

Bosch Fachinformation Automobil



BOSCH
Technik fürs Leben

Konrad Reif
Hrsg.



Sensoren im Kraftfahrzeug

2. Auflage

 Springer Vieweg

Bosch Fachinformation Automobil

Konrad Reif (Hrsg.)

Sensoren im Kraftfahrzeug

2., ergänzte Auflage

Mit 236 Abbildungen

Herausgeber

Prof. Dr.-Ing. Konrad Reif
Duale Hochschule Baden-Württemberg
Ravensburg, Campus Friedrichshafen
Studiengangsleiter
Fahrzeugelektronik und Mechatronische Systeme
konrad.reif@gmx.net
www.bosch-fachinformation-automobil.springer-vieweg.de

ISBN 978-3-8348-1778-5
DOI 10.1007/978-3-8348-2208-6

ISBN 978-3-8348-2208-6 (eBook)

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Vieweg

© Vieweg+Teubner Verlag | Springer Fachmedien Wiesbaden 2010, 2012

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Vieweg ist eine Marke von Springer DE. Springer DE ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media.
www.springer-vieweg.de

Vorwort

Die Technik im Kraftfahrzeug hat sich in den letzten Jahrzehnten stetig weiterentwickelt. Der Einzelne, der beruflich mit dem Thema beschäftigt ist, muss immer mehr tun, um mit diesen Neuerungen Schritt zu halten. Mittlerweile spielen viele neue Themen der Wissenschaft und Technik in Kraftfahrzeugen eine große Rolle. Dies sind nicht nur neue Themen aus der klassischen Fahrzeug- und Motorentechnik, sondern auch aus der Elektronik und aus der Informationstechnik. Diese Themen sind zwar für sich in unterschiedlichen Publikationen gedruckt oder im Internet dokumentiert, also prinzipiell für jeden verfügbar; jedoch ist für jemanden, der sich neu in ein Thema einarbeiten will, die Fülle der Literatur häufig weder überblickbar noch in der dafür verfügbaren Zeit lesbar. Aufgrund der verschiedenen beruflichen Tätigkeiten in der Automobil- und Zulieferindustrie sind zudem unterschiedlich tiefe Ausführungen gefragt.

Gerade heute ist es so wichtig wie früher: Wer die Entwicklung mit gestalten will, muss sich mit den grundlegenden wichtigen Themen gut auskennen. Hierbei sind nicht nur die Hochschulen mit den Studienangeboten und die Arbeitgeber mit Weiterbildungsmaßnahmen in der Pflicht. Der rasche Technologiewechsel zwingt zum lebenslangen Lernen, auch in Form des Selbststudiums.

Hier setzt die Schriftenreihe „Bosch Fachinformation Automobil“ an. Sie bietet eine umfassende und einheitliche Darstellung wichtiger Themen aus der Kraftfahrzeugtechnik in kompakter, verständlicher und praxisrelevanter Form. Dies ist dadurch möglich, dass die Inhalte von Fachleuten verfasst wurden, die in den Entwicklungsabteilungen von Bosch an genau den dargestellten Themen arbeiten. Die Schriftenreihe ist so gestaltet, dass sich auch ein Leser zurechtfindet, für den das Thema neu ist. Die Kapitel sind in einer Zeit lesbar, die auch ein sehr beschäftigter Arbeitnehmer dafür aufbringen kann.

Die Basis der Reihe sind die fünf bewährten, gebundenen Fachbücher. Sie ermöglichen einen umfassenden Einblick in das jeweilige Themengebiet. Anwendungsbezogene Darstellungen, anschauliche und aufwendig gestaltete Bilder ermöglichen den leichten Einstieg. Für den Bedarf an inhaltlich enger zugeschnittenen Themenbereichen bietet die achtbändige broschiierte Reihe das richtige Angebot. Mit deutlich reduziertem Umfang, aber gleicher detaillierter Darstellung, ist das Hintergrundwissen zu konkreten Aufgabenstellungen professionell erklärt. Die schnelle Bereitstellung zielgerichteter Information zu thematisch abgegrenzten Wissensgebieten sind das Kennzeichen der 92 Einzelkapitel, die als pdf-Download zur sofortigen Nutzung bereitstehen. Eine individuelle Auswahl ermöglicht die Zusammenstellung nach eigenem Bedarf.

Die hier vorliegende 2. Auflage des broschiierten Buches „Sensoren im Kraftfahrzeug“ wurde um das Kapitel „Elektronik“ erweitert. In diesem Kapitel werden Grundlagen zur Halbleitertechnik, zu Halbleiterbauelementen und -schaltungen sowie deren Herstellung behandelt.

Inhaltsverzeichnis

Sensoren im Kraftfahrzeug

Grundlagen und Überblick	10
Einsatz im Kraftfahrzeug	13
Angaben zum Sensormarkt	16
Besonderheiten von Kfz-Sensoren	17
Sensorklassifikation	18
Fehlerarten und Toleranzanforderungen	20
Zuverlässigkeit	21
Hauptanforderungen, Trends	24
Übersicht der physikalischen Effekte für Sensoren	31
Übersicht und Auswahl der Sensortechnologien	33

Sensormessprinzipien

Positionssensoren	34
Drehzahl- und Geschwindigkeitssensoren	63
Beschleunigungssensoren	75
Drucksensoren	80
Kraft- und Drehmomentsensoren	83
Durchflussmesser	92
Gassensoren und Konzentrationssonden	98
Temperatursensoren	102
Optoelektronische Sensoren	112

Sensorausführungen

Motordrehzahlsensoren	120
Hall-Phasensensoren	122
Drehzahlsensoren für Getriebesteuerung	123
Raddrehzahlsensoren	126
Mikromechanische Drehratesensoren	130
Piezoelektrischer Stimmgabel-Drehratesensor	133
Mikromechanische Drucksensoren	134
Hochdrucksensoren	136
Temperatursensoren	137
Fahrpedalsensoren	138
Lenkwinkelsensoren	140
Positionssensoren für Getriebesteuerung	142
Achssensoren	145
Heißfilm-Luftmassenmesser	146
Piezoelektrische Klopfensensoren	149
OMM-Beschleunigungssensoren	150
Mikromechanische Bulk-Silizium-Beschleunigungssensoren	152
Piezoelektrische Beschleunigungssensoren	153
Sitzbelegungserkennung	154
Drehmomentsensor	156
Ultraschallsensor	157
Regen-/Lichtsensor	158
Schmutzsensoren	159
Zweipunkt-Lambda-Sonden	160

Planare Breitband-Lambda-Sonde LSU4	164
Climate Control Sensor	166

Elektronik

Grundlagen der Halbleitertechnik	168
Diskrete Halbleiterbauelemente	171
Monolithische integrierte Schaltungen	186
Herstellung von Halbleiterbauelementen und Schaltungen	188

