

# **Einführung in den Maschinenbau**

Vorlesung im Grundstudium für den Studiengang Maschinenbau 1. Semester

## **Vorlesung 6**

# **Mechatronik: Drive-by-Wire**

**Elektronik, Sensorik, Aktorik und MSR-Technik im KFZ**

**Univ.-Prof. Dr.-Ing. O. Nelles**

**Institut für Mechanik und Regelungstechnik - Mechatronik**

**Universität Siegen**



## Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einführung und Motivation.....</b>	<b>3</b>
1.1 Wozu dient dieses Kapitel der Vorlesungsreihe?.....	3
1.2 Was ist mit Drive-by-Wire gemeint?.....	4
1.3 Welchen Beitrag leistet die MSR-Technik zu Drive-by-Wire?.....	5
<b>2. Manuelle und automatische Regelung.....</b>	<b>7</b>
2.1 Der Mensch als Regler.....	7
2.2 Geschlossener Regelkreis und offene Steuerkette.....	8
2.3 Beispiele und Übungsaufgaben zur Steuerung und Regelung.....	9
2.4 Stellglieder (Aktoren).....	11
2.5 Messglieder (Sensoren).....	12
<b>3. Schlupfregelsysteme .....</b>	<b>13</b>
3.1 Reifenschlupf.....	13
3.2 Antiblockiersystem ABS.....	14
3.3 Antriebsschlupfregelung ASR und Motorschleppmomentregelung MSR.....	15
<b>4. Fahrdynamikregelung FDR.....</b>	<b>15</b>
4.1 Aktive und passive Sicherheitssysteme .....	15
4.2 FDR zur Erhöhung der aktiven Sicherheit.....	16
4.3 Integriertes Chassis Management ICM.....	17
<b>5. Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>18</b>
<b>6. Literatur.....</b>	<b>19</b>

# 1. Einführung und Motivation

## 1.1 Wozu dient dieses Kapitel der Vorlesungsreihe?

Das Kapitel **Drive-by-Wire** soll einerseits in das (nicht nur für Maschinenbau-Ingenieure) grundlegende Fachgebiet **Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik (MSR-Technik)** einführen und andererseits am Beispiel des Kraftfahrzeugs eine **Tendenz** andeuten, die im gesamten Maschinenbau zu beobachten und für die Ausbildung junger Ingenieure wichtig ist:

**Mechanische, hydraulische** oder **pneumatische** Komponenten des Maschinenbaus werden immer häufiger durch **elektronische** ersetzt oder sinnvoll ergänzt, so dass neue innovative Produkte und auch neue interdisziplinäre Fachgebiete wie **Mikro- und Nanomechanik, Mechatronik, Fluidtronik** oder **Adaptronik** entstehen /HGP98, Iser99, Neum95/.

In der Kraftfahrzeug- oder Automobiltechnik sind es vor allem **elektronische Sensoren und Aktoren** zum Messen und Stellen, leistungsfähige schnelle **digitale Rechner** zum Steuern, Regeln und Automatisieren sowie **elektrische Leitungen** und **Datenbussysteme** zur Signalübertragung zwischen den verschiedenen elektronischen Komponenten des Kraftfahrzeugs.

Nach einer Prognose aus dem Jahre 1998 sollte der Anteil der Mikroelektronik am Produktionswert eines Autos von 22% im Jahr 1997 auf 32% im Jahr 2002 steigen /Pype98/. Dieser Wert ist bei manchen Fahrzeugen inzwischen erreicht oder sogar übertroffen worden. Nicht nur diese sich weiter fortsetzende Entwicklung, sondern auch die beruflichen Perspektiven, die sich zukünftigen Maschinenbau-Ingenieuren mit MSR-Kenntnissen in der Fahrzeugindustrie (und in anderen Industriezweigen) bieten, legen es nahe, sich schon während des Studiums mit den Grundlagen der MSR-Technik zu beschäftigen.

Innovative MSR-Technik nutzt die Fortschritte und Möglichkeiten der Elektronik und trägt speziell in der KFZ-Technik entscheidend bei zur

- **Verminderung der Abgasemissionen** (Lambda-Regelung, Direkteinspritzung),
- **Senkung des Treibstoffverbrauchs** (Motormanagement, 3-Liter-Auto),
- **Steigerung der aktiven Fahrsicherheit** (Anti-Blockier-System ABS, Antriebs-schlupfregelung ASR, Elektronisches Stabilitätsprogramm ESP, Fahrer-Assistenzsysteme FAS, 30-Meter-Auto),
- **Erhöhung des Fahrkomforts** (Servolenkung, aktive Federung, automatisches Getriebe).
- **Verbesserung des Verkehrsflusses** (Verkehrsleit- und Verkehrsinformationssysteme).

Fragestellungen und Lösungsmethoden der MSR-Technik betreffen deshalb nicht nur den in dieser Vorlesungsreihe vorrangig betrachteten **Antriebsstrang**, bestehend aus Motor und Getriebe, sondern das **gesamte Fahrzeug** (zum Teil sogar einschließlich **Fahrer**). Die Einordnung dieser Vorlesung am Ende der Vorlesungsreihe wäre deshalb ebenso sinnvoll wie die jetzt vorgenommene Einordnung V8 am Ende der Produktentwicklung und vor Beginn der Produktherstellung.

## 1.2 Was ist mit Drive-by-Wire gemeint?

Dieser Ausdruck ist aus der Flugzeugtechnik entlehnt. Dort gibt es den Begriff **Fly-by-Wire** schon lange: Mittels **elektrischer Leitungen** (wire  $\hat{=}$  Draht) werden Messsignale von **Sensoren** (Messgliedern) zu **Steuerungs- oder Regelungseinrichtungen** (Speicherprogrammierbare Steuerungen, Mikrorechner, Signalprozessoren) übertragen. Die von diesen berechneten und ausgegebenen Steuer- oder Stellbefehle werden ebenfalls über elektrische Leitungen an **Aktoren** (Stellglieder) weitergeleitet, die dann in das Fluggeschehen eingreifen. Der sog. **Autopilot** ist bei Flugzeugen bereits Stand der Technik. Ähnliches bahnt sich mit **Drive-by-Wire** für zukünftige Automobil-Generationen an, allerdings über verschiedene Zwischenstufen in einem Zeitraum von voraussichtlich 20 bis 30 Jahren /Scam00/.

Fahrbefehle wie **Lenken, Gasgeben, Bremsen, Kuppeln** und **Schalten** werden bei dieser Methode ausschließlich **elektronisch** an die entsprechenden Aggregate im Fahrzeug übertragen /Scar99/. **Drive-by-Wire** wird auch als Oberbegriff für die genannten Teilaufgaben gewählt und gelegentlich mit **X-by-Wire** bezeichnet /Bur00/, wobei das **X** stellvertretend für **Steer, Shift, Cruise, Brake** oder andere Funktionen steht (Bild 8.1).

