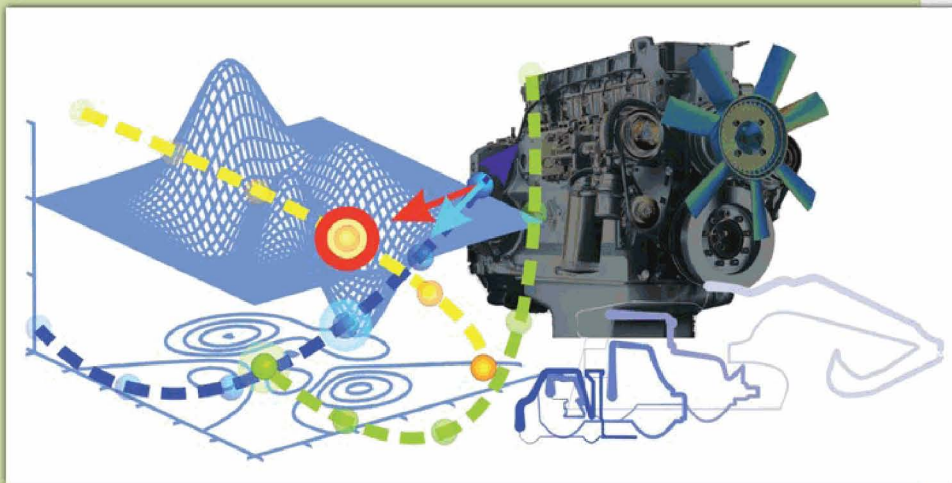


Dieselmotor in der Antriebsstrangsimulation

Untersuchung und Weiterentwicklung von Antriebsstrangkonzepthen mobiler Arbeitsmaschinen



Maurice Bliesener, Marcus Geimer,
Thomas Fleczoneck

Zur konzeptionellen Auslegung, für qualitative Systemvergleiche und zur Voruntersuchung bei der Systemreglerentwicklung mobiler Arbeitsmaschinen ist der Einsatz von Simulationsprogrammen im Fokus von Forschung und Entwicklung. Der Dieselmotor als Primärenergilieferant wird hierbei, je nach Zielstellung der simulationsgestützten Analyse, durch Modelle verschiedener Detaillierungsgrade berücksichtigt.

Autoren: Dipl.-Ing. Maurice Bliesener, wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Mobile Arbeitsmaschinen (Mobima), Universität Karlsruhe (TH). Leiter: Prof. Dr.-Ing. Marcus Geimer. Dipl.-Ing. Thomas Fleczoneck, wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Landmaschinen und Fluidtechnik (ILF), TU Braunschweig

Die Bandbreite bestehender Dieselmotormodelle reicht von exakten physikalischen Modellen über Ansätze mit empirischen Funktionen bis hin zu Black-Box-Modellen auf Basis künstlicher neuronaler Netze. Im Kontext des Gemeinschaftsforschungsprojekts „Untersuchung und Weiterentwicklung von Antriebsstrangkonzepthen mobiler Arbeitsmaschinen“ von vier Hochschulen und zehn Industrieunternehmen entstand die Forderung nach einem praxisorientierten, dynamischen Dieselmotormodell für die Antriebsstrangsimulation [K1].

In diesem Artikel wird das am Lehrstuhl für Mobile Arbeitsmaschinen (Mobima) der Universität Karlsruhe (TH) erstellte Dieselmotormodell vorgestellt und die Vorgehensweise zur Parametrierung dargestellt. Das Modell berücksichtigt sowohl physikalische, als auch empirische Ansätze und kann als Grey-Box-Modell eingestuft werden.