Abkürzungen	198
Sachwortverzeichnis	200

Autorenverzeichnis

Sensoren im Kraftfahrzeug

Autoren und Mitwirkende

Dr.-Ing. Erich Zabler,
Dr. rer. nat. Stefan Fingbeiner,
Dr. rer. nat. Wolfgang Welsch,
Dr. rer. nat. Hartmut Kittel,
Dr. rer. nat. Christian Bauer,
Dipl.-Ing. Günter Noetzel,
Dr.-Ing. Harald Emmerich,
Dipl.-Ing. (FH) Gerald Hopf,
Dr.-Ing. Uwe Konzelmann,
Dr. rer. nat. Thomas Wahl,
Dr.-Ing. Reinhard Neul,
Dr.-Ing. Wolfgang-Michael Müller,
Dr.-Ing. Claus Bischoff,
Dr. Christian Pfahler,
Dipl.-Ing. Peter Weiberle,
Dipl.-Ing. (FH) Ulrich Papert,

Dipl.-Ing. Christian Gerhardt,
Dipl.-Ing. Klaus Miekley,
Dipl.-Ing. Roger Frehoff,
Dipl.-Ing. Martin Mast,
Dipl.-Ing. (FH) Bernhard Bauer,
Dr. Michael Harder,
Dr.-Ing. Klaus Kasten,
Dipl.-Ing. Peter Brenner (ZF Lenksysteme
GmbH, Schwäbisch Gmünd),
Dipl.-Ing. Frank Wolf,
Dr.-Ing. Johann Riegel,
Dr. Michael Arndt,
Dr. rer. nat. Ulrich Schaefer,
Prof. Dr.-Ing. Klemens Gintner
(Hochschule Karlsruhe).

Soweit nicht anders angegeben, handelt es sich um Mitarbeiter der Robert Bosch GmbH, Stuttgart.

Sensoren im Kraftfahrzeug

Der Begriff Sensor führte sich ein, als in den zurückliegenden 20...40 Jahren Messfühler auch in Konsumanwendungen (z. B. Kraftfahrzeug und Hausgerätechnik) einzogen. Sensoren - begrifflich identisch mit (Mess-)Fühlern und (Messwert-)Aufnehmern - setzen eine physikalische oder chemische (meist nichtelektrische) Größe Φ in eine elektrische Größe E um; dies geschieht oft auch über weitere, nichtelektrische Zwischenstufen.

In Tabelle 1 sind die verschiedenen Sensoreinsatzgebiete zusammengestellt und verglichen. Bild 1 gibt einen Eindruck von der Fülle bereits bestehender elektronischer Systeme in Kraftfahrzeugen, deren Zahl sich in Zukunft zweifellos noch wesentlich erhöhen wird.

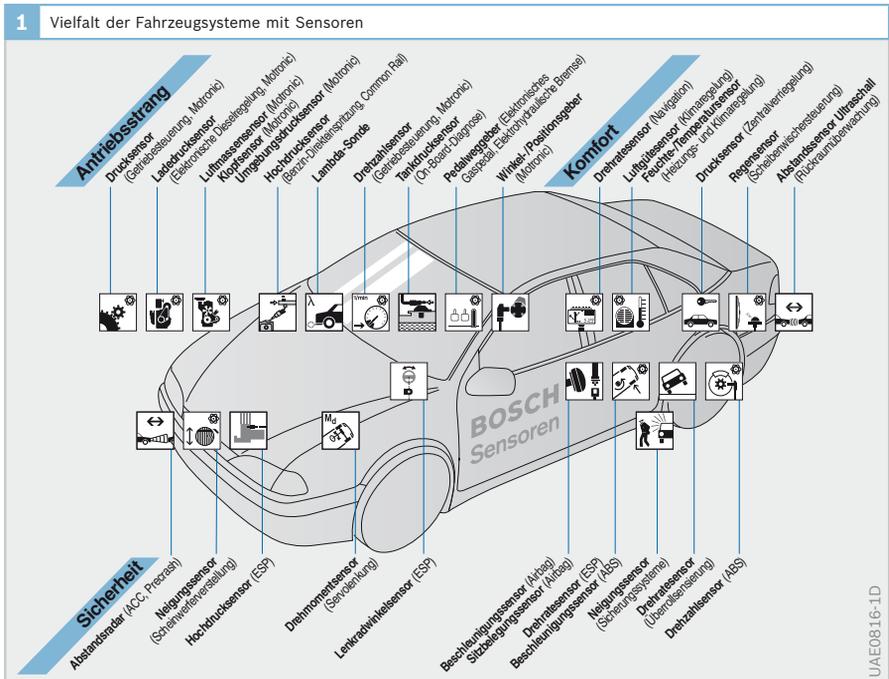
Grundlagen und Überblick

Begriff/Definition Sensor

Als elektrische Größen gelten hier nicht nur Strom und Spannung, sondern auch Strom-/Spannungsamplituden, die Frequenz, Periode, Phase oder auch Pulsdauer einer elektrischen Schwingung sowie die elektrischen Kenngrößen Widerstand, Kapazität und Induktivität. Der Sensor lässt sich durch folgende Gleichungen charakterisieren:

- (1) $E = f(\Phi, Y_1, Y_2, \dots)$
Sensorausgangssignal
- (2) $\Phi = g(E, Y_1, Y_2, \dots)$
gesuchte Messgröße

Sind die Funktionen f oder g bekannt, so stellen sie ein Sensormodell dar, mit Hilfe dessen sich die gesuchte Messgröße aus dem Ausgangssignal E und den Einflussgrößen Y_i praktisch fehlerfrei auch ma-



1 Sensoreinsatzgebiete				
Typische Merkmale	Primärstandards	Präzisionsmesstechnik	Industriemesstechnik	Konsumtechnik
Genauigkeit	$10^{-11} \dots 10^{-7}$	$2 \dots 5 \cdot 10^{-4}$	$2 \dots 5 \cdot 10^{-3}$	$2 \dots 5 \cdot 10^{-2}$
Kosten	100 TEUR... 1 Mio. EUR	einige TEUR	einige 100 EUR	1...10 EUR
Stück/a	einzelne	ca. 10	100...1 k	10 k...10 Mio.
Einsatz	– Forschung, – Prüfung Sekundärnormale	– Eichung	– Prozessinstrumentierung, – Fertigungsmesstechnik	– Kfz-Elektronik, – Haustechnik (Domotik)

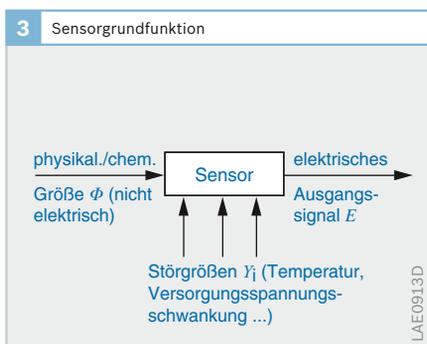
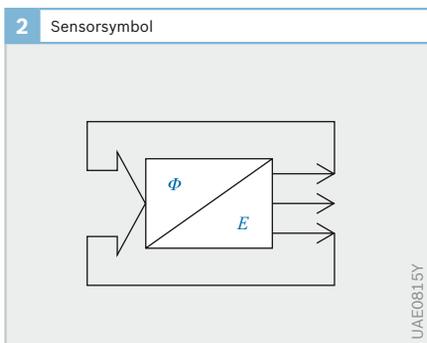
Tabelle 1

thematisch berechnen lässt (intelligente Sensoren, engl.: intelligent oder smart sensors).

