



3. Tagung "Design of Experiments" am 7. Juni 2005 in Berlin

Dr. Ing. Gerald Eifler

Zukünftiger Einsatz von rechnergestützten Motorkennfeldoptimierungssystemen zur Brennverfahrensentwicklung

1. Einleitung

Steigende Anforderungen bezüglich Fahrkomfort, Verbrauch und Emissionen stellen die Motorenentwickler vor die Aufgabe, in allen Betriebsbereichen einen möglichst optimalen Brennverlauf erzielen zu müssen. Erreicht werden kann dies durch Motor- verstellparameter, die über die Motorelektronik einjustiert werden und über die das Motorverhalten betriebspunktabhängig optimal abgestimmt wird. In bestimmten Grenzen lassen sich damit Zielkonflikte z.B. zwischen Verbrauchs- und Emissions-verhalten entschärfen. Als typische Motorverstellparameter seien Zündzeitpunkt, Einspritz-Timing, kennfeldgeregelte AGR, variable Steuerzeiten, variabler Drall genannt.

Die zunehmende Anzahl von Motorverstellparametern führt mehr und mehr dazu, daß bei der Motorkalibrierung verstärkt Systeme zur rechnergestützten Motor-Kennfeldoptimierung (KFO-Systeme) eingesetzt werden. Diese Systeme haben sich inzwischen für Abstimmungsaufgaben an Motoren mit bis zu 6 Motorverstellparametern bewährt und können in komplexen mehrdimensionalen Versuchsräumen, die ein Ingenieur nicht mehr überblicken kann, die exakt optimale Motorkalibrierung bestimmen. Im Prinzip lassen sich die Meßdaten konventionell betriebener Motorprüfstände in KFO-Systeme einspeisen und optimale Motoreinstellungen in einem nachgeschalteten Rechengang ermitteln (Offline-Optimierung). Das KFO-System kann aber auch direkt mit einer

Abstract

Usually the computer assisted systems for engine map optimization (KFO-systems) are used for engine optimization after the basic manual calibration was carried out. In the future a wider spread of use for such kind of systems can be predicted if they could support the engine combustion process development. Additionally some significant savings in time and costs could be realized when carrying out these development on a fully automated testbench which is directly coupled with the optimization system. Especially in the personel-intensiv combustion process development this saving potential is most beneficial.

This presentation describes how computer assisted optimization systems can support the combustion development process. It discusses the additional measures which have to be taken and the additional tools which have to be integrated in order to create a successful over-all-strategy. In this context the presentation will focus on:

- DOE planning
- engine charakteristik modelling
- methods for trimming down the map space in which the combustion development should take place
- the optimization process itself

Zusammenfassung

Bei der Brennverfahrensentwicklung von zukünftige, modernen, schadstoffarmen Otto- und Dieselmotoren wird der Entwickler weitaus mehr Verstellparameter am Motor zu optimieren haben, als heute üblich. Die

Prüfstandsautomatisierung gekoppelt sein und selbsttätig Optimierungsläufe anstoßen, durchführen und auswerten (Online-Optimierung). Im weiteren Verlauf des Vortrages sollen ausschließlich KFO-Systeme zur Online-Optimierung betrachtet werden.

Die Anwendung der KFO-Systeme ist also in Kennfeldbereichen, in denen der Motor lauffähig ist, erprobt. Der vorliegende Vortrag beschäftigt sich mit der Frage, inwieweit sie auch eingesetzt werden können, wenn nicht von vornherein die Lauffähigkeit des Motors im Untersuchungsraum sichergestellt ist: Würde man für solche Anwendungen spezielle Steuerungsfunktionen entwickeln, die sich quasi den unbekanntem Versuchsraum „ertasten“, dann könnten KFO-Systeme zukünftig auch für die Brennverfahrensentwicklung eingesetzt werden und den Kennfeldbereich um einen lauffähigen Betriebspunkt herum sukzessive ausweiten. Vollautomatisierte Anwendungen bei der Entwicklung von z.B. homogenisierten Dieselmotoren (HCCI) oder am GDI-Ottoverfahren mit geschichteter Ladung sind dann denkbar.

