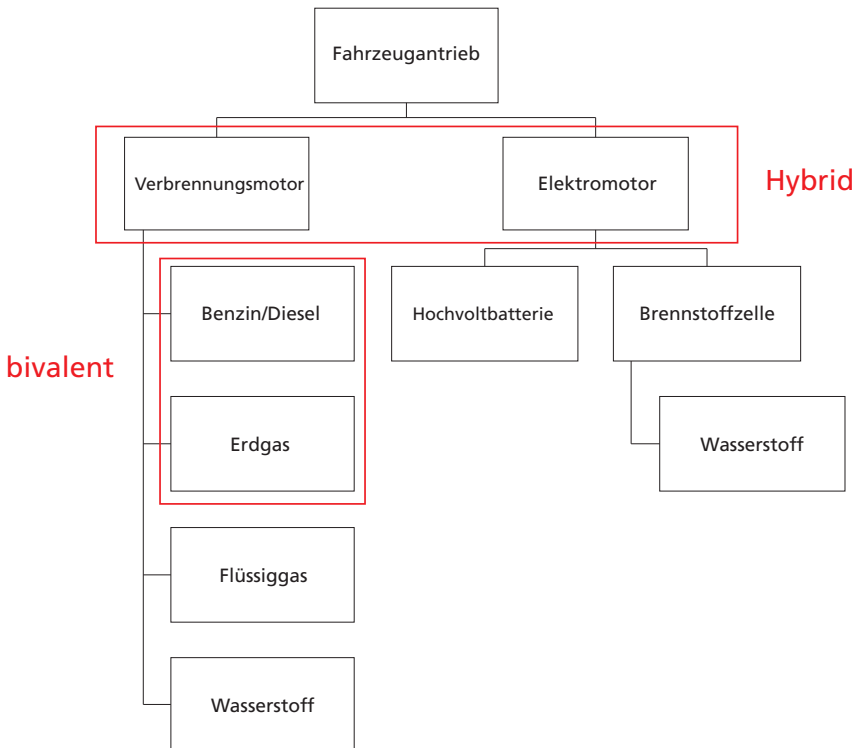


# 1 Einführung

## 1.1 Antriebe von Kraftfahrzeugen

Kraftfahrzeuge können sowohl von einem Verbrennungsmotor als auch von einem oder mehreren Elektromotoren angetrieben werden.

Der Verbrennungsmotor wandelt chemische Energie durch Verbrennung in mechanische Energie um, wobei als Kraftstoffe neben Benzin und Diesel auch Ethanol, Erd- und Flüssiggas (Autogas) sowie Wasserstoff zum Einsatz kommen können.



**Bild 1** Unterteilung und Bezeichnung von Fahrzeugantrieben

Elektromotoren sind elektromechanische Wandler, die elektrische Energie in mechanische Energie umsetzen. Der hierfür notwendige Strom kann an Bord von Kraftfahrzeugen entweder in Batterien gespeichert oder z. B. mit Hilfe einer Brennstoffzelle erzeugt werden. Der Elektromotor ist das Gegenstück zum Generator, der mechanische Energie in elektrische Energie umwandelt.

Werden zum Antrieb eines Kraftfahrzeuges zwei verschiedene Motoren (im Regelfall ein Verbrennungs- und ein Elektromotor) eingesetzt, spricht man von einem Hybridantrieb. Hybridantriebe versuchen die Vorteile verschiedener Antriebsarten zu kombinieren.

Können in einem Verbrennungsmotor mehrere Kraftstoffe verwendet werden, wird der Antrieb als bivalenter Antrieb bezeichnet. Antriebe mit nur einem Betriebsmittel werden hingegen als monovalent bezeichnet, wobei dies auch für Fahrzeuge mit einem Nottank von weniger als 15 Litern Volumen gilt.

## 1.2 Sicherheit von Fahrzeugantrieben

Die Sicherheit des Fahrzeugs und auch die des Fahrzeugantriebs spielt für die Fahrzeughersteller bei der Entwicklung eine entscheidende Rolle. Die Hersteller müssen dabei diverse gesetzliche Regelungen einhalten, so z. B. UN-R 100 (»batteriebetriebene Elektrofahrzeuge«) oder UN-R 110 (»Antriebssystem mit komprimiertem Erdgas«). Diese Richtlinien schreiben notwendige Sicherheitsmaßnahmen und Prüfmethoden für die Antriebskomponenten vor. Auch in Crash Tests (z. B. EuroNCAP) stellen die Fahrzeuge ihre Sicherheit unter Beweis.

