

Thomas Gänsicke, Martin Goede und Julian Sandiano

Das Gewicht und dessen Verteilung im Fahrzeug sind wichtige Faktoren hinsichtlich Fahrverhalten und Verbrauch. Diese Einflüsse wirken sich besonders in Bezug auf die Agilität des Fahrzeugs, ebenso auf die Sicherheit wie auf die Zuladung und die Gesamtenergiebilanz aus. In diesem Kapitel wird zunächst auf die Fahrwiderstände eingegangen und die Frage, welchen Einfluss die Gewichtsreduktion auf diese hat. Ein weiterer Aspekt sind die verschiedenen Fahrzyklen sowie der reale Gebrauch eines Fahrzeugs durch den Kunden. Folgend werden die positiven und negativen Eigenschaften eines leichteren Fahrzeugs bezüglich Fahrdynamik dargestellt. Die Betrachtung und Umkehr der Gewichtsspirale schließen das Kapitel ab.

---

### 2.1 Fahrwiderstände

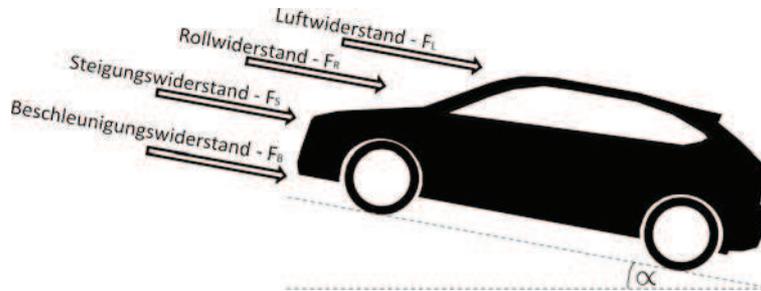
Ein fahrendes Fahrzeug muss verschiedene Widerstände überwinden, um eine bestimmte Geschwindigkeit zu erreichen bzw. diese zu überwinden oder zu halten. Diese Widerstände sind Luft-, Roll-, Steigungs- und Beschleunigungswiderstand. Die einzelnen Widerstände sind wie folgt definiert (Abb. 2.1)

---

T. Gänsicke (✉), J. Sandiano  
Ostfalia-Hochschule für angewandte Wissenschaft, Wolfenbüttel, Deutschland  
E-Mail: [th.gaensicke@ostfalia.de](mailto:th.gaensicke@ostfalia.de)

M. Goede  
Technologieplanung und -entwicklung, Volkswagen AG, Wolfsburg, Deutschland

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2017  
H.E. Friedrich (Hrsg.), *Leichtbau in der Fahrzeugtechnik*,  
ATZ/MTZ-Fachbuch, DOI 10.1007/978-3-658-12295-9\_2



**Abb. 2.1** Darstellung von Widerstandsvektoren

$$\begin{aligned}
 \text{Luftwiderstandskraft:} & \quad F_L = \frac{\rho}{2} \cdot v^2 \cdot c_w \cdot A \\
 \text{Rollwiderstandskraft:} & \quad F_R = f_r \cdot m \cdot g \cdot \cos(\alpha) \\
 \text{Steigungswiderstandskraft:} & \quad F_S = m \cdot g \cdot \sin(\alpha) \\
 \text{Beschleunigungswiderstandskraft:} & \quad F_B = \lambda \cdot m \cdot a
 \end{aligned}$$

Anhand dieser Definitionen lässt sich der gesamte Widerstand ermitteln:

$$F_{ges} = F_L + F_R + F_S + F_B$$

Die benötigte Leistung ist abhängig von der Fahrgeschwindigkeit:

$$P_{ges} = (F_L + F_R + F_S + F_B) \cdot v$$

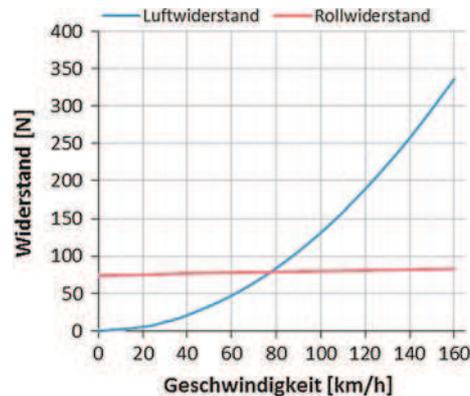
Diese äußeren Widerstände werden mit dem Antriebswirkungsgrad zur Berechnung der Bedarfsleistung eines Fahrzeugs genutzt. Für eine genauere Betrachtung sind die inneren Widerstände und Energien für Hilfsaggregate zu untersuchen.

