

Freie Fahrt für alle: Das Auto



In diesem Kapitel ...

- ▶ Die gängigsten Motoren
- ▶ Die wichtigsten physikalischen Bauteile des Autos
- ▶ Immer wichtiger: elektronische Komponenten

Können Sie sich heute noch ein Leben ohne Ihr Auto vorstellen? Bei der Organisation Ihres täglichen Lebens und für Ihre Freizeit eröffnet Ihnen das Auto völlig neue Möglichkeiten. Auch für die Wirtschaft spielt das Auto eine zentrale Rolle, beispielsweise in der Automobilindustrie oder im Transportwesen.

Es wird Sie nicht überraschen, dass in jedem Auto (vom alten VW Käfer bis zum Ferrari) eine Menge Physik steckt. Dieser Physik wollen wir uns im Folgenden zuwenden. Ich erkläre Ihnen verschiedene Motortypen und andere Bauteile wie den Katalysator oder den Turbolader. Auch bei Autos spielt die Elektronik eine immer größere Rolle, was sich in zwei Artikeln über das ABS und das GPS widerspiegelt. Ganz zum Schluss erfahren Sie, was es mit dem c_W -Wert auf sich hat und wie die Polizei mit ihren Radarfallen messen kann, dass Sie mal wieder zu schnell unterwegs gewesen sind.

Die sportive Variante: Der Ottomotor

In den beiden ersten Artikeln dieses Kapitels geht es um die beiden wichtigsten Motoren zum Antrieb von Kraftfahrzeugen, den Ottomotor (auch Benzinmotor genannt) und den Dieselmotor. Sie lernen zunächst die Funktionsweise der beiden Motortypen und deren Vor- und Nachteile kennen. Am Ende des Artikels über den Dieselmotor habe ich noch einen abschließenden Vergleich für Sie vorbereitet.

Alle Motoren gehören zu den sogenannten *Wärme-Kraft-Maschinen*. Solche Maschinen wandeln Wärme (die in diesem Fall durch Verbrennung des Kraftstoffs erzeugt wird) in mechanische Energie um. Die allererste vom Menschen gebaute Wärme-Kraft-Maschine war die Dampfmaschine. Für individuelle Fahrzeuge war diese zwar noch zu sperrig, in Lokomotiven hat sie jedoch mehr als 100 Jahre lang wertvolle Dienste geleistet (siehe Kapitel 2)!

Die meisten Benzinmotoren arbeiten mit vier Zylindern und je vier Arbeitstakten. Die Takte sind in den Zylindern zeitlich gegeneinander verschoben und werden über sogenannte Wellen gesteuert, an denen die Zylinder befestigt sind. Die vier Takte eines Zylinders sind in Abbildung 1.1 dargestellt. Der Zylinder besteht aus folgenden Bestandteilen:

- ✓ ein Einlassventil für das zu verbrennende Benzin-Luft-Gemisch
- ✓ ein Auslassventil zum Ausstoß des verbrannten Gemischs
- ✓ eine Zündkerze zum Zünden des Gemischs
- ✓ ein Kolben, der sich auf und ab bewegt
- ✓ eine Pleuelstange, die den Hub des Kolbens auf die Welle überträgt

Alle vier in Abbildung 1.1 dargestellten Arbeitstakte haben eigene Namen:

- ✓ **Ansaugtakt:** Der Kolben bewegt sich nach unten. Das Einlassventil ist offen, sodass sich der Verbrennungsraum mit dem Benzin-Luft-Gemisch füllt.

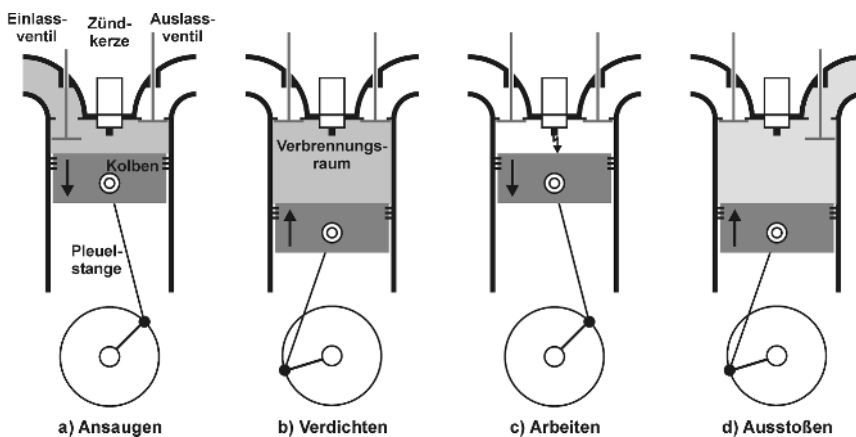


Abbildung 1.1: Die Arbeitstakte eines Ottomotors

- ✓ Verdichtungsakt: Der Kolben bewegt sich nach oben. Da beide Ventile geschlossen sind, wird das Gemisch im Verbrennungsraum verdichtet.
- ✓ Arbeitsakt: Zu Beginn dieses Takts wird das verdichtete Gemisch durch einen Funken der Zündkerze gezündet. Dadurch dehnt sich das Gas explosionsartig aus und der Kolben wird nach unten getrieben.
- ✓ Ausstoßakt: Der Kolben bewegt sich wieder nach oben. Da jetzt das Auslassventil geöffnet ist, werden die Abgase in Richtung Auspuff entsorgt.

Früher wurde das Benzin-Luft-Gemisch in einem *Vergaser* zubereitet. Heute gibt es in den meisten Kraftfahrzeugen ein elektronisches Einspritzsystem. Die Leistung des Motors können Sie durch die eingespritzte Menge des Gemischs regulieren. Die Zusammensetzung des Gemischs ändert sich nicht und ist auf den jeweiligen Motor abgestimmt.

Die beiden Umkehrpunkte des Kolbens nennen Ingenieure oberen und unteren Totpunkt. Der *Hubraum* eines Motors ist das Volumen zwischen den beiden Totpunkten. Bei einem Motor mit mehreren Zylindern wird deren Volumen zum Gesamthubraum addiert.



Die offizielle Einheit der Leistung ist das Watt beziehungsweise das *Kilowatt* (kW). Allerdings geben manche Menschen die Leistung ihres Motors gerne in der (nicht mehr zugelassenen) Einheit *Pferdestärke* (PS) an. Für die Umrechnung gilt:

$$1 \text{ PS} = 735,5 \text{ W} = 0,7355 \text{ kW}$$

Die wesentlichen Vorteile des Ottomotors sind:

- ✓ das geringere Leistungsgewicht (kg/kW). Ein Dieselmotor mit derselben Leistung ist wesentlich schwerer als ein Ottomotor!
- ✓ der größere Drehzahlbereich
- ✓ die einfachere Konstruktion und damit verbunden der geringere Preis

Die gediegene Variante: Der Dieselmotor

Wie beim Ottomotor gibt es auch bei Dieselmotoren vier Arbeitstakte. Diese entsprechen im Wesentlichen denen des Ottomotors: Ansaugen, Verdichten, Arbeiten und Ausstoßen. Nur in den Takten 1 und 3 funktioniert der Dieselmotor ein bisschen anders (siehe Abbildung 1.2). Zudem ist die Zündkerze durch eine *Einspritzdüse* ersetzt.

