



Automotive Engineering Partners, 4-2001

Modul-Prüfstände für die Entwicklung von Verbrennungsmotoren – ein Konzeptvergleich

Schnellere Modellzyklen und zunehmende Komplexität der modernen Verbrennungsmotoren haben dazu geführt, dass wesentliche Arbeiten auf dem Gebiet der Motorenentwicklung von externen Dienstleistern bearbeitet werden. Dieser Beitrag von ElringKlinger behandelt Konzeptüberlegungen für die Einrichtung von Prüffeldern, die durch die Schnellebigkeit und unterschiedliche Anforderungen der Kunden besonders hohen Anforderungen genügen müssen.



Ansicht eines Motorprüfstands als Schnellbaukabine

In den letzten Jahren hat dieser Markt eine zunehmende Bedeutung erlangt. Im Bereich Powertrain Engineering werden inzwischen europaweit geschätzte 1300 Millionen Euro umgesetzt - etwa 25 Prozent davon entfallen auf reine Prüfläufe.

Prüfläufe können je nach Anwendungsfall völlig unterschiedlich angelegt sein. Man unterscheidet

- vollautomatisch gefahrene Dauerläufe zur mechanischen Belastungsprüfung
- Funktionsläufe zum Testen von neuen Motoranbauteilen
- Entwicklungsläufe (Brennverfahren, Mechanik, Tribologie, Motormanagement-Applikation).

Im Zuge der schnellen Entwicklungszeiten in der Automobilindustrie und der gleichzeitig immer weiter steigenden Anforderungen an die Motorenentwicklung müssen auch die Prüfeinrichtungen mit der Entwicklung Schritt halten. An die Systeme zur Leistungsaufnahme, an Prüfstandsleitreechner, an die Messtechnik und an die Systeme zur Datenaufbereitung werden zunehmend höhere Anforderungen gestellt. Mehr und mehr Entwicklungsaufgaben müssen in möglichst kurzer Zeit abgewickelt werden und das bei höchstmöglicher Flexibilität in der Projektabwicklung und der Messmittelbereitstellung.

Dienstleister, die für die OEMs entsprechende Prüfkapazitäten bereit halten, müssen im Allgemeinen höchst flexibel auf unterschiedlichste Prüflaufanforderungen reagieren können. Auch wenn es wünschenswert wäre, harmonisierte Testprozeduren zu haben, so sieht die Realität derzeit anders aus. Jeder Automobilkonzern spezifiziert seine eigenen Tests. Gerade bei Neuinvestitionen in ein neues Prüffeld sind daher entsprechende Konzeptüberlegungen zwingend erforderlich. Sie sind Gegenstand dieses Beitrags.

Klassifizierung von Motorprüfständen

Unter dem Blickwinkel eines wirtschaftlichen Betriebs muss ein Motorprüfstand, besonders wenn ein Dienstleister ihn betreibt, möglichst universell einsetzbar sein. Dies bezieht sich zunächst auf seine bauliche Konzeption. Hier wurden drei Möglichkeiten näher betrachtet:

- die feste, gemauerte Prüfwelle
- die Prüfwelle aus Schnellbau-Wandelementen
- der Modulprüfstand in Containerbauweise.

Ein konventioneller Motorprüfstand in Festbauweise (Konzept 1) zeichnet sich durch eine hohe Freiheit in der Raumgestaltung aus - er kann bei der Bauplanung entsprechend den Betreiberwünschen im Grundriss angepasst werden. Die Prüfwelle aus Schnellbau-Wandelementen (Konzept 2) hat prinzipiell dieselben Möglichkeiten der flexiblen Grundrissgestaltung. Zusätzliche Vorteile bietet dieses Konzept aber bei den Gesteuerungskosten, der Aufbauzeit und bei eventuellen späteren baulichen Änderungen. Nach wie vor hat die Schnellbauwelle jedoch Nachteile, wie sie auch der festgemauerte Prüfstand besitzt:

- eine Prüffelderweiterung erfordert ein "Aufschneiden" der zentralen Versorgungskreise.
- Bei einer Standortverlagerung: werden die Prüfwellelemente zerlegt, Wand- und Bodeninstallationen müssen demontiert werden.

Demgegenüber hat das Konzept des Modulprüfstands nur den Nachteil der eingeschränkten Grundrissgestaltungsmöglichkeit: Er kann zwar in der Größe an den Bedarf des Kunden angepasst werden, wird aber immer auf einem quadratischen Grundriss basieren. Ansonsten ist der modulare Prüfstand in allen Punkten den Konzepten 1 und 2 gleichwertig oder überlegen.