Der Bordnetzenergiebedarf und die dafür benötigte Arbeit des Generators erhöhen den Verbrauch, ebenso wie weitere mechanische Verbraucher, z. B. Klimaanlage, Servolenkung etc. Nicht zu vernachlässigen sind die inneren Widerstände wie sie z. B. durch Reibung an Lagern entstehen. Das Fahrzeuggewicht hat keinen Einfluss auf die verbrauchserhöhenden Energieumwandlungen des Bordnetzverbrauchs und der dafür benötigten Arbeit des Generators. Der Verbrauch von z. B. Wasser- und Ölpumpen ist unabhängig von der Fahrzeugmasse. Die inneren Widerstände des Verbrennungsmotors oder des Elektromotors werden mithilfe von Wirkungsgraden beschrieben. Jedoch hat das Fahrzeuggewicht einen Einfluss auf den Energieverbrauch der Servolenkung.

Aus der vereinfachten Betrachtung des Gesamtwiderstands wird deutlich, dass das Fahrzeuggewicht großen Einfluss hat. Die Fahrzeugmasse ist in drei von vier Widerstandstermen vorhanden.

$$F_{ges} = \frac{\rho}{2} \cdot v^2 \cdot c_w \cdot A + f_r \cdot m \cdot g \cdot \cos(\alpha) + m \cdot g \cdot \sin(\alpha) + \lambda \cdot m \cdot a$$

**Abb. 2.2** Darstellung des Luft- und Rollwiderstand für den VW XL1



Dementsprechend ist der Zusammenhang zwischen benötigter Leistung und der Masse:

$$P_{ges} = \frac{\rho}{2} \cdot v^3 \cdot c_w \cdot A + f_r \cdot m \cdot g \cdot \cos(\alpha) \cdot v + m \cdot g \cdot \sin(\alpha) \cdot v + \lambda \cdot m \cdot a \cdot v$$

Somit sind Fahrzeuggeschwindigkeit und Masse die größten Einflussfaktoren dieser Berechnung. In Abb. 2.2 sind Luft- und Rollwiderstand bezogen auf die Fahrzeuggeschwindigkeit für ein Leichtbaufahrzeug dargestellt.

Aus dieser Abbildung wird deutlich, dass für dieses Auto (VW XL1) ab einer Geschwindigkeit von 77 km/h der Luftwiderstand überwiegt. Beim Fahren auf der Autobahn oder Landstraße hat der Luftwiderstand den größten Einfluss auf den Verbrauch. Für Fahrsituationen in der Stadt ist das Fahrzeuggewicht ausschlaggebend, entsprechend der Definition zur isoenergetischen Geschwindigkeit  $V^*$  ohne Beschleunigung in der Ebene ( $\cos(\alpha) = 1$ ):

$$V^* = \sqrt{\frac{2 \cdot f_r \cdot m \cdot g}{c_w \cdot A \cdot \rho}}$$

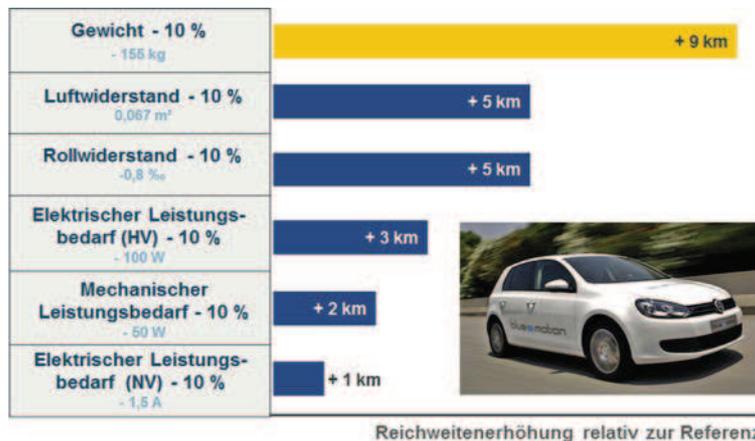
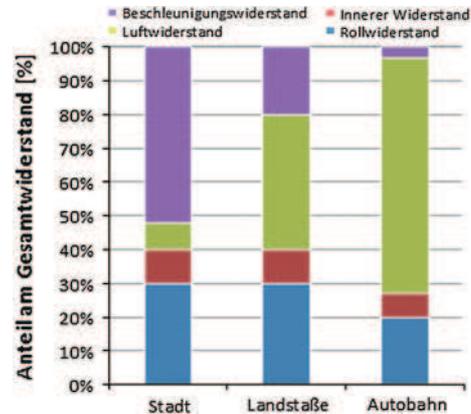
In Abb. 2.3 ist der prozentuelle Bestandteil der einzelnen Fahrwiderstände in Bezug auf verschiedene Fahrsituationen aufgetragen.

