

# Optische Messung der Ventiltemperatur

Die moderne Motorenentwicklung verlangt nach immer flexibleren und dynamischeren Prozessen. Kernpunkte sind dabei Schnelligkeit und Präzision der Messmethoden. Porsche Engineering hat ein Verfahren zur berührungslosen transienten Online-Messung von Bauteiltemperaturen entwickelt, das direkt am Motorprüfstand oder im Fahrzeug einsetzbar ist. Das neue Werkzeug bildet eine wesentliche Grundlage für weitere Steigerungen der spezifischen Motorleistung und für zukünftige CO<sub>2</sub>- und Verbrauchsoptimierungen.

Von Johannes Wüst und Maximilian Fischer

Gesetzliche Anforderungen und der Kundenwunsch nach verbrauchsärmeren Fahrzeugen führten in den vergangenen Jahren zu starken Veränderungen bei der Motorisierung neuer Fahrzeuggenerationen. Drei wesentliche Tendenzen prägten dabei die technologische Entwicklung: erstens die Einführung der Kraftstoff-Direkteinspritzung, die in Europa praktisch flächendeckend abgeschlossen ist. Hier stellt sich den Entwicklern aktuell die Frage nach der Erfüllung der zukünftigen Euro-6-Emissionsgrenzwerte zu möglichst geringen Produktmehrkosten. Zweitens werden Otto-Saugmotoren zunehmend durch hubraumkleinere aufgeladene Motoren ersetzt, was unter dem Oberbegriff Downsizing beschrieben wird. Drittens hielten weitere Optimierungen wie beispielsweise Thermomanagement, Start-Stopp-Funktion, Hybridisierung und Reibungsreduktion Einzug.

Insbesondere Direkteinspritzung und Downsizing führten zu einer steigenden spezifischen Motorleistung. Werte um 90 bis 100 kW/l sind heute Stand der Technik und werden in naher Zukunft

aufgrund der stetigen Weiterentwicklung im Abgasturboladerbereich, der Einspritztechnologien sowie der Brennverfahrensentwicklung weiter wachsen.

Diese Leistungsverdichtung führt zu einer deutlichen Steigerung der spezifischen Wärmeenergie, wodurch auch die thermische Belastung vieler Motorkomponenten steigt. Betroffen sind vor allem die Kolben, die Ladungswechselventile, der Zylinderkopf, der Abgaskrümmen und der Turbolader. Die gängigen Gegenmaßnahmen sind Anpassung der Motorkühlung, konstruktive Mittel wie etwa integrierte Abgaskrümmen oder Kolbenkühlung oder auch höherwertige Werkstoffe. In aller Regel entstehen dadurch jedoch Mehrkosten.

Jede Motorenentwicklung steht daher vor dem Zielkonflikt zwischen technischen Maßnahmen, zum Beispiel zur Verbrauchsreduktion, und der Vermarktbarkeit, also Kostengrenzen. Ein typischer Fall ist die Werkstoffwahl und die konstruktive Ausführung von Auslassventilen: Einerseits besteht die Möglichkeit, durch Gemischanreicherung im

oberen Lastbereich die Abgastemperaturen zu begrenzen und damit die Bauteiltemperaturen der Auslassventile zu reduzieren. Dadurch können kostengünstigere Werkstoffe für die Auslassventile eingesetzt werden, allerdings steigt der Kraftstoffverbrauch in diesen Lastbereichen an. Andererseits kann man höherwertige Werkstoffe verwenden, etwa durch das Ersetzen einer gängigen Stahllegierung wie X50 durch Nimonic, oder natriumgekühlte Ventile einsetzen. Beides führt aber zu einer deutlichen Erhöhung der Teilepreise. Generell steht jedoch im Vordergrund, das thermomechanische Potenzial des eingesetzten Werkstoffs und der konstruktiven Ausführung voll auszuschöpfen.

