

Das elektrisch elektronische Steuerungssystem von Common-Rail Dieselflugmotoren

Teil: Sensorik und Aktorik

Verband der Luftfahrtsachverständigen/ Technik

Autoren:
Prof. Dr. Werner Bauer
Prof. Dr. Martin Doll Helmut Wolfseher

Jede Motorsteuerung benötigt exakte Informationen über den aktuellen Motorzustand. Diese Informationen werden mit Hilfe von Sensoren gewonnen und der Steuerung als analoge oder digitale Nachricht zur Verfügung gestellt. Zunächst müssen diese Informationen aufbereitet werden, dann dienen sie den in der elektronischen Steuerung verankerten Regelfunktionen als Eingangs- und/oder Korrekturgrößen und bestimmen damit die Ansteuerung der Aktoren des Motors.

Der Motor muss nach CS-E 210¹ einer Fehleranalyse unterworfen werden, aus der sich u. a. Konsequenzen für die Sensoren ergeben. Selbstverständlich werden keine unnötigen Sensoren verbaut, denn jeder Sensor ist für den optimalen Betrieb des Motors nötig, aber nicht jeder Sensor ist für die Aufrechterhaltung des Betriebs unbedingt erforderlich, wenn man eine geringe Leistungsreduktion in Kauf nimmt. So ist die Kenntnis der aktuellen Zylinderposition eine dringende Voraussetzung, um den Kraftstoff zum richtigen Zeitpunkt einzuspritzen. Ein Ausfall des Kurbelwellensensors hat zur Folge, dass sich der richtige Zeitpunkt des Einspritzens nicht mehr exakt bestimmen lässt und deshalb der Motor ausfällt. Daher werden an Dieselflugmotoren 2 Kurbelwellensensoren verbaut, damit bei Ausfall eines Sensors durch den zweiten die Zylinderposition trotzdem bestimmt werden kann.

Bei anderen Sensoren kann bei Ausfall ein hinterlegter Ersatzwert verwendet werden oder mit akzeptabler Unschärfe der Wert aus anderen Motorinformationen abgeleitet werden. Als Beispiel sei der Kühlwassertemperatursensor genannt, bei dessen Ausfall in der Regel ein Default-Wert anstelle des nicht vorhandenen Messwerts verwendet wird.

So ermittelt z.B. der Raildrucksensor eine

wesentliche Eingangsgröße für die Regelung des Raildrucks, der über das Druckregelventil und soweit vorhanden, über die Zumesseinheit eingestellt wird. Üblicherweise wird die Freigabe zum Einspritzen von Kraftstoff nur bei ausreichendem Raildruck vom Motorsteuergerät erteilt. Damit der Motorbetrieb nicht eingestellt werden muss, wenn der Raildrucksensor keine plausiblen Werte für den Druck im Rail liefert, kann vom Motorsteuergerät aus Drehzahl, Kraftstofftemperatur und anderen Motorgrößen ein Ersatzwert für den Notlauf gebildet werden.

Der Hochdruckpumpe eines Common-Rail² Systems muss der Kraftstoff durch eine Niederdruckpumpe mit ausreichendem Vordruck zur Verfügung gestellt werden. Dies kann durch eine vorgeschaltete mechanische Niederdruckpumpe erfolgen oder die Aufgabe wird, wie bei den aktuellen, neuen PKW-Dieselmotoren, von einer elektrischen Vorförderpumpe übernommen. Da diese elektrische Vorförderpumpe für den Betrieb des Motors zwingend erforderlich ist, wird sie doppelt ausgeführt. Die Umschaltung von einer Niederdruckpumpe auf die andere erfolgt bei Absinken des Drucks auf der Kraftstoffniederdruckseite. Der Kraftstoffniederdruck wird durch einen Drucksensor ermittelt. Dieser Kraftstoffniederdrucksensor muss aufgrund seiner Funktion nicht dual ausgeführt werden: Unabhängig davon, ob in der Zuleitung des Kraftstoffs vom Tank zur Hochdruckpumpe der Druck tatsächlich abfällt, oder nur sein Messwert aufgrund eines Sensordefekts nicht zur Verfügung steht, wird die zweite elektrische Kraftstoffpumpe aktiviert. Dabei ist es gleichgültig, ob diese Aktivierung aufgrund des Ausfalls der ersten elektrischen Kraftstoffpumpe oder des Ausfalls des Kraftstoffniederdrucksensors erfolgt.