Werden nun die massenbedingten Fahrwiderstände addiert, so ergeben dafür folgende Anteile für die einzelnen Situationen: etwa 92 % der Widerstände während einer Stadtfahrt sind massenbedingt, bei Landstraßenfahrt sind es ca. 55 % und auf der Autobahnfahrt nur ca. 30 %.

Diese Zusammenhänge sind sowohl für Fahrzeuge mit konventionellen Antriebskonzepten als auch mit alternativen Antrieben gleichermaßen relevant. Am Beispiel des E-Golfs sind in Abb. 2.4 die unterschiedlichen Einflüsse der Widerstände und Leistungsbedarfe bezogen auf die Reichweite dargestellt.

Zur Ermittlung des Kraftstoffverbrauchs und der Abgaszusammensetzung, z. B. der  $\text{CO}_2$ - sowie der  $\text{NO}_x$ -Emissionen werden Fahrzeuge anhand verschiedener Fahrzyklen getestet, z. B. in Europa der MNEFZ (Modifizierter Neuer Europäischer Fahrzyklus), in den USA der FTP75- und in Japan der JC08-Zyklus.

**Abb. 2.3** Prozentueller Anteil der Fahrwiderstände für versch. Fahrsituationen

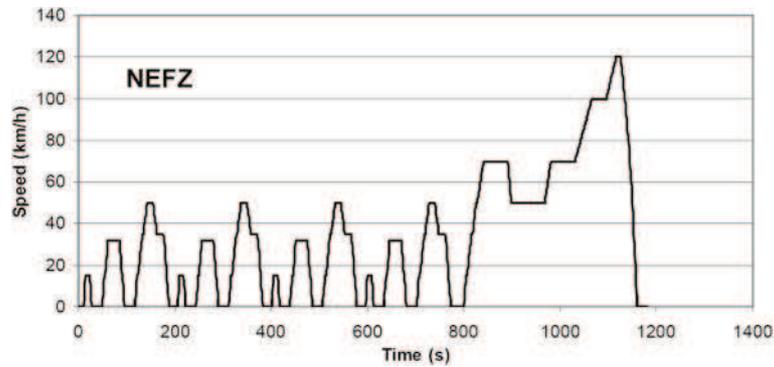


**Abb. 2.4** Reichweitenerhöhung bei Reduzierung der Widerstände bzw. Leistungsbedarfe

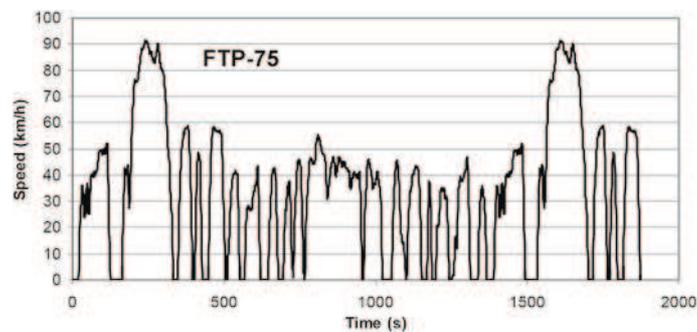
Der MNEFZ ist ein synthetischer Fahrzyklus mit fest definierten Schaltpunkten. Er besteht aus innerstädtischen und außerstädtischen Bereichen, hat eine Zykluslänge von 11 km, eine Maximalgeschwindigkeit von 120 km/h und eine Durchschnittsgeschwindigkeit von 33,6 km/h (Abb. 2.5).

Der FTP 75 soll einen typischen Geschwindigkeitsverlauf im Berufsverkehr von Los Angeles darstellen. Der Aufbau des Zyklus besteht aus drei Phasen (Motor kalt, Stabilisierung und Motor warm) mit einer Pause. Die Zykluslänge beträgt 17,87 km bei einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 34,1 km/h und einer Maximalgeschwindigkeit von 91,2 km/h (Abb. 2.6).

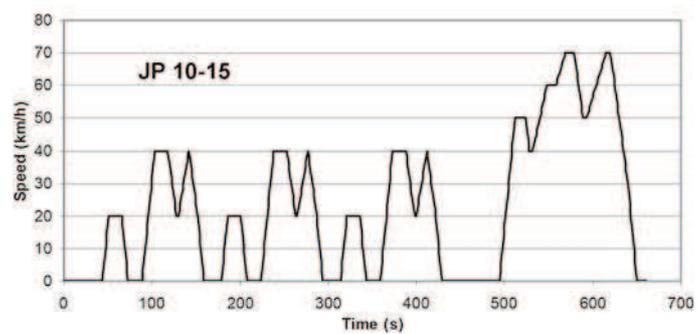
Der japanische Fahrzyklus JP 10-15 (Abb. 2.7) ist ein synthetischer Zyklus, ähnlich wie der NEFZ bestehend aus verschiedenen Phasen, zunächst drei Stadtzyklen (JP 10) und anschließend eine außerorts Phase (JP 15). Dieser Test erfolgt über eine Zykluslänge von 4,16 km und weist eine Maximalgeschwindigkeit von 70 km/h auf. Die Durchschnittsgeschwindigkeit beträgt 30,73 km/h.