## Der Stand der Technik beim Messen der Ventiltemperaturen

Zur Bestimmung der Ventiltemperaturen werden seit vielen Jahren thermometrische Ventile eingesetzt, bei denen aus Änderungen der Materialhärte auf die Ventiltemperatur geschlossen werden kann. Dieses Verfahren ist etabliert,

allerdings liegen die Messergebnisse erst mit deutlicher Verzögerung vor: Der Motor muss erst zerlegt und die Ventile im Labor analysiert werden, was sich zeitlich nur schlecht in heutigen dynamischen Entwicklungsprozessen einbinden lässt. Weiterhin können nur bestimmte Werkstoffe verwendet werden, weshalb die Messventile möglicherweise nicht den Realzustand widerspiegeln. Das Ergebnis lässt auch nur auf die maximale Temperatur schließen, die mit dem verwendeten Applikationsstand in einem gemessenen Betriebspunkt am Ventil herrschte. Informationen über die Ventiltemperatur in anderen Lastpunkten oder mit anderer Applikation gibt es mit einer einzigen Messung nicht.

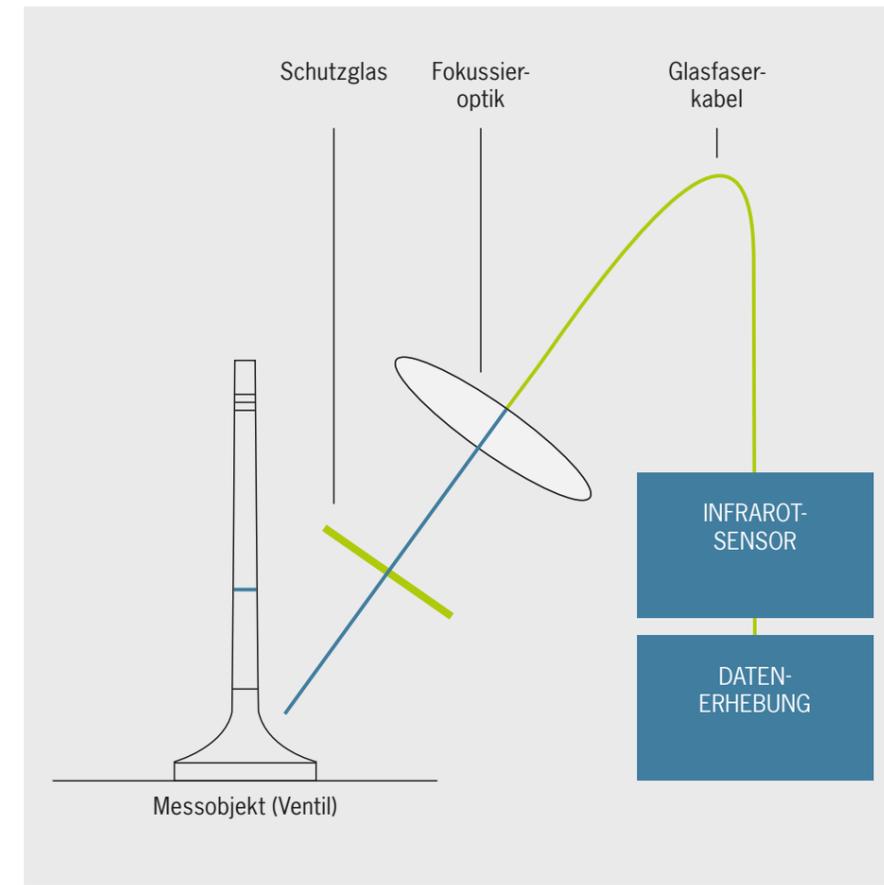
In Sonderfällen werden auch Thermoelemente in die Ventile integriert und mit telemetrischer Signalübertragung überwacht. Dieses Verfahren ist aufwendig und bezüglich der Zuverlässigkeit kritisch, es hat sich daher nicht als Standard durchgesetzt.

