

VERFASST VON



Dr.-Ing. Michael Grill
ist Bereichsleiter
Künstliche Intelligenz &
Simulation am Forschungs-
institut für Kraftfahrwesen
und Fahrzeugmotoren
Stuttgart (FKFS).



Dr.-Ing. Marco Günther
ist Oberingenieur und
Dozent am Lehrstuhl für
Thermodynamik mobiler
Energiewandlungssysteme
(tme) an der RWTH
Aachen University.



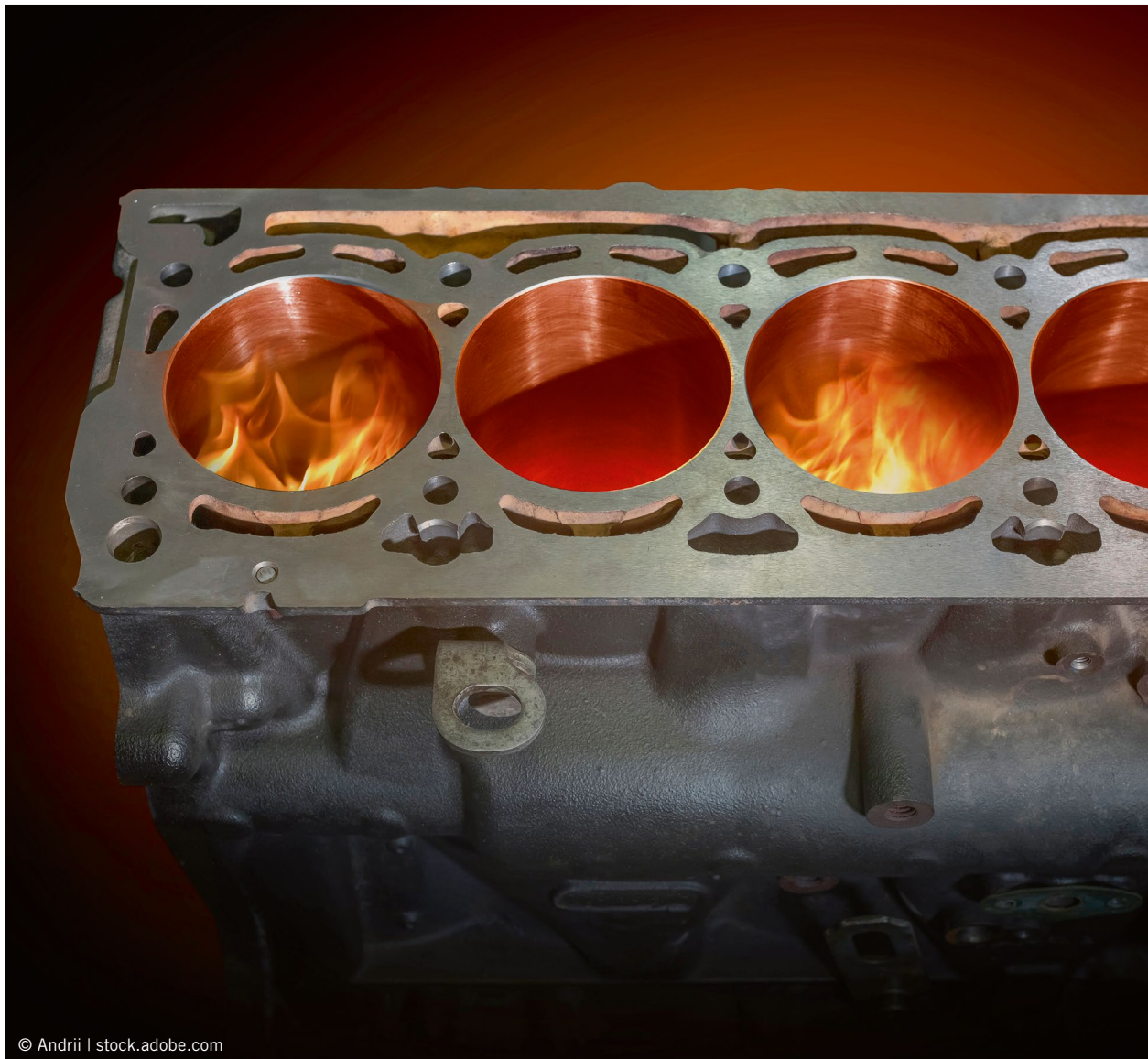
**Univ.-Prof. Dr.-Ing.
André Casal Kulzer**
ist Mitglied des Vorstands
des Forschungsinstituts
für Kraftfahrwesen und
Fahrzeugmotoren Stuttgart
(FKFS) und Ordinarius für
Fahrzeugantriebssysteme
am Institut für Fahr-
zeugtechnik (IFS) der
Universität Stuttgart.