Im Bild 1 sind getrennt für Otto- und Dieselmotoren die Innovationsthemen der Zukunft aufgeführt. Das Bild wurde einer Studie der Mercer-Consulting GmbH entnommen. Alle Verfahren die hier aufgeführt sind – ausgenommen die Zylinder-abschaltung – werden die Anzahl der Verstellparameter drastisch erhöhen. Die Rechnerunterstützung bei der Entwicklung erscheint deshalb schon aus Gründen der Durchführbarkeit zwingend. Darüberhinaus sind mit dem Einsatz von KFO-Systemen bei der Brennverfahrensentwicklung erhebliche Einsparungen möglich.

entsprechende Abstimmungsarbeit am Motor ist ohne Hilfe eines rechnergestützten Systems nicht mehr zu leisten. Abgesehen davon ist das menschliche Vorstellungsvermögen zusätzlich begrenzt: Man muß davon ausgehen, daß ab einer Anzahl von 4 Verstellparametern ein Ingenieur nicht mehr in der Lage ist, das wirklich absolute Optimum zu ermitteln.

Systeme zur rechnergestützten Motorkennfeldoptimierung können theoretisch in n-dimensionalen Räumen arbeiten und sind deshalb für Optimierungsaufgaben dieser Art hervorragend geeignet. Sie können aber auch für Aufgaben der Brennverfahrensentwicklung herangezogen werden. Das KFO-System startet in einem lauffähigen Betriebspunkt und erschließt sich alle weiteren Kennfeldpunkte selbsttätig unter Erarbeitung einer optimalen Abstimmung.

In diesem Fall muß zumindest ausgehend von einem lauffähigen Betriebspunkt zunächst sichergestellt werden, daß bei der anschließenden Parameterverstellung kein Laufgrenze verletzt wird und der Motor sicher lauffähig bleibt. Die Entwicklung entsprechender Funktionen und Algorithmen, die dies sicherstellen, sind Kernaufgabe bei der Anpassung eines KFO-Systems zur Durchführung von Brennverfahrensentwicklungen. Im Rahmen eines geförderten FVV-Projektes wird die entsprechende Software von mehreren Partnern aus Industrie und Forschung derzeit erarbeitet.

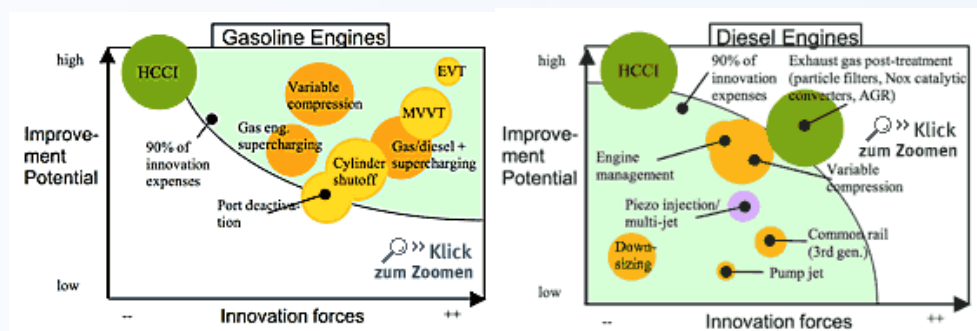


Bild 1: Zukünftige Technologische Entwicklungsschwerpunkte [1]

2. Notwendigkeit des Einsatzes von KFO-Systemen

Am Beispiel eines Ottomotors mit frei variablem Ventiltrieb sei im folgenden dargestellt, warum eine zukünftige Brennverfahrensentwicklung ohne die Unterstützung von rechnergestützten Methoden nicht mehr auskommt.