## Die Anforderungen und die Motivation

Im Fokus der Entwicklung von Porsche Engineering stand das Generieren eines Messsignals, das dem Versuchingenieur am Prüfstand oder im Fahrzeug in Echtzeit zur Verfügung steht. Die Effizienz des Entwicklungsprozesses sowohl in der Mechanik als auch in

der Applikation kann dadurch wesentlich gesteigert werden. Dabei wurde im Lastenheft definiert:

- > Messbereich bis rund 500 Grad Celsius für Einlassventile und bis circa 900 Grad Celsius für Auslassventile; Sensorumgebungstemperatur bis maximal 125 Grad Celsius
- > Messgenauigkeit vergleichbar mit thermometrischen Ventilen oder besser (<10 Kelvin)
- > hohe Signaldynamik und Verfügbarkeit des Messsignals in Echtzeit
- > Unempfindlichkeit gegen Reflexionen und leichte Verschmutzung
- > geringer Bauraumbedarf



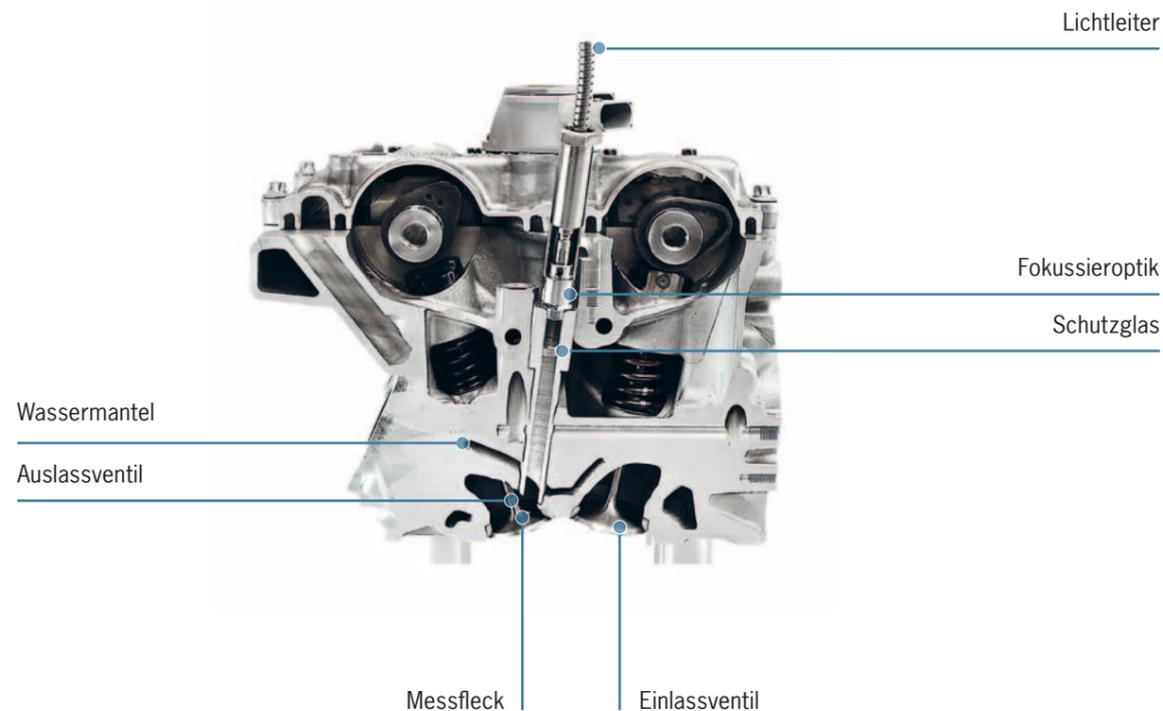
Messtechnischer Aufbau

Von den ersten Überlegungen bis zur Markteinführung im Jahr 2013 durchlief das Projekt mehrere Entwicklungsschleifen. Seither wurde das Messverfahren in einigen Kundenprojekten erfolgreich eingesetzt. So diente es beispielsweise der Ursachenerforschung von Ventilschäden und von übermäßigem Verschleiß von Ventilsitzringen. Weitere Einsätze waren die Vergleiche unterschiedlicher Ventilausführungen mit und ohne Natriumfüllung sowie von unterschiedlichen Motorapplikationen, dabei ging es um die Auswahl des kostengünstigsten Ventilwerkstoffs für jede Applikationsvariante.

Aktuell ist das Entwicklungswerkzeug bei Porsche Engineering bereits in der vierten Evolutionsstufe im Einsatz.