Abgleich

Das Sensormodell enthält im realen Fall immer einige freie Parameter, mit denen in einer Art Abgleichvorgang (Bild 4a) das Modell an die tatsächlichen Eigenschaften des individuellen Sensorexemplars angepasst werden kann. Bei der inzwischen

vorherrschenden digitalen Aufbereitung der Sensorsignale werden diese Modellparameter meist in einem programmierbaren, nichtflüchtigen Speicherteil (PROM) abgelegt. Im Gegensatz zur herkömmlichen analogen Kompensation von Einflussgrößen können hier nicht nur etwa linear wirkende Einflüsse, sondern auch stark nichtlineare Verläufe gut korrigiert werden. Sehr vorteilhaft ist auch, dass bei dieser Art der Kalibrierung, die über eine rein elektrische Verbindung erfolgt, jeder Sensor während der Kalibrierphase leicht unter Betriebsbedingungen gehalten werden kann.



▶ Begriff Smartsensor

In etwas allgemeinerer Form lassen sich „Intelligente Sensoren“ (Smartsensor) folgendermaßen definieren: Intelligente, manchmal auch integrierte Sensoren oder Sensoren mit (exemplar-)spezifischer Elektronik vor Ort genannte Sensoren, erlauben die in einem Sensor steckende (statische und dynamische) Genauigkeit mit den Mitteln der (meist auch digitalen) Mikroelektronik bis zu einem weit höheren Maße auszunutzen als konventionelle Sensoren. Hierbei kann die Sensorinformation, insbesondere auch die komplexe Information von Multisensor-Strukturen, durch Weiterverarbeitung vor Ort verdichtet, d.h. auf ein höheres Niveau gebracht werden (als es der einfache Sensor vermag), ohne dazu eine Vielzahl von äußeren Anschlüssen zu benötigen.

Es gibt keine klare Festlegung, ob Sensoren einen Teil der Signalverarbeitung bereits beinhalten können oder nicht; es wird jedoch empfohlen, nicht beispielsweise zwischen Elementarsensor, Sensorzelle o. ä. und integriertem Sensor zu unterscheiden.

Abgleichvorgang

Die Programmierung bzw. Kalibrierung eines Smartsensors erfolgt - entsprechend dem Abgleich herkömmlicher analoger Sensoren - meist mit Hilfe eines externen Rechners (Host) in drei Schritten (Bild 4):

Istwertaufnahme

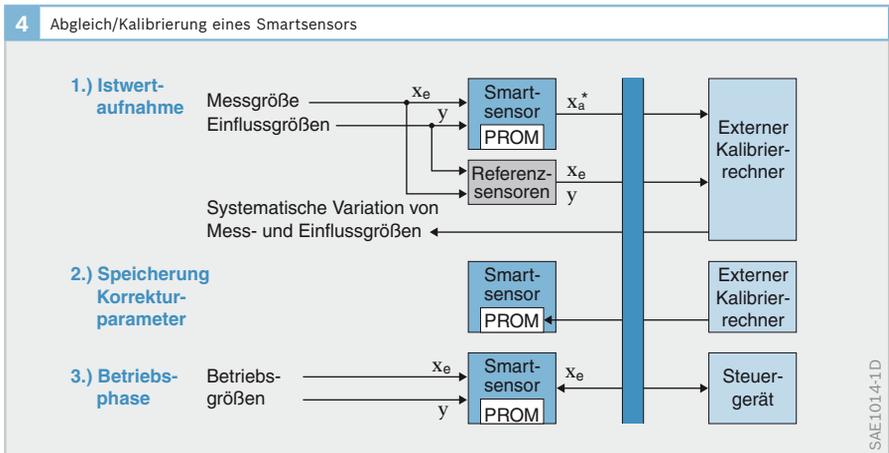
Der Hostrechner variiert sowohl die Messgröße x_e als auch die Einflussgröße(n) y systematisch und stellt dabei eine bestimmte Anzahl relevanter und repräsentativer Betriebspunkte ein. Dabei gibt der Smartsensor die noch unkorrigierten „Rohsignale“ x_a^* an ihn aus. Über wesentlich genauere Referenzsensoren erhält der Host jedoch auch gleichzeitig die „wahren“ Größen x_e und y . Aus dem Vergleich beider Größen errechnet der Host die notwendigen Korrekturgrößen und interpoliert diese auf den gesamten Messbereich.

Speicherung der Korrekturparameter

Aus den zuvor gewonnenen Daten berechnet der Hostrechner die exemplarspezifischen Modellparameter z. B. für einen linearen Kennlinienverlauf und speichert diese in den PROM des Smartsensors ein. In einem Kontrolldurchlauf können diese auch zunächst in einem RAM des Hostrechners emuliert werden, bevor sie endgültig und nichtflüchtig im Smartsensor „eingebrennt“ werden. Werden Kennlinien mit Polynomen höheren Grades angenähert, können zur Vermeidung langwieriger Rechenprozesse im Smartsensor auch Kennfelder (Look-up tables) abgespeichert werden. Sehr bewährt hat sich auch die Abspeicherung eines grobmaschigen Kennfeldes in Verbindung mit einer einfachen linearen Interpolation zwischen den Stützstellen (Beispiel in Bild 5 dargestellt).

Betriebsphase

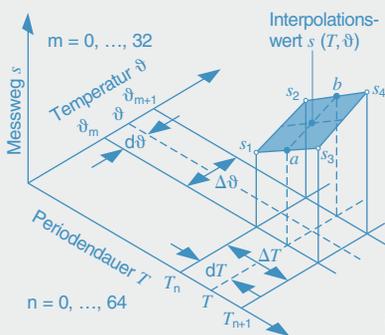
Der Smartsensor wird nun vom Hostrechner abgekoppelt und ist in der Lage, mittels der eingespeicherten Modelldaten selbst die Messgröße x_e sehr fehlerarm zu berechnen. Er kann sie an ein angeschlossenes Steuergerät z. B. in digitaler, bitserieller oder aber auch analoger Form (z. B. pulsdauermoduliert) übertragen. Mittels einer Busschnittstelle kann die Messgröße



digital auch an weitere Steuergeräte verteilt werden.

Dieser Vorgang kann - im Gegensatz zum herkömmlichen Laserabgleich - prinzipiell auch wiederholt werden, wenn ein löschbares PROM verwendet wird. Dies ist gerade in der Entwicklungsphase von Sensoren ein Vorteil.

5 Messwertinterpolation über Stützstellenkennfeld



UAEL1044D

Beispiel: Zweidimensionales Stützstellenkennfeld $s(T_n, \Theta_m)$ eines Smartsensors zur Messung eines Weges s :

Zur hochgenauen Auswertung des als variable Induktivität wirkenden Sensors wird seine natürliche Kennlinie sowie deren Temperaturgang jeweils mit Polynomen 5. Grades angenähert. Er gibt als frequenzbestimmendes Glied einer sehr einfachen Oszillatorschaltung als unkorrigiertes Ausgangssignal die Periodendauer T ab. Als Sensormodell für den Messweg s wird statt der insgesamt 36 Polynomkoeffizienten und einer langwierigen Polynomauswertung ein insgesamt nur $32 \times 64 = 2048$ exemplarspezifische Werte $s_{n,m}$ umfassendes, grobes Kennfeld (im PROM) und ein einfacher Interpolationsalgorithmus (im ROM) abgelegt. Tritt ein Signal T zwischen diesen Stützstellen T_n und T_{n+1} sowie eine Temperatur Θ zwischen den Stützstellen Θ_m und Θ_{m+1} auf, so wird gemäß der Abbildung zwischen den „fehlerfrei“ abgespeicherten Eckwerten s_1, \dots, s_4 zweidimensional interpoliert und so der gesuchte Messwert $s(T, \Theta)$ als Interpolationsergebnis ermittelt.

