

driven
by knowledge



Dipl. Ing. Michael Mandel¹, Dipl. Ing.
Thomas Schöfer¹, Dipl. Ing. Holger Bolz²

Moderne Abgasturboladerprüfstände im neuen Entwicklungszentrum von 3K-Warner

Veröffentlicht: Mai 2002

Academy



¹ 3K-Warner Turbosystems GmbH
Marnheimer Straße 85/87
67292 Kirchheimbolanden

² Kratzer Automation AG
Unterschleissheim

Moderne Abgasturboladerprüfstände im neuen Entwicklungszentrum von 3K-Warner

Verfasser:

Dipl.Ing. Michael Mandel , Dipl. Ing. Thomas Schöfer , 3K-Warner Turbosystems GmbH ,
Kirchheimbolanden

Dipl. Ing. Holger Bolz , Kratzer Automation , Unterschleißheim

Gliederung:

Referent : Dipl.Ing. M.Mandel , 3K-Warner Turbosystems GmbH

- Begrüßung
- Entwicklungszentrum
 - Gebäude
 - technische Ausstattung
 - Motorenprüfstände
 - Abgasturboladerprüfstände
- Anforderungen an moderne Abgasturboladerprüfstände (**Kernthema**)
 - Auslegungsziele
 - Aufgaben
 - Automatisierung
 - erforderlicher Betriebsbereich
 - Heißgaserzeuger
 - Druckluftversorgung
 - offenes Automatisierungssystem

Referent : Dipl. Ing. Holger Bolz , Kratzer Automation , Unterschleißheim

- Vorstellung Fa. Kratzer
 - Prüfsysteme & Automation für Automobil-Industrie & Zulieferer
 - Steuern & Optimieren in der Prozeßindustrie
 - Mobilität & Service / Logistikprozesse flexibel automatisieren
 - Brenntechnik und hydraulische Auslegung durch UTF
- Ausrüstung des 3K-Warner Prüffeldes mit PA-Tools
 - offenes Automatisierungssystem
 - Adaptionen an alle gängigen Mess- und Steuersysteme
- Prüfstände für Abgasturbolader (**Kernthema**)
 - Realisierung der Auslegungsziele 3K-Warner
 - Anlagentechnik
 - Regelungstechnik
 - Messtechnik
 - automatische Abläufe

Moderne Abgasturboladerprüfstände im neuen Entwicklungszentrum von BorgWarner Turbo Systems

Verfasser: Dipl.Ing. Michael Mandel , Dipl. Ing. Thomas Schöfer , 3K-Warner Turbosystems GmbH ,
Kirchheimbolanden/Pfalz

Zusammenfassung

Die Errichtung des Turbolader-Entwicklungszentrums der 3K-Warner Turbosystems GmbH in Kirchheimbolanden bot die Chance alle Testeinrichtungen auf dem neuesten Stand der Technik zu planen und umzusetzen. Während dabei die Motorenprüfstände keine besonderen Anforderungen an die Planung stellen und auf hohem Niveau vielfach am Markt angeboten werden, war es notwendig die Abgasturboladerprüfstände entsprechend den heutigen Anforderungen bezüglich hohem Automatisierungsgrad, zuverlässiger und genauer Messtechnik und moderner Datenverwaltungs- und Auswertesysteme völlig neu zu konzipieren. Borg Warner Turbosystems ist dadurch in der Lage sich den heutigen und zukünftigen Herausforderungen der Abgasturbolader-Technologie zu stellen.

Entwicklungszentrum

Im Rahmen der Standort-Konzentration der 3K-Warner Turbosystems-GmbH in Kirchheimbolanden/Pfalz wurde auch der Neubau eines Entwicklungszentrums mit hohen Investitionen in Angriff genommen.



Abbildung 1:
3K-Warner Entwicklungszentrum

In diesem neuen R&D Center von Borg Warner Turbo Systems ist die Produktentwicklung für „Nutzfahrzeuge Europa – und PkW-Turbolader“, sowie das „Advanced Engineering weltweit“ angesiedelt. Die Aktivitäten am Entwicklungsstandort Indianapolis/USA werden ebenfalls von hier aus koordiniert.

Die Versuchsabteilung, mit Motorenversuch, Abgasturboladerversuch, Akustik/Schwingungen/Messtechnik und Prüffelddatenverarbeitung, ist dabei Dienstleister für alle Produkt- und Entwicklungsbereiche.

Das neue Gebäude gliedert sich in zwei Teile.

Im ersten Teil sind Büroräume für das ingenieurtechnische Personal untergebracht. Die Räumlichkeiten sind ausgelegt für 120 Mitarbeiter. Dieser Teil ist seit Ende Januar bezogen.

Im zweiten Teil werden die Testeinrichtungen für die Turboladerentwicklung und Erprobung installiert. Die Inbetriebnahme der ersten Prüfstände ist für Mai 2000 geplant.

Das neue Gebäude hat eine Grundfläche von 5600 m² und ist 2-stöckig, im Bürobereich 3-stöckig konzipiert.

Zur technischen Ausrüstung des Entwicklungszentrums gehören in der 2. Ausbaustufe 2001 :

- 6 Motorenprüfstände, (davon 1 dynamischer Prüfstand)
Motoraufbau auf Schnellwechselsystemen
Leistungsstufen 80 – 500 KW
Dynamische Abgasmesstechnik
- Schleuderprüfstand für Verdichterräder
 $n_{\max} = 210.000 \text{ min}^{-1}$
- Pulsationsprüfstand für Bauteilschwingungsuntersuchungen
- Fahrzeugwerkstatt mit Hebebühnen und Kältekammer
bis -25°C
- Prüfstand für die Betriebsauswuchtung
- 5-Achsenfräsmaschine zur Fertigung von Prototyp-Verdichterrädern
und Turbinenrad-Wachsmodellen
- Messlabor für messtechnische Neu- und Weiterentwicklungen und zur
Betreuung aller Prüfstandseinrichtungen
- diverse kleinere Sonder-Versuchseinrichtungen
- 1 Prüfstand für mechanische Aufladegeräte
- 9 automatisierte , erdgasbetriebene Brennkammerprüfstände

Anforderungen an moderne Abgasturboladerprüfstände

Auslegungsziele

Die Ziele bei der Auslegung des Turboladerprüffeldes waren:

- Durchführung aller thermodynamischen und mechanischen Tests rund um den Abgasturbolader
- Abdeckung der gesamten Turboladerpalette vom Borg Warner Turbosystems
- Maximale Messgenauigkeit und Wiederholbarkeit der Tests
- Volle Automatisierung der Standard-Messaufgaben innerhalb des ersten Jahres nach der Inbetriebnahme

Das Prüffeld leistet die Durchführung von

- Verdichter- und Turbinen-Leistungstests in Form von Kennfeldmessungen

- Versuchen für die thermodynamische und strömungstechnische Entwicklung der Komponenten des Abgasturboladers
- mechanischen Untersuchungen
- Zuverlässigkeits-Audits in Form von zyklischen Dauerläufen
- Produkt-Audits für die Qualitätssicherung

Aufgaben des Abgasturboladerprüfstandes

Simulation der Motorumgebung

In der Entwicklungsphase eines Abgasturboladers werden alle notwendigen Tests zuerst unabhängig vom Motor am Abgasturboladerprüfstand durchgeführt. Der Prüfstand simuliert dabei den Motor durch

- Bereitstellung aller Strömungsleitungen vor und nach Verdichter und Turbine
- Versorgung der Turbine mit Heißgas bei unterschiedlichen Drücken, Temperaturen und Massenströmen
- Simulation des Strömungswiderstandes am Verdichteraustritt
- Ölversorgung der hydrodynamischen Gleitlagerung
- ggf. Wasserversorgung bei gekühlten Lagergehäusen oder Turbinengehäusen

Die Strömung im Verdichter- und Turbinenzulauf wird konditioniert und als Massenstrom gemessen. An den Systemgrenzen des Turboladers werden Drücke und Temperaturen erfaßt. Außerdem wird immer die Drehzahl des Rotors gemessen.