Das dynamische Verhalten des Dieselmotors hat großen Einfluss auf den Antrieb mobiler Arbeitsmaschinen. Daher muss bei der simulationsgestützten Bewertung von Fahrtrieben mobiler Arbeitsmaschinen dessen Verhalten berücksichtigt werden. Im Zusammenspiel mit Komponenten aus der Fahr- oder Arbeitshydraulik, ist die Reaktion des Dieselmotors auf schnelle Änderungen der Drehmomentanforderungen aus steuerungs- und regelungstechnischer Sicht von besonderem Interesse. Für Maschinenhersteller stellt es eine große Her-

ausforderung dar, sowohl dem unter ökonomischen/ökologischen Aspekten sinnvollen Downsizing gerecht zu werden, als auch den Dieselmotor so zu dimensionieren, dass sporadisch auftretende Lastspitzen abgedeckt werden können.

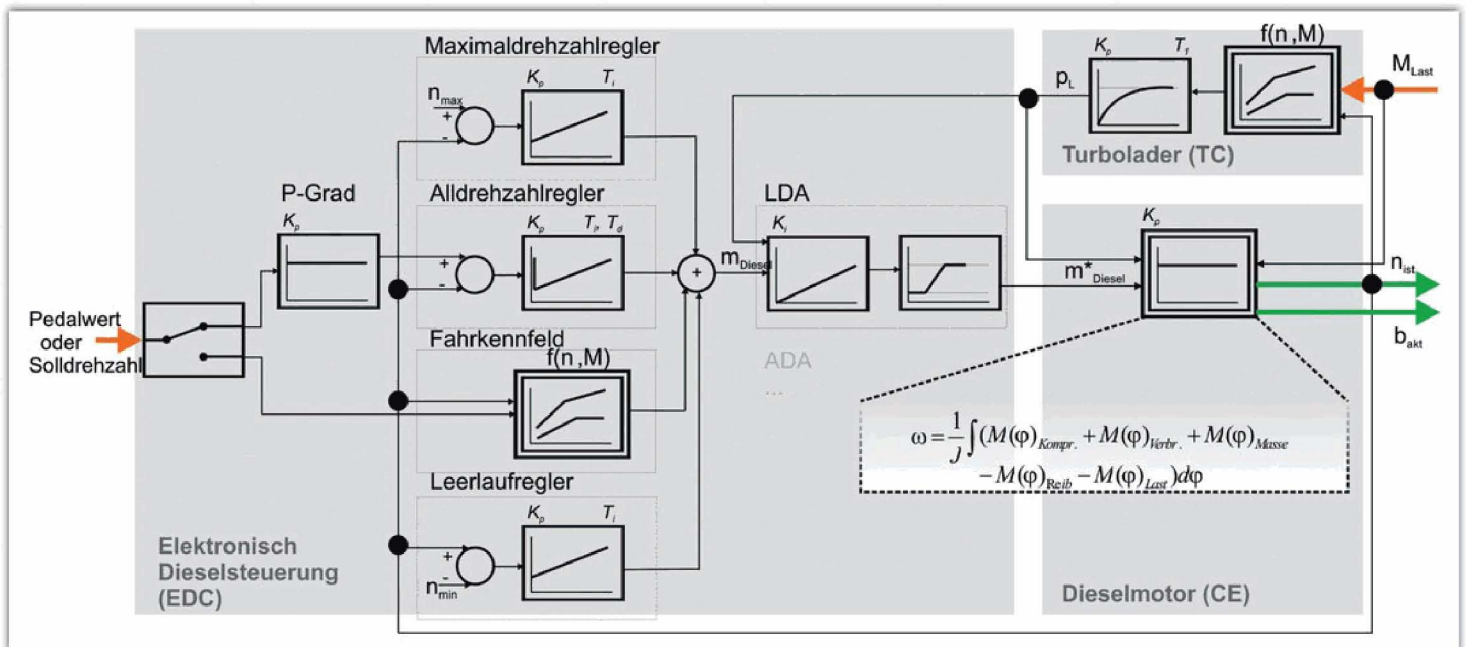
In diesem Beitrag wird ein praxisorientiertes Dieselmotormodell vorgestellt, welches im Rahmen des Verbundprojektes implementiert und verifiziert wurde. Zunächst wird die Modellstruktur erläutert. Im Anschluss wird auf die Modellierung des Triebwerks, Steuergerätes und Abgasturboladers sowie deren Parametrierung eingegangen. Zum Abschluss erfolgt eine Darstellung der Verifikationsergebnisse.

