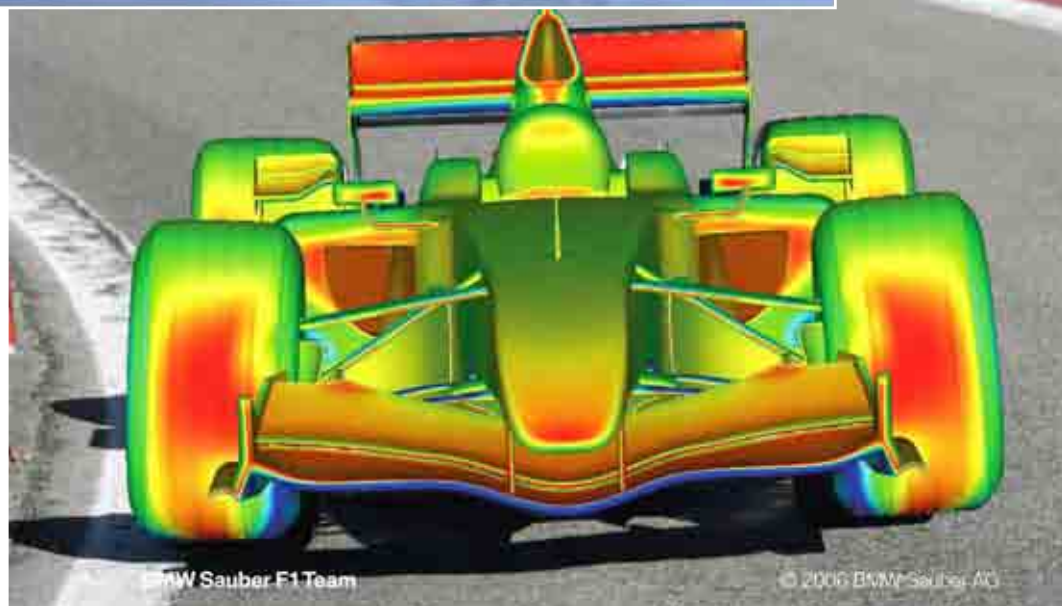


Warum ist der cw-Wert eines normalen Serienfahrzeuges besser als der eines hochentwickelten Formel 1 Rennwagens?  
Aerodynamik im Automobilbau



**Facharbeit Physik**

**Marvin Dönni**

**1. April 2008**

Marvin Dönni

## Inhaltsverzeichnis

|   |    |
|---|----|
| Einleitung.....   | 3  |
| Der $c_w$ -Wert .....   | 4  |
| Die Rolle des $c_w$ -Wertes.....  | 4  |
| Formelbetrachtung.....  | 5  |
| $c_w$ -Wert Bestimmung.....   | 6  |
| Messreihe zum Luftwiderstand verschiedener Körper .....   | 6  |
| Gründe für die Probleme beim 1. Versuch.....  | 7  |
| Optimierung des Versuchsaufbaus .....   | 7  |
| Versuchsreihe mit Miniaturen .....  | 9  |
| Versuch der Bestimmung der Windgeschwindigkeit .....  | 10 |
| Welche Bedeutung hat der $c_w$ -Wert in der Praxis? .....   | 11 |
| Funktionen der Aerodynamik.....   | 12 |
| Die trockene Autoscheibe .....  | 12 |
| Geräusche.....  | 12 |
| Auf- und Abtrieb.....   | 12 |
| Unterschiedliche Entwicklungsschwerpunkte bezüglich der Aerodynamik im Motorsport und der<br>PKW-Fertigung..... | 13 |
| Quellen .....   | 14 |
| Bücher .....  | 14 |
| Sonstige .....  | 14 |
| Anhang: .....   | 15 |
| Aufbau des ersten Versuchs:.....  | 15 |
| Versuchsaufbau mit Kartoffeln: .....  | 15 |
| Bilder zur Versuchsreihe mit den Miniaturen: .....  | 16 |

## Einleitung

Wenn die Formel 1 Fahrzeuge der neuen Saison präsentiert werden, liest man es wieder und wieder. Die zentrale Rolle, ob ein Formel 1 Fahrzeug siegt oder verliert spielt in den letzten Jahren zunehmend die Aerodynamik. Die Leistung der Motoren ist zunehmend in den Hintergrund getreten. Man erfährt von immer höher werdenden Kosten, die bei der Entwicklung entstehen. Besondere Aufmerksamkeit wird den Windkanälen gewidmet, die 24 Stunden am Tag betrieben werden. Es werden auch Computer zu Simulationszwecken genutzt, deren Leistungsdaten unvorstellbar sind. Hier sei nur ein Beispiel genannt.“ Albert 2“, der Rechencomputer des BMWsauberF1-Teams, der mit einem CFD-System (Computational Fluid Dynamics, zu deutsch computergestützte Strömungssimulation) arbeitet, um Luftströmungen am Formel 1 Wagen zu berechnen. „Albert 2“ schafft 12.288.000.000.000 Rechenschritte pro Sekunde und hilft mit seinen Simulationen den 150 Mitarbeitern. Der Windkanal, dessen Hauptventilator unter Volllast 3000kW benötigt, kann Windgeschwindigkeiten von bis zu 300km/h zu erzeugen. Man sieht also den riesigen Aufwand, der für die Aerodynamik der Formel 1 Wagen betrieben wird. Der beim normalen PKW oft zitierte  $c_w$ -Wert, der immer wieder gesenkt werden soll, ist bei einem Formel 1 Fahrzeug trotzdem unvorstellbar groß.