Die Tabelle unten zeigt eine Bewertungsmatrix der unterschiedlichen Prüfstands-Bauweisen, aus der der Modulprüfstand als das eindeutig günstigste Konzept hervorgeht. Im Folgenden soll deshalb auf die messtechnische Ausstattung dieses Konzepts und auf die mittlerweile 18-monatige Betriebserfahrung näher eingegangen werden.

KRITERIUM		KONZEPT 1		KONZEPT 2		KONZEPT 3	
		Gemauerte Prüfkabine		Schnellbau-Prüfkabine		Modularprüfstand	
1	Integration in ein Prüffeld	Festes Gebäude erforderlich	-	Festes Gebäude erforderlich	-	Freie Aufstellung möglich	+
2	Versorgungskreise	Zentrale Installation Platzintensiv	-	Zentrale Installation Platzintensiv	-	Autarke Versorgung jedes Prüfstandes	++
3	Abgasführung	Zentrale Installation	-	Zentrale Installation	-	Zentrale Installation	-
4	Brandschutzeinrichtung	Zentral oder autark		Zentral oder autark		Zentral oder autark	
5	Brandmeldung	Zentral		Zentral		Zentral	
6	Realisierungszeit	mindestens 1 Jahr		mindestens 1 Jahr		typisch 5 - 6 Monate	
7	Installationszeit vor Ort	siehe Punkt 6	--	siehe Punkt 6		2 - 3 Wochen	++
8	Inbetriebnahmezeit	1 Monat	--	1 Monat	-	1 Monat	++
9	Störung des laufenden Betriebes bei Inbetriebnahme	Erheblich	--	Erheblich	--	Sehr gering	++
10	Flexibilität bezüglich Standortverlegung	Keine Flexibilität	--	Ungünstig	-	Sehr gut	++
11	Flexibilität bezüglich Raumgestaltung	Sehr gut in der Planungsphase	++	Gut	+	Eingeschränkt	-
12	Zugänglichkeit des Prüflings	sehr gut	++	eingeschränkt (erhöhter Aufbau)	-	sehr gut	++
13	Kosten	100%	-	75%	++	80%	+
Klassifizierung von konstruktiv unterschiedlichen Motorprüfstandskonzepten							

Festprüfstand und Schnellbauzelle sind für die Hallenaufstellung konzipiert und benötigen somit ein Festgebäude, in das sie integriert werden. Die anteiligen Kosten für ein Festgebäude sind in den in der Tabelle gemachten Angaben noch nicht enthalten und wurden nicht mit bewertet. Wäre dies erfolgt, so wäre der preisliche Vorteil des Modulprüfstands noch deutlicher ausgefallen. Der Modulprüfstand benötigt kein Festgebäude. Mehrere Prüfstände werden als Kompletต์module geliefert und zu einem fertigen Gebäude zusammengesetzt. Der Modulprüfstand verbindet Prüfraum und Messraum inklusive aller Versorgungs-, Mess- und Regeleinheiten zu einem Modul, das komplett vorgefertigt und vom Hersteller ausgetestet angeliefert werden kann. Auf Grund der Tatsache, dass für frühere Ausführungen sogenannte "Eurocontainer" als Außenschale verwendet wurden, die strukturelle Nachteile und viel zu enge Innenmaße auswiesen, wird für dieses Konzept noch heute der Begriff "Containerprüfstand" zu Unrecht in einer abwertenden Bedeutung verwendet. Tatsache ist, dass inzwischen alle Hersteller derartige Modulprüfstände in unterschiedlichen, auf die Bedürfnisse des Kunden zugeschnittenen Maßen anbieten. Grundmaße von bis zu 12m Länge und 5m Breite sind möglich und werden zur Zeit auch ausgeführt.

Ansonsten ist das Konzept sehr positiv zu bewerten. Abgesehen von der Abgasabsaugung, die gemäß den gesetzlichen Vorschriften als Prüffeld-Gesamtanlage ausgeführt wird, ist der Modulprüfstand mit völlig autark arbeitenden Systemen ausgestattet, die eine wechselseitige Beeinflussung ausschließen. Er kann komplett vorgefertigt, in allen Funktionen ausgetestet und abgenommen und mittels eines Schwerlastkrans voll funktionsfähig auf ein vorbereitetes Fundament aufgestellt werden. Zur Anbindung an das bestehende Prüffeld müssen lediglich die Versorgungsleitungen für Kraftstoff, Elektrizität, Pressluft, die Wasser-Befüllleitungen sowie die Abgasabsaugung angeschlossen werden. Die Bauzeit eines Modulprüfstands beträgt typischerweise fünf bis sechs Monate, die Inbetriebnahme ist in zwei bis drei Wochen abgeschlossen.