## Das Messsystem

Zentraler Punkt der Ventiltemperaturmessung ist ein pyrometrischer Infrarotsensor. In Vorversuchen wurden geeignete Sensortypen ausgewählt, die sich >



Sensoreinbau im Zylinderkopf eines Porsche-911-Motors

aufgrund ihrer Eigenschaften für diese Applikation eignen.

Die Messkette selbst besteht aus dem Infrarotsensor, einem Controller und einem Messrechner. Ein Saphirglas schützt den Sensor vor den hohen Abgastemperaturen und dem Abgasgegendruck. Das Messsignal kann ohne Probleme in die üblichen Systeme von Motorprüfständen eingebunden werden. Soll die Messung im Fahrzeug erfolgen, kann das Signal alternativ im Applikationsrechner erfasst werden, um direkte Reaktionen auf den Applikationsstand zu erkennen.

Die konstruktive Umsetzung muss für jeden Motortyp individuell geprüft werden. Dabei können der Anwendungszweck und der Grund der Messung

Einfluss auf die Einbaulage des Sensors nehmen.

Eine Herausforderung dieser Konstruktion – sofern sie nicht bei prototypischen Zylinderköpfen im Gussteil bereits vorgehalten werden kann – ist die Schaffung des Sensorzugangs durch den Ölraum und den Kühlwassermantel gegen das Kühlwasser, der mithilfe eines aufwendigen Schweißverfahrens gelöst werden konnte. Damit kann das Verfahren auch an bereits entwickelten Zylinderköpfen eingesetzt werden.

In der aktuellen Evolutionsstufe kommt ein weiterer Sensortyp zur Anwendung, der über ein Glasfaserkabel komplett

vom Motor getrennt verbaut werden kann. Neben einer noch höheren Dynamik ist dieser Aufbau noch unempfindlicher gegen thermische Belastungen, Verschmutzung und auch mechanische Sensorbelastungen. Mögliche optische Reflexionen werden durch mattschwarze Beschichtungen und möglichst günstige optische Einfallswinkel des Messstrahls vermieden.

#### Die Optikverschmutzung und deren Abhilfe

Ein neuralgischer Punkt ist die Verschmutzung des Schutzglases durch Ruß aus dem Abgas. Insbesondere wenn Ventiltemperaturmessungen über längere Versuchszeiten erfolgen, können die Ablagerungen bestimmter Länder

kraftstoffe die mögliche Messdauer massiv reduzieren. Zur Lösung dieser Problematik entwickelten die Ingenieure zwei unterschiedliche Abhilfemaßnahmen: eine konstruktive Ausführung mit schneller Reinigungsmöglichkeit des Schutzglases und die Nutzung eines Zweifarbprometers.

Das Prinzip der Zweifarbprometrie beruht auf der Verwendung von zwei Infrarotdetektoren, die in unterschiedlichen Wellenlängenbereichen messen. Optik und Glasfaser nehmen das Signal weiterhin auf und leiten es im Sensorgehäuse durch ein Prisma auf die beiden Sensoren. Die spezifische Signalintensität jeder Wellenlänge analog zur Temperatur erlaubt es, die Signale im Controller durch Quotientenbildung abzugleichen. Dadurch steigt die Präzi-

sion der Messung und eine gegebenenfalls vorliegende Signaldämpfung wird kompensiert. Darüber hinaus lassen sich dadurch der Intensitätsverlust und damit der Verschmutzungsgrad erkennen. Die Vorgabe einer maximal erlaubten Signalschwächung veranlasst den Controller beim Erreichen des Grenzwertes zum Abschalten des Sensors, die Optik muss dann gereinigt werden. Dieses Verfahren gewährleistet eine gleichbleibende Qualität der Messungen.