Zum Vergleich einmal einige Werte:

| Fahrzeug                               | $c_w$ -Wert |
|--|-------------|
| <b>Käfer</b>                           | 0,48        |
| <b>Heutige Limousine (BMW 5er E60)</b> | 0,28        |
| <b>Heutiger SUV (BMW X5 E53)</b>       | 0,36        |
| <b>moderner Formel 1 Wagen</b>         | 1,2         |
| <b>VW Beetle</b>                       | 0,38        |
| <b>VW 1-Liter-Auto</b>                 | 0,159       |

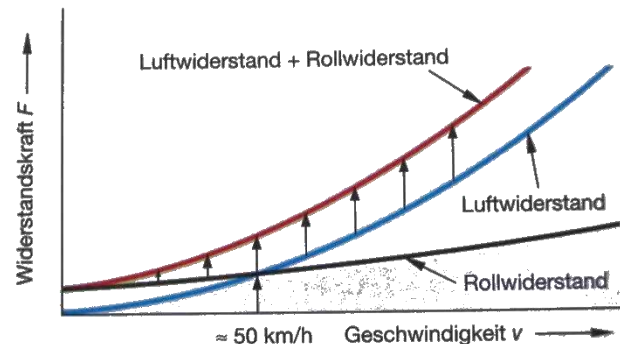
Bei der Betrachtung dieser Werte ist man schon ein bisschen verwundert. Besonders, dass die Aerodynamik, zumindest für den Laien, von einem Geländewagen besser zu sein scheint als von einem kleineren und runden Käfer. Es drängt sich die Frage auf, was eigentlich der  $c_w$ -Wert (oder auch  $c_x$ -Wert) ist, und welche Rolle dieser spielt.

## Der $c_w$ -Wert

### Die Rolle des $c_w$ -Wertes

Der Zusammenhang zwischen unterschiedlichen Formen und Luftwiderständen und dem daraus resultierenden Fahrwiderstand, ist schon lange bekannt. Welche Kräfte beim Fahren auftreten, ist sehr gut an dieser Grafik zu erkennen.

Der Vortrieb eines Fahrzeuges wird durch die Fahrwiderstände, die im Wesentlichen aus drei Komponenten bestehen, begrenzt:

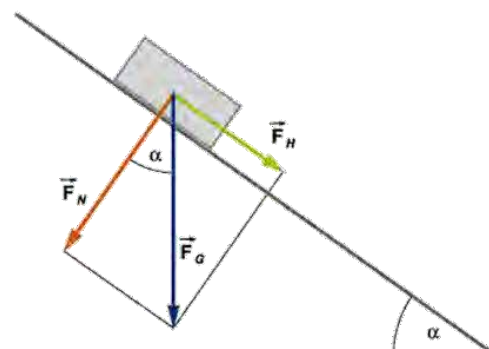


Rollwiderstand, Steigungswiderstand und Luftwiderstand

1) Der Rollwiderstand entsteht z. B. durch die Lagerreibung der Radlager, sowie durch Kräfte, die während der Fahrt für die Verformung der Reifen und der Fahrbahn aufgebracht werden müssen. Die Rollreibung lässt sich vereinfacht durch die Formel  $F_R = F_G \cdot c_R$  darstellen.

Wenn nun für  $F_G = mg$  eingesetzt wird, erhält man folgende Gleichung  $F_R = mgc_R$ , wobei  $c_R$  der spezifische Rollreibungskoeffizient ist. Dieser ist abhängig von der Beschaffenheit der Fahrbahn und der Beschaffenheit der Reifen (Profil, Durchmesser, Luftdruck, Breite, Walkbewegung etc.). Die Verbindung zur Praxis findet man auch hier: Der ADAC empfiehlt seinen Mitglieder den Reifendruck um maximal 0,5 bar zu erhöhen, um den Fahrtwiderstand und somit den Spritverbrauch zu senken. Der Rollwiderstand steigt bei zunehmender Geschwindigkeit sehr langsam an. An der Formel ist dies nicht abzulesen, da diese ein vereinfachtes Modell ist. Die Reibungen innerhalb eines Fahrzeuges sind jedoch sehr komplex und vielseitig. Größtenteils versucht man diese durch Öle zu reduzieren, die eine immer geringere innere Reibung haben.

