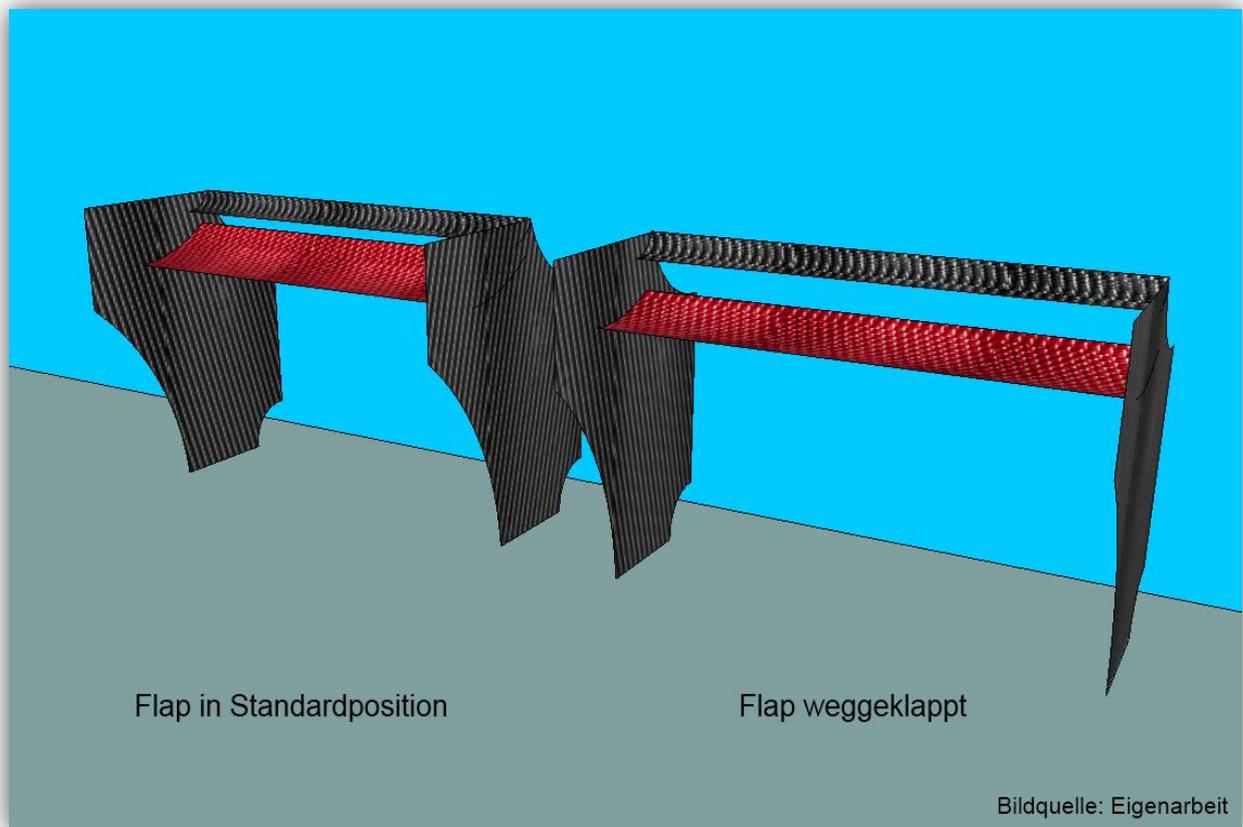


# Der verstellbare Heckflügel in der Formel 1

## Berechnungen zum Überholvorgang und zum Bremsweg im Falle eines Defekts



Minifacharbeit im Fach Physik  
Kurs GK 11.2  
von Christian Heinrich  
Stufe 11  
Betreuender Lehrer: Herr Unger  
Goethe-Gymnasium Dortmund

## **Inhaltsverzeichnis**

### **Textteil**

|   |   |
|---|---|
| 1. Einleitung.....  | 3 |
| 2. Definition des Strömungswiderstandes der Luft.....                                       | 3 |
| 2.1 Berechnung der Maximalgeschwindigkeit unter Einbeziehung des Strömungswiderstandes..... | 3 |
| 2.2 Wertefindung für die Rechnung zur Bestimmung von $v_{max}$ .....                        | 4 |
| 2.3 Ergebnisse der Rechnung zu $v_{max}$ mit und ohne weggeklapptem Flap.....               | 5 |
| 2.4 Entstehende Überholmöglichkeit.....   | 5 |
| 3. Fragestellung: Führt der verringerte Anpressdruck zu Bremsproblemen?.....                | 7 |
| 3.1 Definition und Berechnung des dynamischen Auftriebs.....                                | 7 |
| 3.2 Berechnung des Bremsweges.....  | 8 |
| 3.3 Wertefindung zur Berechnung des Bremsweges.....   | 8 |
| 3.4 Ergebnisse und Auswertung.....  | 9 |

|                                   |    |
|-----------------------------------|----|
| <b>Literaturverzeichnis</b> ..... | 10 |
|-----------------------------------|----|