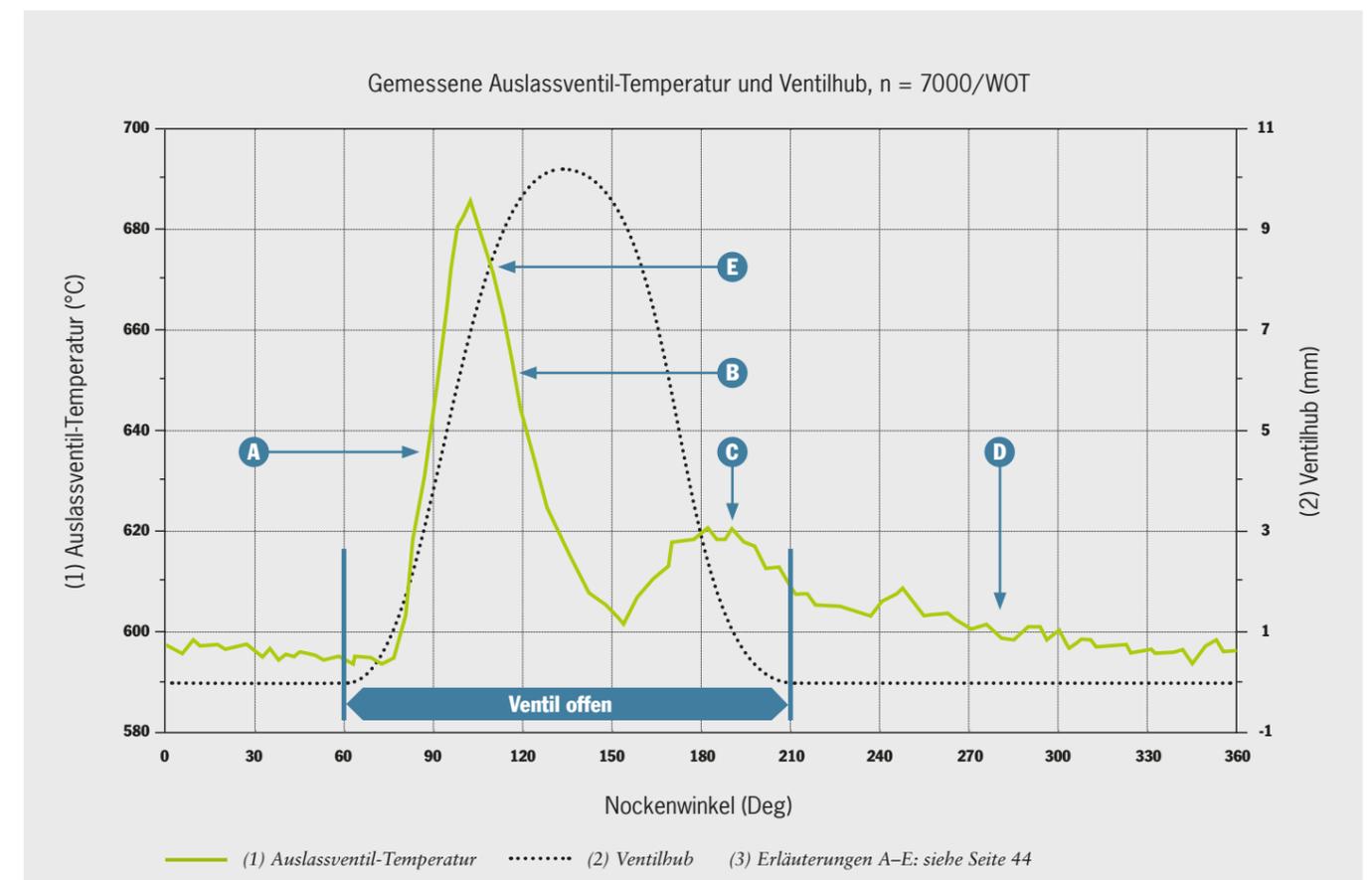
#### Die Konzeptvalidierung

Um die Möglichkeiten dieses Systems aufzuzeigen, startete Anfang 2014 in Nardò (Italien) eine umfangreiche interne Versuchsreihe mit zwei Versuchsfahrzeugen. Sowohl die zweitägige,