Drehzahl geregelter Dieselmotor mit Abgasturbolader

Das Motormodell läuft unter Matlab/Simulink (R2008a) und kann in Form einer modular aufgebauten Zusatzbibliothek eingebunden werden. Im Gegensatz zu kennfeldbasierten Dieselmotormodellen oder daraus abgeleiteten polynomiellen Ansätzen [I1] wird für die Parametrierung kein Verbrauchskennfeld benötigt. Unter Einbeziehung dreier Messungen (s.u.) kann das Modell teilautomatisiert parametrierbar werden. Das aus drei Subsystemen bestehende Systemmodell des Dieselmotors (Bild 1) erhält eine Drehzahl oder einen Pedalwert als Sollwertvorgabe und gibt bei Beaufschlagung mit dem Lastmoment M_{Last} eine Ist-drehzahl n_{Ist} sowie den aktuellen Verbrauch b_{akt} zurück. Der Dieselmotor (CE) wird als Regelstrecke aufgefasst, das Steuergerät (EDC) als Regler und der Abgasturbolader (TC) als ein, die zu regelnde Strecke beeinflussendes PT1-Glied.

Dieselmotor (CE)

Das Hauptaggregat Dieselmotor kann aus regelungstechnischer Sicht als nichtlineares P-Glied beschrieben werden. Es wandelt die vom Steuergerät zur Einspritzung bestimmte Kraftstoffmenge m^{*}_{Diesel} in Abhängigkeit der Drehzahl in ein inneres Drehmoment um. Dieses setzt sich aus dem Kompressions/Expansions-, dem Verbrennungs- und dem Verlustmoment zusammen [S1]. Mittels Drallsatz um die Trägheit des Motors wird daraus die aktuelle Motordrehzahl berechnet. In Ergänzung zu dem



1: Modellbildung Dieselmotor

Modellierungsansatz nach [S1] wurden bei den inneren Verlusten neben der Reibung auch Wandwärmeverluste berücksichtigt [P1, S2, U1].

Die Parameter des Dieselmotors bestehen aus geometrischen Größen, die den Datenblättern der Motorhersteller zu entnehmen sind, physikalischen Naturkonstanten (sind im Modell als Standardwerte hinterlegt) und Parametern für das Steuergerät, die auf Basis von Referenzmessungen mittels heuristischer Verfahren bestimmbar sind.

Steuergerät

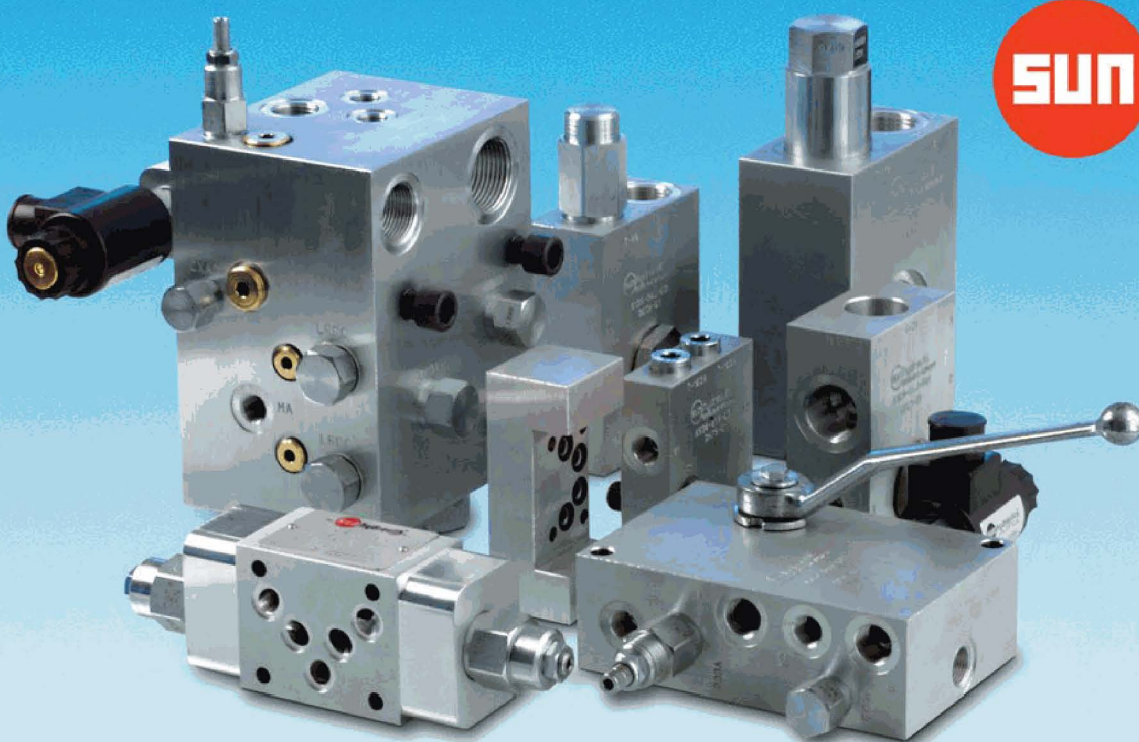
Im Unterschied zu einer rein mechanischen Regelung der Einspritzmenge mittels Fliehkraftregler und Ladedruckdose bieten mo-

