

Carbon in der *Formel 1*

Eine Seminararbeit von Tassilo Pyko

Qualifikationsphase 2015/2017



1 Wissenschaft und Technik im modernen Sport

Schneller. Höher. Weiter. Das Sportideal der Antike ist auch heute noch Ziel und Motivation der Athleten. Erst Anfang November diesen Jahres ehrte der Bundespräsident Joachim Gauck die körperlichen Hochleistungen der deutschen Medaillenträger bei den Olympischen Spielen in Rio de Janeiro 2016.

Allerdings sind seit Beginn des zwanzigsten Jahrhunderts Athleten nicht nur in Turn-, oder Schwimmhallen anzutreffen, sondern auch in Autos auf der Rennstrecke. Seit der Erfindung des Otto-Motors im späten 19. Jahrhundert dauerte es nicht lange, dass der neugewonnene technische Fortschritt für sportliche Zwecke entdeckt wurde. In ganz Europa wurden die Menschen von der Begeisterung für schnelle Autos und spannende Aufholjagden auf der Rennbahn gepackt. Bis heute hat unter Rennsportfans dieses Fieber nicht abgenommen.

Dabei wird der Konkurrenzkampf aber nicht nur von den Fahrern um schnellere Rennzeiten geführt, auch hinter den Kulissen herrscht ein hartes Wettfeiern um den besseren Wagen.



In dieser Disziplin sind die Ingenieure die Meister ihres Fachs. Ihr Credo ist nicht so sehr „schneller, höher, weiter“. Sie streben eher nach: „effizienter, härter, leichter“.

Dies betrifft neben dem Motorenbereich auch den Fahrzeugbau, an welchem seit dem Beginn der *Formel 1* mit der gleichen Intensität gearbeitet wird, mit der auch die Piloten fast täglich trainieren. Unermüdlich arbeiten die Konstrukteure der einzelnen Teams an der Verbesserung ihrer Modelle. Ein wesentlicher Bestandteil ihrer Forschung ist die Suche nach dem bestmöglichen Material für die verschiedenen Herausforderungen, die sich während eines Rennens stellen.

Es geht hierbei aber nicht nur darum, diese Probleme zu bewältigen. Selbstverständlich darf dabei der Rennsport nicht aus dem Auge verloren werden. Hier ist die Aufgabe der Ingenieure, die Balance zwischen maximaler Sicherheit und höchster Geschwindigkeit zu finden. Lange Zeit galt Aluminium als idealer Werkstoff für den Fahrzeugbau in der *Formel 1*.

Jedoch hält schon seit Beginn den 1980er Jahre zunehmend Carbon Einzug in die Forschungsanstalten der Rennställe¹ und hat inzwischen sukzessive fast alle gängigen Materialien ersetzt. In dieser Arbeit sollen nun die verschiedenen Bereiche der Materialanforderungen in der *Formel 1* genauer

¹ vgl. Rother, 2011 Z. 5

2 Carbon in der Formel 1

2.1 Herstellung von Carbon

Bei Carbon, oder genauer bei carbonfaserverstärktem Kunststoff (CFK) handelt es sich um einen Verbundwerkstoff. Bei einem Verbundwerkstoff werden verschiedene Materialien so miteinander kombiniert, dass dabei ein meist sehr leistungsfähiges Endprodukt entsteht, das die Eigenschaften der Ausgangsprodukte in sich vereint. Im CFK setzt sich Carbon aus einem Kohlenstofffasergewebe und einem Mantel aus Duro,- oder Thermoplaste zusammen.

Kohlenstofffasern sind anisotrop, d.h. sie sind deutlich belastbarer durch Zug als durch Druck. Diese Eigenschaft macht das Carbon zwar sehr zugfest aber auf Druck empfindlich, insofern verbessert die Kunststoffschicht die Eigenschaften des Carbons für Belastungen quer zur Achsenrichtung.

Als Ausgangsmaterialien für die Herstellung von Carbonfasern werden in der Industrie folgende organische Stoffe verwendet: Viskosefasern auf Zellulosebasis sowie Pech und Polyacrylnitril (PAN). Aufgrund von Kosten,- und Stabilitätsgründen wird dabei am häufigsten PAN genutzt.

Bevor die Kohlenstofffasern überhaupt verwoben werden können, müssen sie in einer reinen, graphitartigen Form vorliegen. Dabei wird der Ausgangsstoff durch Pyrolyse soweit behandelt, bis ein reiner Gewichtsanteil von 96-98% von Kohlenstoff vorliegt¹. Die Pyrolyse ist ein chemisches Verfahren, wobei der organische kohlenstoffhaltige Ausgangsstoff durch Erhitzen carbonisiert wird. Bei diesem Verfahren werden durch Hitze die Atombindungen des Stoffes gelöst und es entsteht reiner Kohlenstoff.



Abb.2 Herstellung von Carbonfasergewebe

Da bei der Pyrolyse Temperaturen von 1 300 bis über 1 800°C auftreten, werden hauptsächlich Materialien verwendet, die keinen messbaren Schmelzpunkt besitzen (s.o.). Die fertigen Fasern (Filamente) haben einen Durchmesser von 5-9 Mikrometern.²

Anschließend werden die nun gewonnenen Fasern zu einem Garn (Roving) zusammengefasst und aufgewickelt. Normalerweise besteht ein Garn aus 1 000 – 24 000 einzelnen Fäden.

¹ vgl. www.karlmayer-composites.com/impressum/carbon-herstellung Z. 18

² vgl. www.karlmayer-composites.com/impressum/carbon-herstellung Z. 45

Um die Zugfestigkeit von Carbon zu erhöhen, kann das Garn beliebig dicker gemacht werden, so gibt es sogenannte *Heavy Tow* Typen, die aus bis zu 400 000 Einzelfasern bestehen.

Danach startet ein Webprozess, bei dem die Carbonfasern miteinander zu einem textilen Gewebe verwoben werden. Dadurch wird vor allem eine erhöhte Steifigkeit des Gewebes erreicht. Hier bekommt das Carbon seine typische Oberflächenstruktur. (s. Abb.3)

Abschließend wird - wie oben genannt - die Fasermatrix unter hohem Druck mit einer Kunststoffschicht laminiert, die das Gewebe verdichtet und für eine starke Haftung der Matrix sorgt. Dabei ist in der Industrie Epoxidharz das am meisten genutzte Material für den Kunststoffmantel.¹



Abb.3 Oberflächenstruktur von Carbon

Da bei der Herstellung die beiden Materialien chemisch verbunden werden, soll nun genauer auf die innere Struktur von Kohlenstofffaser und Epoxidharz eingegangen werden.

¹ vgl. Callister; Rethwisch 2013, S. 596

2.2 Aufbau und Struktur

Da die Carbonfasern aus nahezu reinem Kohlenstoff bestehen, setzt sich die chemische Struktur der Fasern aus den typischen Kohlenstoff Hexagonen zusammen.

In der Valenzstrichformel lässt sich die Struktur folgendermaßen beschreiben (s. Abb. 4):

Die Kohlenstoffsechsringe ordnen sich bei der Pyrolyse aneinander zu einem stabilen Kohlenstoffgitter an.

Der dreidimensionale Aufbau der Kohlenstofffasern ähnelt sehr dem von Graphit (s. Abb. 5). Der charakteristische Aufbau von Graphit besteht aus einem Schichtgitter, das durch van der Waals Kräfte, also zwischenmolekulare Anziehung zusammengehalten wird.

Die Atombindungen innerhalb einer Schichtebene sind jedoch sehr viel stärker. Ein jedes Kohlenstoffatom innerhalb einer Ebene besitzt nur drei Bindungspartner und verfügt so über ein freies Elektron. Diese freien Elektronen schließen sogenannte pi-Bindungen, die sich bei der Überlagerung von Atomorbitalen bilden und für einen zusätzlichen Zusammenhalt der Schichtebene sorgen.¹

Da die Gravitation zwischen den Schichtebenen so viel geringer ist, als innerhalb der Ebenen, kann Graphit relativ leicht z. B. durch Abrieb beschädigt werden. Deswegen wird für das fertige Carbon ein weiterer Stoff benötigt, der das Kohlenstoffgewebe zusammenhält.

Dazu wird, wie schon in 2.1 erläutert, meist Epoxidharz verwendet. Epoxidharz ist ein Klebstoff, der synthetisch durch eine Polyadditionsreaktion hergestellt wird: Ein spezifisches Epoxid wird mit einem Härter gemischt, und ergibt dann nach Aushärtung einen sehr strapazierfähigen Kunststoff.

Als Epoxide werden Moleküle bezeichnet, die einen Dreiring aus zwei Kohlenstoff- und einem Sauerstoffatom besitzen (meist Epichlorhydrin).

Da Kohlenstoff vier Bindungspartner hat, liegt zwischen den Verbindungen normalerweise ein Winkel von 109°.

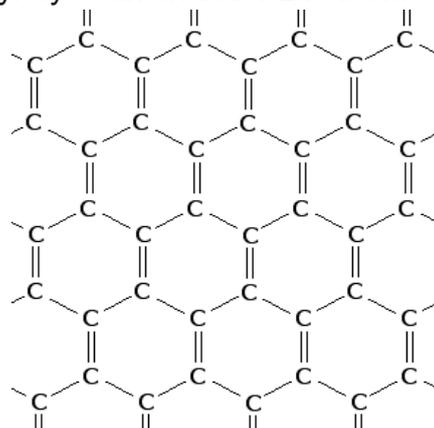


Abb. 4 Valenzstrichformel

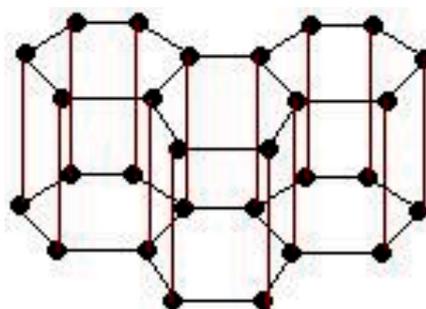


Abb. 5 Graphitgitter

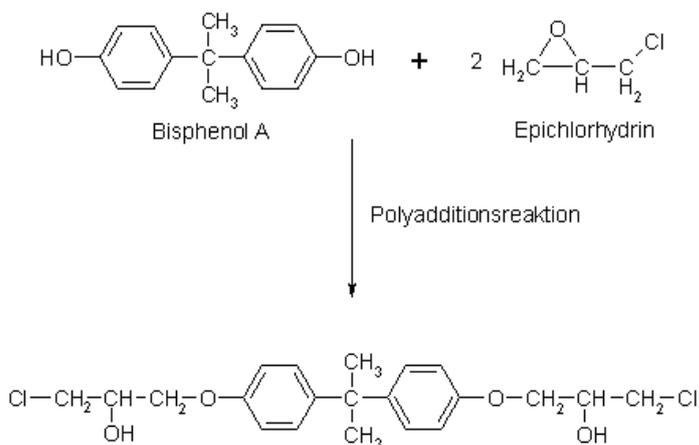


Abb. 6 Herstellung von Epoxidharz

¹ vgl. Oberpaul 2016, S.5

Hier liegt allerdings ein Dreiring vor und somit ein Winkel von 60° . Das setzt den Ring unter eine sehr hohe Spannung, weshalb er sehr leicht reagieren kann.