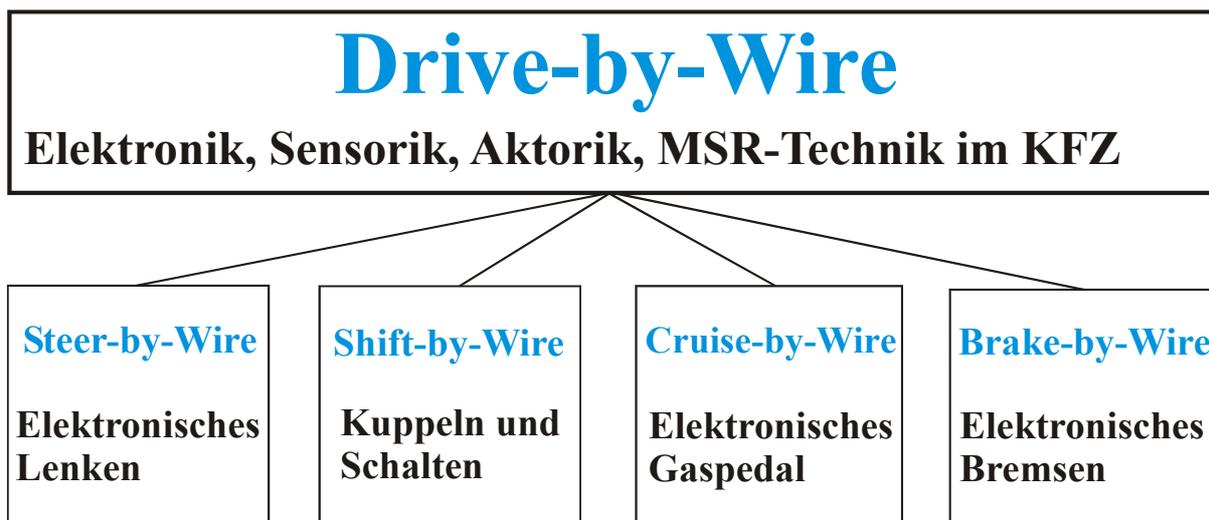


Bild 8.1: Drive-by-Wire-Konzept für zukünftige Automobilgenerationen

DaimlerChrysler testet in einem **Versuchsfahrzeug „R129“** auf Basis eines Mercedes SL Roadsters bereits Drive-by-Wire-Techniken /DaCh00, Ohli00/. Dies ist offenbar das erste Auto ohne Lenkrad, Gas- und Bremspedal, das nur mit einem Steuerknüppel (Sidestick) gesteuert wird. Mit Bewegungen nach rechts und links lässt sich das Fahrzeug präzise lenken. Für einen realitätsnahen Lenkwiderstand sorgt ein im Steuerknüppel eingebauter Elektromotor. Ein Sensor, der auf Druck (Steuerknüppel nach vorne drücken) oder Zug (Steuerknüppel nach hinten, d. h. zum Körper hin ziehen) der Hand reagiert, merkt ob der Fahrer beschleunigen oder bremsen will (s. Titelbild).

BMW hat mit dem fahrbereiten **Konzept-Auto Z22** ebenfalls neue Technologien realisiert. Verwirklicht wurden u.a. mit **Steer-by-Wire** und **Brake-by-Wire** mechatronische Systeme, die herkömmliche mechanische Lenksäulen und hydraulische Bremsen in etwa acht Jahren vollständig ablösen könnten. In diesem Mechatronic-Konzept-Auto stecken 70 Innovationen und mehr als 60 zum Patent angemeldete Erfindungen (VDI Nachrichten, Nr. 32 vom 11.08.2000, Seite 23).

### 1.3 Welchen Beitrag leistet die MSR-Technik zu Drive-by-Wire?

**Drive-by-Wire** ist nicht denkbar ohne die zielgerichtete Anwendung moderner Methoden der Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik (MSR-Technik). Bis zum Versuchsfahrzeug von DaimlerChrysler oder dem Konzept-Auto von BMW war ein weiter Weg zurückzulegen, der es uns erlaubt, die **Methoden der MSR-Technik** exemplarisch anhand ausgewählter Beispiele aus der KFZ-Technik zu studieren.

Es begann mit einfachen mechanischen (und später elektronischen) **Motorsteuerungen** zur drehzahl- und lastabhängigen Verstellung des Zündzeitpunktes bzw. Zündwinkels bei Ottomotoren. Im Jahre 1967 wurde z.B. die erste **elektronisch gesteuerte Benzin-Einspritzung** Jetronic in einem VW 1600 TL eingebaut. Es folgte die sogenannte **Lambda-Regelung** mit der das dem Motor zugeführte Luft-Kraftstoff-Gemisch relativ genau auf einem für die Verbrennung optimalen Sollwert des Luftverhältnisses von  $\lambda = 1$  gehalten werden kann (s. auch Vorlesung 2 „Motorenentwicklung“). Im nachgeschalteten Katalysator lassen sich die ausgestoßenen Schadstoffe dann noch erheblich reduzieren..

Man erkennt an diesem Beispiel auch, dass die umgangssprachliche Bezeichnung vom „geregelten Katalysator“ irreführend ist, denn nicht der Katalysator, sondern das Luftverhältnis  $\lambda$  wird geregelt.

Ein weiterer Meilenstein in der Entwicklung war 1978 die Markteinführung des ersten serientauglichen **Anti-Blockier-Systems ABS**, 1986 folgte die darauf aufbauende **Anfahr- oder Antriebsschlupfregelung ASR**. Ein großer Entwicklungsschub für die MSR-Technik im Fahrzeug folgte nach dem misslungenen „Elchtest“ der A-Klasse von DaimlerChrysler. Konstruktive Maßnahmen allein genügten offenbar nicht, um die notwendige Fahrstabilität bei extremen Ausweichmanövern zu erreichen, deshalb wurde das 1995 entwickelte **Elektronische Stabilitätsprogramm ESP** erstmals serienmäßig in Fahrzeuge der A-Klasse eingebaut und ist heute in vielen anderen Fahrzeugen zu finden.

Ihm folgten in rascher Folge viele weitere steuerungs- und regelungstechnische Verfahren zur Steigerung der aktiven Fahrsicherheit und zur Unterstützung des Fahrers /Naab00/. Bild 8.2 nennt die bekanntesten Beispiele, von denen in dieser Vorlesung nur wenige näher betrachtet werden können. Anhand dieser Beispiele lässt sich jedoch die Entwicklung von der **digitalen Motorsteuerung** bis zu den zukünftigen **Fahrerassistenzsystemen** nachvollziehen.

**Sensoren:**

Lambda-Sonde, Heißfilm-Luftmassensensor, Brennraumdrucksensor, Klopfsensor, Drehzahlsensor, Giergeschwindigkeitssensor, Querschleunigungssensor, Lenkradwinkelsensor

**Aktoren:**

Elektrische Motore und Antriebe für Pumpen, Klappen, Schieber, Ventile, Fensterheber, Scheibenwischer, Türverriegelungen, Sitzverstellungen

**Steuerungen und Regelungen:**

Digitale Motorsteuerung (Einspritzung und Zündung)

Lambda-Regelung (Luft-Kraftstoff-Gemisch-Regelung), Klopf-Regelung

Ladedruckregelung bei Turboladern, Motormanagementsysteme

Elektronisches Gaspedal ⇒ *Cruise-by-Wire*

Automatisches Getriebe, elektronische Getriebesteuerung ⇒ *Shift-by-Wire*

Niveau-Regelung, Leuchtweiten-Regelung

Aktive Federung, Computer Controlled Suspension (CCS)

Anti-Blockier-System (ABS), Antriebsschlupf-Regelung (ASR)

Elektrohydraulische Bremse (EHB), Sensotronic Brake Control (SBC) ⇒ *Brake-by-Wire*

Fahrdynamikregelung (FDR), Fahrstabilitätsregelung (FSR)

Elektronisches Stabilitätsprogramm (ESP)

Porsche Stability Management (PSM), Dynamic Stability Control (DSC)

Active Body Control (ABC), Aktive Hinterachskinematik (AHK)

Servolenkung, Vierradlenkung, elektronische Lenkhilfe ⇒ *Steer-by-Wire*

Automatische Spurhaltung, Automatic Heading Control (AHC)

Elektronische Knautschzone, elektronische Deichsel

Abstandsregelung bei Kolonnenfahrt, Adaptive Cruise Control (ACC)

Fahrerassistenzsysteme, Autonome (fahrerlose) Fahrzeuge

Bild 8.2: Beispiele für den Einsatz von Komponenten und Methoden der Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik im Kraftfahrzeug

## 2. Manuelle und automatische Regelung

### 2.1 Der Mensch als Regler

Zur Erläuterung einiger Grundbegriffe der MSR-Technik betrachten wir als erstes Beispiel die **Kursregelung eines Straßenfahrzeugs durch den Fahrer**. Der Sollkurs ist durch den Straßenverlauf, Ampeln und Verkehrszeichen, auftretende Hindernisse und andere Verkehrsteilnehmer bestimmt.

Der Fahrer (oder die Fahrerin) erfasst mit seinen (ihren) Sinnesorganen laufend den tatsächlichen Kurs (Istkurs) und greift bei Bedarf über das Lenkrad (Stellglied) korrigierend ein. Diesen Vorgang bezeichnet man als **Regelung**. Im hier betrachteten Beispiel handelt es sich um eine **manuelle** Regelung. Sie lässt sich anschaulich in einem **Blockschaltbild** oder **Wirkschema** darstellen (Bild 8.3).

