

# Kalibrierung der Motorleistung bei Mercedes-AMG

Von Hasan Uzun, Mercedes-AMG GmbH

DIE OPTMALE KALIBRIERUNG VON MOTOREN IST FÜR MERCEDES-AMG eine zentrale Fähigkeit bei der Entwicklung von Antriebssträngen, die eine hohe dynamische Leistung und ökologische Verantwortung miteinander vereinen. Moderne, hochkomplexe Motoren mit vielen Freiheitsgraden zu kalibrieren, kann auch für die erfahrensten Automobilingenieure eine Herausforderung darstellen. Die möglichen Variablenkombinationen sind einfach zu vielfältig, um sie alle einzeln testen zu können. Leistung, Effizienz, Emissionen und Zuverlässigkeit sind zudem so eng verflochten, dass die richtige Balance nur schwer zu finden ist.

**A**MG hat mit MATLAB®, der Model-Based Calibration Toolbox™ und der Parallel Computing Toolbox™ ein spezielles Motorkalibrierungs-Tool aufgebaut, mit dem Ingenieure aller Erfahrungsstufen AMG-Antriebsstränge hinsichtlich höchstmöglicher Leistung kalibrieren können (Abb. 1). Das Tool unterstützt den gesamten Kalibrierungsprozess von Design-of-Experiments (DoE) über die Erzeugung und Auswahl von Modellen bis hin zur Optimierung.

## Anwendung von Design-of-Experiments Verfahren

Die Leistung eines Motors hängt von der exakten Führung einer großen Zahl von Motorsteuerungsparametern ab. Aktuelle Motorsteuerungen (Engine Control Units, ECUs) können beispielsweise mehrfach pro Taktzyklus verschiedene Treibstoffmengen

in den Motor einspritzen, wodurch die Zahl der Parameter weiter wächst. Bei der Motorkalibrierung werden diese und weitere Variablen so abgestimmt, dass der Motor über seinen gesamten Drehzahl- und Lastbereich hinweg seine optimale Leistung erzielt.

Da die Auswirkungen einer Variablenänderung von vielen anderen Variablenwerten abhängen, kann man einen Motor unmöglich Variable für Variable optimieren. Und aufgrund der hohen Anzahl mit einem Dutzend oder mehr Variablen mit jeweils eigenen Wertebereichen lassen sich auch nicht alle erdenklichen Kombinationen an einem Motor durchtesten.

Die Methode des DoE löst dieses Problem durch Aufstellung von Testplänen, die das Ansprechverhalten des Motors empirisch ermitteln. Mit dem von AMG entwickelten Tool können Ingenieure ohne Ex-

pertenwissen DoE-Verfahren als Teil der umfassenden internen Kalibrierungsprozesse einsetzen.

## Aufbau eines eigenen Kalibrierungs-Tools

Die Entwicklung des neuen Kalibrierungstools erfolgte in drei Phasen. In der ersten Phase wurde im GUI der Model-Based Calibration Toolbox ein robuster Entwurfs-, Modellierungs- und Optimierungsprozess zur systematischen Kalibrierung von AMG-Motoren konzipiert.

Über die Kommandozeilen-Schnittstelle der Toolbox übersetzten Entwickler die erarbeiteten Schritte dann in MATLAB-Funktionen. Die fertige Applikation sollte sowohl auf die für AMG-Workflows typischen Eingabeparameter als auch auf die besonderen Bedürfnisse der



*Der Mercedes-Benz SLS AMG-Flügelträger. Das Sportcoupé beschleunigt in 3,8 Sekunden von 0 auf 100 km/h.*

Kalibrierungsingenieure zugeschnitten sein. In der dritten Phase wurde darum mit MATLAB ein spezielles GUI erzeugt, das die Model-Based Calibration Toolbox von der Kommandozeile aus aufruft (Abb. 2). Die Erzeugung und Bewertung möglicher Motorenmodelle ist ein rechenintensiver Kalibrierungsprozess, der mehrere Minuten in Anspruch nehmen kann. Zur Beschleunigung dieses Schritts wurde darum mit der Parallel Computing Toolbox die verfügbare Rechenleistung der Dual-Core-Workstations von AMG nutzbar gemacht. MATLAB konnte durch diese einfache Anpassung auf beide CPUs zugreifen und die Modelle um den Faktor 1,7 schneller berechnen.

### Der Kalibrierungs-Workflow

Das neue Tool hat den Kalibrierungsprozess bei AMG vereinfacht und optimiert. Auch Ingenieure ohne Vorerfahrung mit DoE setzen das Tool ein und erzielen damit hervorragende Ergebnisse.

Sie geben zunächst bekannte Variablen-grenzen ein wie etwa minimale und maximale Einspritzmengen (gemessen in Milligramm je Einspritzvorgang) oder Zündzeitpunkte (gemessen in Grad Kurbelwinkel). Das GUI fragt nur Informationen ab, die für AMG-Ingenieure relevant sind und verwendet dabei die im Unternehmen gängigen Fachbegriffe. Dann ruft das Tool die Model-Based Calibration Toolbox auf, die daraus einen Mindestsatz von Testpunkten für einen Testlauf auf einem Motorenprüfstand erzeugt. AMG hat unterschiedliche DoE-Ansätze miteinander verglichen, darunter voll faktorielle, zentral zusammengesetzte sowie Latin-Hypercube-Verfahren. Am Ende entschied man sich für einen selbst aufgestellten Ansatz, der raumfüllende und optimale Methoden miteinander kombiniert.

