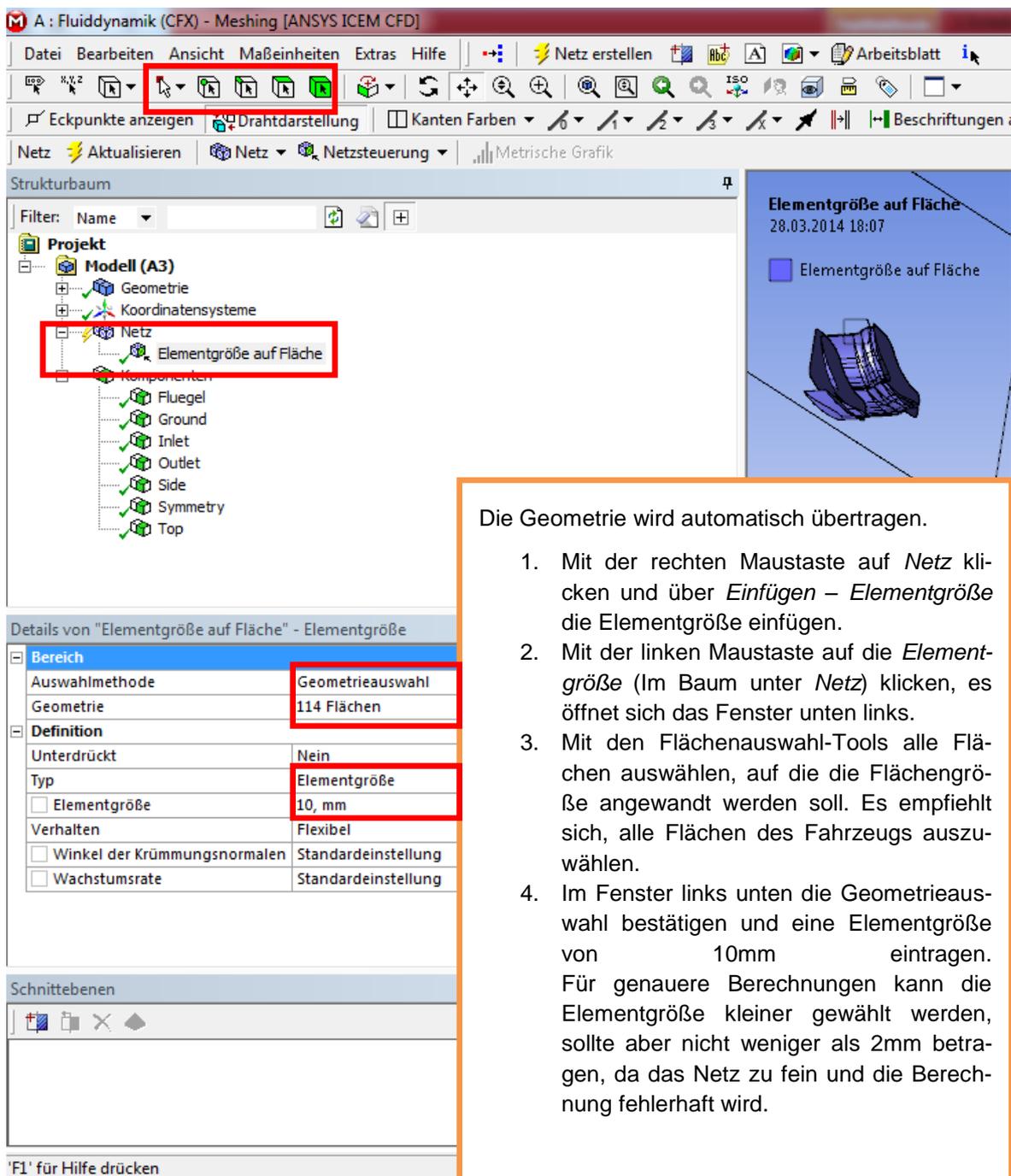
Komponenten werden erstellt, damit man ihnen einfacher Randbedingungen im Präprozessor zuordnen kann. Das geht zwar auch im Präprozessor, im Design Modeller können aber einzelne Bauteile verdeckt werden. Später müsste man jede, zum Bauteil gehörende Fläche einzeln auswählen.

1. Mit den Flächenauswahl-Tools einen Rahmen um einen Flächenverbund oder eine einzelne Fläche markieren.
2. Mit der rechten Maustaste in das Grafikenfenster klicken und *Komponente* auswählen.
3. Im linken, unteren Fenster Anwenden klicken um die Geometrieauswahl zu bestätigen.
4. Bei *Komponente* den Namen der Komponente einfügen und *Erstellen* klicken.
5. Alle 6 Seiten des Quaders und alle Bauteile des Fahrzeugs, denen unterschiedliche Randbedingungen zugeordnet werden, sollten je eine Komponente bilden. Die Bezeichnungen Inlet für den Einlass, Outlet für den Auslass und Symmetry für die Symmetrieebene sollten gewählt werden.
6. Anschließend kann der Design Modeller geschlossen und der Mesher aus dem Projektfenster der Workbench durch Doppelklick gestartet werden. Hinter Geometrie sollte sich ein grüner Hacken befinden.

Erstellen von Komponenten -- Wählen Sie Geometrie für

3 Netz erstellen

3.1 Elementgröße definieren



Die Geometrie wird automatisch übertragen.

