

Sensoren für die Spurtreue

Damit ein Auto auch in kritischen Situationen und unter schwierigen Bedingungen nicht ins Schleudern gerät, wird der Fahrer mittlerweile durch eine ausgetüftelte Elektronik unterstützt. Dabei messen mikromechanisch hergestellte Sensoren die während der Fahrmanöver auftretenden Beschleunigungen.



Ein plötzliches Hindernis lässt dem Reaktionsvermögen eines Autofahrers oft keine Chance mehr für ein angemessenes Ausweichmanöver. Mittlerweile hilft intelligente Elektronik dabei, solche kritische Situationen besser zu meistern. (Fotos: Bosch)

Einer der größten Risikofaktoren beim Auto ist wohl der Fahrer selbst. Bei immerhin 28 % aller Verkehrsunfälle ist zunächst gar kein weiterer Verkehrsteilnehmer beteiligt, vielmehr verlieren viele Fahrer die Kontrolle über ihren Wagen, weil sie zu schnell gefahren sind oder den Zustand der Straße falsch eingeschätzt haben. Kommt der Wagen erst ins Schleudern, ist es meist zu spät. Der Wagen bricht aus der Fahrbahn aus und prallt allzuoft mit der Seite auf einen anderen Wagen oder ein Hindernis. Dann fängt auch keine Knautschzone den Stoß ab. Immerhin 60 % der tödlichen Verletzungen bei Verkehrsunfällen sind, so eine Schätzung der deutschen Versicherungswirtschaft, auf Seitenaufprall zurückzuführen.

Um den Verlust der Fahrkontrolle zu verhindern, hat sich seit Mitte der Neunzigerjahre das so genannte ESP durchgesetzt. Damit ist nicht etwa das Phänomen der „Extra Sensitive Perception“ („außersinnlichen Wahrnehmung“) gemeint, sondern es handelt sich vielmehr um das Elektronische Stabilitätsprogramm.

Mit Hilfe ausgefeilter Elektronik kontrolliert dieses Programm etwa 25-mal pro Sekunde das Fahrverhalten des Wagens und vergleicht es mit der Absicht des Fahrers, die es aus dessen Lenk- und Bremsverhalten erschließt. Wenn der Fahrer das Auto in einer kritischen Situation, etwa bei glatter Fahrbahn oder weil ein Kind auf die Straße

läuft über- oder untersteuert, dann kann das ESP durch radspezifische Bremsmanöver oder Eingriff in die Motorregelung einem Ausbrechen des Fahrzeugs entgegenwirken.

Herzstück des ESP sind Sensoren, welche in der Lage sind, Beschleunigung und Drehung des Fahrzeugs zu messen. Dank der Mikrosystemtechnik werden diese Sensoren immer kleiner und preiswerter und lassen sich zumeist mit den gängigen Verfahren der Chiptechnologie fertigen.¹⁾ Ob Temperatur, Druck, Drehzahl, Winkel, Kraft – mittlerweile dürfte es bei modernen Autos kaum noch eine Kenngröße geben, die nicht von Sensoren überwacht wird, um etwa einen sparsameren Betrieb oder sicherere Fahrt zu ermöglichen. Selbst beim Einparken hilft inzwischen ein Abstandssensor.

Feinfühligkeit Kapazitäten

Sensoren messen z. B. beim Antiblockiersystem (ABS) die Beschleunigung in Längsrichtung oder registrieren die charakteristische hohe Bremsverzögerung bei Unfällen – oft mehr als das 30-fache der Erdbeschleunigung g –, damit der Airbag zuverlässig auslöst.²⁾ Das ESP benötigt dagegen Sensoren, welche die Querschleunigung des Fahrzeugs in einem Bereich von etwa $-2g$ bis $+2g$ messen.³⁾

Das Prinzip der Beschleunigungssensoren beruht auf einer „seismischen“ Masse, die über eine Feder elastisch an ein Gehäuse angekoppelt ist. Eine Beschleunigung des Systems in einer Richtung führt aufgrund der Trägheit zur Auslenkung der Testmasse aus ihrer Ruhelage in eine der Beschleunigung entgegengesetzte Richtung. Diese Auslenkung gegen die rückstellende Wirkung der Feder ist ein Maß für die Kraft, die auf die Testmasse wirkt und somit für die Beschleu-