### **Anhang**

|               |    |
|---------------|----|
| Anhang A..... | 11 |
| Anhang B..... | 11 |
| Anhang C..... | 12 |
| Anhang D..... | 12 |

|  |    |
|--|----|
| <b>Selbstständigkeitserklärung</b> ..... | 13 |
|--|----|

## 1. Einführung

In der FIA Formel 1 Weltmeisterschaft ist es in der Saison des Jahres 2011 erlaubt, einen Heckflügel zu verwenden, bei dem sich eine Platte, Flap genannt, welche normalerweise für Abtrieb (oder auch dynamischen Auftrieb) lotrecht in Richtung Boden, dazu später mehr) sorgt, vom Fahrer von einer leicht schrägen in eine waagerechte Position stellen lässt. In der Abbildung auf der Titelseite ist dieses Flap rot gekennzeichnet. Im Rennen wird dem Hintermann an einer bestimmten Stelle der Strecke die Erlaubnis zum Flachstellen erteilt, wenn der Abstand zwischen ihm und den Vorfahrenden weniger als eine Sekunde beträgt<sup>[1]</sup>. Durch den dadurch reduzierten Strömungswiderstand soll die Maximalgeschwindigkeit erhöht, und somit das Überholen vereinfacht werden. Im Folgenden sollen die Auswirkungen der Stellungsveränderung näher betrachtet werden; nämlich ob der entstehende Geschwindigkeitsüberschuss zum Überholen auf einer durchschnittlichen Geraden reicht, und, ob, sollte das Flap einmal nicht zurückklappen, gefährliche Bremsprobleme entstehen.

## 2. Definition des Strömungswiderstandes der Luft

„[Strömungswiderstand ist] die Widerstandskraft  $F_W$ , die entgegen der Bewegungsrichtung eines sich relativ zur Luft bewegenden Körpers wirkt.“<sup>[2]</sup>

„Der Strömungswiderstand[...] ergibt sich u.a. aus der Differenz der Drücke vor und hinter dem Körper und der Reibungskraft an der Körperoberfläche“<sup>[3]</sup>

### 2.1 Berechnung der Maximalgeschwindigkeit unter Einbeziehung des Strömungswiderstandes

Auch bei Strömungen ist Kraft = Druck \* Fläche ( $F = pA$ )<sup>[4]</sup>.

Damit gilt für Strömungen  $F_W = c_W \frac{\rho}{2} v^2 A$ <sup>[4]</sup>. Dabei ist  $F_W$  der Strömungswiderstand in Newton,  $\rho$  die Dichte des umströmenden Gases ( in unserem Falle die Luft) in  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,  $v$  die Geschwindigkeit des Fahrzeugs in  $\text{ms}^{-1}$ ,  $A$  die Schattenfläche und  $c_W$  der Strömungswiderstandskoeffizient. Letzterer ist eine einheitslose Konstante die sich „[w]egen des komplizierten Verlaufes der Turbulenz (Verwirbelung)[...] nicht berechnen [lässt], sondern

---

<sup>[1]</sup> vgl.: Fédération Internationale de l'Automobile. Unterpunkt 3.18.2

<sup>[2]</sup> Brockhaus

<sup>[3]</sup> Kuchling, S.173

<sup>[4]</sup> vgl.: Kuchling, S.173

[...] durch Versuche ermittelt werden [muss]<sup>[5]</sup>. Diese werden im Windkanal mit einem Kraftmesser durchgeführt<sup>[6]</sup>.

Bei einem Fahrzeug bringt der Motor die Kraft gegen den Strömungswiderstand auf, also muss die gesuchte Gleichung zur Berechnung der Geschwindigkeit die Motorleistung beinhalten. Die Momentanleistung ist durch  $P = F \times v$  definiert<sup>[7]</sup>

(Einheit für P ist Watt). Demnach gilt auch: 
$$v = \sqrt[3]{\frac{2P}{c_W \rho A}}$$