Die folgende Tabelle listet die gebräuchlichsten Sensoren auf und zeigt, welche

Sensoren dual ausgeführt werden müssen und durch welche Ersatzreaktionen bzw. Ersatzwertbildung bei einfach ausgeführten Sensoren die Motorfunktionen aufrecht erhalten werden. Dabei ist zu beachten, dass diese Tabelle keine Aufstellung aller Sensoren für alle Motoren ist. D.h. bei einem bestimmten Motor mag ein aufgeführter Sensor nicht vorhanden sein (man arbeitet dann praktisch immer mit einem Ersatzwert) oder es mag an einem speziellen Motor einen Sensor geben, der in der Tabelle nicht enthalten ist³.

¹CS-E ist die Abkürzung für *Certification Specifications For Engines*. Unter "CS-E 210 Failure Analysis" findet man:

"A failure analysis of the Engine, including the control system for a typical installation shall be made to establish that no single fault, or double fault if one of the faults may be present and undetected during pre-flight checks, could lead to unsafe Engine conditions beyond the normal control of the flight crew."

²Im folgendem Text wird Common Rail auch mit der Abkürzung „CR“ verwendet.

³Die Gestaltung des Motors wird auch von der Richtlinie FAA AC 23.1309 bestimmt. Im Anhang 1C wird die Abhängigkeit des Software Development Assurance Levels (DAL) von der Klassifizierung des Zielflugzeugs dargestellt.

Der Development Assurance Level entscheidet auch darüber, ob die elektronische Hardware des Motorsteuerungssystem als „simple“ oder „complex“ eingestuft wird⁷. Sollte die Behörde feststellen, dass die Hardware „complex“ ist, muss die Hardware nach den Vorgaben der RTCA DO-254 entwickelt werden. Da das ganze System der elektrisch elektronischen Motorsteuerung bewertet wird, sind bei dieser Bewertung auch die Sensoren zu berücksichtigen.



PERMANON

Permanon Aircraft Protect and Fly.

Permanon GmbH
 > Winterstetten 53
 > 88299 Leutkirch, Germany
 > Tel. +49 75 67 - 15 63
 > Fax + 49 75 67 - 10 31
 > info@permanon.de
 > www.permanon.com