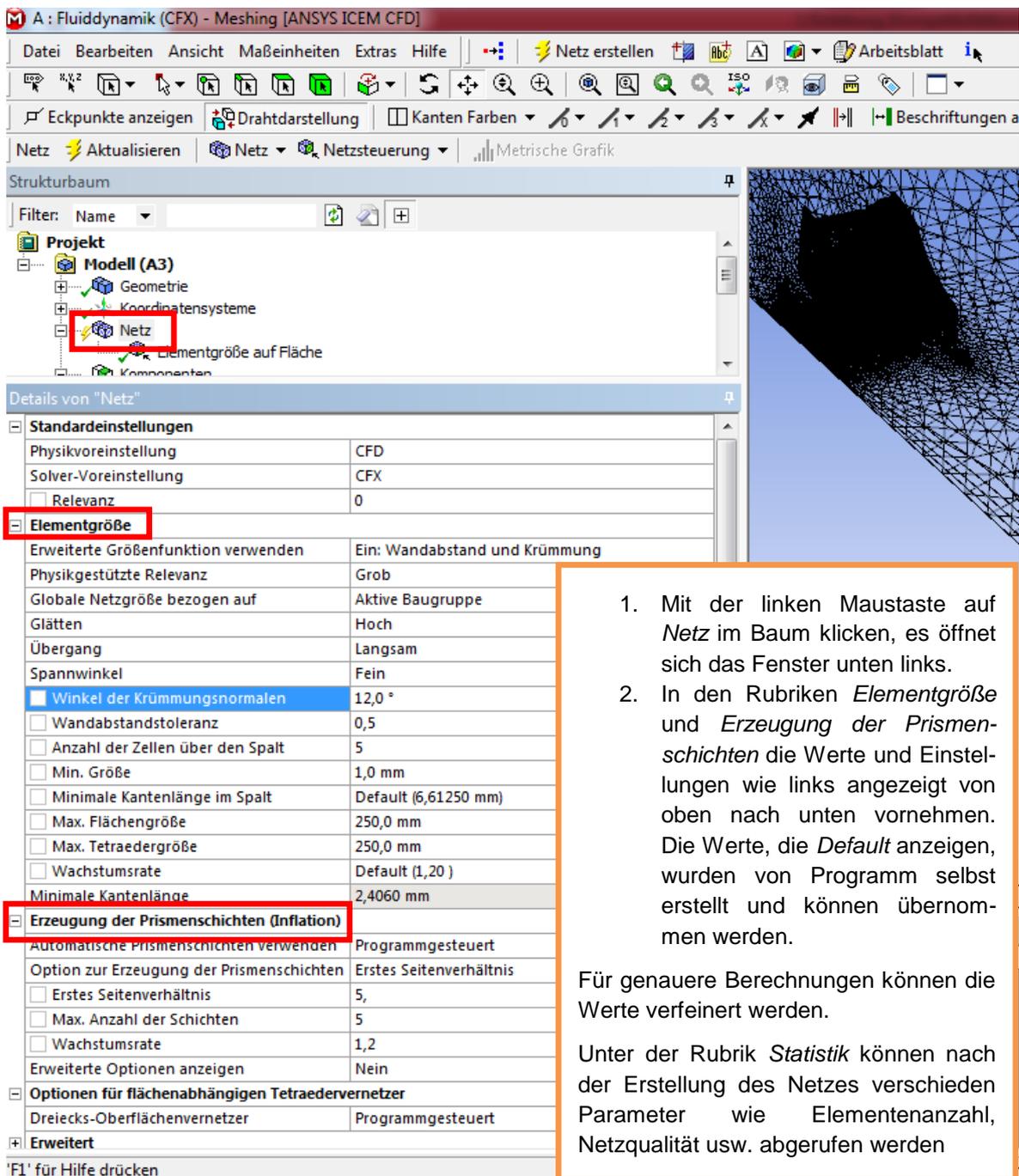
1. Mit der rechten Maustaste auf *Netz* klicken und über *Einfügen – Elementgröße* die Elementgröße einfügen.
2. Mit der linken Maustaste auf die *Elementgröße* (Im Baum unter *Netz*) klicken, es öffnet sich das Fenster unten links.
3. Mit den Flächenauswahl-Tools alle Flächen auswählen, auf die die Flächengröße angewandt werden soll. Es empfiehlt sich, alle Flächen des Fahrzeugs auszuwählen.
4. Im Fenster links unten die Geometrieauswahl bestätigen und eine Elementgröße von 10mm eintragen. Für genauere Berechnungen kann die Elementgröße kleiner gewählt werden, sollte aber nicht weniger als 2mm betragen, da das Netz zu fein und die Berechnung fehlerhaft wird.

Details von "Elementgröße auf Fläche" - Elementgröße	
Bereich	
Auswahlmethode	Geometrieauswahl
Geometrie	114 Flächen
Definition	
Unterdrückt	Nein
Typ	Elementgröße
<input type="checkbox"/> Elementgröße	10, mm
Verhalten	Flexibel
<input type="checkbox"/> Winkel der Krümmungsnormalen	Standardeinstellung
<input type="checkbox"/> Wachstumsrate	Standardeinstellung

Schnittebenen

'F1' für Hilfe drücken

3.2 Netzparameter definieren



The screenshot shows the ANSYS ICEM CFD interface. The 'Strukturbaum' (Structure Tree) on the left shows the project hierarchy: Projekt > Modell (A3) > Geometrie > Koordinatensysteme > Netz. The 'Details von "Netz"' dialog box is open, showing various settings for the mesh. The 'Elementgröße' (Element Size) section is highlighted with a red box, and the 'Erzeugung der Prismenschichten (Inflation)' (Prism Layer Generation) section is also highlighted with a red box. The 'Erweitert' (Advanced) section is partially visible at the bottom.