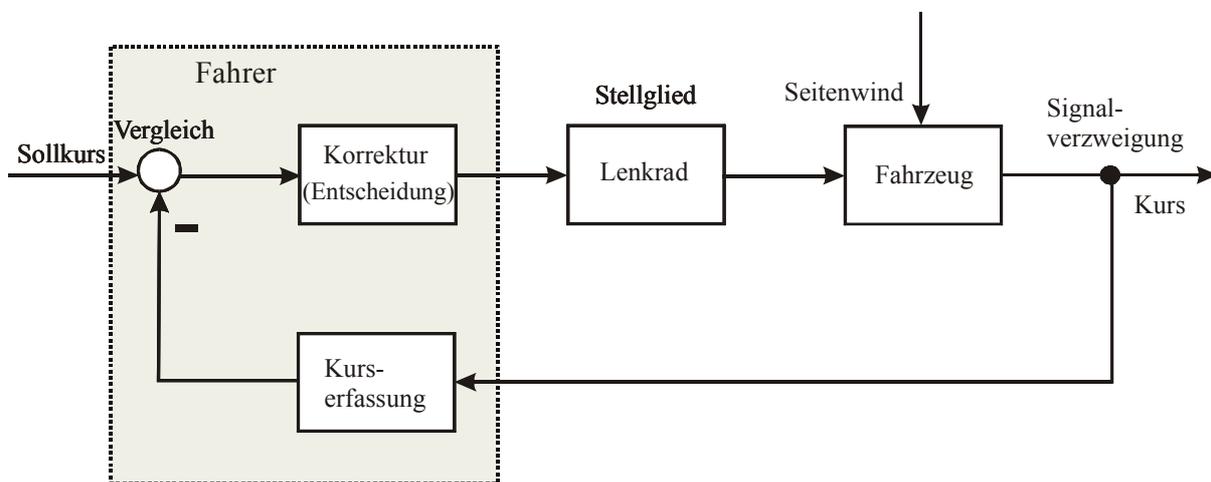


Bild 8.3: Kursregelung eines Straßenfahrzeuges durch den Fahrer

**Blöcke** kennzeichnen die wichtigsten Elemente eines Regelkreises, **Pfeile** stellen gerichtete Wirkungslinien oder Signalflüsse dar (Ursache-Wirkung-Zusammenhänge); außerdem treten **Signalverzweigungen** (Punkte) und **Vergleichsstellen** (Subtraktionsstellen) auf.

Wesentlich für eine Regelung ist die laufende Erfassung (Messung) des Istwertes der Regelgröße (hier des Istkurses) und der **Vergleich** mit dem Sollwert der Regelgröße (hier die Subtraktion des Istkurses vom Sollkurs) sowie die bei Bedarf vorzunehmende **Korrektur** durch den Fahrer (Regler).

Wegen des Minuszeichens an der Vergleichsstelle spricht man von einer **negativen Rückkopplung** im Regelreis: Der Fahrer muss bei Abweichungen vom Sollkurs **korrigierend** eingreifen, d.h. auftretende Abweichungen sollen verringert und nicht vergrößert werden.

**Steuerungen** verzichten auf solche Rückkopplungen, sie verfolgen eine **Vorwärtsstrategie**. Dies kommt in den englischen Bezeichnungen **feedforward control** (Steuerung) und **feedback control** (Regelung) anschaulich zum Ausdruck.

## 2.2 Geschlossener Regelkreis und offene Steuerkette

Würde der Fahrer die Augen schließen, also nicht laufend den Kurs erfassen und mit dem Sollkurs vergleichen, sondern unabhängig davon das Lenkrad betätigen, würde die Rückkopplung fehlen! Man spricht in einem solchen Fall von einer **offenen Steuerkette** (im Gegensatz zum **geschlossenen Regelkreis**).

In dem gewählten Beispiel sollte man eine Steuerung tunlichst vermeiden! Es gibt jedoch andere Beispiele, wo eine Steuerung durchaus sinnvoll ist, z.B. das genaue Positionieren einer Werkzeugmaschine (WZM) mit einem Schrittmotor, der sich bei einem Steuerimpuls immer nur um einen definierten Weg oder Winkel weiter bewegt, die Zahl der Impulse bestimmt dann die erreichte Position. Eine Messung und eine Rückkopplung der gemessenen Größe ist in diesem Falle nicht üblich (Bild 8.4).

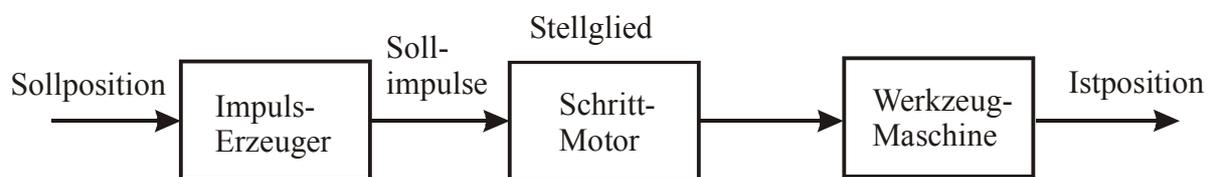


Bild 8.4: Steuerung einer Werkzeugmaschine mit Hilfe eines Schrittmotors als Stellglied

In der Praxis wird nicht immer streng zwischen den beiden Prinzipien zum gezielten Eingreifen in einen zeitveränderlichen (dynamischen) Prozess, der Steuerung und der Regelung, unterschieden, weil in komplexen Systemen eine Steuerkette auch Teil eines Regelkreises sein kann und umgekehrt. So ist z.B. die **elektronische Motorsteuerung** meist in ein übergeordnetes **Motormanagementsystem** eingebettet, das auch Regelkreise umfasst /Bosc99/.

Ein wesentlicher Vorzug der Regelung (Bild 8.3) ist die automatische Erfassung von Störeinflüssen (z.B. Seitenwind oder Fahrbahnänderungen). Sie bewirken eine Änderung des Istkurses und werden beim Vergleich berücksichtigt: Der Fahrer muss „gegenlenken“.

Ein erster Schritt zu **Steer-by-Wire** sind deshalb **elektronische Lenkhilfen**, die dem Fahrer dieses Gegenlenken abnehmen /Naab00/. Ebenso kann das sogenannte Über- oder Untersteuern von Fahrzeugen bei Kurvenfahrt automatisch korrigiert werden. Beim Übersteuern sind die Schräglaufwinkel hinten größer als vorne; das Fahrzeug fährt einen kleineren Kurvenradius als es dem Lenkeinschlag entsprechend fahren müsste. Beim Untersteuern sind die Verhältnisse umgekehrt und es wird ein größerer Kurvenradius gefahren /Bosc98/.

Das **Steer-by-Wire**-Konzept verzichtet auf die Lenksäule und alle mechanischen Verbindungen zwischen Lenkrad und Vorderrädern. Der Fahrer gibt mit dem Lenkrad (oder Sidestick) nur noch den Sollkurs für einen unterlagerten Regelkreis vor, der die Räder mittels elektrischer oder hydraulischer Stellglieder entsprechend der Sollvorgabe so einstellt, dass der gewünschte Kurs gefahren wird.

## 2.3 Beispiele und Übungsaufgaben zur Regelung und Steuerung

### Übungsaufgabe 1: Geschwindigkeitsregelung

*Im Straßenverkehr muss neben dem Kurs auch die **Geschwindigkeit** eingehalten werden, die sich aus Geschwindigkeitsvorgaben, dem Straßenverlauf und der Verkehrssituation ergibt.*

*Zeichnen Sie das Wirkschema oder **Blockschaltbild einer Geschwindigkeitsregelung** mit den beiden Stellgrößen Gasgeben und Bremsen sowie der Regelgröße Fahrzeuggeschwindigkeit.*

### Übungsaufgabe 2: Straßenbeleuchtung und Verkehrslenkung

*Handelt es sich bei der Straßenbeleuchtung und der Verkehrslenkung mit Ampeln um Steuerungs- oder Regelungsvorgänge? Begründen Sie Ihre Antworten!*

Lästig, anstrengend und zeitraubend ist das **Fahren in Kolonnen** und das **Stehen im Stau** auf Autobahnen, weil das häufige Anfahren und Abbremsen hohe Konzentration und volle Aufmerksamkeit erfordert. Regelungstechniker haben sich schon sehr früh mit der Analyse, der mathematischen Beschreibung und der Simulation solcher **Stop-and-Go-Vorgänge** befasst, um häufig beobachtbare Phänomene wie den „Stau aus dem Nichts“ besser zu verstehen.