## 2.2 Wertefindung für die Rechnung zur Bestimmung von $v_{max}$

Die exakten Werte für die Rechnung sind unbekannt, da die Rennställe ihre genauen Daten geheim halten. Deswegen müssen realistische Annahmen gemacht werden, die von den exakten Werten möglichst nur um wenige Prozent abweichen und das Gesamtergebnis deshalb nicht signifikant verändern werden. Zur Bestimmung der Schattenfläche, diese ist der „größte der Strömung entgegenstehende Körperquerschnitt“<sup>[8]</sup>, bietet es sich an, auf einem Bild, welches die Front eines Formel 1-Autos abbildet, Rechtecke einzuzichnen und deren Fläche zu berechnen. Als Bezugsgröße dient dabei der Reifendurchmesser, welcher dem Regelwerk zu entnehmen ist<sup>[9]</sup>. Die auf diese Weise ermittelte Fläche beträgt ~1,5 m<sup>2</sup> (s. Anhang A). Die Leistung eines Rennmotors beträgt ca. 800 PS ( $589 \times 10^3$  W)<sup>[10]</sup> und der Wert für  $c_W$  lässt sich auf 1 schätzen<sup>[11]</sup>. Dies ist erstaunlich hoch, denn der  $c_W$  – Wert eines Straßenautos liegt um 0,35<sup>[12]</sup>. Doch die Räder und Flügelaufbauten erhöhen diesen Wert drastisch<sup>[12]</sup>. Schätzungsweise reduziert sich der  $c_W$  – Wert bei weggeklapptem Flap auf 0,90. Ich halte diesen Wert für realistisch, da laut Tzresniowski der gesamte Heckflügel eines Ferraris von 2000 mit ~30% zum Strömungswiderstandskoeffizienten des Fahrzeugs beiträgt<sup>[13]</sup>. Da das Flap aber nur die Hälfte des Heckflügels ausmacht und die Heckflügel seit 2000 deutlich schmaler geworden sind gehe ich von einer Reduzierung um 10% aus.

---

<sup>[5]</sup>Lindner, S.176

<sup>[6]</sup>Lindner, S.176

<sup>[7]</sup>Kuchling, S.115

<sup>[8]</sup>vgl.: Kuchling, S.173

<sup>[9]</sup>vgl.: Fédération Internationale de l'Automobile. Unterpunkt 12.4.2

<sup>[10]</sup>vgl.: Apolin, S.27

<sup>[11]</sup>vgl.: Apolin, S.27

<sup>[12]</sup>vgl.: Lindner, S.177

<sup>[13]</sup>vgl.: Tzresniowski, S.128

Der einzige Wert welcher genau bekannt ist, ist die Dichte der Luft; sie beträgt bei Normalbedingungen  $1,204 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  <sup>[14]</sup>. Mit den gegebenen Daten lässt sich nun die Rechnung durchführen. Ich habe jene für eine verbesserte Übersichtlichkeit noch einmal in Anhang D zusammengefasst.

### 2.3 Ergebnisse der Rechnung zu $v_{max}$ mit und ohne weggeklapptem Flap

Setzt man die in 2.1 genannten Werte in die Formel aus 2 ein erhält man folgendes Ergebnis:

$$v_{max,Flap \text{ in Standardpos.}} = 86,7 \text{ ms}^{-1} = 312,2 \text{ kmh}^{-1}$$

$$v_{max,Flap \text{ weggeklappt}} = 89,8 \text{ ms}^{-1} = 323,4 \text{ kmh}^{-1}$$

Die Geschwindigkeit erhöht sich also um  $3,1 \text{ ms}^{-1}$  oder auch um  $11,2 \text{ kmh}^{-1}$ . In 2.4 sollen nun die dadurch entstandenen Überholmöglichkeiten beschrieben werden.

### 2.4 Entstehende Überholmöglichkeit

Es wird davon ausgegangen, dass zwei Fahrzeuge auf einer Geraden unterwegs sind. Zur besseren Übersicht nenne ich das Auto, welches vorausfährt „A“ und jenes, welches zu überholen versucht „B“. Exemplarisch habe ich als Strecke die Start-Ziel-Gerade in Sepang, Malaysia ausgewählt, deren Länge ich mithilfe von Google Earth auf  $\sim 900\text{m}$  bestimmen konnte. Die Fahrzeuge beschleunigen auf dieser Geraden von der optimalen Kurvengeschwindigkeit,  $84 \text{ kmh}^{-1}$  <sup>[15]</sup>, also von  $\sim 23,5 \text{ ms}^{-1}$  auf ihre jeweilige Höchstgeschwindigkeit; A also auf  $86,7 \text{ ms}^{-1}$ , B auf  $89,8 \text{ ms}^{-1}$ . Ihr Abstand darf, wie eingangs erwähnt, maximal eine Sekunde beim Passieren der Zeitmessstelle betragen. In anderen Worten ist A schon die Distanz vom Beginn der Geraden, dem „Startpunkt“ entfernt, die er in einer Sekunde zurücklegen konnte, wenn ihn B passiert. A beschleunigt in dieser Zeit mit der maximal möglichen Beschleunigung und hat demnach auch eine andere Startgeschwindigkeit für das eigentliche „Rennen“ auf der Geraden. Die Beschleunigung entnehmen wir einem YouTube-Video, welches einen Rennwagen auf der besagten Gerade in Sepang zeigt. Daneben werden die Telemetriedaten ausgewertet. Die Beschleunigung beträgt danach im relevanten Bereich 80% der Erdbeschleunigung <sup>[16]</sup>, also  $0,8 \cdot 9,81 \text{ ms}^{-2} = 7,85 \text{ ms}^{-2}$ .