- ✓ Im Ansaugtakt wird nur Luft in den Verbrennungsraum angesaugt! Dabei ist die Luftmenge stets gleich. Die Leistungsregelung erfolgt im Arbeitstakt über die Menge des eingespritzten Diesels.
- ✓ Zu Beginn des Arbeitstakts wird durch die Einspritzdüse Dieseldieselfkraftstoff in die Verbrennungskammer geleitet. Aufgrund der dort herrschenden hohen Temperaturen entzündet er sich von selbst, sodass keine externe Zündung erforderlich ist.

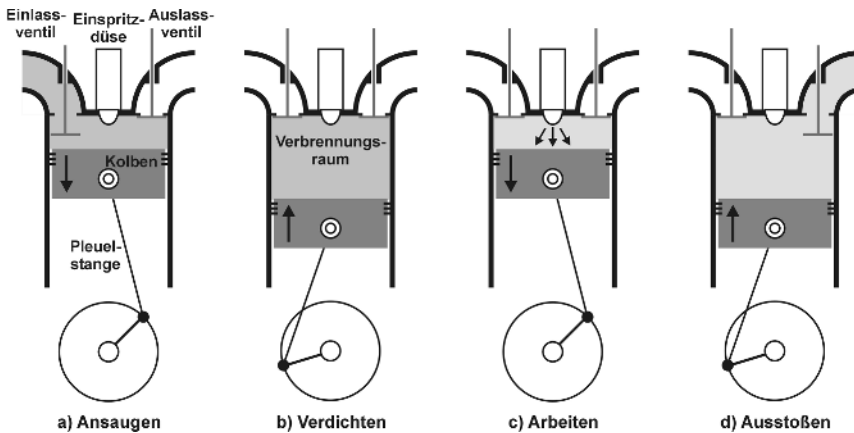


Abbildung 1.2: Die Arbeitstakte eines Dieselmotors

Sowohl Diesel als auch Benzin werden aus Erdöl gewonnen. Erdöl ist ein Gemisch aus verschiedenen Kohlenwasserstoffen C_xH_y , wobei die Zahlen x und y verschiedene (im Rahmen der von der Chemie vorgegebenen Regeln erlaubte) Werte annehmen können. Bei der *Raffinierung* von Erdöl werden diese Kohlenwasserstoffe entsprechend ihrem Molekulargewicht getrennt. Man erhält bei der Trennung aber keine reinen Substanzen, sondern wiederum Gemische. Die Gemische mit den leichtesten Bestandteilen sind Flüssiggase wie Propan und Butan, danach kommen Benzin und Kerosin, gefolgt von Diesel. Die schwersten Produkte bei der Raffinierung sind Heizöl und Schweröl. Sie sehen also, dass Diesel schwerer als Benzin ist und darum auch eine höhere Energiedichte hat! Aus diesem Grund verbraucht ein Dieselmotor weniger Kraftstoff ...

Der größte Vorteil des Dieselmotors ist dieser geringere Kraftstoffverbrauch. Das kommt nicht nur vom höheren Energiegehalt des Kraftstoffs, sondern hängt auch mit der besseren Effizienz des Motors zusammen. Vorteilhaft ist außerdem, dass Dieselmotoren besonders im unteren Drehzahlbereich große Drehmomente entwickeln können. Ein Nachteil ist unter an-

derem, dass die Drücke in Dieselmotoren wesentlich höher sind als in Ottomotoren. Daher müssen sie robuster gebaut werden und sind entsprechend schwerer und teurer.

Zum Abschluss dieses Artikels vergleiche ich für Sie den Otto- und den Dieselmotor unter dem Gesichtspunkt ihrer Effizienz und ihrer Umweltverträglichkeit.

Die schlechte Nachricht vorweg: Beide Motortypen sind nicht besonders effizient! Die Nutzleistung von Ottomotoren beträgt etwa 28 %, die von Dieselmotoren etwa 33 % (siehe Abbildung 1.3). Die restliche Leistung wird über das Abgas und das Kühlwasser abgeführt oder geht durch Reibung und als Wärme verloren. Die geringere Nutzleistung des Ottomotors beruht vor allem auf der höheren im Abgas abgeführten Leistung.

Auch in Bezug auf die Umweltverträglichkeit gibt es gewichtige Unterschiede zwischen den beiden Motoren:

- ✓ Ottomotoren stoßen als Schadstoffe vor allem giftige Stickoxide und Kohlenmonoxid aus.
- ✓ Das schädlichste Abfallprodukt beim Dieselmotor sind krebserzeugende Rußpartikel.

Ohne Abgasaufbereitung sind Ottomotoren wesentlich schädlicher als Dieselmotoren. Dank der Erfindung des geregelten 3-Wege-Katalysators (dazu später mehr) können Sie die Umweltbelastung bei Ottomotoren aber stark reduzieren. Bei Dieselmotoren müssen Sie Rußpartikelfilter einbauen. Hier ist die Umrüstung noch nicht so weit fortgeschritten wie bei den Ottomotoren und ihren Katalysatoren, aber dennoch auf einem guten Weg ...

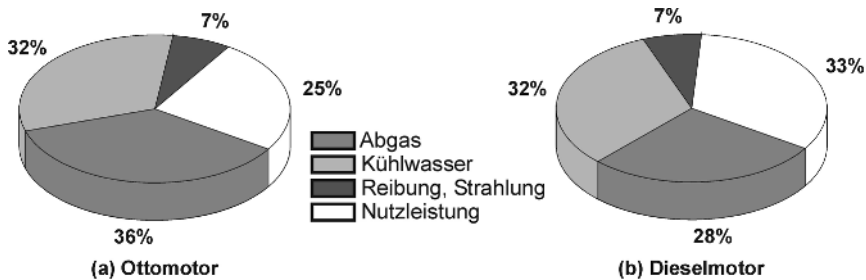


Abbildung 1.3: Vergleich der Nutzleistung von Ottomotor und Dieselmotor

Doppelte Klasse oder nichts Halbes und nichts Ganzes? Das Hybridauto

Ursprünglich wollte ich an dieser Stelle den einfachen Elektromotor erklären, da Elektroautos eine immer größere Rolle spielen. Im Laufe der Zeit erschien mir dann allerdings das *Hybridauto* (in Fachkreisen auch *Hybridelektrokraftfahrzeug* genannt) wesentlich interessanter, zumal der Elektromotor keine wirklich aufregende Physik enthält.

Ein konventionelles Auto (siehe Abbildung 1.4 a) wird von einem Verbrennungsmotor (Benzin oder Diesel) angetrieben, der aus dem Tank mit Kraftstoff gespeist wird. Der Motor treibt über ein Getriebe eine Welle an, deren Drehmoment dann über ein Differenzial (siehe unten) auf die angetriebenen Räder verteilt wird. Bei einem Hybridauto ist dies anders:

- ✓ Neben dem Verbrennungsmotor gibt es noch einen Elektromotor.
- ✓ Außer dem Benzintank gibt es einen weiteren Energiespeicher in Form einer Batterie (genauer gesagt eines Akkumulators, etwa eines Nickel-Metallhydrid- oder eines Lithium-Ionen-Akkumulators), die elektrische Energie speichert. Verwechseln Sie diese Batterie aber bitte nicht mit der herkömmlichen Autobatterie, die leer ist, wenn Sie aus Versehen das Innenlicht brennen lassen!