Sensor		Messwert	Ersatzreaktion bei Ausfall
Nockenwellen-sensor	dual	Der Nockenwellenpositionsgeber erfasst berührungslos über ein Segment an der Nockenwelle die Nockenwellenstellung. Mit dem so gewonnenen Signal erkennt das System die OT-Stellung des ersten Zylinders.	Der 2. Sensor wird verwendet.
Kurbelwellen-sensor	dual	Die Motordrehzahl wird mittels eines Induktivgebers oder Hallsensors über ein Inkrementrad von 60-2 Zähnen erfasst. Aus diesen Impulsen werden die Motordrehzahl und die aktuelle KW-Stellung ermittelt.	Der 2. Sensor wird verwendet.
Temperatur-sensor Ladeluft	dual	Die Ladelufttemperatur, gemessen im Ansaugtrakt, wird zum Schutz der Motormechanik benötigt. Bei unplausiblen Messwerten oder Ausfall des Sensors wird für den Notlauf ein applizierbarer Ersatzwert herangezogen.	Der 2. Sensor wird verwendet.
Ladedruck-sensor	dual	Der Ladedrucksensor ermittelt den Ladedruck zwischen Turbolader und Motor und liefert der Motorsteuerung die Information zur Steuerung der Verbrennung und zur Regelung des Ladedrucks und ermöglicht den Schutz des Laders vor zu hohen Drehzahlen.	Der 2. Sensor wird verwendet.
Raildruck-sensor	single	Der Raildruck wird für die Regelung der ZME ⁴ und/oder DRV ⁵ sowie zum Motorschutz benötigt.	Es kann ein Ersatzwert als Funktion aus Einspritzmenge, Drehzahl und anderen Motordaten ermittelt werden.
Atmosphären-drucksensor	dual	Der Atmosphärendruck wird für höhenabhängige Korrekturen von Sollwerten und insbesondere für die Regelung des Ladedrucks benötigt.	Der 2. Sensor wird verwendet.
Lastwahlhebel (Power Lever)	dual	Aktueller Leistungswunsch, Eingangsgröße zur Berechnung der Spritzmenge	Der 2. Sensor wird verwendet.
Kühlwasser-temperatur-sensor	single	Die Kühlwassertemperatur dient zur Information des Piloten, und wird für die Verbrennungskorrektur sowie für den Motorschutz benötigt.	Verwendung eines Default-Wertes.
Öltemperatur-sensor	single	Die Motoröltemperatur dient zur Information des Piloten, und wird zur Verbrennungskorrektur und den Motorschutz verwendet.	Verwendung eines Default-Wertes.
Öldrucksensor	single	Der Motoröldruck wird zur Information des Piloten erfasst und an die Anzeigeeinstrumente im Cockpit übermittelt.	Keine (Die Anzeige fällt aus)
Getriebeöltemperatur-sensor	single	Die Getriebeöltemperatur wird vom Steuergerät zur Information des Piloten an die Anzeigeeinstrumente im Cockpit übermittelt.	Keine (Die Anzeige fällt aus)
Kraftstoff-temperatur-sensor	single	Die Kraftstofftemperatur kann für die Motorschutzfunktion und die Raildruckstrategie verwendet werden.	Verwendung eines Default-Wertes.
Kraftstoff-niederdruck-sensor ⁶	single	Der Kraftstoff-Niederdruck-Sensor misst den Absolutdruck des Kraftstoffs und prüft damit die ordnungsgemäße Funktion der aktiven Pumpe. Der Sensor ist nicht dual ausgeführt, da bei Ausfall des Sensors beide Pumpen aktiviert werden.	Die 2. elektrische Vorförderpumpe wird eingeschaltet.
Ölstandsensor	single	Der Ölstand wird zur Information des Piloten erfasst.	Keine (Die Anzeige fällt aus)

⁴ZME: Abkürzung für Zumesseinheit (Erläuterung siehe Tabelle Aktoren und Hilfsaggregate)

⁵DRV: Abkürzung für Druckregelventil (Erläuterung siehe Tabelle Aktoren und Hilfsaggregate)

⁶Wird nur in CR-Systemen mit elektrischen Vorförderpumpen verbaut.

⁷In Figure 2-3 der DO-254 wird die Abhängigkeit der Prüfung auf komplexe Hardware vom Design Assurance Level gezeigt.

→ Fortsetzung auf Seite 26

Von der IHK-Kiel öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger für die Schadenbeurteilung und Bewertung von Luftfahrzeugen bis 20t MTOW

Ralf Wagner

Luftfahrtsachverständiger
Prüfer Klassen 1 und 2

Sachverständigenbüro · Ralf Wagner
 Friedlandstraße 20 · 25451 Quickborn
 Tel. 0 41 06 - 65 83 71 · Fax 0 41 06 - 65 83 73
 Mail dslwagner@aol.com



HMS

Aviation & Wind Turbine
 Ingenieurbüro für
 BLADE ENGINEERING
 we take care: **rotorcare**
 HMS - the experts' voice
 in blade quality

Mitglied im Sachverständigenbeirat
 des Bundesverbands WindEnergie
 Sprecher der Qualitäts-Initiative
 Rotorblatt (QIR) im BWE e.V.
 Regionalstelle Berlin des Verbands
 der Luftfahrtsachverständigen e.V.

HMS Sachverständigenbüro
 Dr. Ing. Wolfgang Holstein
 14547 Beelitz · OT Schäpe
 Fon (030) 26 48 45 75
 Fax (030) 26 48 45 76
<http://www.hms-technologie.de>
 E-Mail: dr.w.holstein@t-online.de

Die Gestaltung von Sensoren wird von der Messaufgabe bestimmt. Einfache Messaufgaben, wie die Temperaturermittlung werden im Allgemeinen von einfachen Sensoren (Abb. 2) übernommen. So wird die Temperaturmessung beispielsweise auf eine Widerstandsmessung (NTC) zurückgeführt. Schwierige oder komplexe Messprobleme haben Sensoren mit einem immer komplexeren Aufbau zur Folge (Abb. 1).