---

<sup>[14]</sup>vgl. : Kuchling, S.628, Tabelle 13

<sup>[15]</sup>vgl. Abbildung bei Allianz Sponsoring

<sup>[16]</sup>vgl. YouTube-Video bei 01:32

Mit der Formel  $s = v_0 t + \frac{1}{2} a t^2$  [17] lässt sich die Strecke errechnen, die A in einer Sekunde zurücklegen konnte. Sie beträgt demnach 27,5 m. Außerdem ändert sich die Ausgangsgeschwindigkeit von Fzg. A für das Beschleunigungsrennen, welches berechnet werden soll. Diese lässt sich über die Formel  $v = v_0 + a t$  [17] ermitteln, das resultierende Ergebnis lautet  $31,35 \text{ ms}^{-1}$ . Über die Durchschnittsgeschwindigkeit lässt sich nun die Zeit, die jeweils benötigt wird, um zum „Ziel“, zum Ende der Geraden, zu gelangen, berechnen. Dabei wird angenommen, dass die Fahrer perfekt, also fehlerfrei und ohne jegliche Unterbrechungen durch das Schalten fahren.

Die Durchschnittsgeschwindigkeit berechnet sich durch  $\bar{v} = \frac{v_0 + v_{\max}}{2}$  [17] mit  $23,5 \text{ ms}^{-1}$  bzw.  $31,35 \text{ ms}^{-1}$  als  $v_0$ . Um den Endabstand festzustellen, berechnen wir nun die Zeit, die B benötigt, um den Bremspunkt zu erreichen und die Strecke, die A in dieser Zeit zurücklegen konnte. Die Zeit, die B benötigt, lässt sich mit der Gleichung  $t = \frac{s_{\text{Gerade}}}{\frac{v_0 + v_{\max B}}{2}}$  berechnen (Kombination der bereits genannten Formel und  $\Delta s = v \times \Delta t$  [16]).

Dies führt wiederum zu  $s_A = \frac{v_{0A} + v_{\max A}}{2} \times \frac{s_{\text{Gerade}}}{\frac{v_{0B} + v_{\max B}}{2}} + 27,5 \text{ m}$ .

Das Einsetzen von Werten liefert das Ergebnis 965,2 m. Fahrer A bleibt also weiterhin vorne. Allerdings hat sich der Abstand von Fahrer B auf Fahrer A deutlich reduziert, in Zahlen nämlich auf  $\Delta t = \frac{\Delta s}{v} = \frac{965,2 \text{ m} - 900 \text{ m}}{86,7 \text{ ms}^{-1}} = 0,752 \text{ s}$ .

Ich habe nun einmal mit dieser Abstandsreduzierung weitergerechnet und herausgefunden, dass Fahrer B nach 4 Runden automatisch überholt, wenn A und B im Rest der Runde ihren Abstand nicht weiter reduzieren ( Abstände nach 2. Runde: 42,1m – nach 3. Runde: 18 m - nach 4. Runde: -6,4 m). Wenn Fahrer B nun allerdings mit einer höheren Anfangsgeschwindigkeit als Fahrer A in die Gerade einfährt und z.B. härter bremst oder besser schaltet, könnte es zum früheren Überholen reichen. Auch kann er den Abstand durch fahrerisches Können auf der restlichen Strecke verkürzen. Hätte er einen geringeren Abstand am Anfang wäre der Überholvorgang natürlich schneller beendet. Dennoch sind die Werte von der FIA gut gewählt, da das Abklappen des Flaps nicht automatisch zum Überholen führt, sondern den Fahrer noch etwas fordert, aber trotzdem die Möglichkeit zu einem Kampf eröffnet.

---

[17] vgl. Kuchling, S.73

### 3. Fragestellung: Führt der verringerte Anpressdruck zu Bremsproblemen?

Es stellt sich nun die Frage, was passieren würde, wenn das Flap am Ende der Geraden einmal nicht wieder in seine Ausgangsposition zurückklappen würde. Normalerweise stellt es sich beim Treten des Bremspedals automatisch zurück<sup>[18]</sup>, doch technische Fehler sind niemals vollständig auszuschließen. Das Flap verursacht negativen dynamischen Auftrieb, welcher das Fahrzeug auf die Strecke presst und somit beim Bremsen auch zur Haftreibung beiträgt. Im Folgenden soll herausgefunden werden, wie wichtig dieses Flap für korrektes Bremsen ist, und ob ein Defekt zum Verlassen der Strecke führen würde.

#### 3.1 Definition und Berechnung des dynamischen Auftriebs

Auftrieb entsteht durch den Druckunterschied an der Ober- und Unterseite des Flügelprofils, welcher durch die Geschwindigkeitsunterschiede der Strömungen entsteht<sup>[19]</sup>. Die verschiedenen Formen an der Ober- und Unterseite bremsen die Strömung nämlich unterschiedlich stark ab. Dies lässt sich durch eine Grafik verdeutlichen (siehe Anhang C)

Bei Fahrzeugen richtet sich der von Flügeln erzeugte „Auftrieb“ lotrecht in Richtung Boden und wird daher als „Abtrieb“ bezeichnet, um Verwechslungen auszuschließen. Es kann nämlich an Fahrzeugen auch sehr wohl „Auftrieb“ entstehen, wenn keine Flügel vorhanden sind. Im folgenden soll deshalb von „Abtrieb“ gesprochen werden, obwohl die selbe Formel wie die zur Berechnung des „Auftriebs“ zum Einsatz kommt.