Einsatz im Kraftfahrzeug

Mit steigenden Anforderungen an alle Fahrzeugfunktionen wurden in den letzten 40 Jahren sukzessive die zunächst mechanisch realisierten Steuer- und Regelfunktionen durch elektronische Einheiten (ECU, electronically controlled unit) ersetzt. Daraus entstand zwangsläufig ein hoher Bedarf an Sensoren und Aktoren, mit denen diese elektronischen Steuereinheiten einerseits die relevanten Fahrzeugzustände erfassen und andererseits auch beeinflussen konnten. Die Kfz-Industrie wurde in diesen Jahren zu einem bis dahin beispiellosen Motor der Entwicklung von in großer Stückzahl herstellbaren Sensoren.

Hatten diese anfangs noch eine meist elektromechanische oder wie auch immer geartete makromechanische Form, so ging der Trend ausgang der 1980er-Jahre eindeutig hin zu miniaturisierten, mit den Methoden der Halbleiterherstellung (Batch

6 Meilensteine der Sensorentwicklung für das Kfz

1950	Lambda-Sonde
1960	Elektromechanischer Drucksensor Piezoelektrischer Klopfsensor
1970	Erster integrierter Hall-Sensor Dehnmessstreifen-Beschleunigungssensor für Airbag Erster Drucksensor auf Silizium-Basis
1980	Hitzdraht-Luftmassenmesser Dickfilm-Luftmassenmesser Integrierter Drucksensor
1990	Mikromechanischer Beschleunigungssensor für Airbag Piezoelektrischer Drehratesensor für ESP Mikromechanischer Luftmassenmesser Mikromechanischer Drehratesensor
2000	Drehratesensor für Überrollsensierung

UAEL1045D

Processing) in hohem Nutzen produzierten Sensoren. Vorübergehend spielten auch aus der Hybridtechnik hervorgegangene Sensoren in Dickschichttechnik eine nicht unwesentliche Rolle. Diese wird auch heute noch vereinzelt z. B. in den plättchenförmigen Sauerstoffsonden und Hochtemperatursensoren für den Abgasstrakt verwendet.

Ließen sich Temperatur- und Magnetfeldsensoren zunächst noch als schaltungsähnliche Strukturen realisieren und im Batch fertigen, so verstärkte sich dieser Trend, als es gelang, Silizium in mannigfaltiger Weise auch mikromechanisch in zwei bis drei Dimensionen zu strukturieren und mit sehr effizienten Methoden auch in mehreren Lagen funktionell sehr stabil zu verbinden

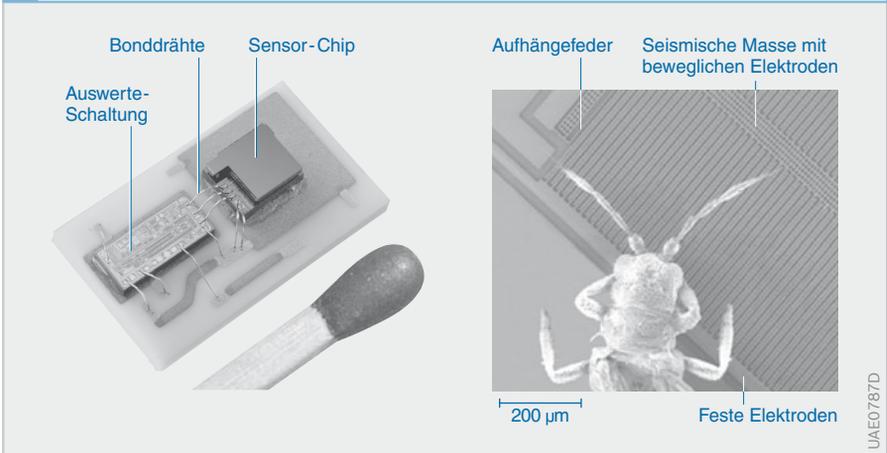
Beruheten die Technologien der elektronischen Halbleiterschaltungen praktisch ausschließlich auf Silizium als Grundwerkstoff, spielen bei den Sensoren durchaus auch noch andere Stoffe und Technologien eine nicht unwesentliche Rolle. So lässt sich z. B. Quarz mittels anisotroper Ätztechnik ebenfalls mikromechanisch formen, besitzt jedoch im Gegensatz zu Silizium auch sehr vorteilhafte piezo-

elektrische Eigenschaften. III-V-Halbleiter wie Galliumarsenid (GaAs) besitzen einen wesentlich größeren Betriebstemperaturbereich als Silizium, was gerade im Kfz an manchen Stellen sehr vorteilhaft sein kann. Dünne metallische Schichten eignen sich sehr zur Herstellung von präzisen Dehnwiderständen, genauen Temperatursensoren und magnetfeldabhängigen Widerständen.

Mit Silizium ist es möglich, in monolithischer Weise zum Sensor auch noch Elektronik zu integrieren. Diese Technik hat - abgesehen von wenigen Ausnahmen (z. B. Hall-IC) - wegen der meist sehr unterschiedlichen Zahl und Art von Prozessschritten sowie wegen der damit verbundenen Inflexibilität sehr an Bedeutung verloren. Hybride Integrationstechniken auf engstem Raum führen in aller Regel zu wesentlich kostengünstigeren, funktionell aber gleichwertigen Lösungen (Bilder 7).

War die Entwicklung von Sensoren in der Anfangszeit fast ausschließlich auf fahrzeuginterne Systeme des Antriebsstrangs, des Fahrwerks sowie der Karosserie und Fahrsicherheit konzentriert, so ist die Sensorierungsrichtung von neueren Entwicklungen zunehmend nach außen auf die nähere

7 Hybride Integration von Sensor und Elektronik: Oberflächenmikromechanischer Beschleunigungssensor auf Mikrohybridschaltkreis



und weitere Umgebung des Fahrzeugs gerichtet:

- ▶ Ultraschallsensoren erfassen Hindernisse beim Einparken und werden - evtl. in Verbindung mit anderen Sensoren - in absehbarer Zukunft auch automatisches Einparken ermöglichen.
- ▶ Nahbereichsradar erfasst rings um das Fahrzeug Objekte, die mit hoher Wahrscheinlichkeit eine Kollision verursachen könnten, um Zeit zu gewinnen und Sicherheitssysteme auch schon vor dem Aufprall zu schärfen (Precrash-Sensoren).
- ▶ Bildsensoren können nicht nur Verkehrsschilder erfassen und in das Fahrerdisplay übertragen, sondern auch die Fahrbahnkontur erkennen, den Fahrer vor gefährlichen Abweichung warnen und bei Bedarf langfristig auch automatisches Fahren ermöglichen. In Verbindung mit Infrarotstrahlern und einem Bildschirm im Sichtfeld des Fahrers lassen IR-empfindliche Bildsensoren auch nachts, selbst bei nebligen Verhältnissen, eine weitreichende Fahrbahnbeobachtung zu (Night Vision).
- ▶ Weitbereichs-Radarsensoren beobachten auch unter schlechten Sichtbedingungen die Fahrbahn auf 150 m vor dem Fahrzeug, um die Fahrgeschwindigkeit vorausfahrenden Fahrzeugen anzupassen und längerfristig auch automatisches Fahren zu unterstützen.