**Univ.-Prof.
Dr.-Ing. (USA)
Stefan Pischinger**
ist Institutsdirektor
am Lehrstuhl für
Thermodynamik mobiler
Energiewandlungs-
systeme (tme) an der
RWTH Aachen University.

Höherer Wirkungsgrad durch eine modellbasierte vorausschauende Klopfregelung

Heutige Klopfregelungen vernachlässigen im Allgemeinen den stochastischen Charakter des Klopfens und reagieren auf einzelne klopfende Arbeitsspiele mit einer Spätstellung des Zündzeitpunkts. Ein im FVV-Projekt „Schnelle Vorhersage von klopfenden Verbrennungen in Ottomotoren“ (Nr. 1370) in Zusammenarbeit mit der Universität Stuttgart und der RWTH Aachen University entwickelter Regelungsansatz verringert die Häufigkeit der Zündwinkelspätverstellung und kann allein dadurch den Wirkungsgrad steigern.



© Andrii | stock.adobe.com

1	OPTIMIERTER VERBRENNUNGSSCHWERPUNKT
2	KLOPFHÄUFIGKEITSMODELL
3	KLOPFREGELUNG
4	VALIDIERUNG
5	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

1 OPTIMIERTER VERBRENNUNGSSCHWERPUNKT

An der Klopfgrenze werden allgemein 4 bis 10 % klopfende Arbeitsspiele zugelassen. Aufgrund der Retardierung des Zündzeitpunkts nach einem klopfenden Arbeitsspiel und einer Vorverlegung in kleineren Schritten werden bei der konventionellen Klopfregelung eine Vielzahl der Zyklen mit unnötig späten Verbrennungsschwerpunktlagen betrieben. Auch Ansätze, die die Intensität des Klopfereignisses in die Entscheidung zur Retardierung einbeziehen, bleiben reaktive Ansätze.

Die prädiktive Klopfregelung ermöglicht einen optimierten Verbrennungsschwerpunkt für den Betrieb an der Klopfgrenze, erhöht den Wirkungsgrad und senkt damit den Kraftstoffverbrauch und die CO₂-Emissionen. Voraussetzung dafür ist ein Modell, das präzise und sehr schnell die Klopfwahrscheinlichkeit für den aktuellen Motorbetrieb vorhersagen kann. Durch das FVV-Forschungsprojekt [1], das am Lehrstuhl für Thermodynamik mobiler Energiewandlungssysteme (tme) der RWTH Aachen University und am Institut für Fahrzeugtechnik Stuttgart (IFS) der Universität Stuttgart durchgeführt wurde, konnte das Wissen über die klopfende Verbrennung erweitert und ein Modell zur Vorhersage von Klopfwahrscheinlichkeiten entwickelt werden. Ein Klopfregler wird damit in die Lage versetzt, den Zündzeitpunkt vorausschauend zu steuern.