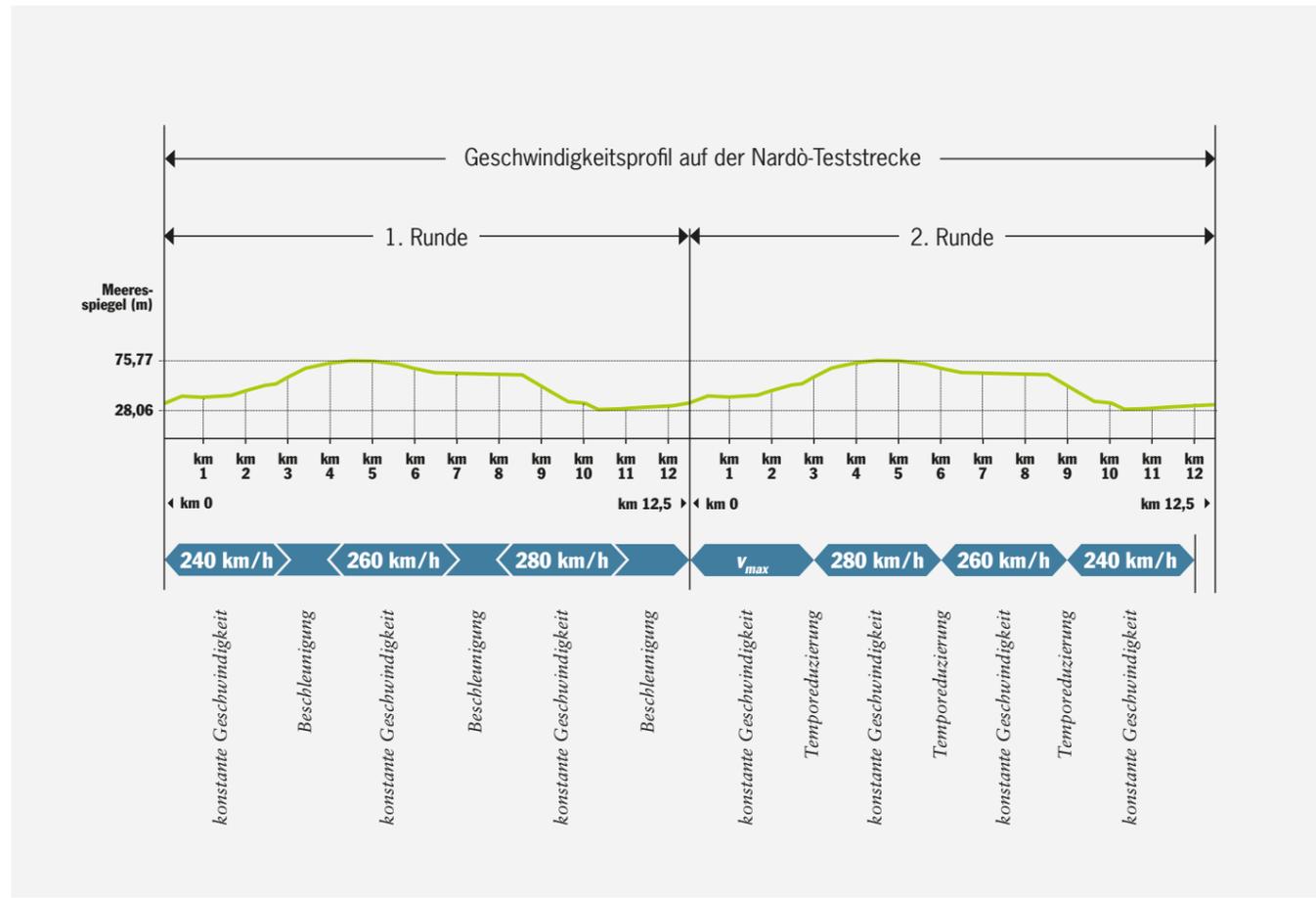
1600 Kilometer lange Anreise als auch die Rückreise absolvierten beide Fahrzeuge auf eigener Achse, um mit einem Langzeit-Datenlogging die Robustheit des Messsystems nachzuweisen.

Die Messungen im Nardò Technical Center von Porsche Engineering liefen im Rahmen eines umfangreichen Versuchsprogramms ab. Beide Versuchsfahrzeuge waren mit direkteinspritzenden Sechszylinder-Boxer-Saugmotoren in zwei unterschiedlichen Leistungsstufen ausgerüstet. Bei den zu untersuchenden Auslassventilen handelte es sich um Hohlchaftventile mit Natriumfüllung.