Sensoren und Aktoren bilden als Peripherie die Schnittstellen zwischen dem Fahrzeug mit seinen komplexen Antriebs-, Brems-, Fahrwerk- und Karosseriefunktionen sowie auch Leit- und Navigationsfunktionen und dem meist digitalen elektronischen Steuergerät als Verarbeitungseinheit (Bild 8). In der Regel bringt eine Anpassschaltung die Sensorsignale in die für das Steuergerät erforderlich, standardisierte Form (Messkette, Messwerterfassungssystem).

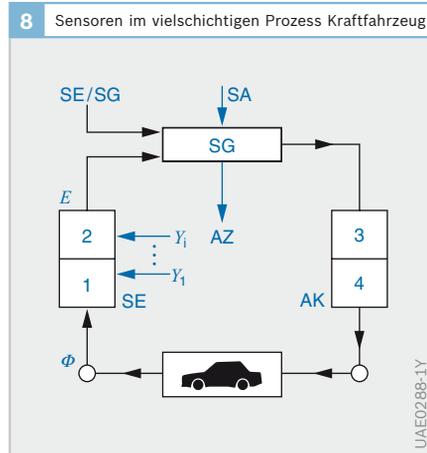


Bild 8

- 1 Messwert-aufnehmer
- 2 Anpassschaltung
- 3 Treiberschaltung
- 4 Stellglieder
- AK Aktor
- AZ Anzeige
- SA Bedienschalter
- SE Sensoren
- SG Steuergerät
- Φ physikalische Größe
- E elektrische Größe
- Y_1 Störgrößen

Diese auf spezielle Sensoren maßgeschneiderten, kundenspezifischen Anpassschaltungen stehen in integrierter Form und in großer Zahl zur Verfügung. Sie stellen eine ganz wesentliche und sehr wertvolle Ergänzung der hier dargestellten Sensoren dar, ohne die deren Einsatz nicht möglich wäre und deren Messqualität genommen nur mit diesen zusammen definiert ist.

In dem dargestellten, vielschichtigen Prozess „Kraftfahrzeug“ können auch Sensorinformationen anderer Verarbeitungseinheiten (Steuergeräte) ebenso wie der Fahrer über einfache Bedienschalter Einfluss auf den Prozess nehmen. Anzeigeneinheiten informieren den Fahrer über den Stand und Verlauf des Gesamtprozesses.

Angaben zum Sensormarkt

Der Wertschöpfungsanteil der Elektrik und Elektronik in Fahrzeugen liegt heute bei ca. 26 %. Inzwischen wird fast jeder zweite Sensor in ein Fahrzeug eingebaut - bei jährlichen Steigerungsraten, die immer noch teilweise im zweistelligen Bereich liegen. Seit ausgangs der 1990er-Jahre nehmen die mikromechanischen und mikrosystemtechnischen Sensoren einen stark zunehmenden Anteil ein, der 2005 schon bei etwa einem Drittel liegt.

Im Gegensatz zum allgemeinen Sensormarkt hat Europa auf dem Sektor der Kfz-Sensoren mit einem Marktanteil von derzeit 41 % und Bosch als Weltmarktführer Amerika mit einem Anteil von nur 34 % bereits deutlich überflügelt. Insgesamt soll der Sensormarkt für automobiler Anwendungen von 8,88 Milliarden US-\$ in 2005 auf etwa 11,35 Milliarden US-\$ in 2010, also um insgesamt 28 % steigen (Bild 9).

Es gibt drei typische Gruppen von Firmen, die für das Automobil Sensoren anbieten:

- Die Halbleiterindustrie: Hier sind die Sensoren aus der Halbleiterfertigung durch Anwendung einiger Sonderprozessschritte hervorgegangen. Sie bedienen den gesamten Sensormarkt inklusiv der Automobilindustrie und haben

ein gut funktionierendes Vertriebssystem. Mikromechanische Prozesse zur Herstellung von Sensoren werden hier zusammen mit den Halbleiterprozessen stetig weiterentwickelt. Diese Firmen haben jedoch kein spezifisches Know-how auf dem Gebiet der fahrzeuggerechten Spezifikation, Prüfung und Verpackung.

- Spezielle, meist mittelgroße Sensorhersteller, die keine Halbleiterschaltungen herstellen, sondern sich meist einige wenige Sensortypen als Produkt ausgewählt haben, um den gesamten Sensormarkt oder sogar Vorzugssparten wie den Kfz-Markt zu beliefern.
- Große Automobilzulieferer und Systemhersteller (z. B. Bosch) oder große Tochterfirmen von Automobilherstellern, die sich auf den Bedarf und Support ihrer Mutterkonzerne spezialisiert haben. Auch hier hat man seit Einführung der Elektronik in das Kfz Erfahrung mit der Herstellung von Halbleiter- und Hybrid Schaltkreisen erworben, in enger Zusammenarbeit mit Halbleiterherstellern (Prozessentwicklung, Lizenznahme). Aufgrund der Systemkenntnisse hat man sich hier ein umfangreiches Know-how auf dem Gebiet der Kfz-gerechten Spezifikation, Prüfungs- und Verpackungstechnik erarbeitet.

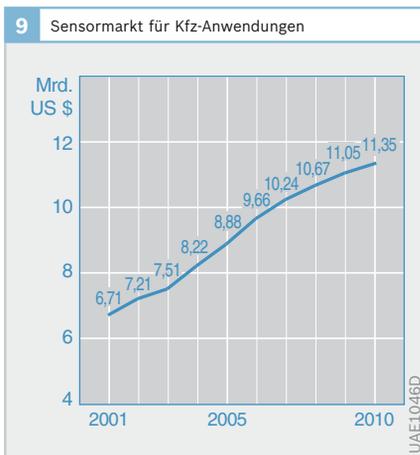


Bild 9

Quelle: Bosch

Besonderheiten von Kfz-Sensoren

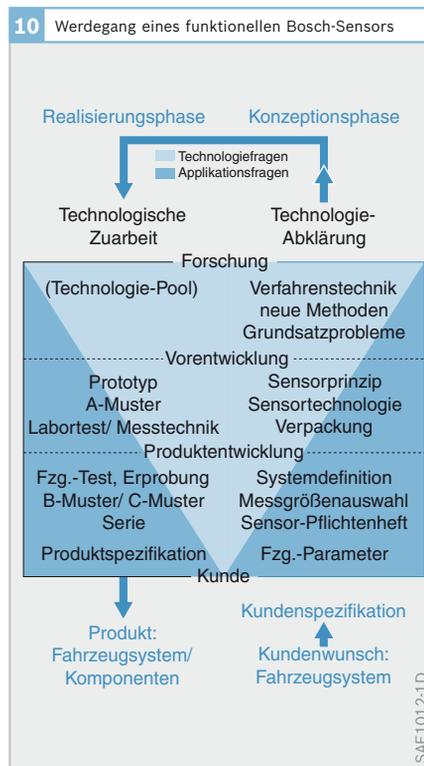
Während allgemeine Sensoren für einen möglichst breiten Anwenderkreis und in gestaffelten Messbereichen entwickelt werden, ohne dass der Hersteller oft die Anwendung kennt, sind Kfz-Sensoren in aller Regel für eine spezielle Anwendung spezifiziert und optimiert. Sie sind Teil eines Systems und oft im Handel nicht frei verfügbar. Ihre Entwicklung dauert meist nicht nur wegen der erhöhten Ansprüche länger als bei handelsüblichen Sensoren. Sie ist vielmehr an die Entwicklung des Systems gekoppelt und dauert in aller Regel ebenso lange wie diese, da sich bis zum Schluss der Systementwicklung noch die Sensorspezifikation ändern kann.