2) Der Steigungswiderstand spielt nur bei Bergauffahrten eine Rolle, d. h. wenn wir dem Körper kinetische Energie zufügen. Hier sind genau die Kräfte im Spiel, die jeder Schüler in der Schule unter dem Themenbegriff „schiefe Ebene“ kennen lernt. Die Hangabtriebskraft ist



hier eine entscheidende Komponente. Die lässt sich mit der Formel  $F_H = m \cdot g \cdot \sin(\alpha)$  berechnen. Die Steigung einer Straße wird selten als Winkel angegeben, sondern als Höhenänderung  $h$ , ausgedrückt in einer Prozentzahl. Bei einer bestimmten zurückgelegten Strecke  $l$ , ist die Formel durch einsetzen von  $\sin a = \frac{h}{l}$  nun für unsere Anwendung praktischer. Also:

$$F_H = mg \frac{h}{l}$$

Dieser Widerstand ist für Automobilkonzerne bei der Entwicklung nicht von Interesse, da eine bergaufführende Straße, immer gleich ansteigt, egal welche Änderungen man am Fahrzeug vornimmt.

3) Der Luftwiderstand hat einen bedeutenden Einfluss auf den Fahrtwiderstand. Auf diesen wird im Folgenden genauer eingegangen.

### Formelbetrachtung

Bei der Frage nach dem Luftwiderstand trifft man auf folgende Formel:

$$F_L = \frac{\rho v^2 A c_w}{2}$$

Umgeformt, nach dem gesuchten  $c_w$ -Wert, erhält man folgende Formel:

$$c_w = \frac{2F_L}{\rho v^2 A}$$

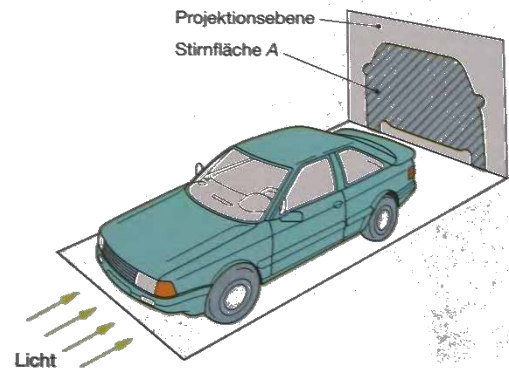
Jetzt ist erst einmal zu klären, welcher der Buchstaben für welche Größe steht, um die Faktoren, die zu einem schlechteren oder besseren  $c_w$ -Wert führen, genauer betrachten zu können.

$\rho$  ist die Dichte der Luft, bzw. des Stoffes der unseren Körper umgibt. Einheit ist  $\frac{kg}{m^3}$ . Da in unserem Fall alle Körper (Fahrzeuge) von Luft umgeben sind, können wir immer mit  $\rho = 1,29 \frac{kg}{m^3}$  rechnen. Diese ist bei allen Versuchen hier auf der Erde als Konstante anzusehen, also ähnlich wie der Ortsfaktor  $g$ .

$v^2$  ist die Geschwindigkeit, mit der der Körper durch ruhige Luft fährt oder die Geschwindigkeit der Luft, die auf einem festen Körper bzw. ein Modell trifft. Diese geht quadratisch ein. Wie jeder in der Fahrschule gelernt hat, steigt der Luftwiderstand bei doppelter Geschwindigkeit um das vierfache.

A ist die Stirnfläche des Fahrzeuges oder des Körpers. Diese kann man bei einem Quader noch leicht berechnen, jedoch bei realen Fahrzeugen benötigt man meist einen Computer, um die Stirnfläche exakt bestimmen zu können.

Besonders die CAD-Modelle vereinfachen das Berechnen erheblich. Wir können die Stirnfläche nur mit Hilfe einer Projektion näherungsweise bestimmen. Wie dies geht, ist aus dem Schaubild ersichtlich. Der Luftwiderstand ist die einzige Größe die neben dem  $c_w$ -Wert durch die Unterschiede bei der Form der Fahrzeuge vom Konstrukteur beeinflusst werden kann. Sie ist ebenfalls von Bedeutung (sowohl  $\rho$  als auch  $v$  sind durch die Körperform nicht zu beeinflussen).