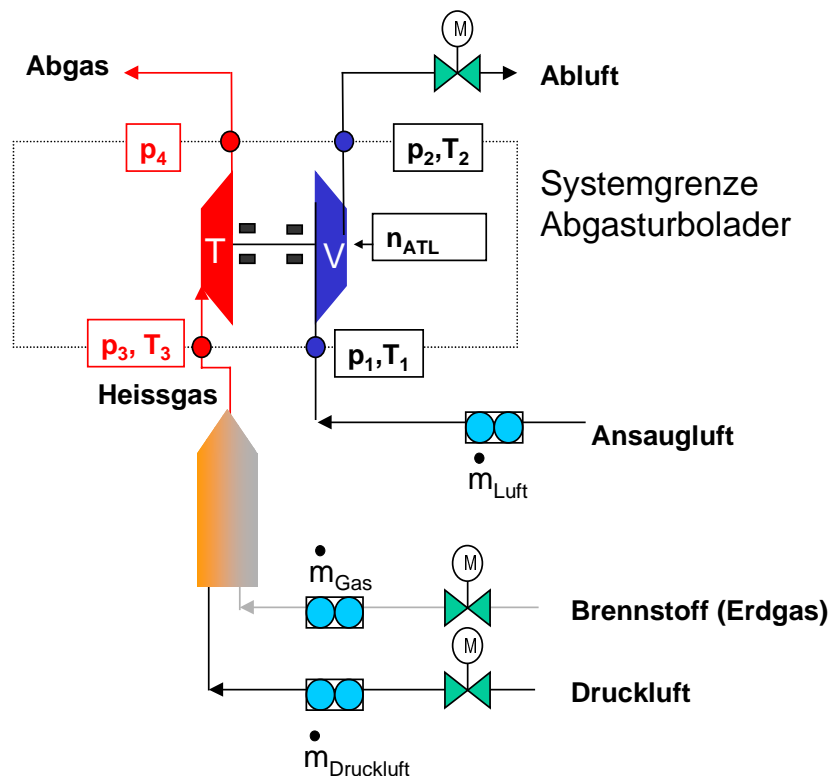


Abbildung 2: Messstellen am Abgasturbolader

Kennfeldmessung

Hauptaufgabe eines Abgasturboladerprüfstandes ist die **Erfassung des Durchsatz- und Wirkungsgradverhaltens** der im Abgasturbolader kombinierten Strömungsmaschinen

Verdichter und Turbine in Form von Kennlinien und Kennfeldern. Diese Kennfelder bilden zum einen die Beurteilungsgrundlage für die Komponentenentwicklung und dienen andererseits als Dokumentation der thermodynamischen Qualität unserer Produkte gegenüber den Kunden.

Diese Tests werden bei konstanter Turbineneintrittstemperatur und konstanten Ölbedingungen (Druck und Zulauftemperatur) durchgeführt.

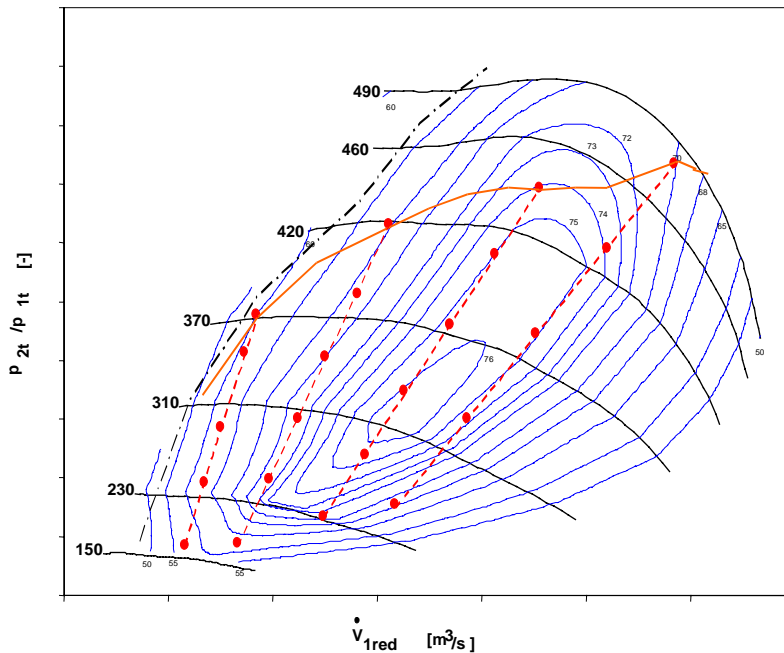


Abbildung 3 :
Betriebsbereich des Verdichters
Bei konstanten Betriebsbedingungen
 $T_3 = \text{const}$
 $p_{\text{Öl}} = \text{const}$
 $T_{\text{Öl}} = \text{const}$

Leistungsbereich in der motorischen
Anwendung

Drehzahl und Volumenstrom werden über dem gesamten messbaren Betriebsbereich des Verdichters bzw. der Turbine variiert um den für die spätere Anwendung nutzbaren Leistungsbereich zu definieren. An jedem Stützpunkt des Kennfeldes müssen dazu die Messdaten stationär erfaßt und die zugehörigen Wirkungsgrad-Informationen ausgewertet werden.

Mechanische Untersuchungen

- Typisch für den Prüfbetrieb sind auch **zyklische Dauerläufe** zur Untersuchung der Langzeit-Zuverlässigkeit der im Heissgasbetrieb bewegten Teile. Als Beispiel sei hier das ständige Auf- und Zufahren der Leitschaufeln einer "Variablen Turbinengeometrie" genannt, wobei die Abgastemperatur zwischen Umgebungstemperatur und Vollast-Betriebstemperatur innerhalb vorgegebener Zeitabläufe variiert wird.
- Daneben werden an diesen Prüfständen **Untersuchungen der Lagerung**, wie z.B. die Ermittlung der Tragfähigkeit des Axiallagers bei verschiedenen Ölkonditionen und Antriebsleistungen durchgeführt.
- An den, insbesondere im ottomotorischen Betrieb mit Abgastemperaturen über 1000°C, besonders thermisch belasteten Bauteilen werden **Bauteiltemperaturmessungen** vorgenommen.
- Bei **Schaufelschwingungsmessungen** mit am Turbinenrad und/oder Verdichterrad applizierten Dehnungs-Messstreifen wird die Laderdrehzahl gezielt so eingestellt, daß sich bei definierter Anregung (konstanter Turbinenmassenstrom, konstante Turbineneintrittstemperatur) an einer bestimmten Schaufel Resonanz einstellt. Die telemetrisch übertragenen Schwingungsamplituden geben Aufschluß über die Bauteilbeanspruchung und dienen als Verifikation für die Simulationsrechnung.
- **Öldichtheits- und Leckgasmessungen** zur Bestimmung in welchem Umfang und bei welchen Betriebszuständen Öl aus dem Lagergehäuse und verdichtete Luft in den

Ölbehälter (sog. BlowBy) gefördert wird gehören ebenfalls zum Leistungsspektrum eines Abgasturboladerprüfstandes.