Vereinfacht kann dabei von drei verschiedenen Sicherheitsprinzipien gesprochen werden:

### **Geschützter Einbau (»Sicher verpacken«)**

Komponenten des Fahrzeugantriebs, wie beispielsweise Kraftstofftanks, Hochvoltbatterien und Brennstoffzellen, werden an Stellen im Fahrzeug eingebaut, die erfahrungsgemäß bei vielen Unfällen nicht betroffen sind. Dies trifft insbesondere auf den Bereich über bzw. vor der Hinterachse, den Bereich des Mitteltunnels oder auch den Bereich der Spritzwand im Motorraum zu. Hierdurch sollen Gefahren reduziert werden, die z. B. beim Austritt von Kraftstoff oder bei Beschädigung einer Hochvoltbatterie entstehen würden.

Weiteren Gefahren, z. B. durch bewegliche Teile im Motorraum oder durch elektrischen Strom, wird durch einen konsequenten Berührschutz entgegen gewirkt, so

dass es im unbeschädigten Zustand normalerweise nicht ohne weiteres möglich ist, derartige Teile zu erreichen.

### **Abschaltung bei Erkennung eines Störfalls (»Abschalten«)**

Da durch die oben genannten Maßnahmen nicht mit absoluter Sicherheit ausgeschlossen werden kann, dass Komponenten des Fahrzeugantriebs trotzdem bei einem Unfall beschädigt werden und dann evtl. auch kein Berührschutz mehr gegeben ist, werden bei vielen Fahrzeugen Teile des Antriebssystems bei Erkennung eines Unfalls automatisch ausgeschaltet (z. B. durch das Abschalten der Kraftstoffpumpe oder das Unterbrechen des Hochvoltstromkreises).

Moderne Fahrzeuge verfügen in der Regel über ein System aus Sicherheitsgurten, Gurtstraffern und Airbags (Rückhaltesysteme), um die Fahrzeuginsassen bei einem Unfall vor Verletzungen zu schützen. Über das Steuergerät dieser Rückhaltesysteme können bei Erkennung eines Unfalls automatisch Teile des Antriebs abgeschaltet werden, um potenzielle Gefahren zu reduzieren.



Die durch das Steuergerät der Rückhaltesysteme (Airbagsteuergerät) ausgelösten Sicherheitsfunktionen können nur greifen, wenn der Unfall auch durch die angeschlossene Sensorik erkannt wurde.

Bei Fahrzeugüberschlägen oder auch bei einem schweren Heckaufprall werden bei vielen Fahrzeugen keine Airbags ausgelöst. In diesen Situationen ist es deshalb von der vorhandenen Sensorik und der Programmierung anhängig, ob ein Signal zum Abschalten des Antriebs gesendet wird. Nicht alle Unfallsituationen können sicher von der Sensorik der Rückhaltesysteme erkannt werden!

Bei Fahrzeugen, die nicht mit Rückhaltesystemen ausgestattet sind (z. B. Kleinserienfahrzeuge, Lkw, Busse), erfolgt ggf. keine Deaktivierung des Antriebs bei einem Unfall. In einigen Fällen ist in derartigen Fahrzeugen ein Trägheitsschalter (Inertia Switch) eingebaut, welcher auf Beschleunigungen oder Verzögerungen reagiert, die gewisse Grenzwerte überschreiten. Ob ein solcher Trägheitsschalter vorhanden ist und ausgelöst hat, lässt sich von außen jedoch nicht erkennen.



Ausgelöste Airbags sind ein Indiz dafür, dass die Sensorik des Rückhaltesystems den Unfall erkannt hat und das Antriebssystem abgeschaltet wurde. Es gibt aber auch Unfallsituationen, die von der Sensorik nicht erkannt werden können oder Fahrzeuge, die über keine Sensorik zur Unfallerkennung verfügen. Deshalb sollte immer eine manuelle Abschaltung vorgenommen werden!