Moderne Fahrzeuge mit elektronischem Gaspedal, ABS und Motorsteuerung, die man zusätzlich mit optischen oder Radar unterstützten Abstandsmesseinrichtungen versehen würde, könnten den Fahrer bei solchen Fahrmanövern unterstützen oder sie zukünftig sogar weitgehend autonom ausführen **Cruise-by-Wire** sieht dies vor.

Zur Zeit werden neue elektronische Chips entwickelt (u.a. auch im ZESS Zentrum für Sensorsysteme der Universität Siegen), die den Bau preiswerter bildverarbeitender Systeme erlauben. Man möchte damit „sehende“ oder „sensible“ Fahrzeuge, Roboter und Maschinen realisieren, die ihre Umwelt laufend erfassen und auf die empfangenen Informationen sinnvoll reagieren. Nähert sich ein Fahrzeug z.B. zu rasch dem vorausfahrenden, so wird es mit **Cruise-by-Wire-Technik** automatisch abgebremst, obwohl der Fahrer noch das Gaspedal tritt.

### Übungsaufgabe 3: Fahrzeugkolonne

*Die einfachste **Fahrzeugkolonne** besteht aus mindestens drei Fahrzeugen (Bild 8.5), d.h. das mittlere Fahrzeug (und jedes andere innerhalb einer größeren Kolonne) hat ein vorausfahrendes und ein nachfolgendes Fahrzeug (oder mehrere).*

*Die gesamte Kolonne soll mit vorgegebenen **Sollgeschwindigkeit**  $V_S$  und daraus ableitbaren **Sicherheits- oder Sollabständen**  $A_S$  fahren (auf dem Tachometer angezeigte Geschwindigkeit halbiert und in Metern gerechnet). Diskutieren Sie das dynamische Verhalten und typische Fahrsituationen einer solchen Kolonne aus mehreren Fahrzeugen.*

*Welche Messinformationen würde eine **Geschwindigkeits- und Abstandsregelung** benötigen?*

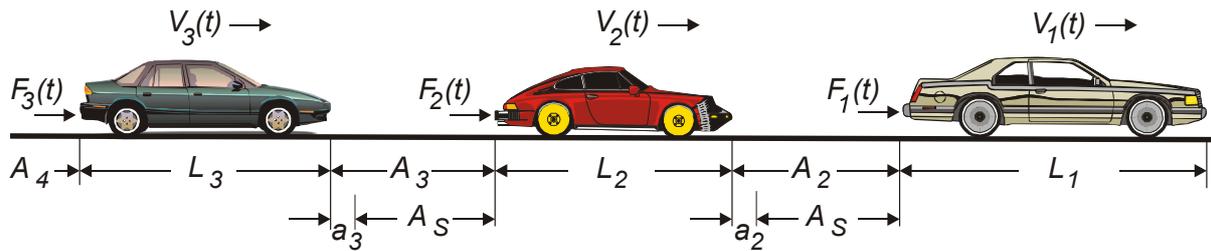


Bild 8.5: Anfang einer Fahrzeugkolonne

Das Gegenteil, das Fahren auf freien Strecken mit Geschwindigkeitsbeschränkungen kann ebenfalls eintönig sein, wenn man sich an die vorgegebene Geschwindigkeit hält. Ältere Fahrzeuge (z.B. Fiat 500) hatten für solche Fälle das sogenannte **Handgas**, d.h. das Gaspedal wurde von Hand entsprechend der Sollgeschwindigkeit fest eingestellt. Der Fahrer konnte dann den Fuß vom Gaspedal nehmen. Heute übernimmt diese Funktion ein **Tempomat**, der automatisch die gewünschte oder vorgegebene Geschwindigkeit einhält und auch Steigungen oder Gefälle berücksichtigt, was beim Handgas nicht möglich war.

#### Übungsaufgabe 4: Handgas und Tempomat

Erläutern Sie am Beispiel **Handgas** und **Tempomat** noch einmal die grundsätzlichen Möglichkeiten zur gezielten Beeinflussung dynamischer Systeme durch **Steuerung** oder **Regelung**. Welche Methode wird jeweils angewandt?

#### Übungsaufgabe 5: Fahrzeugdichte und Verkehrsfluss

Der Verkehrsfluss auf Schnellstraßen oder Autobahnen lässt sich (analog zum Massenfluss in Rohrleitungen oder Kanälen) durch zwei Variablen beschreiben:

**Verkehrsfluss**  $q$  = Zahl der am Messort vorbeifahrenden Fahrzeuge je Zeiteinheit [Fz/h]

**Verkehrsdichte**  $d$  = Zahl der Fahrzeuge im betrachteten Straßenabschnitt [Fz/km]

Beide Größen sind nicht unabhängig voneinander. Wie könnte man die Abhängigkeit näherungsweise beschreiben? (Formel oder graphische Darstellung)

**Hinweis:** Folgende Extremsituationen sind bei der Lösung der Aufgabe nützlich:

Bei vollkommen leerer Straße ist  $q=0$  und  $d=0$ . Stehen die Fahrzeuge im Stau Stoßstange an Stoßstange, ist zwar die Verkehrsdichte maximal ( $d=d_{max}$ ), es ist jedoch kein Verkehrsfluss mehr möglich ( $q=0$ ).

Zwischen diesen beiden Extremsituationen muss bei mittlerer Verkehrsdichte  $d$  und üblichem Sicherheitsabstand der maximale Verkehrsfluss  $q_{max}$  liegen.

## 2.4 Stellglieder (Aktoren)

Um ein Fahrzeug (eine Maschine oder eine Anlage) steuern oder regeln zu können, müssen **Stellglieder (Aktoren)** vorhanden sein, mit denen aufgrund von gewonnenen Informationen (durch Messung oder Erfahrung) in Energie- oder Massenströme eingegriffen werden kann. Beim Kraftfahrzeug werden heute überwiegend **Elektromotore als Stellantriebe** für die verschiedensten Stellaufgaben eingesetzt (Bild 8.6).

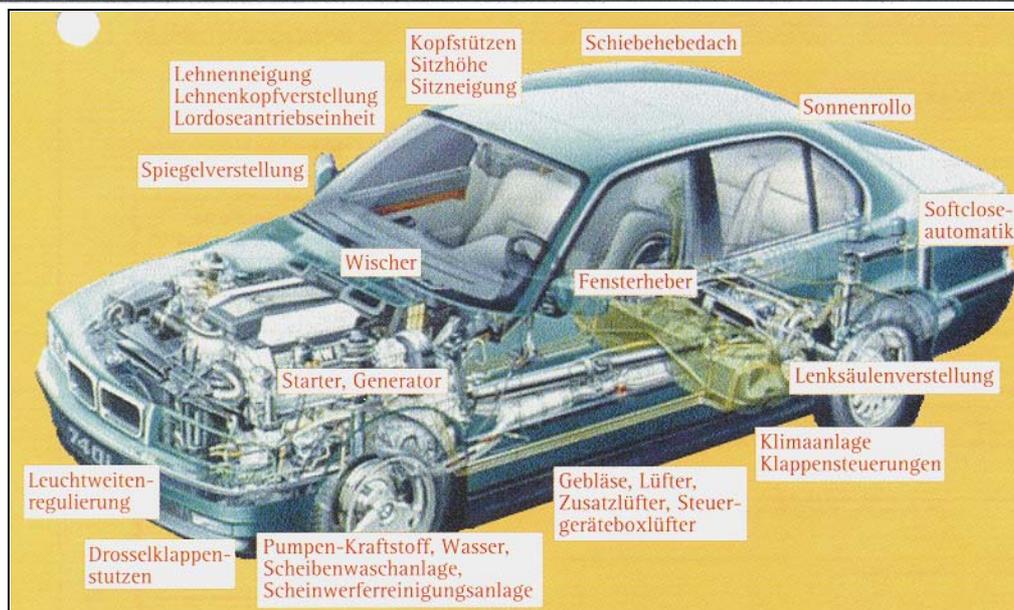
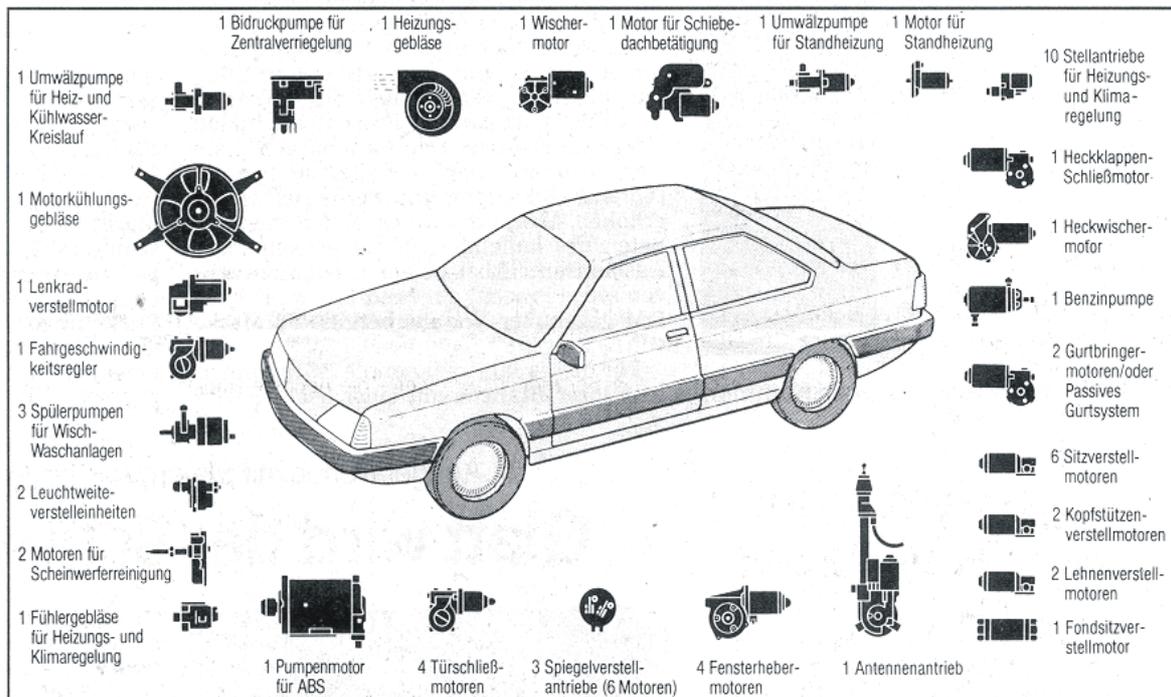