Produkt-Audit

Im Rahmen der Qualitätssicherung muß insbesondere im Großseriengeschäft die thermodynamische Qualität des Aufladesystems durch regelmäßige Überprüfung vorgeschriebener Losmengen aus der Serienproduktion gewährleistet werden. Neben der Fähigkeit die thermodynamischen Leistungsdaten, wenn auch in reduzierter Form, zu ermitteln, müssen an einen solchen Prüfstand weitere Anforderungen gestellt werden wie z.B.:

- Reduzierung der Rüstzeiten durch Verwendung von Schnellspannvorrichtungen
- höhere Flexibilität bei der Adaption des Turboladers an den Prüfstand
 - Original Motor-Einbaustellung der Turbinen und Verdichter-Flansche
 - Abgasturbolader mit am TG angegossenem Krümmer
- Durchführung von Streubandmessungen
- Implementierung statistischer Auswertemethoden

Vorentwicklungsaufgaben

Die Motorprozeß- und Antriebsstrangsimulation gewinnt im Zuge der dramatisch reduzierten Entwicklungszeiten für das Fahrzeuggesamtsystem zunehmend an Bedeutung. Für die Modellbildung instationärer Beschleunigungsvorgänge bei denen die Turbine mehr (oder weniger) Leistung aufnimmt, als bei Kennfeldmessungen mit frei ansaugendem Verdichter dargestellt werden kann oder für die Simulation der Stossaufladung mit zweiflutigen Turbinen in der Nutzfahrzeuganwendung werden erweiterte Kennfelder benötigt. Ein Prüfstand wird deshalb in der Ausbaustufe 2 des Prüffeldes mit zusätzlicher Funktionalität ausgerüstet:

- Erweiterung des Betriebsbereiches der Turbine durch geschlossenen Verdichterkreislauf.
- 2 getrennt regelbare Heißgaserzeuger zur Versorgung der einzelnen Turbinenstränge.

Automatisierung

In Folge der europäischen Schadstoffgesetzgebung gewinnt der aufgeladene Verbrennungsmotor zunehmend an Bedeutung. Mit dem Ziel, für jeden individuellen Motor bezüglich

- thermodynamischem Verhalten
- Einbausituation
- Regelverhalten

den optimalen Abgasturbolader anzupassen, erhöht sich die Vielfalt der an den Prüfständen zu untersuchenden Komponenten. Dadurch rechtfertigt sich die Forderung nach einem hohen Automatisierungsgrad der an den Abgasturboladerprüfständen häufig anfallenden Messaufgaben bis hin zum mannslosen Betrieb der Anlagen, auch über Nacht (soweit dies die gesetzlichen Auflagen bezüglich Geräuschemission zulassen).

Am Beispiel der Kennfeldmessung sollen einige Aspekte der Automatisierung näher beleuchtet werden:

Für die Kennfeldmessung, d.h. die Erfassung von Drücken, Temperaturen, Massenströmen unter stationären Betriebsbedingungen, ist es besonders wichtig Regelalgorithmen zu implementieren um

- Laderdrehzahl
- Turbineneintrittstemperatur
- Verdichtermassenstrom
- Öldruck, Ölzulauftemperatur

in engen Grenzen konstant zu halten.

Die Betriebsgrenzen des Turboladers

- Pumpgrenze
- Schluckgrenze
- maximale Leistungsaufnahme des Verdichters bei der Turbinenkennfeldmessung müssen automatisch erkannt werden.

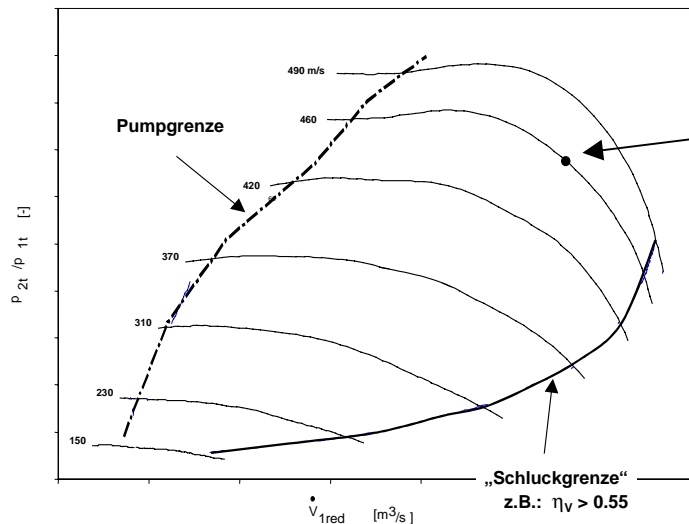


Abbildung 4 :
Automatische Kennfelderfassung

Betriebsbedingungen für einen Messpunkt

$T_3 = \text{const}$
 $p_{01} = \text{const}$
 $T_{01} = \text{const}$
 $u_{red} = \text{const}$
 $m_{Verdichter} = \text{const}$

Die Temperaturverteilung der Strömung vor und nach Verdichter, sowie vor Turbine wird ständig überwacht, da diese einen deutlichen Einfluß auf die Energiebilanz und damit auf die Wirkungsgradbestimmung ausübt.

Das Automatisierungssystem muß außerdem bei dieser stationären Messung durch Beobachtung der für die Wirkungsgradbestimmung maßgebenden Größen den Beharrungszustand erkennen, alle relevanten Daten strukturiert abspeichern und entsprechend dem vorgeschriebenen Versuchsablauf den nächsten Betriebspunkt anfahren. Während des Betriebes müssen kritische Messwerte mit variablen Warn- und Abschaltgrenzen überwacht werden.

Erforderlicher Betriebsbereich

In der Ausbaustufe 1 des Prüffeldes sind insgesamt 6 Prüfstände vorgesehen, wobei jeweils 2 davon identische Leistungsdaten besitzen. Diese Prüfstände decken den Bereich von sehr kleinen PKW-Turboladern mit 31 mm Turbinenraddurchmesser, wie er heute im 0,8 l, 30 kW -Dieselmotor des SMART eingebaut wird bis hin zu Abgasturboladern mit 112 mm Turbinenraddurchmesser für Generator- und Schiffsanwendungen mit 500 kW Motorleistung je Abgasturbolader. Die Auswertung der Prüfstandslaufzeiten der letzten 6 Jahre ergab, daß diese Baugrößenpalette die Prüfstände zu 98% belegen. Dieser Bereich läßt sich mit definierten Überlappungen in 3 Bereiche aufteilen, so daß sich für jede Prüfstandsbaugröße ein erforderlicher Regelbereich für den Turbinenmassenstrom von 25:1 ergibt.

Der kleinste Prüfstand, der den Bereich der Abgasturbolader für die PKW-Mittelklasse abdeckt, sollte gerade für die oben erwähnten Bauteiltemperaturbetrachtungen in der Lage sein, Abgastemperaturen über 1000°C zu erzeugen. Turbolader für Nutzfahrzeuganwendungen sollten auch bei höheren Abgasgedrücken bis 4.5 bar (und damit höheren Ladedrücken) untersucht werden können.