Nun lässt man einen nucleophiles Molekül, überwiegend Bisphenol A¹, mit dem Epoxid reagieren. Nucleophil heißt, dass das Molekül eine Gruppe besitzt, die von Protonen angezogen wird. In diesem Falle ist dieses Molekül das Sauerstoffatom in der Hydroxygruppe beim Bisphenol A. Weil der elektrisch negative Sauerstoff die Kohlenstoffatome innerhalb des Dreirings positiviert, kann die Hydroxygruppe dort sehr gut angreifen und es kommt zu einer Polyaddition (s. Abb.6).

Nachdem sich ein Komplex der beiden Endunkte gebildet hat, entsteht unter Abspaltung von Salzsäure (HCL) das fertige Epoxidharz (s. Abb. 7).

Das Epoxidharz ist nach der Herstellung in sich dreidimensional vernetzt und daher ein Duroplast, durch Hitze schwer bis mehr unter 2.3.3).

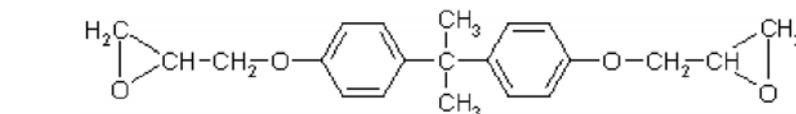


Abb.7 Fertiges Epoxidharz

d.h. nach der Aushärtung nicht mehr verformbar² (dazu

Weiterhin ist es nach dem Härteprozess bei der Herstellung nahezu untrennbar mit dem Kohlenstofffasergewebe verbunden. Demnach eignet sich das Epoxid-harz hervorragend für die Ummantelung und Schutz des Carbonfasergewebes.

Der chemische Aufbau des Carbons ist für die Anwendung des Materials bei der Entwicklung von Rennfahrzeugen für die *Formel 1* elementar. Die chemische Zusammensetzung stellt die Voraussetzungen für die physikalischen Eigenschaften, die für den Motorsport unentbehrlich sind. Dazu gehören: geringes Gewicht, starker Widerstand gegen mechanische Verformungen, Temperaturbeständigkeit und das Reibungsverhalten. Die nun genannten Gesichtspunkte werden unter dem nachstehenden Punkt 2.3 näher behandelt werden.

¹ vgl. Nuyken, Samarian, Wurdack. Z. 2

² vgl. Amelunxen, 2013 S.61 Tab.1

2.3 Grundlagen der Eigenschaften von Carbon



Abb.8 Monocoque

2.3.1 Widerstand gegen mechanische Verformungen

Ein Rennfahrzeug in der *Formel 1* wird auch als Bolide bezeichnet.

Wiederum wird die Fahrerkabine eines Boliden Monocoque genannt (s. Abb.6). Dies ist ein Karosseriebauteil, das den Fahrer,- Motor,- und Tankbereich einschließt. So wird für eine größere Kompaktheit des Wagens und weniger Materialverbrauch bei der Herstellung gesorgt.

Um den Fahrer im Falle eines Unfalls vor Verbrennungen und schweren Verletzungen zu schützen, darf es bei einem Crash zu keinen Verformungen des Monocoques kommen. Daher muss es einen sehr hohen Widerstand gegen Druck vorweisen können, um bei einem Unfall die nötige Sicherheit für den Piloten zu gewährleisten.

Um festzustellen, wie groß der Widerstand eines Materials gegen mechanische Verformungen ist, wird im Allgemeinen zunächst seine Steifigkeit und Festigkeit betrachtet.

Dabei gibt die Steifigkeit den Widerstand des Werkstoffes gegen Krafteinwirkung an, während die Festigkeit die maximale Belastungsgrenze bis zu einem vollständigen Bruch beschreibt. Fälschlicherweise werden diese beiden Begriffe in der Umgangssprache oft gleichgesetzt.

Steifigkeit ist abhängig von der Elastizität, der Konstruktionsgeometrie und der Querschnittsfläche des Materials. Der Festigkeitswert wird hingegen durch ein Dehnungs-Spannungsdiagramm ermittelt, das auf den Werten einer Belastungsprobe basiert.

2.3.1.1 Steifigkeit

Steifigkeit lässt sich im Allgemeinen unterteilen in Dehn,- Biege,- und Torsionssteifigkeit.

Für die Belastungen, die bei der *Formel 1* bei einem Crash auftreten, ist allerdings nur die Dehnsteifigkeit D relevant, da sie angibt wie viel Kraft nötig ist, um das Material in Längsrichtung zu dehnen. Hierbei bildet man das Produkt des Elastizitätsmoduls E und der Querschnittsfläche A des Probestabes, auf den die Zugkraft wirkt:

$$D = E \cdot A^1$$

Die SI-Einheit für Dehnsteifigkeit ist Newton (1N).

Der Elastizitätsmodul ist eine Materialkonstante, der das Verhältnis von Spannung und Dehnung eines Körpers entnommen werden kann. Die SI-Einheit ist die Spannungsgröße kN/mm^2 .

Der Elastizitätsmodul bei CFK beträgt im Durchschnitt in axialer Richtung ca. 400kN/mm^2 und in anaxialer bis zu 10 kN/mm^2 ² (mehr dazu unter 2.3.1.3). Da bei einem Crash das Material quer zur Achsenrichtung belastet wird, ist hier nur der letzte Wert zu betrachten.

Bei einem ideellen Probestab mit der Dicke 2 cm und der Breite 5 cm ergibt sich für die Querschnittsfläche A :

$$\begin{aligned} A &= 2\text{ cm} \cdot 5\text{ cm} \\ &= 10\text{ cm}^2 \end{aligned}$$

Es ist nun vorteilhaft, die Querschnittsfläche in mm^2 umzurechnen. So erreicht man, dass bei der Gleichung $D = E \cdot A$ die Einheit (mm^2) sich herauskürzt und das Ergebnis in Newton angegeben werden kann. Die Umrechnung ergibt hier:

$$10 \cdot 1000\text{ mm}^2 = 10\,000\text{ mm}^2$$

Setzt man jetzt diesen Wert in die Formel zur Berechnung der Dehnsteifigkeit ein erhält man:

$$\begin{aligned} 10 \cdot 10^3 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot 10\,000\text{mm}^2 &= 100 \cdot 10^6\text{ N} \\ &= 100\text{ MN} \end{aligned}$$

Die Kraft von 100 Meganewton ist also notwendig, um das Material vollständig zu dehnen.

Zudem kann auch die prozentuale Verlängerung ε des Werkstoffes durch das Produkt der aufgewendeten Kraft und des Kehrwerts der Dehnsteifigkeit berechnet werden:

$$\varepsilon = \frac{F}{E \cdot A}^3$$

Bei den vorangegangenen Werten beträgt diese:

¹ Agerer 1 2009, Z. 29

² vgl. Ehrenstein, 2006, S. 49, Eigene Ermittlung und Rundung des Durchschnittswerts

³ Agerer 1 2009, Z.39

$$\varepsilon = \frac{100 \cdot 10^6 \text{ N}}{10 \cdot 10^3 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot 10\,000 \text{ mm}^2}$$

$$= 1$$

Nachdem also eine Kraftanwendung von 100 Meganewton auf eine Fläche von 10 000 mm² gewirkt hat, dehnt sich das Material theoretisch um 100 % und leistet gar keinen Widerstand mehr.

Als nächstes ist zu prüfen, inwieweit sich das Material überhaupt so weit dehnen lässt oder ob es vorher schon nachgibt, d.h. bricht. Hierzu muss man nun die Festigkeit betrachten.

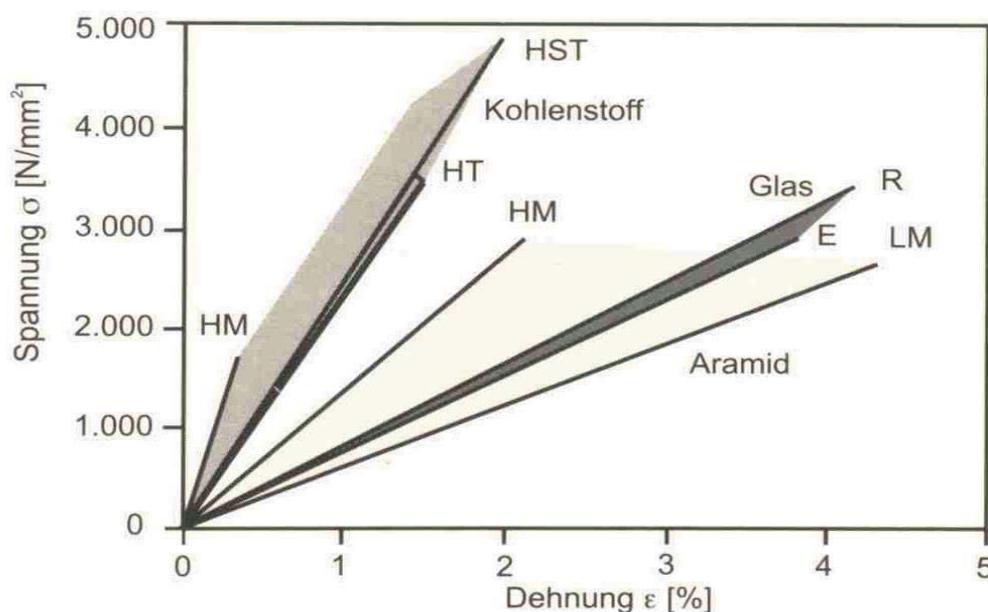
2.3.1.2 Festigkeit

Bei der Festigkeit wird ebenfalls zwischen mehreren verschiedenen Arten differenziert. Am aussagekräftigsten dabei ist allerdings die Zugfestigkeit. Sie beschreibt nicht nur, wie fest ein Stoff auf Zugbelastung ist, sondern zugleich auch die Maximalbelastbarkeit dieses Stoffes¹. Somit ist sie eine feste Kenngröße bei der Betrachtung von Werkstoffen.