Grundkonstruktion eines Modulprüfstands

Das Bild unten zeigt die Aufrisszeichnung einer Standard-Prüfzelle mit den Grundmaßen 12m x 3,5m. Gut zu erkennen ist der T-förmige, luftgefederte Grundrahmen, der im Doppelboden versenkt angeordnet ist und der die Schnellwechsepalette mit dem Versuchsmotor und die Belastungseinheit trägt. Die Luftfederung des Grundrahmens kann mit einer Grenzfrequenz von 2,7 bis 3,5 Hz sehr weich abgestimmt werden, so dass eine Übertragung von Vibrationen auf die Zellenstruktur ausgeschlossen ist. Die Innenauskleidung des Prüfraums besteht aus schallgedämmten Lochblechen, die die Schallabstrahlung nach außen minimieren. Wand-, Tür- und Fensterkonstruktionen entsprechen der F30- bzw. T30-Norm und sind damit 30 min feuerresistent. Die Schallabsorptionsfähigkeit der Zelle wird mit > 36 dB angegeben. Der Modulprüfstand ist mit einem Kran mit einer Tragfähigkeit von 1250 kg ausgestattet.

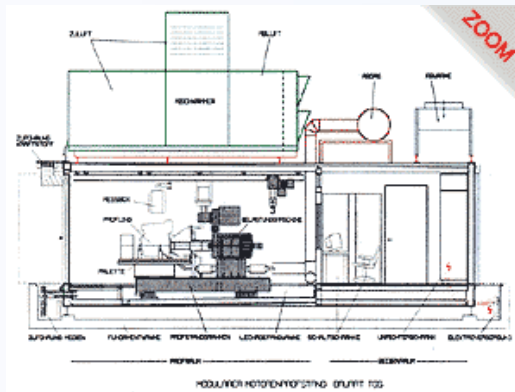


Prüffeld aus mehreren Modulprüfständen, die zu einem Gebäude zusammengesetzt wurden

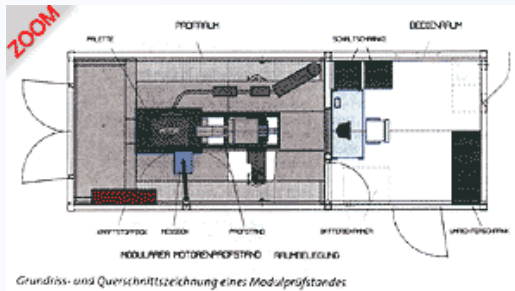
Des Weiteren ist die Anordnung der wichtigsten Komponenten zu erkennen. Die messtechnische Verkabelung des Motors erfolgt über eine Koppelstation, die so genannte Messbox, die an einem Gelenkarm schwenkbar aufgehängt ist und

- alle Temperaturumsetzer
- alle Druckumformer
- Umformer für Sonderkanäle
- Zündwinkeltester
- Lambda-Auswerteeinheit
- Einzelkanal-Trennverstärker enthält.

Die Signale werden konventionell oder über ein Bussystem an die Prüfstandsautomatisierung in der Messwarte übertragen.



Die Prüfstandsautomatisierung ist zusammen mit der Niederspannungs-Unterverteilung platzsparend in zwei Schaltschrankeinheiten untergebracht. Die Messwarte enthält außerdem noch den IGBT-Umrichterschrank der Asynchronmaschine. Er ist schallgedämmt und außenluftgekühlt, so dass die Prüfstandsmannschaft keiner Geräuschbelastung ausgesetzt ist.



Die Lüftungseinheit wurde auf dem Dach des Modulprüfstandes positioniert und ist für einen Durchsatz von 24.000 m³/h ausgelegt. Sie ist mit einer temperaturgeführten Umluftregelung ausgestattet. Für höhere Anforderungen kann sie um ein zusätzliches Kühlregister erweitert werden, das auch in Sommermonaten eine absolute Konditionierung der Motorfrischluft gewährleistet.

Zusätzlich befindet sich auf dem Dach der Luft/Wasser-Wärmetauscher für die Kühlung des Motorkühlwasserkreislaufes. Der

Wärmetauscher arbeitet aus Schallschutzgründen mit besonders langsam laufenden Ventilatoren.

