

# Das elektrisch elektronische Steuerungssystem von Common-Rail Dieselflugmotoren



Verband der Luftfahrtsachverständigen/ Technik

Autoren: Prof. Dr.-Ing. Werner Bauer Helmut Wolfseher

Common-Rail Dieselmotoren benötigen aufgrund ihrer komplexen Technologie eine elektronische Steuerung, die ihre Informationen über den Betriebszustand des Motors von elektrischen Sensoren erhält und neben anderen Aktoren, insbesondere die Injektoren, elektrisch ansteuert. Sensoren, Aktoren, Kabelsatz, elektronische Motorsteuereinheit mit Software und Applikationsdaten, elektrische Vorförderpumpe, Starter sowie Generator und Batterie werden hier als Teil des „elektrisch elektronischen Motorsteuerungssystems (EEEC)“ betrachtet. Obwohl oder gerade weil sich im elektrisch elektronischen Steuerungssystem verschiedene Ingenieurdisziplinen treffen wird dem Gesamtsystem in der Literatur wenig Beachtung geschenkt. Allenfalls über einzelne Aspekte des Gesamtsystems wie neue Sensoren oder Injektoren und bestimmte neue im Steuergerät hinterlegte Modelle wird berichtet. Das wird verständlich, wenn man bedenkt, dass das gesamte Motorsteuerungssystem im Automotive Bereich nur einen Teilbereich des gesamten elektronischen Bordnetzes darstellt.

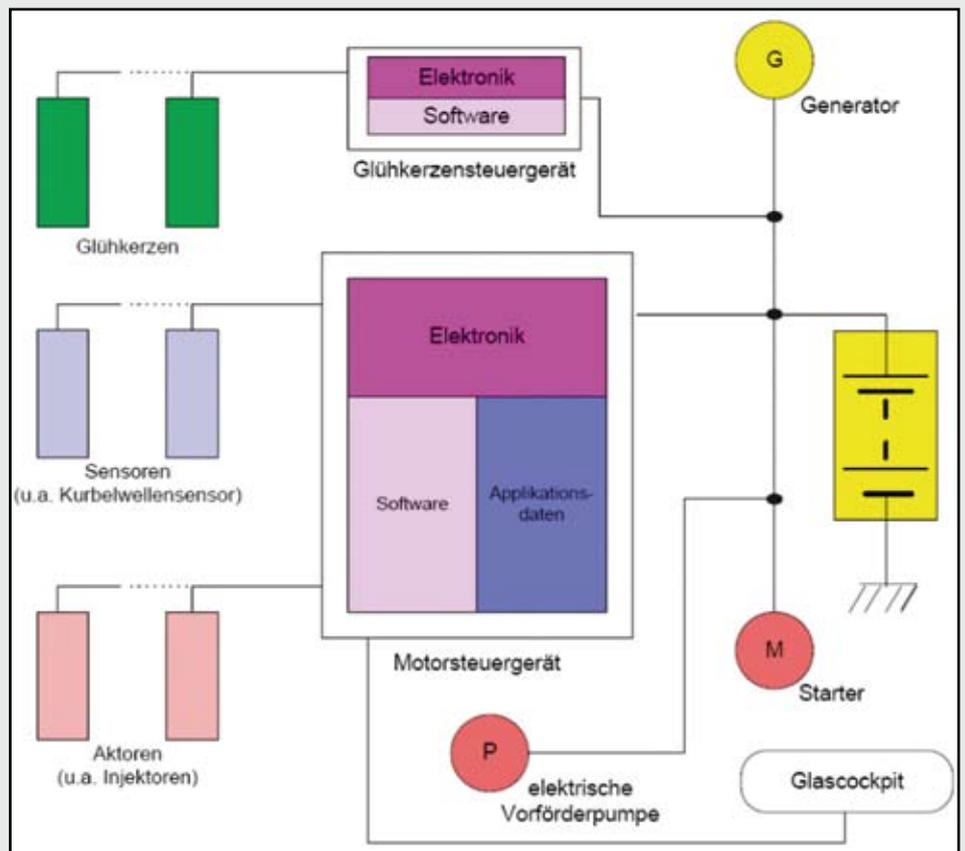


Abb. 1: Schematische Darstellung des elektrisch elektronischen Systems der Steuerung von Flugmotoren