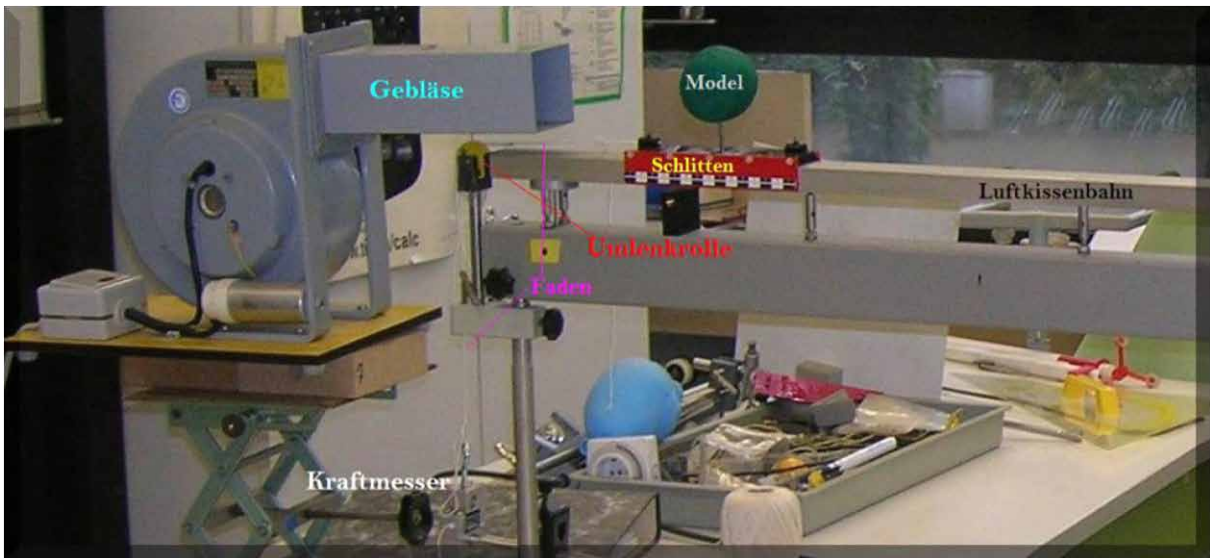


## **$c_w$ -Wert Bestimmung**

### **Messreihe zum Luftwiderstand verschiedener Körper**

Nach soviel Theorie stellt sich nun die Frage, ob man den  $c_w$ -Wert denn wirklich so einfach bestimmen kann. In einer Reihe von Versuchen möchte ich nun auch selber den  $c_w$ -Wert von verschiedenen Körpern und Körperformen bestimmen.

Die erste Idee den  $c_w$ -Wert zu ermitteln war, einen Körper auf einem Schlitten zu befestigen und dann auf einer Luftkissenbahn schweben zu lassen. Die Befestigung sollte Reibungskräfte ausschließen, damit der am Schlitten angebrachte Kraftsensor den Luftwiderstand misst. Das auf Höhe des Gebläses montierte Modell sollte nun, von mir aus gesehen, nach rechts gedrückt werden. Die erste Verbesserung an diesem Versuchsaufbau war, den Kraftsensor nicht direkt am Schlitten zu befestigen, sondern unterhalb der Luftkissenbahn, damit dieser nicht im Windzug steht, und die Messung verfälscht. Die Kraft sollte über einen Faden und eine Umlenkrolle weitergeleitet werden. Leider zeigte der Kraftsensor (oder Kraftmesser in der Grafik genannt) keinen Ausschlag. (Weitere Bilder hierzu auch im Anhang)



### Gründe für die Probleme beim 1. Versuch

Zum einen ist durch die Luftkissenbahn der Reibungswiderstand nicht ganz verschwunden. Ein geringer Reibungswiderstand ist immer noch da. Desweiteren ist unser Band etwas elastisch gewesen und hat einen Teil der kinetischen Energie aufgenommen. Statt die Energie an den Sensor weiter zu leiten, ist durch das Benutzen der Umlenkrolle eine gewisse Rollreibung entstanden. Also wurde unsere Kraft  $F_L$ , die gemessen werden sollte, durch drei andere Kräfte ( $F_R$  der Umlenkrolle,  $F_K$  des Fadens und  $F_R$  des Schlittens) sehr stark reduziert worden. Zusätzlich kam noch der ungünstige Arbeitsbereich unseres Kräftesensors hinzu, der nicht so empfindlich war, als dass dieser diese kleinen Kräfte hätte messen können.

### Optimierung des Versuchsaufbaus

Es ging im Folgenden darum, den Aufbau nach und nach zu verbessern. Der wichtigste Schritt war die Verwendung eines anderen Kraftsensors. Dieser hat nicht nur den Vorteil, dass er empfindlicher ist und einen für diesen Zwecke geeigneteren Messbereich hat, sondern auch, dass er die Luftkissenbahn überflüssig macht. Man kann den Körper mit Hilfe eines Nagels o. ä. direkt an dem Kraftsensor befestigen. Wir schließen so alle drei Kräfte aus, die unsere Messung im ersten Versuch behindert haben.

Bei Versuchen mit diesem optimierten Aufbau, erhielt man schon sehr brauchbare Ergebnisse, aber dennoch gab es auch hier noch Verbesserungspotential. Ein kleines Problem war, dass mit Hilfe des Cassy-Systems keine Single-Point-Messung möglich war. Man musste Werte über eine längere Zeit aufnehmen und anschließend mit Excel oder einem vergleichbaren Tabellenkalkulationsprogramm den Mittelwert errechnen. Vor ein größeres Problem, stellte mich die Wahl des Modells. Die Körper bestanden aus Knete, um

viele unterschiedliche Modelle innerhalb kürzester Zeit erstellen zu können und auch Feinheiten rasch zu modifizieren. Leider war die Haltbarkeit nicht wie gewünscht. Auf einem Nagel befestigt, waren sie mit dem Sensor verbunden, drehten sich weg und fielen nach wenigen Sekunden auf den Boden. Dennoch erhielt ich folgende, recht brauchbare und realistische Werte:

| Körper            | $F_L$ in mN | $A$ in $\text{cm}^2$ | $F_L \cdot A$ |
|-------------------|-------------|----------------------|---------------|
| <b>Kugel</b>      | 282,42      | 28,27                | 0,000798      |
| <b>Zylinder 1</b> | 672,47      | 38,48                | 0,002576      |
| <b>Zylinder 2</b> | 367,16      | 24,1                 | 0,000849      |