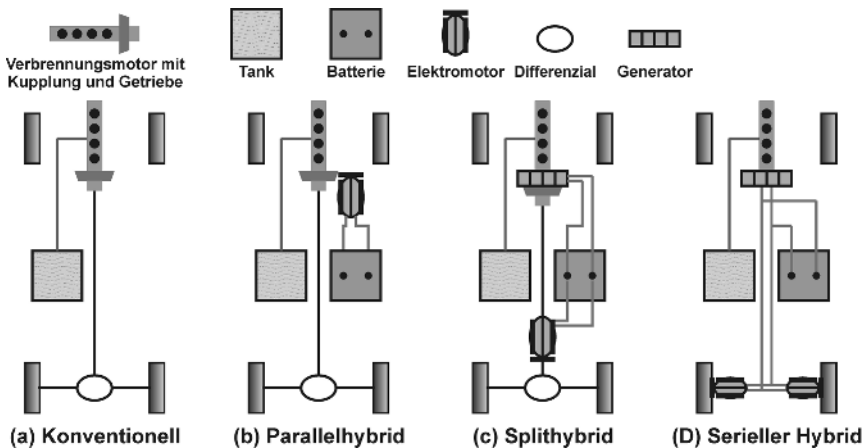


Abbildung 1.4: Vergleich eines konventionellen Autos und verschiedener Hybridautos

Damit ist schon klar, dass Hybridautos schwerer sind als konventionelle Kraftfahrzeuge, wesentlich komplexer und daher auch teurer. Um diese Nachteile auszugleichen, müssen Hybridautos riesige Vorteile aufweisen, ansonsten wären sie nicht konkurrenzfähig. Und in der Tat gibt es eine Reihe bemerkenswerter Vorteile! Dabei unterscheide ich drei verschiedene Typen von Hybridautos (siehe Abbildung 1.4 b bis d):

- ✓ Bei der Serien- oder Reihenschaltung beider Motoren (siehe Abbildung 1.4 d) ist der eigentliche Antrieb elektrisch. Der Verbrennungsmotor unterstützt entweder den Gesamtantrieb oder lädt die Batterie auf. Ein Vorteil dieser Anordnung besteht darin, dass der Verbrennungsmotor stets im optimalen Drehzahlbereich arbeitet, da er nichts mit dem

eigentlichen Antrieb zu tun hat, sondern nur den Generator betreibt. Dadurch wird auch die Schadstoffemission reduziert.

- ✓ Bei der Parallelschaltung beider Motoren (siehe Abbildung 1.4 b) wirken beide Motoren auf die Antriebsachse. Daher können Sie kleinere Motoren verwenden, was den Kraftstoffverbrauch und die Schadstoffemission reduziert.
- ✓ Eine Mischung der beiden Schaltungstypen (siehe Abbildung 1.4 c) wird *Mischhybrid* genannt. Sie können während der Fahrt den seriellen und den parallelen Antrieb entsprechend Ihren Anforderungen anpassen. Im einfachsten Fall lädt der Verbrennungsmotor entweder über den Generator die Batterie auf (serieller Antrieb) oder er ist mechanisch mit der Antriebswelle gekoppelt (paralleler Antrieb). Bei einem leistungsverzweigten Hybridantrieb können Sie die Leistung des Verbrennungsmotors je nach Situation variabel zwischen der direkten mechanischen Übertragung auf die Räder und der Generator-Elektromotor-Kombination aufteilen.

Unabhängig vom Typ haben Hybridautos folgende Vorteile:

- ✓ Elektromotoren erzeugen bereits bei geringen Drehzahlen ein großes Drehmoment, während Verbrennungsmotoren vor allem bei hohen Drehzahlen ihre Stärken ausspielen können. Durch die Kombination können Sie die Vorteile beider Motoren ausnützen!
- ✓ Der Verbrennungsmotor wird öfter und über längere Zeiträume in einem für ihn günstigen Drehzahlbereich betrieben.
- ✓ Beim Bremsen geht ein Teil der Energie in den Akkumulator zurück, was in Fachkreisen *Nutzbremse* genannt wird.
- ✓ Bei geringen Antriebsleistungen können Sie den Verbrennungsmotor ganz abschalten, was unter anderem die Lärmbelastung (etwa vor Ampeln oder in Wohngebieten) reduziert.

Problemlos in die Kurve: Das Differenzialgetriebe

Stellen Sie sich vor, Sie wollen mit Ihrem Auto an einer Kreuzung rechts abbiegen. Aus Abbildung 1.5 geht deutlich hervor, dass die Räder auf der Außenseite der Kurve einen weiteren Weg zurücklegen müssen als die Räder auf der Innenseite.

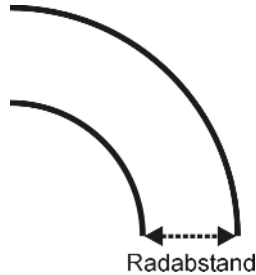


Abbildung 1.5: In einer Kurve legen die Räder unterschiedliche Wege zurück

Würden beide von derselben Welle mit derselben Geschwindigkeit angetrieben, gäbe es ein böses Erwachen für Sie! Darum gibt es in jedem Auto ein sogenanntes *Differenzialgetriebe* oder kurz Differenzial, das dafür sorgt, dass die beiden Räder unterschiedlich angetrieben werden. Hätten Sie gedacht, dass in Ihrem Auto auch so ein Differenzial arbeitet?

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, Differenzialgetriebe zu bauen. Heutzutage wird zumeist das *Kegelrad-Differenzialgetriebe* verwendet, dessen Aufbau und Wirkungsweise Sie schematisch in Abbildung 1.6 sehen. In einem solchen Getriebe gibt es drei Wellen und mindestens sechs Zahnräder. Die Zahnräder sind in der Form eines Kegelstumpfes aufeinandergesetzt,

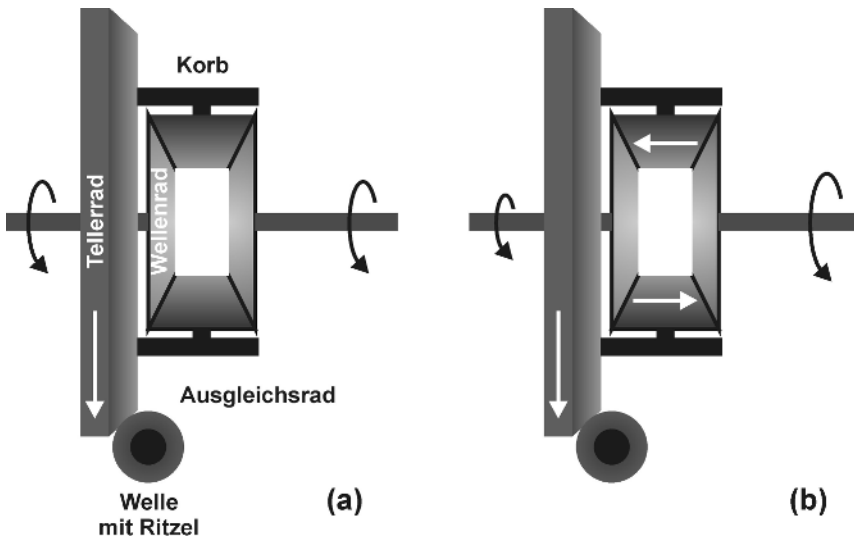


Abbildung 1.6: Geradeausfahrt (a) und Kurvenfahrt (b) mit einem Kegelrad-Differenzialgetriebe

wodurch sich auch der Name des Getriebes erklärt. Die vom Motor kommende Welle überträgt das Drehmoment des Motors über ein Ritzel auf das große Zahnrad, das sogenannte *Tellerrad*. An diesem Rad ist starr ein Korb befestigt, der das eigentliche Differenzial trägt. Der Korb dreht sich also mit dem Tellerrad mit, wobei die Drehachse waagrecht in der Papierebene von Abbildung 1.6 liegt. In dem Korb sind vier weitere Zahnräder:

- ✓ Zwei *Ausgleichszahnräder* am oberen und unteren Rand des Korbs, die sich mit dem Korb um die zentrale Achse drehen.
- ✓ Die Ausgleichszahnräder treiben zwei senkrecht dazu stehende *Achskegelräder* an. Diese beiden Zahnräder sind über zwei Wellen mit den beiden Rädern verbunden. Die beiden Wellen sind weder mit dem Tellerrad noch mit dem Korb starr verbunden, können sich also frei und unabhängig drehen. Die Drehung des Korbs wird durch die Ausgleichszahnräder auf sie übertragen.