Standard-Einstellungen	
Physikvoreinstellung	CFD
Solver-Voreinstellung	CFX
<input type="checkbox"/> Relevanz	0
Elementgröße	
Erweiterte Größenfunktion verwenden	Ein: Wandabstand und Krümmung
Physikgestützte Relevanz	Grob
Globale Netzgröße bezogen auf	Aktive Baugruppe
Glätten	Hoch
Übergang	Langsam
Spannwinkel	Fein
<input checked="" type="checkbox"/> Winkel der Krümmungsnormalen	12,0 °
<input type="checkbox"/> Wandabstandstoleranz	0,5
<input type="checkbox"/> Anzahl der Zellen über den Spalt	5
<input type="checkbox"/> Min. Größe	1,0 mm
<input type="checkbox"/> Minimale Kantenlänge im Spalt	Default (6,61250 mm)
<input type="checkbox"/> Max. Flächengröße	250,0 mm
<input type="checkbox"/> Max. Tetraedergröße	250,0 mm
<input type="checkbox"/> Wachstumsrate	Default (1,20)
Minimale Kantenlänge	2,4060 mm
Erzeugung der Prismenschichten (Inflation)	
Automatische Prismenschichten verwenden	Programmgesteuert
Option zur Erzeugung der Prismenschichten	Erstes Seitenverhältnis
<input type="checkbox"/> Erstes Seitenverhältnis	5,
<input type="checkbox"/> Max. Anzahl der Schichten	5
<input type="checkbox"/> Wachstumsrate	1,2
Erweiterte Optionen anzeigen	Nein
Optionen für flächenabhängigen Tetraedervernetzer	
Dreiecks-Oberflächenvernetzer	Programmgesteuert
Erweitert	

1. Mit der linken Maustaste auf **Netz** im Baum klicken, es öffnet sich das Fenster unten links.
2. In den Rubriken *Elementgröße* und *Erzeugung der Prismenschichten* die Werte und Einstellungen wie links angezeigt von oben nach unten vornehmen. Die Werte, die *Default* anzeigen, wurden von Programm selbst erstellt und können übernommen werden.

Für genauere Berechnungen können die Werte verfeinert werden.

Unter der Rubrik *Statistik* können nach der Erstellung des Netzes verschiedene Parameter wie Elementenanzahl, Netzqualität usw. abgerufen werden

3.3 Prismenschichten zuordnen

The screenshot shows the ANSYS ICEM CFD interface. The 'Strukturbaum' (Structure Tree) on the left lists the components of the model: Projekt, Modell (A3), Geometrie, Koordinatensysteme, Netz, Elementgröße auf Fläche, and Komponenten. Under 'Komponenten', the following items are listed: Fluegel, Ground, Inlet, Outlet, Side, Symmetry, and Top. The 'Fluegel' component is highlighted with a red box. The 'Details von "Fluegel"' panel at the bottom shows the following settings:

Bereich	
Auswahlmethode	Geometrieauswahl
Geometrie	114 Flächen
Definition	
Zum Solver senden	Ja
Sichtbar	Ja
Automatisch erzeugte Prismenschichten	Einschließen
Statistik	
Typ	Importiert
Gesamtauswahl	114 Flächen
Unterdrückt	0
Verwendet vom Arbeitsblatt "Vernetzung"	Nein

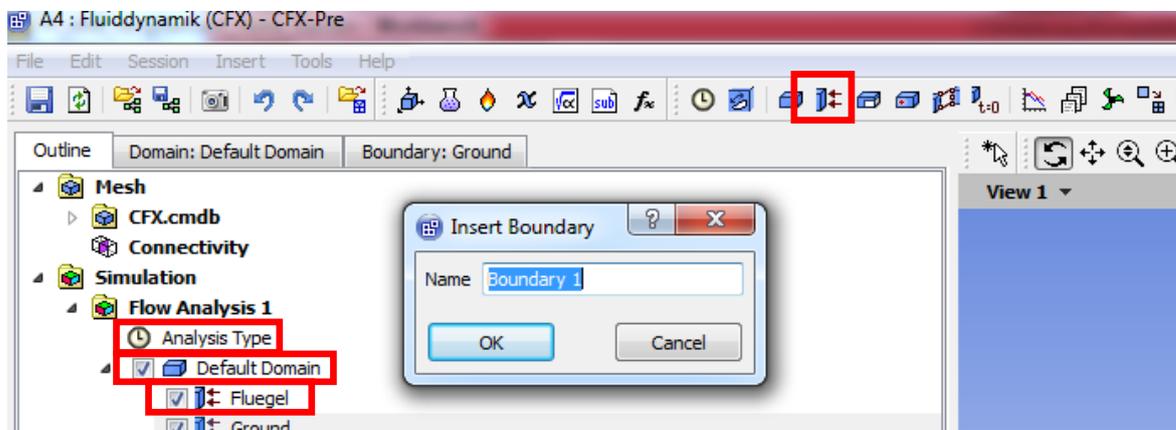
The 'Netz erstellen' button in the top toolbar is highlighted with a red box. The 3D model of the wing is shown on the right side of the interface.

1. Im Baum werden die im Design Model-ler erstellten Komponenten angezeigt. Mit der linken Maustaste jede Komponente anwählen, das Fenster unten links geht auf. Für alle zum Fahrzeug gehörenden Komponenten und für den Boden muss zur Erstellung der Prismenschichten nach einander die Option *Einschließen* aktiviert werden. Für freie Wände muss die Option *Ausschließen* aktiviert werden.
2. Anschließend auf *Netz erstellen* klicken, das Netz wird erzeugt.

Werden Änderungen an den Einstellungen vorgenommen, muss das Netz neu erstellt werden.

