

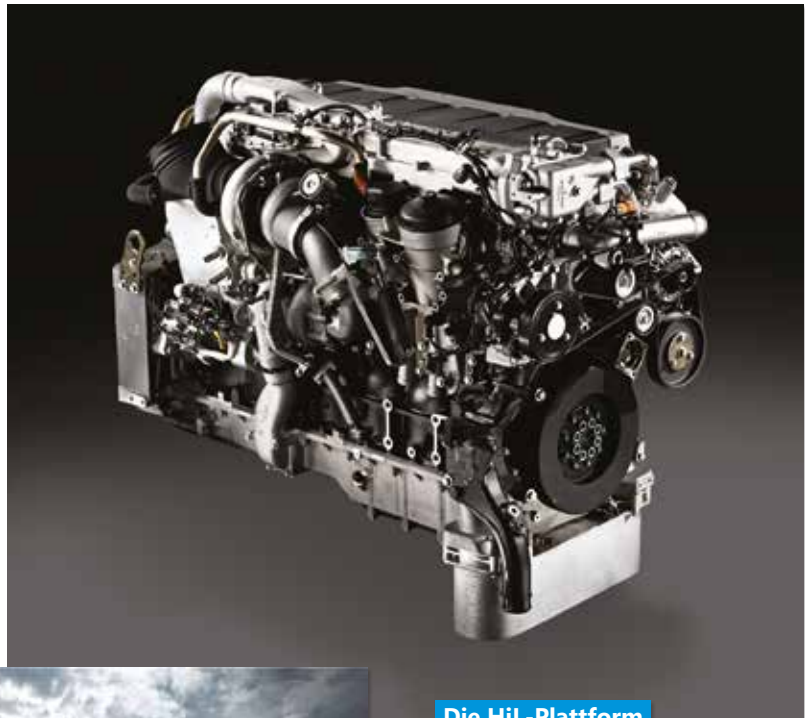
# Prozessoren für Brummis

## Thermodynamische Simulation von Verbrennungsmotoren in Echtzeit

**TEXT: Redaktion BILDER: © MAN Nutzfahrzeuge**

Bei der Simulation von Verbrennungsmotoren spielen Modellgenauigkeit und Echtzeitfähigkeit eine zentrale Rolle. Dabei unterliegt die Echtzeitsimulation den zeitlich engen Vorgaben der Zylindertaktung. Um diese Anforderungen zu erfüllen, verteilen MicroNova-HiL-Systeme die Simulationsarbeit auf mehrere Prozessoren.

Die MAN Nutzfahrzeuge AG entschied sich für die Simulation von Dieselmotoren mit bis zu zwölf Zylindern für die HiL-Plattform von MicroNova. In diesem Anwendungsfall wurde ein Multiprozessorsystem mit vier Prozessoren in Verbindung mit einem thermodynamischen Simulationsmodell verwendet.



### Die HiL-Plattform

Die skalierbare Echtzeitplattform der MicroNova AG deckt den Bereich von der einfachen Simulation bis hin zu verteilten Mehrprozessorsystemen mit verteilter I/O ab. Auf diese Weise lassen sich folgende Eigenschaften erzielen:

- » I/O-Pin-Anzahl bis hin zu mehreren tausend I/Os
- » Rechenleistung vom Power-PC bis hin zu gekoppelten, verteilten Echtzeitsystemen mit jeweils bis zu 16 Prozessoren
- » Von der Simulation bis zum Betrieb von verteilten, hochleistungsfähigen HiL-Modellen einsetzbar
- » Simulation ohne Lasten sowie zur hochgenauen Simulation von realen Lasten wie Hochdruck-Magnet-Injektoren möglich

Einen Überblick über die Skalierungsmöglichkeiten der HiL-Plattform gibt Abbildung 1.