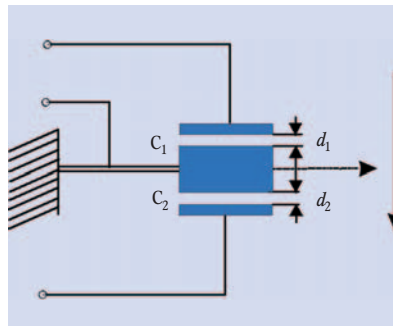
nigung des Systems. Moderne Systeme verwenden stattdessen Blattfedern bzw. schwingende Plättchen als Testmasse, die über Biegebalken mit dem Körper des Sensors verbunden sind. Zum einen sind die Vorteile dieser Konstruktionen die relativ einfache Massenfertigung aus einem Stück durch Ätzverfahren, die gleich bleibende Qualität und die kompakte und stabile Bauweise. Zum anderen lässt sich die Auslenkung des Plättchens in diesen Systemen inzwischen durch eine ganze Reihe von unterschiedlichen Methoden sehr genau und sehr zuverlässig nachweisen.

Bei den sehr verbreiteten kapazitiven Beschleunigungssensoren fungiert die seismische Masse als Elektrode eines oder mehrerer Kondensatoren nach dem Schema unten links. Durch geeignete elektronische Schaltungen lässt sich hier die Auslenkung der Testmasse direkt in ein proportionales Spannungssignal umwandeln. Für kapazitive Sensoren, die in Massenproduktion hergestellt werden, muss das gesamte System in einer Ebene liegen. Erst dann kann man es in möglichst wenigen Arbeitsschritten z. B. aus einem einzigen Silizium-Substrat herstellen. Das führt zu Kondensatoren in Form von ineinander greifenden, beweglichen Kammstrukturen. Da die Kapazitäten der Kammelektroden im pF-Bereich liegen, muss die Messelektronik eng mit dem Sensorelement verbunden sein. Die erreichbare Messempfindlichkeit ist in der Praxis meist durch die Eigenfrequenz des Sensors beschränkt, mit der sie über die Federkonstante verknüpft ist: je niedriger die Eigenfrequenz, desto höher die Empfindlichkeit. Auf die im Prinzip erreichbaren Empfindlichkeiten muss man jedoch häufig verzichten, weil die dafür notwendigen geringen Eigenfrequenzen dann

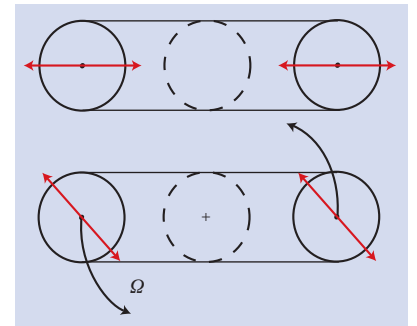
1) vgl. Physik Journal, November 2002, S. 40

2) siehe Physikalische Blätter, September 2001, S. 62

3) $1 g = 9,81 \text{ m/s}^2$ ist die Erdbeschleunigung.



Schema eines kapazitiven Beschleunigungssensors. Die seismische Masse m wird bei Beschleunigung ausgelenkt und verursacht eine messbare Änderung der Kapazitäten C_1 und C_2 .



Die Funktionsweise eines Drehratensensors lässt sich anhand einer Stimmgabel (hier schematischer Blick von oben), die plötzlich um ihre Hochachse gedreht wird, veranschaulichen (vgl. Text.)

im Bereich von typischen Störfrequenzen mechanischer Systeme (etwa Automotoren) lägen.

Die Auslenkung des Plättchens, also der „Testmasse“, lässt sich aber auch auf andere Weise direkt messen, etwa magnetisch, induktiv oder optisch. In optischen Sensoren z. B. verläuft ein Lichtwellenleiter über der Testmasse und zeigt an deren beweglichem Ende auf einen Wellenleiter im stationären Rahmen des Sensors. Bewegt sich die Testmasse, dann wird am Spalt eine geringere Lichtintensität in den zweiten Wellenleiter eintreten. Verwendet man kohärentes Licht, dann lässt sich die Auslenkung auch anhand der entstehenden Interferenzstreifen oder durch die Doppler-Verschiebung der Frequenz des reflektierten Lichts bestimmen. Zwar sind alle diese Systeme im Prinzip eindimensional, aber diese Beschränkung ist natürlich

leicht zu umgehen, indem man zwei oder drei Sensoren rechtwinklig zueinander ausrichtet. Erst damit lassen sich die Beschleunigungssensoren für Navigations- und Fahrdynamik-Systeme, wie ESP und ABS, nutzen.