**Abb. 2.5** Darstellung des NEFZ. *Quelle* [1]



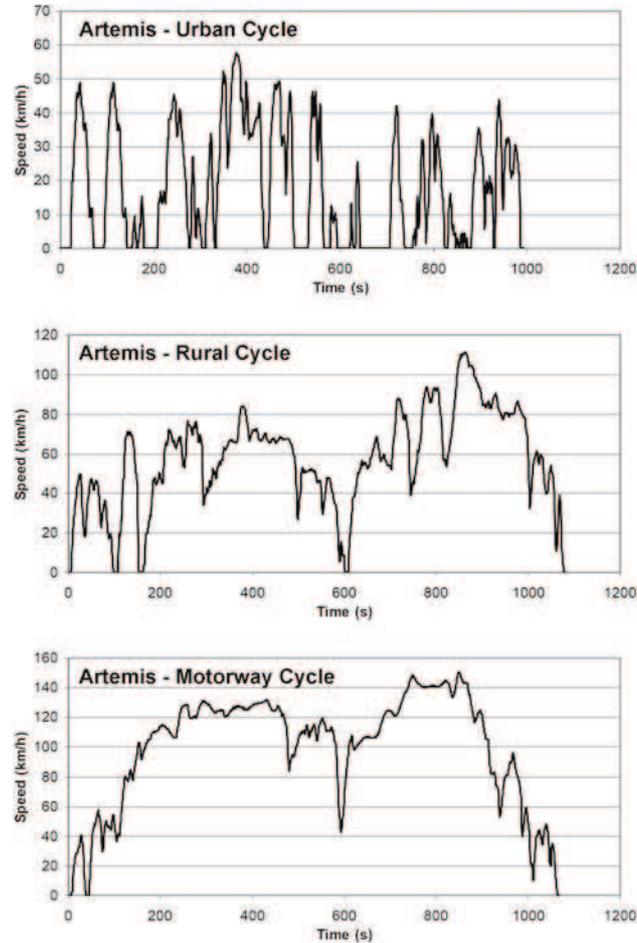
**Abb. 2.6** Darstellung des FTP 75. *Quelle* [1]



**Abb. 2.7** Darstellung des JP 10-15. *Quelle* [1]

Ein weiterer Fahrzyklus ist der ARTEMIS (Assessment and Reliability of Transport Emission Models and Inventory Systems). Dieser Zyklus existiert in drei Varianten: Stadt-, Überland- sowie Autobahnfahrt und soll ein realistisches Fahrprofil in Europa darstellen. Der ARTEMIS-Zyklus entstand im Rahmen eines EU-Projekts, er ist jedoch zurzeit nicht verbindlich. Je nach zu untersuchenden Fahrsituationen kann einer der drei Fahrprofile

**Abb. 2.8** Artemis Fahrzyklen  
[1]



(Abb. 2.8 oben: Stadtzyklus, mitte: Landstraße, unten: Autobahnfahrt) herangezogen werden.

Diese Fahrzyklen lassen sich nicht nur in Hinblick auf Verbrauch und Emissionen auswerten, sondern auch hinsichtlich der Auswirkungen des Leichtbaus untersuchen. Ein leichteres Fahrzeug hat einen geringeren Roll-, Steigungs- und Beschleunigungswiderstand und dadurch einen niedrigeren Verbrauch und geringere Emissionen.

Die als Beispiel aufgeführten Fahrzyklen sind durch häufiges Anfahren und Abbremsen geprägt. Dieses Verhalten soll eine Fahrt in der Stadt simulieren und die Fahrgeschwindigkeit solches Stadtfahrens übersteigt selten 50 km/h, somit ist der Luftwiderstand nicht ausschlaggebend. Die Masse eines Fahrzeugs bleibt somit in Bezug auf alle Zyklen das wichtigste Kriterium.