Deutlich wird hier schon, dass die Kugel im Vergleich zu anderen Formen, einen sehr geringen Luftwiderstand hat. Als Ergebnis kann man festhalten, dass der gleiche Körper von jeder Seite einen anderen  $c_w$ -Wert und Luftwiderstand hat. Der Zylinder hat von beiden Seiten eine andere Stirnfläche und auch einen anderen Widerstand, wie man in der Tabelle leicht ablesen kann. Dieser Versuchsaufbau sollte aber jetzt noch weiter verbessert werden, besonders bei der Wahl der Modelle. Statt Knete wurden als Material für die Modelle nun im Folgenden Kartoffeln genommen. Die Vorteile sind einerseits, dass diese besser auf dem Nagel halten und nicht runter rutschen. Andererseits sind die Schnittkanten glatt und sauber und nicht unregelmäßig und uneben, wie bei der bisher verwendeten Knete. Das Wegdrehen wurde durch zusätzliche Drähte am hinteren Ende des Sensors reduziert bzw. ganz vermieden. Desweiteren war es noch wichtig den Querschnitt des Körpers zu wissen. Da ich die Form der Körper so gewählt hatte, dass entweder ein Rechteck oder ein Kreis als Grundlage für den Querschnitt diente, war die Berechnung simpel. Nach Auswertung aller Ergebnisse erhält man folgende Werte (Bilder aller Modelle im Anhang):

| Körper             | Formbeschreibung | $F_L$ in mN | $A$ in $\text{cm}^2$ |
|--------------------|------------------|-------------|----------------------|
| <b>Kartoffel 1</b> | Quader           | 322,28      | 12,4                 |
| <b>Kartoffel 2</b> | schräg           | 345,44      | 12,4                 |
| <b>Kartoffel 3</b> | konkav           | 341,3       | 12,4                 |
| <b>Kartoffel 4</b> | konvex           | 301,33      | 12,4                 |

Da man aufgrund der nicht nachgemessenen Luftgeschwindigkeit den  $c_w$ -Wert nicht berechnen kann, sind nun nur die Verhältnisse der Produkte aus Luftwiderstand  $F_L$  und Stirnfläche  $A$  zu betrachten. Da aber die Stirnfläche  $A$  in diesem Fall immer gleich ist, kann man sogar die  $F_L$ -Werte direkt miteinander vergleichen. Deutlich wird auf jeden Fall, dass



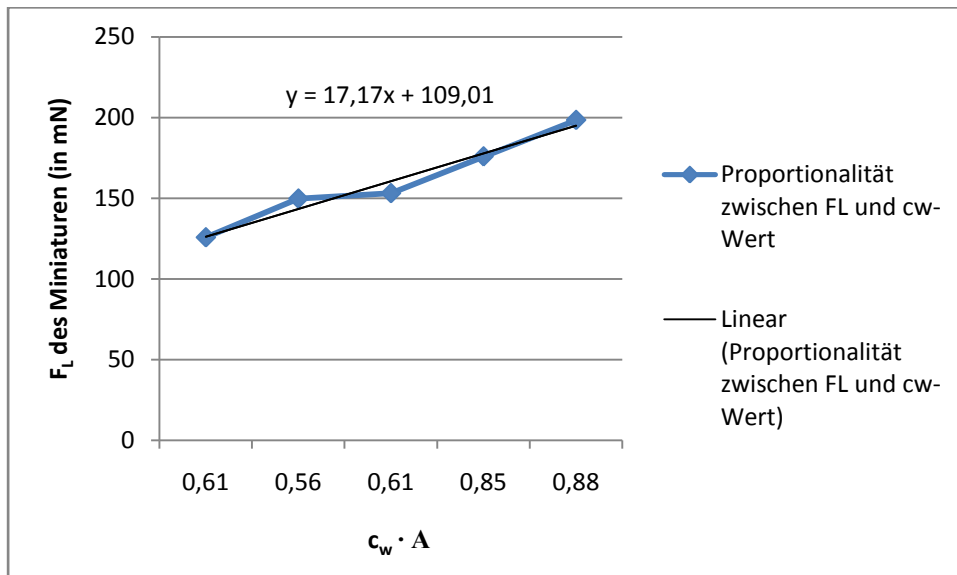
durch einfache Veränderungen der Form schon relative große Änderungen am Luftwiderstand deutlich werden. Wenn man jetzt bedenkt, dass noch nicht mal alle Möglichkeiten der Optimierung genutzt wurden, zeigt sich welchen Einfluss die Formgestaltung hat. Eine Tropfenform wäre hier sicher das Optimum gewesen. Bei den Versuchen konnten leider nicht die Kräfte gemessen werden, die der Körper nach unten oder nach oben erfuhr. Diese hätten uns noch Aufschluss über Auf- und Abtrieb geben können. Ein Effekt der besonders im Autorennsport meist wichtiger ist als der Luftwiderstand.