Die Abtriebskraft ist durch die folgende Formel definiert:  $F_A = c_A \frac{\rho}{2} A v^2$ <sup>[20]</sup>, mit  $c_A$  als Auftriebsbeiwert, welcher wie der Strömungswiderstandskoeffizient einheitslos ist und im Windkanal ermittelt werden muss.  $\rho$  gibt die Dichte des Mediums,  $A$  die Querschnittsfläche des Flügelprofils und  $v$  die Geschwindigkeit an<sup>[21]</sup>.

---

<sup>[18]</sup>vgl. Hecker, S. V7

<sup>[19]</sup>vgl. Stöcker, S.184

<sup>[20]</sup>Stöcker, S.184

<sup>[21]</sup>vgl. Stöcker, S.184

### 3.2 Berechnung des Bremsweges

Die Berechnung des Bremsweges unter Einbeziehung der Haftreibung ist uns bereits aus dem Physikunterricht bekannt (vgl. deshalb mit <sup>[22]</sup>). In diesem Falle müssen allerdings noch der Abtrieb, der das Gewicht des Autos erhöht, und der Strömungswiderstand als entschleunigendes Element einbezogen werden. Beim Bremsen mit Rädern, die kurz vor dem Blockieren stehen, wirkt deren Reibung auf der Straße gegen die im sich bewegenden Fahrzeug enthaltene Energie. Dabei wird die Bewegungsenergie umgewandelt und als Wärmeenergie den Reifen und dem Asphalt zugeführt. Da das Fahrzeug nicht bis zum Stillstand abgebremst wird, sondern nur eine Geschwindigkeit erhalten soll, mit der sich die Kurve sicher durchfahren lässt, wird die Bewegungsenergie nur reduziert und nicht vollständig umgewandelt. Deshalb lässt sich die folgende Gleichung aufstellen:

$$W_{kinFzg.v_{max}} - W_{kinFzg.v_{end}} = F_{Haft} \times s + F_W$$

Ausgeschrieben würde sie lauten:

$$\frac{1}{2}mv_{max}^2 - \frac{1}{2}mv_{end}^2 = f_{Haft} \times F_G \times s + c_W \frac{\rho}{2} A \bar{v}^2$$

( $m$ = Masse Fzg. in kg,  $v$ = Geschwindigkeit in  $ms^{-1}$  mit  $_{max}$  als Anfangsgeschw. und  $_{end}$  als Endgeschw. ,  $f_{Haft}$ =Haftreibungskoeffizient,  $F_G$ = Gewichtskraft in N,  $s$ = Bremsweg in m)

Hierbei ist nun zu bedenken, dass sich  $F_G$  nicht nur aus  $m \times g$  ( $g$ = Ortsfaktor) zusammensetzt, sondern dass es die Summe aus Gewichtskraft und Abtriebskraft des Fahrzeugs minus Abtriebskraft des Flaps ist, da letztere dem Fahrzeug fehlt. Umgestellt nach  $s$ , welches ja den gesuchten Wert darstellt, liest sich die Gleichung nun:

$$s = \frac{\frac{1}{2}mv_{max}^2 - \frac{1}{2}mv_{end}^2 - c_W \frac{\rho}{2} A_{Front} \bar{v}^2}{f_{Haft} \times (m \times g + c_{AFzg} \frac{\rho}{2} A_{Oben} \bar{v}^2 - c_{AFlap} \frac{\rho}{2} A_{Flap} \bar{v}^2)}$$

### 3.3 Wertefindung zur Berechnung des Bremsweges

$v_{max}$  wurde für ein Fahrzeug mit weggeklapptem Flap in 2.3 berechnet, das Ergebnis betrug  $89,8 ms^{-1}$ .  $v_{end}$  entnehmen wir erneut der Streckengrafik für Sepang, die Kurvengeschwindigkeit beträgt demnach  $76 kmh^{-1}$  <sup>[23]</sup>,