Wenn Sie geradeaus fahren, werden die beiden Wellen durch die Rotation des Korbs gleich schnell angetrieben. Dadurch wird das Drehmoment des Motors gleichmäßig auf beide Räder verteilt. In Kurvenfahrten erkennt das System von selbst, dass sich die beiden Räder nicht gleich schnell drehen dürfen. Infolgedessen beginnen die beiden Ausgleichszahnräder, sich in entgegengesetzter Drehrichtung um ihre senkrechte Achse zu drehen. Dies führt dazu, dass sich das Innenrad langsamer, das Außenrad dagegen schneller dreht!

Das Differenzial sorgt übrigens auch dafür, dass sich ein Rad doppelt so schnell dreht, wenn das andere zum Beispiel auf einer vereisten Straße durchdreht. Dadurch wird das Drehmoment trotz der unterschiedlichen Drehzahlen gleichmäßig auf beide Räder verteilt, und Sie können das Auto trotz durchdrehender Reifen noch steuern!

Differenzialgetriebe spielen nicht nur bei Kurvenfahrten eine wichtige Rolle. Bei *Allradfahrzeugen* sorgt beispielsweise ein Differenzial dafür, dass die Leistung optimal auf alle angetriebenen Wellen verteilt wird.



Schon die alten Griechen kannten Differenzialgetriebe. Der berühmte Forscher Leonardo da Vinci entdeckte die Technik im Jahre 1495 wieder. Für Landfahrzeuge wurden sie im Jahr 1827 von dem Franzosen Onésiphore Pecqueur eingeführt, also lange vor der Erfindung des Kraftfahrzeugs!

Keine unnötige Energie verheizen: Turbolader

Das Wort *Turbolader* lief mir zum ersten Mal Anfang der 1980er-Jahre über den Weg, als ich mir Formel-1-Rennen im Fernsehen anschaute und in fast jedem Rennen eines dieser teuren Geräte in Rauch aufging. 1989 wurden Turbolader in der Formel 1 verboten (seit 2014 sind sie übrigens wieder zugelassen). Danach wurde es zunächst einmal still um dieses technische Gerät. Heutzutage finden Sie jedoch in fast jedem neuen Diesel-Pkw und auch in vielen Pkws mit Ottomotor einen solchen Turbolader!

Turbolader verbessern die Effizienz von Motoren und reduzieren deren Treibstoffverbrauch. Um ihre Wirkungsweise zu verstehen, möchte ich Sie bitten, noch einmal zurück zum Artikel über Dieselmotoren zu blättern. Aus Abbildung 1.3 können Sie ablesen, dass unabhängig vom Motortyp die größten Energieverluste durch das zum Teil sehr heiße Abgas entstehen. Die Idee beim Turbolader ist, die im Abgas vorhandene Energie zumindest zum Teil zurückzugewinnen und wieder dem Motor zuzuführen. Dadurch kann der Motor effizienter arbeiten.

In Abbildung 1.7 sehen Sie den (sehr schematischen) Aufbau eines Turboladers. Das heiße Abgas des Motors wird auf eine Turbine geleitet (daher der Name »Turbolader«), die sich dadurch zu drehen beginnt. Die Turbine treibt eine Welle an (die völlig unabhängig vom Motor ist), an deren anderem Ende ein *Verdichter* sitzt. Dieser saugt Umgebungsluft an, verdichtet sie (vergrößert also ihren Druck) und erwärmt sie dabei. Die Temperatur wird anschließend im sogenannten *Ladeluftkühler* wieder gedrosselt, der hohe Druck bleibt jedoch! Diese verdichtete Luft wird dann im Ansaugtakt des Motors in den Verbrennungsraum gepustet. Dadurch ist bei gleichem Hubraum mehr Sauerstoff in der Kammer, sodass Sie dort mehr Treibstoff verbrennen können beziehungsweise der vorhandene Treibstoff effizienter verbrannt wird.

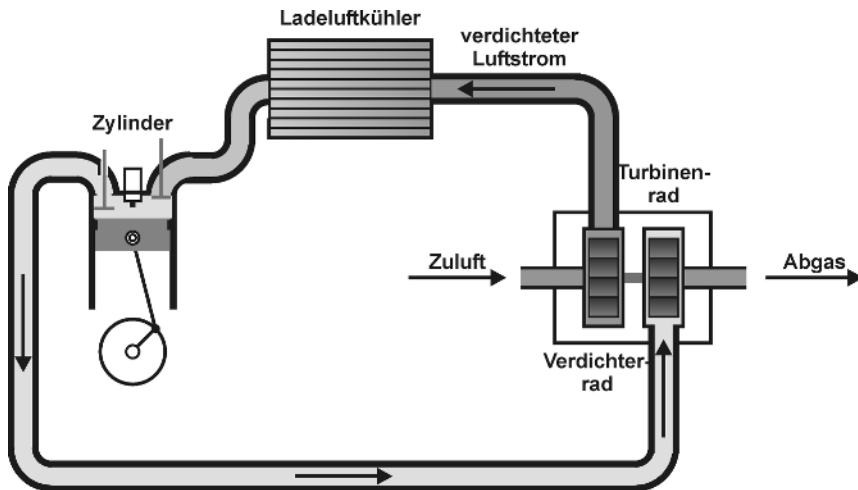


Abbildung 1.7: Aufbau eines Turboladers

Gegenüber einem gleich starken Saugmotor besitzt ein Motor mit Turbolader die folgenden Vorteile:

- ✓ Der Motor kann einen Teil der sonst ungenutzten Abgasenergie zur Steigerung seiner Leistung verwenden.
- ✓ Ein Motor mit Turbolader kann bei gleicher Leistung kleiner ausgelegt werden als ein Saugmotor.
- ✓ Bei einem Motor mit entsprechend kleinerem Hubraum sind die Reibungs- und Wärmeverluste geringer.
- ✓ Dadurch verringern sich sowohl der Kraftstoffverbrauch als auch die Schadstoffemission.

Ihnen wird schnell einleuchten, dass es umso mehr Abgase gibt, je größer die Drehzahl ist. Ein technisches Problem bei Turboladern besteht also darin, den Grad der Luftverdichtung in Abhängigkeit von der aktuellen Drehzahl zu regulieren. Sonst wäre die Verdichtung bei hohen Drehzahlen des Motors zu groß, bei kleinen Drehzahlen hingegen zu gering! Autobauer lösen dieses Problem durch einen *Bypass*, mit dem sie die Menge des auf die Turbine treffenden Abgases regeln können. Eine andere Möglichkeit ist die in Abbildung 1.8 gezeigte Anordnung, bei der die Turbinengeschwindigkeit durch die Geschwindigkeit des anströmenden Abgases geregelt wird (je geringer der Leitungsquerschnitt, desto schneller ist das Abgas).