Dagegen stellt in der General Aviation bei Flugzeugen nach CS 23 (FAR 23) das elektrisch elektronische Motorsteuerungssystem das zentrale Nervensystem dar, das die Bereitstellung des nötigen Vortriebs in Abhängigkeit von Flugsituation und Pilotenwunsch übernimmt und garantiert. Dass die gesamtheitliche Betrachtung des Systems der Motorsteuerung bei der Entwicklung von Antrieben in der Luftfahrt eine zentrale Bedeutung hat, zeigt sich schon an der Vielzahl von Regularien, die die Behörden für die Zulassung aufgestellt haben<sup>2</sup>.

Die elektronische Motorsteuerung wird entweder als EEC (Electronic Engine Control) oder als FADEC (Full Authority Digital

Engine Control) bezeichnet. So steuert die Fa. Thielert ihre Centurion Flugmotoren mit einer als „FADEC“, die Fa. Austro Engine dagegen ihren AE 300 Motor mit einer „elektronischen Motorsteuerungseinheit (EECU)“. Sowohl EECU als auch FADEC wurden als Bestandteil des gesamten Motorsteuerungssystems zertifiziert. Konsequenterweise müsste zwischen einem „FADEC-System“ und einem „electric electronic engine control system“ unterschieden werden. Da für beide Motorsteuerungssysteme die gleichen Regularien gelten, hat die Unterscheidung zwischen EECU und FADEC eher eine semantische als eine zertifizierungsrelevante Bedeutung. Im Folgenden wird das auf elektrischen, elektronischen und

speicherprogrammierbaren Komponenten basierende Gesamtsystem der Steuerung von Flugmotoren summarisch unter dem Begriff „electric electronic engine control system“ besprochen und die Begriffe „EECU“ und „FADEC“ synonym verwendet.

Nach der reinen Lehre werden die Anforderungen an das Antriebssystem zu Beginn der Entwicklung definiert und dann unter Berücksichtigung der behördlichen Vorschriften auf die einzelnen Teilsysteme des Antriebs heruntergebrochen, sprich für jedes Teilsystem definiert. In der realen Welt der Motorentwicklung werden dagegen nur diejenigen Anforderungen des neuen Motors definiert, die Erweiterungen oder Änderungen gegenüber einem

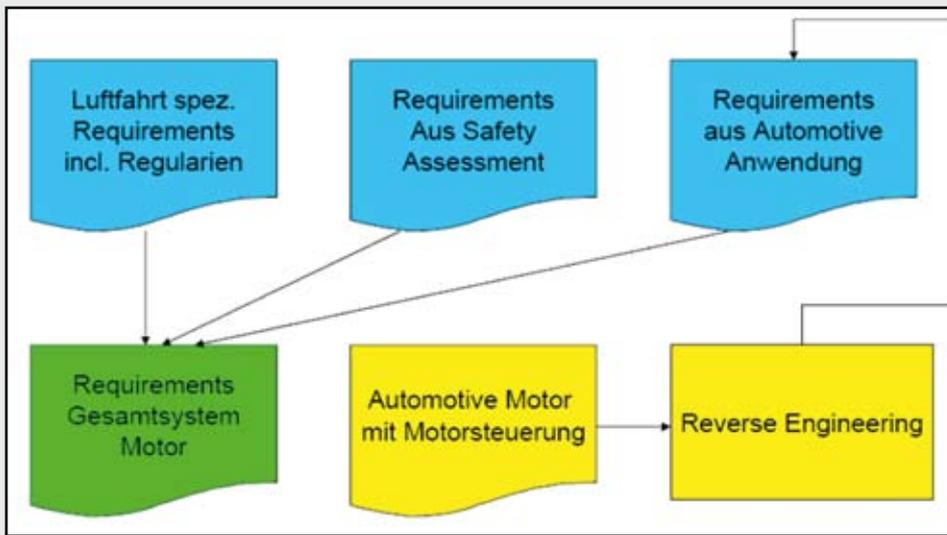


Abb. 2: Schematische Darstellung der Ermittlung der Anforderungen an den Flugmotor<sup>4</sup> (Der rot hinterlegte Teil kommt nur bei Entwicklungen zum Tragen, die auf einem bereits existierenden KFZ-Motor basieren)