Die SI-Einheit der Zugfestigkeit wird in MPa (Megapascal) angegeben. Meist wird sie auch in N/mm² ausgedrückt. Ihr Formelzeichen ist R_m.

Weiterhin ist sie allgemein aus einem Dehnungs-Spannungsdiagramm des Werkstoffes zu entnehmen. Dieses wird durch eine mechanische Belastungsprobe erstellt. Bei CFK lässt sich die Zugfestigkeit von dem Diagramm auf Abbildung 9 entnehmen.

Die Darstellung zeigt die prozentuale Veränderung der Dehnung ε dreier Werkstoffe



bei zunehmender Spannung σ , angegeben in N/mm².

Abb.9 Dehnungs-Spannungsdiagramm

¹ vgl. Agerer 2 2009, Z. 21

Das Diagramm vergleicht die Materialien kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff und dessen Faserdicken high modulus (HM), high tenacity (HT) und high strength (HST) mit den Glasvarianten E-, und R-Glas (E;R) sowie mit den Strukturen des Werkstoffes Aramid, high modulus (HM) und low modulus (LM). Da es sich in diesem Abschnitt um die Zugfestigkeit von Carbon handelt, sind hier nur die Graphen der Kohlenstofffasern zu beachten.

Der Verlauf der Dehnungs-Spannungskurve für CFK zeigt die sehr lineare Dehnungszunahme bis zu einem Bruch des Testmaterials.

Die Carbonvarianten HM, HT und HST unterscheiden sich vor allem in der inneren Struktur und Dicke. Da die Dicke aber theoretisch beliebig geändert werden kann, liegt der Fokus bei der Differenzierung der Materialien auf deren Struktur.

Der größte Gegensatz bei der inneren Struktur zwischen HM und den beiden anderen Materialien HT und HST ist der atomare Aufbau, auf den jetzt nicht genauer eingegangen werden soll.

Die Graphen zeigen, dass je nach Struktur und Dicke das Material bei Belastungen von ungefähr 1 800 bis knapp 5 000 Megapascal schlagartig nachgibt.

Die Werte abgelesen, beträgt die Zugfestigkeit von HM ca. 1 800 N/mm², von HT ca. 3 500 N/mm² und von HST ca. 4 900 N/mm², oder anders ausgedrückt:

$$R_m(\text{HM}) = 1800 \text{ MPa}$$

$$R_m(\text{HT}) = 3500 \text{ MPa}$$

$$R_m(\text{HST}) = 4900 \text{ MPa}$$

Interessant ist zu beobachten, dass zwar HT und HST eine größere Zugfestigkeit haben als HM, der Anstieg des Graphen von HM aber steiler ist. Daher dehnt sich HM bei größer werdender Spannung weniger als die beiden anderen Materialien. Damit ist trotz geringerer Zugfestigkeit seine Steifigkeit höher.

Ferner ist dem Diagramm zu entnehmen, dass bis zum endgültigen Bruch der Werkstoff sich nur um ca. 0,5 – ca. 2,1% dehnt.

Demzufolge ist Carbon bis zur Maximalbelastung kaum elastisch, d.h. kaum verformbar und garantiert bis zu diesem Punkt fast vollständige Härte. Nachdem es gebrochen ist, leistet es allerdings keinen Widerstand mehr und bietet somit dann auch keinen Schutz mehr.

Zusammenfassend lässt sich also sagen, dass im Falle eines Crashes, das Monocoque den Zusammenprall entweder mit nahezu keiner Verformung auffangen kann, oder ab einer bestimmten Belastungsgrenze komplett nachgibt.

Bei einem Bruch ergibt sich darüber hinaus auch das Sicherheitsrisiko für den Fahrer, dass er durch gesplitterte Carbonteile verletzt werden kann. Für diese Fälle ist der Pilot in seinem Sitz von einer einen Millimeter starken Polsterung geschützt¹, die den Fahrerbereich von der Karosserie trennen soll.

Um die Werte der Steifigkeit und der Festigkeit direkt miteinander vergleichen zu können, empfiehlt es sich den vorhergegangenen Wert der Steifigkeit (s. 2.3.1.1) für einen N/mm^2 umzurechnen:

$$\begin{aligned}\frac{100 \cdot 10^6 \text{ N}}{10\,000 \text{ mm}^2} &= 10\,000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \\ &= 10 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2}\end{aligned}$$

Bei der Umrechnung erhält man 10 kN/mm^2 .

So viel Kraft wurde benötigt, um den Probestab vollständig zu dehnen.

Da das Carbon aber offensichtlich schon bei einer Belastung von $1\,800 - 4\,900 \text{ N/mm}^2$ bricht, scheinen diese beiden Werte auf den ersten Blick nicht zusammen zu passen.

Eigentlich bedeutet dies aber nur, dass die Formeln zur Dehnsteifigkeit nur bis zu einem Bruch des Materials Gültigkeit besitzen und der Wert zur maximalen Dehnung in diesem Falle nur ein theoretischer ist.

Ein weiterer Punkt ist die unterschiedliche Dicke der Probestäbe, mit dem sich die großen Abweichungen zwischen den Dehn-, und Belastungsmaxima erklären lassen.

Im oberen Diagramm (Abb.9) werden allerdings keine Größenangaben zu den Materialproben gemacht, sodass leider kein direkter Vergleich zwischen den beiden Vorgehensweisen zur Ermittlung der Dehnsteifigkeit und der Zugfestigkeit gezogen werden kann.

Hier kann der unterschiedliche Elastizitätsmodul der Testmaterialien den Grund für die hohen Ergebnisdifferenzen geben.

Wie schon erwähnt, ist der Elastizitätsmodul eine Materialkonstante, die die mechanischen Eigenschaften eines Werkstoffs charakterisiert. Von welchen Bedingungen die Größe des E-Moduls, speziell von Carbon, abhängt wird im nächsten Punkt genauer erläutert.

2.3.1.3 Abhängigkeiten der Größe des Elastizitätsmoduls

Bei der Berechnung der Dehnsteifigkeit unter Berücksichtigung des Wertes des oben genannten Elastizitätsmoduls, handelt es sich lediglich um einen Richtwert. Jedoch lässt sich der Elastizitätsmodul durch Änderungen im Herstellungsprozess entscheidend beeinflussen.

Beispielsweise wirkt sich eine Veränderung der Gewebestruktur direkt auf den E-Modul aus.¹ Hier lässt sich beobachten, dass aus einer höheren Komplexität des Gewebes ein höheres E-Modul resultiert.²

So ist der E-Modul eines CFK Teils, das nur aus längsliegenden Fasern besteht, wesentlich geringer, als der eines Carbonwerkstoffs, der auf einer eng verwobenen Fasermatte basiert.

Ergänzend dazu ist bei der Größe des E-Moduls³ die Belastungsrichtung auf den Werkstoff entscheidend. Kohlenstofffasern sind, wie in 2.1 schon kurz erwähnt, anisotrop, deshalb ist der E-Modul bei Kohlenstofffasern in Faserrichtung am höchsten und gegen die Faserrichtung am geringsten.⁴

1 und 2 vgl. Ehrenstein, 2006 S.141

3 vgl. Ehrenstein 2006 S.142

4 vgl. Ehrenstein 2006 S. 142

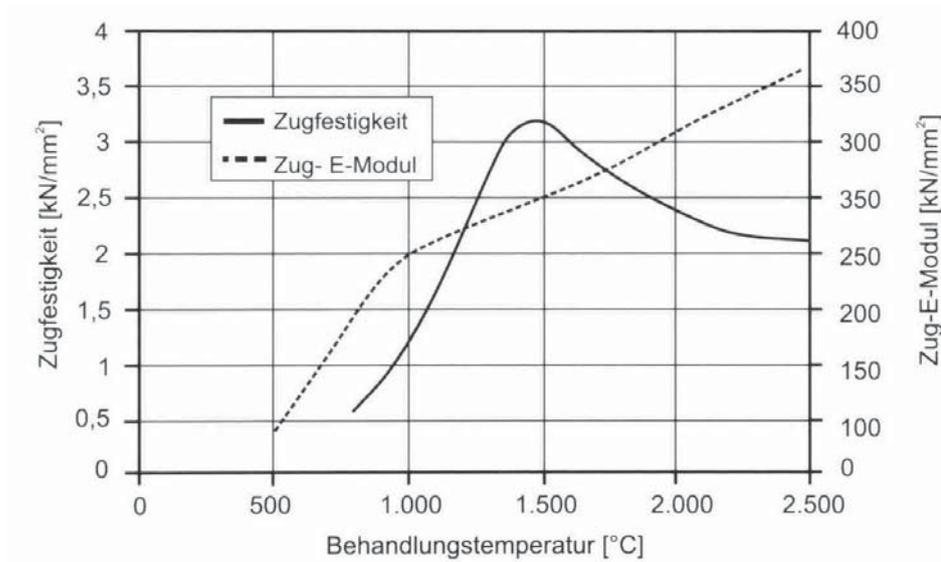


Abb.10 Einfluss der Behandlungstemperatur auf die Zugfestigkeit und den E-Modul einer C-Faser

Des Weiteren besteht die Möglichkeit bei der Pyrolyse der Carbonfasern (s. 2.1) ein höheres E-Modul und eine höhere Zugfestigkeit zu erzielen.

Das Verändern der beiden Größen in Abhängigkeit von der Behandlungstemperatur ist auf Abbildung 10 zu sehen.

Dieses Diagramm (Abb.10) stellt sehr anschaulich den Anstieg des E-Moduls und der Zugfestigkeit ab einer Behandlungstemperatur der Carbonfasern von 500°C dar. Beide Größen werden in kN/mm² angegeben.

