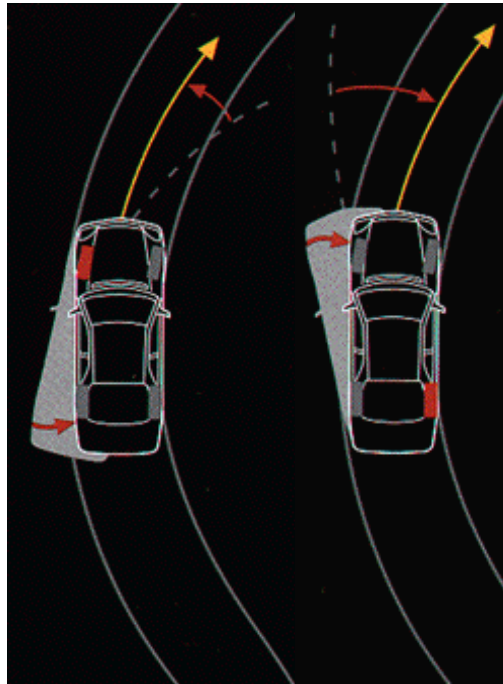


ESP und der Gierratensensor



Inhaltsangabe

1. Einleitung
2. Grundlagen der Fahrphysik
 - 2.1 Kräfte am Fahrzeug
 - 2.2 Meßgrößen
 - 2.3 Bodenhaftung
 - 2.4 Fahrzeuglängsdynamik
 - 2.5 Fahrzeugquerdynamik
3. Was macht ESP ?
 - 3.1 Beispiele für kritische Situationen
 - 3.2 Arbeitsweise
4. Aufbau und Funktion der Fahrdynamikregelung
 - 4.1 Zusammenschluß ABS und ASR mit Zusatzfunktionen
 - 4.2 Datenverarbeitung
 - 4.3 Gesamtregelkreis und Regelgrößen
5. Komponenten der Fahrdynamikregelung
6. Der Gierratensensor
 - 6.1 Physikalisches Prinzip
 - 6.2 Umsetzung und Signalauswertung verschiedener Bauformen
7. Zusammenfassung
8. Begriffserklärung
9. Literatur
10. Abbildungsverzeichnis

1. Einleitung

Die größte Fehlerquelle im Straßenverkehr ist der Mensch. 90 % aller Unfälle gehen auf mangelnde Fertigkeiten im Umgang mit Gas, Bremse und Lenkung sowie Unaufmerksamkeit, Leichtsinn und Fahrlässigkeit zurück. Da der Fehlerfaktor Mensch nur schwer oder gar nicht verkleinert werden kann, setzt man auf immer komplexer werdende aktive Sicherheitssysteme, mit denen man die Fahrfehler des Menschen korrigieren oder mindern kann.

Für die Entwicklung solcher Systeme ist es jedoch zunächst notwendig die Grundlagen des Fahrens, d. h. das Fahrverhalten des Fahrers zu kennen und einschätzen zu können. Nur dadurch wird es möglich, durch den Einsatz aktiver Systeme, den Fahrer in kritischen Situationen zu unterstützen.

Bei dieser Beobachtung läßt sich die Handlungsweise des Fahrers grundsätzlich in zwei Teile gliedern:

- das Führungsverhalten
- das Stabilisierungsverhalten

Dabei fast man unter dem Führungsverhalten zusammen, was im Allgemeinen als „Vorausschauendes Fahren“ bezeichnet wird. Darunter fallen die Entscheidungen, wie der Fahrer das Lenkrad in einer bestimmten Kurve einschlagen muß, wann er beginnen muß zu bremsen oder wann er beschleunigen muß um gefahrlos zu überholen.

Das Stabilisierungsverhalten ist zu beobachten, wenn der Fahrer beim Führungsverhalten „versagt“ hat oder plötzlich etwas Unvorhersehbares eintritt, d.h. in eine kritische Situation gerät. Hier ist nicht nur die Reaktion des Fahrers gefragt, sondern vor allem sein richtiges Handeln, um einen Unfall zu vermeiden und die Situation gefahrlos zu meistern.

Aus diesen Beobachtungen und Untersuchungen des Fahrverhaltens lassen sich folgende Anforderungen an die aktiven Sicherheitssysteme stellen:

- Agieren im Hintergrund
- Kontrolle der Fahrbewegungen
- Unterstützung des Fahrer in Problemsituationen

Das bekannteste aktive Sicherheitssystem ist sicherlich das ABS (Antiblockiersystem) welches seit Anfang der 80er Jahre in immer mehr Fahrzeugtypen und –klassen eingesetzt wird. Auch die ASR (Antischlupfregelung) findet in immer mehr Fahrzeugen Anwendung. Neu in diesem Segment wird seit etwa Mitte der 90er Jahre das ESP (Elektronisches Stabilitätsprogramm) eingesetzt. Zunächst nur in großen, teuren Autos verwendet, wird es durch sinkende Preise und immer weitergehende Entwicklung langsam aber sicher auch für Krafffahrzeuge der kleineren Klassen interessant.

An dieser Stelle wird das ESP und seine Wirkungsweise vorgestellt, vor allem im Zusammenspiel mit dem Gierratensensor (Drehratensensor), welcher genauer betrachtet werden soll.

2. Grundlagen der Fahrphysik

Wie schon bei der Betrachtung des Fahrverhaltens zur Erkennung der wichtigen Anforderungen an ein aktives Sicherheitssystem, muß zum Verständnis der aktiv eingreifenden Maßnahmen zunächst die Fahrphysik etwas unter die Lupe genommen werden.

2.1 Kräfte am Fahrzeug

Bewegungsrichtungen eines Fahrzeugs.

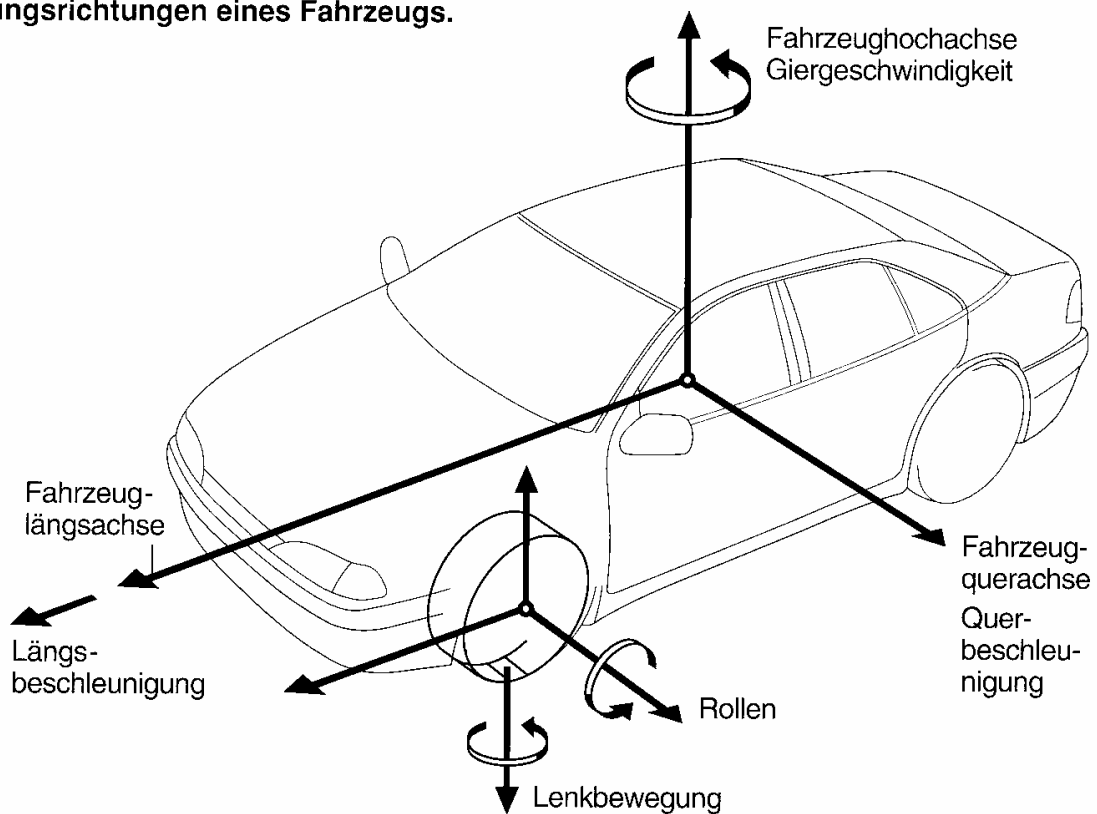


Abb. 1: Bewegungsrichtungen eines Fahrzeugs

In Abbildung 1 sind alle Bewegungsrichtungen eines Fahrzeugs dargestellt. In diesen Bewegungsrichtungen wirken die Kräfte, die an einem Fahrzeug angreifen können. Dazu gehören in Längsrichtung:

- Antriebskraft
- Luftwiderstand
- Rollreibung

In Querrichtung:

- Fliehkräfte bei Kurvenfahrt oder Seitenwind

Die Kräfte, die am Fahrzeug über Lenkung, Motor, Getriebe und Bremskraft entstehen, werden über die Reifen letztendlich auf die Straße übertragen. In der anderen Richtung wirken die Kräfte „von unten“ über die Reifen auf das Fahrzeug (Rollwiderstand, Fahrgestell).

Für die Beurteilung der Fahrdynamik oder auch Fahrstabilität müssen die Kräfte, die am Fahrzeug angreifen bekannt sein. Der Fahrer lernt mit wachsender Erfahrung die angreifenden Kräfte richtig einzuschätzen und zu deuten. Sie sind für ihn spürbar bei Seitenwind, Glätte oder Beschleunigungen und Verzögerungen. Diese Kräfte werden gefährlich, wenn sie in zu großem Maße auftreten (z.B. beim Schleudern) oder werden zumindest ausdrücklich wahrgenommen (z.B. beim Durchdrehen der Räder).