2 KLOPFHÄUFIGKEITSMODELL

Die hohe Komplexität und die stochastische Natur des Klopfens sind eine Herausforderung für die Entwicklung von Klopfmodellen. Inhomogenitäten in der Zylinderladung, die das Klopfen begünstigen, sind am Prüfstand nicht zu erfassen und können in Zwei-Zonen-Verbrennungsmodellen aufgrund der Mittelwertbildung über die gesamte verbrannte und unverbrannte Zone nicht untersucht werden. Klopfrelevante Bedingungen lassen sich mit 3-D-Strömungssimulationen (Computational Fluid Dynamics, CFD) und Grobstruktursimulation (Large-Eddy-Simulationen, LES) identifizieren, insbesondere Temperatur- und Gemischinhomogenitäten sowie deren zyklischen Schwankungen. Regimegrenzen innerhalb des Detonationsdiagramms werden mit CFD-Simulationen verifiziert und die Anwendbarkeit des Detonationsdiagramms zur Bewertung von Selbstzündungen wird in O-D-Simulationen untersucht, um den Einfluss der Variationen von Verbrennungszyklus-zu-Zyklus in Bezug auf das Klopfen bewerten zu können. Für die modellbasierte Klopfregelung wurde der 3-Parameter-Ansatz aus [2] so weiterentwickelt, dass eine Anwendung auf Steuergeräten möglich wird.

3 KLOPFREGELUNG

Basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen aus den vorhergehenden Untersuchungen wurde eine prädiktive Klopfregelung entwickelt, die für die Randbedingungen des nächsten Arbeitsspiels die zu erwartende Klopfwahrscheinlichkeit modelliert. Dabei wird der Zündzeitpunkt so eingestellt, dass die modellierte Klopfwahrscheinlichkeit einer gewünschten maximalen Klopfhäufigkeit von zum Beispiel 5 % klopfender Arbeitsspiele an der Klopfgrenze entspricht. Vom Klopfsensor erkannte Klopfereignisse führen nicht mehr zu direkten Eingriffen des Reglers, stattdessen wird mit dem Klopfsensor zunächst die tatsächliche Klopfhäufigkeit nur noch überwacht. Weicht sie von der modellierten Klopfhäufigkeit ab, kann diese Information in einer späteren Implementierung zur Nachkalibrierung des Klopfmodells genutzt werden. Das erstellte Konzept wurde mittels O-D-/1-D-Simulationen mit einer konventionellen Klopfregelung verglichen, insbesondere um die Robustheit auch bei schnellen Laständerungen zu demonstrieren, **BILD 1**.

4 VALIDIERUNG

Um das Potenzial des neu entwickelten prädiktiven Klopfregelungsmodells unter realen Bedingungen zu bewerten, wurden sta-

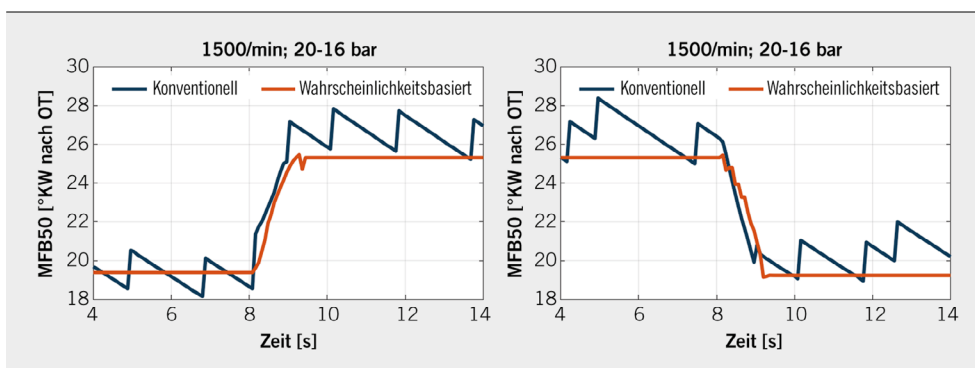


BILD 1 Visualisierung der Robustheit des neuen Ansatzes für schnelle Lastwechsel (links und rechts) im Vergleich zur konventionellen Regelung (© IFS | FKFS)