Die Entwicklung der Sensoren wird vor allem von der automobilen Entwicklung getrieben. Diese Entwicklung wird vom Wunsch bestimmt, möglichst genaue Sensoren mit möglichst wenigen Leitungen zum Steuergerät zu verwenden. Weitere Ziele sind die störunempfindliche Übertragung und die Verhinderung von immer größerer Komplexität des Steuergeräts für die Signalaufbereitung.

Die Regelung moderner Dieselmotoren strebt einen optimalen Betriebspunkt des Motors an. Die dafür nötigen Sensoren müssen immer schwierigere Messaufgaben erledigen. Durch Verlagerung der Signalaufbereitung aus dem Motorsteuergerät hinaus in den Sensor hinein wird zwar die Komplexität des Steuergeräts durch die Messaufgabe nicht erhöht, aber dafür kann komplexe Elektronik im Sensor nötig sein. Bei der Entwicklung von Flugmotoren muss man zwangsläufig auf Sensoren und Aktoren aus automobiler Entwicklung zurückgreifen. Dabei ist die Komplexität von Sensoren und Aktoren bei der Entwicklung unter dem Gesichtspunkt der Vorgaben der DO-254 zu untersuchen und dabei auch die Qualitätssicherung für die spätere Produktion in die Überlegungen mit einzubeziehen.

Auch aufwändigere Messverfahren ziehen höhere Komplexität nach sich. Bei bestimmten Messaufgaben ist aber ein aufwändiges Messverfahren u.U. nur schwer zu umgehen. Die Ermittlung des Ölstandes in der Ölwanne ist angesichts von Strömungen und Bewegungen der Oberfläche die der Motorbetrieb hervorruft eine anspruchsvolle Aufgabe, die beim Einsatz im Flugzeug noch weiter erschwert wird (siehe Abb. 3 und 4). Für die Wahl eines Sensors lassen sich aufgrund der vorherigen Überlegungen folgende Kriterien angeben:

- Ist der Sensor erprobt?
- Entspricht der Sensor der Messaufgabe (Z.B.: Robuster Temperatursensor für die Messung in Flüssigkeiten, schnell ansprechender Sensor für die Messung der Lufttemperatur nach dem Lader)?
- Ist die Komplexität des Sensors dem Design Assurance Level angemessen?
- Preis für Sensor, Leitung und Signalaufbereitung im Motorsteuergerät?

