

In der Fa. Schmidt Motorentechnik GmbH sind Untersuchungen zur Entwicklung eines Steuergerätes zum Betrieb eines Turbodieselmotors für den Zusatz von LPG Flüssigas zur Verbrauchsreduzierung und zur Leistungsverbesserung mit Prüfstandsarbeiten abgeschlossen worden.

Die Auswahl des Test-Dieselmotors wurde vom Cummins Reihensechszylinder auf einen Volvo Motor TAD 650 VE mit Ladeluftkühler umgestellt. (Anlagen)

Der Volvo-Motor TAD 650 VE wird für unterschiedliche Einsatzzwecke u.a. als Bootsantrieb, als stationärer Motor und Fahrzeugantrieb in LKW verwendet. Der TAD 650 VE wird auch baugleich von Magirus Deutz angeboten.

Die Dieselsteuerung erfolgt über eine VODIA-Elektronik (ECU) von Volvo. Die Einspritzventile sind an einer Common Rail Treibstoffversorgungsleitung angeschlossen und werden elektrisch gesteuert. Die VODIA ECU verfügt über eine standardisierte OBD-C-Schnittstelle zum Auslesen von Motordaten zur Analyse und Störungsbehebung.

Das Steuerpult des Motors verfügt über ein LCD Display mit Steuerungstastatur (Anlage). Motordaten wie Drehzahl, Verbrauchswerte in Liter/Stunde, Temperaturen, Öldruck etc werden angezeigt. Festeinstellungen von Drehzahlen lassen sich voreinstellen. Unabhängig von der Motorlast wird die vorgewählte Drehzahl durch die VODIA-ECU konstant gehalten. Die VODIA ECU verändert mit jeder Lastanforderung die Einspritzmenge und den Einspritzzyklus.

Es sollte der Nachweis einer möglichen Substitution des Dieselkraftstoffes durch Gaszugabe bei Abgabe gleicher Motorleistung als Vergleichsnormale ermittelt werden. Das Ziel der Reduzierung der Treibstoffkosten wurde mit einer Quote von 56 % erreicht und nachgewiesen.

Die Vergleichsparameter wurden auf die Drehzahlen 1200, 1500 und 1800 U/min und die Drehmomente 100 Nm, 300 Nm und 500 Nm für diesen Motor normiert ausgewählt.

Es erfolgte zunächst ein Testlauf mit der Einblasung von Propangas. Der Motorlauf erfolgte ohne Erhöhung der Abgastemperaturen. Verbrennungsgeräusche durch Zündverzug konnten nicht festgestellt werden. Im Leerlauf und bei sehr hohem Gaszusatz erfolgt durch Zündverzug eine unvollständige Verbrennung mit Geräuschen ähnlich dem Schütteln eines Blecheimer mit Glaskugeln.

Der Dieserverbrauch im voreingestellten Betriebspunkt von 1800 U/min und 500 Nm reduzierte sich von 29/30 Liter/Std bis auf 17 Liter/Std. Mit zunehmender Raumtemperatur erhöhte sich der Verbrauchswert von 29 auf 30 Liter/h und wurde auf dem Anzeige-Display der Volvo Penta (Anlage) dargestellt.

Damit war der erste Nachweis erbracht worden, dass sich ca. 40% Dieseltreibstoff als Energieequivalent durch Propangas ersetzen lassen. Die Zuführung der Gasmenge erfolgte über das Luftfiltergehäuse. Die Mengenbestimmung konnte mit der Gewichtsabnahme der Propanflasche nur grob beurteilt werden.

12 Liter Diesel haben ein Gewicht von $0,845 \times 12 = 10,14\text{kg}$ und ein spez. Heizwert von 11,8 kWh/kg oder 42,6 MJ/kg. Das entspricht einem Wärmeäquivalent als Heizwert von 116 kWh. Das Wärmeäquivalent von Propan errechnet sich über den spez. Heizwert 46,3 MJ/kg (LPG 46,1 MJ/kg) und entspricht umgerechnet einer Propan-Gasmenge von 9,33 Kg.

Die Vodia-Steuerung hält die fest eingestellte Drehzahl über die Einspritzmenge zum gebremsten Drehmoment jeweils konstant, regelt Lastschwankungen aus und zeigt den augenblicklichen ermittelten Diesel-Verbrauch umgerechnet in Liter/h im Display an.