tionäre Validierungsmessungen an einem Einzylinderforschungs- motor durchgeführt. Dafür muss das neue Modellkonzept in ein echtzeitfähiges, kompilierbares Rapid-Control-Prototyping(RCP)- Softwaremodell übersetzt werden, was in drei Schritten im Rahmen der Modellintegration erfolgt. Für die Anwendung auf der RCP-Hardware ist zu berücksichtigen, dass die Anforderungen an die Modellkomplexität in Bezug auf die Echtzeitfähigkeit jedoch andere sind als bei dem verwendeten O-D-Simulationsmodell, sodass das bisherige Modell für Simulationszwecke in Bezug auf die Berechnungskomplexität vereinfacht werden muss. Um die Berechnungsgeschwindigkeit zu erhöhen, werden ausgewählte hochkomplexe Berechnungen auf einen kennfeldbasierten Ansatz übertragen, der zuvor offline parametrisiert worden ist. In einem ersten Schritt wird die Funktionsbeschreibung des Modells in ein Simulink-Modell übersetzt. Durch Simulink kann das Modell in einer Open-Loop-Umgebung getestet werden, um das Modellverhalten mit aufgeprägten Werten aus vorangegangenen Simulationen zu validieren. Mit der Konvertierung des Simulationsmodells in ein Simulink-Modell wird auch die Kompilierbarkeit auf dedizierte RCP-Hardware und die Lieferung gleicher Ergebnisse wie aus den vorherigen Simulationsuntersuchungen des prädiktiven modellbasierten Regelkonzepts sichergestellt.

Nach Abschluss der Modelltests wurde das kompilierte Modell auf der dedizierten RCP-Hardware implementiert, um zum einen die Zeit für die Berechnung (Taskzeit, T_{Task}) zu bestimmen und zum anderen die Echtzeitfähigkeit des Modells auf der endgültigen Zielhardware am Motorprüfstand zu validieren. Dazu wird die RCP-Hardware mit der gesamten erforderlichen Software und dem implementierten neuen Klopfmodell mit allen erforderlichen Eingaben vom Motorprüfstand verbunden und für die Untersuchungen in Betrieb genommen. Die Haupteingabe für die Berechnung der Steuerparameter sind die Motordrehzahl (n), der indizierte Mittel- druck (p_{mi}) und der aktuelle Zündwinkel (ZZP). Zusätzlich werden der Anfangsdruck und die Anfangstemperatur im Zylinder als Eingabe für die Berechnung verwendet. Sie werden nicht von den ECU-Sensoren ermittelt, sondern aus einem kalibrierten Kenn- feld entnommen.

In **BILD 2** ist der Abgleich der Modelle in der Open-Loop-Umgebung dargestellt. Das Beispiel des Betriebspunkts belegt, dass die berechneten Werte des RCP-Modells und die simulierten Werte der O-D/1-D-Simulation eine Abweichung von weniger als 0,1 %

aufweisen. Voruntersuchungen der Berechnungszeit zur Sicher- stellung der Echtzeitfähigkeit zeigten, dass bei einer Taskzeit von $T_{Task} = 1$ ms nur eine geringe Rechenlast von 4 % durch das prä- diktive Klopfregelungsmodell verursacht wird, während bei der geringeren Taskzeit von $T_{Task} = 0,1$ ms eine Rechenlast von 45 % durch das Modell belegt wird. Es ist zu berücksichtigen, dass für den Betrieb am Einzylinderprüfstand nicht nur das prädiktive Klopfregelungsmodell auf der RCP-Hardware betrieben werden muss, sondern auch alle weiteren für den Betrieb des Motors not- wendigen Modelle. Aus diesem Grund wurde für die weitere Ver- wendung des neuen Klopfregelungsmodells eine Taskzeit von $T_{Task} = 0,5$ ms gewählt.