Die Unterschiede der genannten Fahrprofile und der Gewichtseinfluss auf den Verbrauch wurde in [2] für die Fahrzustände:

- Konstantfahrt
- NEFZ
- NEFZ modifiziert für höhere Dynamik (NEFZ, dyn.)
- Extreme Autobahnfahrt (BAB, dyn.)
- NEFZ mit angepasster Übersetzung ( $i$  angepasst NEFZ)
- NEFZ mit angepasstem Hubraum ( $v_h$  angepasst NEFZ)

am Beispiel eines Golf 1,4 l – 90 kW untersucht und ausführlich verglichen. Der Mehr- oder Minderverbrauch in l/100 km für eine Gewichtsveränderung von 100 kg beläuft sich demzufolge für einen Ottomotor auf 0,07 für Konstantfahrt bis 0,31 bei der dynamischen Autobahnfahrt (Abb. 2.9). Von elementarer Bedeutung ist jedoch die Anpassung der Aggregate im Sinne des Gesamtfahrzeugkonzepts: nur so lassen sich höhere Verbrauchs- (und CO<sub>2</sub>-) Einsparungen erreichen, da sie die Nutzung sekundärer Verbrauchseffekte durch Anpassung der Übersetzung oder des Hubraums für gleiche Fahrleistung erlauben. Im oben genannten Beispiel steigen die Werte auf 0,32 bei angepasstem Getriebe bzw. auf 0,39 bei angepasstem Hubraum. Bei einer vergleichbaren Diesel-Motorisierung liegen die Werte bei 0,29 bzw. 0,26 l/100 km (Abb. 2.9).

Der zentrale Parameter im automobilen Leichtbau ist somit der sogenannte Differenzverbrauchs faktor, engl. Fuel Reduction Value (FRV). Diese Kennzahl sagt aus, um wie viel der Verbrauch eines Pkws sinkt, wenn das Fahrzeuggewicht um 100 kg reduziert wird. Im NEFZ beträgt dieser Wert für Ottomotoren ca. 0,15 l/(100 km · 100 kg) und für Dieselfahrzeuge ca. 0,12 l/(100 km · 100 kg). Bei Anpassung des Antriebsstrangs (Hubraumreduzierung und/oder Getriebeverlängerung bei gleichbleibenden Fahrleistungen) erhöht sich der Einspareffekt deutlich auf rund 0,35 bzw. 0,28 l/(100 km · 100 kg) [3]. Vergleicht man ein Referenzbauteil mit einer Leichtbauvariante, welche die gleiche Funktion und Qualität bei gleichzeitig reduziertem Bauteilgewicht aufweist, so ergibt sich die gewichtsinduzierte Kraftstoffeinsparung.

$$C_{\text{comp},i} = (m_{\text{comp},i} - m_{\text{comp,ref}}) \cdot V_{100\text{kg,NEFC}} \cdot 0,01$$

$C_{\text{comp},i}$ : gewichtsbedingte Kraftstoffeinsparung von Bauteilvariante  $i$  [l/100 km]

$m_{\text{comp},i}$ : Gewicht der Bauteilvariante  $i$  [kg]

$m_{\text{comp,ref}}$ : Gewicht des Referenzbauteils [kg]

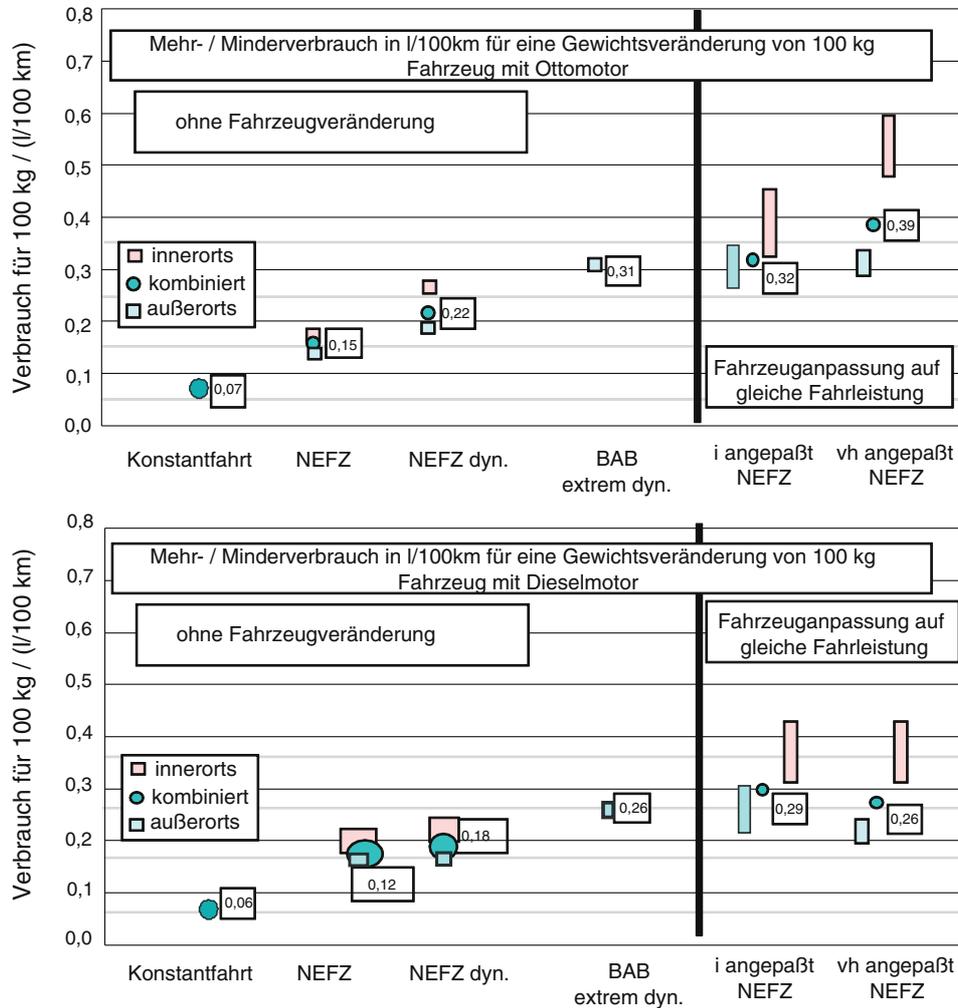
$V_{100\text{kg,NEFC}}$ : Fuel Reduction Value [l/(100 km · 100 kg)]