In der Beurteilung der Kräfte liegt die Arbeitsweise des ESP. Es vergleicht ständig die gewünschte Soll-Spur (Wunsch des Fahrers) mit der Ist-Spur des Fahrzeugs /<3.>,Seite 25/ und greift immer dann automatisch ein, wenn ein destabilisierender Effekt auftritt. Dazu werden ständig die angreifenden Kräfte und somit Bewegungen des Fahrzeug über Sensoren gemessen.

2.2 Meßgrößen

Die Hauptbeurteilungsgrößen der Fahrdynamik sind dabei:

- Lenkwinkel
- Quereschleunigung
- Längsbeschleunigung bzw. –verzögerung
- Giergeschwindigkeit¹
- Schwimmwinkel²

Über den Vergleich dieser Daten mit den, vom Fahrer über sein Handeln, vorgegebenen Daten (Lenkbewegung, Bremsen, Beschleunigen) entscheidet das ESP über einen Eingriff und somit eine stabilisierende Wirkung. Auf die Bedeutung der verschiedenen Meßgrößen für die Arbeitsweise des ESP wird bei der Erläuterung der Funktionsweise genauer eingegangen.

2.3 Bodenhaftung

An der Bodenhaftung entscheidet sich die Sicherheit eines Fahrzeugs. Wie oben erwähnt werden alle Kräfte, die am Fahrzeug angreifen, über die Reifen auf die Fahrbahn bzw. den Untergrund übertragen. Somit sind die physikalischen Begebenheiten der Grenzen zwischen Reifen und Lauffläche für die Fahrdynamik eines Fahrzeugs verantwortlich. Alle Kräfte, die auf das Fahrzeug wirken, wirken an den vier Reifen des Wagens mit verschiedenem Betrag und verschiedener Richtung. Dies sind die Aufstandskraft (Normalkraft), die Längskraft und die Seiten- bzw. Querkraft.

Solange die Bodenhaftung des Wagens ein Gleichgewicht der Kräfte, welche am Reifen angreifen, garantiert, bleibt das Fahrzeug stabil. Bis zu dieser physikalischen Grenze werden dementsprechend alle angreifenden Kräfte am sich drehenden Rad von der

Fahrbahn aufgenommen und durch betragsgleiche, aber entgegengesetzt wirkende Kräfte ausgeglichen. Jenseits dieser physikalischen Grenze ist das Kräftegleichgewicht nicht mehr gegeben und das Fahrzeug wird instabil.

2.4 Fahrzeuglängsdynamik

Zur Fahrzeuglängsdynamik gehören alle Bewegungen und Beschleunigungen in Längsrichtung. Dabei ist die Verzögerung der wichtigere Parameter bei der Fahrdynamikbeobachtung, denn die Länge des Bremsweges wirkt sich direkt auf die Verkehrssicherheit aus.

Die Höchstwerte der Beschleunigung oder Verzögerung sind erreicht, wenn die Antriebs- oder Bremskräfte an den Reifen so hoch sind, daß die Räder auf der Fahrbahn gerade noch haften. Die praktisch erreichbaren Werte liegen dabei unter den theoretischen, da nicht bei jeder Beschleunigung oder Verzögerung alle Räder gleichzeitig den maximal möglichen Kraftschluß nutzen. Die aktiven Sicherheitssysteme (ABS, ASR und ESP) regeln im Bereich dieser maximal übertragbaren Kräfte.

2.5 Fahrzeugquerdynamik

Bei der Fahrzeugquerdynamik werden die Kräfte betrachtet, welche in seitlicher Richtung auf einen Wagen wirken. Dazu gehört z.B. die Auswirkung von Seitenwind auf ein Fahrzeug. Die Kraft, welche durch auftretenden Seitenwind hervorgerufen wird, kann man sich in einem Punkt angesetzt denken. Als günstigster Ansatzpunkt gilt dabei bei Fahrzeugen mit untersteuerndem³ Verhalten, ein Punkt kurz hinter dem Schwerpunkt, bei übersteuernden³ Fahrzeugen ein Punkt kurz vor dem Schwerpunkt. Je nach Bauform liegt der Angriffspunkt aber meist nicht im für die Querdynamik günstigsten Punkt. Deshalb wäre ein schneller Eingriff bei plötzlich auftretendem Seitenwind wünschenswert, da die Reaktionszeit des Fahrers oft nicht ausreicht um ein Ausbrechen des Wagens zu verhindern.

Eine weitere Betrachtung der Querdynamik muß für ein Fahrzeug bei Kurvenfahrt gemacht werden. Die Fliehkraft die dabei auftritt setzt im Schwerpunkt des Fahrzeugs an. Sie ist abhängig von:

- dem Kurvenradius
- der Geschwindigkeit
- der Höhe des Fahrzeugschwerpunktes
- der Fahrzeugmasse
- der Spurbreite des Wagens
- der Reibpaarung Reifen/ Fahrbahn (Witterung, Straßenbelag,...)
- der Lastverteilung im Fahrzeug

Wenn die Fliehkraft die Seitenkräfte an den Rädern übersteigt, droht Gefahr, daß das Fahrzeug nicht mehr in der Sollspur gehalten werden kann. Hier müßte durch aktiven Eingriff eine stabilisierende Wirkung des Fahrzeugs erreicht werden.

3. Was macht ESP ?

1. Wohin lenkt der Fahrer ?
2. Fährt das Auto auch wirklich in die gewünschte Richtung ?

Dies sind die Fragen, welche sich die Elektronik des ESP ständig stellt. Durch gezielten Eingriff auf Bremsen und Motormanagement versucht ESP, wenn Abweichungen zwischen der tatsächlichen Fahrtrichtung und der gewünschten Fahrtrichtung auftreten, die Stabilität des Fahrzeuges wieder herzustellen.

3.1 Beispiele für kritische Situationen

Um den Eingriff des ESP genauer zu erläutern werden hier einige Fahrsituationen dargestellt. Dabei ist zu sehen, daß ein mit ESP ausgestatteter Wagen in kritischen Situationen besser beherrschbar ist.

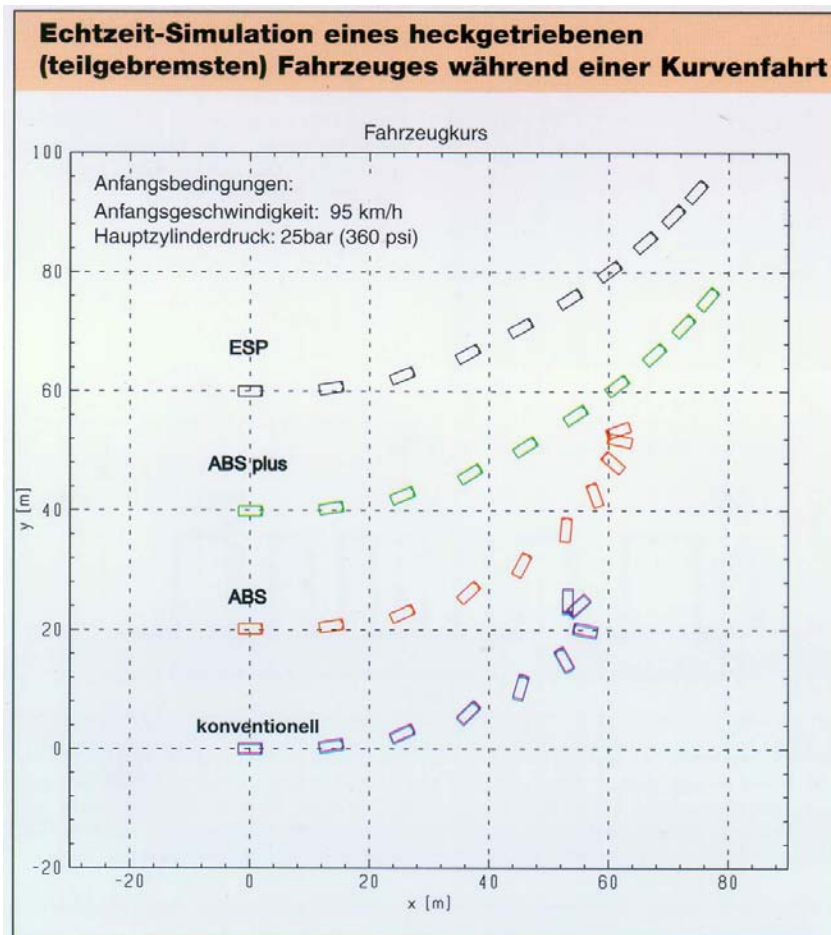


Abb. 2:
Echtzeit-Simulation

Im obigen Bild ist zunächst eine Simulation der Fahrwege verschieden ausgestatteter Fahrzeuge mit gleichen Anfangsbedingungen dargestellt. Dabei erkennt man die unterschiedlichen Abweichungen von einem stabilen Bremsvorgang. Das mit ABS Plus ausgestattete Fahrzeug hält zwar genau wie das mit ESP ausgestattete Fahrzeug die Spur, jedoch ist der Bremsweg ein kleines bißchen länger.



Abb. 3: PKW mit und ohne ESP

Im Bild sieht man einen PKW einmal mit ESP ausgestattet und einmal ohne ESP. Beim mit ESP stabilisierten Wagen ist der Fahrer auch bei höherer Geschwindigkeit noch in der Lage das Fahrzeug um den Pylonen-Kurs zu steuern.

Fahrspurverlauf beim Durchfahren einer Rechts-Links-Kurvenfolge (links ohne, rechts mit ESP).

- ▮ Bremskrafterhöhung
- ① Fahrer lenkt, Seitenkraftaufbau,
- ② drohende Instabilität, ESP-Eingriff vorne links
- ③ Gegenlenken, links: Fahrzeug gerät außer Kontrolle, rechts: Fahrzeug bleibt unter Kontrolle,
- ④ links: Fahrzeug nicht mehr beherrschbar, rechts: ESP-Eingriff vorne rechts, vollständige Stabilisierung.