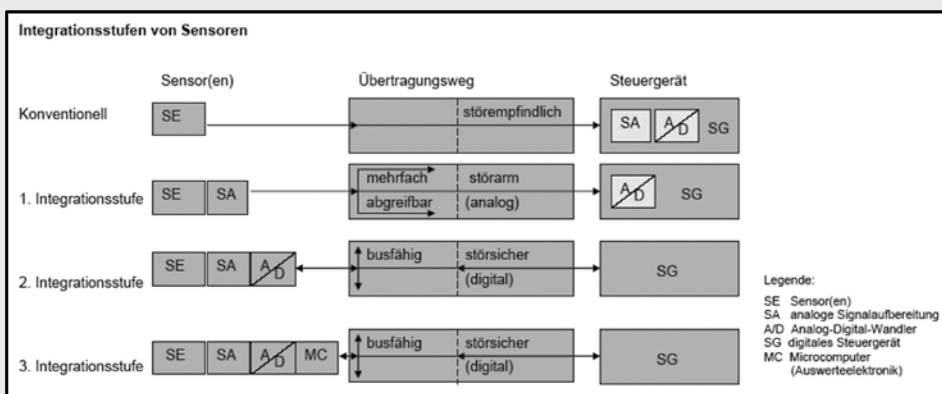


Bild 1 Integrationsstufen von Sensoren und ihre Auswirkung auf die Komplexität⁸

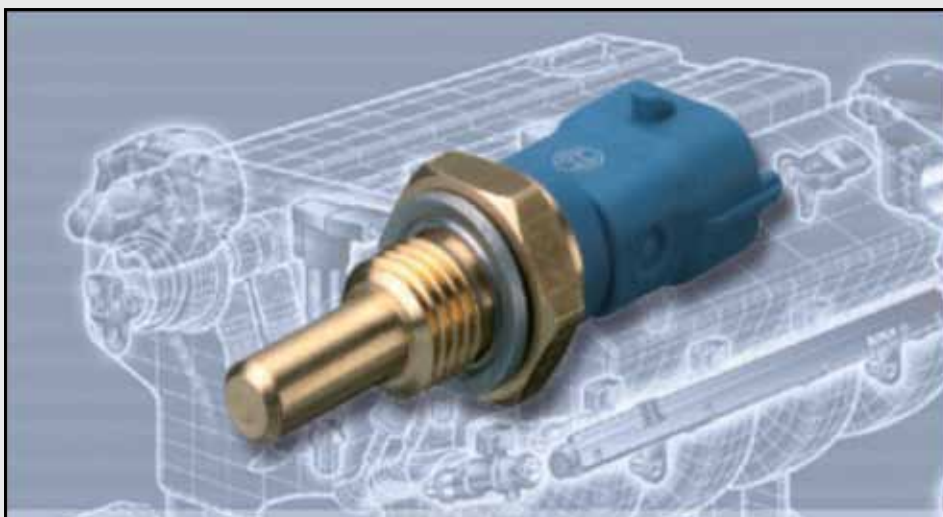


Bild 2 Temperatursensor für Flüssigkeiten⁹



Bild 3 Kombinierte Sensoren für die Messung von Ölstand, Öltemperatur und Ölqualität¹⁰



Bild 4 Ölstandsensor auf Ultraschallbasis¹¹

⁸Quelle: Bosch Dieselmanagement, Friedrich Vieweg & Sohn Verlag, Wiesbaden, 2004

⁹Werkbild Robert Bosch GmbH. Der Metallmantel um das Widerstandselement besitzt eine thermische Masse, die einen guten Wärmeübergang gegenüber dem zu messenden Medium verlangt, da sonst die Messung zu träge erfolgt. Bei Sensoren für Messungen von Luft oder anderen Gasen wird das Messelement mit einem dünnen Mantel von geringer thermischer Masse umgeben. Das ergibt schneller messende Sensoren, deren mechanische Stabilität dafür geringer ist.

¹⁰Werkbild Continental. Der Sensor kann mit einer seriellen Schnittstelle (LIN) ausgerüstet werden und verlangt daher über eigene Intelligenz, die das LIN-Protokoll bedienen kann.

¹¹Quelle: ATZ online Juli 2008

¹²Die Robert Bosch GmbH spricht von höheren Integrationsstufen.

Aus den Eingangssignalen der Sensoren erkennt das Motorsteuergerät den aktuellen Betriebszustand des Motors und berechnet daraus die Stellsignale für die Aktoren.

Die wichtigsten Aktoren und Hilfsaggregate sind in der folgenden Tabelle aufgeführt.

Mit Hilfe der Aktoren steuert das Motorsteuergerät den Verbrennungsablauf des Motors. Am einsichtigsten ist dies bei den Injektoren (Abb. 5), die den Kraftstoff in den Zylinder einspritzen. Die Einspritzzeiten liegen im Bereich von unter 1 Millisekunde bis zu mehreren Millisekunden. Da bei modernen Dieselmotoren mit Pilot einspritzungen (Voreinspritzungen) und Nacheinspritzungen gearbeitet wird muss die Öffnung und Schließung des Ventils in einer äußerst kurzen Zeitspanne von ca. 250 µs erfolgen.

Die analoge Ansteuerung von Aktoren erfolgt vom Motorsteuergerät in aller Regel über pulsweitenmodulierte (PWM) Signale. Die PWM-Ansteuerung hat gegenüber einer Ansteuerung über D/A-Wandler folgende Vorteile:

- Robuste Signale, die auch Lasten treiben können
- Keine Offsetdrift durch Alterung oder Temperatureinfluss
- Preisgünstige Bauteile für die Endstufe
- Keine Kalibrierung erforderlich

Der typische Signalverlauf eines PWM-Signals ist im folgenden Bild 6 dargestellt. Das Signal kann digital zwei Signalpegel annehmen – Zustand Low (typisch 0V) und Zustand High (typisch 5V). Der Wechsel von Low auf High und zurück erfolgt mit einer fest eingestellten Grundfrequenz (typisch 10 bis 100 Hz). Die Wahl dieser Grundfrequenz hängt von der Trägheit bzw. Eigenfrequenz des anzusteuern Aktors ab.