$$C_{\text{veh},j} = C_{\text{veh,ref}} + \sum_{i=1}^n C_{\text{comp},i}$$

$C_{\text{veh},j}$ : Kraftstoffverbrauch von Fahrzeugkonzept  $j$  [l/100 km]

$C_{\text{veh,ref}}$ : Kraftstoffverbrauch von Referenzfahrzeug [l/100 km]

$n$ : Anzahl aller Leichtbaumaßnahmen in Fahrzeugkonzept  $j$



**Abb. 2.9** Differenzverbrauchs-faktoren für eine Gewichtsveränderung von 100 kg für ein Fahrzeug mit Ottomotor (oben) und Dieselmotor (unten) [2]

Da die Abgas- und Emissionsnormen auch in Zukunft höhere Anforderungen an neu zuzulassende Fahrzeuge stellen, ist die Betrachtung von Leichtbau-Auswirkungen wichtig. Fahrzeugleichtbau bewirkt auch Sekundäreffekte wie z. B. einen kleineren, leichteren Motor oder eine weniger leistungsstarke Servolenkung oder angepasste Fahrwerkskomponenten.

Des Weiteren kann durch ein geringeres Gewicht ein besserer CO<sub>2</sub>-Footprint erzeugt werden. Er resultiert aus den Energieeinsparungen im Betrieb, in der Herstellung und beim Recycling. Durch geringeren Materialeinsatz kann CO<sub>2</sub> bei der Herstellung und im end-of-life gespart werden, jedoch sind die Fertigungsmethoden des Leichtbaus nicht außer Acht zu lassen. Diese benötigen unter Umständen einen hohen Energieaufwand.

Fahrzyklen sind gut geeignet, um reproduzierbare Messergebnisse zu erzielen, spiegeln jedoch keine realen Fahrprofile von Kunden wieder. Das Fahrprofil eines Fahrers ist stark abhängig von äußeren Einflüssen wie z. B. Wetter, Sicht, Verkehrslage, Straßenzustand, Stimmungslage etc. Ein weiterer wichtiger Einfluss ist der Einsatzort bzw. das Nutzungsprofil des Fahrzeugs. Das Fahrverhalten in Megacities wie Tokio oder Shanghai wird anders geprägt sein als das auf den Highways der USA.

Das persönliche Fahrprofil des Kunden hat große Auswirkungen auf den Verbrauch des Fahrzeugs. Durch frühzeitiges Hochschalten sowie vorausschauendes Fahren kann der Verbrauch minimiert werden. Der Beladungszustand wirkt sich durch die steigende Gesamtmasse ebenfalls auf die verbrauchte Kraftstoffmenge aus.

Um trotz aller äußeren Randbedingungen einen attraktiv niedrigen Verbrauch zu garantieren, muss das Fahrzeug selbst für den jeweiligen Einsatz optimiert werden, z. B. durch eine sehr leichte Karosserie für ein Stadtfahrzeug.

## 2.2 Einfluss der Gewichtsreduzierung auf die Fahrdynamik

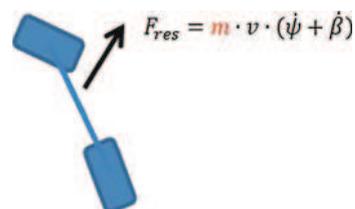
Die Gewichtsminimierung wirkt sich auf das ganze Fahrzeug aus, das heißt, nicht nur auf die Fahrwiderstände und den Verbrauch sondern auch auf das Fahrverhalten. Die Masse eines Fahrzeugs und dessen Verteilung spielt eine große Rolle in Bezug auf Beschleunigung, Kurvenlage sowie Bremsverhalten. Hierbei handelt es sich jedoch nicht immer um positive Auswirkungen.