Der Verbrauch wird über den Common-Rail Druck, der Durchflußmenge der Einspritzventile und die Ventilöffnungszeiten von VODIA errechnet und in Liter pro Stunde angezeigt.

Das Drehmoment wird als Bremsmoment am Motorenprüfstand eingestellt. Der jeweils gewählte Betriebspunkt aus Drehzahl und Drehmoment des Volvo-Motors wurde durch die Zugabe von Propangas nicht verändert.

Eine Erhöhung der maximalen spezifischen Leistungsabgabe ist möglich. Die Betriebssicherheit des Motors war aufgrund der festen Parameterwahl immer gewährleistet.

Die Substitution von Diesel durch Gas war dadurch über den gewählten Drehzahlbereich stabil. Im Leerlauf und unter 1000 U/min konnten bei erhöhter Gaszugabe über 50% Dieseläquivalent Klopfgeräusche der Verbrennung und des Zündverzuges festgestellt werden.

Der Motorprüfstand wurde aufgrund der positiven Erstergebnisse mit Propangas danach mit LPG Tanks ausgerüstet. Über einen Verdampfer wurde LPG gasförmig in den Ansaugkanal hinter dem Ladeluftkühler und dem Turbolader zugeführt.

Das Aluminiumgehäuse des Luftsammlers am Zylinderkopf sollte durch Bohrungen die Magnet-Ventile zur Gaseinblasung aufnehmen. Die Magnetventile sollten durch eine eigene ECU anhand der Abgaswerte der Breitband Lamdasonde angesteuert werden.

Zur Strömungsbeurteilung der Einströmung der vorkomprimierten Luft des Turboladers und der Gaseinblasung wurde der Luftsammler als Ersatzteil beschafft, weil von Volvo keine Bauteilzeichnung erhältlich war. Besonderheiten in der Luftführung konnten nicht festgestellt werden. Die Ansaugbrücke ist nur als Kastenvolumen ausgeprägt, das nicht strömungsoptimiert gestaltet ist und erhebliche Luftwirbel in den Ecken als Totzonen darstellt.

Die Gasdüsen wurden dann in einem Rohrbogen nach dem Turbolader platziert. (Anlage) Die Mengenzugabe an verdampften LPG erfolgte über 4 konzentrisch angeordnete Gasventile.

Über die Einstellung des Versorgungsdrucks am Verdampfer zu den normierten Betriebspunkten 1200, 1500 und 1800 U/min konnte die zugesetzte Gasmenge über den Gasdruck eingestellt werden.

Die fest eingestellten Betriebspunkte des Motors waren wegen inhomogenem Gas-Luftgemisch stationär nicht stabil und reproduzierbar zu halten. Die Vodia Regelung konnte die schnelle und un stetige Energiezufuhr nicht sicher ausgleichen.

Als Ursache wurde zunächst eine zu geringe Verdampferleistung vermutet.

Die Verwendung von zwei Verdampfeinheiten im Parallelbetrieb erzeugten eine größere, ausreichenden Verdampferleistung und stabile Versorgungsdrücke. Die Ursache des ungleichmäßigen Motorlaufs konnte in den variablen Ladedruckverhältnissen des Turboladers und der turbulenten und un stetigen Strömungen der Ladeluft im Bereich des Turboladers bis zum Einlassventil im Zylinderkopf vermutet werden.

Die gasförmige LPG Zuführung hinter dem Turbolader wurde als instabil verworfen. Eine lastabhängige, elektrische Ventilsteuerung der Gaszufuhr über eine ECU war aufgrund der turbulenten Strömungen und der Bauteilgeometrien ohne Aussicht auf Erfolg.

Die Treibstoffzufuhr über Gasinjektoren wurden durch direkte Flüssiggaseinspritzung ersetzt. (Anlage)

Die Vorteile der Flüssiggaseinspritzung waren eine zeitsynchrone Dosierung der LPG-Menge zum Dieseleinspritzzyklus und die weitere Abkühlung der Luftzufuhr nach dem Ladeluftkühler von ca. 55°C um weitere ca. 10°C.

Eine Vereisung der LPG-Einspritzventile konnte nicht beobachtet werden. Es wurde ein Vollmetall-Injektor und ein Injektor im Plastikgehäuse verwendet.