derne elektronische Motorsteuergeräte eine Vielzahl zusätzlicher Freiheitsgrade. Beispiele hierfür sind die multiplen Einspritzmengen-Korrekturfaktoren, variable Steuerzeiten oder die anwenderspezifische Kennfeldhinterlegung für Vollastkurven und Fahrverhalten [H1]. Im Sinne einer praxistauglichen Parameterbestimmung für das entwickelte Modell wurde die hohe Komplexität realer Steuergeräte auf den in Bild 1 dargestellten Detaillierungsgrad beschränkt. Folgendes wurde dabei berücksichtigt:

- Leerlauf-/Enddrehzahlregler
- Alldrehzahlregler
- Fahrkennfeld
- Ladedruckabhängige Einspritzmengenbegrenzer (LDA)
- P-Grad

Die Parameter des Steuergeräts bestimmen das charakteristische Verhalten des Motors maßgeblich, liegen jedoch für die Modellbildung zumeist nicht vor. Anhand der Parameterbestimmung des Alldrehzahlreglers wird im Folgenden beispielhaft beschrieben, wie die Modellparameter der hier abgebildeten Steuerung anhand weniger Messungen am realen Dieselmotor ermittelt werden können.

Hierfür sind (minimal) drei Messungen erforderlich, die das Lastmoment, den Ladedruck des Abgasturboladers, die aktuelle Motordrehzahl, die Solldrehzahl sowie den aktuellen Kraftstoffverbrauch beinhalten. Die drei Messungen erfolgen bei drei unterschiedlichen, den Drehzahlbereich repräsentativ überdeckenden, Solldrehzahlen. Bei aktiviertem Alldrehzahlregler werden