Der Darstellung ist zu entnehmen, dass der E-Modul zwischen 500 und 1 000°C bei steigender Temperatur gleichsam recht schnell und ab 1 000°C annähernd kontinuierlich zunimmt. Seinen Maximalwert von ca. 370 kN/mm² erreicht er dann bei einer Temperatur von etwas unter 2 500°C.

Dagegen besitzt die Zugfestigkeit der Carbonfasern ihren höchsten Wert von ca. 3,2 kN/mm² bei einer Erhitzung der Kohlenstofffasern auf ca. 1 500°C.

Bei weiterer Steigerung der Temperatur auf 2 500°C, sinkt sie jedoch auf den Wert von 2,1 kN/mm².

Zudem hat Carbon die Spezialität, ein progressives Spannungs-Dehnungs-Verhalten zu besitzen. Dies bedeutet die Erhöhung des Elastizitätsmoduls von Carbon bei zunehmender Spannung.¹

Carbon hat also den Effekt, dass es beim Herstellungsprozess individuell angepasst werden kann. Konkret heißt das für den Bau und die Konzeption eines Rennwagens, dass verschiedene Teile aus verschiedenen Carbonmaterialien gefertigt werden, um so unterschiedlichen Anforderungen entsprechen zu können.

Etwa sollte das Cockpit eine möglichst hohe Zugfestigkeit und Dehnsteifigkeit haben, damit der Pilot bei einem Unfall nicht verletzt wird. Die Nase eines Rennautos hingegen fungiert mehr als Knautschzone² zur Stoßdämpfung.

Hier empfiehlt sich eher eine kleinere Dehnsteifigkeit. Denn in der Verformung des Materials wandelt sich die kinetische Energie, die bei einem Zusammenprall

¹ vgl. Ehrenstein, 2006 S. 41

² vgl. Hintergrund: Wie ist ein Formel-1-Auto aufgebaut? 2010, Z.160

freigesetzt wird, in Verformungsenergie um und wird durch die Nase absorbiert. Je größer die Verformung, desto mehr Energie wird aufgenommen. Der Stoß wird stärker abgefangen und die Fahrer beider Fahrzeuge mehr geschützt. Dies setzt, wie zuvor erwähnt, einen kleineren E-Modul und die damit einhergehenden niedrigeren Behandlungstemperaturen voraus.

Wenn ein Monocoque auf dem Prüfstand den vorgeschriebenen Belastungstests unterzogen wird, wirken auf das Cockpit oft Kräfte, die ein Mehrfaches der Zugfestigkeit von Carbon aufweisen. Um bei einem Frontal,- oder Seitencrash dennoch auf eine sichere Konstruktion zurückgreifen zu können, werden bei der Herstellung der Fahrerkabine mehrere Lagen CFK übereinander verbaut. So addiert sich die Steifigkeit und Festigkeit der einzelnen Teile. Damit geht auch die Gefahr von schweren körperlichen Schäden der Fahrer oder starken Bränden, verursacht durch Kollision zweier Fahrzeuge, stark zurück.

Dabei werden bis zu 60 Carbonfaserschichten¹ übereinander gelegt und in entgegengesetzter Faserrichtung ausgerichtet. Diese Bauweise bietet den Vorteil, einzelne Stellen, bei deren Beanspruchung die Kräfte in verschiedene Richtungen wirken, besonders stark auszubauen.

So ist das Cockpit jetzt in der Lage, Druckeinwirkungen aus verschiedenen Richtungen problemlos standzuhalten.

Um anderen Teams diese wertvollen Forschungsergebnisse nicht zur freien Verfügung zu stellen, unterliegt diese Arbeit in der Regel leider einer strengen Geheimhaltung. Das soll verhindern, dass ein möglicher Vorsprung in der Fahrzeugentwicklung an konkurrierende Rennställe preisgegeben wird.

An dieser Stelle muss angemerkt werden, dass die Diagramme (Abb.9 u.10) sich nicht auf gebräuchliches Carbon in der *Formel 1* beziehen, da diese Tests für gewöhnlich nicht publiziert werden (s.o.). Die Diagramme helfen lediglich beim logischen Nachvollzug einer generellen materialwissenschaftlichen Betrachtung zu Carbon.

In den letzten Punkten wurde verstärkt auf die Eignung Carbons für die *Formel 1* aufgrund seiner mechanischen Eigenschaften eingegangen. Im Folgenden soll es nun stärker um den Gebrauch von Carbon in der *Formel 1* wegen seines Gewichtes, sowie seines Brand-, und Reibungsverhaltens gehen.

¹ vgl. Hintergrund: Wie ist ein Formel-1-Auto aufgebaut? 2010, Z. 46

2.3.2 Gewicht

Üblicherweise stellt bei der *Formel 1* jeder Rennstall seine eigenen Ingenieurteams an, die sich hauptsächlich mit der Optimierung des Fahrzeugs zur Steigerung der Geschwindigkeit befassen. Sie beschäftigen sich aber nicht nur mit der Leistungsfähigkeit des Motors sondern auch mit der Optimierung des Materials.

Zur Unterstützung des Ingenieurteams stehen auch Forschungseinrichtungen beiseite, die sich teilweise ausschließlich mit Materialentwicklung befassen. Ziel dieser Gruppen von Wissenschaftlern ist es, die Gewichtseffizienz des Rennwagens möglichst zu erhöhen. Zum Beispiel bewirkt eine Verkleinerung des Gewichts eine Verringerung von unnötigen Treibstoffverbrauchs durch einen kleineren Kraftaufwand bei der Beschleunigung. Da bei einem *Formel1*- Rennen seit 2010 nicht mehr getankt werden darf¹, ist ein möglichst geringer Treibstoffverbrauch ein wichtiges Ziel bei der Konstrukteure.

Darüber hinaus trägt das geringere Gewicht der Karosserie auch dazu bei, dass der Fahrer schnellere Wendemanöver durchführen und so die Kurven der Rennstrecke schneller durchfahren kann. Aufgrund der geringeren Masse steigen auch die Kräfteeinwirkungen der Thermodynamik und üben auf den Wagen eine größere Wirkung aus. Diese Kräfte werden speziell vom Heckspoiler umgelenkt, um das Auto sicher auf der Straße zu halten.

Auch bei Überholmanövern ist ein schnelleres Einlenken von Vorteil, da die kritische Phase während der der Pilot aus dem Windschatten des Gegners herausfährt und den Gegner seitlich überholt (s. Abb.11), durch ein schnelleres Einlenken verkürzt werden kann.

Dass in der Konstruktion eines Boliden auf Carbon zurückgegriffen wird, liegt, wie der folgende Teil zeigt, an seiner leichten natürlichen Struktur. Diese eignet sich hervorragend für den Einsatz im Rennsportbereich.



Abb. 11 Überholmanöver beim europäischen Grand Prix 2007

Dazu liegt ein Fokus zunächst auf den Abhängigkeiten der Masse von Carbon. Die Masse m als physikalische Größe wird berechnet aus dem Produkt der materialspezifischen Dichte ρ und dem jeweiligen Volumen V des Stoffes. Die Formel dazu lautet:

$$m = \rho \cdot V$$

¹ vgl. Formel-1-Regeln 2016: Sportliches Formel-1-Reglement 2016, Z.140

² Meyer 2015 S. 4, Eigene Umstellung der Formel nach der Masse

Die spezifische Dichte bei Carbon beträgt durchschnittlich $1,8 \text{ g/cm}^3$ ¹. Dieser Wert ist im Vergleich zu anderen gängigen Materialien wie Stahl oder Aluminium bedeutend kleiner.

Die Ursache für diese geringe Dichte und das damit einhergehende niedrige Gewicht liegt im chemischen Aufbau des Carbons, welcher in 2.2 näher behandelt wird. Dort sieht man, dass die Kohlenstofffasern aus nahezu reinem Kohlenstoff bestehen. Kohlenstoff besitzt eine atomare Masse von ca. 12 u ² und gehört damit zu den leichtesten chemischen Elementen überhaupt.

Reines Epoxidharz selbst hat eine durchschnittliche Dichte von $1,2 \text{ g/cm}^3$ ³ und trägt daher zu ungefähr $2/3$ des Gewichts von Carbon bei. Die hervorragende Eignung für den Einsatz in der *Formel 1* verdankt CFK also vor allem der inneren Graphitstruktur, die zwar den Hauptteil des Volumens, aber nur ein Bruchteil des Gewichts ausmacht.

Bei der *Formel 1* legt die technische Kommission Regeln fest, um die technischen Anforderungen eines *Formel 1*-Autos zu bestimmen. Unter anderem setzt diese ein Mindestgewicht von 702 Kilogramm voraus⁴. Dieses Mindestgewicht beinhaltet das Fahrzeug ohne Treibstoff und den Fahrer samt Anzug.

Der Grund für diese Regelung ist, dass es bei hohen Geschwindigkeiten passieren kann, dass die Reibung der Reifen nicht mehr ausreicht, um das Fahrzeug kontrolliert auf der Fahrbahn zu halten. In diesen Fällen wird die Reibung von der Trägheit übertroffen und das Auto gerät ins Schlingern. Das kann sogar soweit führen, dass der Wagen bei Kurven aus der Bahn geworfen wird.

Der vorgeschriebene Gewichtstandard zielt auf eine Steigerung des Schwerpunkts hin, welcher von den Konstrukteuren möglichst tief gewählt wird. Dieser niedrig liegende Schwerpunkt ermöglicht ein stabileres Fahren und eine höhere Sicherheit vor einem Driften oder gar einem Überschlagen durch die in der Kurve wirkende Zentrifugalkraft.

Bei der Herstellung eines Rennwagens mit reiner Carbon-Karosserie ist es aufgrund seines spezifischen Gewichtes problematisch, dass das Mindestgewicht unterschritten wird und der Wagen nicht zugelassen werden kann.

Deswegen sind die entwickelnden Ingenieure gezwungen, extra Gewichtsanteile einzubauen, um so das gesetzte Mindestmaß einzuhalten. So wird zum Beispiel das im Gegensatz zu Carbon etwa um 15-mal schwerere Element Wolfram⁵ in hochverdichteter Form als Gewichtszusatz verwendet.⁶

Anzumerken ist, dass das Reglement von der technischen Kommission fast jährlich verändert wird. Eine häufige Anpassung des Gewichts des Wagens ist somit ein fast dauerhaftes Muss für die Konstrukteure.⁷

Trotz der Gewichtsregelung und des hohen Schutzes des Carbon-Monocoque kann es durch die Verkettung unglücklicher Umstände zu Unfällen mit einem Autobrand kommen.