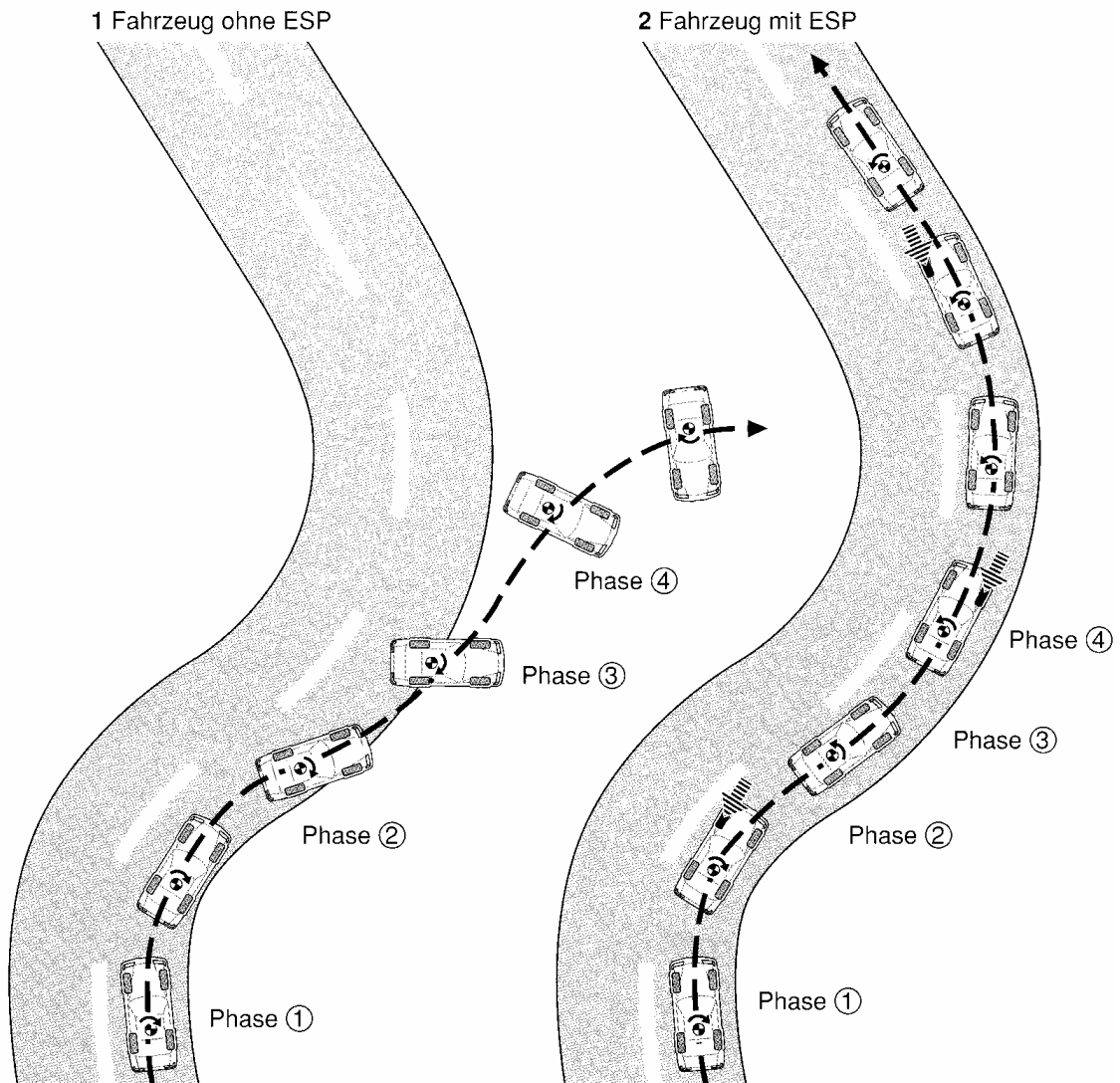


Abb. 4: Verhalten in einer schnell durchfahrenen S-Kurve

Fahrzeug ohne ESP:

Bereits nach dem ersten ruckartigen Lenkeinschlag droht das Fahrzeug ohne ESP instabil zu werden (Phase 2). An den Vorderrädern werden durch den Lenkeinschlag plötzlich sehr große Seitenkräfte erzeugt, an den Hinterrädern bauen sie sich dagegen erst verzögert auf. Das Fahrzeug dreht sich rechts um seine Hochachse herum (eindrehendes Giermoment). Auf das Gegenlenken reagiert das unregulierte Fahrzeug nicht, d.h. es ist nicht mehr beherrschbar. Die Giergeschwindigkeit und der Schwimmwinkel steigen stark an, das Fahrzeug schleudert.

Fahrzeug mit ESP:

Das Fahrzeug mit ESP wird bei der drohenden Instabilität (Phase 2) nach dem ersten Lenkeinschlag durch Bremsen des linken Vorderrades stabilisiert. Dieses Bremsen wird als aktives Bremsen bezeichnet, weil es ohne Einwirkung des Fahrers geschieht. Der Eingriff baut das eindrehende Giermoment ab. Die Giergeschwindigkeit wird reduziert und der Schwimmwinkel begrenzt. Nach dem Gegenlenken wechselt zuerst das Giermoment und dann die Giergeschwindigkeit die Wirkrichtung (Phase 3). Ein weiterer kurzer Bremseneingriff in Phase 4 am rechten Vorderrad führt zu einer vollständigen Stabilisierung.

In der nächsten Darstellung werden zwei Fahrzeuge verglichen, die während einer Vollbremsung einem Hindernis ausweichen müssen. Vor dem Einsatz des ABS war dieses Manöver gar nicht denkbar, da bei blockierenden Rädern ein Ausweichen durch Lenkeinschlag nicht mehr möglich war. Mit Einsatz des ABS gelang dies plötzlich und man konnte auch bei starken Bremsmanövern einem Hindernis ausweichen. Dieses Ausweichen stellt jedoch immer noch große Anforderungen an den Fahrer, da ein stabilisiertes Ausweichen nicht gesichert ist. Mit dem neuen ESP wird diese Möglichkeit des Ausweichens noch einmal verbessert, d.h. das Fahrzeug auch während des Bremsvorgangs stabilisiert, und man erkennt einen kürzeren Bremsweg bei dem mit ESP ausgestatteten Fahrzeug.

Fahrzeug mit ABS, aber ohne ESP:

Schon nach dem ersten Lenkeinschlag werden Giergeschwindigkeit und Lenkeinschlag so groß, daß der Fahrer gegenlenken muß. Durch diesen Fahrereingriff entsteht ein Schwimmwinkel in die Gegenrichtung, der sehr stark zunimmt. Der Fahrer ist gezwungen, wieder schnell gegenzulenken. Es gelingt ihm gerade noch, das Fahrzeug zu stabilisieren und auf der Fahrbahn zum Stehen zu bringen.

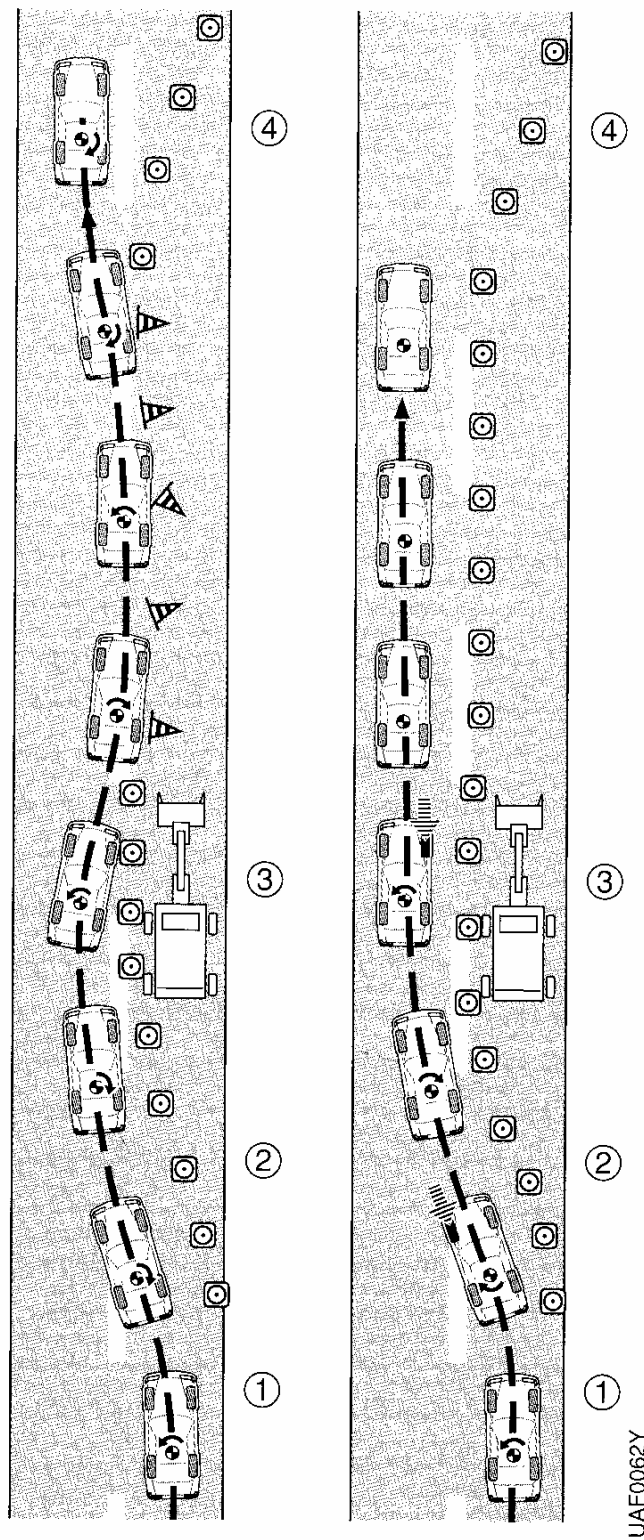
Fahrzeug mit ESP:

Das mit ESP geregelte Fahrzeug bleibt stabil, da die Giergeschwindigkeit und der Schwimmwinkel auf leicht beherrschbare Werte reduziert werden. Der Fahrer kann sich ganz auf seine eigentliche Lenkaufgabe konzentrieren, weil er nicht durch ein instabiles Fahrverhalten überrascht wird. Der Lenkaufwand und damit die Anforderungen an den Fahrer sind dank ESP deutlich geringer. Außerdem hat das Fahrzeug, das mit ESP ausgestattet ist, wie schon erwähnt einen kürzeren Bremsweg.