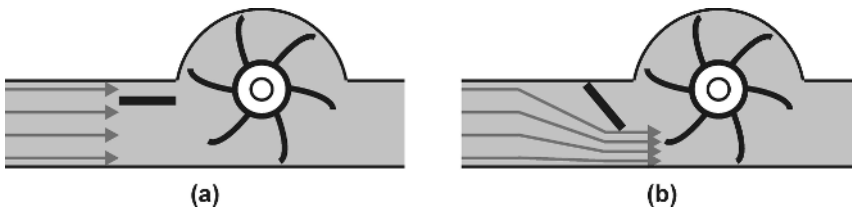


Abbildung 1.8: Regelung der Strömungsgeschwindigkeit bei einem Turbolader durch Querschnittsänderung

Geht dem Abgas an den Kragen: Der Katalysator

Die Abgase eines Automotors, insbesondere eines Ottomotors, enthalten Kohlenwasserstoffe (C_xH_y), Kohlenmonoxid (CO), Stickoxide (NO_x) und Wasser (H_2O). Die ersten drei sind gesundheitsgefährdend und umweltschädlich, sollten also lieber nicht aus dem Auspuff Ihres Autos in die Umwelt gelangen! In den letzten zwanzig Jahren haben Ingenieure sogenannte *Fahrzeugkatalysatoren* entwickelt, die einen Großteil dieser schädlichen Bestandteile aus dem Autoabgas herausfiltern. Der heutige Standard für Benzinmotoren ist der *geregelter 3-Wege-Katalysator*, den ich Ihnen in diesem Artikel vorstelle.

Katalysatoren sind nicht auf Autos beschränkt, sondern spielen in der gesamten Chemie und Biochemie eine überaus wichtige Rolle. Der Chemiker versteht unter einem Katalysator einen Stoff, der eine chemische Reaktion beschleunigt oder sogar erst ermöglicht, am Ende der Reaktion aber unverändert vorliegt. Der Katalysator ist also weder ein Reaktionsprodukt noch ein verbrauchter Rohstoff, sondern kann immer wieder für weitere, gleichartige Reaktionen verwendet werden. Damit keine Verwirrung für Sie entsteht, verwende ich zwei verschiedene Benennungen:

- ✓ Die chemische Komponente, die den katalytischen Prozess bewirkt, nenne ich *Katalysator*.
- ✓ Das im Auto eingebaute Gerät nenne ich abgekürzt *Kat*.

In einem 3-Wege-Kat werden die Abgase wie folgt umgesetzt:

- ✓ Oxidation von CO: $CO + O_2 \rightarrow CO_2$
- ✓ Oxidation von Kohlenwasserstoffen: $C_xH_y + O_2 \rightarrow CO_2 + H_2O$
- ✓ Reduktion von Stickoxiden: $NO_x + CO \rightarrow N_2 + CO_2$

Vorsicht: Diese Reaktionsgleichungen sind nicht chemisch (»stöchiometrisch«) exakt, sie sollen lediglich das Prinzip zeigen!



Der Name »3-Wege-Kat« bezieht sich auf diese drei Reaktionen.

In den Reaktionsgleichungen können Sie bereits die große Schwierigkeit entdecken, die beim Bau eines Kats auf die Ingenieure zukommt. Die beiden ersten Reaktionen sind Oxidationsreaktionen, benötigen also Sauerstoff. Die dritte Reaktion ist eine sogenannte *Reduktionsreaktion*, für die Kohlenmonoxid benötigt wird. Andererseits soll aber eben dieses Kohlenmonoxid per Oxidationsreaktion aus dem Abgas verschwinden! Enthält das Abgas zu viel Sauerstoff, so wird das CO zu schnell oxidiert und die Stickoxide können nicht abgebaut werden. Ist der Sauerstoffanteil hingegen zu gering, werden zwar alle Stickoxide, nicht aber das Kohlenmonoxid und die Kohlenwasserstoffe erwischt ...

Die Zusammensetzung des in den Motor eingespritzten Benzin-Luft-Gemischs muss also sinnvoll geregelt werden. Dazu wird der Restsauerstoffgehalt im Abgas mithilfe einer sogenannten *Lambdasonde* gemessen. Anhand dieses Messwerts können Sie dann den Luftgehalt im Gemisch einstellen. Sie regeln also keineswegs den Kat selbst, sondern die Einspritzung!

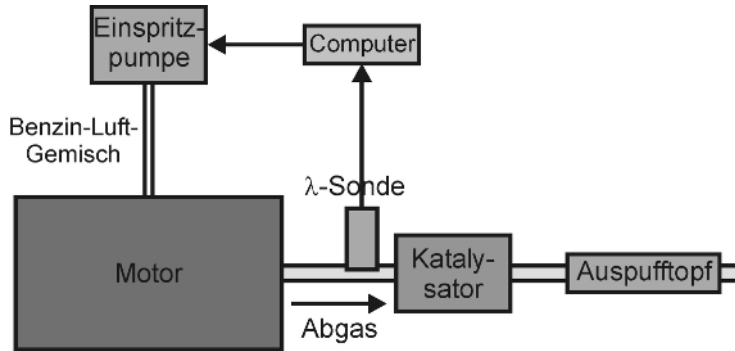


Abbildung 1.9: Die Wirkungsweise eines geregelten Katalysators

Der Ablauf ist für Sie nochmals schematisch in Abbildung 1.9 gezeigt. Mit solch einem 3-Wege-Kat können Sie über 90 % der Schadstoffe im Abgas abbauen. Da Dieselmotoren einen höheren Sauerstoffanteil im Abgas haben, kann ein 3-Wege-Kat nur bei Ottomotoren eingesetzt werden.

Der Kat selbst besteht aus drei Teilen, die in Abbildung 1.10 dargestellt sind:

- ✓ Grundlage ist ein *Träger* aus Keramik oder Metall. Keramikträger sind von engen Kanälen durchzogen, Metallträger bestehen aus vielen dünnen Folien. In beiden Fällen ist das Ziel, eine möglichst große Oberfläche zu bekommen.
- ✓ Durch eine Beschichtung aus porösem Aluminiumoxid (Al_2O_3) können Sie die Oberfläche des Trägers nochmals vergrößern. Dadurch kann auch mehr Sauerstoff gespeichert werden.
- ✓ Auf diese *Zwischenschicht* wird dann die eigentliche Katalysatorschicht aufgedampft. Sie besteht aus den Edelmetallen Platin und Rhodium, manchmal auch aus Palladium (siehe Abbildung 1.10). Platin unterstützt die Oxidationsreaktionen, Rhodium die Reduktionsreaktionen.

Die verwendeten Edelmetalle sind sehr teuer. Sie brauchen aber auch nur wenige Gramm für den Bau eines Kats! Zudem wirken die Edelmetalle katalysatorisch, liegen also nach Ende der Reaktion wieder im Ursprungszustand vor und können für viele weitere Reaktionen verwendet werden.