Die Abgasabsaugung erfolgt auslegungsgemäß im Verhältnis 3:1 (3 Teile Luft: 1 Teil Abgas) über einen zentralen Abgasabsaugventilator für alle Prüfstände. Im Brandfall oder bei Stillstand eines Prüfstandes wird das Abgasabsaugrohr automatisch abgesperrt. Alle sonstigen Versorgungs-, Grundriss- und Querschnittszeichnung eines Modulprüfstandes

Regel- und Steuerkomponenten sind im Unterboden des Prüfstandes integriert. Dadurch konnten zugunsten des nutzbaren Raumes die Wandflächen glattflächig gestaltet werden. Die Bodenwanne des Doppelbodens ist gleichzeitig Auffangwanne für Leckflüssigkeiten, die bei einem größeren Schaden nicht von der Leckagefangwanne der Motorpalette zurückgehalten werden können.

Regel- und steuerungstechnische Ausstattung Prüfstandsregelkreise

Aufgrund der vielen Mess- und Konditionierungsaufgaben rund um den Versuchsträger wurde bereits in der Planungsphase festgelegt, dass nur Softwareregler eingesetzt werden, die alle in einen Steuerrechner zu integrieren sind. Folgende Regelkreise sind im Einsatz:

- Kraftstofftemperatur-Konditionierung über zwei Mischventile und einen Heizwasser- und einen Kühlwasser-Wärmetauscher.
- Ladelufttemperaturregelung über einen Luft/Wasser-Wärmetauscher mit wasserseitigem 3-WegeRegelventil.
- Ölkonditionierung über einen Öl/ Wasser-Wärmetauscher mit zwei wasserseitigen Regelventilen.
- Kühlwasserthermostatisierung.
- Lufttemperaturregelung über die Umluftklappenführung der Lüftungsanlage.
- Druckregelung im Prüfraum über ein reglergeführtes Luftklappensystem.

Alle Regler sind als PID-Regler (zum Teil auch mit Modellsimulation) ausgeführt. Die Anpassungen der Regelparameter können direkt am Rechnerbildschirm von der Messwarte aus bei laufendem Motor- betrieb vorgenommen werden. Die Linienschreiberfunktion des Steuerrechners erleichtert die Regelkreisabstimmung und die Überprüfung der Regelkreise bei laufendem Betrieb.

Besonders hervorzuheben ist die konstruktive Ausführung der Kraftstoffkonditionierung. Maßgeblichen positiven Einfluss auf die Güte einer Kraftstoffverbrauchsmessung haben insbesondere Maßnahmen zur exakten Temperaturregelung und zur Vermeidung von Pulsationen in der Kraftstoffleitung.

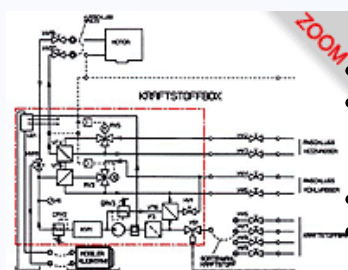
Ersteres wurde durch einen Aufbau entsprechend der Abbildung rechts erreicht. Heizwasserkreislauf (40 °C) und Kühlwasserkreislauf (15 °C) halten über einen 2-Punktregler die Temperatur auf + 1 °C konstant.

Heiz- und Kühlwärmetauscher sind sehr motornah angebracht. Die Mischventile wurden als schnelle Stellventile ausgeführt und arbeiten mit einer Auflösung von 1: 1000 und einer Stellzeit für den vollen Ventilhub von etwa 1s. Mit diesem Aufbau werden Temperaturschwankungsbreiten von nur + 0,2 °C eingehalten.

Pulsationen im Kraftstoffsystem werden durch eine nach der Förderpumpe angeordnete Druckminderungs/ Druckdämpfungseinheit eliminiert. Des Weiteren sind alle Kraftstoffleitungen als feste Leitungen gestaltet; der Anschluss zum Motor besteht aus einem Stück flexibler Schlauchleitung von nur 50 cm Länge.

Prüfstandsautomatisierung

Die Automatisierung vom Typ TGS/Autotest 2000 wurde standardmäßig mit 16 Druck- und 30 Temperaturmesskanälen ausgestattet. Sie besitzt außerdem Messeingänge für eine Kraftstoffverbrauchs-Messeinrichtung sowie für Drehzahl-, Drehmoment- und Rauchgasmessung. Zusätzliche Messgeräte wie Luftmassenmesser, Blow-By-Messung, Lambdamessung, Abgasanalyse etc. können über 20 frei konfigurierbare Sondermesskanäle eingebunden werden.