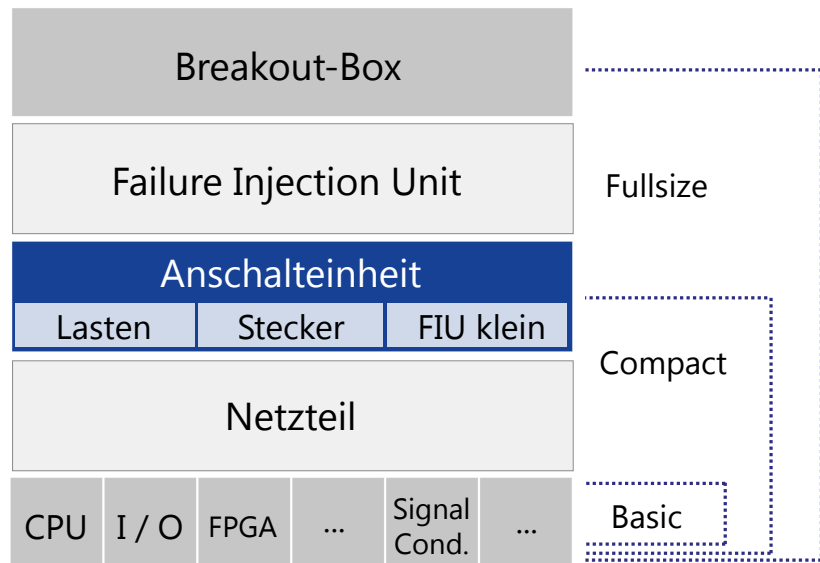
### MAN Nutzfahrzeuge AG

Die Angebotspalette der MAN Nutzfahrzeuge AG erstreckt sich von Sechszylinder-LKW-Motoren bis hin zu Zwölfzylinder-Schiffmotoren. Um für diese Motoren die passenden Steuergeräte zu entwickeln, ist eine realistische Simulation des Motorverhaltens erforderlich. Hier stießen kennfeldbasierte Mittelwertmodelle an ihre Grenzen, da sie nicht alle benötigten Effekte ohne übermäßig hohen Parametrierungsaufwand abbilden konnten. Die Verwendung eines echtzeitfähigen thermodynamischen Motormodells ermöglichte die erforderlichen hohen Genauigkeiten. Die HiL-Multiprozessorplattform stellt eine leistungsfähige Ablaufumgebung für diese Anforderungen zur Verfügung. Links ist ein typischer zu simulierender Motor dargestellt. Für höhere Zylinderzahlen kommen zwei baugleiche Steuergeräte (ECU) zum Einsatz. Das eingesetzte HiL-System ist in der Lage, die große Anzahl von I/Os (mehrere 100) in Echtzeit zu behandeln.

### enDYNA Themos

Die TESIS DYNAware GmbH, mit der die MicroNova AG kooperiert, ist ein Anbieter von echtzeitfähigen Simulationsmodellen, die auf der MicroNova-HiL-Plattform ablaufen können.

Bei enDYNA Themos handelt es sich um ein Software-Paket zur Simulation von Verbrennungsmotoren. Der thermodynamische Modellansatz ermöglicht die detaillierte Abbildung physikalischer Abhängigkeiten im Motor. enDYNA Themos stellt eine hochwertige Basis für die Entwicklung und den Test von Diesel- und Ottomotor-Steuergeräten dar. Aufgrund der Performance dieser Modelle sind sie für den Echtzeitbetrieb auf der MicroNova-Plattform hervorragend geeignet. Die hohe Genauigkeit des Motormodells



## 1 Die HiL-Plattform von MicroNova

erlaubt es ECU-Entwicklern, genaue und zuverlässige Aussagen über das Verhalten von Motoren und den zugehörigen Steuergeräten zu machen. Damit ist sogar eine weitgehende Vorkalibrierung der ECUs am HiL möglich. Die Simulationsmodelle werden unter anderem eingesetzt für:

- » Hardware-in-the-Loop-Tests von Steuergeräten mit Überwachung des Zylinderdruckverlaufs
- » Konzept- und Reglerentwurf unter anderem für zweistufige Turboaufladung, vollvariable Ventilsteuerung und Abgasrückführung
- » Test und Entwicklung von Funktionen zur Abgasnachbehandlung und Onboard-Diagnose.

enDYNA Themos berechnet den zeitlich aufgelösten Druckverlauf im Zylinder, basierend auf einem nulldimensionalen Verbrennungsmodell, dem Wandwärmeverlust über die Zylinder und der Kolben-Kinematik.