Die zu übertragende analoge Information wird nun auf die Dauer der High-Phase aufmoduliert, d.h. es wird das Verhältnis von Low- zu High-Phase verändert.

Dieses Verhältnis wird auch als Tastverhältnis bezeichnet.

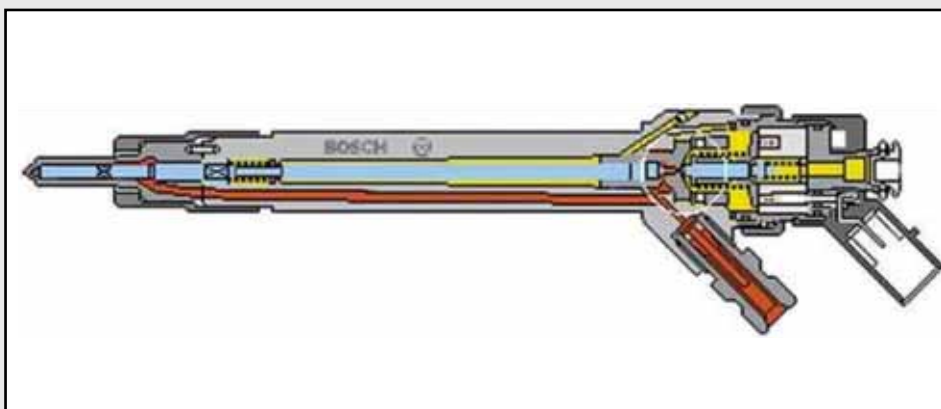


Bild 5 Schnittbild eines Injektors¹³

Aktoren und Hilfsaggregate	Funktion	Bemerkung
Injektoren	Aufgrund eines elektrischen Signals erfolgt eine Einspritzung des Kraftstoffs in den Zylinder.	Bisher wurden in Flugmotoren nur Magnet-Injektoren eingesetzt. Mit Piezo-Injektoren könnte die Verbrennung noch besser gesteuert werden.
ZME (Zumesseinheit)	Die Zumesseinheit dosiert in modernen CR-Systemen die Menge des Kraftstoffs, der von der Niederdruckseite der Hochdruckpumpe zur Verfügung gestellt wird. Dadurch wird die Menge des Kraftstoffs der auf den hohen Druck im Rail gebracht wird auf die notwendige Menge begrenzt.	Das überschüssige Öl wird in den Tank zurückgeführt.
DRV (Druckregelventil)	Das Druckregelventil stellt den Raildruck auf den Nenndruck ein.	Der überschüssige Kraftstoff wird in den Tank zurückgeführt.
EPW (Elektropneumatischer Wandler) oder Ladedruckregelventil	Der EPW wird vom Motorsteuergerät nach einem Algorithmus angesteuert, der sicherstellt, dass der aktuell erforderliche Ladedruck eingestellt wird.	Die Erhöhung des Ladedrucks wird durch eine höhere Drehzahl der Turbine des Turboladers erreicht. Durch den EPW muss die mögliche Überdrehzahl des Turboladers sicher verhindert werden, was aufgrund der stärkeren Umgebungsdruckänderungen beim Flugmotor sehr wichtig ist.
Elektrische Vorförderpumpe	Bei manchen CR-Systemen wird der Hochdruckpumpe eine mechanische Vorförderpumpe vorgeschaltet. Bei derartigen Systemen entfällt die elektrische Vorförderpumpe	
Governor (Propellerregler)	Über den Governor wird der Propellerpitch von Constant-Speed-Propellern eingestellt. Bei elektrisch verstellbaren Propellern erfolgt diese Verstellung meist über elektrische Stellmotoren.	Von der kombinierten Motor- und Propellersteuerung kann die Ansteuerung der Hydraulik direkt (ohne den Weg über eine elektrische Propellerregelung) vorgenommen werden. In anderen Anwendungen erhält der Governor ein Stellsignal für die vorgewählte Drehzahl von der Motorsteuerung und regelt diese wie bei herkömmlichen Motoren.
GZE (Glühzeitendstufe)	Die Glühzeitendstufe steuert die Glühstiftkerzen an. Bei Verwendung von Schnellstartglühkerzen setzt das eine intelligente Elektronik voraus.	
Glühstiftkerzen	Die Glühstiftkerzen leiten bei kaltem Motor die Verbrennung ein.	
Starter	Der Starter setzt den stehenden Motor in Bewegung und muss dabei nicht nur die Reibungskräfte des Motors sondern auch die Massenträgheit des Propellers überwinden	
Generator/Alternator	Der Generator ist die „Lichtmaschine des Autos“ und versorgt das Bordnetz mit elektrischer Energie.	Bei Ausfall des Generators wird die Versorgung des Bordnetzes vom Akkumulator für eine begrenzte Zeit übernommen.
Akkumulator	Der Akkumulator stellt die notwendige Energie für den Motorstart zur Verfügung und versorgt für begrenzte Zeit das Bordnetz mit Strom, wenn der Generator ausgefallen ist.	