Die Simulationsstudien zeigten ein maximales CO_2 -Reduktions- potenzial von bis zu $\Delta CO_2 = 1$ % und eine mögliche Absenkung der Abgastemperatur von $\Delta T_{Abgas} = 20$ K. Dieses Potenzial wurde abschließend in der Auswertung der realen Messungen auf dem Einzylinderprüfstand validiert. Dazu wurden die Messungen hin- sichtlich der mittleren Abgastemperatur $T_{Abgas,mittel}$ und des mittlere- ren Zykluswirkungsgrads η_{Zyklus} für den Betrieb mit einer konven- tionellen Klopfregelung und dem prädiktiven modellbasierten Klopfregelungsmodell ausgewertet. Zusätzlich wurde der Zylinder- spitzendruck ausgewertet, um Implikationen für eine mögliche unterschiedliche mechanische Belastung zwischen den beiden Regelungsansätzen zu bewerten.

BILD 3 zeigt die Gegenüberstellung der Regelungsansätze für einen repräsentativen Lastpunkt mit $n = 2500$ /min und $p_{mi} = 21$ bar. Die Auswertung des konventionellen Reglers ergab einen durchschnittlichen Zykluswirkungsgrad von $\eta_{Zyklus} = 34,3$ %. Der durchschnittliche Zylinderdruck betrug $p_{Zylinder,mittel} = 76,91$ bar mit einem Maximalwert von $p_{Zylinder,maximal} = 100,85$ bar und einem Minimalwert von $p_{Zylinder,minimal} = 56,27$ bar Spitzendruck. Die gemessene Abgastemperatur vor der Turbine betrug $T_{Abgas} = 502,0$ °C. Mit dem prädiktiven Klopfregelungsansatz verbessert sich der Zykluswirkungsgrad in diesem Betriebspunkt um $\Delta \eta_{Zyklus} = 0,54$ % auf $\eta_{Zyklus} = 34,84$ %. Der durchschnittliche Zylinderdruck steigt auf $p_{Zylinder,mittel} = 80,87$ bar. Außerdem wird die Abgastemperatur vor der Turbine um $\Delta T_{Abgas} = 20$ K auf $T_{Abgas} = 481,25$ °C gesenkt. Diese Auswertung bestätigt, dass der Reg- ler sein in der Simulation gezeigtes Potenzial auch in realen Tests am Motorprüfstand unter stationären Betriebsbedingungen veri- fizieren kann.

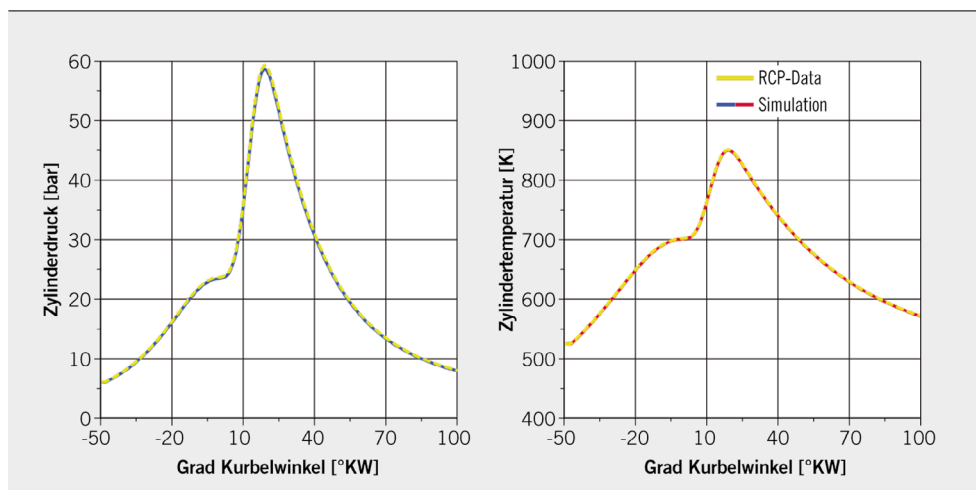


BILD 2 Abgleich des Zylinderdrucks (links) und der Zylindertemperatur (rechts) zwischen Simulationsmodell und Simulink-Modell (RCP) für einen Betriebspunkt von $n = 1500$ /min, $p_{mi} = 12$ bar und Zündzeitpunkt = $6,9$ °KW vor Zünd-OT (© tme)