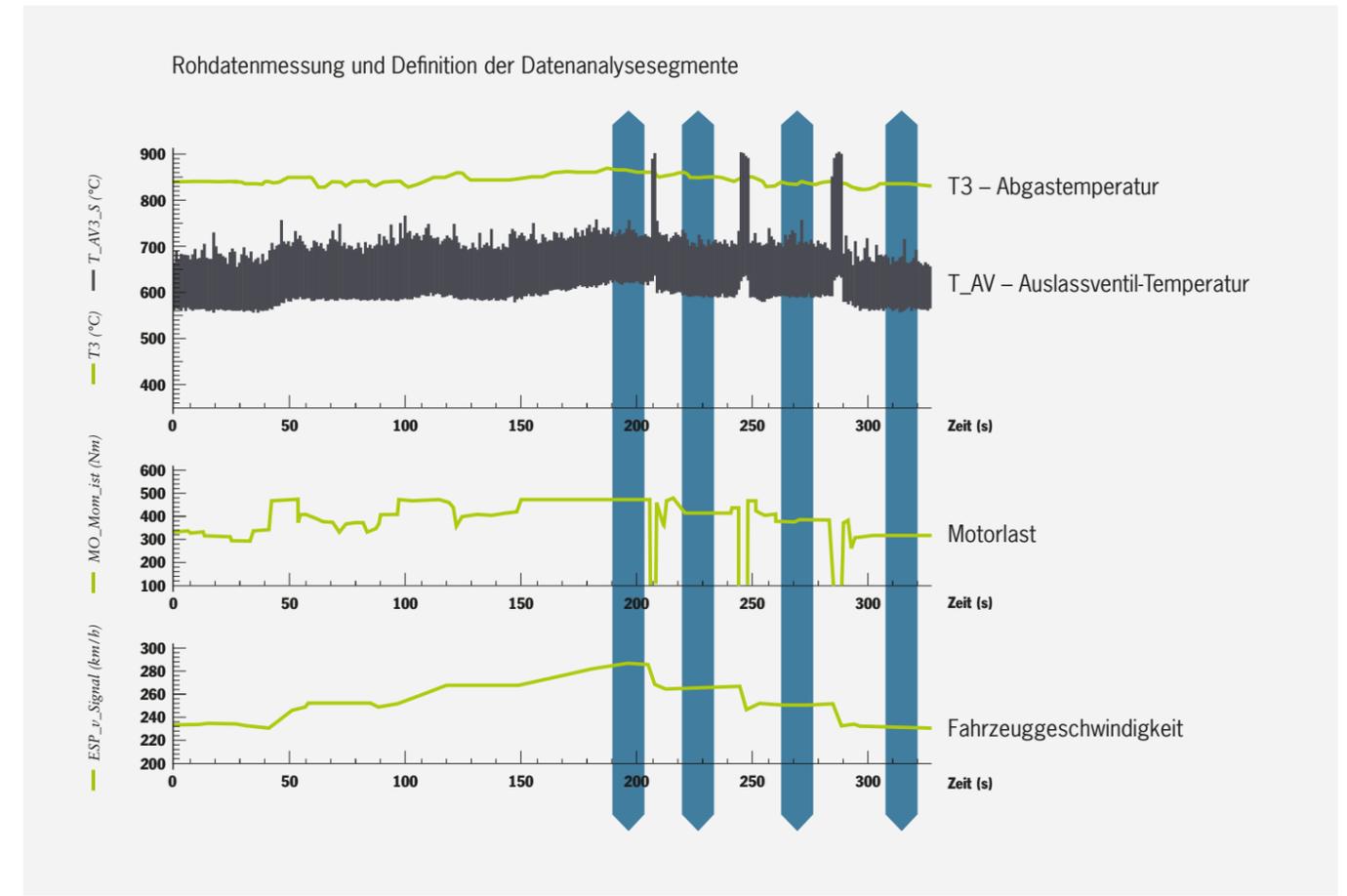
Variiert wurden die Kraftstoffsorte, das Fahrprofil, der Sensor sowie abwechselnd die Applikationswerte für Zündwinkel, Lambda, Abgasgegendruck >



Ventilhub und Ventiltemperatur bei 7000/min in der Vollast



Fahrgeschwindigkeitsprofil auf der Rundstrecke in Nardò



Einzelmessung und Definition der statistischen Auswertebereiche, bezogen auf eine Strecke von 1 km

und Kühlmitteltemperatur. Schon der Umfang dieser Versuchsmatrix zeigt, welches Potenzial zur Datengewinnung in dieser Messtechnik steckt.