Der hohe Innovationsschub der Kfz-Branche auf der Systemseite zwingt sehr oft auch zur Entwicklung neuer Sensortechnologien, bzw. zu wesentlichen Erweiterung von deren Spezifikation. Bild 10 zeigt die typischen Entwicklungsphasen, die Kfz-Sensoren beim Zulieferer durchlaufen.

Der Entwicklungsprozess beginnt naturgemäß bei der Systemidee des Fahrzeugherstellers oder des Zulieferers. Hier gilt es zunächst - noch unabhängig von der Realisierbarkeit - eine Auswahl der erforderlichen Messgrößen zu treffen. In diesem Stadium werden die Sensoren auch im Rahmen der bei den Systemtechnikern üblichen Systemsimulation in ihrer Funktion simuliert und eine erste Spezifikation erstellt. Kommt man mit einer bereits eingeführten Sensortechnologie aus, werden die Sensorwünsche unmittelbar an die Produktentwicklung bzw. den produzierenden Bereich weitergeben. Ist keine Technologie unmittelbar verfügbar, werden nach und nach immer mehr auch Sensor- und Technologieexperten der Voraufwicklung und Forschung eingeschaltet. Hier können mit bekannten Tech-

Partner erste Labormuster erstellt werden, die der Produktentwicklung für erste Tests zur Verfügung gestellt werden.

Sind keine Sensorprinzipien für die gestellten Anforderungen bekannt, wird notfalls nach neuen Verfahren und Methoden zur Messung der gewünschten Größen geforscht. In dieser Phase ist die Grundlagenforschung eingeschaltet, die schließlich auch neuartige erste Technologiemuster liefert. Dieser Vorgang kann sich rekursiv wiederholen, bis eine aussichtsreiche Lösung gefunden ist, die ihren Weg in die Produktentwicklung nimmt. Nicht selten muss diese Entwicklungsschleife auch nochmals in ihrer ganzen Länge wiederholt oder eine neue Auswahl der Messgrößen getroffen werden.



Bei der Entwicklung eines ganz neuen Sensors werden im Allgemeinen – ähnlich wie bei anderen elektronischen Erzeugnissen – fünf Phasen unterschieden (Tab. 2). Während Prototypen und A-Muster meist noch aus der Voraentwicklung bzw. Forschung kommen, entstehen B- und C-Muster bereits in der Produktentwicklung. Sind in schwierigen Entwicklungen Rekursionen nötig, kann es leicht auch zu mehreren B- oder C-Musterphasen (B1, B2, C1, C2) kommen.

2 Sensorbemusterungsphasen bis zur Serienfertigung		
Musterphase	Funktion/ Pflichtenheft	Herstellung
Prototyp	eingeschränkt	Musterbau ohne Werkzeuge
A	eingeschränkt	Musterbau ohne Werkzeuge
B (evtl. B1, B2)	voll	Musterbau ohne Werkzeuge (baugleich mit C)
C (evtl. C1, C2)	voll	Musterbau mit Serienwerkzeugen
D	voll	Pilotserie, teilweise manuell
Serie	voll	automatisiert

Tabelle 2

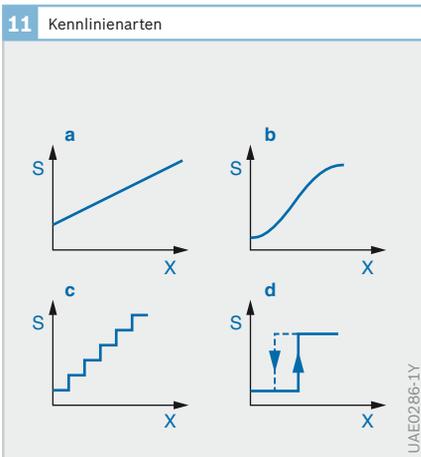


Bild 11
 S Ausgangssignal
 X Messgröße
 a Stetig, linear
 b stetig, nichtlinear
 c unstetig, mehrfach gestuft
 d unstetig, zweistufig (mit Hysterese)

Sensorklassifikation

Sensoren lassen sich nach sehr unterschiedlichen Gesichtspunkten klassifizieren und ordnen. Mit Hinblick auf die Verwendung im Kfz kann man sie folgendermaßen einteilen:

Aufgabe und Anwendung

- Funktionelle Sensoren (Druck, Luftmassenfluss), vorwiegend für Steuerung- und Regelungsaufgaben.
- Sensoren für Sicherheit (Passagierschutz: Airbag, ESP) und Sicherung (Diebstahlschutz).
- Sensoren für Überwachung des Fahrzeugs (Onboard-Diagnose, Verbrauchs- und Verschleißgrößen) und zur Information von Fahrer und Passagieren.

Kennlinienart

- Stetig lineare Kennlinien (Bild 11a) werden insbesondere für Steuerungsaufgaben über einen weiten Messbereich verwendet. Lineare Kennlinien haben überdies den Vorzug der leichten Prüf- und Abgleichbarkeit.
- Stetig nichtlineare Kennlinien (Bild 11b) dienen oft der Regelung einer Messgröße in sehr engem Bereich (z. B. Abgasregelung auf $\lambda = 1$, Regelung des Einfederniveaus). Stark nichtlineare Kennlinien spezieller Form (z. B. logarithmisch) haben auch Vorteile, wenn beispielsweise im gesamten Messbereich eine konstante zulässige Abweichung relativ vom Messwert gefordert wird (z. B. Luftmassenmesser HFM).
- Unstetig zweistufige Kennlinien (evtl. mit Hysterese, Bild 11d) dienen der Überwachung von Grenzwerten, bei deren Erreichen leichte Abhilfe möglich ist. Ist Abhilfe schwieriger, kann auch durch mehrfache Stufung (Bild 11c) früher vorgewarnt werden.

Art des Ausgangssignals

Man kann Sensoren auch unterscheiden nach Art ihres Ausgangssignals (Bild 13):

Analogsignale

- ▶ Strom/Spannung, oder entsprechende Amplitude.
- ▶ Frequenz/Periodendauer.
- ▶ Pulsdauer/Pulstastverhältnis.