### Versuchsreihe mit Miniaturen

Als Weiterführung der Versuchsreihe habe ich Miniaturen von Originalfahrzeugen als Modell genommen. Interessant hierbei ist das Vergleichen der Werte der Miniaturen mit denen der richtigen Fahrzeuge. Um die Modelle möglichst so anzuströmen, dass die Werte für ein Kfz realistisch sind, wurde eine Pappe als Fahrbahnersatz genommen, auf dem die Miniatur stand, so wie das Originalfahrzeug auf der Straße.

|                | $F_L$ in mN | $A$ in $m^2$ | $c_w * A$ | $c_w$ -Wert | $A$ in $cm^2$ |
|----------------|-------------|--------------|-----------|-------------|---------------|
|                | Miniatur    | Kfz          | Kfz       | des Kfz     | Miniatur      |
| <b>BMW E87</b> | 125,65      | 2,09         | 0,61      | 0,29        | 11,3          |
| <b>BMW E63</b> | 149,66      | 2,15         | 0,56      | 0,30        | 11,7          |
| <b>BMW E91</b> | 175,82      | 2,11         | 0,85      | 0,27        | 11,4          |
| <b>BMW E60</b> | 153,04      | 2,26         | 0,61      | 0,27        | 12,2          |
| <b>BMW E83</b> | 198,42      | 2,50         | 0,88      | 0,35        | 13,5          |

Bei Betrachtung der Messergebnisse lassen sich einige richtige Tendenzen erkennen. Zum Beispiel hat der Geländewagen (E83) den größten Luftwiderstand. Um jedoch die Ergebnisse möglichst einfach auszuwerten empfiehlt sich ein Diagramm. Da in den Luftwiderstand eines Fahrzeuges sowohl der  $c_w$ -Wert als auch die Stirnfläche einfließen, muss der Faktor aus diesen beiden Größen proportional zu  $F_L$  sein. Um dies zu überprüfen, empfiehlt sich hier ein Diagramm bei dem diese beiden Parameter gegeneinander aufgetragen werden. Im Optimalfall sollten wir eine Gerade erhalten.



Die Proportionalität ist sehr deutlich zu erkennen. Die kleinen Abweichungen von dem Ausgleichsgraphen lassen sich auf die Messungengenauigkeit des Cassysystems zurückführen und auf Störfaktoren, die im Windkanal selber entstehen konnten, da dieser kein geschlossenes System war. Ein weiterer Punkt der zu Abweichungen führen könnte, sind Unterschiede zwischen Miniatur und Originalfahrzeug. Die Miniatur hat keine Öffnungen hinter der sich ein Motorblock o. ä. befindet. Der Unterboden unterscheidet sich ebenfalls nicht unmerklich. Bei diesen ganzen Störfaktoren ist es fast schon überraschend, dass man hier eine solche Proportionalität mit verhältnismäßig geringen Abweichungen feststellen kann.

### Versuch der Bestimmung der Windgeschwindigkeit

Unter der Annahme, dass der  $c_w$ -Wert der Miniatur identisch ist, mit dem des Originalfahrzeuges, lässt sich die Luftgeschwindigkeit berechnen.

$$v = \sqrt{\frac{2F_L}{c_w \rho A}}$$

$F_L$  ist unser experimenteller Wert  $F_L = 125,65\text{mN}$

$c_w$  ist der Wert, den wir vom Originalfahrzeug übernehmen:  $c_w = 0,29$

$\rho$  ist die Luftdichte. Auf der Erde ist  $\rho = 1,29 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

$A$  ist ungefähr  $11,3 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$

Nun setzt man die Werte ein:

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot 125,65 \cdot 10^{-3}}{0,29 \cdot 1,29 \cdot 11,3 \cdot 10^{-4}}} = 24,38 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$$

Dieser Wert scheint sehr unrealistisch, da unser Gebläse wahrscheinlich eine geringere Windgeschwindigkeit als umgerechnet  $87,7 \frac{km}{h}$  erreicht. Es zeigt sich also, dass man mit dieser Methode nicht weiter kommt. Offensichtlich unterscheiden sich die  $c_w$ -Werte von Miniatur und dem Originalfahrzeug deutlich, oder die Messwerte wurden auf Grund von Störfaktoren und Messungenauigkeiten verfälscht. Da kein Anemometer zur Verfügung steht kann man den  $c_w$ -Wert der Modelle so nicht bestimmen, wohl aber sie untereinander vergleichen.

### Welche Bedeutung hat der $c_w$ -Wert in der Praxis?

Der  $c_w$ -Wert spielt auch in der Automobilindustrie eine wichtige Rolle. Deutlich macht das auch eine Reihe von Prototypen, die das Ziel hatten zu zeigen, wo die Grenzen des technisch Machbaren derzeit sind. Beispielhaft seien hier einmal zwei dieser Prototypen erwähnt.