Aufbau der Kraftstoffkonditionierung

Die Automatisierung besitzt

- einen Formeleditor
- einen Programmierer mit der Möglichkeit der Schleifenprogrammierung (bis zu 1.500 Betriebspunkte pro Testzyklus)
- einen Post-Mortem-Speicher
- Warn- und Abschaltgrenzen, frei programmierbar für jede Mess- und Rechengröße

und ist damit auf dem neuesten Stand der Technik. Als Rechner wird ein 2-Prozessorsystem eingesetzt.

Erwähnenswert ist die Möglichkeit, mithilfe des Programmierers instationäre Fahrzyklen in Sekundenschritten zu programmieren. Mit der integrierten SME-Funktion (Schnelle MessdatenErfassung) kann ein instationärer Fahrzyklus in 0,2-s-Schritten aufgezeichnet und am Bildschirm mittels der Linienschreiberfunktion sichtbar gemacht werden. Durch ein Zusatzprogramm lassen sich instationäre Fahrzyklen wie der MVEG- oder der FTP75-Zyklus im Excel-Format einlesen.

Messtechnische Ausstattung

Die messtechnische Ausstattung eines Motorprüfstands hängt von seiner Verwendung ab. Diese Aussage gilt jedoch nicht nur für die Sondermesstechnik sondern gleichermaßen für die Grundausrüstung.

Aufgabe des Planers muss es sein, aus der Tabelle eine Ausstattung auszuwählen, die bei vertretbarem Invest möglichst viele Anwendungen abdeckt, um den Prüfstand möglichst flexibel einsetzen zu können.

Als Grundausrüstung wurde für alle Prüfstände des betrachteten neuen Prüffeldes eine Asynchronmaschine mit einer Leistung von 200 kW sowie eine Prüfstandsautomatisierung mit vollautomatischen Steuerungsfunktionen ausgewählt. Des Weiteren wurde eine Abgasanalyseanlage an zwei Prüfständen installiert (zwischen zwei Prüfständen umschaltbar). Geräte zur Motormanagement-Applikation und zur Brennraumdruckindizierung werden als mobile Einzelgeräte eingesetzt. Mit dieser Ausstattung wird dem Bedarf der Kunden in den Bereichen Brennverfahrensentwicklung, Mechanikerprobung, Tribologie und

Reibungsuntersuchungen Rechnung getragen. Die Ausstattung bei Einsatz des Prüfstandes als Entwicklungsprüfstand ist im Bild auf Seite 66 oben dargestellt.

Einer der Prüfstände des Prüffelds ist zudem mit einer Thermoschockanlage ausgestattet, um Schockversuche in Verbindung mit geschlepptem Motorbetrieb realisieren zu können. Im Zuge der Harmonisierung von Testspezifikationen innerhalb weltweit operierender Automobilkonzerne werden von den Kunden zunehmend solche kombinierten Tests nachgefragt.

Versuche im instationären Motorbetrieb sind prinzipiell auf allen Prüfständen des neuen Prüffelds möglich. Es muss jedoch zusätzlich der zugehörige instationäre Zyklusrechner in die Automatisierung eingebunden werden. Dieses Softwareprogramm übernimmt die Programmierung der Einzelfahrzustände in 1-Sekundenschritten. Damit wird die Konfigurierarbeit vor Beginn des Prüfstandeinsatzes wesentlich reduziert.

Die verwendeten, luftgekühlten Asynchronmaschinen vom Typ Schorch genügen im Übrigen für die Durchführung von MVEG- oder FTP75-Tests völlig. Ihre Anregelzeiten sind in Verbindung mit den eingesetzten, modernen IGBT-Umrichtern mit 2,0 ms ausreichend schnell und reichen an die Performance eines hochdynamischen Prüfstands heran.

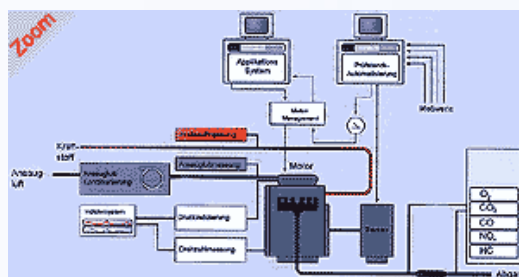
Zusammenfassung

Die ElringKlinger Motortechnik GmbH hat im Jahr 1999 ihr vorhandenes Prüffeld um fünf Modulprüfstände erweitert. Sie entschied sich nach intensiver Prüfung der funktionellen und wirtschaftlichen Vorteile für dieses Konzept.