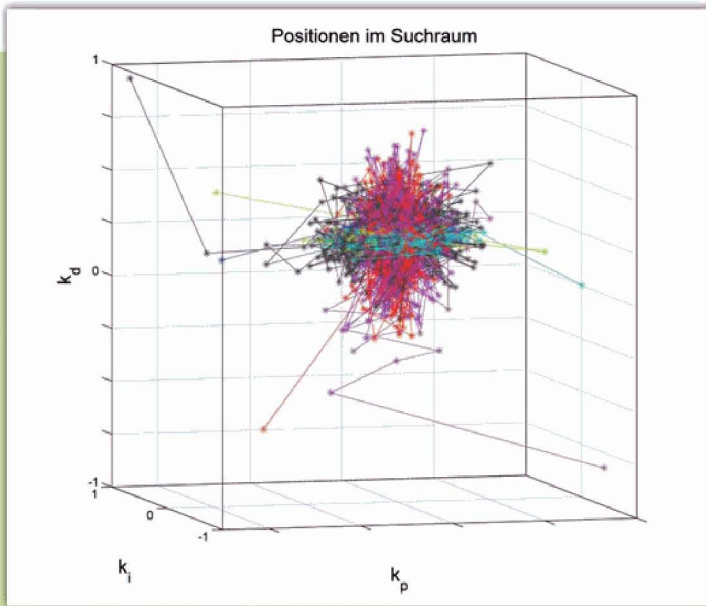


SUN hydraulik®
GmbH

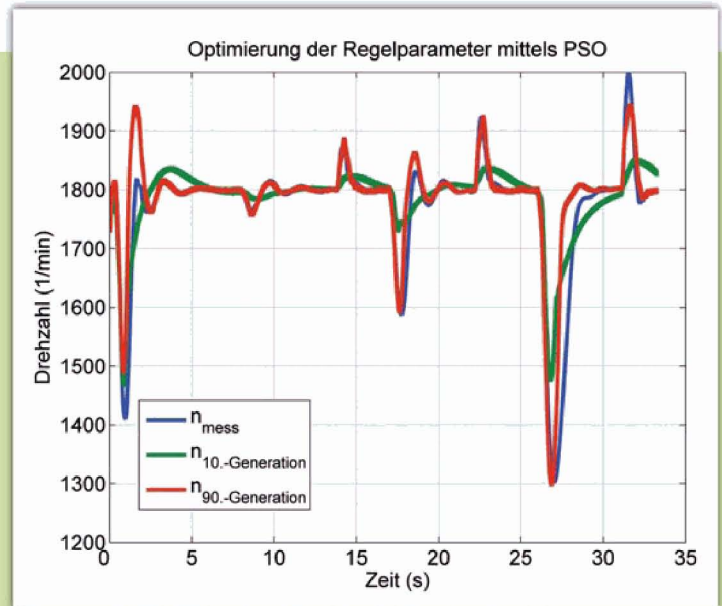
Brüsseler Allee 2
D-41812 Erkelenz
Germany

Tel. 0 24 31 / 80 91 - 0
Fax 0 24 31 / 80 91 - 19

info@sunhydraulik.de
www.sunhydraulik.de



2: Parameteroptimierung mittels PSO



3: Parameterabhängiges Drehzahlverhalten des Modells

dem Motor bei jeder Drehzahl Lastsprünge variabler Höhe aufgeprägt und die Messgrößen erfasst.

Die PID-Verstärkungsfaktoren des Alldrehzahlreglers werden auf Basis der Messungen mit der Particle Swarm Optimization (PSO), einer Heuristik aus der Familie der Schwarm-Intelligenz-Verfahren, iterativ bestimmt [C1]. Das Verfahren aus dem Forschungsfeld des Soft Computing [L1] eignet sich insbesondere zum Finden von Extremalstellen gegebener Funktionen mit unbekanntem Funktionsverläufen, wie Konvergenztests mit analytischen Testfunktio-

nen zeigen. Das Motormodell stellt die durch Optimierung der Parameter zu adaptierende Funktion dar. Die Güte der einzelnen Tupel von Parameterwerten wird mittels Least-Square-Methode aus der Differenz des gemessenen und des simulierten Drehzahlverlaufs berechnet. **Bild 2** illustriert das „Zusammenschnüren“ der Parameterwertkombinationen in Richtung der Optimallösung. Die einzelnen Instanzen der Problemstellung sind durch unterschiedliche Farben gekennzeichnet, die Veränderung der Parameterwerte einer Lösung über die Zeitschritte (Generations) durch sternförmige Markierungen. **Bild 3** zeigt die Auswirkung auf das Simulationsergebnis entlang einer zunehmenden Zahl an Optimierungsläufen.

Unter Verwendung der beschriebenen Messungen kann mit Hilfe der Schwarmoptimierung für jede der drei Soll Drehzahlen der Messungen ein Parametersatz für die Regelparameter des Alldrehzahlreglers bestimmt werden. Durch die Einbindung eines interpolierten Kennfeldes der Form $k_x = f(M_{CE}, n_{CE})$ mit $x \in I = \{p, i, d\}$ wird so der betriebspunktabhängigen Korrekturwertüberlagerung mit den Basisregelparametern Rechnung getragen.