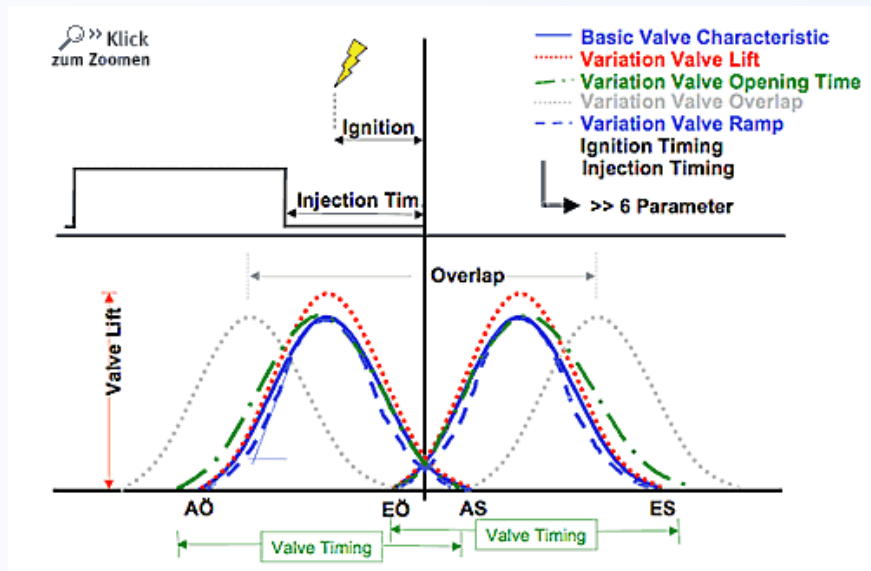


Bild 2: Anzahl der Motorverstellparameter bei der Entwicklung eines frei variablen Ventiltriebes.

Allein bei einer Variation der im Bild 2 dargestellten Größen ergäben sich bereits 6 Verstellparameter, die in Ihrer Gesamtheit optimal abgestimmt werden müssten. Setzt man einen 4V-Ventiltrieb voraus, an dem alle 4 Ventile eines Zylinders mit individuell unterschiedlichen Steuerzeiten und Ventilhuben betrieben werden, dann erhöht sich die Anzahl der möglichen Verstellparameter sofort drastisch.

Die Komplexität der zu untersuchenden motorischen Zusammenhänge wurde schematisch im Bild 3 dargestellt. Es ist sofort ersichtlich, daß der Ingenieur bis zu einer Anzahl von 4 Motorverstellparametern die Wirkzusammenhänge in mehreren, nebeneinandergestellten 3D-Diagrammen noch übersehen kann. Berücksichtigt man, daß er diese Diagramme nicht nur für den im Bild 3 dargestellten Kraftstoffverbrauch sondern auch für die Emissionskomponenten Nox, HC, CO auswerten muß, dann kann man bereits ermessen, wie groß die Schwierigkeiten bei einer „händisch“ ausgeführten Motorabstimmung sind.

KFO-Rechnersysteme können in mehrdimensionalen Räumen „denken“ und gleichzeitig auch gegenläufige Wirkzusammenhänge erkennen und bewerten – eine Leistung, die der Entwickler ohne Rechnerunterstützung bei einer Verstellparameteranzahl von > 4 nicht mehr erbringen kann.

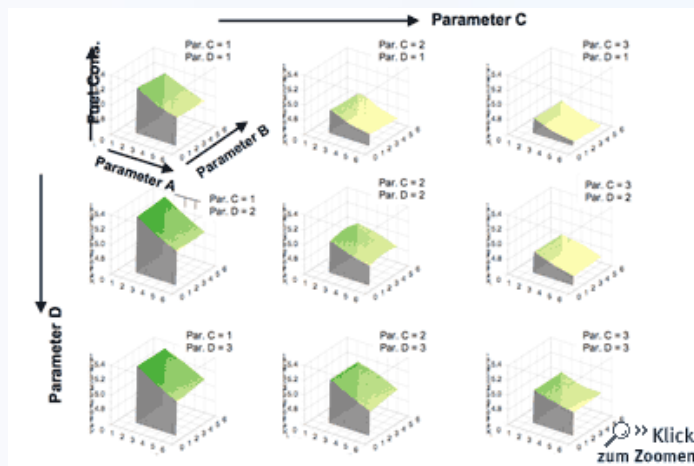


Bild 3: Darstellung der Kraftstoffverbrauchs-Kennfelder an einem Motor mit 4 Verstellparametern

3. Funktionen eines konventionellen KFO-Systems und ihre Eignung für die Brennverfahrensentwicklung

Ein konventionelles System zu rechnergestützten Motor-Kennfeldoptimierung enthält unterschiedliche Software-Funktionalitäten, die im folgenden aufgeführt sind:

- Modul zur Versuchsplanerstellung (DOE)
- Modul zur Ermittlung von harten und weichen Laufgrenzen
- Modellierer
- Gütefunktionsbildner mit Gewichtung
- Optimierer

Das Bild 4 zeigt den Wirkablauf eines automatisierten Optimierungsprozesses, um die Bedeutung der einzelnen Softwaremodule zu erklären.