3. Anschließend kann der Mesher geschlossen werden und der Präprozessor (Setup) mit Doppelklick aus dem Projektfenster gestartet werden.

4 Randbedingungen definieren

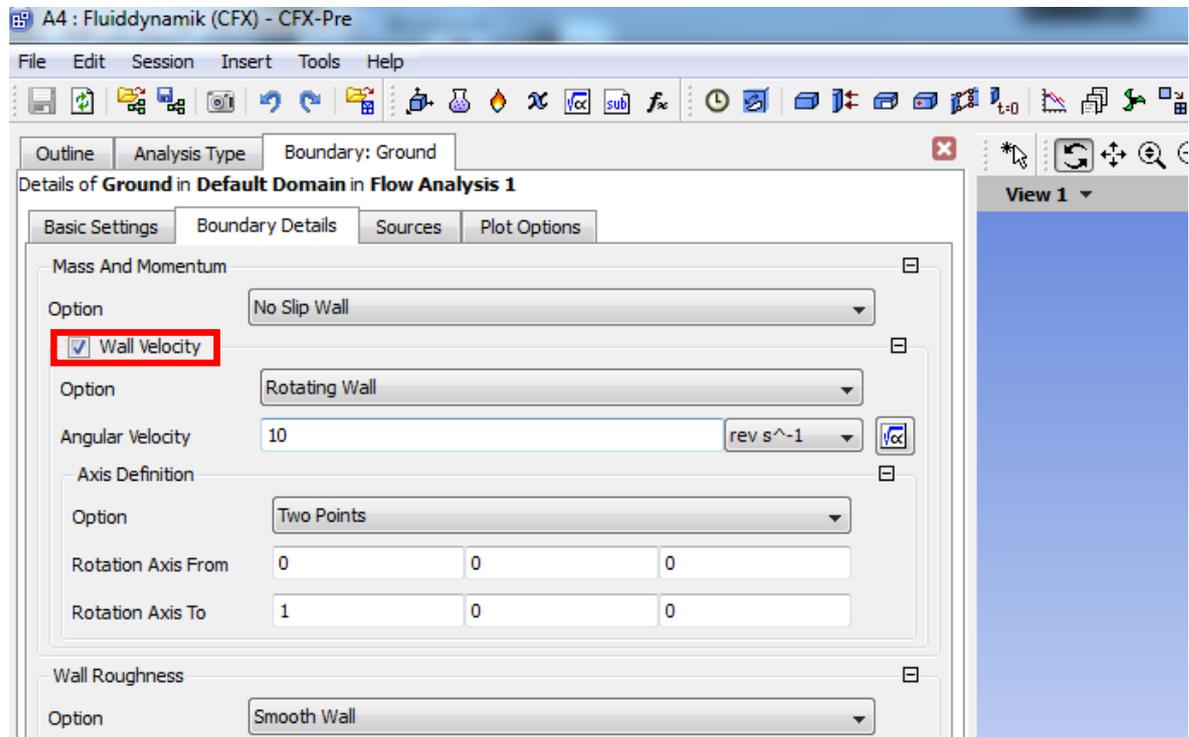


Die Netz-Daten werden automatisch in den Präprozessor geladen.

1. Doppelklick auf *Analysis Type*. In dem sich öffnenden Fenster bei *Analysis Type Steady State* auswählen
2. Doppelklick auf *Default Domain*. In dem sich öffnenden Fenster unter *Basic Setting* folgende Einstellungen vornehmen:
Material: Air Ideal Gas
Morphology: Continuous Fluid
Pressure: 1[atm]
Buoyancy Model: Non Buoyant
Domain Motion: Stationary
Mesh Deformation: None
 Unter *Fluid Models* folgende:
Heat Transfer: Isothermal
Fluid Temperature: 25 [C]
Turbulence: k-Epsilon
Wall Function: Scalable
Combustion: None
Thermal Radiation: None
3. Unten links auf *Apply* und dann auf *OK* klicken

4. Oben in der Symbolleiste *Boundary* auswählen. In das sich öffnende Fenster den Namen einer Komponente schreiben, z.B. „Fluegel“. Nacheinander für alle Komponenten wiederholen.
5. Im Baum tauchen nun die Komponenten unter der *Default Domain* auf *Boundaries* auf.
6. Nacheinander Doppelklick auf die Boundaries.
7. Unter *Boundary Type* *Inlet* für den Einlass, *Outlet* für den Auslass, *Symmetry* für Seitenwände und Deckel, *Wall* für alle Bauteile des Fahrzeugs und für den Boden auswählen.
8. Unter *Location* die entsprechende Komponente auswählen.
9. Bei *Inlet* unter *Boundary Details* folgende Einstellungen vornehmen:
Flow Regime: Subsonic
Mass and Momentum: Normal Speed wählen und eine *Geschwindigkeit* angeben
Turbulence: Low

4.2 Randbedingungen für die Flächen definieren



10. Bei *Outlet* unter *Boundary Details* folgende Einstellungen vornehmen:
 - *Flow Regime: Subsonic*
 - *Mass and Momentum: Average Static Pressure,*
 - *Relative Pressure: 0[Pa]*
 - *Pres. Profile Blend: 0.05*
 - *Pressure Averaging: Average over Whole Outlet*
11. Bei stehenden Wänden (Fahrzeug) unter *Boundary Details* folgende Einstellungen vornehmen:
 - *Mass and Momentum: No Slip Wall*, damit wird eine Haftbedingung erzeugt
 - *Wall Roughness: Smooth Wall*, entspricht hydraulisch glatter Wand. Alternativ kann eine Rauigkeit angegeben werden.