¹³Quelle: Robert Bosch GmbH

Im oberen Teil von Abb. 6 wird auf diese Weise die Information „10%“ übertragen, im unteren Teil die Information „50%“. Ein typisches Beispiel für eine PWM-Ansteuerung ist das Wastegate zur Regelung bzw. Begrenzung des Ladedrucks bei einem aufgeladenen Motor. Die Funktionsweise des Wastegates ist im folgenden Bild 7 dargestellt. Durch das Öffnen des Wastegates wird ein Teil des Abgasmassenstroms an der Turbine des Abgasturboladers vorbei geleitet und die Turbinen- und damit die Verdichterleistung reduziert.

Am Ladedruck-Regelventil liegt auf der einen Seite der Ladedruck auf der anderen Seite der Umgebungsdruck an. Durch die Ansteuerung des Ladedruck-Regelventils über ein PWM-Signal wird in dem pneumatischen Steller der Druck eingeregelt. Pulsbreite 0% bedeutet Umgebungsdruck im Steller,

Pulsbreite 100% bedeutet Ladedruck im Steller. Der aufmodulierte Druck im Steller erzeugt über eine Membran eine Gegenkraft zur Federkraft und bewirkt eine Öffnung der Wastegate-Klappe.

Über die Aufgaben der Glühkerzen und des Glühkerzensteuergeräts wurde bereits in vorangegangenen Artikeln eingegangen.

Die Bedeutung von Sensoren und Aktoren für das System der elektrisch-elektronischen Motorsteuerung macht ihre dauernde fehlerfreie Verfügbarkeit notwendig. Und erfordert Ersatzstrategien, um einen Ausfall zu beherrschen. Auf die Notwendigkeiten, die sich aus den Regularien ergeben, wird im Laufe dieser Artikelreihe später eingegangen.