1 Bergmeister 2009, S. 42 /Tabelle 2.7

2 chemische Masseneinheit: $1 \text{ u} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

3 vgl. www.chemie.de/lexikon/Epoxidharz.html

4 vgl. Formel-1-Regeln 2016: Technisches Formel-1-Reglement 2016, Z.67

5 Wolfram hat ein Gewicht von 187 u

6 vgl. Schmidt 2016, Z. 40

7 vgl. Schmidt 2016, Tabelle

Diese waren vor den 1980er Jahren eine ernsthafte Gefahr für die Rennfahrer, die durch die Entzündung des Tanks bei einem Zusammenprall verbrennen konnten. Seitdem wird der Tank aber nun nicht mehr separat, sondern in das hochgeschützte Cockpit mit eingebaut. Diese Maßnahme hat dazu geführt, dass die Anzahl der Brände auf *Formel 1* Rennstrecken in den letzten Jahren nahezu auf null gesunken ist.

Dennoch soll hier der Vollständigkeit halber im nächsten Kapitel die Hitzebeständigkeit von Carbon im Falle eines Brandes untersucht werden.

2.3.3 Verhalten und Widerstand bei hohen Temperaturen

Bei der Betrachtung des Verhaltens von Carbon bei höheren Temperaturen ist erneut die chemische Struktur von Carbon zu bewerten.

Ein Verbrennen von Carbon ist chemisch betrachtet nur die Umwandlung des chemischen Aufbaus durch Zugabe von Wärmeenergie. Daraus resultiert im Allgemeinen meist eine Änderung des Aggregatzustands.

Je größer nun diese Temperatur ist, die zur Änderung der inneren Struktur zugeführt werden muss, desto größer ist auch die Hitzebeständigkeit von Carbon.

Wenn ein *Formel 1*-Auto brennt, wird natürlich zuerst die Oberfläche des Carbons, das Laminat, der hohen Temperatur ausgesetzt.

Wie schon in 2.2 erwähnt gehört die Ummantelung des Carbons, das Epoxidharz, zu den Duroplasten.

Duroplasten besitzen ein sehr engmaschiges Molekülnetz, welches durch hohe Temperaturen nicht aufgelockert werden kann. Dadurch wird bei Erhitzen nicht der Aggregatzustand verändert sondern die Molekülbindungen brechen auf und das Harz zerfällt. Die Aggregatzustandsänderung findet dabei direkt von fest zu gasförmig statt. Das Material verändert währenddessen nicht durch Schmelzen seine Form.¹ Die maximale Belastungstemperatur von Epoxidharz vor dem Zerfall hängt stark von seinen Ausgangsstoffen beim Herstellungsprozess ab. Die strapazierfähigsten Epoxidharze zerfallen in dem Temperaturbereich von ca. 120 bis 150°C².

Ähnlich wie das Epoxidharz, verbrennen Kohlenstofffasern ebenfalls nicht sondern auch hier werden die Kohlenstoffbindungen durch die Hitze zertrennt. Im Gegensatz zu Epoxidharz wechselt Carbonfaser seine mechanischen Eigenschaften aber erst ab 500°C³, da die zwischenmolekularen Bindungen im Kohlenstoffgitter höher sind.

Um das weitere Verhalten Carbons bei besonderer Hitze durch ein Feuer festzustellen, muss der Wärmeausdehnungskoeffizient betrachtet werden.

2.3.3.1 Wärmeausdehnungskoeffizient

Der Wärmeausdehnungskoeffizient oder auch die Wärmedehnungszahl α ist eine Materialkonstante, die die Längenveränderung eines Stoffes proportional zur Temperaturveränderung beschreibt. Sie wird angegeben in:

$$\alpha = \frac{1}{L} \cdot \frac{\Delta L}{\Delta T}$$

Da sich die beiden Längengrößen herauskürzen hat α die Größe:

$$\alpha = \frac{1}{\Delta T}$$

Die physikalische SI-Basiseinheit der Temperatur beträgt Kelvin, daher hat der Wärmeausdehnungskoeffizient die Einheit 1/K, bzw. $1 \cdot \text{K}^{-1}$. Für ΔT kann aber sowohl

¹ vgl. Amelunxen 2013, S. 61 Tabelle 1 Spalte 3

² vgl. Schwarz; Ebeling 2002, S. 190 Z. 9

³ vgl. Ehrenstein, S. 41 Z. 22

⁴ vgl. <http://www.chemie.de/lexikon/Ausdehnungskoeffizient.html>

Grad Kelvin und Grad Celsius eingesetzt werden, da es sich hierbei nur um die Temperaturänderung handelt.

Das ideale Epoxidharz hat aufgrund seiner Eigenschaft bei Hitze nicht die Form zu verändern, einen Wärmeausdehnungskoeffizienten von 0.

Die Kohlenstofffasern dagegen haben die Besonderheit, sich bei Hitze zu verkürzen und dicker zu werden.

Dies liegt an der negativen Wärmedehnungszahl: Sie beträgt in Achsenrichtung im Durchschnitt ca. $-1,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ und gegen die Achsenrichtung ca. $12 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

Bei einer Erhitzung auf 150°C von einer normalen Außentemperatur von 20°C entsteht eine Temperaturänderung von 130°C bzw. 130K .

Weiterhin ist das Seitenteil eines Monocoques ungefähr 1,5 Meter lang. Die Fasern werden in ganzer Länge verarbeitet (s. 2.1) und sind durch den Webprozess etwas länger als das Teil selbst. Näherungsweise nehmen wir an, die eingewobenen Fasern haben demzufolge eine Länge von ca. 2 Metern. Möchte man nun herausfinden, wie weit sich die Kohlenstoffstränge bei einer solchen Erhitzung zusammenziehen, stellt man die erste Gleichung nach ΔL um und setzt die Werte ein:

$$\Delta L = \alpha \cdot L \cdot \Delta T$$

$$\Delta L = -1,5 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{K}} \cdot 2\text{m} \cdot 130 \text{ K}$$

$$\Delta L = -0,39 \cdot 10^{-3}\text{m}$$

Die Faser verkürzt sich in axialer Richtung also um 0,39 mm.

Betrachtet man nun die Verdickung in anaxialer Richtung erhält man:

$$\Delta L = 12 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{K}} \cdot 2\text{m} \cdot 130 \text{ K}$$

$$\Delta L = 3,12 \cdot 10^{-3}\text{m}$$

Die Faser verdickt sich also bei einer Verkürzung um 0,39 mm gleichzeitig um 3,12 mm.

Da ein Carbonteil aus mehreren Millionen bis Milliarden Carbonfasern besteht (s. 2.1) führt eine Verdickung von 3,12 mm jedes einzelnen Stranges zu einem explosionsartigen Reißen des Carbonteils.

Da aber, wie vorher angemerkt, Carbonfasern erst ab 500°C beginnen, ihre Eigenschaften zu



Abb.12 Brand eines Rennwagens

verändern, gilt die hier genannte Formel erst ab Temperaturen darüber.

Hinzufügend muss man anmerken, dass bei Bränden, die durch eine Entzündung des Tanks geschehen (s. Abb. 10) Temperaturen deutlich über 500 °C entstehen. Dennoch zerfällt weder das Epoxidharz, noch zerreißt die Carbon-Karosserie sofort. Dies liegt daran, dass das Feuer Zeit benötigt, sich auf dem Material auszubreiten und seine gesamte Hitze auf das Carbon zu entfalten.

Deswegen bleibt dem Piloten noch etwas Zeit, aus seinem Wagen zu klettern und sich in Sicherheit zu bringen. Da der Bolide nach obenhin völlig offen ist fällt das Aussteigen nicht schwer. Das technische Reglement der *Formel 1* sieht deswegen vor, dass das Cockpit so konzipiert sein muss, dass der Fahrer in fünf Sekunden aussteigen kann.¹

Damit der Pilot aber noch genug Zeit hat, aus seinem Auto herauszuklettern ohne sich dabei schwere Verbrennungen zuzufügen, muss das Material die Hitze möglichst dämmen. So wird eine schnelle Verbreitung über den ganzen Wagen vermieden. Um hier die Eignung von Carbon zu untersuchen, ist dazu der Wärmeleitkoeffizient zu betrachten.

2.3.3.2 Wärmeleitkoeffizient

Die Wärme wird bei CFK über die Schwingungen der Molekülgitter von Epoxidharz und der Kohlenstofffasern weitergegeben.² Der Wert dafür ist der Wärmeleitkoeffizient bzw. die spezifische Wärmeleitfähigkeit λ . Sie ist die Materialkonstante, welche angibt, wie gut ein Stoff Wärme leitet.

Der Wärmeleitkoeffizient berechnet sich aus dem Produkt des Wärmeleitwerts G_{th} , der angibt mit welcher Dichte ein Wärmestrom fließt und der Division von Länge L und Fläche A des zu betrachtenden Materials:

$$\lambda = G_{th} \cdot \frac{L}{A} \quad 3$$

Die Einheit von λ beträgt $1 \frac{J \cdot m}{m^2 \cdot s \cdot K}$ ⁴, kürzt man die Einheiten, erhält man $1 \frac{W}{m \cdot K}$.

Der Wärmeleitkoeffizient von CFK beträgt im Schnitt ca. $17 \frac{W}{m \cdot K}$.⁵

Oft ist aber eher der Wärmeleitwert von Interesse, da er angibt, ab welcher Temperaturänderung ein Wärmeleitstrom von 1 Joule durch das Material fließt.