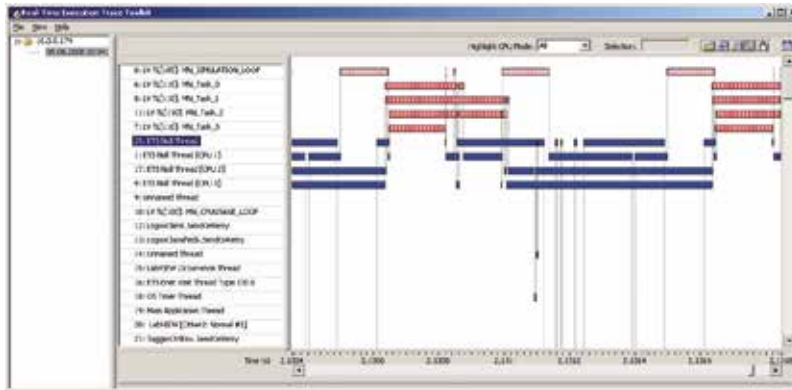
Durch den physikalischen Modellansatz konnten gekoppelte Effekte wie die Auswirkung der Ladungsverdünnung durch Abgasrückführung auf Drehmomententwicklung und Abgas

naturgemäß abgebildet werden. Der hohe Detailgrad der Modelle bei gleichzeitiger Echtzeitanforderung erforderte eine leistungsstarke Hardware und eine HiL-Software, die eine Parallelisierung des Berechnungsvorgangs ermöglichten. Diese Herausforderungen löste MicroNova mit Hilfe einer Quadcore-CPU und eines leistungsstarken Simulink-Blocksets.

### HiL-Hardware

In einem Zwölfzylinder-Diesel-HiL sind von oben nach unten die folgenden Komponenten untergebracht:

- » Fehleraufschaltung für 160 Pins. Die Injektoren besitzen eine separate Fehleraufschaltung
- » Breakout-Boxen für 360 I/O-Pins
- » Simulierte Lasten für 16 Hochdruck-Magnet-Injektoren mit Strommessung. Für die Injektoren sind LEDs zur Anzeige der Ansteuerung der Injektoren vorhanden
- » ECU-Anschaltung mit weiteren simulierten Lasten
- » QuadCore-CPU mit 2,4 GHz Taktfrequenz
- » PXI-Rack mit I/O-Karten und Signalkonditionierung



## 2 Vier Prozessoren bei der Arbeit

Für den Aufbau des HiL-Simulators wurde auf den bewährten MicroNova-HiL-Baukasten zurückgegriffen, mit Komponenten wie der Simulation von Lambdasonden. Die Dimensionierung der Simulation der verwendeten Hochdruck-Magnet-Injektoren wurde an die physikalischen Gegebenheiten im LKW-Bereich angepasst.

### HiL-Software

Die einfache Anbindung der motorspezifischen Inputs und Outputs ist die Basis für den erfolgreichen Einsatz von Modellen zur Simulation von Verbrennungsmotoren. Die Basis hierfür sind eine Reihe von einfach zu konfigurierenden Simulink-Blocksets. Diese umfassen:

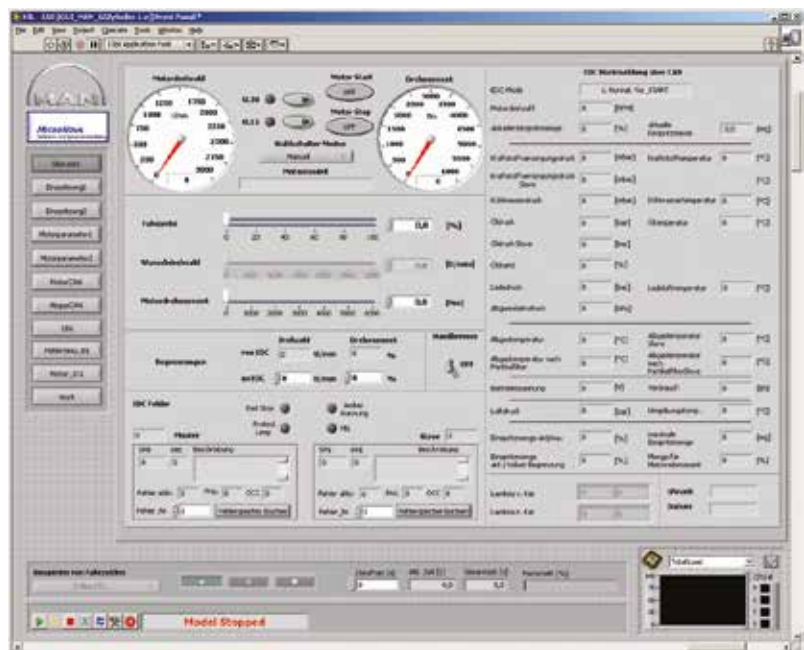
- » Analoge Ein- und Ausgabe
- » Digitale Ein- und Ausgabe
- » PWM Ein- und Ausgabe
- » Tabellen-gesteuerte Erzeugung von Kurbel- und Nockenwellensignalen
- » Einspritz- und Zündfassung (auch Mehrfacheinspritz- und Zündfassung)
- » Simulink-Blocksets für CAN
- » Simulink-Blocksets für LIN

Diese Blocksets werden in zahlreichen MicroNova-HiL-Simulatoren eingesetzt. Auch sogenannte Multirate-Modelle, das heißt Modelle, die Teile mit unterschiedlichen Zykluszeiten

beinhalten, werden unterstützt und nutzen die hohe Rechenleistung von Mehrprozessor-Plattformen. In der beschriebenen Anwendung rechnen Teile des Modells parallel auf mehreren Prozessoren, so dass die zeitlichen Anforderungen der Simulation erfüllt wurden. Simulink-Blöcke ermöglichen es, einzelne Berechnungen graphisch verschiedenen Prozessoren zuzuweisen. Die auf den einzelnen Prozessoren ablaufenden Modellteile müssen

vom Anwender lediglich in entsprechenden Subsystemen untergebracht werden. Die Software sorgt für eine effiziente Zuweisung von Berechnungen an Einzelprozessoren und für die Synchronisation der einzelnen parallelen Berechnungen. Die Nutzung mehrerer Prozessoren wird damit für den Anwender zum Kinderspiel.

Abbildung 2 zeigt einen Modellschritt mit einer Zykluszeit von einer Millisekunde. Die Hauptschleife ist in Hellrosa dargestellt, die Verbrennungsvorgänge in den einzelnen Zylindern in Rot. Die Berechnung für jeweils vier Zylinder ist in einem Thread zusammengefasst. Die Rechenzeiten für die einzelnen Zylinder sind unterschiedlich lang, weil ein Verbrennungsvorgang zum Beispiel mehr Rechenzeit erfordert als das Ausstoßen der Abgase. Bei den blau dargestellten Threads handelt es sich um die sogenannten Idle-Threads. Diese stellen die Reserve der Rechenzeit am HiL-Simulator dar. Zudem ist noch ausreichend Spielraum für zukünftige Erweiterungen vorhanden.



## 3 Die Bedienoberfläche

Der HiL-Simulator kann auf zwei Arten bedient werden:

- » Zum einen steht eine komfortable, in LabVIEW realisierte Oberfläche zur Verfügung.
- » Zum anderen ist ein vollautomatischer Betrieb des Simulators über eine auf Python basierende Testautomation möglich.

Die Bedienoberfläche für den HiL-Simulator ist in Abbildung 3 dargestellt. Für eine einfache Bedienung des HiL-Simulators sind alle Ein- und Ausgänge sowie wichtige Modellvariablen und -parameter an der Bedienoberfläche vorhanden. Der MAN Nutzfahrzeuge AG wurde das HiL-System mit einem komplett parametrisierten Modell geliefert.