Fahrspurwechsel mit Vollbremsung bei $v_0 = 50 \text{ km/h}$ und $\mu_{HF} = 0,15$.

▨▨▨▨ Bremsenschlupferhöhung

1 Fahrzeug ohne ESP, 2 Fahrzeug mit ESP.



UAF0062Y

Abb. 5: Ausweichen eines Hindernisses mit gleichzeitiger Vollbremsung

3.2 Arbeitsweise

Die Fahrdynamikregelung ist ein System, welches die Bremsanlage eines Fahrzeugs nutzt um dieses zu „lenken“. Dabei wird die eigentliche Aufgabe der Bremsanlage, das Fahrzeug zum Stehen zu bekommen, in den Hintergrund gestellt. Vorrangiges Ziel ist in diesem Moment, das Fahrzeug unter allen Umständen stabil zu halten. Dabei werden gezielt einzelne Räder abgebremst, z.B. wie unten zu sehen, das linke Hinterrad bei Untersteuerung in einer Linkskurve oder das rechte Vorderrad bei Übersteuerung. Ein Abkommen von der Fahrbahn kann aber auch hier nur innerhalb der physikalischen Grenzen vermieden werden.

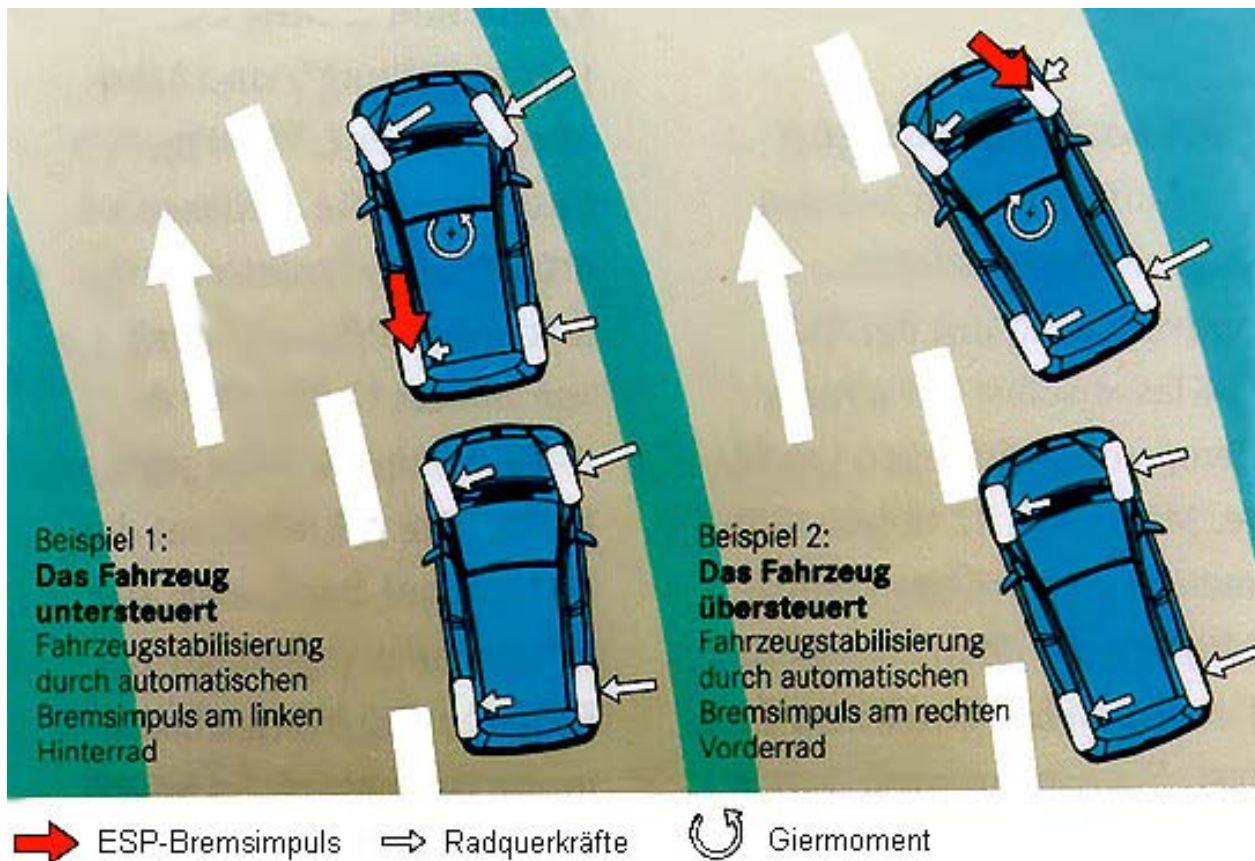


Abb. 6: Arbeitsweise des ESP

Das in der Abbildung gezeigte Gierrmoment ist das Moment, welches durch den gezielten Bremsingriff aufgebaut wird. Es wirkt dem, durch das untersteuernde bzw. übersteuernde Verhalten, aufgebauten Moment entgegen, welches hier nicht eingezeichnet ist.

Neben dem Eingriff in die Bremsanlage des Fahrzeugs, greift das elektronische Stabilitätsprogramm auch in das Motormanagement ein. Dabei wird zum Beispiel die Motorleistung gedrosselt, um ein Gierrmoment, welches bereits auf den Wagen wirkt und welches schon durch gezieltes Bremsen verringert wird, nicht noch durch beschleunigen des Wagens größer werden zu lassen.

Beide Eingriffmöglichkeiten des ESP wollen wir uns an einem letzten Beispiel noch einmal verdeutlichen. Hierbei versucht der Fahrer das Fahrzeug auf griffiger Fahrbahn und mit langsam zunehmender Geschwindigkeit bis in den Grenzbereich auf einer Kreisbahn von 100 m Radius zu halten.

Fahrzeug ohne ESP:

Das Fahrzeug kommt ab einer Geschwindigkeit von etwa 95 km/h in den physikalischen Grenzbereich und untersteuert zuerst. Der erforderliche Lenkaufwand nimmt sehr stark zu. Gleichzeitig wird der Schwimmwinkel viel größer. Der Fahrer kann das Fahrzeug gerade noch auf der Kreisbahn halten. Bei etwa 98 km/h wird das ungeriegelte Fahrzeug instabil. Das Heck bricht aus, der Fahrer muß gegenlenken und den Kreis verlassen.

Fahrzeug mit ESP:

Das geregelte Fahrzeug verhält sich bis zu der Geschwindigkeit von etwa 95 km/h genau wie das ungeriegelte. Der Wunsch des Fahrers nach noch weiterer Geschwindigkeit wird jedoch nicht erfüllt, da sich das Fahrzeug bereits an der Stabilisierungsgrenze befindet und das ESP eine weitere Beschleunigung durch Eingriff in das Motormanagement nicht zuläßt. Durch die aktiven Brems- und Motor-Eingriffe ergeben sich kleine Abweichungen vom gegebenen Kurs, die der Fahrer jedoch leicht korrigieren kann.

4. Aufbau und Funktion der Fahrdynamikregelung

4.1 Zusammenschluß ABS und ASR mit Zusatzfunktionen

Das ESP besteht im Grunde aus den beiden aktiven Sicherheitssystemen ABS und ASR und bietet auch in vollem Umfang diese Funktionen. Zusätzlich zu den Sensoren, die für diese beiden Systeme angewandt werden, sind beim ESP noch zwei weitere Sensoren vorhanden, der Gierratensensor und der Querschleunigungssensor. Durch ein Steuergerät werden alle erforderlichen Daten verarbeitet und an die, für die jeweilige Situation notwendigen, Aktoren weitergegeben.

ABS-Regelkreis.

- 1 Hydroaggregat mit Magnetventilen,
- 2 Hauptzylinder, 3 Radzylinder, 4 Steuergerät,
- 5 Drehzahlsensor.

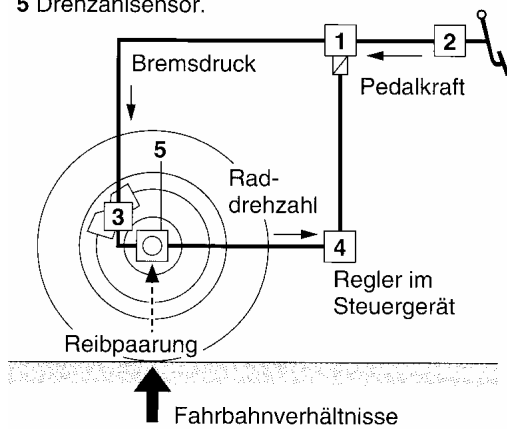


Abb. 7: Regelkreis ABS

Elektronische Motorleistungssteuerung EGAS für ASR.

- 1 ABS/ASR-Steuergerät,
- 2 Motronic-Steuergerät mit EGAS,
- 3 Fahrpedalsensor,
- 4 Stellmotor,
- 5 Drosselklappe (oder Dieseleinspritzpumpe),
- 6 Drehzahlsensor.