12. Beim Boden zusätzlich die Box *Wall Velocity* anhacken. Bei *Option Cartesian Components* auswählen und bei *Wall U* die gleiche Geschwindigkeit eintragen, wie beim Inlet. Bei *Wall V* und *Wall W* 0 eintragen.
13. Für drehende Räder *Rotating Wall* unter *Option* wählen. Unter *Angular Velocity* eine Winkelgeschwindigkeit oder Anzahl der Umdrehungen eintragen. Bei *Axis Definition* z.B. die Option *Two Points* auswählen und die Punkte, die die Achse definieren, bestimmen. Die Einheiten hier sind [m]. Alternativ können im Design Modeller entsprechende Achsen definiert werden.
14. Klick auf *Apply* und dann *OK*

4.3 Solver Einstellungen

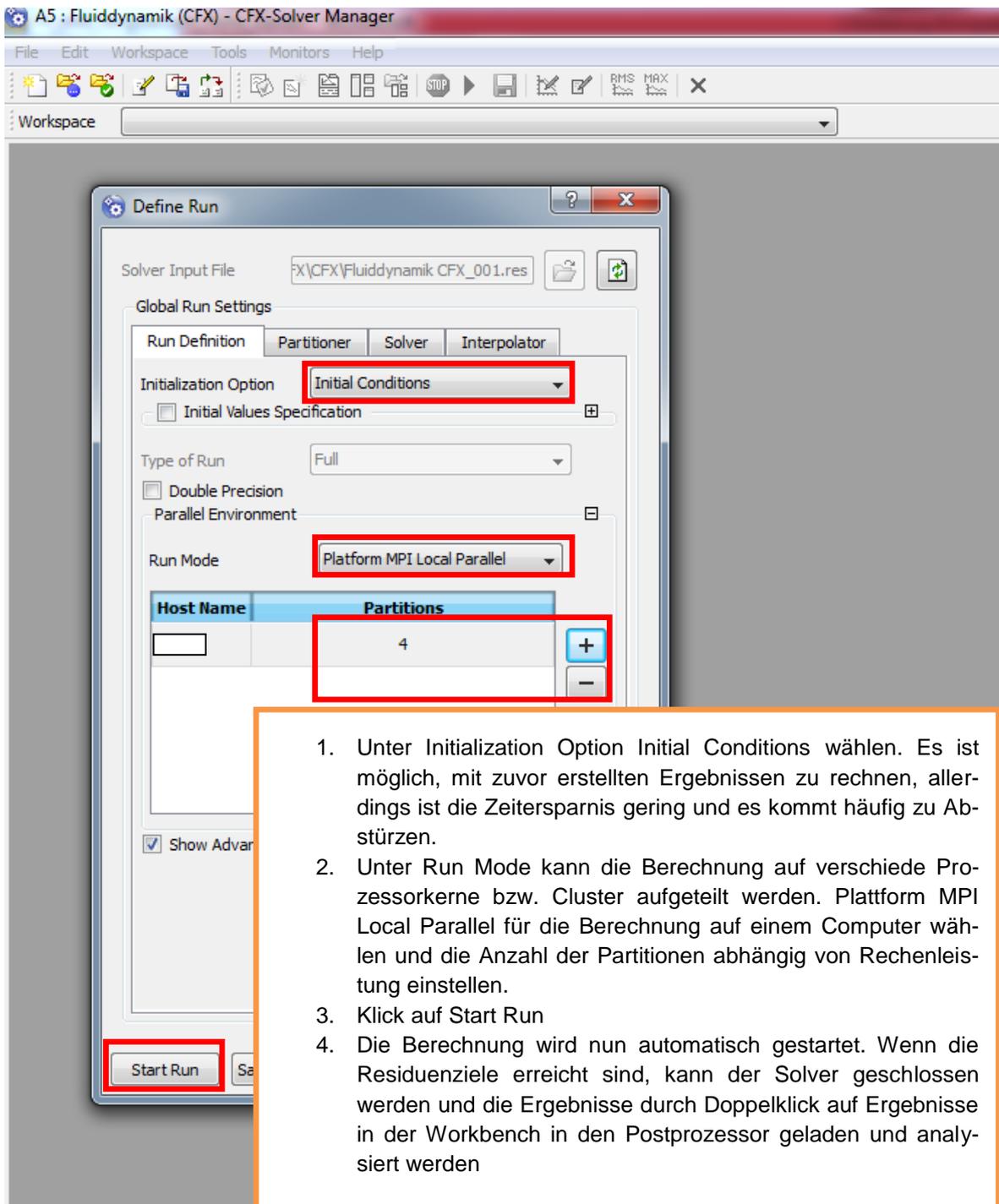
The screenshot shows the 'Solver Control' dialog box in CFX-Pre. The 'Basic Settings' tab is selected. The following settings are highlighted with red boxes:

- Advection Scheme:** High Resolution
- Turbulence Numerics:** First Order
- Convergence Control:** Min. Iterations: 50, Max. Iterations: 150
- Convergence Criteria:** Residual Type: RMS, Residual Target: 1.E-4

At the bottom of the dialog are buttons for 'OK', 'Apply', and 'Close'.