Zudem ist es grundsätzlich möglich, dass der Antrieb z. B. auch bei der Erkennung einer Leckage (gasbetriebene Fahrzeuge) abgeschaltet wird. Allerdings gilt hier wie für alle diese Abschaltmechanismen, dass entsprechende Detektionsmöglichkeiten im Fahrzeug vorhanden sein müssen, was (außer bei einigen Versuchsfahrzeugen mit Wasserstoffantrieb) aktuell nicht der Fall ist.

Grundsätzlich ist eine sichere Abschaltung des Fahrzeugantriebs bei Erkennung eines Störfalls auch von der Funktion der Abschaltmechanismen abhängig. So ist z. B. denkbar, dass elektromagnetische Absperrventile (vgl. Kapitel 3.2) so beschädigt werden, dass diese nicht mehr schließen können oder dass Schutzrelais (vgl. Kapitel 5.3) »zusammenkleben« können und so der Stromfluss nicht unterbrochen wird.

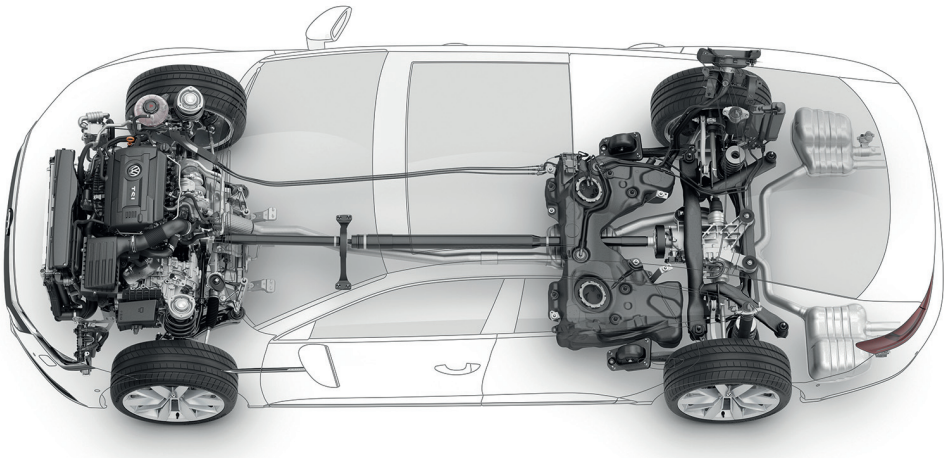
### **Verhinderung einer Explosion der Betriebsmittelspeicher (Tanks)**

Durch Sicherheitseinrichtungen soll verhindert werden, dass von den Kraftstoffen und deren Speichern eine Gefahr ausgeht. Dies betrifft insbesondere alle Tanks für gasförmige Stoffe, da der Innendruck bei einer Temperaturerhöhung, z. B. infolge eines Fahrzeugbrandes, steigt und die Gefahr besteht, dass die Tanks bersten. Aus diesem Grund müssen die Tanks mit Sicherungen (sog. PRD – Pressure Relief Device) ausgestattet sein, die bei einem zu hohen Innendruck oder einer zu hohen Temperatur das Gas gezielt abblasen.

## 2 Benzin- und Dieselantrieb

Der Fahrzeugantrieb mit Benzin- bzw. Diesel ist der am häufigsten verwendete Fahrzeugantrieb. Durch den Einbau des Kraftstofftanks im Bereich über bzw. vor der Hinterachse soll eine Beschädigung des Tanks und ein Austritt von Betriebsmittel bei einem Unfall verhindert werden. Die Brandgefahr ist am geringsten, wenn kein Kraftstoff austritt.