Bild 8.6: Stellantriebe im Kraftfahrzeug (oben) und typische Stellaufgaben (unten)

### Übungsaufgabe 6: Aktoren

Nennen Sie weitere Beispiele für Aktoren aus anderen Bereichen des täglichen Lebens.

## 2.5 Messglieder (Sensoren)

Zur Regelung sind **Sensoren** erforderlich, denn nur gemessene Größen können mit vorgegebenen Sollwerten verglichen und geregelt werden. Ein typisches Beispiel ist die bereits erwähnte Lambda-Regelung mit  $\lambda$ -Sonden zur Messung des Luftverhältnisses. Als Stelleingriffe dienen Drosselklappenstellung und Zündzeitpunkt oder -winkel.

Im Bild 8.7 sind für einen **Ottomotor mit Kraftstoffeinspritzung** alle wesentlichen Sensoren und Aktoren angegeben, die zum **Motormanagement** erforderlich sind. Berücksichtigt man die heute in vielen Ländern vorgeschriebene katalytische Abgasnachbehandlung durch einen **Dreibege-Katalysator**, so ist die Einhaltung von  $\lambda = 1,0$  bei betriebswarmem Motor unbedingt erforderlich /Bosc99/. Um dies zu erreichen, muss die angesaugte **Luftmenge** genau ermittelt und eine entsprechend dosierte **Kraftstoffmenge** zugegeben werden.

Die angesaugte **Luftmasse im Zylinder** wird von den Motorfachleuten als **Last** bezeichnet /Hart99/. Sie wird üblicherweise durch die Drosselklappe eingestellt und mit Hilfe von Luftmassen- und Saugrohrdrucksensoren gemessen (Bild 8.7). Zukünftige Motorkonzepte verzichten auf die Drosselklappe (wegen der relativ hohen Leistungsverluste) und auf die lediglich drehzahlabhängige (aber sonst starre) Ventilsteuerung mittels Nockenwelle. Stattdessen wird die zylinderindividuelle Direkteinspritzung und eine **variable** Ventilsteuerung angestrebt. Durch diesen entdrosselten Betrieb erwartete man (ähnlich wie bei Dieselmotoren) eine Leistungssteigerung von etwa 10% /Hart99/. Siehe hierzu auch V2.

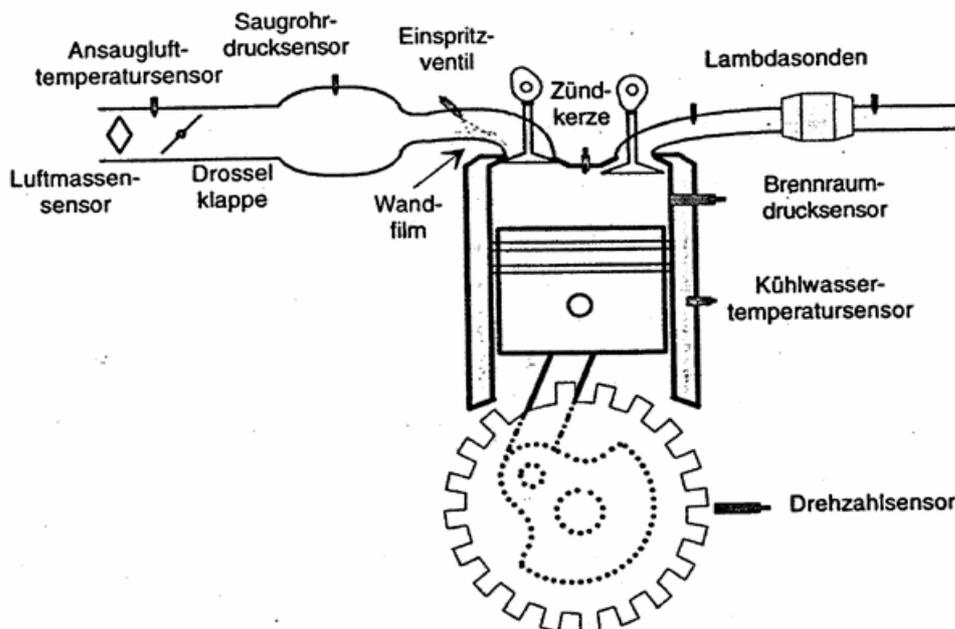


Bild 8.7: Sensoren und Aktoren eines Ottomotors mit Kraftstoffeinspritzung /Hart99/

### Übungsaufgabe 7: Sensoren

*Nennen Sie weitere Beispiele für Sensoren aus der KFZ-Technik (ABS, ESP) oder aus anderen Bereichen des täglichen Lebens (Heizung, Klimaanlage, Gebäudeautomatisierung).*

## 3. Schlupfregelsysteme

### 3.1 Reifenschlupf

Der Reifen eines angetriebenen Rades, der auf der Straße abrollt, wird deformiert und verrichtet je nach Witterungs- und Fahrbahnbedingungen mehr oder weniger „Walkarbeit“. Deshalb ist die bei einer Umdrehung tatsächlich zurückgelegte Wegstrecke kürzer als die theoretisch mögliche eines ideal rollenden Rades. Diese Differenz wird **Reifenschlupf** oder kurz **Schlupf** genannt. Man unterscheidet zwischen

$$\text{Antriebsschlupf} \quad S_A = (v_R - v_F) / v_R$$

$$\text{Bremschlupf} \quad S_B = (v_F - v_R) / v_F$$

Mit  $v_F$  wird die Fahrzeuggeschwindigkeit und mit  $v_R$  die Umfangsgeschwindigkeit des Rades bezeichnet. *Durchdrehende Räder* eines stehenden Fahrzeuges bedeuten 100% Antriebsschlupf ( $S_A = 1$ ), *blockierende Räder* eines fahrenden Wagens 100% Bremschlupf ( $S_B = 1$ ). Beide Extremsituationen müssen durch **Schlupfregelungen** vermieden werden.