Leichtbau sollte dort betrieben werden, wo es nötig und sinnvoll ist, denn die Schwerpunktlage hat einen direkten Einfluss auf das Fahrverhalten. Fahrzeuge werden mit einem möglichst tiefen Schwerpunkt ausgelegt. Durch tief liegende Kraftpfade und Versteifungen lässt sich die Schwerpunktlage senken und ein besserer Kraftverlauf innerhalb der Struktur erzeugen.

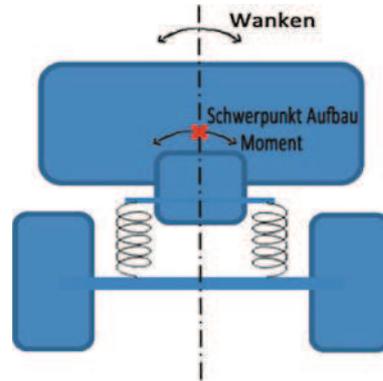
Positive Auswirkungen der Gewichtsreduktion auf das Fahrverhalten sind z. B. eine bessere Agilität. Ein leichteres Fahrzeug hat eine geringere Massenträgheit und dadurch ein besseres Kurvenverhalten. Dies lässt sich anhand des Einspurmodells einfach darstellen (Abb. 2.10).

Je größer die Masse, desto größer ist die resultierende Kraft, die das Fahrzeug zur kurvenäußeren Seite zieht. Bei gleicher Fahrwerksgeometrie neigt ein Fahrzeug mit großer Masse zum Untersteuern, ein leichteres dagegen weniger.

Abb. 2.10 Vereinfachtes Einspurmodell



**Abb. 2.11** Vereinfachtes Modell. Schwerpunkt und Wanken



Das Wankverhalten eines leichteren Fahrzeugs ist aus demselben Grund besser als das eines schwereren. Ein gewichtsreduziertes Fahrzeug weist bessere Beschleunigungswerte und ein geringeres Rollverhalten auf. Um dieses Verhalten zu erläutern, kann ein Fahrzeug mit Hilfe von Feder-Masse-Dämpfer-Systemen dargestellt werden. Die große Masse stellt das Fahrzeug dar, die Feder-Dämpfer-Systeme die Räder samt Aufhängung. Die Masse befindet sich oberhalb der Feder-Dämpfer-Systeme und erzeugt durch ihre Trägheit z. B. Fliehkräfte in Kurven, die ein Moment um die x-Achse bewirken. Die Folge ist ein Wanken des Fahrzeugs. Geringes Wanken gewährleistet einen gleichmäßigen Kraftschluss in den Radaufstandspunkten und ist für ein stabiles Fahrverhalten maßgebend (Abb. 2.11).

Die positiven Effekte einer Massereduzierung sind auch sicherheitsrelevante Aspekte, wie z. B. das Bremsverhalten und die bessere Beherrschbarkeit des Fahrzeugs. Ist die Massenträgheit eines Fahrzeugs gering, so ist auch der Bremsweg kürzer. Durch geringere Gier-, Wank- und Nickmomente ist das leichtere Fahrzeug einfacher zu kontrollieren.

Gewichtsminimierung wirkt sich jedoch im Bereich Seitenwindverhalten, Anpressdruck sowie Kraftschluss negativ aus. Der Einsatz von Leichtbauwerkstoffen oder dünnwandigen Bauteilen kann aber, vor allem im Bereich des Frontends und der Motorhaube, bezüglich des Fußgängerschutzes problematisch werden. Motorhauben sowie Kotflügel aus CFK oder GFK bieten kein ideales Verformungs- oder Versagensverhalten. Sie bremsen den Fußgänger nicht genug ab, sodass dieser in manchen Fällen auf unter der Motorhaube liegende Bauteile aufprallen kann.

Hinsichtlich der Fahrdynamik ist Leichtbau im Dachbereich, in der Front und im Heck zu bevorzugen.

### 2.3 Gewichtsspirale

Die große Anzahl der Anforderungen, die an ein Fahrzeug im Laufe des Entwicklungsprozesses gestellt werden, sind u.U. für ein hohes Fahrzeuggewicht verantwortlich. Vor allem sicherheits- und komfortrelevante Anforderungen bringen große Massen mit sich. Auch das



**Abb. 2.12** Gewichtsspirale in der Fahrzeugentwicklung. *Links* Aufwärtsspirale; *Rechts* Abwärts-spirale durch Einsatz von Leichtbau

Verlangen nach Sportlichkeit und Agilität führt dazu, dass Fahrzeuge in der Regel nicht schwerer werden dürfen.