---

<sup>[22]</sup> vgl. Bader S.37-38

<sup>[23]</sup> vgl. Abbildung bei Allianz Sponsoring

also  $21,1 \text{ ms}^{-1}$ . Der  $c_W$ -Wert, die Luftdichte und die Schattenfläche, hier mit  $A_{Front}$  abgekürzt wurden bereits in 2.2 genannt. Die Mindestmasse eines Rennautos beträgt  $640 \text{ kg}^{[24]}$ .  $\bar{v}$  beträgt mit weggeklapptem Flap  $55,45 \text{ ms}^{-1}$ , ohne  $53,9 \text{ ms}^{-1}$  (vgl. 2.4). Der Ortsfaktor ist mit  $9,81 \text{ Nkg}^{-1}$  bekannt. Es fehlen also nur noch die Querschnittsfläche, welche ich erneut mit einem Bild ermittelt habe (s. Anhang B; Ergebnis ist  $5,53 \text{ m}^2$ ), die Haftreibungszahl eines Rennreifens - diese beträgt  $\sim 3^{[25]}$  - und der  $c_A$ -Wert. Letzterer ist wie auch schon der  $c_W$ -Wert nicht bekannt und muss erschlossen werden. Aus der Annahme, dass ein Formel-1-Fahrzeug ab einer bestimmten Geschwindigkeit an der Decke fahren kann, lässt sich der ungefähre  $c_A$ -Wert zurückführen. Tzresniowski gibt in diesem Zusammenhang an, dass ein Formel-1-Fahrzeug bei „240 km/h [...] tatsächlich rund 16 kN Abtrieb [erzeugt]“<sup>[26]</sup>. Stellt man die in 3.1 eingeführte Formel nach  $c_A$  um,  $c_A = \frac{F_A}{\frac{\rho}{2} A v^2}$ , so erhält man für  $66,66 \text{ ms}^{-1}$  und  $16000 \text{ N}$  das Ergebnis  $c_{A,FzG} = 1,08$ . Der  $c_A$ -Wert eines einzelnen Flügelprofils mit den Maßen  $0,785 \text{ m} * 0,23 \text{ m}$  (Hälfte der Länge des Heckflügels aus der Vogelperspektive, da es sich um einen Doppelflügel handelt und nur ein Flap wegklappt) und einem Anstellwinkel von  $6^\circ$ , dies scheint mir ein realistischer Wert zu sein, beträgt  $6,6^{[27]}$  (Zusammenfassung der Werte erneut in Anhang D).

### 3.4 Ergebnisse und Auswertung

Setzt man alle Werte in die Formel ein, so erhält man für das Bremsen ohne weggeklapptem Heckflügel, also im Normalzustand  $46,8 \text{ m}$  Bremsweg, mit weggeklapptem Heckflügel allerdings ganze  $53,7 \text{ m}$ . Diese Differenz von  $\sim 7 \text{ m}$  führt unweigerlich zum Verlassen der Strecke, was mindestens einen großen Zeitverlust für den Sportler darstellt.

---

<sup>[24]</sup> vgl. Fédération Internationale de l'Automobile. Unterpunkt 4.1

<sup>[25]</sup> Tzresniowski, S.204

<sup>[26]</sup> Tzresniowski, S.137

<sup>[27]</sup> vgl. Prandtl, S.113

## Literaturverzeichnis

*Allianz Sponsoring*

[http://sponsoring.allianz.com/static/sites/default/media/formula1/Images\\_2011/CircuitGraphics2011/2011\\_ALZ\\_02\\_Malaysia\\_D\\_CMYK\\_300DPI\\_V03.zip](http://sponsoring.allianz.com/static/sites/default/media/formula1/Images_2011/CircuitGraphics2011/2011_ALZ_02_Malaysia_D_CMYK_300DPI_V03.zip) (Stand 20.04.11)

*Apolin, Mag.Dr. Martin:* Flügelkraft. In: The Red Bulletin Deutschland, 3/2011, S. 26-27

*Bader, Prof. Dr. Franz / Dorn, Prof. Friedrich:* Physik 11: Ausgabe C  
Gymnasium Sek II, Hannover <sup>1</sup>2000

*F.A.Brockhaus:* Luftwiderstand. In: Brockhaus-Enzyklopädie: in 24 Bd., Band 13, Mannheim <sup>18</sup>1993, S.602

*Fédération Internationale de l'Automobile:* 2011 F1 Technical Regulations.

[http://argent.fia.com/web/fia-public.nsf/15A68242E9992FCEC12577F8004A826A/\\$FILE/1-2011%20TECHNICAL%20REGULATIONS%2010-12-2010.pdf](http://argent.fia.com/web/fia-public.nsf/15A68242E9992FCEC12577F8004A826A/$FILE/1-2011%20TECHNICAL%20REGULATIONS%2010-12-2010.pdf) (Stand 04.04.11)

*Hecker, Anno:* Multitasking im Cockpit. In: Frankfurter Allgemeine Sonntagszeitung, 11/2011, S. V7

*Kuchling, Horst:* Taschenbuch der Physik, München <sup>19</sup>2007

*Lindner, Helmut/Siebke, Wolfgang:* Physik für Ingenieure, München-Wien <sup>17</sup>2006

*Prandtl, Ludwig:* Ergebnisse der Aerodynamischen Versuchsanstalt zu Göttingen, Göttingen <sup>1</sup>2009 (Wiederauflage von München-Berlin <sup>1</sup>1921)

*Stöcker, Prof. Dr. Dr. h.c. Horst:* Taschenbuch der Physik, Frankfurt a.M. <sup>6</sup>2010