Anschließend übertragen Ingenieure die Testdaten – gemessene Drehmomente, Emissionen und Treibstoffverbräuche – zurück in das Tool, das erneut die Model-Based Calibration Toolbox aufruft und nun



ABB. 1. Hauptmenü des AMG-Kalibrierungstools.

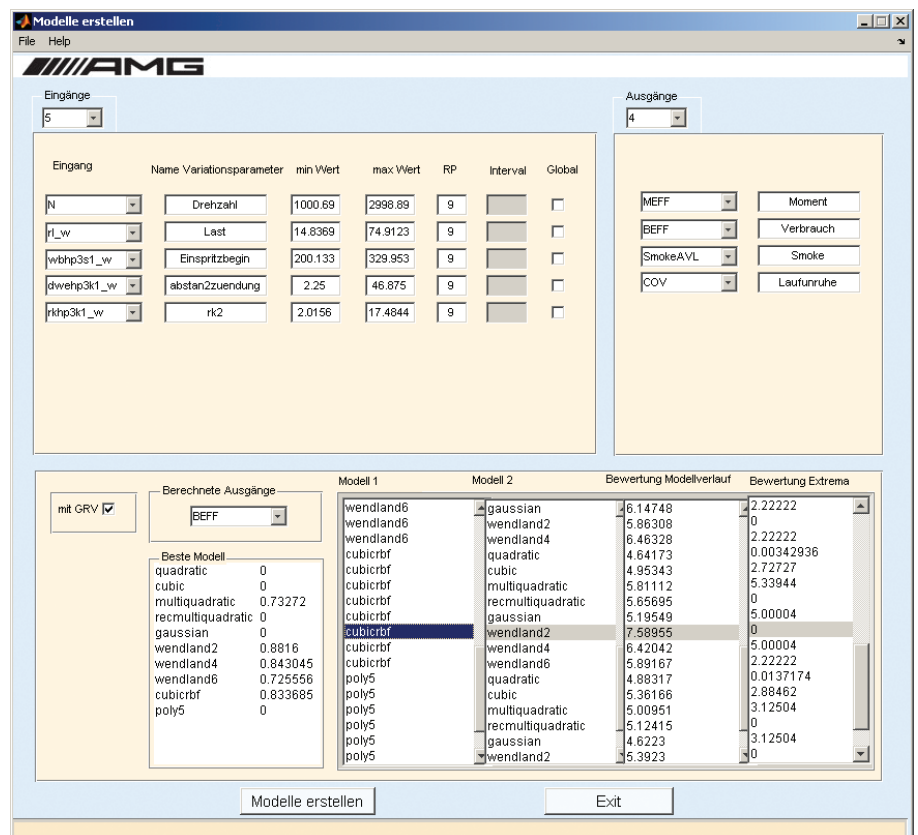


ABB. 2. Dialogbox zur Modellerstellung.

## Entwicklung umweltfreundlicherer Sportwagen

Mit MATLAB und der Kommandozeilen-Schnittstelle der Model-Based Calibration Toolbox konnte AMG eine Lösung implementieren, die sich nahtlos in den intern bestehenden Kalibrierungsworkflow einfügt. Mit diesem spezialisierten Kalibrierungs-Tool kann AMG beispielsweise seine Ziele zur Erfüllung der EURO 6-Abgasnorm erreichen. DoE-Verfahren sowie die Parallelisierung rechenintensiver statistischer Modellierungs- und Optimierungsaufgaben beschleunigen die Kalibrierung erheblich.

AMG-Ingenieure haben das Tool auch im Rahmen des Kalibrierungsprozesses für den neuen Mercedes-Benz SLS AMG eingesetzt. Der AMG 6,3 Liter V8-Motor dieses Sportwagens leistet 420 kW (571 PS) bei einem Drehmoment von 650 Nm (alle Werte sind vorläufig). Das Flügeltür-Coupé beschleunigt von 0 auf 100 km/h in 3,8 Sekunden. Die präzise Kalibrierung hat dazu beigetragen, dass dieses Fahrzeug mit 13,2 Litern auf 100 km den in seiner Klasse niedrigsten Verbrauch erzielt.