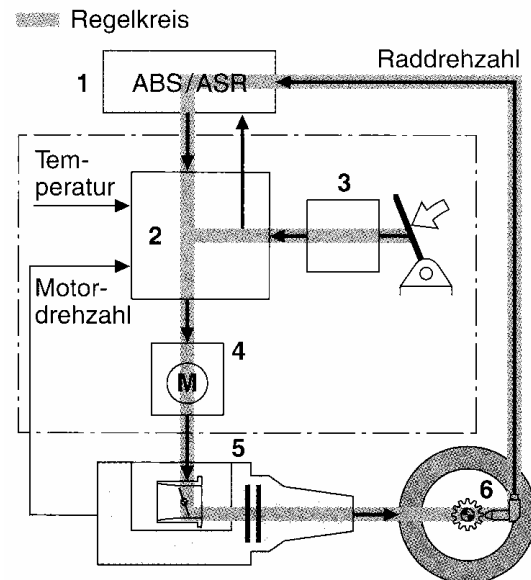


Abb. 8: Regelkreis ASR

Wie man den Abbildungen sieht, ist auch bereits im ASR das ABS enthalten, so daß man von einer Entwicklung sprechen kann, die vom ABS über das ASR zum ESP reicht. Jedes folgende System hat auch die Funktionen des Vorgängers und wurde mit weiteren Sensoren und Aktoren versehen, um neue Aufgabengebiete abzudecken. Dabei stiegen natürlich auch die Aufgaben der Steuerung.

ABS:

Das ABS verhindert lediglich das Blockieren der Räder. Dabei überwacht es mit Hilfe von Raddrehzahlsensoren die Räder und mindert gegebenenfalls den Bremsdruck blockierender Räder. Das Fahrzeug bleibt dadurch lenkbar.

ASR:

Neben der Funktion des ABS verhindert dieses System nun auch das Durchdrehen der Räder beim Anfahren. Dazu wird ebenfalls das Signal der Drehzahlsensoren an den Rädern ausgewertet und es wird auf die Bremse und auf das Motormanagement eingegriffen, d.h. es werden durchdrehende Räder abgebremst und die Motorleistung wird reduziert.

ESP:

Durch die beiden zusätzlichen Sensoren (Gierratensensor und Querbeschleunigungssensor) werden an die Steuerung nicht nur Signale über die Fahrzeuglängsdynamik, sondern auch über die Fahrzeugquerdynamik geleitet. Über die Auswertung kann die Steuerung nun die momentane Fahrsituation ermitteln und durch Ansteuerung der Aktoren darauf Einfluß nehmen. Dabei werden die gleichen Aktoren benutzt, wie sie auch bei der Antischlupfregelung eingesetzt werden.

4.2 Datenverarbeitung

Signalverarbeitung im Steuergerät.

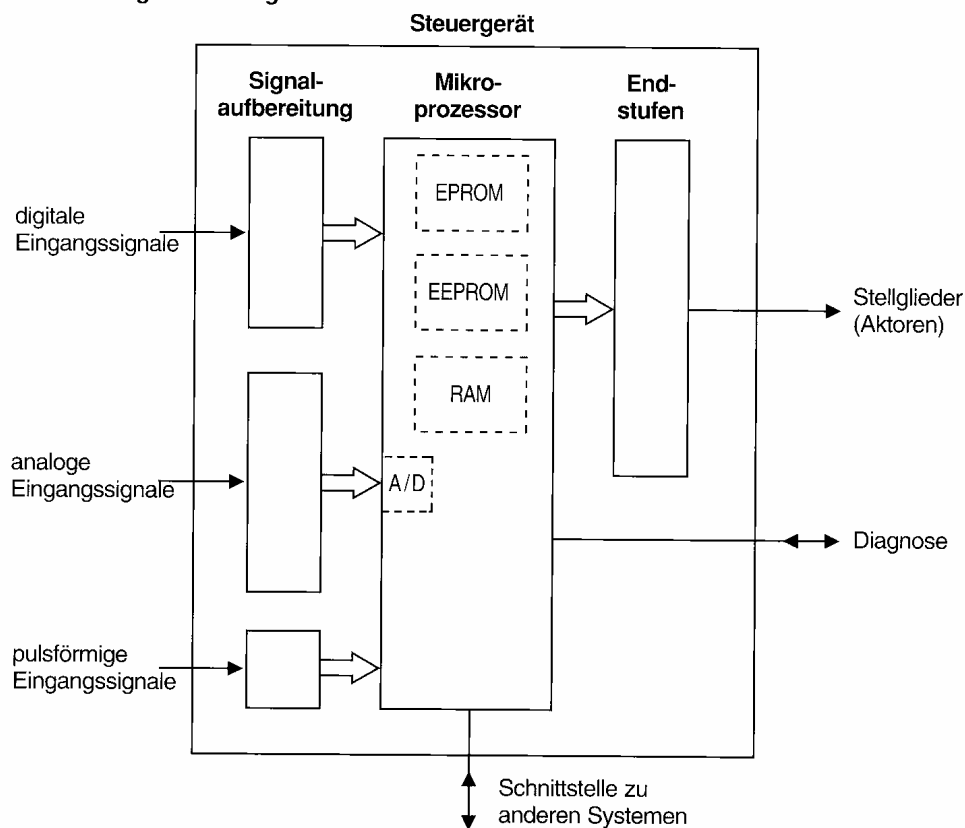


Abb. 9: Datenverarbeitung

Die Signale, die von den Sensoren übertragen werden, werden aufbereitet und vom Mikroprozessor der Steuerung verarbeitet. Die Ausgangssignale des Prozessors werden auf Endstufen geleitet, welche dann die entsprechenden Stellglieder ansprechen.

4.3 Gesamtregelkreis und Regelgrößen

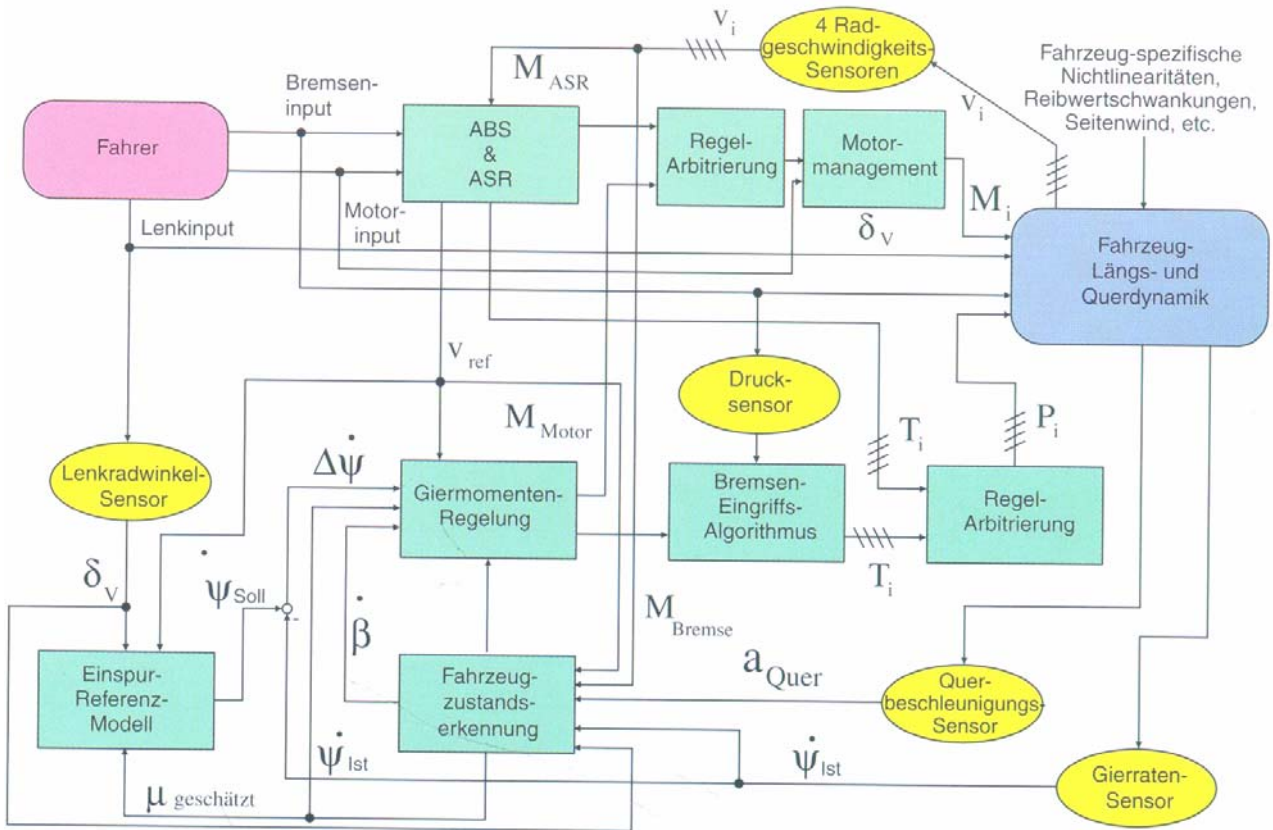


Abb. 10: Gesamtregelkreis

Der Fahrer gibt die gewünschte Richtung und Geschwindigkeit vor und damit die Führungsgröße (Ziel). Alle Störgrößen (blau), sowie die Führungsgröße, die vom Fahrer vorgegeben wird, werden über die Sensoren (gelb) aufgenommen und an die Steuerung weitergegeben. So wird der Zustand und die nötigen Eingriffe in die momentane Fahrsituation ermittelt. Die Steuerung gibt die entsprechenden Regelsignale nach Auswertung an die Aktoren aus (Regelabitrierung⁵).