Zur Anwendung des oberen Beispiels zur Bestimmung der Größe eines Wärmeleitstromes G_{th} wird nun noch eine Fläche benötigt. Die Seitenflächen eines Boliden sind ca. 70 Zentimeter hoch⁶, somit ergibt sich näherungsweise aus dem oberen Beispiel eine Fläche von 1,05m². Wird die Gleichung nach G_{th} umgestellt und die Werte eingesetzt erhält man:

1 vgl. <http://www.formel1.de/inside/reglement/technisches-reglement> Z. 84

2 Callister; Rethwisch 2013, S.734 Z. 22

3 vgl. Wärmeleitfähigkeit, Z.36

4 vgl. Wärmeleitfähigkeit, Z. 28

5 vgl. Ehrenstein, 2006 S. 49 Tabelle 2.11 Spalte 8, Zeile 7-9

6 vgl. eigene Abschätzung nach den Daten von: Schmidt, 13.3.16 Bild 1 in Verbindung mit Schmidt, 10.5.16 S.2 Z. 2

$$G_{\text{th}} = \lambda \cdot \frac{A}{L}$$

$$G_{\text{th}} = 17 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}} \cdot \frac{1,05 \text{ m}^2}{1,5 \text{ m}}$$

$$G_{\text{th}} = 11,9 \frac{\text{W}}{\text{K}}$$

Da der Wärmeleitstrom in Joule angegeben wird, ist also eine Temperaturänderung von 11,9 K bzw. 11,9°C nötig, damit ein Wärmeleitstrom von einem Joule fließt. Teilt man die Temperaturänderung von 130°C durch 11,9 °C so bekommt man den gerundeten Wert von ca. 10,9. Multipliziert man diesen Faktor mit einem Joule, bekommt man eine Wärmestromdichte von 10,9 Joule. Diese Stromdichte fließt durch eine Fahrzeugseite bei einer Erhitzung des Materials auf 150 °C. Diese Stromdichte ist im Vergleich zu anderen Metallen, die bei der *Formel 1* früher verwendet wurden relativ niedrig (mehr dazu unter 2.4). Da Carbon aber kein Dämmstoff ist, reicht sie aber dennoch zu einer guten Wärmeleitung. Im Falle eines Brandes ist es also durchaus möglich, dass der Pilot sich an den Seitenwänden durch starke Hitze verbrennt. Weil auch der Tank sich direkt hinter dem Fahrer befindet, ist ein schnellst mögliches Aussteigen daher unbedingt notwendig, um den Körper vor hochgradigen Verbrennungen zu schützen.

Bislang wurde das Carbon in Bezug auf *Formel 1* immer nur als Material für den Karosseriebau gesehen.

Tatsächlich wird Carbon aber auch als Werkstoff für die Bremsen eines Boliden verwendet. Dieser Punkt wird im nächsten Kapitel genauer beleuchtet.

2.3.4 Bremsverhalten

Bei einem Rennen ist nicht nur eine schnelle Beschleunigung durch den Motor wichtig, um möglichst schnell Geschwindigkeit aufnehmen zu können sondern auch ein gutes Bremsverhalten. Dies kann unter Umständen lebensrettend sein, wenn es um die Vermeidung von Unfällen geht. Darüber hinaus spart schnelles Bremsen Zeit, was vor allem beim Boxenstopp eine große Rolle spielt.

Der Boxenstopp ist eine kurze Pause, während der dem Wagen die Reifen gewechselt und geringfügige Reparaturarbeiten vorgenommen werden. In der Regel dauert dieser unter 5 Sekunden. Das Ziel des Fahrers vor dem Boxenstopp ist es, den Boliden möglichst lang auf seiner hohen Geschwindigkeit zu halten und erst kurz davor abzubremesen. Dafür ist es erforderlich, dass die Bremsen eine starke Wirkung haben, sodass die Umdrehung des Reifens rasch gestoppt werden kann. Die Betrachtungsgröße, die man dabei behandeln muss, heißt Reibungskoeffizient. Die Bremsen der *Formel 1* sind so konzipiert, dass Bremsblock und Bremsscheibe aus Carbon bestehen (s. Abb. 13).

Bei der Reibung wird im Allgemeinen zwischen Haft-, und Gleitreibung unterschieden. Da bei den Bremsen der *Formel 1* ein stationärer Bremsblock auf eine rotierende Bremsscheibe drückt, wirkt hier nur die Haftreibung¹.

Da die Oberfläche des Carbons durch die Reibungshitze erwärmt wird, wird diese poröser und gewährleistet dadurch eine starke Reibungsfläche. Das Maß dafür ist der Reibungskoeffizient, der bei Carbon in der Regel bei 0,6 liegt².



Abb. 13 Carbonbremsen

Die maximale Haftreibung $F_{R, \max}$ wird berechnet aus dem Produkt des Reibungskoeffizienten μ_H und der Normalkraft F_N :

$$F_{R, \max} = \mu_H \cdot F_N^3$$

Die Normalkraft entspricht oft der Gewichtskraft. In diesem Falle ist die Normalkraft aber die Kraft, die von dem Piloten durch die Bremse auf die Bremsscheiben ausgeht. Die Bremsen sind so stark, dass während eines Rennens die Boliden bei einer Geschwindigkeit von 300km/h innerhalb 4 Sekunden zum Stillstand kommen können.⁴ Wenn das Auto zum Stillstand gekommen ist, entspricht die negative Beschleunigungskraft, also das Abbremsen, der Haftreibung. Die negative Beschleunigung wurde dann beim Stillstand endgültig in Haftreibung umgewandelt. Es gilt:

1 vgl. Agerer 3, Z. 12

2 vgl. Schmitz 2014, Z. 10

3 vgl. Agerer 3, Z. 35

4 vgl. Grüner, 13.3.2013 Z. 10

$$-F = F_R$$

Bei diesem Beispiel entspricht die Beschleunigungskraft F:

$$F = m \cdot a^1$$

Die Masse beträgt bei dem vorgeschriebenen Mindestgewicht 702 Kilogramm (s. 2.3.3). Damit die Beschleunigung mit $\frac{\Delta v}{\Delta T}$ bestimmt werden kann, muss zuerst die Geschwindigkeit 300 km/h in die SI-Einheit m/s umgerechnet werden:

$$(300 \div 3,6) \frac{\text{m}}{\text{s}} \approx 83,3 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Da es sich hierbei um einen Bremsvorgang handelt, ist Δv negativ. Im nächsten Schritt kann man a mit $\Delta T = 4\text{s}$ ermitteln:

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta T}^2$$

$$a = \frac{-83,3 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{4\text{s}}$$

$$a = -20,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Die Beschleunigungskraft, die auf den Wagen wirkt, beträgt also:

$$F = m \cdot a$$

$$F = 702 \text{ kg} \cdot (-20,8) \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$F \approx -14600 \text{ N}$$

Um jetzt herauszufinden, wie groß die Kraft F_N sein muss, die auf die Bremsen wirkt, setzt man diesen Wert in die erste Gleichung ein:

$$-F = F_R$$

$$-F = \mu_H \cdot F_N$$

$$-(-14600 \text{ N}) = 0,6 \cdot F_N$$

$$\frac{14600\text{N}}{0,6} = F_N$$

$$24300\text{N} \approx F_N$$

Folglich muss der Fahrer eine Kraft von 24,3 MN aufwenden, um das Fahrzeug bei dieser Geschwindigkeit zum Stehen zu bekommen. Zum Vergleich. Das ist die 3,5-fache Erdbeschleunigung des Autos¹, die auf den Fahrer wirkt.

Dagegen haben Bremsen aus Stahl, welche auch in normalen PKWs verbaut sind, mit einem Reibungskoeffizienten von 0,15² einen viermal so geringen Reibungskoeffizienten wie Carbon. Somit wäre die aufzuwendende Kraft auch viermal so hoch:

$$-F = \frac{1}{4} \mu_{\text{H Carbon}} \cdot F_N$$

$$\frac{-F}{\mu_{\text{H Carbon}}} = 4 F_N$$

Damit einher geht auch ein 4-mal so großer Zeitaufwand, um diese Kraft aufzubringen. Dadurch würde ebenfalls ein Verlust von kostbarer Zeit entstehen.

Weiterhin ist noch der Bremsweg zu beachten, da er aussagt, wann ein Fahrer anfangen muss zu bremsen, um im Ziel, z.B. im Boxenstopp zum Stehen zu kommen.

Der Bremsweg s wird mit der nachstehenden Formel bestimmt:

$$s = \frac{1}{2} a \cdot t^2 \quad 3$$

a = Beschleunigung
 t = aufgewendete Zeit

Da s bei den vorherigen Werten negativ wird, ist der Betrag der Gleichung zu bilden. Nach Einsetzen der Ergebnisse erhält man für s :

$$s = \left| \frac{1}{2} \cdot (-20,8) \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot (4\text{s})^2 \right|$$

$$s \approx 166 \text{ m}$$

Der Bremsweg eines Autos mit dieser Geschwindigkeit ist also ca. 166 m lang. Bei herkömmlichen Stahlbremsen wäre auch dieser höher, da durch die Zeit, die benötigt wird, um die erforderliche Bremskraft aufzuwenden, der Bremsweg vervierfacht wird.

So ist auch hier Carbon das ideale Bremsmaterial für den Einsatz in der *Formel 1*.

1 vgl. Ergebnis aus der Rechnung: $24300\text{N} / (702\text{kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2)$

2 vgl. Meyer 2015, S. 52

3 vgl. Meyer 2015, S. 8, zudem eigene Modifikation, da $(v_0 \cdot t + x_0)$ vernachlässigt werden kann

2.4 Vergleich mit Aluminium

Aluminium ist eine Legierung aus den Elementen Magnesium und Silicium. Ähnlich wie Carbon verbindet auch Aluminium die Eigenschaften der beiden Elemente in einem Material.

Wie eingangs erwähnt, war bis zu den 80er Jahren beim Karosseriebau der *Formel 1* Aluminium die Wahl der Mittel(s. Abb. 14).

In diesem Kapitel soll geprüft werden, inwiefern Carbon tatsächlich Aluminium übertrifft. Dazu soll in den schon behandelten Kategorien: Beständigkeit gegen Druckeinwirkung, Gewicht und Temperaturbeständigkeit ein zügiger Vergleich gezogen werden.



Abb. 14 Aluminiumrennwagen

2.4.1 Widerstand gegen mechanische Verformungen

Wie schon zuvor bei Carbon muss man für die Belastungen bei der *Formel 1* hier Dehnsteifigkeit und Zugfestigkeit untersuchen.