Einer der Hauptvorteile des Einsatzes dieses in Eigenregie entwickelten Kalibrierungs-Tools beim Mercedes-Benz SLS AMG und weiteren Projekten besteht darin, dass es vollständig auf die spezifischen Anforderungen von AMG und die bestehenden Kalibrierungsprozesse zugeschnitten ist. Die Ingenieure und Mechaniker bei AMG können sich damit im Rahmen eines optimierten Kalibrierungsprozesses voll auf die Besonderheiten der AMG-Motoren konzentrieren. ■

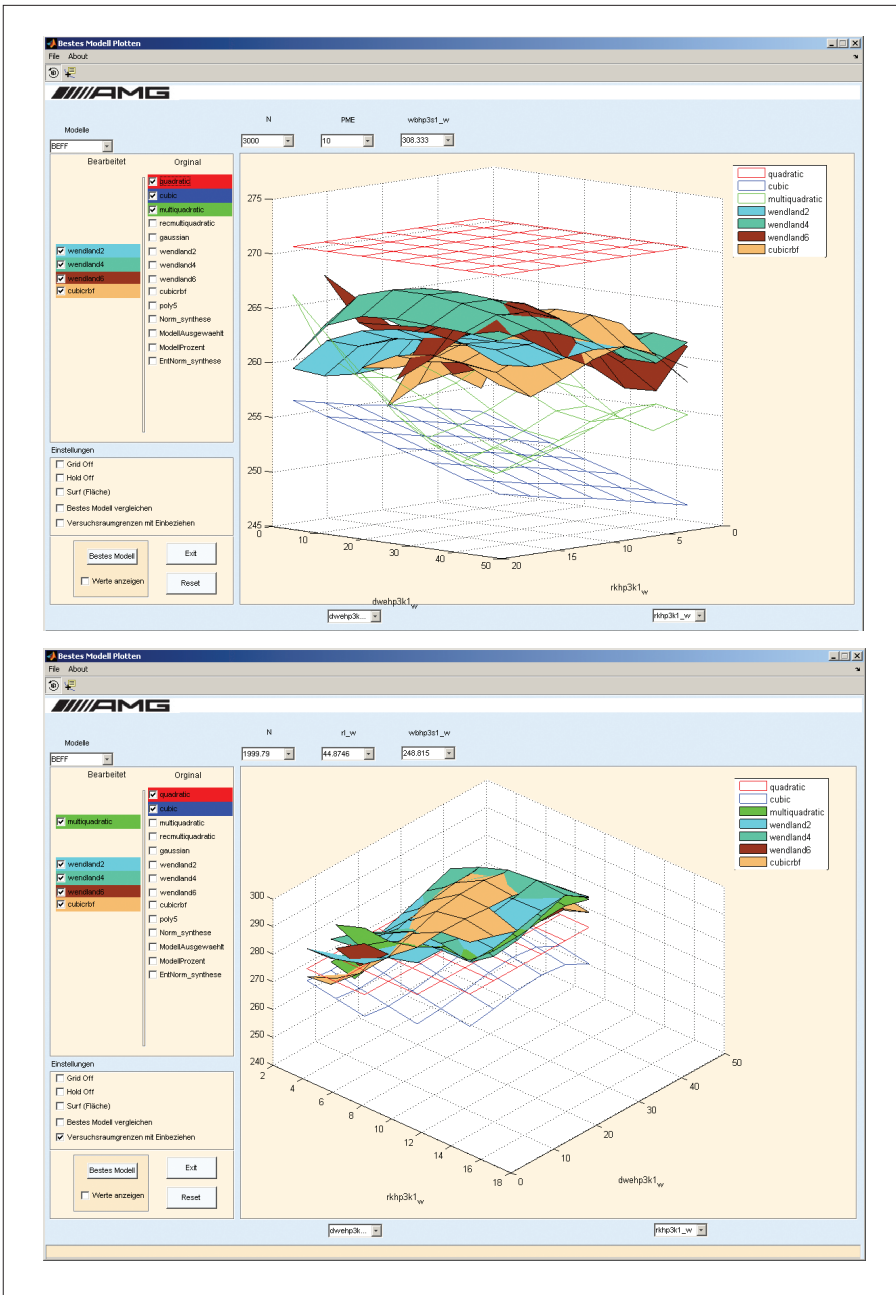


ABB. 3. Vom Tool erzeugte Diagramme zum Auswählen und Vergleichen von Modellen.

Motormodelle erzeugt (Abb. 3).

Zum Schluss optimiert das Tool mithilfe der Model-Based Calibration Toolbox die Kalibrierungs-Einstellungen über einen breiten Bereich von Drehzahl- und Lastwerten. Der Ingenieur gibt dazu beispielsweise eine gesetzliche Emissionsgrenze sowie einen auf die Umweltziele

von AMG abgestimmten Verbrauch vor und optimiert dann das Drehmoment auf die hiermit bestmögliche Leistung. Die Model-Based Calibration Toolbox löst auch umfangreiche Optimierungsprobleme mit Nebenbedingungen und erzeugt als Ergebnis Look-Up-Tables, die direkt auf die ECU exportiert werden können.

### Weitere Informationen online

**FITTING A STATISTICAL MODEL TO ENGINE TEST DATA**  
[www.mathworks.de/statistical\\_model](http://www.mathworks.de/statistical_model)

**MERCEDES-AMG DEVELOPS ON-TARGET RAPID PROTOTYPING SYSTEM**  
[www.mathworks.de/mercedes\\_prototyping](http://www.mathworks.de/mercedes_prototyping)