#### Fazit

Durch den Einsatz von bewährten Komponenten aus dem Produkt-Baukasten realisierte MicroNova in kurzer Zeit ein für den Kunden maßgeschneidertes HiL-System basierend

auf Standards. Dadurch konnte der reale Motor wirklichkeitsnah nachgebildet werden, so dass keine Einträge in den Fehlerspeichern der Steuergeräte mehr auftraten. Für das Steuergerät war es nicht erkennbar, dass kein realer Motor bedient wird.

Das Erreichen einer derartigen Simulationsqualität war möglich, weil:

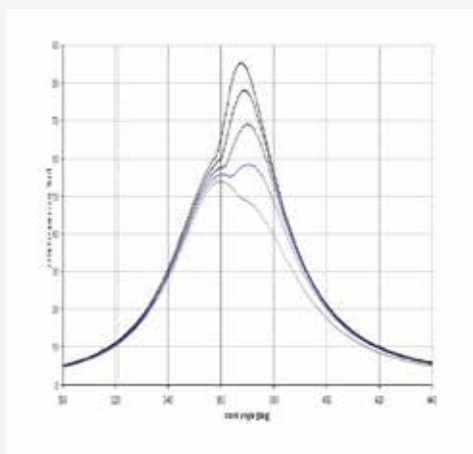
- » MAN Motordaten in sehr hoher Qualität zur Verfügung stellte.
- » das enDYNA Motormodell eine Simulation in der benötigten Detailtreue ermöglicht. Nur ein thermodynamischer Modellansatz bildet das Motorverhalten in der geforderten Genauigkeit ab.
- » MicroNova die erforderliche leistungsfähige Hardware- und Software-Umgebung bietet.

Für den Kunden ergibt sich ein großer Kostenvorteil, weil jetzt Tests auf dem HiL-Simulator durchgeführt werden können, die früher an teuren Motorprüfständen mit höherem Zeitaufwand und unter weniger reproduzierbaren Bedingungen durchgeführt

werden mussten. Die Tests können sogar schon gestartet werden, wenn noch kein echter Motor zur Verfügung steht.

Die MicroNova-HiL-Plattform eignet sich auch für andere komplexe Anwendungsgebiete wie Fahrdynamikmodelle in Verbindung mit Fahrerassistenzsystemen. Durch die Unterstützung einer fast beliebigen Anzahl von Prozessoren in Multiprozessorsystemen lassen sich so zahlreiche neue HiL-Anwendungen realisieren.

### Exkurs: Thermodynamisches Motormodell



4 Verlauf des Zylinderinnendrucks

Der Kern eines thermodynamischen Motormodells ist die Motorprozesssimulation. Hier werden der Verbrennungsvorgang und die dabei auftretenden Energieströme mit einem physikalisch-basierten Ansatz zeitaufgelöst berechnet. Der entscheidende Vorteil im Vergleich zu bisher üblichen Mittelwertmodellen, in denen das stationäre Motorverhalten meist in Kennfeldern hinterlegt ist, ist die Abbildung komplexer Zusammenhänge gemäß physikalischer Wirkprinzipien und die gleichzeitig erreichte höhere Genauigkeit.

Somit lassen sich zum Beispiel die direkten Auswirkungen von reduziertem Luftdurchsatz auf Abgastemperatur und Ladedruck sehr genau darstellen. Durch die zeitaufgelöste Berechnung des Verbrennungsvorgangs zeigt sich auch der Einfluss von Einspritzwinkel und Mehrfacheinspritzungen auf den Verlauf des Zylinderinnendrucks über den gesamten Arbeitsbereich des Motors. In Abbildung 4 sind simulierte Zylinderdruckverläufe bei verschiedenen Lastpunkten und Einspritzmustern dargestellt. Ein thermodynamisches Motormodell ist daher für Tests und Entwicklung zunehmend komplexer Regler wie das Abgastemperatur-Management, die zweistufige Turboaufladung, der vollvariable Ventiltrieb, AGR sowie für die Überprüfung der Onboard-Diagnosefunktionalität von großer Bedeutung.