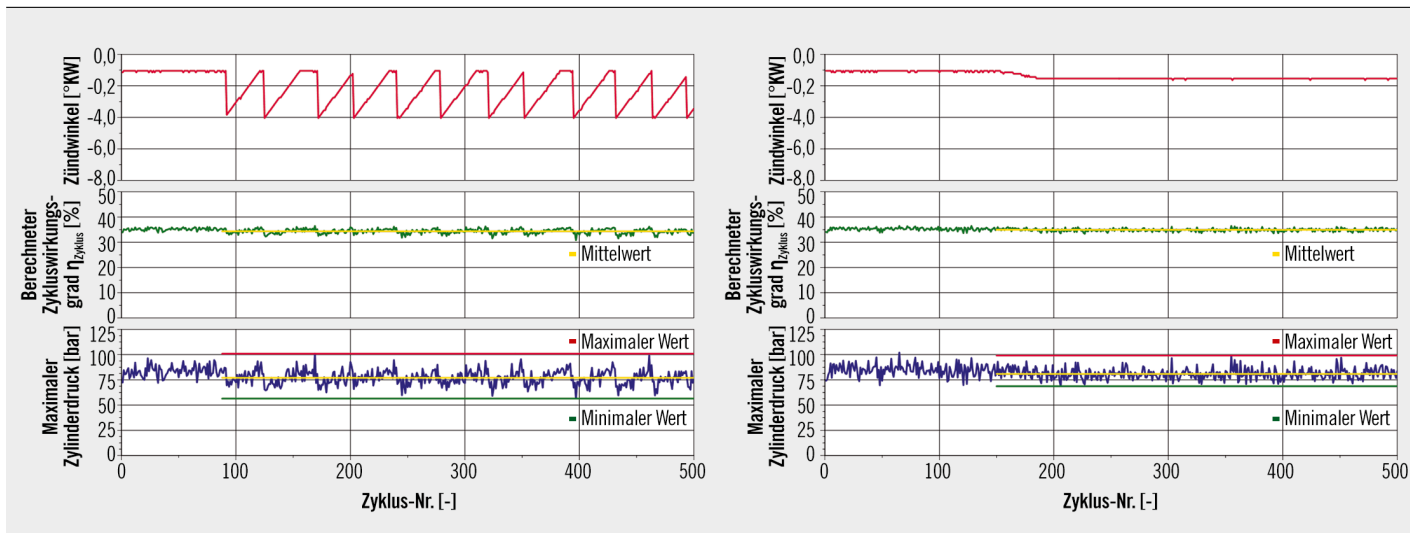


BILD 3 Vergleich der Regelungsansätze für die wesentlichen Kenngrößen für einen Betriebspunkt von $n = 2500/\text{min}$ und $p_{\text{mi}} = 21$ bar: konventionelle Klopfregelung (links) und prädiktives modellbasiertes Klopfregelungsmodell (rechts) (© tme)