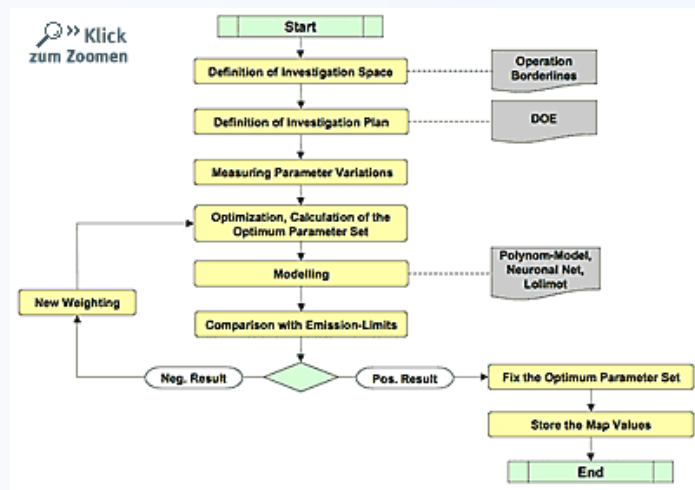


Bild 4: Ablaufdiagramm einer konventionellen rechnergestützten Optimierung

Für zukünftige Einsätze eines KFO-Rechners in der Brennverfahrensentwicklung ist eine Betrachtung, inwieweit die genannten Module geändert oder angepasst werden müssen, notwendig:

Dem Modul zur Ermittlung von Laufgrenzen kommt eine Schlüsselbedeutung zu. Bei der herkömmlichen Optimierung arbeitet es als Begrenzer für den Verstellbereich der Motorparameter und wertet kontinuierlich Meßgrößen aus, die einen bestimmten Maximalwert nicht überschreiten dürfen. Das Erreichen des Maximalwertes ist als Laufgrenze definiert. Bei der Entwicklung von neuen Brennverfahren ist gar nicht von vornherein klar, ob die nächste gewählte Parametereinstellung oder der nächste Betriebspunkt überhaupt fahrbar ist. Ein Ansteuern einer Einstellung, die nicht fahrbar ist, würde zwangsläufig den Abbruch des Prozesses zur Folge haben und muß unbedingt vermieden werden. Dem Laufgrenzenmodul wird also die zusätzliche Aufgabe zukommen müssen, die Fahrbarkeit einer neuen Parametereinstellung im vorhinein festzustellen.

Das Modul zur Versuchsplanerstellung setzt üblicherweise voraus, daß zumindest die Abhängigkeiten des Motorverhaltens von einer Parametereinstellung bekannt sind (Motorcharakteristik). Dies ist bei herkömmlichen Optimierungsaufgaben, bei denen bereits eine Grundabstimmung des Motors besteht, unproblematisch. Deutlich schwieriger wird es in der Brennverfahrensentwicklung wenn die Charakteristiken nicht bekannt sind, weil der Versuchsraum noch gar nicht erschlossen wurde. Hier sind neue Ansätze notwendig.

Der Modellierer hat die Aufgabe, anhand der vermessenen Parametereinstellungen auch Zwischeneinstellungen zu interpolieren und die Motorcharakteristik als Kurve, Fläche, Kennfeld etc. auszuformen. Er wird diese Aufgabe auch bei der Brennverfahrensentwicklung unverändert ausführen. Wichtig ist, daß man Softwaretools einsetzt, die auch stark zerklüftete Kennfelder unverfälscht nachbilden können. Bei neuen Brennverfahren, bei denen man sich häufig in Grenzbereichen der Lauffähigkeit bewegt, ist mit Unstetigkeiten der Motorcharakteristik zu rechnen.

Gütefunktionsbildner und Optimierer können mit entsprechenden Anpassungen

voraussichtlich von konventionellen KFO-Systemen übernommen werden.

4. Ansätze zur Progammentwicklung für ein KFO-System zur Brennverfahrensentwicklung

4.1 Versuchsraumbestimmung

Wie aus Bild 4 entnommen werden kann, ist der erste Schritt im KFO-Prozess die Versuchsraumbestimmung. Ist der Versuchsraum nicht von vornherein bekannt und sind seine Grenzen nicht von vornherein durch den Ingenieur festgelegt, so findet üblicherweise ein sogenannter „Screening-Versuch“ statt, in dem automatisiert die Verstellparameter an die min/max-Grenzen verstellt werden. Das Programm-Modul zur Laufgrenzenüberwachung ist während dieses Versuchs im Eingriff. Im Bild 5 ist beispielhaft dargestellt, wie das KFO-System Cameo diese Aufgabe bearbeitet:

- ausgehend von einer beliebigen Betriebspunkteinstellung werden alle Motorverstellparameter strahlenförmig im n-dimensionalen Raum (im Bild 5 ist nur ein 3-dimensionaler Raum mit 3 Verstellparametern dargestellt) bis auf die maximale und minimale Einstellung gefahren
- während der Parameterverstellung überwacht das Laufgrenzenmodul die Laufgrenzen bestimmenden Meßwerte, wie z.B. Klopfsignale, Abgastemperaturen, Brennraum-Spitzendrücke etc..
- Überschreitet ein Meßwert die zulässige Grenze, ist damit also eine Laufgrenze verletzt, so wird der Verstellparameter auf die letzte Einstellung ohne Grenzwertverletzung zurückgenommen. Diese Position ist die Laufgrenze.
- Ist der Screening-Versuch abgeschlossen, so setzt der Modellierer die ermittelten Werte zu Laufgrenzen-„Flächen“ im räumlichen Modell zusammen.

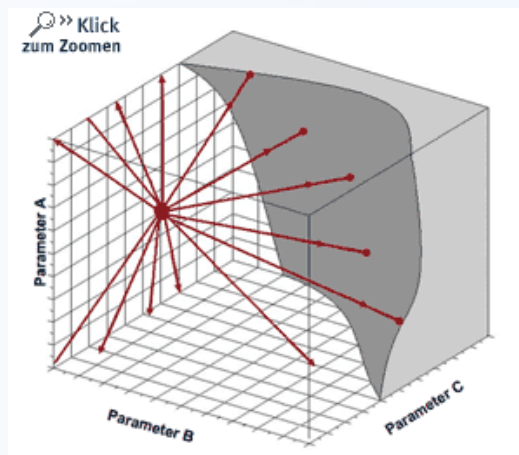


Bild 5: Laufgrenzenbestimmung im Cameo-System [2]

Prinzipiell wird ein Screening-Versuch zur Laufgrenzenermittlung auch beim Einsatz eines KFO-Systems in der Brennverfahrensentwicklung stattfinden müssen. Die besondere Schwierigkeit dabei ist, daß man keinesfalls davon ausgehen kann, daß man es mit weiten Parameterverstellbereichen zu tun hat, in denen der Motor lauffähig ist. Vielmehr ist damit zu rechnen, daß die Motorverbrennung plötzlich aussetzt. Damit hätte man zwar eine Laufgrenze ermittelt; gleichzeitig wäre aber der automatisierte Lauf abgebrochen.

Für diese Versuchsraumbestimmung müssen also bestimmte Algorithmen entwickelt werden, die Verbrennungsaussetzer strikt vermeiden. Die Verfahren, die derzeit in der Überlegung sind, gehen deshalb wie folgt vor:

- in den Katalog der Meßwerte, die zur Laufgrenzenüberwachung herangezogen werden, werden Größen, die die Verbrennungsstabilität repräsentieren, mit aufgenommen (statistische Auswertung aufeinanderfolgender Brennraumdruckverläufe, Laufunruhe-Ermittlung).
- Die Parameterverstellung im Screening-Versuch geht langsam vonstatten. Ihre Verstellgeschwindigkeit wird mit zunehmender Instabilität der Verbrennung

- automatisch weiter reduziert.
- Bei einem Verlöschen der motorischen Verbrennung wird der Lauf nicht abgebrochen. Der Prüfstand schleppt den Motor weiter auf gleichbleibender Drehzahl. Alle Parameter werden sofort auf die Ausgangswerte zurückgestellt, so daß der Motor wieder im lauffähigen Bereich arbeitet.
- die kritische Einstellung wird erneut angefahren. Kommt es wieder zum Aussetzerbetrieb, wird die Einstellung als Laufgrenze festgeschrieben.

Voraussetzung ist, daß der Prüfstand mit einer Motorbremse ausgestattet ist, mit der sowohl der gefeuerter Motorbetrieb als auch Schlepptrieb realisierbar ist.

4.2 Versuchsplanerstellung

Die Versuchsplanerstellung muß den Typ der Motorcharakteristiken mit berücksichtigen. In der gängigen Sprachregelung wird dies mit dem Begriff „Expertenwissen“ umschrieben. Wie im Bild 6 dargestellt, handelt es sich bei üblichen Optimierungsaufgaben am Motor um Kurven zweiter oder dritter Ordnung. Dies kann man bei der Brennverfahrensentwicklung – insbesondere nahe der Laufgrenze – nicht unbedingt voraussetzen. Motorcharakteristiken mit großen Unstetigkeitsstellen kann aber ein DOE-Verfahren nur schwer verarbeiten. In jedem Fall führen sie zu einer erhöhten Anzahl von Meßpunkten und vergrößern damit den Aufwand.