Die wesentlichen Kriterien für die Beurteilung verschiedener Prüfstandsvarianten sind in der vorliegenden Veröffentlichung dargestellt. Aus dem Vergleich

- festgemauerte Prüfzelle
- Prüfzelle aus Schnellbauelementen
- Modul-Prüfstand

ging der Modulprüfstand eindeutig als erste Wahl hervor, insbesondere deshalb, weil er bei niedrigem Invest die für einen Dienstleister auf dem Gebiet des Motor-Testings notwendige Flexibilität aufweist. Zudem kann der Neubau eines Prüffelds bei diesem Konzept nahezu ohne Beeinträchtigung des Prüfbetriebs an den bereits vorhandenen Prüfständen vorstatten gehen.



Ausstattung bei Einsatz des Prüfstands als Entwicklungsprüfstand

Konstruktive Nachteile der Modulprüfstände konnten während des nunmehr ein- und einhalbjährigen Betriebs nicht festgestellt werden. Das Konzept erlaubt eine weitgehend flexible regelungstechnische und messtechnische Ausstattung des neuen Prüffelds. Grundsätzlich gibt es zwar keine Ausstattung, mit der alle möglicherweise anfallenden Messaufgaben abgearbeitet werden können. Trotzdem kann eine Analyse der anstehenden Einsatzfälle Aufschluss darüber geben, welche Komponenten in die

Standardausrüstung eines Prüfstands übernommen werden und welche mobil von Fall zu Fall am Prüfstand adaptiert werden sollten. Eine solche Analyse ist vor allem vor dem Hintergrund der erheblichen Investsummen unerlässlich.

Ausblick

Das derzeit aus fünf Modulprüfständen bestehende Prüffeld wurde im 4. Quartal 2000 um weitere zwei Prüfstände erweitert. Einer der Erweiterungsprüfstände ist als Kältekammer aufgebaut, um gezielte Motorkaltstartversuche bis zu $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ und Katalysatortests durchführen zu können. Um Fahrzeugabgasanlagen von großen V-Motoren unverändert vom Fahrzeug übernehmen zu können, wurde das Längsmaß des Kälteprüfstands um 3 m verlängert. Auf einem luftgefederten Langrahmen können Motor und Asynchronmaschine in diesem Prüfstand so weit auseinander gezogen werden, dass ein Versuchsaufbau mit langer Kardanwelle, der die

Verwendung einer originalen Fahrzeugabgasanlage überhaupt erst ermöglicht, realisiert werden kann.

Dieser Kälteprüfstand wurde bewusst als Maximalprüfstand konzipiert. Mit einer Bremsleistung von 400 kW und der Möglichkeit, instationäre Zyklen zu fahren, ist er dazu bestimmt, der ElringKlinger Motortechnik ein neues Marktsegment zu eröffnen. Hier werden zukünftig insbesondere Motormanagementapplikationsarbeiten speziell zum Thema Kaltstartoptimierung stattfinden.

Anwendung des Prüfstandes	Meßtechnische Ausstattung			
	vollautom. Steuerung	Instationärer Zyklusrechner	Abgasanalyse	Motormanagement Applikation
Brennverfahrensentwicklung	nein	nein	konv.	ja
Tribologie und Reibungsunters.	nein	nein	nein nein	
Mechanikerprobung	ja	nein	(konv.)	nein
Thermoschock	ja	nein	nein	nein
Kaltstartoptimierung	ja	ja	schnell	ja
Instationärentwicklung	ja	ja	schnell	ja
Anwendung des Prüfstandes	Meßtechnische Ausstattung			
	Asynchronmaschine	Brennraumdruck Indizierung	Partikelanalyse	Kälteanlage
Einsatzmöglichkeiten eines Motorprüfstands bei unterschiedlicher Ausstattung				

MODULARER
MOTORENPRÜFSTRND BAUART
TGS

Dr.-Ing. Gerald Eifler,
Geschäftsführer der ElringKlinger Motortechnik GmbH,
Idstein / Ts.

Dr.-Ing. Karlheinz Storck,
Leiter Technik der Technogerma Systems GmbH,
Darmstadt