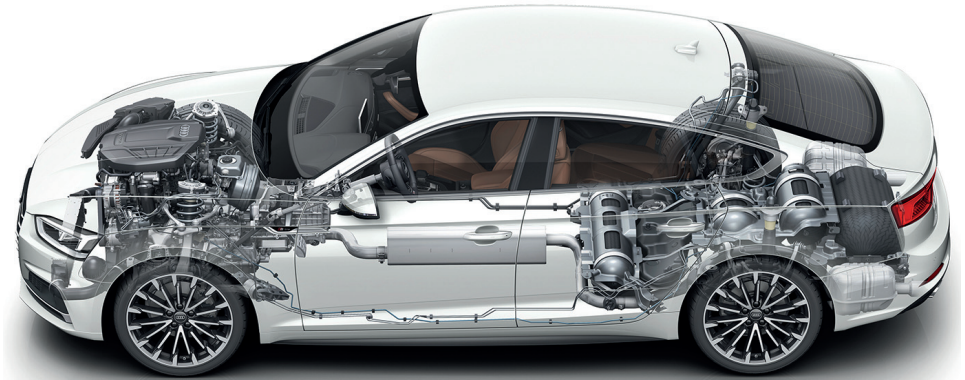
Um die weitere Förderung von Kraftstoff zu unterbinden, wird bei vielen Fahrzeugen bei der Erkennung eines Unfalls automatisch die Kraftstoffpumpe abgeschaltet. Diese kann dann keinen Kraftstoff mehr fördern, der sich z. B. an heißen Teilen im Motorraum entzünden könnte. Ist die Fahrzeugbatterie außerhalb des Motorraums verbaut, wird ggf. auch eine sogenannte Sicherheitsbatterieklemme verwendet. Diese trennt die Batterie-Plusleitung zum Motorraum pyrotechnisch ab, um dort Kurzschlüsse zu verhindern. Die weiteren elektrischen Systeme des Fahrzeugs, z. B. die Rückhaltesysteme sowie die Beleuchtung (Warnblinkanlage), werden aber weiter mit Spannung versorgt.



**Bild 2** *Der Kraftstofftank wird bei vielen aktuellen Fahrzeugen im Bereich vor der Hinterachse eingebaut und ist so gut gegen unfallbedingte Beschädigung geschützt. (Grafik: Volkswagen AG)*

## 3 Erdgasantrieb

### 3.1 Funktion des Erdgasantriebs



**Bild 3** *Dieser Audi A5 Sportback g-tron verfügt über einen Erdgasantrieb, kann aber auch mit Benzin betrieben werden. (Grafik: Audi AG)*

Fahrzeuge mit Erdgasantrieb (komprimiertes Erdgas, auch CNG = Compressed Natural Gas oder GNC = Gaz Naturel Comprimé) werden von vielen Herstellern in Serie produziert und ab Werk zum Kauf angeboten. Grundsätzlich ist auch der nachträgliche Einbau einer Erdgasanlage möglich, aber in Anbetracht der Verfügbarkeit von Serienfahrzeugen nicht sehr gängig.

Erdgasfahrzeuge sind sowohl in monovalenter Ausführung (d. h. ohne Benzintank bzw. mit einem Benzin-Nottank) als auch in bivalenter Ausführung erhältlich. Die Fahrzeuge verwenden einen herkömmlichen Verbrennungsmotor (Ottomotor). Anstatt eines Benzin-Luft-Gemisches wird ein Erdgas-Luft-Gemisch in den Zylindern verbrannt. Der Fahrer kann in der Regel mit einem Schalter wählen, ob das Fahrzeug mit Benzin oder Erdgas betrieben werden soll.

Um eine ausreichende Menge Erdgas mitführen zu können, sind im Fahrzeug in der Regel mehrere Erdgastanks montiert, wobei der maximale Druck je Tank ca. 200 bar beträgt. Je nach Anzahl und Größe der Tanks reicht die Erdgasmasse von ca. 26 kg bei Pkw bis zu 250 kg bei Bussen.

Die Erdgastanks können sowohl aus Stahl als auch aus kohlefaserverstärktem Kunststoff (CFK) bestehen. Die Tanks sind dabei so stabil, dass eine mechanische Beschädigung durch einen Unfall sehr unwahrscheinlich ist (vgl. auch Egelhaaf und Rücker, 2006).

Erdgastanks befinden sich i. d. R. an geschützten Einbauorten und können entweder längs oder quer zur Fahrtrichtung eingebaut sein. Gängige Einbauorte sind der Bereich der Hinterachse, der Mitteltunnel des Fahrzeugs sowie der Kofferraum. Bei Transportern und Lkw sind die Tanks häufig am Fahrgestellrahmen montiert. Bei Bussen befinden sich die Tanks in der Regel auf dem Fahrzeugdach.