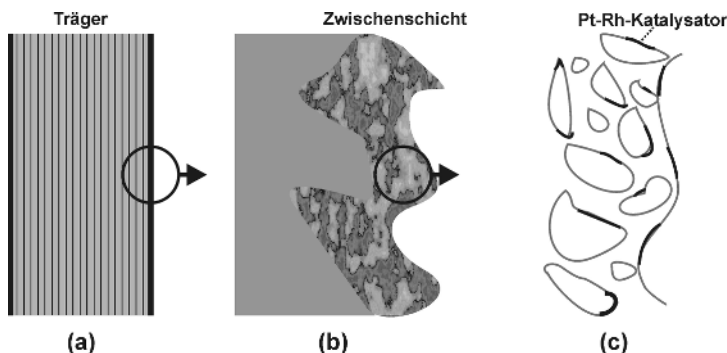


Abbildung 1.10: Aufbau eines 3-Wege-Katalysators

Drehen Sie nicht durch: Das ABS

Elektronik nimmt auch im Auto einen immer wichtigeren Platz ein. Leider führt dies häufig dazu, dass einfache Autowerkstätten kleine Defekte überhaupt nicht mehr reparieren können, sondern das ganze System austauschen müssen. Das Antiblockiersystem (ABS) ist ein typisches Beispiel dafür. Andererseits ist das ABS außerordentlich hilfreich: Indem es bei einer abrupten Bremsung dem Blockieren der Räder entgegenwirkt, erhöht es die Fahrsicherheit und verringert den Reifenverschleiß.

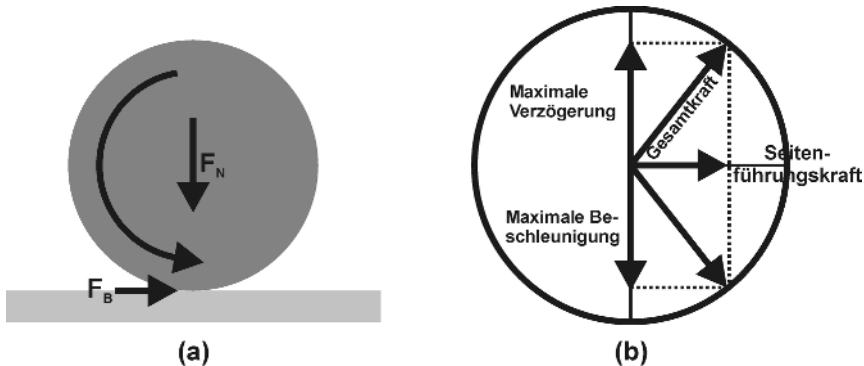


Abbildung 1.11: Die Reibungskraft bei einem Rad (a) und der kammische Reibkreis (b)

Zunächst erkläre ich Ihnen anhand von Abbildung 1.11 die für das Bremsen relevanten Größen und deren physikalische Zusammenhänge:

- ✓ Die Bremskraft F_B , die ein Rad bestenfalls auf die Straße übertragen kann, hängt vom *Haftreibungskoeffizienten* (oder *Reibwert*) μ_R ab:

$$F_B = \mu_R \cdot F_N = \mu_R \cdot m \cdot g$$

Dabei ist F_N die sogenannte *Normalkraft*. Sie wirkt nach unten und entspricht der auf die vier Räder verteilten Gewichtskraft des Fahrzeugs. Der Reibwert hängt stark vom Untergrund und den Witterungsbedingungen ab. Bei trockenem Asphalt liegt er knapp unter eins. Wenn Sie zu stark bremsen, wird dieser Grenzwert überschritten. In der Folge blockieren die Räder und das Auto beginnt zu rutschen.



Beim Rutschen wirkt nur noch die *Gleitreibung*, die deutlich geringer ist als die Haftreibung.

- ✓ Die maximal übertragbare Kraft müssen Sie in zwei Komponenten aufteilen: Die Kraft in Längsrichtung dient dem Beschleunigen oder Bremsen und die *Seitenführungskraft* verhindert, dass Ihr Auto nach rechts oder links ausbricht.

Die beiden Kräfte sind im *kammischen Reibkreis* in Abbildung 1.11 b dargestellt. Je mehr Seitenführungskraft Sie benötigen, um nicht auszubrechen, desto weniger Kraft steht

Ihnen zum Bremsen zur Verfügung. Stecken Sie umgekehrt die gesamte Radkraft in die Bremsung, können Sie nicht mehr gegensteuern und das Auto bricht seitlich aus.

- ✓ Als *Schlupf* bezeichnet der Physiker den Geschwindigkeitsunterschied zwischen Rad und Fahrzeug. Wenn sich ein Fahrzeug beim Bremsen um 1 m fortbewegt, das Rad aber nur 80 cm rollt, beträgt der Schlupf 20 %. Für einen optimalen Bremsvorgang mit maximaler Bremskraft sollte der Schlupf 10 bis 25 % betragen. Steigt der Schlupf höher, nimmt die Bremskraft stetig ab, bis das Rad blockiert.
- ✓ Blockiert das Rad, beträgt der Schlupf 100 %. Das Fahrzeug wird jetzt nur noch über die Gleitreibung abgebremst, die deutlich kleiner als die Haftreibung ist.

Ein elektronisches Antiblockiersystem kennt all diese physikalischen Zusammenhänge und verhilft Ihnen immer zur bestmöglichen Bremsung. Dabei wird der Bremsdruck aller vier Räder individuell geregelt. Über Sensoren bestimmt das ABS den Schlupf jedes Rades und optimiert den Bremsdruck der einzelnen Räder. Zeitgleich sorgt es dafür, dass Ihnen ausreichend Kraft zum Gegenlenken übrig bleibt.

Das ABS spielt seine Stärken am allerbesten aus, wenn die beiden Reifenpaare eines Autos auf Straßenbelag mit unterschiedlichen Reibungskoeffizienten fahren. In Abbildung 1.12 ist zum Beispiel der Fall dargestellt, dass eine Hälfte der Fahrbahn nass, die andere aber trocken ist. Auf der trockenen Hälfte ist der Reibungskoeffizient μ größer als auf der feuchten, sodass der Bremseffekt auf der einen Seite des Autos größer ist als auf der anderen. Das dabei entstehende Drehmoment führt dazu, dass das Auto zur Seite abdriftet. Das ABS erkennt die Gefahr jedoch in Sekundenschnelle und sorgt dafür, dass der Bremsdruck auf der griffigen Seite nicht so schnell ansteigt wie auf der glatteren. Sie als Fahrer bekommen so Zeit zum Gegenlenken geschenkt. Beachten Sie aber: Dadurch verlängert sich auch Ihr Bremsweg!

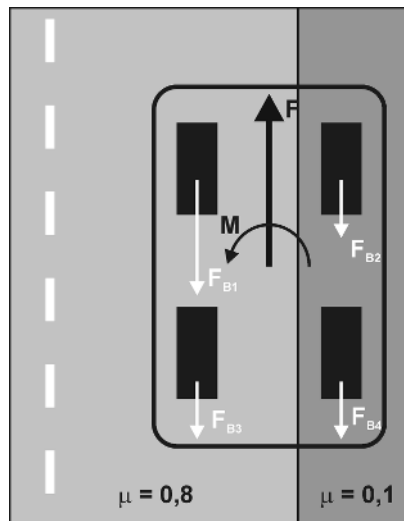


Abbildung 1.12: Wirkungsweise des ABS bei Untergründen mit verschiedenen Reibungskoeffizienten μ

Warum das Auto in den Main fuhr: Das GPS

Neulich endete eine Meldung in den hr-Nachrichten mit den Worten: »Warum das Auto in den Main fuhr, ist noch unklar.« Anschließend kommentierte die Moderatorin: »Ist doch klar: Das Navi hat es gesagt.«

Navigationsgeräte, kurz Navi genannt, haben den Beifahrern dieser Welt die lästige Aufgabe des Kartenlesens abgenommen. Das Navigationssystem »Global Positioning System« oder kurz GPS wurde vom US-Militär entwickelt, im Jahre 1995 installiert und wird auch heute noch von ihm betrieben. Seit 2000 darf es auch in vollem Umfang von Zivilpersonen genutzt werden. Davor war das Signal für die zivile Nutzung künstlich verschlechtert worden.