Die auf die Straße übertragenen Antriebs- oder Bremskräfte  $F_A$  oder  $F_B$  hängen von der Normalkraft  $F_N$  (anteiliges Gewicht) und von der Straßenbeschaffenheit ab. Diese wird empirisch durch die Reibungszahl  $\mu$  ausgedrückt (s. auch Vorlesung 3):

$$F_{A,B} = \mu \cdot F_N$$

Außer von den Straßenverhältnissen (Asphalt, Schotter, trocken, nass, Schnee, Eis) hängt die Reibungszahl  $\mu$  auch nichtlinear vom Schlupf ab. Bild 8.8 zeigt zwei prinzipielle Verläufe für trockene und nasse Fahrbahn.

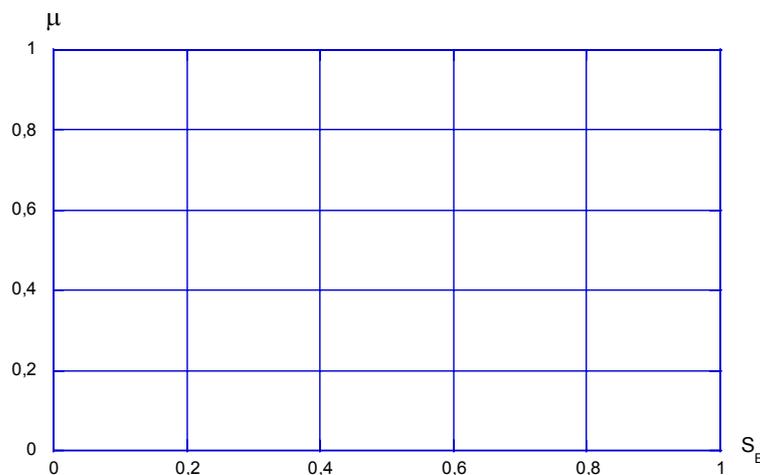


Bild 8.8: Reibungszahl  $\mu$  in Abhängigkeit vom Bremschlupf  $S_B$  bei trockener und nasser Fahrbahn (in der Vorlesung einzeichnen)

Anfahren und Beschleunigen sowie Bremsen und Verzögern sollten bei niedrigen Schlupfwerten (bis etwa 20%) erfolgen. Wird das Maximum der Kurven überschritten, nimmt die Bremskraft mit steigendem Schlupf wieder ab, man gelangt in den sogenannten **instabilen** Bereich. Dieser muss vermieden werden! **Schlupfregelungen** sorgen dafür, dass der Schlupf im stabilen Bereich bleibt.

### 3.2 Antiblockiersysteme ABS

Bei kritischen Straßenverhältnissen oder Fahrsituationen kann es während des Bremsvorgangs zum Blockieren der Räder kommen: Das Fahrzeug wird lenkunfähig, kann ins Schleudern geraten und/oder von der Fahrbahn abkommen. Das ABS erkennt frühzeitig die Blockierneigung eines Rades (oder mehrerer Räder) und vermeidet durch Beeinflussen des Bremsdruckes das Blockieren. Gleichzeitig soll die Haftreibung zwischen Reifen und Fahrbahn optimal ausgenutzt werden, um den Bremsweg zu verkürzen. Dabei muss die **Fahrstabilität** und die **Lenkbarkeit** des Fahrzeugs gewährleistet sein.

Bild 8.9 zeigt das Gesamtkonzept am Beispiel des ersten Antiblockiersystems ABS 2S von Bosch. Inzwischen gibt es zahlreiche Varianten und Weiterentwicklungen des ABS für PKW und LKW /Bosc99/.

#### Pkw mit ABS2S.

1 Drehzahlsensoren, 2 Radzylinder, 3 Hydroaggregat, 4 Hauptzylinder, 5 Steuergerät, 6 Kontrolleuchte.

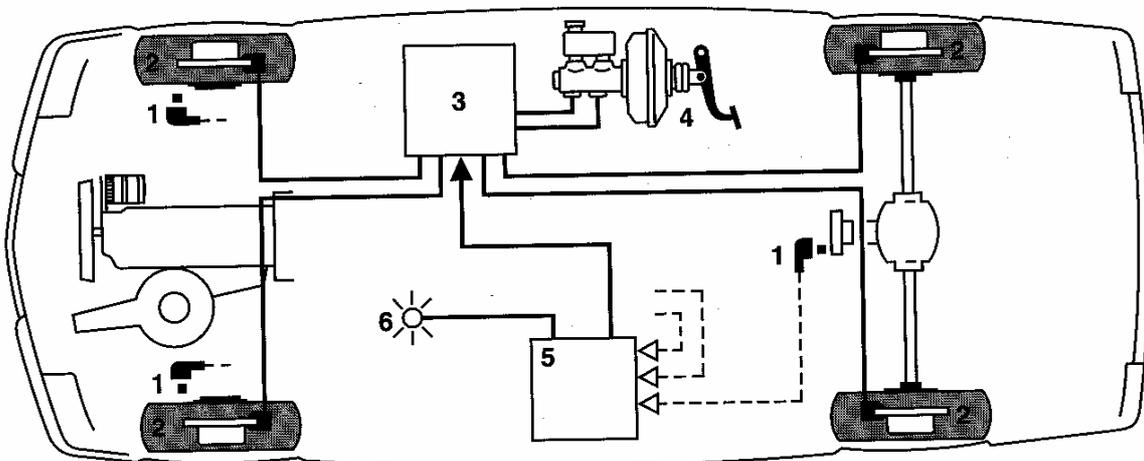


Bild 8.9: Gesamtkonzept des ABS 2S von Bosch /Bosc98/ S. 58

Das **Brake-by-Wire**-Konzept kann in zwei Stufen realisiert werden: Ausgehend von herkömmlichen hydraulischen Bremssystemen wird nur die Befehlsübertragung vom Bremspedal zur Hydraulikeinheit durch elektrische Signale ersetzt (elektro-hydraulisches Bremssystem). Zukünftig ist aber auch eine Bremse denkbar, die über elektro-mechanisch betätigte Bremszangen verfügt /BMW99/.

### 3.3 Antriebsschlupfregelung ASR und Motorschleppmomentregelung MSR

Kritische Fahrsituationen treten nicht nur beim Bremsen auf, sondern auch beim Anfahren und Beschleunigen auf nasser oder glatter Fahrbahn und bei Kurvenfahrten. Solche Situationen können den Fahrer überfordern und Fehlreaktionen auslösen. Hier hilft die **Antriebsschlupfregelung (ASR)**, manchmal auch **Traktionsregelung** genannt. Sie passt bei Bedarf das Motordrehmoment rechtzeitig an das jeweils auf die Straße übertragbare Antriebsmoment an. Die Kombination von ASR und ABS erhöht die Fahrsicherheit und erlaubt eine sinnvolle Doppelnutzung bereits vorhandener Komponenten (z.B. Raddrehzahlsensoren).

Die ASR lässt unabhängig von der Stellung des Gaspedals nur soviel Motorleistung zu, wie in der momentanen Fahrsituation ohne durchdrehende Räder möglich ist. So kann auch auf regennasser oder schneebedeckter Fahrbahn mit dem maximal möglichen Anfahrmoment beschleunigt werden, ohne ein Ausbrechen des Fahrzeugs befürchten zu müssen /BMW99/.

Wenn der Motor beim Herunterschalten zuviel Bremsmoment an den Antriebsrädern erzeugt, besteht (besonders auf glatter Fahrbahn) die Gefahr, dass die Antriebsräder blockieren und das Fahrzeug ins Rutschen kommt. Die **Motorschleppmomentregelung MSR** ist eine sinnvolle Erweiterung der ASR, sie erkennt solche kritischen Situationen durch Auswerten der Signale von den Raddrehzahlsensoren. Im Gegensatz zur ASR, wo bei Gefahr des Durchdrehens der Antriebsräder Gas weggenommen wird, wird beim MSR-Einsatz etwas Gas gegeben, bis die Räder wieder rutschfrei rollen. Bei Automatikgetrieben werden Schaltvorgänge solange unterdrückt, bis die kritische Situation behoben ist. ASR und MSR greifen bei Bedarf in die Motor- und Getriebesteuerung ein. Sie können deshalb als Vorstufen zur elektronischen Getriebesteuerung **Shift-by-Wire** (s. Bild 8.1) angesehen werden.