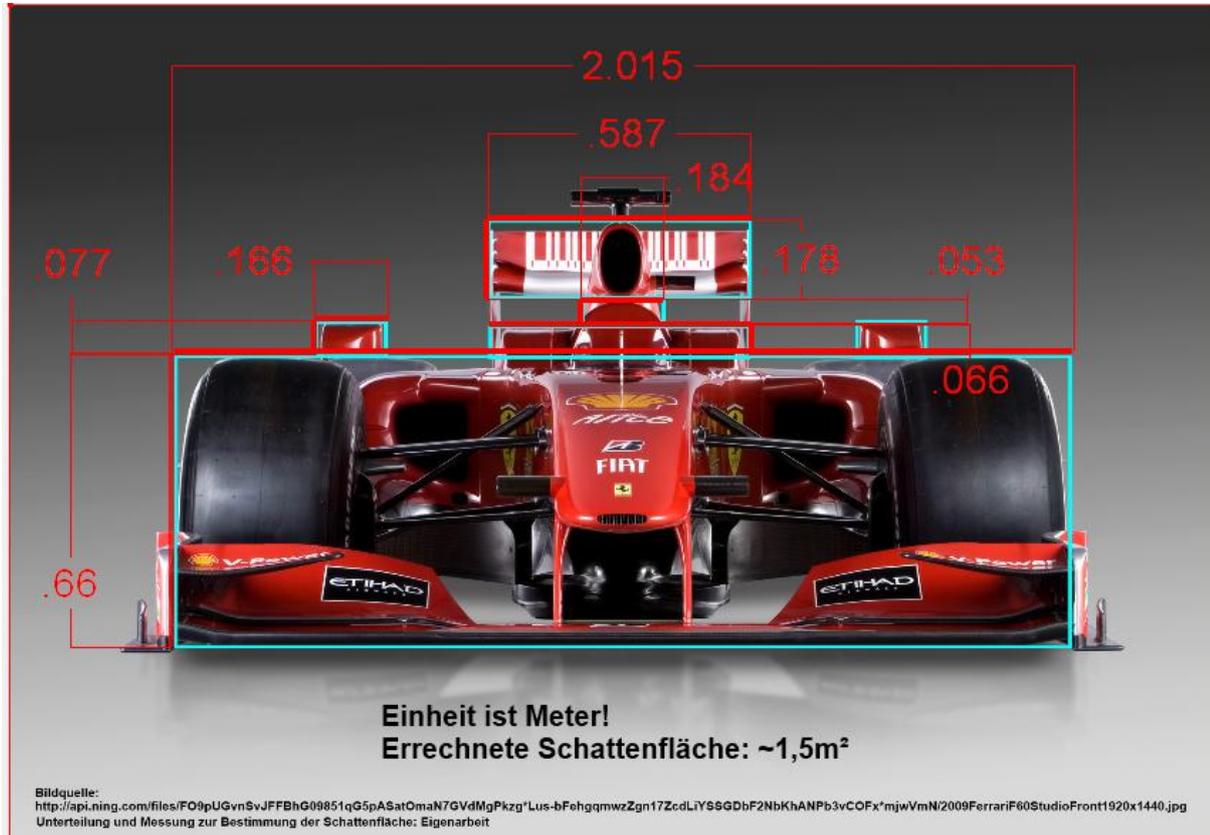
*Tzresniowski, Michael:* Rennwagentechnik: Grundlagen, Konstruktion, Komponenten, Systeme, Wiesbaden <sup>2</sup>2010