5. Komponenten der Fahrdynamikregelung

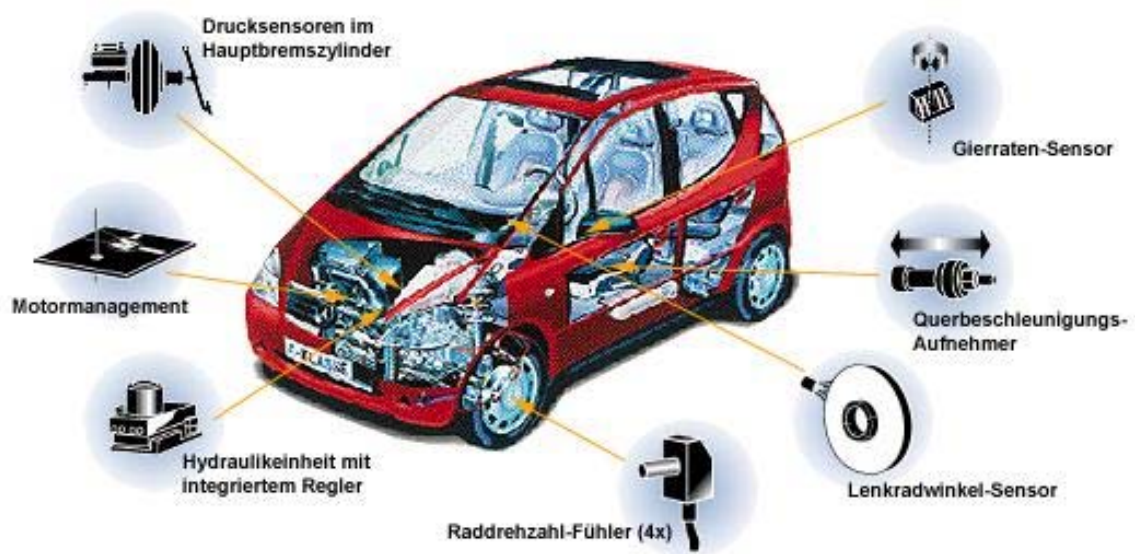


Abb. 11: Komponenten der Fahrdynamikregelung

Die einzelnen Komponenten der Fahrdynamikregelung sind:

- Gierratensensor: Messung der Giergeschwindigkeit (Drehrate)
- Drucksensor: Messung des Bremsdruckes im Hauptbremszylinder
- Querbeschleunigungssensor: Messung der Querbeschleunigung (z.B. bei Seitenwind oder in einer Kurve)
- 4 Drehzahlsensoren: Messung der Drehzahl jedes Rades
- Lenkradwinkelsensor: Messung des Lenkeinschlages (Fahrerwunsch)
- Elektronisches Steuergerät: Verarbeitung aller Signale und Ausgabe der Ansteuerungssignale an die Aktoren (oben nicht abgebildet)
- Hydroaggregat(Hydraulikeinheit): Umsetzung der Befehle des Steuergerätes. Ansteuerung der jeweiligen Bremszylinder unabhängig vom Fahrer vorgegebenen Bremsdruck
- Vorladepumpe/Ladepumpeinheit: Zum Druckaufbau im Bremszylinder, daß auch bei Nichtbetätigung der Bremse immer genug Druck zum aktiven Bremsen bereitsteht.

6. Der Gierratensensor

6.1 Physikalisches Prinzip

Die Funktionsweise der Gierratensensoren beruht auf der Auswirkung einer Drehbewegung auf ein schwingendes System. Bevor auf die Erklärung des verwendeten Prinzips eingegangen wird, werden zunächst ein paar Randerläuterungen machen, welche das Verständnis erleichtern könnten.

Wenn sich ein Teilchen auf der drehenden Erde von einem Punkt zum anderen bewegt, wird es abgelenkt. Die Kraft, die dies bewirkt, wird Corioliskraft genannt (nach Gaspard Gustave de Coriolis, 1835). Auf der Nordhalbkugel lenkt sie ein bewegtes Teilchen nach rechts ab, auf der Südhalbkugel nach links. Für einen Beobachter, der sich nicht auf der drehenden Erde befindet, bewegt sich das Teilchen aber geradlinig durch den Raum. Es wird also nur bezüglich der Erdoberfläche nach rechts bzw. nach links abgelenkt, nicht aber gegenüber dem nicht mitdrehenden Beobachter/ <10.+11.>, Seite 25/.

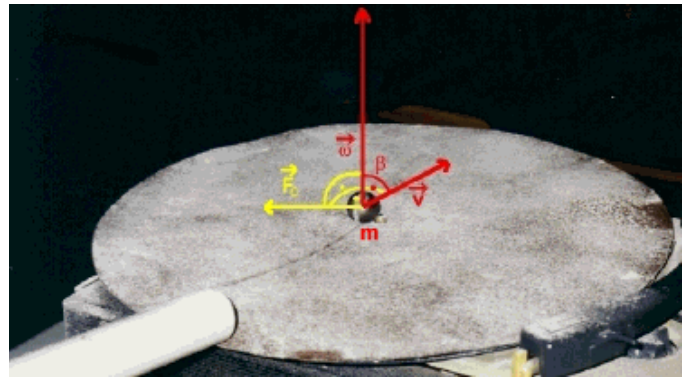
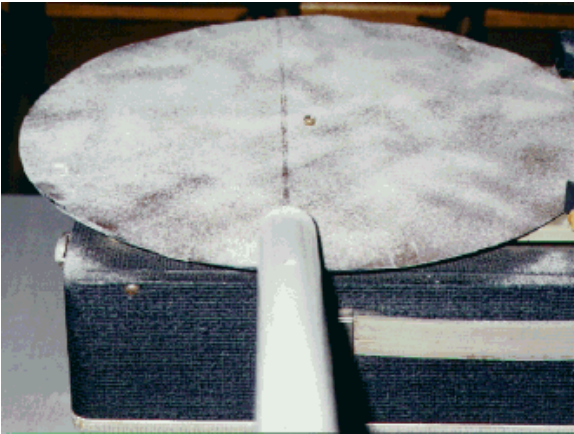


Abb. 12: Plattenspieler ohne Ablenkung

Abb. 13: Plattenspieler mit Ablenkung

Ähnlich dieser Ablenkung, die auf bewegte Körper auf der Erde wirkt, kann man eine Ablenkung dieser Art aber auch in kleineren Systemen feststellen, welche sich drehen.

Nimmt man zum Beispiel einmal die obigen Abbildungen. Der Plattenspieler in der linken Abbildung dreht sich nicht. Die Kugel, die auf die Platte rollt, macht eine geradlinige Bewegung, die auch in dem Mehl zu sehen ist. Jetzt wird, wie in Abbildung 13 zu sehen ist, der Plattenspieler laufen gelassen. Auf der Platte zeichnet sich eine Bewegung ab, wie sie ein träger Körper durchlaufen würde, der in dieses sich drehende System (im Uhrzeigersinn) eindringt. Der Körper kommt von einem Gebiet schnellerer Drehgeschwindigkeit in ein Gebiet langsamerer Drehgeschwindigkeit. Deshalb nimmt der Radius der Kurve nach innen ab.

Nun unterscheidet man wieder die Beobachtersposition. Ein Beobachter, der nur auf die Kugel schaut und sich außerhalb des drehenden System befindet, sieht eine genauso geradlinige Bewegung, wie in Abbildung 12. Befindet sich aber der Beobachter auf dem Plattenspieler und dreht sich mit, so wird für ihn der Körper nach der Seite abgelenkt, während er ruhig steht. Die Kurve, die auf dem Plattenspieler zu sehen ist, ist im übrigen

für keinen der beiden Beobachter so zu sehen. Sie ist die Bewegung, die der Plattenspieler und die Kugel zueinander machen.

Doch nun zu dem, bei dem Gierratensensor, ausgenutzten Effekt.

Man betrachte eine Stimmgabel, welche in ihrer Eigenfrequenz zu Schwingungen angeregt wird. Die Schwingungsebene der Stimmgabel befindet sich natürlich in der Ebene des Schwingungskörpers und die beiden Zinken schwingen immer in entgegengesetzter Richtung (Abb. 14).

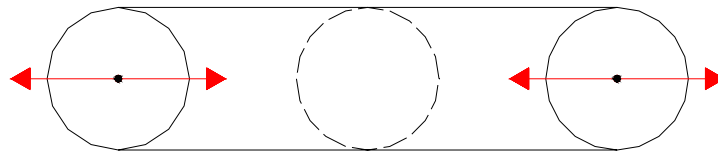


Abb. 14: Stimmgabel von oben betrachtet (ohne Drehung)

Doch was passiert, wenn man die Stimmgabel plötzlich dreht?

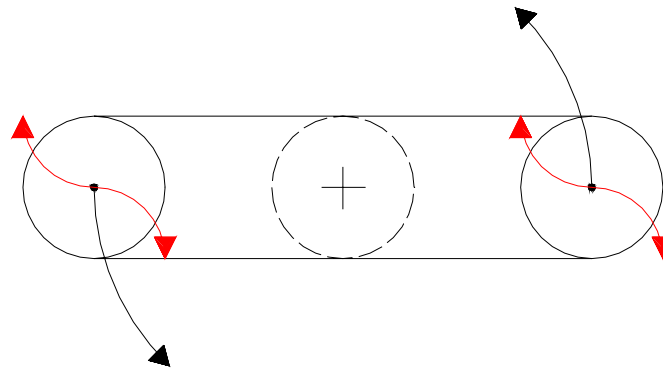


Abb. 15: Stimmgabel von oben betrachtet (mit Drehung)

Betrachte man einmal nur den rechten Zinken und nehme an er wäre, während seiner Schwingung, gerade auf dem Weg nach außen. Nun kommt er von einem Gebiet niedriger Drehgeschwindigkeit in ein Gebiet höherer Drehgeschwindigkeit ($v = \omega r$). Die Trägheit der Masse des Stimmgabelast sorgt nun dafür, daß er entgegen der Drehgeschwindigkeit abgelenkt wird, d.h. er kann die Geschwindigkeit nicht so schnell aufnehmen (beschleunigt werden).

Nun bewegt sich der Ast während seiner Schwingung wieder in die andere Richtung. Dabei bewegt er sich umgekehrt von einem Gebiet höherer Geschwindigkeit (in Drehrichtung) in ein Gebiet niedrigerer Geschwindigkeit. Wiederum durch die Trägheit der Masse wird die Drehgeschwindigkeit, die er von außen kommend hat, nicht abrupt abgebremst.

Die richtigere Bewegung des Stimmgabelast sieht man in Abbildung 16. Wie hier nocheinmal zu erkennen hat sich die Hauptschwingungsrichtung gedreht.