Dazu wurden 2 elektrische Bosch Injektoren für die Saugrohreinspritzung und eine Megasquirt ECU-Box (Anlage) verwendet.

Das Einspritzsignal wurde in der ECU nicht anhand der Abgaswerte und der Drehzahl berechnet sondern von dem Dieselinjektor adaptiert. Dazu mußte die Strategie und die Signalfolge der VODIA Steuerung ermittelt werden (Anlage).

Die Strategie der Volvo Diesel-Einspritzung über das VODIA-System wurde mit einem PICO Messsystem, einem ECM Abgasmesssystem und mit Daten-Speicherung auf dem Laptop ermittelt. Von Volvo waren keine Daten dazu erhältlich.

Die Volvo Dieseleinspritzung zeigt bestimmte auch nicht periodische Mehrfach-Zyklen der elektrischen Injektoransteuerung zu den Phasen der Voreinspritzung und der Haupteinspritzung. Diese Zyklen wurden aufgezeichnet und ausgewertet. (Anlagen)

Die Signaladaption zur Steuerung der LPG Einspritzung erfolgte nicht über den CAN-Bus Anschluß sondern über den Leitungsabgriff des Spannungssignal für die Diesel-Einspritzdüse des ersten Zylinders am Volvo Motor.

Weitere Kennwerte wie Drehzahl, Betriebstemperatur, Gaspedalstellung, Ladedruck, Abgastemperatur etc. wurden nicht in die eigene ECU übertragen. Die VODIA-Steuerung errechnet aus diesen Parametern und dem geforderten Drehmoment bereits spezifische Einspritzzyklen für die Zumessung des Dieseltreibstoffes und die interne Abgasrückführung (EGR emission gas recirculation).

Das geplante Verfahren die Betriebspunkte des Motors über die Abgasanalyse mit einem Breitband O₂ Sensor (Lamdasonde) zu steuern wurde nicht mehr verfolgt.

Anhand der Adaption der VODIA Dieseltreibstoffeinspritzung konnte an der eigenen ECU mit einem Stimulator Board ein Parameter als frei wählbarer Prozentsatz der LPG Flüssiggaszufuhr eingestellt werden. Die Flüssiggaseinspritzung verläuft getaktet zur VODIA Steuerung und wird fast simultan zugemessen. (Anlagen). Der Dieselanteil am Gesamtenergiebedarf wurde von der Vodia-ECU entsprechen zurückgenommen und stabil ausgeregelt. VODIA verändert mit der Zugabe von LPG die Dieselmenge selbständig zum Erhalt der festen voreingestellten Drehzahl und des Drehmoments.

Mit dem ECM System konnten alle Abgaswerte wie CO, NO_x und das Luft-Dieselmisch gemessen werden. Unter Belastung stehende Turbo-Dieselmotoren (AFR air-fuel-ratio) werden grundsätzlich mit einem hohen Luftüberschuß bis zu einem AFR = ca. 45 betrieben. Aus einem AFR-Wert der Breitband-Lamdasonde läßt sich eine Regelgröße zur zusätzlichen Treibstoffzumessung von LPG nicht zur Veränderung des Lastzustandes wie z.B. Beschleunigung oder Motorbremse allgemein ableiten.

Effektiver ist das direkte adaptive Verfahren. Das Einspritzsignal am Diesel-Injektor regelt die Dieseleinspritzmenge und die Motorleistung. An der Megasquirt ECU erfolgt die manuelle Eingabe des Prozentsatzes der LPG-Menge. Die LPG Einspritzung erfolgt quasi zeitsynchron zu der einströmenden Luftmenge im Luftsammler vor den Zylindern (Anlage).

Die Saugrohreinspritzung des Flüssiggas erfolgt immer vor der späteren Direkteinspritzung des Diesel in den Brennraum.

Die Flüssiggaseinspritzung kühlt die Ansaugluft hinter dem Ladeluftkühler nochmals um 5°C bis 15°C ab. Daraus ergibt sich ein weiterer Leistungszuwachs und ein höherer thermischer Wirkungsgrad gegenüber einer vaporisierten LPG-Zufuhr. Dieser Vorteil wurde aber nicht weiter untersucht.