Diskretes Ausgangssignal

- ▶ Zweistufig (binär codiert).
- ▶ Mehrstufig ungleich gestuft (analog codiert).
- ▶ Mehrstufig äquidistant (analog oder digital codiert).
- ▶ Man muss ferner - wie in Bild 12 in einer systematischen Übersicht der determinierten, d. h. nicht zufälligen (stochastischen) Signale dargestellt - unterscheiden, ob das Signal am Sensorausgang ständig zur Verfügung steht (kontinuierlich) oder nur zu diskreten Zeitpunkten (diskontinuierlich). Liegt

das Signal beispielsweise digital vor und wird bitseriell ausgegeben, so ist es zwangswise diskontinuierlich.

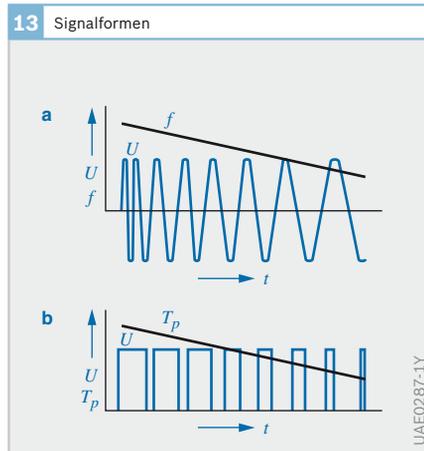
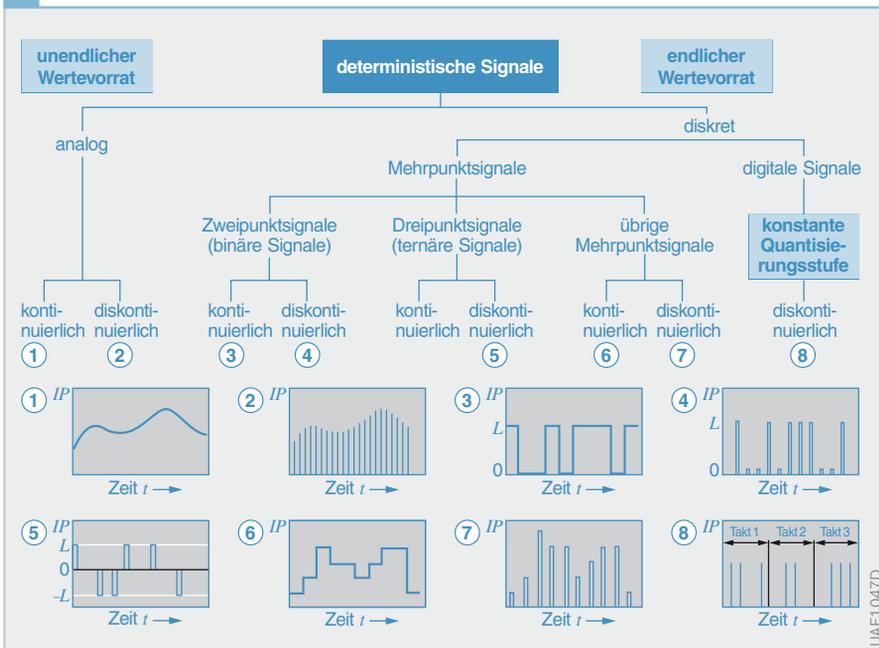


Bild 13
 a Ausgangssignal U , Informationsparameter: Frequenz f
 b Ausgangssignal U , Informationsparameter: Pulsdauer T_p

12 Einteilung der determinierten Signale nach dem Informationsparameter (IP) mit Beispielen



Fehlerarten und Toleranzanforderungen

Die Abweichung der Ist-Kennlinie von der Soll-Kennlinie eines Sensors wird als Fehler F (englisch: error e) bezeichnet. Er wird zweckmäßigerweise auf den Eingangsbereich y (Messgröße) und nicht auf den Ausgangsbereich x (Ausgangssignal) bezogen und angegeben:

- (3) $F = y_{\text{anz}} - y_{\text{wahr}}$
 y_{anz} = Anzeigewert der Messgröße.
 y_{wahr} = „wahrer“/idealer Wert, Sollwert der Messgröße (wird mit einem Messwertaufnehmer ermittelt, der mindestens 1 Klasse genauer ist als der untersuchte Sensor)

Der Betrag der Abweichung stellt, wie in Bild 14 dargestellt, den Absolutfehler F_{abs} dar (Einheit wie Messgröße). Bezogen auf den (wahren) Messwert y_{wahr} wird dieser zum Relativen Fehler (% v. MW, engl.: of reading), bezogen auf den Messbereichs-

endwert wird er zum prozentualen Fehler vom Endwert (% v. EW, engl.: of range).

Geht man von einer im Allgemeinen gewünschten linearen Kennlinie aus, kann man die absolute Abweichung F_{abs} in drei Kategorien einteilen (Bild 15):

- ▶ Nullpunktverschiebung (Offset-Fehler) F_{nu} .
- ▶ Steigungsabweichung (Gain-Fehler) F_{st} .
- ▶ Linearitätsabweichung F_{lin} .

Die Ursachen dieser Fehler liegen vor allem in

- ▶ der Fertigungsstreuung der Kennlinie,
- ▶ dem Temperaturgang der Kennlinie und

14 Kennlinien und Fehlerkurve eines Sensors

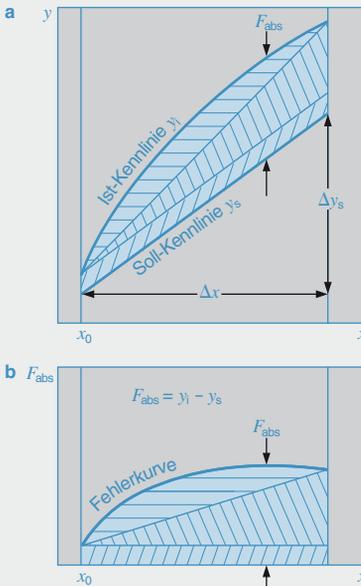
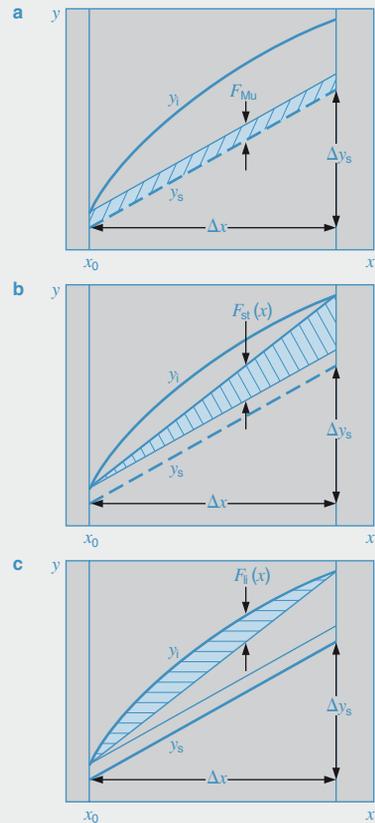


Bild 14
 a Ist- und Sollkennlinie
 b Fehlerkurve
 y Messgröße
 x Ausgangssignal
 Δx Messbereich
 F Fehler (Abweichung)

Bild 15
 a Nullpunktfehler
 b Steigungsfehler
 c Linearitätsfehler
 y Messgröße
 x Ausgangssignal
 Δx Messbereich
 F Fehler

15 Aufspaltung des Gesamtfehlers



UAEI.049D

- der Fertigungsstreuung des Temperaturgangs.