### Die Resultate

Allein schon Auszüge aus den Ergebnissen vermitteln einen Eindruck von den Fähigkeiten des Messsystems. Ein Beispiel ist das hoch aufgelöste Temperatursignal. Die Abbildung auf Seite 43 zeigt einen Lastpunkt bei 7000/min in der Vollast, jedoch noch nicht in Beharrung. Simultan zur Temperatur ist der Hub dieses Ventils dargestellt.

Erkennbar sind extrem hohe Temperaturgradienten, die nur mit masselosen

Messverfahren sichtbar werden. Die Interpretation dieser Temperaturverläufe ist allerdings nicht einfach. Die Kurve der lokal gemessenen Ventiltemperatur ist als Überlagerung von mindestens vier verschiedenen Effekten zu sehen:

- Aufheizen durch ausströmendes Abgas unter hohem Druck aus dem Brennraum (in der Abbildung auf Seite 43 Punkt A),
- scheinbare Abkühlung durch Bewegung des Messflecks in Richtung des kälteren Ventilschafts (B),
- Expansionseffekte und Gasdruckschwingungen im Auslasskanal (C),
- Abkühlung durch Wärmeübertragung von der Oberfläche ins Innere des Ventils, den Ventilsitz und die Ventilfehrung (D).

Als weiterer Effekt kommt gegebenenfalls ein Temperatur- und -abstieg durch Überfahren des heißesten Punktes am Ventil hinzu (E).

Zur Auswertung der Versuchsmatrix wurden die Datenmengen durch statistische Auswertungen von Mittel- und Maximalwerten stark komprimiert. Ein einheitliches Fahrprofil (Abbildung oben) stellte direkt vergleichbare Ergebnisse sicher. Für die statistischen Auswertungen zogen die Ingenieure jeweils eine Strecke von einem Kilometer der zweiten Messrunde heran (Abbildung rechte Seite).

Unter Last wurde bei dieser Versuchsreihe eine höchste gemessene Auslassventiltemperatur ( $T_{AV}$ ) von 805,6 °C

gemessen. Diese trat mit dem Schlechtkraftstoff in Verbindung mit einer leichten Applikationsänderung auf. Die höchste gemessene Abgastemperatur ( $T_3$ ) von 893,8 °C wurde über einen konventionellen Thermofühler beim Einsatz von Super Plus 100 in Verbindung mit einer leichten Applikationsänderung – einer Gemischabmagerung – ermittelt. Die insgesamt höchsten Auslassventiltemperaturen traten im befeuertem Schub auf. Hier ließen sich mit dem neuen trägheitslosen Messsystem Werte von über 900 Grad Celsius ablesen, dem für diese Versuchsreihe gewählten oberen Temperaturende der Sensorkalibrierung.

### Zusammenfassung

Für die Entwicklung noch effizienterer und robuster Motoren hat Porsche Engineering mit der neuen Messmethodik ein wertvolles Werkzeug geschaffen. Die Messergebnisse liegen unmittelbar während des Versuchs vor und der Effekt von Abhilfemaßnahmen kann im direkten Vorher-Nachher-Vergleich dargestellt werden. Dadurch verkürzen sich Entwicklungs- und Versuchszeiten signifikant.

Als weiterer Vorteil erschließt die berührungslose Messmethode zusätzliche Möglichkeiten zur  $CO_2$ - und Kraftstoffeinsparung, indem die thermomechanischen Grenzen der Ventile besser ausgeschöpft werden können.

Die Robustheit und Zuverlässigkeit des Messsystems hat sich bereits über eine Gesamteinsatzdauer von über 25 000 störungsfreien Kilometern bewiesen. Anfang 2014 wurde das Verfahren darüber hinaus erstmals erfolgreich bei der Temperaturmessung am Turbinenrad eines VTG-Laders angewandt. Als Weiterentwicklung kam dabei ein wassergekühlter Infrarotsensor zum Einsatz. ■