	Prüfstandsgröße:	1	2	3
Turbine	max Massenstrom	0.25 kg/s	0.5 kg/s	0.9 kg/s
	Regelbereich:	25:1	25:1	25:1
	Rad-Durchmesser	28-55 mm	50-76 mm	65-112 mm
	max Temperatur	1050 °C	1000 °C	750 °C
	max Druckverhältnis	5.	5.	5.
Verdichter	max Massenstrom	0.22 kg/s	0.45 kg/s	0.9 kg/s
	max Druckverhältnis	4.5	4.5	4.5
Erdgas	max Druck	8 bar (abs)	8 bar (abs)	8 bar (abs)

Tabelle 1 : Projektierte Leistungsmerkmale

Für die Untersuchung der Lagerung müssen Öldruck und –Temperatur in bestimmten Grenzen variierbar sein.

Die Wasserkreisläufe an den Prüfständen sollten so konzipiert sein, daß neben dem Einsatz von Kaltwasser zur Turbinengehäusekühlung, analog zur Seewasserkühlung von Turboladern im marinen Einsatz, auch die im PKW üblichen Kühlwassertemperaturen (90°) für die Lagergehäusekühlung geregelt bereitstehen.

Heißgaserzeuger

Als wesentliche Änderung gegenüber den alten Anlagen in Frankenthal mit dieselbefeueten Brennkammern, werden die neuen Heißgaserzeuger mit Erdgas betrieben, denn nur damit läßt sich der geforderte Betriebsbereich der Prüfstände ohne Umbau darstellen. Dies ist wiederum die Voraussetzung für einen mannlosen, automatisierten Betrieb. Außerdem entsteht bei der λ -geregelten Verbrennung von Erdgas, das zu ca. 98% aus Methan (CH₄) besteht, kein Ruß oder sonstige Partikel, welche die nach dem Brenner angeordneten Beruhigungsstrecken und die Turbine verschmutzen könnten. Weil dabei auch keine relevanten Emissionen entstehen, entfällt die im Falle der Dieselbefeuerung notwendige Abgasnachbehandlung.

Ein weiterer Nachteil des Dieselbetriebes ist die Neigung zu Temperaturschichtungen in der Brennkammer infolge einer pulsierenden Einspritzung bei der Verwendung herkömmlicher Stempelinspritzpumpen. Die dabei entstehenden „hot spots“ reduzieren die Lebensdauer des Brenners.

Als Nachteil der Erdgasbefeuerung muß man die deutlich höheren Sicherheitsanforderungen nennen, da zum Betrieb der Prüfstandsanlage der erforderliche Gasdruck immer größer sein muß, als der Druck der Verbrennungsluft. Diese Anforderungen werden jedoch durch eigensichere Systeme bei der Flammenüberwachung, durch hochsensible Schnellschlußventile, automatische Dichtheitsprüfungen und gebäudeseitig durch CH₄-Detektoren erfüllt.

Wir erwarten mit dem Umstieg auf Erdgas eine deutliche Reduktion der Wartungs- und Betriebskosten sowie eine deutliche Steigerung des Nutzungsgrades.

Druckluftversorgung

Ein Kernstück der technischen Ausrüstung des Prüfstandbereiches ist die Kompressorenstation, die die Brennkammerprüfstände mit der notwendigen Verbrennungsluft versorgt.

Vor allem wirtschaftliche Gesichtspunkte führen zu der Forderung alle Prüfstände aus einem gemeinsamen -Common-Rail- Speicher zu versorgen. Würde man jeden Prüfstand mit einem eigenen Kompressor versorgen, müßte man eine deutlich höhere Gesamt-Verdichter-

Kapazität vorhalten. Andererseits würde ein großer Teil der Kompressoren die meiste Zeit im Leerlauf oder unterem Teillastbetrieb und damit bei schlechtem Wirkungsgrad laufen. Bei der Auslegung der Kompressor-Leistung gingen wir von einem empirisch ermittelten Gleichzeitigkeitsfaktor von 0,5 aus; d.h. maximal 50% der gesamt installierten Prüfstandsleistung werden gleichzeitig angefordert.

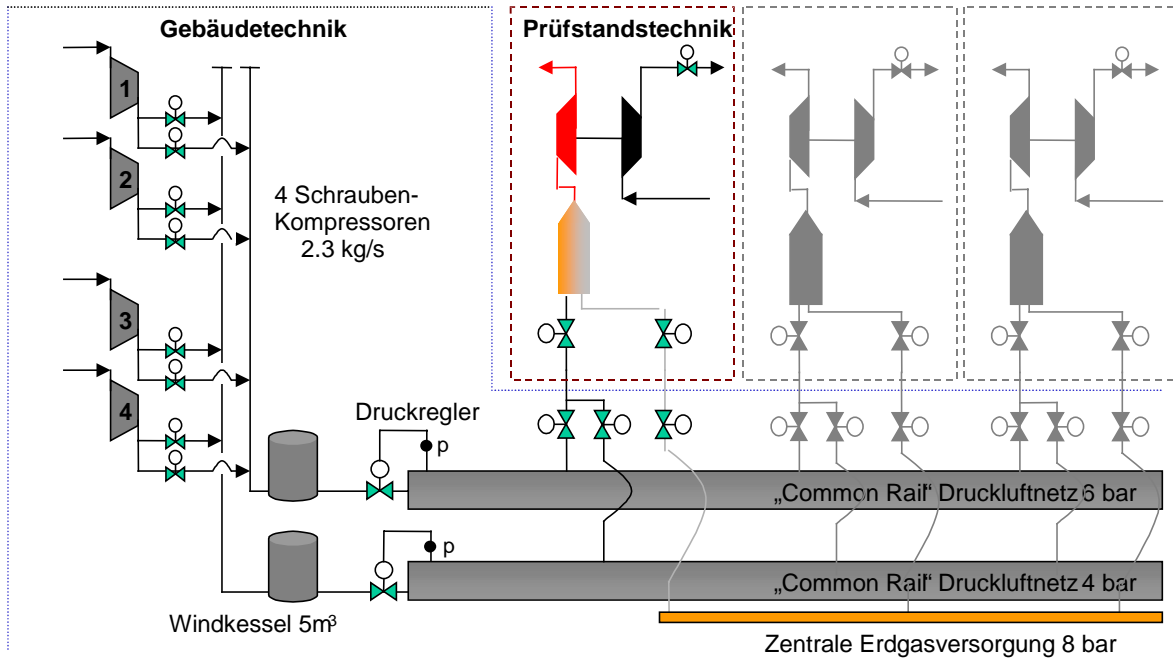


Abbildung 5 : Druckluftversorgung

Für thermodynamische Messaufgaben ist es bei dieser Konstellation unbedingt notwendig, daß eine gegenseitige Beeinflussung der Prüfstände durch Rückwirkungen im Druckluftnetz ausgeschlossen wird.

Maximal sind Druckschwankungen im Common-Rail von ± 10 mbar gegenüber dem Nenndruck zulässig.

Zur Versorgung aller Prüfstände, in der 2. Ausbaustufe sind dies 9 Brennkammer-Prüfstände, werden zwei Druckluftnetze, die auf unterschiedliche Druckniveaus (bis 4 bzw. 6 bar) geregelt werden können, installiert.