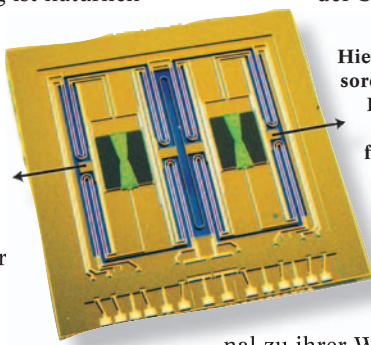
Dabei gilt es, die Sensoren von Umwelteinflüssen weitgehend unabhängig zu machen. Gegen Feuchtigkeit, Staub und die in Industrie und Auto vorhandenen aggressiven Gase und Flüssigkeiten kann schon eine hermetische Versiegelung helfen.

Drehratensensor

Damit das ESP die Fahrdynamik steuern kann, muss neben der Querschleunigung auch die Drehung des Fahrzeugs um die Hochachse gemessen werden. Dafür verwendet man sog. Drehratensensoren. Ihre Funktionsweise beruht auf der Auswirkung einer Drehbewegung auf ein schwingendes System und nutzt die Coriolis-Kraft aus, die bei der Drehung um eine Achse senkrecht zur Sensorchip-Oberfläche entsteht. Die Coriolis-Beschleunigung ergibt sich dabei als Vektorprodukt aus der Schwinggeschwindigkeit v der seismischen Massen sowie der zu detektierenden Drehrate Ω : $a_c = -2 \Omega \times v$.

Der beim Drehratensensor ausgenutzte Effekt lässt sich sehr gut anhand einer schwingenden Stimmgabel veranschaulichen, die plötzlich

gedreht wird (rechtes Schema). Ihre Schwingungsebene befindet sich dabei in der Ebene des Schwingungskörpers, die Zinken schwingen immer in entgegengesetzter Richtung (oben). Nun drehe sich die Stimmgabel plötzlich um ihre Hochachse. Befindet sich die rechte Zinke gerade auf dem Weg nach außen, dann gerät sie in einen Bereich mit höherer Drehgeschwindigkeit. Die Massenträgheit der Stimmgabel sorgt nun dafür, dass die Zinke entgegen der Drehgeschwindigkeit abgelenkt wird. Während der Schwingung in die Gegenrichtung (also nach innen) ist die Situation umgekehrt. Die Zinke bewegt sich nun in ein Gebiet mit niedrigerer Drehgeschwindigkeit und wird wieder infolge der Massenträgheit abgebremst. Letztendlich führt also die Drehung der Stimmgabel dazu, dass die Schwingungsrichtung der Stimmgabel proportio-



Hier ist ein moderner Sensorchip zu sehen, der die Drehrate um eine Achse senkrecht zur Chipoberfläche misst. Eingezeichnet ist die Schwingungsrichtung (Pfeile) der seismischen Massen. Die Kammelektroden befinden sich in den grünen Bereichen.

nal zu ihrer Winkelgeschwindigkeit gedreht wird (unten).

Die Schwingungsrichtung wird beim Drehratensensor wie beim Beschleunigungssensor kapazitiv detektiert: Durch die Änderung der Schwingungsrichtung der seismischen Massen ändert sich die Kapazität der ineinander greifenden Kammstrukturen. Damit lässt sich die Drehrate bis auf etwa $0,1^\circ/\text{s}$ (Messbereich ca. $100^\circ/\text{s}$) messen.

Vor allem das Auto hat der Sensortechnik den Weg geebnet; es ist mit Airbag, Alarmanlage, ABS, ESP und Navigationssystem ist die Automobiltechnik sicher einer der intensivsten Nutzer dieser Technik. Allerdings gibt es auch viele andere Anwendungen für Beschleunigungssensoren, etwa in seismischen Anlagen (zum Nachweis von Erdbeben), militärischen Waffenleitsystemen, bei der Erschütterungskontrolle für elektronische Bauteile wie Computer-Festplatten usw. Vermutlich ist es nur eine Frage der Zeit, bis Beschleunigungssensoren – zu welchem Zweck auch immer – auch in Handys auftauchen werden.

PATRICK VOSS-DE HAAN,
ALEXANDER PAWLAK