5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Im FVV-Projekt konnte das Potenzial für eine kleine, aber nicht unwesentliche Wirkungsgradsteigerung allein über eine fortschrittlichere Regelungssoftware im Steuergerät gezeigt und am Stationärprüfstand in verschiedenen Betriebspunkten nachgewiesen werden. Die erzielten Verbesserungen in Bezug auf Wirkungsgrad und Abgastemperatur lagen im Bereich der simulativen Vorhersage. Zur Weiterentwicklung des Regelungsansatzes für einen Serieneinsatz muss berücksichtigt werden, dass die Güte der modellierten Klopfhäufigkeit über die Qualität der Regelung entscheidet. Die Modellierung der Klopfhäufigkeit ist dabei exponentiell abhängig von den modellierten Temperaturen der Verbrennung des Arbeitsprozesses, sodass auch an diese Untermodelle hohe Genauigkeitsanforderungen zu stellen und Themen wie Serienstreuung und Alterung auszugleichen sind. Ebenso kann die verfügbare Rechenkapazität auf einer aktuellen Serien-ECU ein limitierender Faktor sein, wobei hier dank der stetigen Weiterentwicklung Verbesserungen zu erwarten sind.

Die Modellgüte soll in einem bereits geplanten FVV-Folgeprojekt über sogenannte Gray-Box-Modelle verbessert werden. Im Rahmen des Projekts soll auch der gesamte Ansatz an einem aktuellen Vollmotor validiert werden. Parallel soll ein auf künstlicher Intelligenz (KI) basierender Ansatz verfolgt werden, bei dem nicht mehr explizit zwischen Modell, Vorsteuerung und Regelung getrennt wird. Als KI-Methode soll Reinforcement Learning zum Einsatz kommen. Mit dieser Lernmethode sollen aus einer sehr großen Menge an Trainingsdaten sowohl Vorsteuerungs- und Regelstrategien ermittelt als auch neue Strategien trainiert werden, um Schwankungen der Kraftstoffqualität nach Tankvorgängen sowie langfristige Alterungsvorgänge ausgleichen zu können. Zum Trainieren des Reinforcement-Learning-Systems wird eine virtuelle Versuchsumgebung benötigt, in der es selbstständig Erfahrungen sammeln kann. Für eine hohe Modellgüte muss der Antriebsstrang so exakt wie möglich in der virtuellen Versuchsumgebung abgebildet sein. Da das Reinforcement-Learning-System nur langsam Grundzusammenhänge erkennt, weil es sehr viele Entscheidungen im hochdimensionalen

transienten Parameterraum austestet, sind hohe Rechenleistungen erforderlich. Voruntersuchungen zeigen, dass eine Simulationsleistung von 20 Millionen km an virtuellen Testfahrten pro Tag notwendig wird, um ein Reinforcement-Learning-System auf eine komplexe Fragestellung im Antriebsstrang erfolgreich trainieren zu können. Hierfür soll im geplanten Folgeprojekt eine KI-basierte virtuelle Simulationsumgebung aufgebaut werden, die eine derartig enorme Rechenleistung bereitstellen kann.

LITERATURHINWEISE

- [1] Blomberg M.; Fajt N.; Leyens L.: Fast Knocking Prediction for Gasoline Engines. Abschlussbericht FVV-Projekt Nr. 1370, 2022
- [2] Blomberg M.; Hess M.; Hesse R.; Morsch P.: Engine Knock Model. Abschlussbericht FVV-Projekt Nr. 1313, 2021

DANKE

Das FVV-Forschungsvorhaben (Projekt-Nr. 1370) wurde am Lehrstuhl für Thermodynamik mobiler Energiewandlungssysteme (tme) der RWTH Aachen University unter der Leitung von Univ.-Prof. Dr.-Ing. (USA) Stefan Pischinger und am Institut für Fahrzeugtechnik Stuttgart (IFS) der Universität Stuttgart unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. Michael Bargende und Prof. Dr.-Ing. André Casal Kulzer durchgeführt. Es wurde von der FVV e. V. mit Eigenmitteln finanziell gefördert und von einem Arbeitskreis unter der Leitung von Dr.-Ing. Michael Fischer (Tenneco GmbH) begleitet. Die Autoren bedanken sich bei der FVV und allen Projektbeteiligten für die Unterstützung des Vorhabens.



READ THE ENGLISH E-MAGAZINE

Test now for 30 days free of charge: www.mtz-worldwide.com