Aus wirtschaftlichen Gründen werden die standardisierten Messaufgaben aus dem Druckluftnetz mit einem niedrigen Druckniveau (4 bar-Netz) beschickt. Allerdings gibt es auch Messaufgaben, bei denen mit höherem Druck angefahren werden muß. Als Beispiel sei hier die Simulation des Motorbremsbetriebes mit einer Nutzfahrzeug VTG erwähnt; dabei werden Versuche mit bis zu 5 bar Gegendruck am Turbineneintritt gefahren.

Ein zweites Druckluftnetz hat auch den Vorteil, daß für Dauerläufe bei denen schnelle Durchsatzänderungen abverlangt werden, z.B. VTG-Vorleitschaufeln auf- zu in schnellen Wechsels, auf ein separates Netz zugegriffen werden kann, wobei hier Druckschwankungen durchaus zulässig sind. Gleichzeitig können aus dem ersten Netz thermodynamische Messaufgaben bedient werden, ohne Rückkopplung zu den anderen Prüfständen.

Zum Einsatz kommen für die erste Ausbaustufe insgesamt 4 Schraubenverdichter, davon können 2 je nach Schaltung die Grundlasten abdecken; 2 weitere Maschinen können drehzahl geregelt gefahren werden um die Forderung nach Druckkonstanz zu erfüllen.

Offenes Automatisierungssystem

Notwendig für uns als Betreiber der Prüfstandsanlagen war es auch, auf der Softwareseite ein flexibles, offenes Automatisierungssystem vorzufinden, das es uns erlaubt, zukünftig in Eigenregie neue Messaufgaben zu implementieren und zusätzliche Sonder-Messgeräte einzubinden.

Kalibrierdaten der eingesetzten Messgeräte werden im System abgelegt und bei der Auswertung berücksichtigt.

Daneben sollen die bei der Versuchsvorbereitung und der Versuchs-Turbolader-Montage gewonnenen Informationen

- Kontierungsinformationen
- Teilenummern
- Soll- und Ist-Hauptabmessungen der verwendeten Strömungskomponenten
- Spalte und Spiele
- Die angeforderte Messaufgabe und der Messumfang
- Beschreibung des Prüfstandsbaus (verwendete Messmittel und Adapter)

datenseitig angebunden werden.

Im Rahmen einer Betriebsdatenerfassung müssen projektbezogene Laufstunden, Ausfallzeiten und Ausfallursachen dokumentiert werden.

Die Integration des 3K-eigenen Softwaremoduls für die Online-Auswertung der thermodynamischen Kenngrößen des Abgasturboladers ist ein weiterer Baustein des offenen Automatisierungssystemes.

Literatur:

Pucher, Helmut, Prof.Dr.Ing.;; Eggert,Torsten, Dipl. Ing.; Schenk, Björn,Dr-Ing.
„Experimentelle Entwicklungswerkzeuge für Turbolader in Fahrzeugmotoren.“
6. Aufladetechnische Konferenz, Dresden 1997

Michael Y. Young ,David A. Penz
„The Design of a New Turbocharger Test Facility“
SAE Technical Paper Series 900176
International Congress and Exhibition, Detroit 1990

Prüfstände für Abgasturbolader

Verfasser: Dipl. Ing. Holger Bolz, Kratzer Automation AG, Unterschleißheim

Zusammenfassung

Die Anforderungen an automatisierte Abgasturboladerprüfstände sind vielseitig. Dies betrifft insbesondere die Anlagentechnik und die damit eng verbundene Automatisierungstechnik. Auslegungsziele, die durch 3K-Warner vorgegeben wurden, beinhalten eine Vielzahl von Problemstellungen. An Hand einiger Beispiele werden die Kernprobleme aufgezeigt und passende Lösungen beschrieben.

Auslegungsziele:

Nachfolgend werden noch einmal die wesentlichen Auslegungsziele genannt sowie die damit verbundenen Problemstellungen:

- Durchführung aller thermodynamischen und mechanischen Tests am Turbolader
 - Platz- und Auslegungsreserven für Sondermeßtechnik
 - belastungsfähige Anlagenkonstruktion
- Abdeckung der Produktpalette
 - große Stellbereiche der bestimmenden Medienströme (Heißgas und Verdichterabluft)
 - große Meßbereiche der eingesetzten Sensorik
- Meßgenauigkeit und Reproduzierbarkeit
 - Kalibrierung der wichtigsten Meßgrößen
 - Fehlerrechnung im Automatisierungssystem
- Automatisierung
 - Meßprinzipien zur Erfassung des gesamten Durchsatzbereiches am ATL ohne Umbauten
 - Sensorik zur Erkennung der wichtigsten Kenngrößen wie Pumpgrenze und Schluckgrenze
 - Abfahren einer Drehzahllinie durch robuste und schnelle Regelung
 - offene Versuchsgestaltung

Anlagentechnik

Zu den Hauptkomponenten der Anlage zählen:

- Heißgasgenerator zur Bereitstellung definierter Abgasmassenströme bei konstanter Temperatur
- Abluftsteuerung am Verdichter zur Einstellung eines definierten Verdichtermassenstroms
- Schmierölkreislauf mit Druckregelung, Heizung und Kühlung
- Wasserkreislauf mit Heizung und Kühlung für den Einsatz von wassergekühlte Turbinengehäusen

Nachfolgende Skizze gibt einen schematischen Überblick zu den Hauptanlagenteilen:

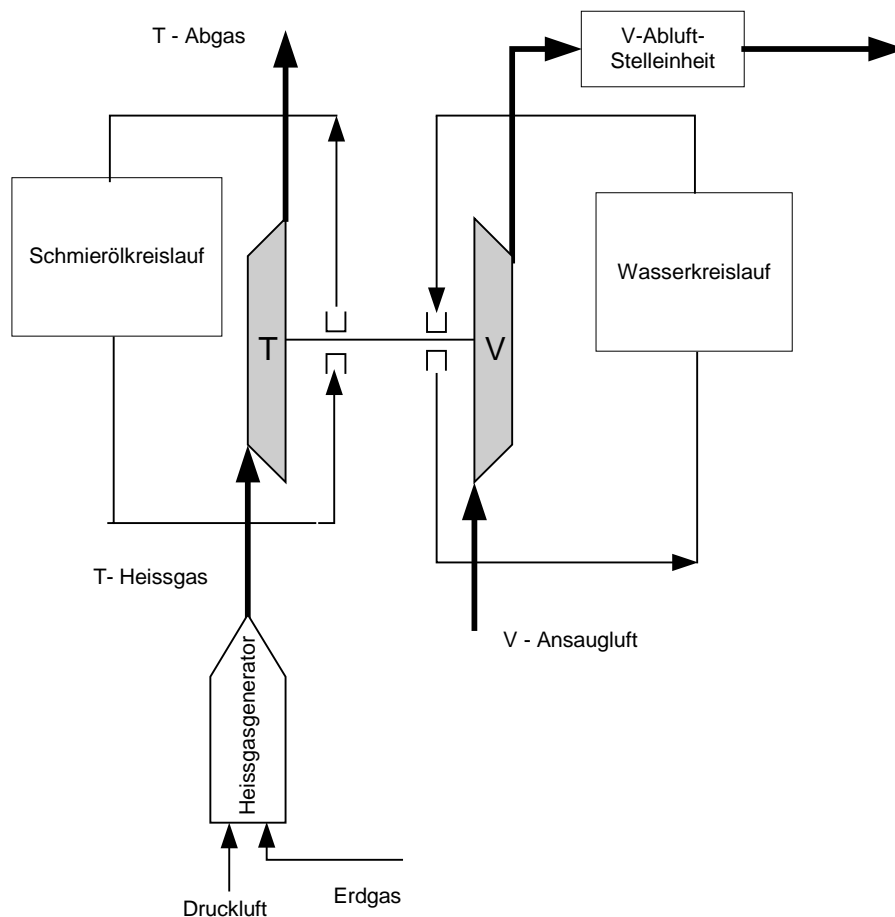


Abbildung 1: Prinzip eines Abgasturboladerprüfstands

Während der Konzeption wurde darauf geachtet ein kompaktes Maschinengestell aufzubauen. Das erleichtert die Wartung des Systems, da die Prüfstandszelle um den Prüfstand herum begehbar bleibt. Das Maschinengestell mit der Brennkammer sowie der Öl- und Wasserkonditionierung bildet mit den zugehörigen Stellorganen eine Einheit. Um die benötigten Ein- und Ausläuflängen zur Messung der Verdichtierzuluft und des Turbinenmassenstrom zu erhalten, wurden die Massenstrommessgeräte an der Wand der Prüfstandszelle montiert.

Das nachfolgende Bild zeigt Turboladerprüfstand für kleine Abgasturbolader:



Abbildung 2: Heissgasgenerator HD_HGG200/600

Im unteren Teil sind die Öl- und Wasser-Konditioniersysteme untergebracht. Im oberen Teil sitzen die Brennkammer und die zugehörigen Regelorgane.

Hochdruck-Heissgasgenerator

Das Kernstück der Anlage bildet der Hochdruck-Heissgasgenerator, der den geforderten Abgasmassenstrom in weiten Temperatur- und Durchsatzbereichen erzeugt. Der Brennstoff, Erdgas, wird optimal eingesetzt und schadstofffrei verbrannt.

Die Voraussetzung, um eine große Palette von Abgasturboladern an einem Prüfstand testen zu können, ist ein hoher Stellbereich des Erdgasbrenners. Eine zweiflutige Brennerkonstruktion gewährleistet hier den erforderlichen Stellbereich. Der Brenner in obiger Abbildung kann von 5 bis 200 kW betrieben werden.

Wenn die Turbine in die oberen Drehzahlbereiche gefahren wird, muß die Brennkammer gegen einen hohen Abgasgegendruck arbeiten. Hier kann der Abgasgegendruck bis zu 5 bar ansteigen.

Durch den Einsatz von hochfesten und temperaturbeständigen Materialien können folgende Heissgasgrenzwerte für obige Brennkammer erreicht werden:

- 6 bar (abs) bei $T = 600\text{ °C}$
- 2,5 bar (abs) bei $T = 1050\text{ °C}$

Die Temperatur des verbrannten Abgases wird definiert eingestellt, indem kalte Mischluft dem Abgas zugeführt wird. Um eine konstante Temperaturverteilung am Austritt der Brennkammer zu erhalten, werden die Mischluft und das Abgas über ein Mischsystem geführt, das schnelle Wärmeübergänge und Durchmischung des Heissgases gewährleistet.

Nachfolgend die wichtigsten technischen Daten der Brennkammeranlagen für 3 projektierte Prüfstandsgrößen im Entwicklungszentrum:

Heissgasgeneratortyp	HD-HGG200/600	HD-HGG 400/600	HD-HGG 750/600
Turbinenmassenstrom Min/Max [kg/s]	0,01..0,25	0,02..0,5	0,035..0,9
Stellverhältniss:	25:1	25:1	25:1
Brennerleistung [kW]	5..200	10..400	20..750
Temperatur des Heissgases minimal [°C]	200	200	200
Temperatur des Heissgases maximal [°C]	1050 ¹	1000 ²	750
Verdichtermassenstrom Min/Max [kg/s]	0,01..0,22	0,07..0,45	0,015..0,9
Heissgasdruck max [bar]	5	5	5

Tabelle 1: wichtige Kenngrößen

Regelungstechnik

Für die Vermessung eines Verdichterkennfeldes müssen folgende Größen eingestellt werden:

- Massenstrom Verdichter m_{pV}
- Drehzahl Turbolader n_{ATL}
- Temperatur Heissgasmassenstrom T_3

Nachfolgend wird ausgeführt, wie ins besondere die Brennkammer geregelt wird, um die Zielgrößen n_{ATL} und T_3 , für die die Brennkammer verantwortlich ist, im Kennfeldbetrieb einzustellen.

Der Prüfstand kann in zwei Betriebsarten gefahren werden. Dies sind ein Handbetrieb sowie ein Automatikbetrieb.

Handbetrieb

Der Bediener wirkt direkt auf die Stellorgane, die den Massenstrom des Verdichters und den Mischluftanteil in der Brennkammer stellen. Ausgenommen davon bleibt die Regelung des Brenners. Hier wurde ein Regelalgorithmus entwickelt, der die Massenströme des Brennstoffs und der Brennluft mit einem definierten Luftverhältnis einstellt. Der Brenner wird somit in seiner Leistung geregelt. Über die Brennerleistung wird die Temperatur eingestellt. Gleichzeitig wird über den Mischluftanteil der Heissgasmassenstrom und somit die Drehzahl des Turboladers gestellt.

Automatikbetrieb

In dieser Betriebsart werden nur noch die Sollwerte Drehzahl, n_{ATL} , und Temperatur, T_3 , vorgegeben und dann in wesentlich kürzerer Zeit von einem Regelalgorithmus eingestellt. Temperatur sowie Massenstrom und die daraus resultierende Drehzahl am Turbolader sind Größen, die sich im Regelvorgang gegenseitig beeinflussen.

¹ bis zu einen Massenstrom von 0,15 kg/h

² bis zu einen Massenstrom von 0,25 kg/h

Folgende Abbildung zeigt das Zweigrößen-Regelsystem für die Drehzahlregelung des Turboladers ohne Entkopplung:

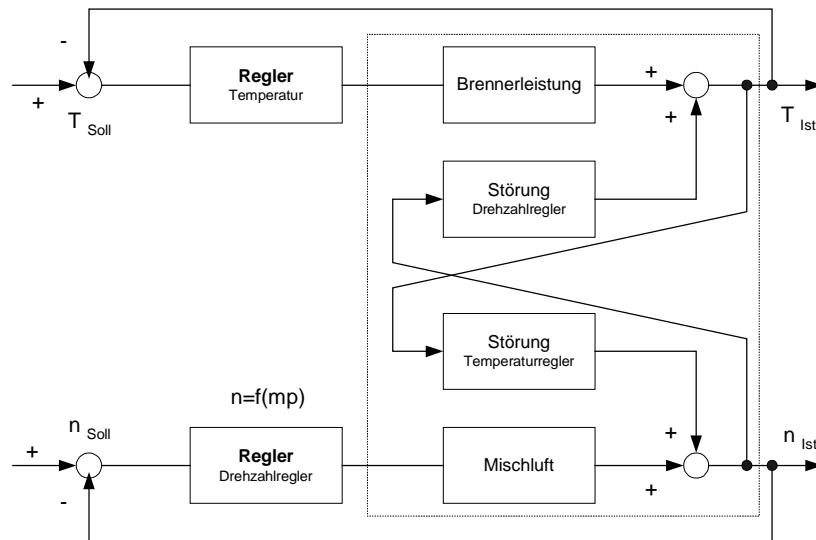


Abbildung 3: Zweigrößen-Regelstrecke

Durch eine Entkopplung der Regelkreise wird eine schnellere Einregelung der Sollgrößen erreicht. Die Heissgastemperatur wird nicht sprunghaft verändert, sondern während einer Meßreihe konstant gehalten. Deshalb ist eine Entkopplung in Richtung Drehzahlregler nicht erforderlich.