1. Im Strukturbaum unter *Solver* auf *Solver Control* doppelt klicken.
2. Unter *Advection Scheme* *High Resolution* auswählen.
3. Unter *Turbulence Numerics* *First Order* auswählen. Für genauere Berechnungen kann auch *High Resolution* gewählt werden um mit einer höheren Ordnung zu rechnen.
4. Bei *Convergence Control* die Anzahl der min. und max. Iterationen auswählen. In der Regel werden die Residuenziele nach max. 100 Iterationen erreicht.
5. Bei *Convergence Criteria* *RMS* unter *Residual Type* und $1e4$ bei *Residual Target* wählen. Für genauere Berechnungen kann *MAX* und ein kleineres Residuenziel gewählt werden.
6. Klick auf *Apply* und dann auf *OK*.
7. Im Strukturbaum unter *Solver* auf *Output Control* doppelt klicken.
8. In der Registerkarte *Monitor* den Haken bei *Monitor Objects* setzen, da sonst keine Kräfte und Momente in die Ausgabedatei geschrieben werden.
9. Klick auf *Apply* und dann auf *OK*.
10. Die Einstellungen sind abgeschlossen und der Präprozessor kann geschlossen werden. In der Workbench kann nun der Solver durch Doppelklick auf *Lösung* gestartet werden.

5 Berechnung starten



The screenshot shows the 'Define Run' dialog box in the CFX-Solver Manager. The 'Solver Input File' is 'FX\CFX\Fluiddynamik CFX_001.res'. Under 'Global Run Settings', the 'Initialization Option' is set to 'Initial Conditions', 'Type of Run' is 'Full', and 'Run Mode' is 'Platform MPI Local Parallel'. A table shows 4 partitions. The 'Start Run' button is highlighted.

Host Name	Partitions
	4

1. Unter Initialization Option Initial Conditions wählen. Es ist möglich, mit zuvor erstellten Ergebnissen zu rechnen, allerdings ist die Zeitersparnis gering und es kommt häufig zu Abstürzen.
2. Unter Run Mode kann die Berechnung auf verschiedene Prozessorkerne bzw. Cluster aufgeteilt werden. Plattform MPI Local Parallel für die Berechnung auf einem Computer wählen und die Anzahl der Partitions abhängig von Rechenleistung einstellen.
3. Klick auf Start Run
4. Die Berechnung wird nun automatisch gestartet. Wenn die Residuenziele erreicht sind, kann der Solver geschlossen werden und die Ergebnisse durch Doppelklick auf Ergebnisse in der Workbench in den Postprozessor geladen und analysiert werden

Anhang B

Ergebnisse Auswertungstool H08

Fahrzeug		H08						
Beide Flügel 12° angestellt								
Eingangsdaten	Einheit	Wert	Z. Einheit	Wert	Einheit	Wert	Z. Einheit	Wert
Fahrgewicht mit Fahrer	kg	300	N	2943	Abtriebsbeiwert Ca	-	-3,10	-
Radstand	mm	1670	m	1,67	Widerstandsbeiwert Cw	-	1,44	-
Spurweite	mm	1200	m	1,2	Höchstgeschwindigkeit	m/s	36,97	km/h
Leistung	kW	60	W	60000	Kurvengeschwindigkeit	km/h	28,50	133,11
Stirnfläche	m ²	1,216	-	-	Querbeschleunigung	m/s ²	22,56	102,58
Spantfläche	m ²	3,6	-	-	Balance 30 km/h	%HA	50,42	g
Wirkungsgrad Antriebsstrang	-	0,875	-	-	Balance 60 km/h	%HA	51,42	-
Lage S in X, Grundbalance	mm	835	% HA	50	Balance 120 km/h	%HA	53,53	-
Dichte Luft 25° C	kg/m ³	1,184	-	-				
Kurveninnenradius	m	36	-	-				
Haftbeiwert Reifen-Boden	-	1,4	-	-				

Simulationsergebnisse			
Geschwindigkeit	km/h	30	60
FZ	FX	MY	
Fahrzeugkörper/Unterboden	1,54	14,64	-2,60
Frontflügel	-66,00	16,92	-99,80
Heckflügel	-99,00	36,84	127,20
Vorderräder	3,28	-0,62	2,66
Hinterräder	7,04	3,68	-5,98
Sonstige 1	0,00	0,00	0,00
Sonstige 2	0,00	0,00	0,00
Sonstige 3	0,00	0,00	0,00

Simulationsergebnisse			
Geschwindigkeit	km/h	8,3	16,7
FZ	FX	MY	
Fahrzeugkörper/Unterboden	11,02	59,95	-12,52
Frontflügel	-268,46	67,98	-405,64
Heckflügel	-402,84	148,95	516,80
Vorderräder	12,52	-3,20	10,16
Hinterräder	28,94	13,84	-24,58
Sonstige 1	0,00	0,00	0,00
Sonstige 2	0,00	0,00	0,00
Sonstige 3	0,00	0,00	0,00

Simulationsergebnisse			
Geschwindigkeit	km/h	120	120
FZ	FX	MY	
Fahrzeugkörper/Unterboden	63,90	246,10	-59,52
Frontflügel	-1099,42	274,34	-1661,66
Heckflügel	-1639,74	607,04	2105,20
Vorderräder	46,98	-16,60	38,16
Hinterräder	119,08	57,86	-100,94
Sonstige 1	0,00	0,00	0,00
Sonstige 2	0,00	0,00	0,00
Sonstige 3	0,00	0,00	0,00

Simulationsergebnisse			
Abtriebskraft gesamt [N]	Widerstand gesamt [N]	Moment um Y gesamt [Nm]	Abtriebskraft gesamt [N]
-153,14	71,46	21,48	-2509,20
			1168,74

Simulationsergebnisse			
Ca1	Cw1	X-Abstand S - P [m]	Aerolast HA [N]
-3,06	1,43	0,14	-89,43
			-63,71
			1560,93
			1535,21
			3096,14
			315,611

Simulationsergebnisse			
Ca2	Cw2	X-Abstand S - P [m]	Aerolast HA [N]
-3,09	1,44	0,14	-359,84
			-258,98
			1831,34
			1730,48
			3561,82
			363,08