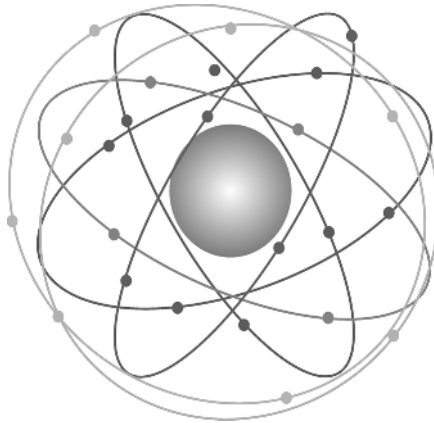


Abbildung 1.13: Die 24 Satelliten des GPS-Systems umkreisen die Erde.

Das GPS besteht aus 24 Satelliten, deren Bahnen sehr kompliziert aufeinander abgestimmt sind (siehe Abbildung 1.13):

- ✓ Je vier Satelliten bewegen sich auf einer Umlaufbahn.
- ✓ Alle Umlaufbahnen sind gegenüber der Äquatorebene um 55° geneigt.
- ✓ Die Bahnen sind um je 60° gegeneinander versetzt.
- ✓ Die Bahnen sind grundsätzlich elliptisch, aber nahezu kreisförmig. Die Satelliten fliegen in einer Höhe von etwa 20.200 km. Sie sind nicht geostationär (also an einem festen Ort bezüglich der Erdoberfläche), sondern umkreisen die Erde etwa einmal pro Tag.

Dank dieser Anordnung stehen Ihnen zu jedem Zeitpunkt an jedem Punkt der Erdoberfläche mindestens vier Satelliten in brauchbarer Höhe zur Verfügung!

Jeder dieser Satelliten sendet im Radiofrequenzbereich fortwährend ein Datenpaket aus, das seine Nummer, seine gegenwärtige Position sowie die aktuelle Uhrzeit beinhaltet. Ein GPS-Empfangsgerät bestimmt zunächst die Ankunftszeit der ankommenden Signale. Anschließend ermittelt es deren Laufzeit (die zwischen 0,067 und 0,086 s liegt) und bestimmt daraus seine Entfernung zum jeweiligen Satelliten.

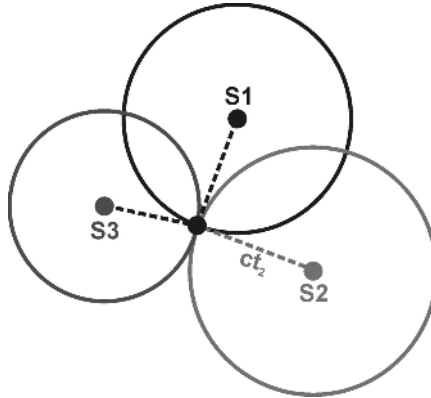


Abbildung 1.14: Positionsbestimmung im zweidimensionalen Fall

In Abbildung 1.14 habe ich den zweidimensionalen Fall für Sie aufgezeichnet. Kennen Sie die Position eines der Satelliten und seine Entfernung, so müssen Sie sich auf einem Kreis um den Satelliten mit dem Radius ct befinden (c ist die Lichtgeschwindigkeit). Dieselbe Rechnung können Sie für einen zweiten Satelliten durchführen. Danach wissen Sie, dass Sie sich auf einem der beiden Schnittpunkte der Kreise befinden müssen! Einer der Schnittpunkte ist zu meist geografisch sinnlos und kann ausgeschlossen werden. Mithilfe eines dritten Satelliten können Sie dann noch Ihre aktuelle Position bestätigen. Im zweidimensionalen Fall reichen also im Prinzip zwei Signalquellen.

In drei Dimensionen benötigen Sie entsprechend drei Satelliten. In der Praxis zeigt sich jedoch, dass Sie für eine präzise Ortsbestimmung vier Satellitensignale benötigen. Sie können sich sicher denken, dass dieses Verfahren kritisch von den Zeitmessungen abhängt! Die Satelliten sind dabei völlig unproblematisch: Sie haben Atomuhren an Bord, die ständig von der Erde aus kontrolliert und geregelt werden. Häufig gehen aber die Uhren in den GPS-Empfängern nicht genau genug oder stimmen nicht mit den Satellitenuhren überein. Diese Unsicherheit wird durch das Signal des vierten Satelliten ausgegült.



Mit GPS können Sie Ihre laterale Position mit einer Genauigkeit von etwa 10 m bestimmen.

Auf GPS beruhende Navigationssysteme sind natürlich nicht auf das Auto beschränkt. Sie können sie auch zum Wandern, Radfahren oder Geocaching verwenden! Auch im Schiffsverkehr (und natürlich im militärischen Bereich) spielen Navigationssysteme eine zentrale Rolle.

Windschnittige Karossen: Der c_W -Wert

Bewegt sich ein Körper in einem Medium, so tritt zwischen ihm und dem Medium eine Reibungskraft auf. Bei Bewegungen in Luft spricht der Physiker vom *Luftwiderstand*. Der Luftwiderstand F_L ist eine Kraft, die sich der Bewegung des Körpers widersetzt. Die mathematische Formel lautet:

$$F_L = \frac{1}{2} c_W \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A$$

Die einzelnen Größen dieser Formel sind wie folgt definiert:

- ✓ A ist die Fläche des Körpers. Es leuchtet Ihnen sicher ein, dass der Luftwiderstand umso größer ist, je größer die im Wind stehende Fläche ist.
- ✓ ρ ist die *Dichte* des Mediums, durch das sich der Körper bewegt (also üblicherweise Luft). Die Dichte der Luft beträgt bei Normalbedingungen $1,293 \text{ kg/m}^3$.
- ✓ v ist die Geschwindigkeit des Körpers. Der Luftwiderstand wächst also mit steigender Geschwindigkeit. Radfahrer kennen dies aus eigener Erfahrung: Je schneller Sie fahren, desto stärker kommt der Wind von vorn. Haben Sie zudem bemerkt, dass die Geschwindigkeit quadratisch in die Formel eingeht? Wenn Sie also doppelt so schnell fahren, vervierfacht sich der Luftwiderstand!
- ✓ Die Größe c_W hat den einprägsamen Namen *Luftwiderstandsbeiwert* oder kurz c_W -Wert. Dieser Faktor berücksichtigt die Form des Körpers. Sie können sich ganz generell merken, dass der c_W -Wert umso geringer ist, je leichter die Luft den Körper umfließen kann.

In Abbildung 1.15 können Sie die c_W -Werte einiger regelmäßig geformter Körper ablesen. Erwartungsgemäß »gewinnt« der stromlinienförmige Körper mit deutlichem Abstand. In Tabelle 1.1 habe ich für Sie die Werte einiger wichtiger Fahrzeugtypen zusammengestellt. Denken Sie aber daran, dass dies nur grobe Anhaltswerte sind! Die Automobilindustrie bringt ständig neue Modelle mit immer geringeren c_W -Werten auf den Markt ...