Bei den genannten Abweichungen handelt es sich ausschließlich um systematische oder auch terministische Fehler, die im Gegensatz zu zufälligen (stochastischen) Fehlern wohl definiert, vorhersehbar und prinzipiell korrigierbar sind und auch großenteils mehr oder weniger genau korrigiert werden.

Zu den nicht korrigierbaren, stochastischen Fehlern gehören z. B.

- Drift (tief- und höherfrequentes Rauschen) und
- Alterungseffekte.

Bei der Spezifikation eines Sensors wird im Allgemeinen der Gesamtfehler im Neuzustand und nach Alterung durch ein Toleranzschema (Bild 16) im Pflichtenheft vorgeschrieben. Teilweise werden jedoch auch zusätzlich die zulässigen Einzelfehleranteile wie Offset-, Steigungs- und Linearitätsabweichung spezifiziert.

Nach strenger Lehre der Messtechnik gilt, dass man bei systematischen Fehlern als Gesamtfehler die Summe der Beträge von Einzelfehlern annehmen muss (können sich im „worst case“ addieren). Bei stochastischen Fehlern ist die statistische Addition erlaubt, die den Gesamtfehler als Wurzel aus den Quadratsummen der Einzelfehler berechnet. Da die statistische Addition zu einem kleineren Gesamtfehler führt, wird sie allerdings oft auch in einer weniger strengen Auslegung auf die systematischen Fehler angewandt:

$$(4) F_{\text{ges}} = \sum_1^n |F_i| \quad \text{Summierung von } n \text{ systematischen Fehlern}$$

$$(5) F_{\text{ges}} = \sqrt{\sum_1^n F_i^2} \quad \text{Summierung von } n \text{ stochastischen Fehlern (Statistische Addition)}$$

Zuverlässigkeit

Ausfallrate

Die Zuverlässigkeit eines Sensors ist eine rein statistische Größe und wird wie bei jedem Bauteil durch seine Ausfallrate λ gekennzeichnet, die in 1/h, %/h oder ppm/h angegeben wird. Hierbei ist λ mit einer sehr großen Zahl von Teilen ermittelt. Will man mit einer nicht allzu großen Anzahl N (< 40) von Sensoren die Ausfallrate näherungsweise bestimmen, so beobachtet man das Ausfallverhalten dieser Stichprobe unter Betriebsbedingungen so lange, bis – nach endlicher Zeit – alle Teile ausgefallen sind. Beginnt man die Beobachtung zum Zeitpunkt t_0 und bezeichnet den zum späteren Zeitpunkt t_i noch vorhandenen intakten Restbestand als $B(t_i)$, so erhält man für die Ausfallrate λ als gute Näherung die Ausfallquote q zu:

$$(6) q(\Delta t_i, t_i) = \frac{B(t_i) - B(t_{i+1})}{\Delta t_i \cdot B(t_i)} \quad \text{Ausfallquote}$$

mit $\Delta t_i = t_{i+1} - t_i$.

t_i sind diejenigen Zeitpunkte, an denen jeweils einzelne oder mehrere Teile ausfallen (Bild 17). Das Verhältnis von Momentan- zu Anfangsbestand wird auch als relativer Bestand B_R bezeichnet:

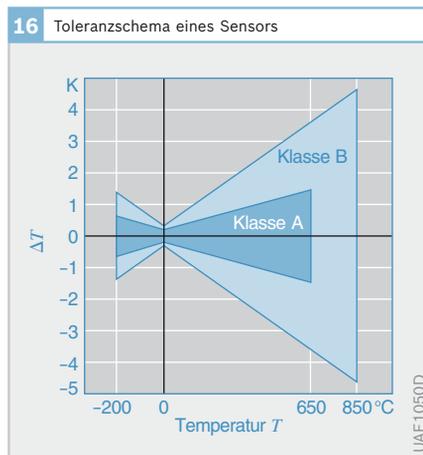


Bild 16
Toleranzschema dargestellt am Beispiel eines Widerstandstempersensoren

$$(7) B_R(t_i, t_0) = \frac{B(t_i)}{B(t_0)}$$

Diesem entspricht bei einer sehr großen Anzahl von Teilen ($N \rightarrow \infty$) die Überlebenswahrscheinlichkeit $R(t)$ zum - hier jetzt kontinuierlich veränderlichen - Zeitpunkt t . Die Ausfallrate errechnet sich hiermit für eine große Anzahl (in der Praxis $N \approx 2000$) von Sensoren als prozentuale Änderung der Überlebenswahrscheinlichkeit R pro Zeiteinheit dt zu:

$$(8) \lambda(t) = -\frac{1}{R(t)} \cdot \frac{dR}{dt} \quad \text{Ausfallrate (engl: failure rate)}$$

Unter der Zuverlässigkeit versteht man den Kehrwert der Ausfallrate:

$$(9) z = \frac{1}{\lambda} \quad \text{Zuverlässigkeit (engl.: reliability)}$$

Zur Definition der Ausfallrate λ bedarf es eines Ausfallkriteriums:

- ▶ Vollaussfall,
- ▶ Teilaussfall,
- ▶ Sprungausfall (sprungartige Merkmalsänderung),
- ▶ Driftausfall (allmähliche Merkmalsänderung).

Es ist ferner unbedingt festzulegen, unter welchen Betriebsbedingungen die so definierte Ausfallrate zu verstehen ist. Hierbei ist beispielsweise gerade bei elektrischen Teilen wie Sensoren zu unterscheiden zwischen echter, aktiver Betriebszeit (eingeschalteter Zustand) und Lebensdauer im Sinne reiner Lagerzeit. Ohne diese Zusatzangaben ist jede Angabe einer Ausfallrate wertlos!

Ausfallraten werden meist mittels Zeitraffermetoden ermittelt. Hierbei werden Raffungsfaktoren dadurch erzielt, dass die Sensoren verschärften Betriebsbedingungen ausgesetzt werden. Zum Einsatz wirklichkeitsgerechter Zeitrafferverfahren bedarf es eines hohen Maßes an Erfahrung.

Zur Kennzeichnung der Zuverlässigkeit eines Sensors wird auch der Begriff der Mittleren Lebensdauer T_M verwendet. Diese berechnet sich im Falle einer Stichprobe in guter Näherung aus der Summe der Einzellebensdauern T_i :

$$(10) T_M \approx \frac{1}{N} \cdot \sum_1^N T_i, \quad \text{bzw.}$$

$$(11) T_M = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad \text{für eine sehr große Zahl von Teilen.}$$

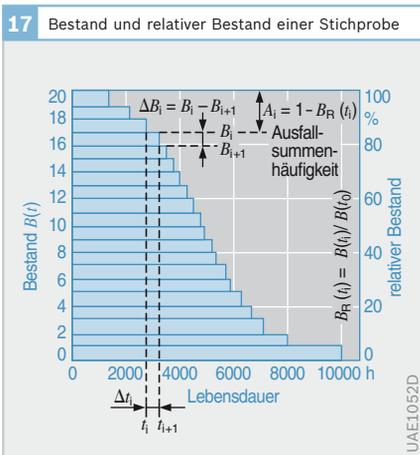


Bild 17
Betrachtung für eine Stichprobe von $N = 20$ Sensoren; mittlere Lebensdauer $T_M = 4965$ h.