Eine Entkopplung wird in Richtung Temperaturregler ausgeführt, d.h. wenn sich der Heissgasmassenstrom und somit die Drehzahl ändert, wird die Leistung der Brennkammer über ein Koppelglied vorgesteuert.

Das Koppelglied hat die Aufgabe, die Leistung der Brennkammer bei einer Änderung des Heissgasmassenstroms gleichsinnig vorzusteuern.

Die nachfolgende Abbildung zeigt die entkoppelte Regelstrecke in Richtung Temperaturregler:

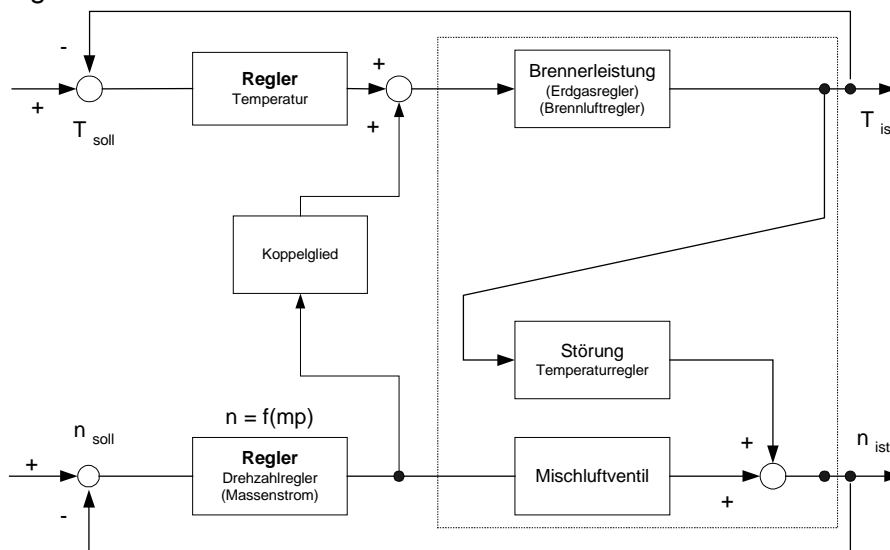


Abbildung 4: entkoppelte Regelstrecke

Meßtechnik

Die Turboladerprüfung steht und fällt mit der Genauigkeit der eingesetzten Meßtechnik. Am Beispiel der Massenstrommessung wird erläutert, mit welchen Verfahren die Messgenauigkeit erhöht wird.

Meßprinzip Massenstrommessung

An die eingesetzte Meßtechnik zur Massenstrommessung werden folgende Anforderungen gestellt:

- großer Messbereich entsprechend dem Stellbereich der Brennkammer
- hohe Reproduzierbarkeit der Messung
- einfache Wartung und Nachkalibrierung
- schnelle Ansprechzeit des Meßsignals

Zum Einsatz kommen hier Gasmassen-Durchflußmesser mittels thermischer Messverfahren, die diese Anforderungen erfüllen.

Kalibrierung

Nach einer Kalibrierung erhält man eine Fehlerkurve, die eine prozentuale Abweichung des Meßsystems von einem hoch genauen Kalibriersystem angibt. Die Kalibrierung der Massenstrommessgeräte erfolgt an DKD-zertifizierten Kalibrieranlagen.

Diese Fehlerkurve wird im übergeordneten Rechnersystem abgelegt und zur Nachberechnung des ermittelten Meßwertes herangezogen. Nachfolgende Abbildung zeigt eine Kalibrierkurve:

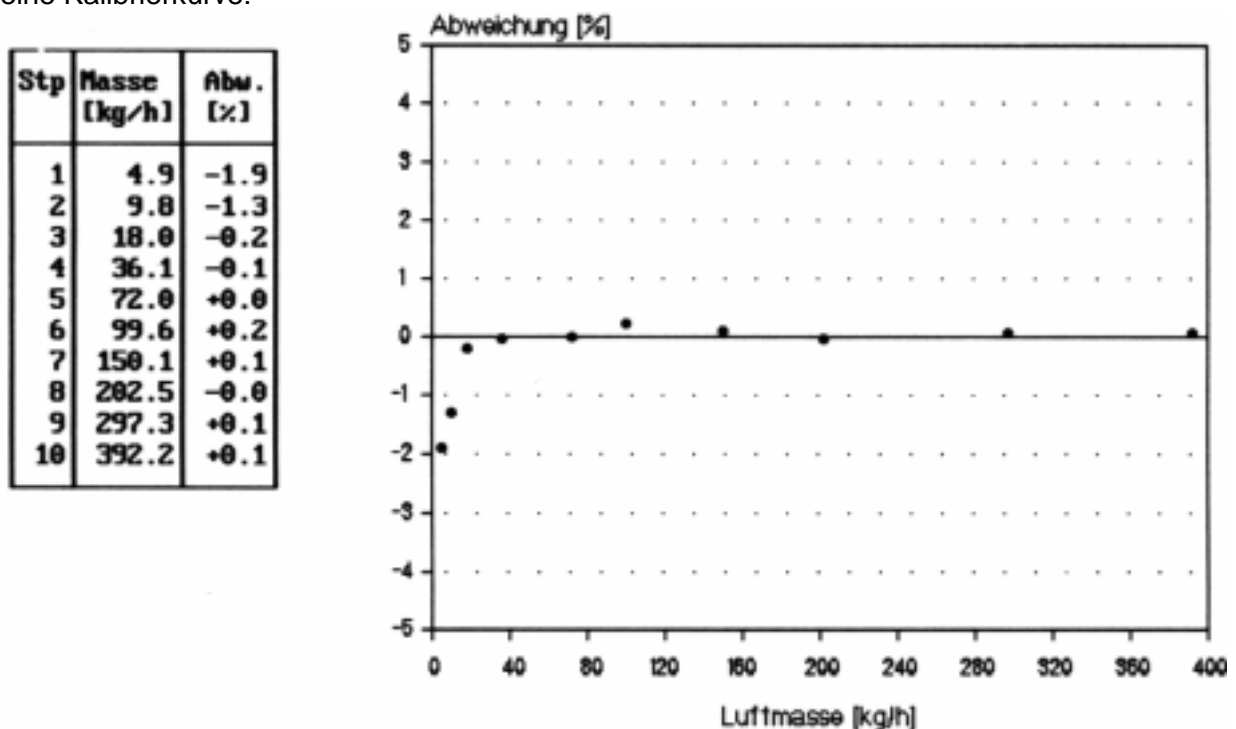


Abbildung 5 : Kalibrierkurve

Der gemessene Wert wird mit dieser Kurve korrigiert. Lediglich die Reproduzierbarkeit des Meßsystems bleibt als Meßfehler übrig. Eine serielle Übertragung der Meßergebnisse von der Auswerteeinheit zum Automatisierungssystem schaltet die Fehlerquelle einer Analog / Digitalwandlung im Automatisierungssystem aus.

Kalibrierkurven sind für alle kalibrierfähigen Meßsysteme im Automatisierungssystem hinterlegt.