Kugel	Halbkugel	Kegel	Würfel
			
0,47	0,42	0,52	1,05
Schräger Würfel	Langer Zylinder	Kurzer Zylinder	Stromlinienkörper
			
0,80	0,82	1,15	0,04

Abbildung 1.15: Die c_W -Werte einiger regelmäßig geformter Körper

Fahrzeug	Sportwagen	Pkw	SUV	Lieferwagen
c_W -Wert	0,22	0,3	0,36	0,42
Fahrzeug	Lastwagen	Bus	Sattelschlepper	Formel-1-Auto
c_W -Wert	0,56	0,66	0,71	1,2

Tabelle 1.1: Typische c_W -Werte für Fahrzeuge

Bei zwei Einträgen in der Tabelle sind Sie vielleicht stutzig geworden:

- ✓ SUVs haben einen nur geringfügig höheren c_W -Wert als normale Pkws. Dabei werden diese Geländewagen doch immer als »Benzinschlucker« bezeichnet! Sie müssen jedoch bedenken, dass in den c_W -Wert nur die Form eines Körpers eingeht, der letztlich Luftwiderstand aber auch von der Querschnittsfläche abhängt:

$$F_L \propto c_W \cdot A$$

Die Querschnittsfläche eines SUV ist wesentlich größer als die eines normalen Pkws. Der hohe Benzinverbrauch eines SUV beruht also vor allem auf dessen großer Querschnittsfläche.

- ✓ Intuitiv würden Sie doch erwarten, dass Formel-1-Autos einen besonders geringen c_W -Wert aufweisen, oder? Aus Tabelle 1.1 geht hervor, dass das genaue Gegenteil der Fall ist! Der Grund dafür ist relativ einfach: Der Motor eines Formel-1-Boliden ist so leistungstark, dass es überhaupt kein Problem ist, hohe Geschwindigkeiten zu erreichen. Auch der Benzinverbrauch spielt keine Rolle, da er ohnehin unwahrscheinlich hoch ist. Für Formel-1-Autos ist hingegen extrem wichtig, dass sie eine optimale Bodenhaftung haben (insbesondere in den Kurven). Dafür sind an einem Formel-1-Auto allerlei raffinierte Flügel, Ablenkbleche und andere Vorrichtungen angebracht, die den Luftstrom um das Auto beeinflussen. Dies führt zu dem extrem schlechten c_W -Wert ...

Der c_W -Wert eines Autos wird üblicherweise in einem Windkanal ermittelt. Dabei steht es auf einer Platte, die mit Kraftsensoren versehen ist. Aus den gemessenen Kräften und der Anströmungsgeschwindigkeit der Luft kann der c_W -Wert berechnet werden.



Abbildung 1.16: Ein Auto in einem Windkanal. Die Rauchstreifen dienen zur Verdeutlichung des Strömungsverlaufs, nicht zur Messung des c_W -Werts

Erwischt: Die Radarfalle

Die allermeisten Autofahrer fürchten sich vor Radarkontrollen der Polizei. Dafür gibt es aber eigentlich überhaupt keinen Grund! Mein Tipp: Halten Sie sich einfach an die geltenden Geschwindigkeitsbegrenzungen ...

Die *Radarkontrolle* ist das am häufigsten eingesetzte Verfahren zur Ermittlung von Geschwindigkeitsübertretungen. *RADAR* steht für »Radio Detection and Ranging« (auf Deutsch »Funkortung und -abstandsmessung«). Dieses Verfahren wurde in den 1930er-Jahren in England zur Ortung von Flugzeugen entwickelt. Bei der Geschwindigkeitskontrolle setzt die Polizei Radiowellen mit einer Frequenz von etwa 24 GHz ein (siehe Kapitel 11). Da sich diese elektromagnetischen Wellen mit der ungeheuer großen Lichtgeschwindigkeit ausbreiten, können Sie angesichts der verhältnismäßig kleinen Abstände unmöglich eine direkte Laufzeitmessung durchführen.

Stattdessen können Sie sich aber einen Effekt zunutze machen, der zum ersten Mal 1842 von dem österreichischen Physiker Christian Doppler beschrieben wurde: der *Dopplereffekt*. Obwohl sich Herr Doppler bei seinen Experimenten auf Schallwellen beschränkt hatte, tritt der von ihm gefundene Effekt bei jeder Art von Wellen auf, also auch bei elektromagnetischen Wellen wie Radiowellen.

Sie kennen den Dopplereffekt ganz sicher aus Ihrem Alltag. Ein Beispiel: Sie müssen an einer geschlossenen Bahnschranke warten. Sie hören den Zug kommen, das Geräusch wird immer lauter und schließlich rauscht der Zug an Ihnen vorbei. Genau in diesem Moment ändert sich das Geräusch plötzlich – der Ton wird tiefer. Der Dopplereffekt hat zugeschlagen! Die wahrgenommene Frequenz einer Welle hängt nämlich davon ab, ob die Quelle und der Beobachter in Ruhe sind oder sich gegeneinander bewegen.



Bei Schallwellen ist die Situation noch komplizierter: Die wahrgenommene Frequenz hängt auch davon ab, ob sich die Quelle oder aber der Beobachter bewegt. Bei Radiowellen spielt es hingegen keine Rolle, ob sich die Quelle oder der Beobachter oder gar beide bewegen. Entscheidend ist hier allein die Relativgeschwindigkeit.

Dieser Dopplereffekt tritt auch bei den für die Radarkontrollen verwendeten Radiowellen auf. In Abbildung 1.17 sehen Sie ein stehendes Polizeiauto, das eine Radiowelle in Richtung eines näher kommenden Autos schießt. Die Welle wird am Auto reflektiert und läuft dann zum Polizeiauto zurück. Die beim Polizeiauto eintreffende Welle ist gleich zweifach dopplerverschoben. Die erste Verschiebung geschieht beim Auftreffen auf das fahrende Auto, die zweite



Abbildung 1.17: Das Prinzip einer Radar-Geschwindigkeitskontrolle

bei der Beobachtung im Polizeiwagen (entscheidend sind die relativen Bewegungen). Insgesamt gilt für die beobachtete Frequenzverschiebung:

$$\frac{\Delta f}{f_0} = 2 \cdot \frac{v}{c}$$

Dabei ist f_0 die Grundfrequenz der Radiowelle, v die Relativgeschwindigkeit und c die Lichtgeschwindigkeit. Nach Messung der Frequenz des reflektierten Signals kann die Polizei ganz einfach die Geschwindigkeit Ihres Autos berechnen!



Fährt das Auto auf den Polizeiwagen zu, so vergrößert sich die Frequenz der Radiowelle, ihre Wellenlänge wird also kleiner.

Neben Radarkontrollen setzt die Polizei übrigens noch zwei weitere Verfahren zur Geschwindigkeitsbestimmung im Straßenverkehr ein:

- ✓ Am genauesten sind Lichtschrankenmessungen. Dabei wird die Zeit ermittelt, die ein Auto braucht, um die Strecke zwischen zwei Lichtschranken zurückzulegen. Zur Kontrolle wird meist noch eine dritte Lichtschranke eingesetzt.
- ✓ Bei Lasermessungen (mit Laserpistolen) wird der Laufzeitunterschied für zwei zeitlich aufeinanderfolgende Lasersignale ermittelt. Daraus kann man auf die Geschwindigkeit zurückschließen.