© Prof. Dr. Werner Bauer
Prof. Dr. Martin Doll
Helmut Wolfseher

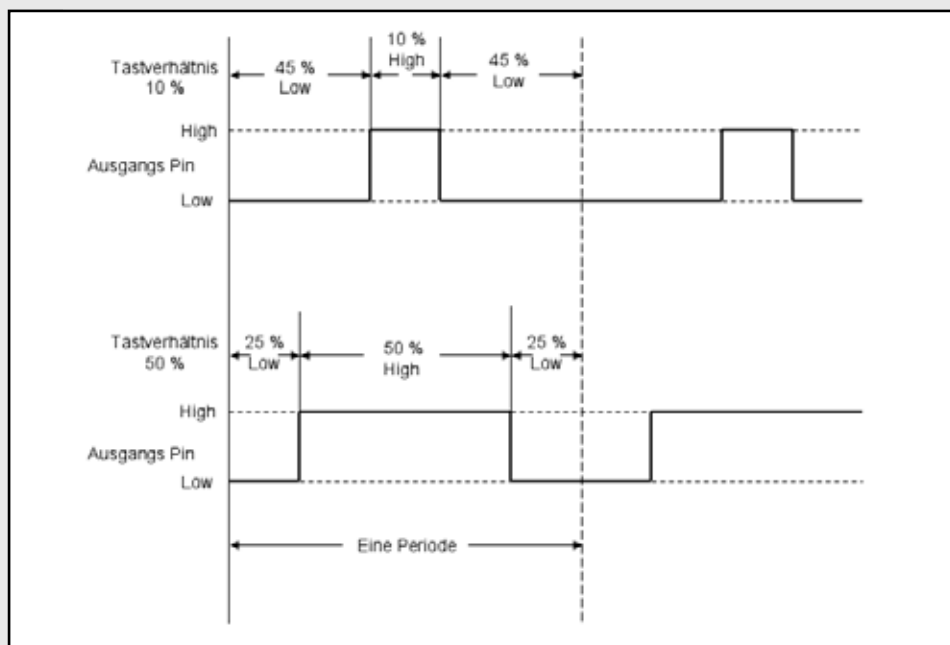


Bild 6 Signalverlauf eines PWM-Signals

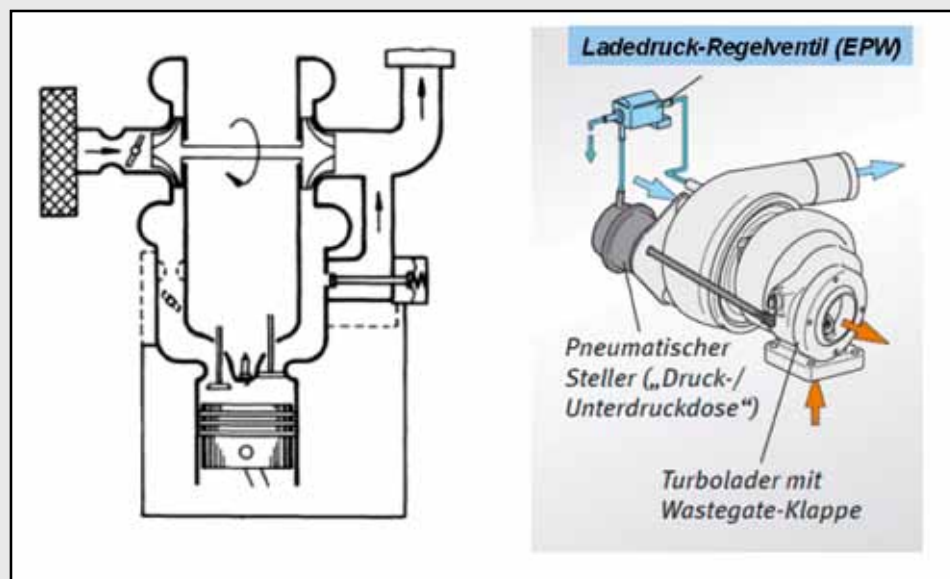


Bild 7 Ladedruckregelung mit Wastegate

Von Piloten 1994 ins Leben gerufen und geleitet, unterstützt die „Stiftung Mayday“ in Not geratene Luftfahrer und deren Angehörige. So betreut sie Flugbesatzungen aller Luftfahrtbereiche nach kritischen und belastenden Vorfällen, um stressbedingten Folgeerkrankungen entgegenzuwirken. Ziel aller Hilfsmaßnahmen ist Anregung und Unterstützung zur Selbsthilfe.

In ihrem Namen trägt sie bewusst den Notruf der internationalen Luftfahrt: Mayday. Helfen Sie mit, dass auf diesen Notruf stets rasche Hilfe erfolgen kann.

Schirmherr ist Bundesminister a.D., MdB Dr. Otto Schily.



Stiftung Mayday

Frankfurter Straße 124,
63263 Neu-Isenburg
Telefon: 07 00 – 77 00 77 01
Fax: 07 00 – 77 00 77 02

E-Mail:
info@Stiftung-Mayday.de
Internet:
www.Stiftung-Mayday.de

Spenden:
Frankfurter Sparkasse
BLZ 500 502 01,
Kontonummer: 4440
IBAN: DE36 5005 0201
0000 0044 00
SWIFT-BIC.: FRASDEFFXXX