Abgasturbolader

Eine Sensitivitätsanalyse des Ladedrucks, der dem Motormodell als Eingangsgröße zugeführt wird, zeigt seine großen Auswirkungen auf die Drehmomententstehung und den Verbrauch. Deshalb wurde auf Basis der zur Verfügung stehenden Ladedruckmessungen ein Blackbox-Modell des Abgasturboladers implementiert. Eine Korrelationsanalyse zeigte, dass der Ladedruck in guter Näherung mit der aktuellen Leistung des Verbrennungsmotors korreliert. Deshalb wurden aus den zeitlichen Druckverläufen die stationären Druckniveaus extrahiert und

die Betriebspunkte (p_{TC}, M_{CE}, n_{CE}) durch lineare Interpolation zu einem Kennfeld der Form $p_{TC} = f(M_{CE}, n_{CE})$ erweitert. Die Abbildung des dynamischen Verhaltens erfolgte durch die Kopplung des Kennfeldes mit einem PT1-Streckenglied. Die Zeitkonstante wurde durch Systemidentifikation ermittelt. **Bild 4** illustriert die Vorgehensweise.

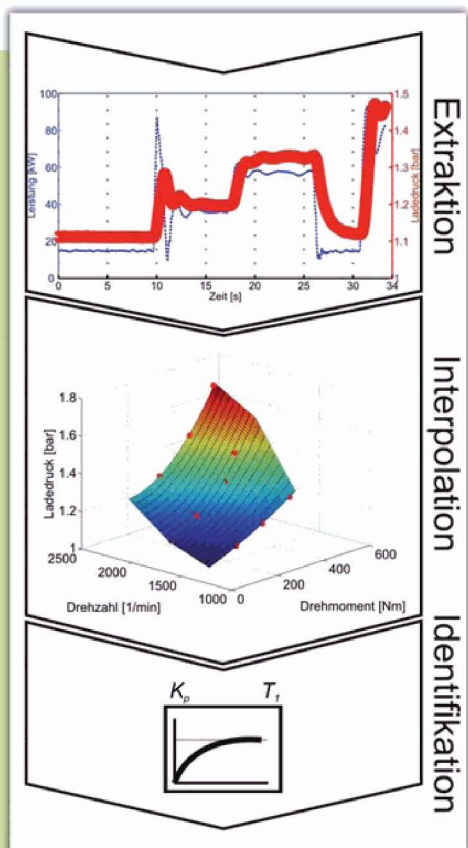
Verifikation

Die Verifikation des Motormodells wurde anhand eines 6-Zylinder-Reihenmotors von DEUTZ durchgeführt. Die technischen Daten des am ILF der TU Braunschweig in einem Getriebeprüfstand integrierten Motors sind:

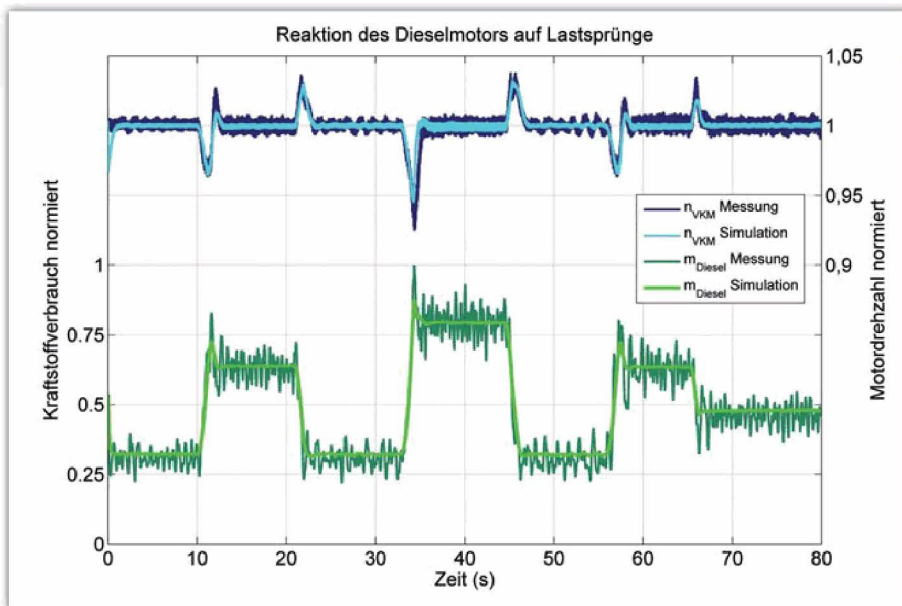
- Typ: BF6M1013EC
- Zylinderzahl: 6, Reihe, stehend
- Verdichtung: 17,6
- Bohrung: 108 mm
- Hub: 130 mm
- Volumen: 7,146 dm³