Von den Gastanks wird das Gas über Leitungen aus Edelstahl dem Verbrennungsmotor zugeleitet. Erdgasleitungen verlaufen bei Pkw (parallel zu den Kraftstoffleitungen) im Bereich des Fahrzeugbodens. Bei Bussen ist es allerdings möglich, dass Erdgasleitungen auch in Fahrzeugsäulen verlaufen.

## 3.2 Sicherheitseinrichtungen der Erdgasanlage

An jedem Gastank befindet sich ein Ventilblock, welcher verschiedene Aufgaben und Sicherheitsfunktionen erfüllt:

### **Elektromagnetisches Absperrventil**

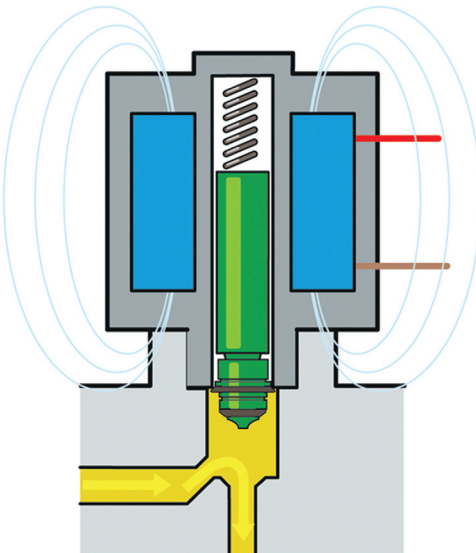
Die elektromagnetischen Absperrventile werden vom Motorsteuergerät während des Erdgasbetriebs geöffnet. Fließt kein Strom, schließen sie automatisch. Beim Betanken öffnen sie durch den Druck des eingefüllten Erdgases.

Im Erdgasbetrieb wird das elektromagnetische Absperrventil mit Strom versorgt. Durch das entstehende Magnetfeld des Elektromagneten wird das Ventil nach oben gezogen und öffnet den Erdgastank. Wird der Erdgasbetrieb beendet, schaltet das Motorsteuergerät die Stromversorgung ab und durch die Feder wird das Ventil wieder nach unten gedrückt (vgl. Bild 5).

Das elektromagnetische Absperrventil schließt (je nach Hersteller) z. B. beim Umschalten auf Benzinbetrieb, beim Abstellen des Motors, im Falle eines Unfalls mit Airbag- und/oder Gurtstrafferauslösung oder beim Verlust der Spannungsversorgung des Ventils automatisch.



**Bild 4** *Beispiel für ein Flaschenventil an einem Erdgastank, hier auf dem Dach eines Buses. Oben auf dem Ventil befindet sich das mechanische Absperrventil, unten das elektromagnetische Absperrventil. In diesem Fall ist die Thermo­sicherung nach links oben gerichtet. (Foto: Daimler AG)*



**Bild 5** *Funktionsweise des elektromagnetischen Absperrventils (Grafik: Volkswagen AG)*



### Durchflussmengenbegrenzer

Der Durchflussmengenbegrenzer verhindert das ungewollte, schlagartige Ausströmen von Erdgas aus den Erdgastanks nach einer Beschädigung der Erdgasleitung oder bei Beschädigung des Gasdruckreglers, um die Gefahr der Entstehung eines explosionsfähigen Gas-Luftgemisches zu reduzieren.

Ist der Druck im Erdgastank um ca. 2 bar höher als in der Leitung (z. B. nach einem Leitungsabriss), wird ein Dichtkegel durch den Druck im Erdgastank in einen Dichtsitz gedrückt und es kann nur noch eine geringe Menge Erdgas austreten. Dies ist notwendig, damit der Tank sich beim Einstellen gleicher Druckverhältnisse im Tank und in der Leitung (z. B. nach einer Reparatur) auch wieder öffnen kann. Durch Betätigung des mechanischen Absperrventils kann der Gasaustritt vollständig unterbunden werden.