## 4. Fahrdynamikregelung FDR

### 4.1 Aktive und passive Sicherheitssysteme

**Aktive** Sicherheitssysteme helfen, Unfälle zu **vermeiden** und tragen damit **vorbeugend** zur Sicherheit im Straßenverkehr bei. Zwei Beispiele für aktive Fahrsicherheitssysteme, ABS und ASR, sind bereits behandelt worden; hinzu kommt die **Fahrdynamikregelung FDR**, auch **Elektronisches Stabilitätsprogramm ESP** (Bosch, DaimlerChrysler), **Dynamic Stability Control DSC** (BMW) oder **Porsche Stability Management PSM** genannt. Alle diese Systeme dienen der Stabilisierung des Fahrzeugs in kritischen Situationen und zur Erhaltung der Lenkbarkeit.

**Passive** Sicherheitssysteme (wie Sicherheitsgurte, Airbags, Knautschzonen) dienen dem Schutz der Fahrzeuginsassen vor schweren Verletzungen, wenn ein Unfall trotz der aktiven Sicherheitssysteme nicht vermieden werden konnte. Sie senken die Verletzungsgefahr und mildern die Unfallfolgen.

#### *Übungsaufgabe 8: 30-Meter-Auto*

*Die Continental AG will das 30-Meter-Auto entwickeln. Was ist damit wohl gemeint?*

## 4.2 FDR zur Erhöhung der aktiven Sicherheit

Die **Fahrdynamikregelung FDR** ist ein Regelsystem zur Verbesserung des Fahrverhaltens eines Straßenfahrzeugs, das einerseits in das **Bremssystem** und andererseits in den **Antriebsstrang** eingreift. FDR integriert ABS, ASR und MSR und gewährleistet als Gesamtsystem, dass das Fahrzeug beim Lenken nicht „schiebt“ oder **instabil** (lenkunfähig) wird und seitlich nicht ausbricht, sondern möglichst gut der vom Fahrer durch den Lenkwinkel vorgegebenen Fahrspur folgt. Insbesondere bei abrupten Ausweichmanövern (Elchtest), Spurwechseln oder plötzlichen Gefahrensituationen bei Kurvenfahrt unterstützt FDR den Fahrer und erhöht die Fahrsicherheit. Durch den gezielten selektiven Einsatz der einzelnen Radbremsen und Eingriff in den Antriebsstrang (Bremsen- und Motormanagement) wird eine **sichere Spurhaltung** und **größere Fahrstabilität** erreicht.

Um diese Vorgänge besser zu verstehen, müssen die relevanten Bewegungsfreiheitsgrade eines Fahrzeugs betrachtet werden (Bild 8.10). Für die Fahrdynamikregelung sind vor allem **Querbewegungen** und **Drehbewegungen um die Hochachse** (Gieren) von Bedeutung. FDR nutzt gewissermaßen die Bremsanlage (ABS), um das Fahrzeug zu „lenken“, z.B. durch Bremsen des linken Hinterrades beim Untersteuern oder des rechten Vorderrades beim Übersteuern in einer Linkskurve.

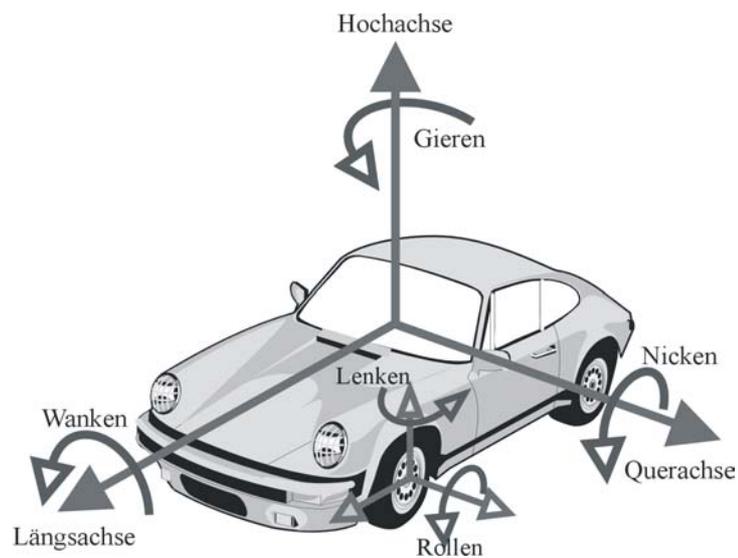


Bild 8.10: Bewegungsfreiheitsgrade eines Fahrzeugs und des einzelnen Rades

### **Übungsaufgabe 9: Elektronisches Gaspedal und Bremspedal**

*Was sind die typischen Merkmale des elektronischen Gaspedals und des elektronischen Bremspedals?*

Bild 8.11 zeigt die zur FDR erforderlichen Sensoren und Aggregate. Gegenüber dem ABS oder der ASR sind zusätzliche Sensoren zur Messung des **Lenkwinkels**, der **Giergeschwindigkeit** (Gier- oder Drehrate) und der **Querbeschleunigung** erforderlich.

Gesamtregelsystem von ESP  
(Einbauort der Komponenten).

- 1 Radbremsen,
- 2 Drehzahlsensoren,
- 3 Steuergerät,
- 4 Drosselklappensteller,
- 5 Vorladepumpe mit Vordrucksensor,

- 6 Lenkradwinkelsensor,
- 7 Bremskraftverstärker mit Hauptzylinder,
- 8 Hydroaggregat (5.3),
- 9 Drehratensensor mit Querbeschleunigungssensor.

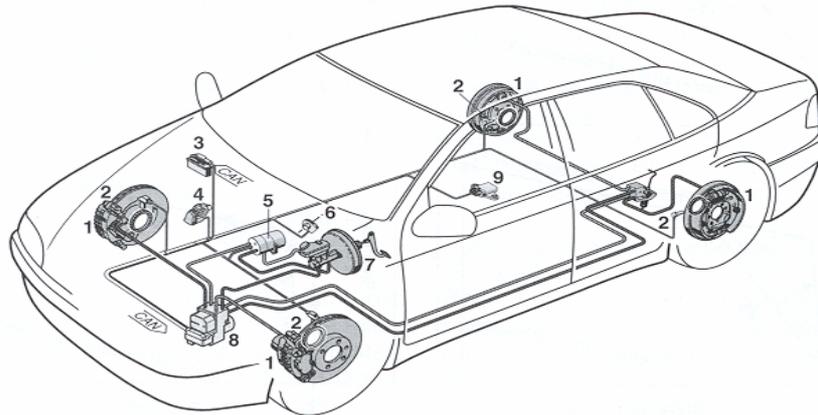


Bild 8.11: Komponenten der Fahrdynamikregelung ESP von Bosch /Bosc98, S. 226/

Der Fahrerwunsch (Sollzustand) wird aus dem **Lenkwinkel** (Richtungswunsch) und dem **Bremsdruck** (Bremswunsch), den der Fahrer auf das Pedal ausübt, abgeleitet. Die **Gierrate** gibt an, wie schnell sich das Fahrzeug um seine Hochachse dreht, die **Querbeschleunigung** dient als Maß für Kurvenradius und –geschwindigkeit. Vom ABS werden die Informationen über die Drehzahlen der einzelnen Räder übernommen. Der FDR-Rechner ermittelt aus diesen Daten den momentanen Istzustand, mit dem sich das Fahrzeug aktuell bewegt. Weicht der errechnete Istzustand vom Sollzustand (für sichere Kurvenfahrt) ab, wird die FDR aktiv und greift in das Bremssystem und die Motorsteuerung ein.

### 4.3 Integriertes Chassis Management ICM

Als Ergänzung zum **elektronischen Motormanagement EMM** und **Bremsenmanagement EBM** bietet sich als nächste Vision das **integrierte Chassis Management ICM** an /BMW99/, dass die EMM- und EBM-Funktionen mit weiteren Fahrwerksregelfunktionen vernetzt. Durch Verknüpfung der Schlupfregelungen mit **Stoßdämpferregelungen** (sog. aktive Dämpfer) oder dem **Wankausgleich** (z.B. bei Geländefahrzeugen) werden auch die weiteren Bewegungsfreiheitsgrade Nicken und Wanken (s. Bild 8.10) berücksichtigt, um den Kraftschluss zwischen Reifen und Straße bei diesen Bewegungen zu verbessern, denn ein Nicken nach vorn (beim Bremsen) belastet die Vorderräder und entlastet die Hinterräder. Umgekehrte Verhältnisse ergeben sich beim Anfahren. Bei Kurvenfahrt oder Richtungswechsel werden Wankbewegungen ausgelöst und die Belastungen der Räder auf der linken oder rechten Seite ändern sich.