Der Einsatz verschiedener Leichtbauansätze an punktuellen Problemzonen hilft dabei das Fahrzeug leichter zu machen, löst jedoch nicht das generelle Problem.

Zur besseren Visualisierung der Problematik wird die Gewichtsspirale erläutert. Das Prinzip der Gewichtsspirale besagt, dass durch Anstieg des Gewichtes der Karosserie eines Fahrzeugs aus komfort- und sicherheitstechnischen Aspekten zunächst das Fahrwerk stärker ausgelegt werden muss. Durch die gestiegene Masse der Karosserie und des Fahrwerks muss die Motorisierung angepasst werden. Ein stärkerer Motor ist nun notwendig, um die gleichen Fahreigenschaften realisieren zu können. Durch den stärkeren Motor ist wiederum ein größerer Tank erforderlich. Dies hat eine weitere Gewichtszunahme zur Folge. Die nun schwereren Komponenten müssen von der Karosserie getragen werden, wodurch diese wiederum erneut angepasst werden muss und die Aufwärtsspirale schraubt sich weiter nach oben (Abb. 2.12 links).

Um diese aufwärtsgerichtete Bewegung der Spirale zu durchbrechen, sollten vorrangig und zunächst die Leichtbaupotenziale der Karosserie genutzt werden. Wird das Gewicht der Karosserie verringert, so können Fahrwerk, gesamter Aufbau und kleinere Motorisierung folgen. Durch die kleinere Motorisierung wird mit kleinerem Tank die gleiche Reichweite erzielt. Auf dieser Weise kann die Gewichtsspirale umgekehrt werden und neue Fahrzeuge gewichtsoptimiert entwickelt werden (Abb. 2.12 rechts).

Üblich ist die Erkenntnis, dass der Leichtbau bei der Karosserie beginnen muss und alle anderen Baugruppen nachziehen müssen. Allgemein wird die Möglichkeit, die Baugruppen Fahrwerk und Antrieb leichter gestalten zu können, als Sekundäreffekte bezeichnet. Aber die abwärtsgerichtete Gewichtsspirale ermöglicht viele weitere Einspareffekte. Z. B. können Halterungen, Konsolen und allgemein Kräftepfade leichter ausgeführt werden und ein kleinerer Motor bedingt auch kleinere Hilfsaggregate.

Herstellung und Recycling sind aus leichtbautechnischer Sicht sowohl Potenzial als auch Problemzone. Kann Leichtbau mit weniger Material und gleicher Herstellung durchgeführt werden, so kann auch Energie und CO<sub>2</sub> eingespart werden. Kann durch CFK oder ähnliches Leichtbaumaterial das Gewicht stark reduziert werden, jedoch unter dem Einsatz

von energieaufwendigen Prozessen (Autoklavieren etc.) wird unter Umständen mehr Energie benötigt, als durch den geringen Verbrauch während der Nutzung eingespart wird. In diesen Fällen muss eine genaue Life-Cycle-Analysis bezüglich Kosten und CO<sub>2</sub>-Emission durchgeführt werden (s. Kap. 8).

Ähnlich verhält es sich beim Recycling. Werden übliche oder monostrukturelle Materialien wie z. B. Stahl und Aluminium verwendet, so ist die Wiederverwendung in Sekundenschwefelströmen möglich. Bei Verwendung vieler verschiedener Werkstoffe ist die Trennung aufwendiger oder gar nicht effizient.

Eine positive Energiebilanz zeigt sich in der Gesamtbewertung: wenn für die Herstellung eines Fahrzeugs mehr Energie benötigt wird als für den Vorgänger, der Nachfolger aber im Gebrauch deutlich weniger benötigt, kann die Gesamtbilanz trotz der energieaufwendigeren Herstellung und des Fahrzeugrecyclings (Gutschrift) erfolgreich sein (vgl. Abschn. 8.1).

---

## Literatur

1. Barlow, T.J., Latham, S., McCrae, I.S., Boulter P.G.: A reference book of driving cycles for use in the measurement of road vehicle emissions. Version 3. 06/2009. IHS, Berkshire
2. Rohde-Brandenburger, K., Obernolte, J.: CO<sub>2</sub>-Potenzial durch Leichtbau beim PKW. MP Materials Testing. Wolfsburg, 01-02/2009
3. Krinke, S., Koffler, C., Deinzer, G., Heil, U.: Automobil Leichtbau unter Einbezug des gesamten Lebenszyklus. Automobiltech. Z. 6/2010