Simulationsergebnisse			
Ca3	Cw3	X-Abstand S - P [m]	Aerolast HA [N]
-3,14	1,46	0,13	-1446,96
			-1062,24
			2918,46
			2533,74
			5452,20
			555,78

Anhang C

Ergebnisse Auswertungstool Gesamtfahrzeug 1

Fahrzeug		H0X_AWA_1					
Setup		Frontflügel Variante 7, Heckflügel Variante 5, Chassis und Unterboden Variante 8					
Eingangsdaten	Einheit	Wert	2. Einheit	Einheit	Wert	2. Einheit	Wert
Fahrzeuggewicht mit Fahrer	kg	300	N	2943	Abtriebsbeiwert Ca	-	-2,98
Radstand	mm	1650	m	1,65	Widerstandsbeiwert Cw	-	1,40
Spurweite	mm	1170	m	1,17	Höchstgeschwindigkeit	km/h	125,57
Leistung	kW	60	W	60000	Kurvengeschwindigkeit	m/s	30,24
Stirnfläche	m ²	1,497	-	-	Querbearbeitung	m/s ²	25,41
Spannfläche	m ²	3,6	-	-	Balance 30 km/h	%HA	48,76
Wirkungsgrad Antriebsstrang	-	0,875	-	-	Balance 60 km/h	%HA	45,77
Lage S in X, Grundbalance	mm	825	% HA	50	Balance 120 km/h	%HA	39,43
Dichte Luft 25 °C	kg/m ³	1,184	-	-			
Kurveninnenradius	m	36	-	-			
Haftbeiwert Reifen-Boden	-	1,4	-	-			

Simulationsergebnisse		Simulationsergebnisse		Simulationsergebnisse									
Geschwindigkeit	km/h	30	m/s	8,3	Geschwindigkeit	km/h	60	m/s	15,7	Geschwindigkeit	km/h	120	m/s
Fahrzeugkörper/Unterboden	FZ	FX	MY	FZ	FZ	FX	MY	FZ	FZ	FX	MY	FZ	MY
Fahrzeugkörper/Unterboden	-22,08	18,35	4,81	Fahrzeugkörper/Unterboden	-88,30	73,40	19,25	Fahrzeugkörper/Unterboden	-353,20	293,60	77,00	Fahrzeugkörper/Unterboden	-1752,00
Frontflügel	-109,50	34,90	-165,10	Frontflügel	-438,00	139,60	-660,38	Frontflügel	-1752,00	558,40	-2641,52	Frontflügel	-1046,16
Heckflügel	-65,25	31,06	93,57	Heckflügel	-261,54	124,25	374,28	Heckflügel	-1046,16	497,00	1497,12	Heckflügel	136,92
Vorderräder	8,56	-0,78	6,92	Vorderräder	34,23	-3,10	27,66	Vorderräder	80,96	38,00	-68,56	Vorderräder	0,00
Hinterräder	5,06	2,38	-4,28	Hinterräder	20,24	9,50	-17,14	Hinterräder	0,00	0,00	0,00	Hinterräder	0,00
Sonstige 1	0,00	0,00	0,00	Sonstige 1	0,00	0,00	0,00	Sonstige 1	0,00	0,00	0,00	Sonstige 1	0,00
Sonstige 2	0,00	0,00	0,00	Sonstige 2	0,00	0,00	0,00	Sonstige 2	0,00	0,00	0,00	Sonstige 2	0,00
Sonstige 3	0,00	0,00	0,00	Sonstige 3	0,00	0,00	0,00	Sonstige 3	0,00	0,00	0,00	Sonstige 3	0,00

Simulationsergebnisse		Simulationsergebnisse		Simulationsergebnisse							
Abtriebskraft gesamt [N]	-183,21	85,91	-64,08	Abtriebskraft gesamt [N]	-733,37	343,65	-256,33	Abtriebskraft gesamt [N]	-2933,48	1374,60	-1025,32
Widerstand gesamt [N]				Widerstand gesamt [N]				Widerstand gesamt [N]			
Moment um Y gesamt [Nm]				Moment um Y gesamt [Nm]				Moment um Y gesamt [Nm]			

Simulationsergebnisse		Simulationsergebnisse		Simulationsergebnisse							
Ca1	-2,98	1,40	-0,35	Ca2	-2,98	1,40	-0,35	Ca3	-2,98	1,40	-0,35
Cw1				Cw2				Cw3			
X-Abstand S - P [m]				X-Abstand S - P [m]				X-Abstand S - P [m]			
Aerolast HA [N]				Aerolast HA [N]				Aerolast HA [N]			
Aerolast VA [N]	HA/VA	0,40	-130,44	Aerolast VA [N]	HA/VA	0,40	-522,04	Aerolast VA [N]	HA/VA	0,40	-2088,15
Gesamtlast HA [N]			1524,27	Gesamtlast HA [N]			1682,83	Gesamtlast HA [N]			2316,83
Gesamtlast VA [N]	HA/VA	0,95	1601,94	Gesamtlast VA [N]	HA/VA	0,84	1993,54	Gesamtlast VA [N]	HA/VA	0,65	3559,65
Gesamtlast [N]			3126,21	Gesamtlast [N]			3676,37	Gesamtlast [N]			5876,48
Gesamtlast [kg]			318,676	Gesamtlast [kg]			374,76	Gesamtlast [kg]			599,03