Vorgängermotor darstellen. D.h. die Basisanforderungen werden vom Vorgängermotor übernommen. Um die gesamten Anforderungen an den Motor zu beschreiben, müssen daher die Anforderungen des Vorgängers bekannt sein. Sie sind aber auch nur in Form von Erweiterungen und Änderungen gegen über dem des Vorgängers vorausgegangen Motors vorhanden. Die Spezifikation eines Motors im Automotive Bereich setzt sich demnach aus einem nicht oder ungenügend definierten Prototypen (dem Vorgängermotor) und den zusätzlichen, neuen Anforderungen zusammen.

In der Luftfahrt muss die Compliance des Antriebs mit den Vorschriften nachgewiesen werden. Dazu müssen die gesamten Anforderungen an den Motor bekannt sein. Dieses Erfordernis kann insbesondere bei der Ertüchtigung eines Automotors zu einem Flugmotor zu einer Herausforderung werden. Denn zu den luftfahrtspezifischen Anforderungen, die man vom gesamten Motorsystem ausgehend auf die einzelnen Komponenten herunterbrechen kann, müssen die Requirements, die vom KFZ-Motor übernommen werden sollen, ebenfalls beschrieben werden. Wie bereits ausgeführt sind die Requirements des Automotive Motors aber nur teilweise dokumentiert. Sie müssen daher durch Reverse Engineering auf Basis des KFZ-Motors, der in dieser Entwicklungsphase als Prototyp dient, rekonstruiert werden.

Luftfahrtspezifische Requirements, die Ergebnisse des Safety Assessments und die durch Reverse Engineering gewonnenen Anforderungen bzw. die frei und neu definierten Anforderungen stellen die Requirements des Gesamtsystems<sup>5</sup> dar.

Unter Requirements werden im Folgenden alle Anforderungen an das Antriebssystem verstanden. Dies können Bauvorschriften, Safety Aspekte, aber auch Forderungen an den Motor sein (z.B. Leistung, Zylinderzahl, Volldruckhöhe, Verbrauch, Gewicht, Motorabmessungen etc.). Derartige Motordaten sind bei einer Entwicklung, die auf einem Automotive Motor basiert, durch den existierenden Motor vorgegeben. Vertreter einer derartigen Motorentwicklung sind die Centurion Motoren der Fa. Thielert und noch viel deutlicher die AE 300 Motoren von Austro Engine.

<sup>1</sup>Die elektrisch elektronische Motorsteuerung wird in im Folgenden als „electric electronic engine control“ bezeichnet und mit „EEEC“ abgekürzt.

<sup>2</sup>Neben den CS-E (Certification Specifications For Engines), die das Gesamtsystem Motor regeln, sind die DO-160E (Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment), die DO-178B (Software Considerations in Airborne Systems and Equipment Certification) und bei komplexer Hardware auch die DO-254 (Design Assurance Guidance for Airborne Electronic Hardware) auf das elektrisch elektronische Steuerungssystem anzuwenden. Zusätzlich kann die Behörde weitere projektbezogene Zulassungsvorschriften erlassen. Diese werden z.B. als Sonderanforderungen (Special Conditions) bezeichnet.

<sup>3</sup>„EECU“ steht für „electronic engine control unit“

<sup>4</sup>Die elektrisch elektronische Motorsteuerung stellt einen Teil des Flugmotors dar. In dieser Artikelreihe wird die elektrisch elektronische Motorsteuerung als Gesamtsystem bezeichnet. Dies ist zulässig, da im System der Motorsteuerung die Gesamtheit aller elektrischen und elektronischen Komponenten sowie alle Softwarefunktionen und Applikationsdaten enthalten ist.

<sup>5</sup>Die Anforderungen an das Gesamtsystem werden im Folgenden „System Requirements“ genannt.

<sup>6</sup>(Die Autoren haben sich bei dieser Darstellung von Figure 2.1 der DO-254 (Relationships Among Airborne Systems, Safety Assessment, Hardware and Software Process) inspirieren lassen.