## 5. Zusammenfassung und Ausblick

Seit etwa 20 Jahren halten elektronische Komponenten (Sensoren und Aktoren) und Informatikanwendungen (Rechner, Software, Steuerungs- und Regelungsverfahren) verstärkt Einzug in den Maschinenbau bzw. in Produkte des Maschinenbaus.

Ergebnisse dieser Entwicklung sind **mechatronische Systeme**, d.h. elektronisch gesteuerte oder geregelte Systeme im Maschinenbau oder **Drive-by-Wire-Systeme** in Kraftfahrzeugen, bei denen **mechanische** Elemente (Lenksäulen, Spurstangen) und **hydraulische** Komponenten (Bremsen, Getriebe, Servolenkung) durch **elektronische** Systeme ersetzt oder ergänzt werden. Einige Vorläufer von Drive-by-Wire, z. B. ABS, ASR und FDR, wurden in diesem Kapitel 8 der Vorlesung Einführung in den Maschinenbau kurz beschrieben. Weitere Informationen finden interessierte Studenten in der angeführten Literatur.

Drive-by-Wire-Systeme im Fahrzeug und elektronische Systeme im Maschinenbau bieten eine Reihe von Vorteilen sowohl bei der **Nutzung** des Fahrzeugs oder der Maschine, als auch bei deren **Konstruktion** und **Produktion**. So muss z.B. schon bei der **Produktentwicklung** und bei der späteren **Produktherstellung** berücksichtigt werden, welche elektronischen Komponenten für welche Aufgaben eingesetzt werden sollen. Ein nachträgliches Ergänzen oder Hinzufügen ist kostspielig, manchmal überhaupt nicht durchführbar oder nur bedingt erfolgreich (s. Elchtest und seine Folgen).

Der Trend zum verstärkten Einsatz elektronischer Komponenten im Maschinenbau hat deshalb auch Konsequenzen für die **Ausbildung des Maschinenbauingenieurs**: Neben Kenntnissen in den klassischen Grundlagenfächern wie Mechanik, Werkstoff-, Konstruktions- oder Produktionstechnik werden auch Grundkenntnisse in Elektronik, Informatik und Automatisierungstechnik oder Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik verlangt, damit die notwendigen (aber keineswegs hinreichenden) Voraussetzungen für späteres interdisziplinäres Arbeiten geschaffen werden.

Moderne **mechatronische Systeme der Fahrzeugtechnik**, die in dieser Vorlesung vorgestellt wurden, sind insgesamt komplexer, qualitativ hochwertiger und dennoch wirtschaftlich effizienter als ihre mechanischen oder hydraulischen Vorläufer. An diesen Beispielen erkennt man, dass neue innovative Ideen und Produkte heute nicht nur in den Kerngebieten des Maschinenbaus entstehen, sondern immer häufiger in den überlappenden Randgebieten verschiedener Disziplinen. Deshalb gewinnt **interdisziplinäres** Arbeiten immer mehr an Bedeutung.

Neben **Mechatronik** im Maschinenbau oder **Drive-by-Wire** in der Fahrzeugtechnik sind **Adaptronik** und **Bionik** weitere zukunftsweisende interdisziplinäre Arbeitsgebiete. Die **Adaptronik** beschäftigt sich mit der Entwicklung anpassungsfähiger (adaptiver) oder intelligenter Systeme, die sich über **selbstregelnde** Mechanismen an unterschiedliche Betriebs- oder Umweltbedingungen anpassen können /Neum95/. Die **Bionik** versucht, von der Natur (der Biologie) zu lernen und die gewonnenen Erkenntnisse in der Technik zu nutzen, z. B. die „Haifischhaut“ bei Flugzeugen zur Verminderung der Reibung oder der „Lotuseffekt“ zur Selbstreinigung von Oberflächen.

## 6. Literatur zum Kapitel 8: Drive-by-Wire

### Fachbücher und Beiträge in Fachzeitschriften

- /Beer00/ Beer, A.:  
X-by-Wire – die sichere Alternative?  
Auto und Elektronik, 2000, Heft 2, S. 73 - 75
- /Bosc98/ Robert Bosch GmbH (Hrsg.):  
Fahrsicherheitssysteme.  
Vieweg, Braunschweig, 2. Aufl. 1998
- /Bosc99/ Robert Bosch GmbH (Hrsg.):  
Kraftfahrtechnisches Taschenbuch.  
Vieweg, Braunschweig, 23. Aufl. 1999
- /Burc93/ Burckhardt, M.:  
Fahrwerktechnik: Radschlupf-Regelsysteme  
Vogel, Würzburg, 1993
- /FeMe97/ Fleischer, M., Meixner, H.:  
Vom Brandmelder bis zur Lambda-Sonde.  
Siemens AG, Forschung und Innovation, 1997, Heft 1, S. 26 – 30
- /Hart99/ Hart, M.:  
Auswertung direkter Brennrauminformationen am  
Verbrennungsmotor mit estimationstheoretischen Methoden.  
Dissertation, Universität Siegen, 1999
- /HGP98/ Heimann, B., Gerth, W., Popp, K.:  
Mechatronik. Komponenten – Methoden – Beispiele.  
Hanser, München, Wien, 1998
- /HHR97/ Henn, M., Heppner, H., Robineau, J.:  
Kraftfahrzeugtechnik – Vorfahrt für Sensoren.  
Siemens AG, Forschung und Innovation, 1997, Heft 1, S. 23 – 25
- /Iser99/ Isermann, R.:  
Mechatronische Systeme. Grundlagen  
Springer, Berlin-Heidelberg, 1999
- /Naab00/ Naab, K.:  
Automatisierung bei der Fahrzeugführung im Straßenverkehr.  
at-Automatisierungstechnik 48 (2000) S. 211 – 223
- /Neum95/ Neumann, D.:  
Bausteine „intelligenter“ Technik von morgen - Funktions-  
werkstoffe in der Adaptronik. Wiss. Buchgesellschaft, Darmstadt, 1995
- /SBKH01/ Svaricek, F., Bohn, C., Karkosch, H.-J., Härtel, V.:  
Aktive Schwingungskompensation in Kfz aus regelungstechnischer Sicht.  
at-Automatisierungstechnik 49 (2001) S. 249-259

## Firmeninformationen und Zeitungsartikel

- /Bart01/ Bartsch, Chr.:  
Elektronisches Pedal bremst Auto bei Gefahr ohne Zutun des Fahrers.  
VDInachrichten vom 19.01.2001
- /BMW99/ BMW AG:  
Elektronisches Bremsen Management EBM  
BMW AG, AK-2, 1999
- /DaCh00/ DaimlerChrysler AG:  
Drive by Wire. Die elektronische Deichsel. Das mitdenkende Fahrzeug.  
www.daimlerchrysler.de
- /Jaco00/ Jacobi, G.:  
Schleudernder PKW wie von Geisterhand im Griff.  
VDInachrichten vom 18.02.2000:
- /Krau99/ Krause, G.:  
Denkendes Auto lenkt den Fahrer  
VDInachrichten vom 06.08.1999
- /Ohli00/ Ohligschläger, H.:  
Netzwerke auf vier Rädern  
ADAC Motorwelt 2000, Heft 11, S. 42-45
- /Pype98/ Pyper, M.:  
Elektronik ersetzt Mechanik und Software die Hardware.  
VDInachrichten vom 23.10.1998
- /Radw01/ Radwan, Chr.:  
Auto korrigiert den Fahrbefehl.  
VDInachrichten vom 28.09.2001
- /Scam00/ Schamari, U.W.:  
"Drive-by-Wire" bestimmt die Zukunft des Automobils.  
VDInachrichten vom 03.03.2000
- /Scar99/ Scharf, A.:  
Elektronik ersetzt Hydraulik.  
VDInachrichten vom 06.08.1999
- /Scar01/ Scharf, A.:  
Sensitives Auto wird Realität  
VDInachrichten vom 01.06.2001
- /Spir88/ Spira, J.C.:  
Elektronik optimiert Federung und Dämpfung.  
VDInachrichten vom 07.10.1988
- /Wild01/ Wildhage, H.-J.:  
Elektronik hilft Getriebe in die Gänge.  
VDInachrichten vom 03.08.2001