*YouTube (hochgeladen von 100ajibola)*

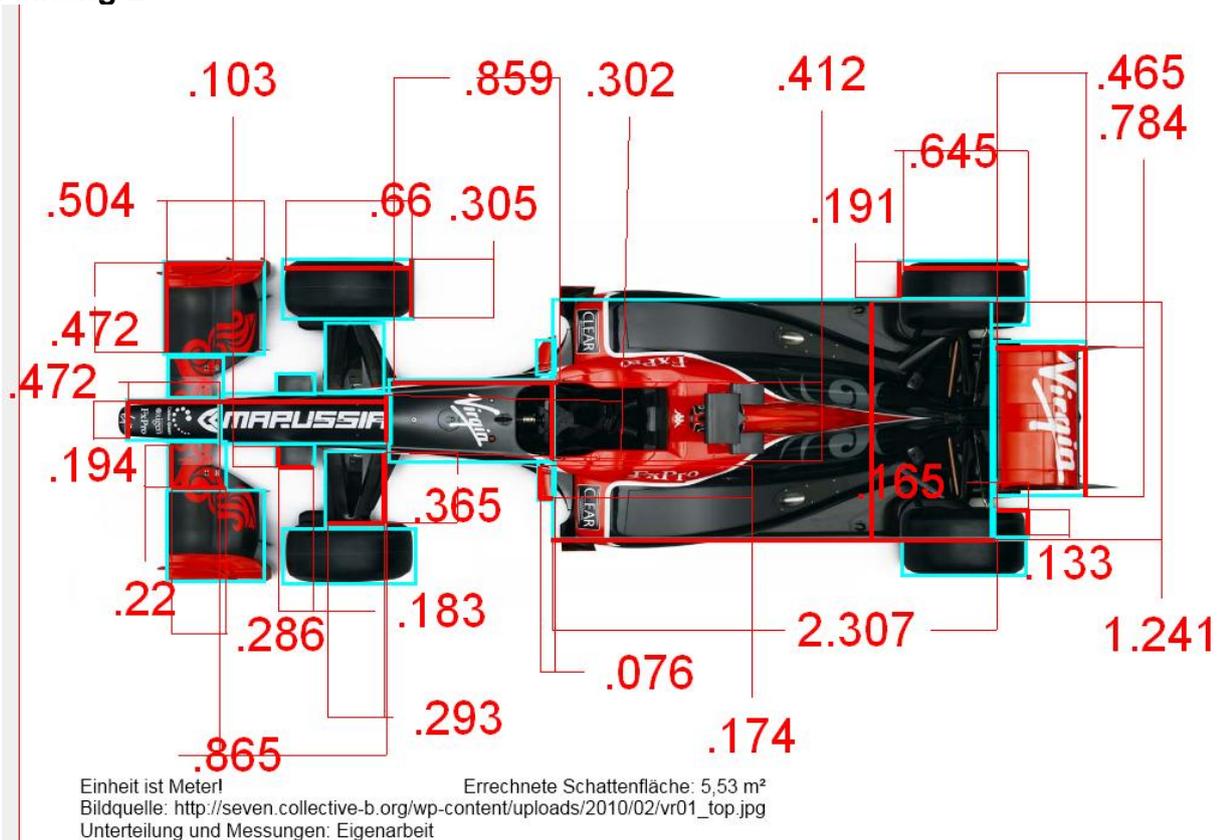
<http://www.youtube.com/watch?v=RPRGqBnbrS8> (Stand 25.04.11)

## Anhang

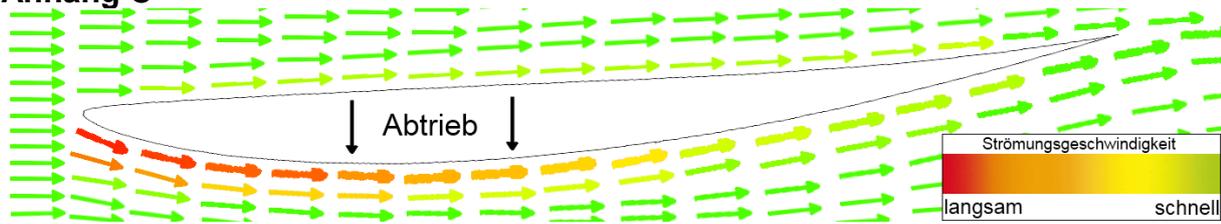
### Anhang A



### Anhang B



### Anhang C



Quelle: Eigenarbeit

### Anhang D

Wertetabelle (zur besseren Übersicht in Reihenfolge der Nennungen)

| Bezeichnung                          | Wert                                   |
|--------------------------------------|--|
| Schattenfläche $A$                   | $1,5\text{m}^2$                        |
| Leistung Rennmotor $P$               | $5,89 \cdot 10^3 \text{ W}$            |
| $c_W$ -Wert, mit Flap                | 1                                      |
| $c_W$ -Wert, ohne Flap               | 0,90                                   |
| Dichte Luft $\rho$                   | $1,204 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ |
| $v_{\text{max}}$ , mit Flap          | $86,7 \text{ ms}^{-1}$                 |
| $v_{\text{max}}$ , ohne Flap         | $89,8 \text{ ms}^{-1}$                 |
| Länge Gerade $s$                     | 900 m                                  |
| $v_{0, B}$ auf Gerade                | $23,5 \text{ ms}^{-1}$                 |
| $v_{0, A}$ auf Gerade                | $31,35 \text{ ms}^{-1}$                |
| Abstand A zu B, $\Delta s$           | 27,5 m                                 |
| $v_{\text{end}}$ in Kurve            | $21,1 \text{ ms}^{-1}$                 |
| Masse Rennauto, $m$                  | 640 kg                                 |
| $\bar{v}$ , mit Flap                 | $53,9 \text{ ms}^{-1}$                 |
| $\bar{v}$ , ohne Flap                | $55,45 \text{ ms}^{-1}$                |
| Ortsfaktor $g$                       | $9,81 \text{ ms}^{-2}$                 |
| Querschnittsfläche $A_{\text{oben}}$ | $5,53 \text{ m}^2$                     |
| Haftreibungszahl Rennreifen, $f_h$   | 3                                      |
| $c_A$ -Wert mit Flap                 | 1,08                                   |
| Maße Flap                            | $0,785\text{m} \cdot 0,23\text{m}$     |
| $c_A$ - Wert Flap                    | 6,6                                    |

**Selbstständigkeitserklärung**

Ich erkläre, dass ich die Minifacharbeit ohne fremde Hilfe angefertigt und nur die im Literaturverzeichnis angeführten Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.