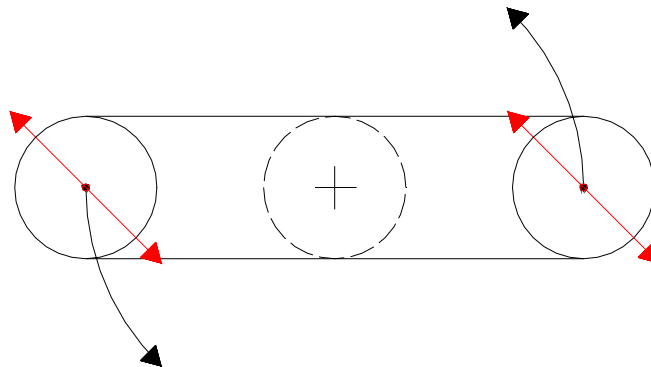


Abb. 16: Drehende Stimmgabel (vereinfachte Darstellung)

Die Drehung der Schwingungsrichtung ist proportional zur Winkelgeschwindigkeit der Stimmgabel. So hat man, wenn man die Änderung der Schwingungsrichtung detektiert, ein genaues Maß für die Richtung und die Geschwindigkeit der Drehung. Um so schneller die Bewegung, um so größer ist auch die Änderung der Schwingungsrichtung. Ebenso kann man durch die Richtung, in der sich die Schwingungsrichtung ändert auch auf die Richtung der Drehung schließen.

Achtung: Die Änderung der Schwingungsrichtung ändert sich für einen Beobachter in dieser Art nur, wenn er sich mit der Gabel mit dreht. Sollte der Beobachter sich außerhalb des System befinden, dann würde sich der Stimmgabelast in einer völlig anderen Art und Weise bewegen, weil dann die drehende Bewegung durch den Raum noch hinzukäme.

6.2 Umsetzung und Signalauswertung verschiedener Bauformen

Das oben beschriebene Prinzip findet vor allem Anwendung in Mikromechanischen Drehratensensoren. Die Struktur aus mehreren Schichten ist dabei so aufgebaut, daß die Stimmgabel in eine Siliziumscheibe eingätzt ist. Eine Vertiefung unterhalb der Stimmgabelzinken gewährleistet die Schwingfähigkeit des Sensors.

Die Detektion der Schwingungsrichtung wird dabei folgender Maßen realisiert. Beginnt sich das System zu drehen, ändert sich die Schwingungsrichtung wie oben beschrieben. Dieses „Ausweichen“ der Zinken äußert sich letztendlich in einer Drehung um die Längsachse, die fest mit der Siliziumscheibe verbunden ist. Die Stärke dieser Drehung dient als Meßgröße für die Drehrate.

Detektiert wird diese Drehung mit Hilfe einer kapazitiven Auswertung. Die Drehung ändert die Kapazität in einer Meßbrücke und über diese Änderung kann die Drehrichtung und Geschwindigkeit, d.h. die Drehrate bestimmt werden. Im unteren Bild erkennt man zwischen Rahmen und Schwingkörper der Schwingstruktur die gegeneinander gerichteten Waferteile, welche die kapazitive Auswertung ermöglichen.

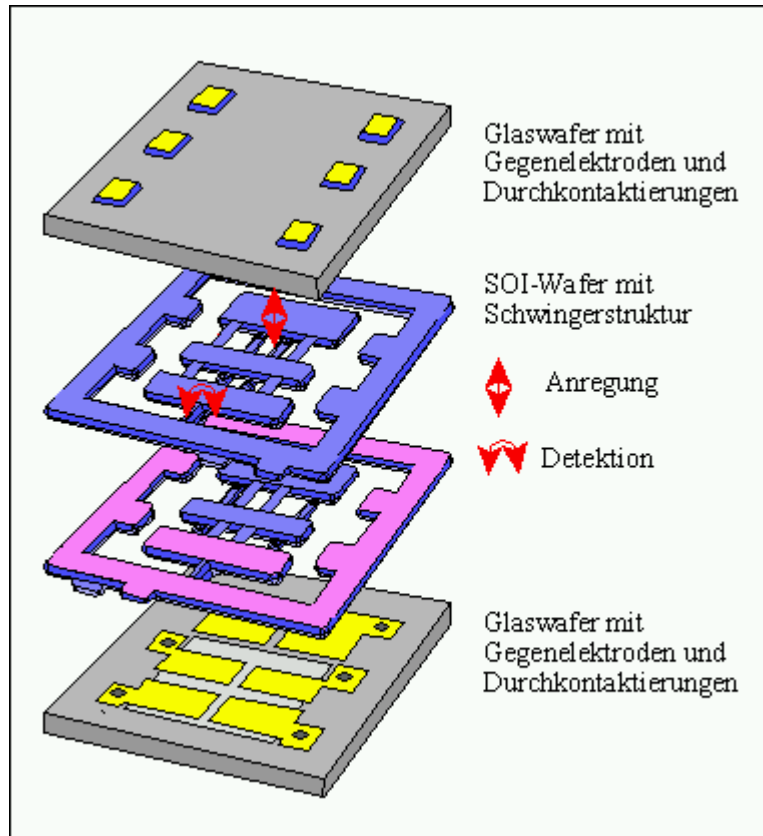


Abb. 17: Sensordesign und Wirkprinzip eines Mikromechanischen Drehratensensor mit kapazitiver Auswertung

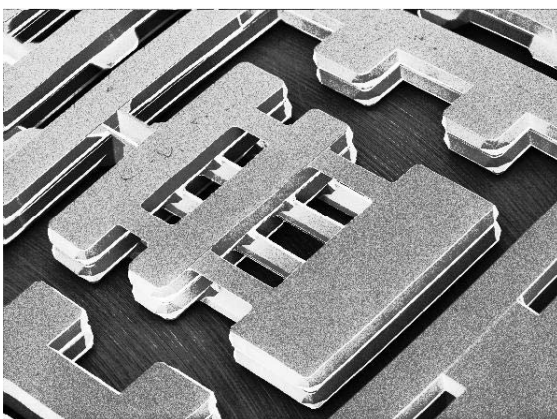


Abb. 18: Schwingerstruktur

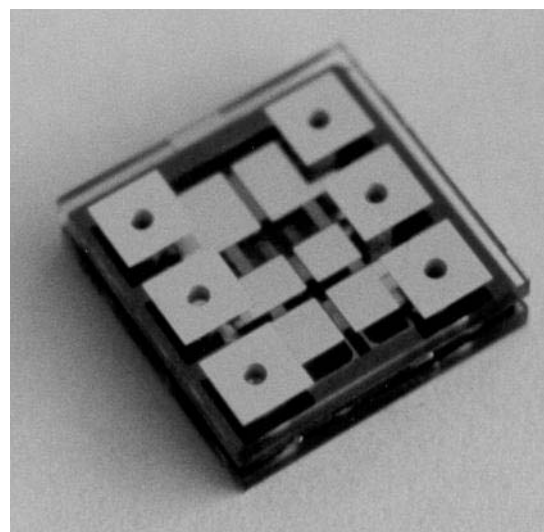


Abb. 19: Mikromechanischer Drehratensensor (11 x 11 x 3,2 mm)

Die technischen Daten des abgebildeten Sensors sind:

- Meßbereich: bis 1000 °/s
- Genauigkeit: 1 °/s ... 0,1 °/s
- Schockbeständigkeit: 1000 g

Die Drehrate von 0,1 °/s, welche die größte Genauigkeit dieses Sensors wiedergibt, bedeutet, daß eine Drehbewegung eines Minutenzeigers detektiert wird, also 360 °/h /<7>,Seite 25/.

Im folgenden Bild sehen sie einen weiteren mikromechanischen Drehratensensor. Hier ist der Schwingungskörper keine Stimmgabel, aber er arbeitet nach dem gleichen Prinzip. Zusätzlich beinhaltet er noch einen Beschleunigungssensor. So können bei Einbau in ein Kraftfahrzeug gleich die beiden zusätzlichen Sensoren beim ESP auf einmal erschlagen werden.

Mikromechanischer Drehratensensor.

- 1 Schwingrichtung,
- 2 Schwingkörper (schwingende Masse),
- 3 Beschleunigungssensor,
- 4 Feder,
- 5 Richtung der Coriolis-Beschleunigung.