Da Aluminium nicht anisotrop ist, beträgt der Elastizitätsmodul in alle Belastungsrichtungen im Durchschnitt 70 000 N/mm². Dieser ist zum Vergleich mit Carbon 7-mal so hoch (s. 2.3.1.1). Das bedeutet für die Dehnsteifigkeit:

$$D = 7 \cdot E_{\text{Carbon}} \cdot A$$

$$\frac{1}{7} D = E_{\text{Carbon}} \cdot A$$

Die Dehnsteifigkeit von Carbon ist siebenmal geringer als die von Aluminium. Das bedeutet, dass Carbon sich 7-mal leichter dehnen lässt als Aluminium. Diese Bilanz spricht auf den ersten Blick für Aluminium als Karosseriematerial der Formel 1. Da, wie unter 2.3.1.2 schon erwähnt, diese Formeln nur bis zur Belastungsgrenze der Zugfestigkeit gelten, muss nun diese betrachtet werden.

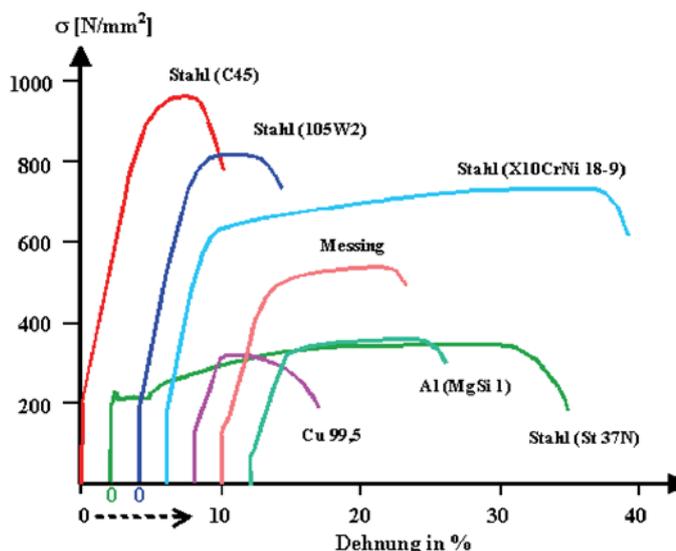


Abb.15 Dehnung-Spannungsdiagramm von verschiedenen Metallen

Das Dehnungs-Spannungsdiagramm (Abb. 12) vergleicht die Zugfestigkeit verschiedener Metalle.

Die Nullstellen der Graphen sind dabei auf der x-Achse um 2% verschoben.

Die Achsenbeschriftung gleicht dabei der auf Abbildung 7.

Für einen Vergleich mit Carbon, ist für uns aber nur die türkisfarbene Aluminiumkurve von Bedeutung.

Sie zeigt, dass Aluminium bei einer Belastung von ca. 300 N/mm² nachgibt. Bis dahin verformt es sich um bis zu ca. 15 %.

Diese Materialkonstante ist bei Carbon um mehr als das 8-, bis 16-fache kleiner als die von Aluminium (s. 2.3.1.2).

Die Diskrepanz zwischen diesen beiden Werten spricht eindeutig für Carbon, da es einer viel größeren Belastung ohne große Verformung standhalten kann.

Bei dem Crash einer Aluminium-Karosserie wird der Fahrer bei einer solchen hohen Verformung von seinem Auto eingeschlossen und kann sich massive Verletzungen zuziehen. In diesem Punkt bietet Carbon ein Mehrfaches an Sicherheit und hat somit einen entscheidenden Vorteil gegenüber Aluminium.

2.4.2 Gewicht

Das Gewicht einer Karosserie ist abhängig von der Dichte des Werkstoffs.

Diese hat bei Aluminium die Größe von 2,7 g/ cm³¹. Damit ist Aluminium um 50% schwerer als Carbon (s. 2.3.2).

Auch diese vergleichsweise große Gewichtseinsparung gegenüber Aluminium macht Carbon für die Konstrukteure sehr attraktiv.

2.4.3 Verhalten und Widerstand bei hohen Temperaturen

Weiterhin zeigt Aluminium auch ein ganz anderes Verhalten bei Hitze.

Die Längenänderung von Aluminium ist bei Temperaturänderung ist fast 4-mal so groß wie die von Carbon gegen die Faserrichtung und um über 45-mal größer als die in Faserrichtung (s. 2.3.3.1). Diese Aussage lässt sich anhand des

Wärmeausdehnungskoeffizienten von rund $46 \cdot 10^{-6} \cdot K^{-1}$ ² treffen.

Während Carbon also bei gleicher Temperaturänderung relativ kompakt bleibt, fängt Aluminium bereits an, zu schmelzen und die Form zu verändern. Noch dazu leitet Aluminium die Hitze 14-mal besser als CFK (s. 2.3.3.2). Dies geht hervor aus der Wärmeleitfähigkeit Aluminiums, die 237 W/(m·K)³ beträgt.

Auch sonst eignet sich Aluminium als hervorragender Wärmeleiter und unterliegt deshalb deutlich auch in diesem Anforderungsbereich dem Material Carbon.

Abschließend ist es wohl sehr gut nachvollziehbar, dass die Materialwissenschaftler nach der Entdeckung von Carbon dieses nutzten. Zum einen machte das den Rennsport sicherer und zum anderen ergaben sich auch neue Möglichkeiten zur Steigerung der Geschwindigkeit.

¹ Meyer 2015, S.45

² vgl. Hornbogen; Warlimont 2016, S.104

³ vgl. Wärmeleitfähigkeit Tabelle 1

3 Wissenschaftlicher Fortschritt zur Verbesserung des täglichen Lebens

Seit die Fahrzeuge bei der *Formel 1* aus Carbon gefertigt werden, ist die Zahl der Verletzungen und tödlichen Unfällen drastisch zurückgegangen. Gleichzeitig wurden aber auch die schnellsten Geschwindigkeitsrekorde aufgestellt.

Mit der Einführung von Carbon haben die Konstrukteure der Rennställe in Bezug auf die Rennserie somit großartige Arbeit geleistet.

In der heutigen Zeit wird aber nicht nur im Motorsportbereich auf dieses Hochleistungsmaterial zurückgegriffen.

Auch experimentieren inzwischen Automobilfirmen wie z.B. *BMW* mit dem Einsatz von Carbon bei herkömmlichen Pkws (s. Abb.16). Dies führt auch im Alltag zu mehr Treibstoffeffizienz und zu mehr Sicherheit im Straßenverkehr.

Die Erforschung von Carbon für extreme Herausforderungen könnte bald auch mehr Einfluss in unser alltägliches Leben haben: Weniger Treibstoffverbrauch führt zu weniger Emission von Treibhausgasen. Aus diesem Grund verfolgt die jetzige Bundesregierung das Konzept bis 2020 eine Millionen Elektroautos auf die Straßen zu bringen, um die klimaschädlichen CO₂ Abgase zu verringern.¹



Abb.16 Elektroauto mit Carbonanteil

Dabei kann Carbon aufgrund seines geringen Gewichts helfen, die Entwicklung der Elektroautos voran zu bringen.

Bislang verhindert noch der hohe Preis des Materials eine großflächige Verwendung in Serienmodellen. Auch hier macht der Blick auf die *Formel 1* Hoffnung: Durch kontinuierliches Forschen werden neue Gebiete der Materialwissenschaften erschlossen. Natürlich wird dabei als erstes die Neugier der Wissenschaftler auf technische Innovationen befriedigt.

Darüber hinaus ermöglichen diese Innovationen -im Hinblick auf den Klimawandel- längerfristig aber auch die Verbesserung

¹ vgl. Presse-und Informationsamt der Bundesregierung 2016, Z. 21

4 Anhang

4.1 Abkürzungsverzeichnis

CFK = carbonfaserverstärkter Kunststoff

HM = high modulus

HST = high strength

HT = high tenacity

PAN = Polyacrylnitril

4.2 Formelzeichen

A	=	Fläche
a	=	Beschleunigung
D	=	Dehnsteifigkeit
E	=	Elastizitätsmodul
ϵ	=	Dehnung in Prozent
$F_{R. \max.}$	=	maximale Reibungskraft
F_N	=	Normalkraft
G_{th}	=	Dichte des Wärmestroms
L	=	Länge
λ	=	Wärmeleitkoeffizient
m	=	Masse
R_m	=	Zugfestigkeit
ρ	=	Dichte
σ	=	Spannung

4.3 Quellen

4.3.1 Literaturquellen

Amelunxen, Kerstin. *Galvani - Chemie 11 Ausgabe B*. München: Oldenbourg Schulbuchverlag GmbH, 2013¹

Bergmeister, Konrad. *Kohlenstofffasern im Konstruktiven Ingenieurbau*. Berlin: Ernst und Sohn Verlag, 2003¹

Briehl, Horst. *Chemie der Werkstoffe*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014³

Callister, William; Rethwisch David. *Materialwissenschaften und Werkstofftechnik- Eine Einführung*. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2013¹

Ehrenstein, Gottfried W.. *Faserverbund-Kunststoffe - Werkstoffe-Verarbeitung-Eigenschaften*. München,Wien: Carl Hanser Verlag, 2006²

Ehrenstein, Gottfried W.. *Polymerwerkstoffe-Struktur-Eigenschaften-Anwendung*. München: Carl Hanser Verlag, 2011³

Gieck, K. *technische Formelsammlung*. Heilbronn: Gieck Verlag, 1989²⁹

Gottstein, Günther. *Materialwissenschaften und Werkstofftechnik - Physikalische Grundlagen*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2014⁴

Hornbogen, Erhard; Eggeler, Gunther; Werner, Ewald A.. *Werkstoffe-Aufbau und Eigenschaften*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2012¹⁰

Hornbogen, Erhard; Warlimont Hans. *Metalle-Struktur und Eigenschaften der Metalle und Legierungen*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 2016⁶

Meyer, Lothar. *Naturwissenschaftliche Formelsammlung – für die bayerischen Gymnasien 2. Fassung*. Berlin: Cornelsen Schulverlage GmbH, 2015¹

Richard, Hans Albert; Sander Manuela. *Technische Mechanik. Festigkeitslehre: - Lehrbuch mit Praxisbeispielen, Klausuraufgaben und Lösungen*. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2008²

Roos, Eberhard; Maile, Karl. *Werkstoffkunde für Ingenieure-Grundlagen, Anwendung, Prüfung*. Heidelberg, Berlin: Springer-Verlag, 2008³

Schwarz, Otto; Ebeling Friedrich Wolfhard. *Kunststoffkunde*. Würzburg: Vogel Verlag und Druck GmbH & Co. KG 2002⁷