Ein relativ früher Versuch, Kraftfahrzeuge aerodynamisch zu optimieren, wurde von Reinhard Freiherr von König-Fachsenfeld unternommen. Als Basis diente ihm ein BMW 328, der zur damaligen Zeit ein erfolgreicher Sportwagen war. Er hatte ein besonders gutes Leistungsgewicht und bot sich u. a. deshalb an. Ziel war es damals weniger, den Spritverbrauch zu senken, sondern dieses Fahrzeug, besonders für Autobahnfahrten, noch schneller zu machen. Freiherr von König-Fachsenfeld nutzte zur Reduzierung des  $c_w$ -Werts Detailverbesserungen, die auch in weiterentwickelter Form heute verwendet werden. Er verbaute abgerundete Scheiben (heute eine Selbstverständlichkeit), versenkbare Türgriffe und versuchte mit möglichst wenigen Kühlrippen auszukommen. Der  $c_w$ -Wert hätte ohne diese nur 0,29 betragen, auch für die heutige Zeit kein schlechter Wert.

Das Thema hat keinesfalls an Wichtigkeit verloren. Selbst wenn man heute den  $c_w$ -Wert in erster Line versucht zu senken, um den Benzinverbrauch zu reduzieren, so ist der Grundgedanke immer noch der gleiche, den Luftwiderstand zu minimieren. Ein aktuelles Beispiel ist hierzu das 1-Liter-Auto von VW. Das Ziel war es, ein möglichst verbrauchsarmes Fahrzeug zu realisieren. Einen bedeutenden Beitrag leistete die aerodynamische Feinarbeit. Der Verzicht auf alle möglichen Kühleinlässe und einer, von oben betrachtet, der Tropfenform sehr ähnliche Form tragen zum sehr geringen  $c_w$ -Wert von 0,159 bei. Durch eine sehr kleine Stirnfläche werden die Luftreibungskräfte zusätzlich reduziert.

## Funktionen der Aerodynamik

Die Aerodynamikentwicklung bei Serienfahrzeugen konzentriert sich auch auf Aspekte über die man normal nicht nachdenken würde. Aerodynamik kann sehr vielseitig sein, wie die folgenden Beispiele, die hier nur ganz kurz angeschnitten werden, verdeutlichen sollen.

### Die trockene Autoscheibe

An vielen Stellen nutzen die Konstrukteure den Fahrtwind zum Komfortgewinn, ohne dass sich eine nennenswerte Zahl von Kunden darüber bewusst ist. Wenn der Fahrer einer Limousine bei Regen aus der Heckscheibe sieht und eine relativ klare Sicht hat, würde er wahrscheinlich nicht auf die Idee kommen, dass das alles andere als purer Zufall ist. Die großen Autohersteller haben hier besonders in den letzten Jahren viel getan. Im Windkanal nutzen sie Wasser, welches mit fluoreszierenden Stoffen versetzt wurde. Dieses Wasser wird nun im Windkanal langsam auf bestimmte Stellen der Fahrzeuges gespritzt. Mit speziellen Kameras und Schwarzlichtlampen lässt sich nun der Weg, den das Wasser zurückgelegt hat, genau analysieren und man kann versuchen den Weg des Wassers zu optimieren. Das einzige Problem ist nur, dass leider in der Praxis selten ein so gerade gerichteter Windzug entsteht, wie im Windkanal. Denn genau dann wenn es regnet, ist meist auch Sturm und damit Wind aus verschiedenen Richtungen mit von der Partie und dieser sorgt so dafür, dass es mit einer trockenen Heckscheibe oder einem trockenen Türgriff nicht immer klappt.

### Geräusche

Ein weiterer Schwerpunkt hat sich besonders in den letzten beiden Jahrzehnten herausgebildet. Die Aeroakustik. Bei dieser sind spezielle Windkanäle von Nöten. In diesen können Windgeschwindigkeiten von bis zu 250km/h erreicht werden, und dies bei absoluter Stille. Hier werden von den Karosseriekanten bis zum Außenspiegel alle einzelnen Bauteile eines Fahrzeuges genau analysiert. Innerhalb der Aeroakustik gibt es zwei verschiedene Richtungen. Die eine beschäftigt sich mit den Geräuschen innerhalb des Fahrzeuges und die andere mit Geräuschen außerhalb. Es gibt bei jedem Fahrzeugtyp jedoch unterschiedliche Ziele. Ein Ferrari soll bei einer Vorbeifahrt natürlich anders klingen als ein Limousine der Oberklasse.

### Auf- und Abtrieb

Eine ganz wichtige Rolle spielt der Auf- und Abtrieb von Fahrzeugen. Durch den Wind und die Form des Fahrzeuges wird es entweder auf die Straße gepresst oder von der Straße abgehoben. Für die Konstrukteure gibt es hier einen Spagat der zwischen Auf- und Abtrieb gemacht werden muss. Auftrieb ist in sofern interessant, dass bei hohen Geschwindigkeiten