Hat der Durchflussmengenbegrenzer angesprochen, dauert das Entleeren eines vollen Erdgastanks mehrere Stunden.

### Thermosicherung

Die Thermosicherung verhindert das Bersten des Erdgastanks durch übermäßigen Druckanstieg als Folge von hohen Temperaturen. Sie ist i. d. R. in das Flaschenventil integriert. Außerdem ist es möglich, dass auf der entgegengesetzten Seite des Tanks eine weitere Thermosicherung montiert ist.

Steigt die Temperatur im Bereich der Thermosicherung auf über 110 °C an, öffnet die Thermosicherung die Abblasöffnung und das Erdgas kann aus dem Tank in die Atmosphäre entweichen. Hierzu ist die Thermosicherung z. B. als Schmelzsicherung ausgeführt. Ist der Abblasvorgang einmal gestartet, kann er nicht mehr gestoppt werden. Bei einem vollen Pkw-Erdgastank dauert das Abblasen des Erdgases bis zur vollständigen Entleerung ca. 90 Sekunden.

### Berstscheibe

Eine Berstscheibe verhindert einen übermäßigen Druckanstieg im Tank. Eine Einmal-Membran bricht beim Erreichen eines zu hohen Drucks im Tank (z. B. 300 bar). Ist dieser Vorgang einmal gestartet, kann auch er nicht mehr gestoppt werden. Im Gegensatz zur Thermosicherung ist die Berstscheibe nicht vorgeschrieben und deshalb nicht zwangsläufig vorhanden.

### Mechanisches Absperrventil

Eine Handabsperung (mechanisches Absperrventil) erlaubt das manuelle Schließen des Gastanks z. B. für Wartungsarbeiten oder bei einer Leckage im System. Der Ablasskanal zur Thermosicherung ist aus Sicherheitsgründen auch bei geschlosse-

dem Absperrventil geöffnet. Das Schließen des mechanischen Absperrventils erfolgt normalerweise im Uhrzeigersinn, die Form des Absperrventils ist allerdings nicht genormt und kann sich von Fahrzeug zu Fahrzeug unterscheiden (vgl. auch Bild 25).

### 3.3 Physikalische Eigenschaften von Erdgas

- Erdgas (Methan,  $\text{CH}_4$ ) ist ein farbloses brennbares Gas, das im Ursprungszustand geruchlos ist.
- Erdgas ist leichter als Luft (Dichteverhältnis Erdgas/Luft  $\sim 0,6$ ) und steigt deshalb im Freien rasch auf!
- Erdgas ist odoriert (mit einem Geruchstoff versetzt), d. h. ein Erdgasaustritt kann bereits vor dem Erreichen der unteren Explosionsgrenze festgestellt werden.
- Der Explosionsbereich liegt zwischen 4 Vol% und 17 Vol% in Luft.
- Die Zündtemperatur liegt bei ca.  $640^\circ\text{C}$ .

### 3.4 Sonderfall: Verflüssigtes Erdgas

Bei Lkw kommt aufgrund der höheren Reichweite vereinzelt auch verflüssigtes Erdgas (LNG = Liquefied Natural Gas) als Kraftstoff zum Einsatz:

Verflüssigtes Erdgas nimmt nur 1/600 des ursprünglichen Gasvolumens ein, so dass in einem Tank gleicher Größe deutlich mehr Erdgas mitgeführt werden kann. Um Erdgas zu verflüssigen, muss es allerdings auf  $-162^\circ\text{C}$  heruntergekühlt werden und im Tank auf dieser Temperatur gehalten werden. Deshalb kommen sogenannte Kryogentanks zum Einsatz, d. h. spezielle doppelwandige, isolierte Edeltanks ohne externe Kühlung.



Verflüssigtes Erdgas ist anders als CNG ggf. nicht mit einem Geruchstoff versehen (odoriert).

Kommt es zu einer Leckage, verbreitet sich verflüssigtes Erdgas aufgrund der niedrigen Temperatur zuerst am Boden. Gefrierendes Wasser aus der Luft sorgt dabei dafür, dass sich eine Nebelwolke bildet. Erwärmt sich das LNG verringert sich die Dichte zunehmend und das Gas steigt nach oben auf.