Die Erfassung des Drehmoments erfolgte mit einer externen Messnabe mit einer statischen Abweichung unter $\pm 0,5$ % FS. Die Motordrehzahl wurde hier direkt aus dem Motorsteuergerät entnommen. Der Ladedruck des Abgasturboladers wurde mittels Drucksensor bei einer Genauigkeit von $\pm 0,5$ % gemessen. Die Erfassung des Kraftstoffverbrauchs erfolgte durch einen servogeregelten Zahnradimpulszähler. Die Genauigkeit beträgt $\pm 0,5$ % (bei 4 bis 60 L/h).

Bild 5 veranschaulicht die Ergebnisse des Vergleichs von Messung und Simulation am Beispiel eines über 80 s dargestellten Verlaufs der Drehzahl- und des Kraftstoffverbrauchs. Dem Dieselmotor wurden Momentsprünge unterschiedlicher Höhe aufgeprägt. Bei Vernachlässigung des messtechnisch bedingten Rauschens der Messgrößen ist eine gute Übereinstimmung des Verlaufs der damit einhergehenden Motor-drückung sowie des, dem Drehzahlabfall



4: Modellbildung Abgasturbolader



5: Verifikation Motormodell

entgegenwirkenden dynamischen Verbrauchsanstiegs zu beobachten. Das bei fester Schrittweite (0,1 ms) rechnende S-function-basierte Modell läuft unter Verwendung der Heuner-Methode (explizites ODE-2-Verfahren) auf einem 32-Bit Intel Pentium M Centrino 1.7 GHz, 1 GB DDR2-533 (266 MHz) RAM mit Realzeitfaktor 4.

Zusammenfassung und Ausblick

Für die geschlossene Modellierung des Antriebsstrangs mobiler Arbeitsmaschinen ist die Einbeziehung des Dieselmotors erforderlich. Aufgrund der rasanten Entwicklung im Bereich der Motorentechnik (Kurbelwellengenerator [N1], entkoppelte Kühler [B1], Einspritzgestaltung) wird die modellhafte Abbildung des Dieselmotors für die Antriebsstrangsimulation jedoch immer komplexer. Deshalb erscheint eine starke Abstraktion vom realen System, je nach zu vertretendem Messaufwand, erforderlicher Simulationszeit und gewünschter Genauigkeit, zunehmend sinnvoller.

Der Beitrag zeigt, dass ein Greybox-Modell durch die entsprechende Wahl zu schätzender Parameter gut handhabbar wird. Die Sensitivitätsanalyse der unbekannt Parameter mit anschließender Schätzung der als relevant identifizierten Größen mittels heuristischer Verfahren hat sich als zweckmäßig erwiesen.