das Auto leichter wird und die Endgeschwindigkeit erhöht werden kann, bei Flugzeugen ist dieser sogar schließlich so groß, dass diese tonnenschweren Maschinen sich einige hundert Meter vom Boden entfernen, oder sogar noch mehr. Der Abtrieb ist, besonders im Motorsport von Interesse. So fester ein Fahrzeug an den Boden gedrückt wird, umso schwerer ist es von dort aus wegzubewegen. Dies wird besonders bei Kurvenfahrten genutzt. Die Geschwindigkeit kann erhöht werden, weil das Fahrzeug nicht so schnell aus der Kurve getragen werden kann. Hier wird das Problem schon deutlich. In einer solchen Situation soll das Fahrzeug möglichst viel Abtrieb produzieren und auf der Geraden einen gewissen Auftrieb. Ein Versuch sind hier flexible Leitbleche an der Karosserie des Fahrzeuges. In Kurven, also bei niedrigen Geschwindigkeiten, stehen sie steil im Wind und sorgen für genügend Abtrieb, auf der Geraden, bei hohen Geschwindigkeiten, geben sie auf Grund des hohen Luftwiderstandes nach und sorgen so für einen reduzierten Abtrieb. Diese Form der Luftleitbleche wurde in der Formel 1 aufgrund von Sicherheitsbedenken verboten. Die meisten Optimierungen, die für einen höheren Abtrieb sorgen, bewirken auch einen höheren Luftwiderstand. Die Erklärung liefert der Erhaltungssatz, da die Kraft, die nach unten wirken soll, irgendwoher kommen muss. Diese resultiert aus der Energie die durch den Druck des Fahrtwindes auf die Karosserie entstehen muss. Dies ist sogar für einen Laien, bei genauerer Betrachtung eines Rennwagens, erkennbar. Die große Anzahl von Spoilern und Flügel sorgen, neben dem erwünschten Abtrieb, auch für einen größeren Luftwiderstand.

### **Unterschiedliche Entwicklungsschwerpunkte bezüglich der Aerodynamik im Motorsport und der PKW-Fertigung**

Der Luftwiderstand hängt also nicht nur von  $c_w$ -Wert ab, sondern auch von der Stirnfläche. Da ein Formel 1 Wagen eine sehr geringe Stirnfläche hat, spielt der  $c_w$ - Wert eine geringe Rolle. Wenn man nochmal die Formel 1 betrachtet, wird deutlich, dass beide Größen den gleichen Einfluss haben, sie fließen beide linear ein (zu Erinnerung:  $F_L = \frac{\rho v^2 A c_w}{2}$ ). Der  $c_w$ -Wert spielt also bei einem Formel 1 Wagen eine untergeordnete Rolle. Was allerdings keine untergeordnete Rolle spielt ist der, hier nur relativ kurz erwähnte, Auf- bzw. Abtrieb. Dieser ist vor allem im Rennsport wichtig, weil die meisten Zweikämpfe in Kurven ausgetragen werden und auch hier die meisten Plätze gewonnen oder verloren werden. Da man, wie schon erwähnt, besonders dort einen hohen Abtrieb braucht, wird meistens ein höherer Luftwiderstand und so auch  $c_w$ -Wert in Kauf genommen. Das Entwicklungsziel für Fahrzeuge

in der Serienproduktion ist ein Anderes. Keiner möchte mit einem 75PS-Golf möglichst schnell durch die Kurve fahren können, sondern lieber einen geringen Benzinverbrauch haben und eine hohe Endgeschwindigkeit. Beides lässt sich mit einem möglichst geringen Luftwiderstand realisieren.

Das Formel 1 Fahrzeug ist also aerodynamisch nicht schlechter als ein Serienfahrzeug, es hat nur einen ganz anderes Einsatzgebiet auf das es abgestimmt wird.

## Quellen

### Bücher

Neue Berufe, Automobiltechnik kompakt von Dietrich Kurse (westermann-Verlag)

Taschenbuch der Physik, 4. korrigierte Auflage 2000, von Prof. Dr. Horst Stöcker (Verlag Harri Deutsch)

### Sonstige

[www.kfz-tech.de](http://www.kfz-tech.de)

[www.bmw-sauber-f1.com](http://www.bmw-sauber-f1.com)

BMW Kundenbetreuung

## Anhang:

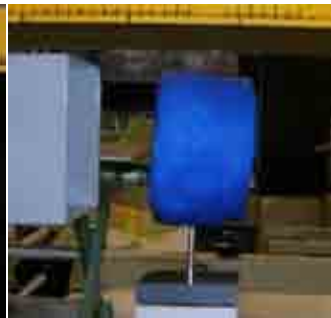
### Aufbau des ersten Versuchs:



Kugel:



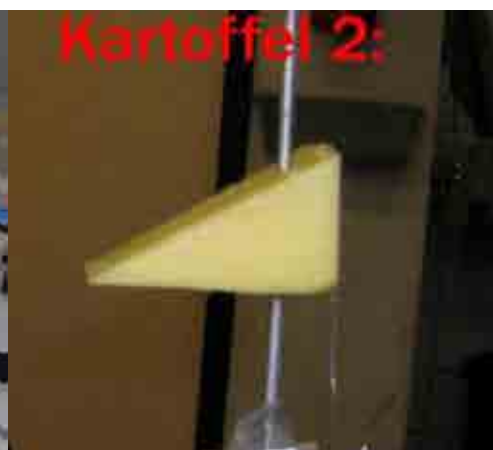
Zylinder 1:



Zylinder 2:



### Versuchsaufbau mit Kartoffeln:





**Bilder zur Versuchsreihe mit den Miniaturen:**

BMW E53 (X5):



BMW E91 (3er touring):



BMW E63 (6er):





BMW E60 (5er):



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