Anhang D

Ergebnisse Auswertungstool Gesamtfahrzeug 2

Fahrzeug		HOX_AWA_2							
Setup		Frontflügel Variante 6, Heckflügel Variante 4, um 15% vergrößert, 100mm höher, Chassis und Unterboden Variante 8							
Eingangsdaten	Einheit	Wert	2. Einheit	Wert	2. Einheit	Wert			
Fahrzeuggewicht mit Fahrer	kg	300	N	2943	Abtriebsbeiwert Ca	-3,31			
Radstand	mm	1650	m	1,65	Widerstandsbeiwert Cw	1,67			
Spurweite	mm	1170	m	1,17	Höchstgeschwindigkeit	m/s	32,43	km/h	116,76
Leistung	kW	60	W	60000	Kurvengeschwindigkeit	m/s	32,36	km/h	116,51
Stirnfläche	m^2	1,553	-	-	Querbeschleunigung	m/s^2	29,09	g	2,97
Spantfläche	m^2	3,6	-	-	Balance 30 km/h	%HA	49,90	-	-
Wirkungsgrad Antriebsstrang	-	0,875	-	-	Balance 60 km/h	%HA	49,65	-	-
Lage S in X, Grundbalance	mm	825	%HA	50	Balance 120 km/h	%HA	49,17	-	-
Dichte Luft 25° C	kg/m^3	1,184	-	-	-	-	-	-	-
Kurveninnenradius	m	36	-	-	-	-	-	-	-
Haftbeiwert Reifen-Boden	-	1,4	-	-	-	-	-	-	-

Simulationsergebnisse		Simulationsergebnisse		Simulationsergebnisse			
Geschwindigkeit	km/h	30	8,3	60	16,7	120	33,3
	FZ	FX	MY	FZ	FX	MY	FZ
Fahrzeugkörper/Unterboden	-20,59	22,48	2,27	-82,34	89,91	9,07	-329,36
Frontflügel	-103,98	31,06	-155,47	-415,92	124,25	-621,86	-1663,68
Heckflügel	-100,35	51,81	146,71	-401,38	207,24	586,82	-1605,52
Vorderräder	7,44	-0,35	6,00	29,74	-1,41	24,00	118,96
Hinterräder	5,86	1,85	-4,95	23,42	7,40	-19,80	93,68
Sonstige 1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Sonstige 2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Sonstige 3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Simulationsergebnisse		Simulationsergebnisse	
Abtriebskraft gesamt [N]	-211,62	Abtriebskraft gesamt [N]	-846,48
Widerstand gesamt [N]	106,85	Widerstand gesamt [N]	427,39
Moment um Y gesamt [Nm]	-5,44	Moment um Y gesamt [Nm]	-21,77
Ca1	-3,31	Ca2	-3,31
Cw1	1,67	Cw2	1,67
X-Abstand S - P [m]	-0,03	X-Abstand S - P [m]	-0,03
Aerolast HA [N]	-102,51	Aerolast HA [N]	-410,05
Aerolast VA [N]	-109,11	Aerolast VA [N]	-436,43
Gesamtlast HA [N]	1574,01	Gesamtlast HA [N]	1881,55
Gesamtlast VA [N]	1580,61	Gesamtlast VA [N]	1907,93
Gesamtlast [N]	3154,62	Gesamtlast [N]	3789,48
Gesamtlast [kg]	321,572	Gesamtlast [kg]	386,29

Simulationsergebnisse		Simulationsergebnisse	
Abtriebskraft gesamt [N]	-3385,92	Abtriebskraft gesamt [N]	-3385,92
Widerstand gesamt [N]	1709,57	Widerstand gesamt [N]	1709,57
Moment um Y gesamt [Nm]	-87,08	Moment um Y gesamt [Nm]	-87,08
Ca3	-3,31	Ca3	-3,31
Cw3	1,67	Cw3	1,67
X-Abstand S - P [m]	-0,03	X-Abstand S - P [m]	-0,03
Aerolast HA [N]	-1640,18	Aerolast HA [N]	-1640,18
Aerolast VA [N]	-1745,74	Aerolast VA [N]	-1745,74
Gesamtlast HA [N]	3111,68	Gesamtlast HA [N]	3111,68
Gesamtlast VA [N]	3217,24	Gesamtlast VA [N]	3217,24
Gesamtlast [N]	6328,92	Gesamtlast [N]	6328,92
Gesamtlast [kg]	645,15	Gesamtlast [kg]	645,15



Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit

Gemäß der Allgemeinen Prüfungs- und Studienordnung ist zusammen mit der Abschlussarbeit eine schriftliche Erklärung abzugeben, in der der Studierende bestätigt, dass die Abschlussarbeit „– bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit [(§ 18 Abs. 1 APSO-TI-BM bzw. § 21 Abs. 1 APSO-INGI)] – ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt wurden. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich zu machen.“

Quelle: § 16 Abs. 5 APSO-TI-BM bzw. § 15 Abs. 6 APSO-INGI

Dieses Blatt, mit der folgenden Erklärung, ist nach Fertigstellung der Abschlussarbeit durch den Studierenden auszufüllen und jeweils mit Originalunterschrift als letztes Blatt in das Prüfungsexemplar der Abschlussarbeit einzubinden.

Eine unrichtig abgegebene Erklärung kann -auch nachträglich- zur Ungültigkeit des Studienabschlusses führen.

Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung der Arbeit

Hiermit versichere ich,

Name: Walter

Vorname: Andreas

dass ich die vorliegende Bachelorarbeit bzw. bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit – mit dem Thema:

Aerodynamik für ein Formel-Rennfahrzeug

ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

- die folgende Aussage ist bei Gruppenarbeiten auszufüllen und entfällt bei Einzelarbeiten -

Die Kennzeichnung der von mir erstellten und verantworteten Teile der -bitte auswählen- ist erfolgt durch:

Hamburg

Ort

29.03.2014

Datum

Unterschrift im Original