Literatur

[B1] Baynes, M.: *FANTASTIC FIVE: this group of engine cooling products that deliver optimal performance with reduced noise provide a superb means to TIER 4 conformance*. In: *IVT Industrial Vehicle Technology/Off-Highway Edition*, 2008, p. 65-66

[C1] Chan, F., Tiwari, M.: *Swarm Intelligence - Focus on Ant and Particle Swarm Optimization*. Croatia: I-Tech Education and Publishing, 2007

[H1] Heinzmann GmbH & Co. KG: URL: <http://www.heinzmann.de>, erreicht am 08.10.2008

[I1] Ivantysynova, M., Ossyra, J.C.: „Control Concept for Hydrostatic Drive Lines“, *The Fourth International Symposium on Fluid Power Transmission and Control (ISFP 2003)*, Wuhan, China, 2003

[K1] Kohmäscher, T., Jähne, H., Deiters, H.: *Comparison of selected fluidtechnical drive line concepts for off-highway machines; 5th International Fluid Power Conference (5th IFK)*, Aachen 2006, S. 45-56

[L1] Lippe, W.-M.: *Soft Computing*. Heidelberg: Springer-Verlag, 2006

[N1] Neumann, O.: *Mehr Power auf dem Feld: neues Konzept verleiht Traktoren „e-Power“ für Arbeitsgeräte*, *Mobile Maschinen*, Band 1 (2008), Nr. 3, S. 25-26

[P1] Pischinger, R., Klell, M., Sams, T.: *Thermodynamik der Verbrennungskraftmaschine - Der Fahrzeugantrieb*. Wien: Springer-Verlag, 2002

[S1] Schmitt, A., Müller, D., Wohl, G.: *Simulationsmodell eines elektronisch geregelten 6-Zyl.-Dieselmotors*, In: *Simulation im Maschinenbau. Softwaretools und Anwendungen in Lehre, Forschung und Praxis. Band 1: Dresdner Tagung, SIM 2000*, 24. und 25. Februar 2000, Dresden

[S2] Sinsel, S., Schaffnüt, J., Isermann, R.: *Echtzeitsimulation von Dieselmotoren zur Entwicklung von Diagnosemethoden*. In: *Stuttgarter Symposium „Kraftfahrwesen und Verbrennungsmotoren“*, Renningen-Malmsheim: expert-Verlag, 1997

[U1] Urlaub, A.: *Verbrennungsmotoren: Grundlagen, Verfahrenstheorie, Konstruktion*. Berlin: Springer-Verlag, 1994, S.49-58

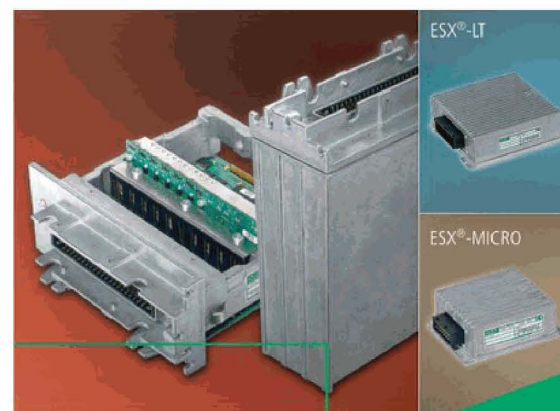
Formelzeichen

k_x mit $x=\{p,i,d\}$	Verstärkung PID-Regler
M_{CE}	Drehmoment Dieselmotor
n_{CE}	Drehzahl Dieselmotor
P_{TC}	Ladedruck Abgasturbolader
FS	Full Scale

Pioneering new technologies
Pioneering new technologies

STW

Sensor-Technik Wiedemann GmbH
Mobil-Steuerungen und Messtechnik



ESX®-Familie



- frei programmierbare Steuer- und Regel-elektronik (in C und IEC61131-3)
- für den Einsatz in mobilen Arbeitsmaschinen und Nutzfahrzeugen



ESX®-3XL
32bit-Controller mit 150MHz
Taktfrequenz und 124 I/Os



ESX®-C2C
Modul für mobile
Datenerfassung und
Fernwartung/-diagnose über
GSM/GPRS oder Bluetooth®
wireless technology



ESX®-IOX
CAN-Bus I/O-Modul
z. B. für CANopen Netzwerke

www.sensor-technik.de

Am Bärenwald 6 • 87600 Kaufbeuren
Telefon +49 (0) 83 41 - 95 05-0
sales@sensor-technik.de

Weitere Informationen www.vfv1.de/#2640520 ▶