**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 Technologie GmbH**  
 Dr. Wolfgang Holstein  
 12099 Berlin · Werbergstr. 9  
 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](mailto:dr.w.holstein@t-online.de)

<b>Von der IHK-Kiel öffentlich          bestellter und vereidigter          Sachverständiger für die          Schadenbeurteilung und          Bewertung von Luftfahr-          zeugen bis 20t MTOW</b>	<b>Ralf Wagner</b>
<b>Luftfahrtsachverständiger          Prüfer Klassen 1 und 2</b>	<b>Sachverständigenbüro · Ralf Wagner          Friedlandstraße 20 · 25451 Quickborn          Tel. 0 41 06 - 65 83 71 · Fax 0 41 06 - 65 83 73          Mail <a href="mailto:dslwagner@aol.com">dslwagner@aol.com</a></b>

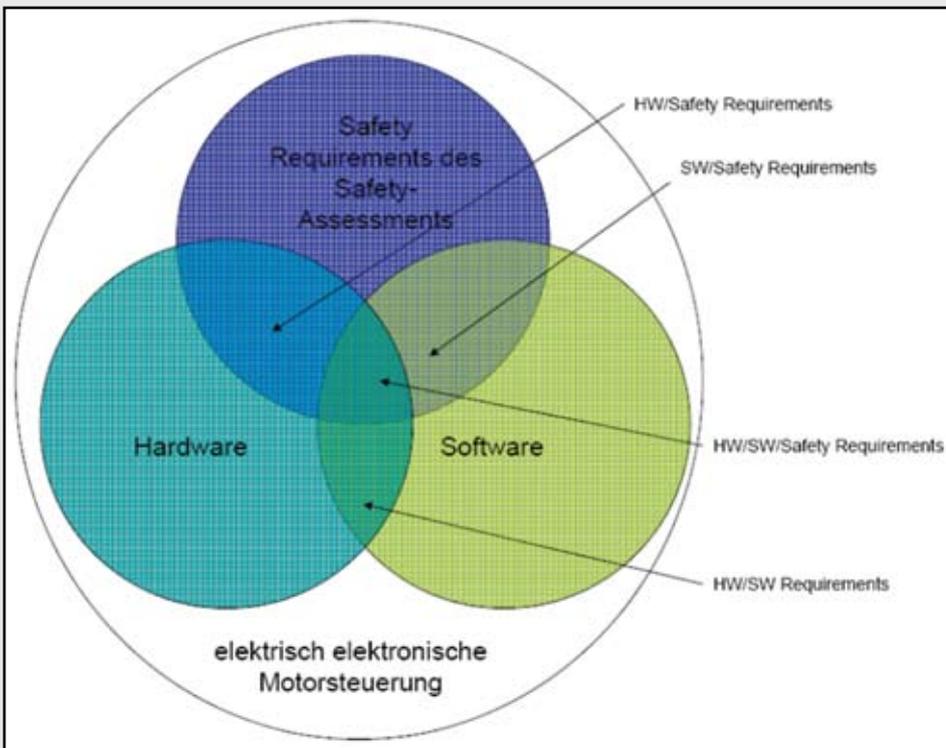


Abb. 3: Schematische Darstellung der Abdeckung der System Requirements durch die einzelnen Komponenten des Gesamtsystems<sup>6</sup>

EECU	Software
Es werden zwei EECU-Boards verwendet. Bei Ausfall oder Störung eines Boards wird auf das andere Board umgeschaltet.	Es wird eine Diagnose entwickelt, die das Erkennen von Fehlern auf dem Board bzw. den Ausfall eines Boards erkennen kann.

Abb. 4

Sensorik	Software
Es wird ein zweiter Kurbelwellensensor installiert	Da der zweite Kurbelwellensensor nicht an derselben Position wie der erste sitzen kann, muss die Software die Positionsangaben des zweiten Sensors korrigieren.