Automatische Abläufe

An Hand eines Beispiels wird erläutert, wie die automatische Aufnahme einer Drehzahlkennlinie in einem Verdichterkennfeld erfolgt.

Die Sollgrößen und Parameter, die zu einer Linie konstanter Drehzahl im Verdichterkennfeld führen, sind:

- Heissgastemperatur $T_3 = \text{konstant}$
- Turboladerdrehzahl $n_{ATL} = \text{konstant}$
- Anzahl der Messpunkte, an denen der Verdichter thermodynamisch vermessen wird

Das Diagramm zeigt die einzelnen Stationen des automatischen Ablaufs:

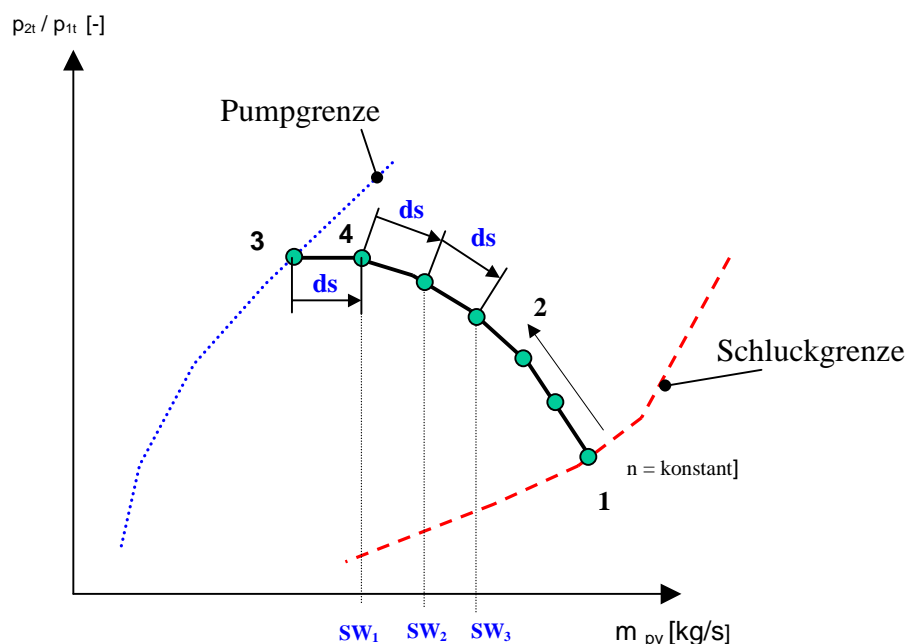


Abbildung 6: Drehzahlkennlinie

1. Der Turbolader wird ohne nachgeschalteten Widerstand am Verdichter auf eine konstante Drehzahl und Heissgastemperatur gefahren, n_{ATL} , $T_3 = \text{konstant}$.
2. Der Massenstrom des Verdichters wird nun verringert und dabei die Drehzahl in engen Grenzen konstant gehalten. Der Betriebspunkt des Turboladers bewegt sich in Richtung der Pumpgrenze des Verdichters. Das Abfahren der Drehzahlkurve ist dynamisch.
3. Die Pumpgrenze wird mit einer geeigneten Sensorik erkannt. Hierbei wird der schnell schwankende Druck an der Pumpgrenze am Verdichteraustritt ausgewertet. Nun wird der Betriebspunkt von der Pumpgrenze in einen für den Turbolader stabilen Betriebsbereich gelegt. Auf dem ‚Weg‘ von der Schluckgrenze zur Pumpgrenze wird über einen Algorithmus die Kurvenlänge der Drehzahlkurve ermittelt.
4. Ein Sollwertgenerator errechnet aus der Kurvenlänge Sollwerte (SW_1 bis SW_n) für den Massenstrom des Verdichters. Diese werden nun eingeregelt, um den Verdichter in diesen Betriebspunkten thermodynamisch zu vermessen. Die Sollwerte werden so errechnet, daß immer gleiche Kurvenlängen „ ds “ auf der Kennlinie entstehen, um auch Messpunkte dort zu erhalten, wo die Kennlinie eine große Steigung hat.

Automatisierungssystem

Zum Einsatz kommt das Automatisierungssystem **PAtools - Werkzeuge zur Prüfstandsautomatisierung**. Das System wurde speziell für Prüfsysteme in der Automobilindustrie entwickelt. Durch den Einsatz eines Client – Server-Systems, bestehend aus einem Prozeßrechner mit dem Betriebssystem Lynx-OS (Server) und einem Bedien-PC mit dem Betriebssystem Windows – NT, können die hohen Echtzeitanforderungen für Steuerung, Regelung und Datenerfassung bei gewohnter Bedienung unter Windows – NT gewährleistet werden.

Schlußbetrachtung

Moderne Gasbrennertechnik ermöglicht es Prüfstände zu konzipieren, bei denen ein hoher Leistungsstellbereich ohne Umbauten am Brenner möglich wird. Dies ist die wesentliche Voraussetzung für einen hohen Automatisierungsgrad solcher Anlagen, der im täglichen Prüfbetrieb die Prüfzeiten deutlich verringert.

Mit erdgasbefeuerten Abgasturboladerprüfständen ist Borg Warner Turbosystems in der Lage sich den heutigen und zukünftigen Herausforderungen der Auflade-Technologie zu stellen.

Zukünftig werden Prüfaufgaben, wie die Vermessung eines in weiten Stellbereichen geregelten Abgasturboladers mit VTG sowie die Prüfung von zweistufigen Aufladesystemen, zunehmend an Bedeutung gewinnen. Diese Prüfaufgaben können heute schon abgedeckt werden.

Anmerkung des Autors:

Die gute Zusammenarbeit mit den Versuchsingenieuren und Systemberatern der Borg Warner Turbo Systems sowie mit unserem Partner, der UTF in Brand Erbsdorf, waren ein wesentlicher Grund für den erfolgreichen Verlauf des Projektes. Hier möchte ich mich im Namen der Kratzer Automation bedanken.

BorgWarner Turbo Systems
Worldwide Headquarters GmbH
Mannheimer Strasse 88
67292 Kirchheimbolanden / Germany
Phone: ++49 (0)6352 75 33 0
Fax: ++49 (0)6352 75 33 99

3K-Warner Turbosystems GmbH
Mannheimer Strasse 85/87
67292 Kirchheimbolanden / Germany
Phone: ++49 (0)6352 403 0
Fax: ++49 (0)6352 403 1866

BorgWarner Turbo Systems Ltd.
Euroway Industrial Estate
Bradford BD4 6SE
West Yorkshire / UK
Phone: ++44 1274 684 915
Fax: ++44 1274 689 671

BorgWarner Turbo Systems
PO Box 15075
Asheville, NC 28813/USA
Phone: 001 828 684 4000
Fax: 001 828 684 4114

BorgWarner Automotive Brasil Ltda.
Estrada da Rhodia Km 15
P.O. Box 6540
13084-970 Campinas-SP / Brasil
Phone: ++55 19 3787 5700
Fax: ++55 19 3787 5701

Hitachi Warner Turbo Systems Ltd.
3085-5 Higashi Ishikawa Saikouchi, Hitachinaka-shi
Ibaraki-ken
312-0052, Japan
Phone: +81 (0) 29-276-9388
Fax: +81 (0) 29-276-9397

www.turbos.bwauto.com