Weitze, Marc-Denise; Berger Christine. *Werkstoffe – Unsichtbar, aber unverzichtbar*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2013¹

4.3.2 Vortragsquellen:

Oberpaul, Petra. *Kohlenstoff -seine Elementmodifikationen-*. Bayreuth, 2016

Rapp, Helmut/ Institut für Leichtbau Universität der Bundeswehr München.
Faserverbundstrukturen unter dem Gesichtspunkt Faserverbundstrukturen unter dem Gesichtspunkt werkstoffhybrider Bauweisen. Neubiberg, 25.8.2005

4.3.3 Internetquellen

Onlinezeitschriftenartikel

namentlich bekannte Autoren

Brunner, Matthias. *Autos 2016: Was steckt hinter den Bezeichnungen?*. Speed Week, 21.1.2016 auf:
<http://www.speedweek.com/formel1/news/86813/Autos-2016-Was-steckt-hinter-den-Bezeichnungen.html>
(letztes Aufrufdatum: 4.11.2016)

Grüner, Tobias. *F1-Technik Video Bremsen- von 100km/h auf null in 15 Metern*. Auto, Motor und Sport, 13.6.2013 auf:
<http://www.auto-motor-und-sport.de/formel-1/f1-technik-video-bremsen-von-100-km-h-auf-null-in-15-metern-7244437.html>
(letztes Aufrufdatum: 4.11.2016)

Rother, Franz. *Karbon - die schwarze Magie*. WirtschaftsWoche Online, 06.03.2011 auf:
<http://www.handelsblatt.com/auto/test-technik/auto-leichtbau-karbon-die-schwarze-magie/3872664.html>
(letztes Aufrufdatum: 4.11.2016)

Schmidt, Michael.

1:
Die geheimen Daten der neuen Autos. Auto Motor und Sport, 13.3.2016 auf:
<http://www.auto-motor-und-sport.de/formel-1/f1-autos-2016-technische-daten-abmessungen-laenge-radstand-anstellwinkel-10641310.html>
(letztes Aufrufdatum: 4.11.2016)

2:
Formel 1 immer schwerer – 125 Kilogramm in 20 Jahren. Auto Motor und Sport, 10.5.2016 auf:
<http://www.auto-motor-und-sport.de/formel-1/f1-immer-schwerer-125-kilogramm-in-20-jahren-11194521.html>
(letztes Aufrufdatum: 4.11.2016)

Schulz, Manuel. *Über 360 km/h im Rennen*. Motorsportmagazin.com, 20.06.2016 auf:
<http://www.motorsport-magazin.com/formel1/news-228791-geschwindigkeitsrekord-in-baku-die-topspeeds/>
(letztes Aufrufdatum: 4.11.2016)

Stegmaier, Gerd.

Reifen, Speed, Power: Die Formel 1 im Zahlen-Check. Online Focus, 15.3.2013 auf:
http://www.focus.de/sport/formel1/tid-30029/formel-1-technik-und-fakten-gewicht-top-speed-und-verbrauch-der-boliden-von-0-auf-200-in-fuenf-sekunden_aid_938271.html
(letztes Aufrufdatum: 4.11.2016)

nicht namentlich bekannte Autoren

Hintergrund: Wie ist ein Formel-1-Auto aufgebaut?. Motorsport total.com, 16.2.2010 auf:
http://www.motorsport-total.com/f1/news/2010/02/Hintergrund_Wie_ist_ein_Formel-1-Auto_aufgebaut_10021610.html
(letztes Aufrufdatum: 4.11.2016)

Internetseiten
namentlich bekannten Autoren

Agerer, Markus Sebastian. Maschninenbau-Wissen.de

1: *Steifigkeit in der Mechanik*. Auf:

<http://www.maschinenbau-wissen.de/skript3/mechanik/festigkeitslehre/139-steifigkeit>
 (letztes Aufrufdatum: 4.11.2016)

2: *Unterschied zwischen Steifigkeit und Festigkeit*. Auf:

<http://www.maschinenbau-wissen.de/skript3/mechanik/festigkeitslehre/138-unterschied-steifigkeit-festigkeit>
 (letztes Aufrufdatum: 4.11.2016)

3: *Reibungskoeffizient*. Auf:

<http://www.maschinenbau-wissen.de/skript3/mechanik/kinetik/289-reibungskoeffizient>
 (letztes Aufrufdatum: 4.11.2016)

Didaktik der Chemie, FU Berlin: Brockmann, Mirjam; Ibold, Stefan.

Kunststoffe zum Kennenlernen-Polyacrylnitril. 2000 auf:

<http://www.chemie.fu-berlin.de/chemistry/kunststoffe/acryl.htm>

Föll, H.

Spannungs - Dehnungskurven realer duktiler Materialien. Auf:

http://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/mw1_ge/kap_7/illustr/t7_1_1.html
 (letztes Aufrufdatum: 4.11.2016)

Lohner, Hans.

Graphit. 8.8. 2013 Auf:

<http://anorganik.chemie.vias.org/graphit.html>
 (letztes Aufrufdatum: 4.11.2016)

Presse-und Informationsamt der Bundesregierung.

Mobilität der Zukunft-sauber und kostengünstig. Bundesregierung.de, 2016 auf:

https://www.bundesregierung.de/Webs/Breg/DE/Themen/Energiewende/Mobilitaet/mobilitaet_zukunft/_node.html
 (letztes Aufrufdatum: 4.11.2016)

Sauber.

Formel-1-Technik 2015: der Sitz. Formel1.de, 10.2.2015 auf:

<http://www.formel1.de/news/news/2015-02-10/formel-1-technik-2015-sitz>
 (letztes Aufrufdatum: 4.11.2016)

Schmitz, Ralf.

So bremst die Formel 1. at-rs.de, 2014 auf:

<http://www.at-rs.de/beitrag/items/so-bremst-die-formel-1.html>
 (letztes Aufrufdatum: 4.11.2016)

Stuhlpfarrer, Fridolin.

Kohlenstoff/ Kohlenstoffoxide. chemienet.info, 8.7.2013 auf:

<http://www.chemienet.info/7-c.html>
(letztes Aufrufdatum: 4.11.2016)

Nuyken, Oskar; Samarian, Heidi; Wurdack, Ilse. chemgapedia.de
www.chemgapedia.de/vsengine/vlu/vsc/de/ch/9/mac/stufen/polyaddition/epoxide/epoxidharz.vlu.html
(letztes Aufrufdatum: 4.11.2016)

namentlich nicht bekannten Autoren

Ausdehnungskoeffizient. chemie.de
<http://www.chemie.de/lexikon/Ausdehnungskoeffizient.html>
(letztes Aufrufdatum: 4.11.2016)

CFK-Herstellung. Karl Mayer
www.karlmayer-composites.com/impressum/cfk-herstellung
(letztes Aufrufdatum: 4.11.2016)

Die Carbon Herstellung-federleicht und bruchssicher. CG-TEC
www.cg-tec.de/carbon-herstellung/
(letztes Aufrufdatum: 4.11.2016)

Formel-1 Regeln 2016: Sportliches Formel-1 Reglement. Formel1.de, 2016 auf:
<http://www.formel1.de/inside/reglement/sportliches-reglement>
(letztes Aufrufdatum: 4.11.2016)

Formel-1-Regeln 2016: Technisches Formel-1-Reglement. Formel1.de, 2016 auf:
<http://www.formel1.de/inside/reglement/technisches-reglement>
(letztes Aufrufdatum: 4.11.2016)

Wärmeleitfähigkeit. chemie.de
<http://www.chemie.de/lexikon/W%C3%A4rmeleitf%C3%A4higkeit.html>
(letztes Aufrufdatum: 4.11.2016)

4.3.4 Abbildungsquellen:

Abbildung 1:
CNN International. „*The Circuit*“. 2015

Abbildung 2:
SGL Group. *Herstellung von Carbonfasergewebe*. 2010

Abbildung 3:
Larsson Alva. *Blue Carbon Fiber Wallpaper HD Resolution #0f5*. 2016

Abbildung 4:
Lohninger, Hans. *Graphit*. 2013 auf:
<http://anorganik.chemie.vias.org/graphit.html>

Abbildung 5:

Stuhlpfarrer, Fridolin. *Graphit*. www.chemienet.info/7-c.html. 2013

Abbildung 6+7:

Ibold, Stefan/Didaktik der Chemie, FU Berlin. *epoxsyn*. 2000 auf:
<http://www.chemie.fu-berlin.de/chemistry/kunststoffe/acryl.htm>

Abbildung 8:

Piola, Giorgio. *McLaren MP4/1 Carbon Monocoque*

Abbildung 9:

Gottfried W. Ehrenstein. *Eigenschaftsspektrum der verschiedenen Faserarten*. 2006
in: *Faserverbund-Kunststoffe- Werkstoffe - Verarbeitung – Eigenschaften*.
München/Wien: Carl Hanser Verlag, 2006² S. 43

Abbildung 10:

Gottfried W. Ehrenstein. *Einfluß der Behandlungstemperatur auf die Zugfestigkeit
und den E-Modul einer C-Faser*. 2006 in: *Faserverbund-Kunststoffe- Werkstoffe -
Verarbeitung – Eigenschaften*. München/Wien: Carl Hanser Verlag, 2006² S. 41

Abbildung 11:

xpbimages. *Fernando Alonso vs. Felipe Massa (GP Europa 2007)*. 2007

Abbildung 12:

getty. *Kevin Magnussens fire*. 2016

Abbildung 13:

xpbimages. *Jenson Button, Bremsen*. 2013

Abbildung 14:

Daimler. *Großer Preis von Deutschland, 1. August 1954. Der Sieger Juan Manuel
Fangio auf Mercedes-Benz W 196 R mit freistehenden Rädern, Startnummer 18*. 1954

Abbildung 15:

Föll H. / technische Fakultät der Universität Kiel. *Spannungs-Dehnungskurven realer
duktiler Materialien*.

Abbildung 16:

BMW group. *bmw i3*. 2016

4 Bestätigung der eigenständigen Anfertigung

Hiermit bestätige ich, Tassilo Pyko, dass ich die Seminararbeit im W-Seminar Physik zum Thema „Carbon in der *Formel 1*“ eigenständig und ohne fremde Hilfe angefertigt habe.

München, den 08.11.2016 _____