Abb. 5

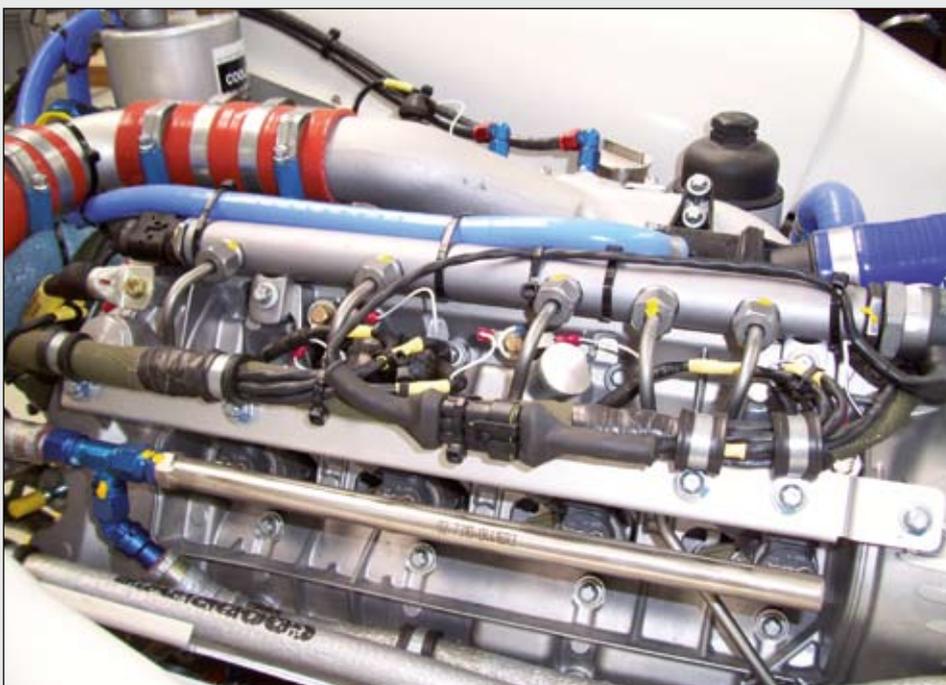


Abb. 6: Ein Blick auf den Centurion Motor der Fa. Thielert<sup>7</sup>:

Ein Teil der System Requirements lassen sich nicht auf einzelne Komponenten des Gesamtsystems herunterbrechen sondern betreffen mehrere Teilsysteme wie Hardware und Software der ECU. Diese Abhängigkeit läßt sich mit folgender Darstellung erläutern: Abb.:3

Das Zusammenwirken der Komponenten des Gesamtsystems soll an zwei Beispielen illustriert werden:

Die Forderung, dass ein Fehler im elektrisch elektronischen Gesamtsystem keinen Motorausfall nach sich zieht, hat beispielsweise folgende Konsequenzen: Abb.: 4

Wie bereits früher gezeigt wurde, ist die Kenntnis der aktuellen Kurbelwellenposition für den richtigen Einspritzzeitpunkt unentbehrlich. Um einen Motorstillstand bei Ausfall des Kurbelwellensensors zu vermeiden, muss daher ein zweiter Kurbelwellensensor verbaut werden. Abb.: 5

Das Bild 6 zeigt das Rail mit den Kraftstoffzuleitungen an die Injektoren. Der in diesem Bild sichtbare Teil des Kabelbaums steuert Sensoren und Aktoren an (z.B. den links das Rail abschließenden Raildrucksensor). Die Injektoren mit ihren Anschlüssen für die elektrische Ansteuerung sind verdeckt. Das Foto illustriert die enge Verzahnung von elektrisch elektronischer Motorsteuerung und dem Motor selbst.

In den folgenden Artikeln sollen die einzelnen Komponenten unter Berücksichtigung der Luftfahrtregularien diskutiert werden.

<sup>6</sup>Die Autoren haben sich bei dieser Darstellung von Figure 2.1 der DO-254 (Relationships Among Airborne Systems, Safety Assessment, Hardware and Software Process) inspirieren lassen.

<sup>7</sup>Die Autoren danken der Fa. Thielert für Fotos von Motor und Komponenten der Motorsteuerung. Sollte der Leser in dieser Artikelreihe Bilder des AE 300 von Austro Engine vermissen, entschuldigen sich die Autoren mit dem Hinweis, dass die Austro Engine GmbH der Bitte nach Bildern nicht entsprochen hat.