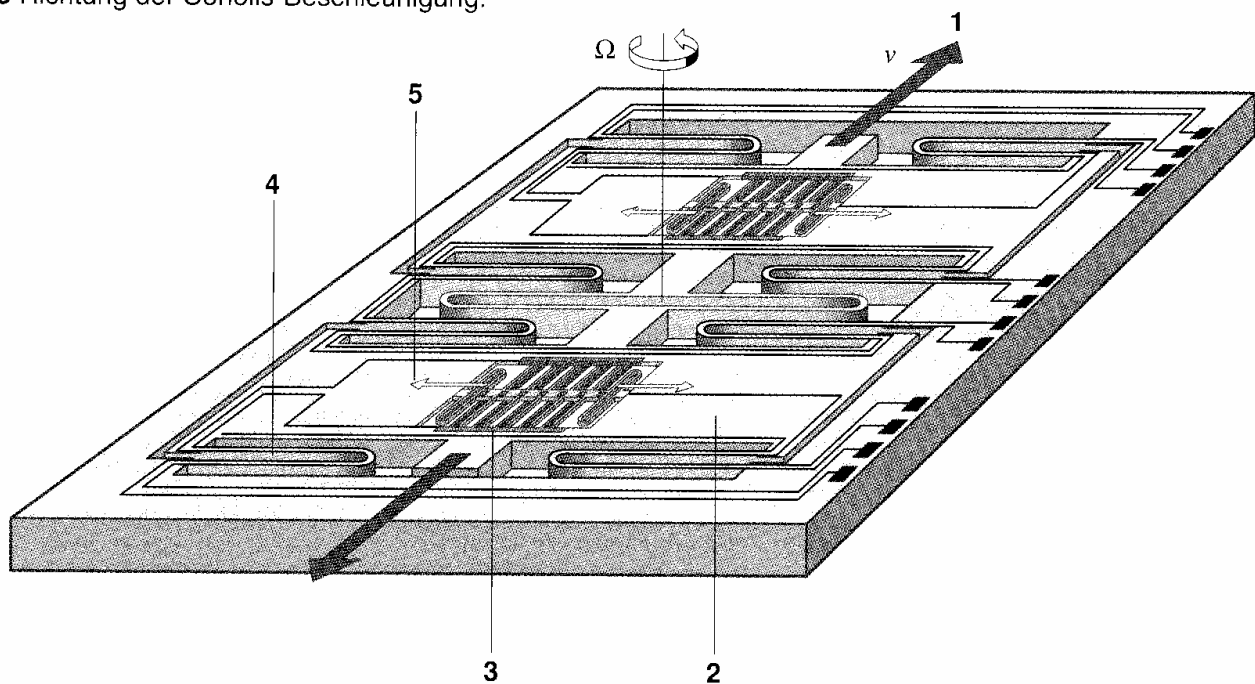


Abb. 20: Mikromechanischer Drehratensensor inkl. Beschleunigungssensor

Neben der kapazitiven Auswertung und dem mikromechanischen Aufbau gibt es noch weitere Prinzipien. Dabei ist der mikromechanische Sensor vom Bauraum her der Günstigste. An Genauigkeit kann er dem optischen Drehratensensor (vgl. Sensortechnik 2, Löffler-Mang) jedoch nicht das Wasser reichen. Mit dem nach dem Sagnac-Effekt arbeitenden Sensor konnte man bis jetzt Drehraten von bis zu 0,01 °/h messen. Nachteil

ist der etwas größere Bauraum. Diese Art der Drehratensensoren wird bis jetzt nicht in Kraftfahrzeugen eingebaut, wobei aber in naher Zukunft sicher damit zu rechnen sein wird.

Eine weitere Bauform ist der piezoelektrische Drehratensensor, der jedoch in Größe und Genauigkeit schon weit hinter dem mikromechanischen zurückbleibt. Er wird wohl nicht mehr lange in diesem System eingesetzt.

Piezoelektrischer Drehratensensor.

- 1...4 Piezoelementpaare,
 - 5 Anschlußstifte,
 - 6 Schwingzylinder,
 - 7 Grundplatte.
- Ω Drehrate.

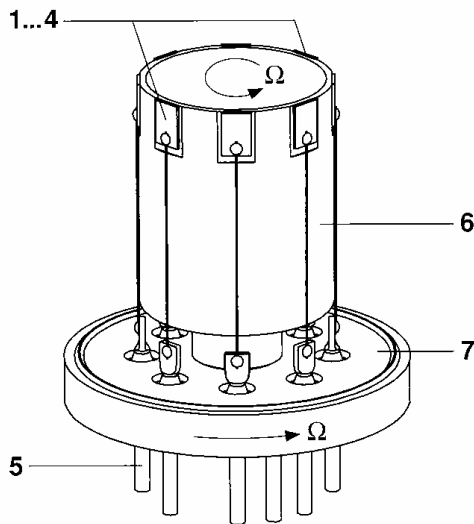


Abb. 21: Piezoelektrischer Drehratensensor

Schwingkörper ist bei dieser Ausführung ein Hohlzylinder, der am Rand zu amplituden geregelten Schwingungen (ähnlich den hörbaren Schwingungen eines Weinglases, wenn man mit dem nassen Finger an seinem Rand vorbeistreicht) angeregt wird. Diese Schwingungen werden durch die Drehbewegung verstimmt. Über diese Verstimmung wird die Drehrate gemessen. Dies geschieht dadurch, das man die Schwingungen über einen Servokreis nachregeln muß. Über die Größe der Nachregelung schließt man auf die Verstimmung und somit die Drehrate.

7. Zusammenfassung

Eine gute Fahrzeugführung hängt davon ab, ob das Fahrzeug einer Fahrspur folgt, die möglichst präzise mit dem Lenkwinkelverlauf übereinstimmt und ob das Fahrzeug stabil bleibt, also bei Lenkbewegungen weder „schiebt“ noch instabil wird. Die Querdynamik des Fahrzeugs ist dabei besonders von Bedeutung. Sie wird, wie gesehen, durch die seitliche Bewegung (Schwimmwinkel) und die Drehbewegung des Fahrzeugs um die Hochachse senkrecht zur Fahrbahn (Giergeschwindigkeit) beschrieben.

Mit Einsatz des Gierratensensors ist es den Entwicklern in der Automobilindustrie gelungen diese beiden, für die Fahrdynamik wichtigen Parameter, zu messen und über den Einsatz des ESP Einfluß darauf zu nehmen. Die Sicherheit in der Fahrzeugindustrie wurde damit wieder etwas verstärkt, auch wenn das System im Moment hauptsächlich noch als Zusatzausstattung oder als Serienausstattung im Bereich der gehobenen Klassen eingesetzt wird. Die weitere Entwicklung wird sicher dafür sorgen, daß auch bei Kleinwagen in naher Zukunft mit dem Einsatz des Elektronischen Stabilitätsprogramms gerechnet werden kann.

Bleibt zu guter letzt noch der Faktor Mensch, der den Ingenieuren und Entwicklern den Kummer bereitet. Durch ESP hat er die Möglichkeit schneller durch Kurven zu fahren und nutzt somit das System oft in einem Sinne aus, für den es nicht entwickelt wurde. Deshalb hört man auch Stimmen aus den Reihen der Entwickler, daß sie am liebsten für einige Zeit die Motorleistung drastisch herunterregeln würden, wenn ESP mal wieder für den Fahrspaß ausgenutzt wird. Denn das ESP ist kein „elektronisches Fahrwerkstuning“, sondern ausschließlich für den Notfall gedacht.

8. Begriffserklärung

1. Giergeschwindigkeit/ Gierrate/ Drehrate

„gieren“ nennt man die Drehbewegung des Fahrzeugs um seine Hochachse. Die Giergeschwindigkeit ist somit die Geschwindigkeit dieser Drehung.

2. Schwimmwinkel

Die Abweichung zur Fahrt auf der Normallinie wird als Schwimmwinkel bezeichnet.

3. untersteuern/übersteuern:

Als untersteuernd wird ein Fahrzeug bezeichnet, bei dem mit zunehmender Querbeschleunigung der Schräglaufwinkel⁴ an der Vorderachse stärker anwächst als der Schräglaufwinkel an der Hinterachse. Das umkehrte Verhalten wird als Übersteuernd bezeichnet.

D.h. ein untersteuerndes Fahrzeug rutscht bei steigender Querbeschleunigung über die Vorderräder weg, beim übersteuernden Fahrzeug bricht das Heck aus

4. Schräglaufwinkel

Der Winkel zwischen der resultierenden Radgeschwindigkeit (gewünschte Richtung) und der Geschwindigkeit in Längsrichtung (momentane Richtung) wird Schräglaufwinkel genannt.

5. Regelabitrierung:

Von Abitrium: Schiedsspruch, Gutachten

9. Literatur

1. Technology 2000+ Informationsbroschüre, *Continental TEVES*
2. Fahrdynamikregelung ESP, Technische Unterrichtung
Robert Bosch GmbH, Bestellnr.: 1 987 722 052 (Bosch)
ISBN 3-934584-15-2
3. Die Komponenten des Elektronischen Stabilitätsprogramms ESP, *Audi*
4. Das Elektronische Stabilitätsprogramm – ESP, *Technik*
www.vw-hartmann.de/technik/technik.html, 26.10.00, 20.03 Uhr
5. Das Electronic Stability Program ESP – Ohne Schleudern sicher ans Ziel,
www.ddd-online.com/ContiTeves/27009.html, 26.10.00, 19.40 Uhr
6. Ohne Schleudern sicher ans Ziel – Aktive Hilfe in Notsituationen
www.ddd-online.com/ContiTeves/27129.html, 26.10.00, 19.45 Uhr
7. Mikromechanischer Drehratensensor
www.infotech.tu-chemnitz.de/~zfm/forschung/drehrate.html, 04.01.01, 10.37 Uhr
8. Neuartiger Sensor für Drehbewegungen
www.daimler-benz.com/research/text/70826_g.htm, 30.12.00, 10.26 Uhr
9. Sensoren für inertielle Messungen
<ftp://int53.imt.ing.tu-bs.de/pub/literatur/dau96.pdf>, 30.12.00, 10.30 Uhr
10. Die Corioliskraft, Caroline Göttlein
www.hausarbeiten.de/cqi-bin/superDBdruck.pl/archiv/physik/physik-coriolis/physik-coriolis.shtml, 17.01.01, 11.13 Uhr
11. Die Corioliskraft,
www.windpower.dk/de/tour/wres/coriolis.htm, 17.01.01, 11.17 Uhr

10. Abbildungsverzeichnis

Abb.	Dargestellt	Seite
1	Bewegungsrichtungen eines Fahrzeugs	4
2	Echtzeit-Simulation	7
3	PKW mit und ohne ESP	8
4	Verhalten in einer schnell durchfahrenen S-Kurve	8
5	Ausweichen eines Hindernisses mit gleichzeitiger Vollbremsung	10
6	Arbeitsweise des ESP	11
7	Regelkreis ABS	13
8	Regelkreis ASR	13
9	Datenverarbeitung	14
10	Gesamtregelkreis	15
11	Komponenten der Fahrdynamikregelung	16
12	Plattenspieler ohne Ablenkung	17
13	Plattenspieler mit Ablenkung	17
14	Stimmgabel von oben betrachtet (ohne Drehung)	18
15	Stimmgabel von oben betrachtet (mit Drehung)	18
16	Drehende Stimmgabel (vereinfachte Darstellung)	19
17	Sensordesign und Wirkprinzip eines Mikromechanischen Drehratensensor mit kapazitiver Auswertung	20
18	Schwingstruktur	20
19	Mikromechanischer Drehratensensor (11 x 11 x 3,2 mm)	20
20	Mikromechanischer Drehratensensor inkl. Beschleunigungssensor	21
21	Piezoelektrischer Drehratensensor	22