Ziel muß es sein, auch für diese Fälle praktikable, fahrbare, von der Anzahl her begrenzte Motorbetriebseinstellungen zu berechnen. Möglich wäre z.B. die Definition eines „Unstetigkeitsgrades“. In Bereichen mit stetig verlaufenden Motor-charakteristiken könnte ein normales DOE-Verfahren angewendet werden. In Bereichen mit hoher Unstetigkeit müssen andere – allerdings auch aufwendigere – Verfahren zum Zuge kommen. Der Typ der Motorcharakteristik und der Unstetigkeitsgrad lassen sich zweckmäßigerweise aus den Daten des Screening-Versuches zur Versuchraumbestimmung (siehe Kap. 4.1) ermitteln.

Welche Bedeutung der Entwicklung dieser Verfahren zufällt, mag man ermesen, wenn man sich vor Augen führt, daß die Entwicklung des ottomotorischen GDI-Verfahrens im Schichtbetrieb oder des dieselmotorischen HCCI-Brennverfahrens sich zu 90% mit der Aufgabenstellung beschäftigt, wie der kleine Teillastbereich, in dem der Motor bereits lauffähig ist, ausgeweitet werden kann.

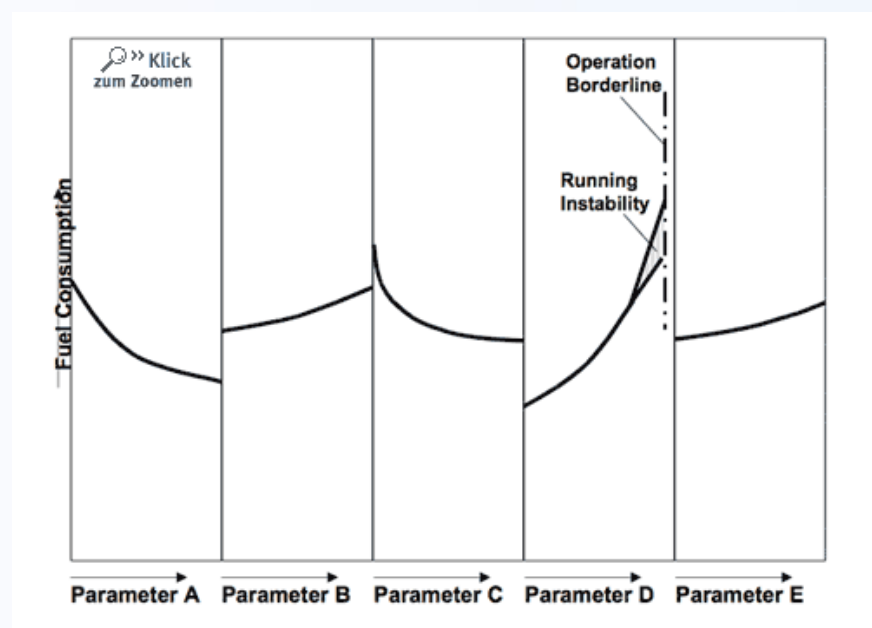


Bild 6: Motorcharakteristiken für den Kraftstoffverbrauch in Abhängigkeit von mehreren Parametervoreinstellungen (Bei Parameter D mit Laufgrenze und instabilem Grenzbereich)

4.3 Modellierung

Bei der Modellbildung stellt sich vor allem das Problem, einen hochdimensionalen Zusammenhang mit ausreichender Genauigkeit abzubilden. Es werden bereits unterschiedliche Modelle im Markt verwendet, die auf ihre Eignung zu überprüfen sind. Insbesondere ist darauf zu achten, daß das verwendete Modell

- mit relativ wenigen Meßpunkten eine gute Abbildung des Motorverhaltens erreicht
- geeignet ist, auch zerklüftete Wirkzusammenhänge wiederzugeben
- nur einen kleinen Berechnungsaufwand erfordert
- stabil arbeitet (keine Oszillationen)

Polynommodelle erscheinen für die Verwendung bei hochdimensionalen Zusammenhängen deshalb als weniger geeignet. Die Entwicklung wird eher auf die Modellierung mittels neuronaler Netze o.ä. abzielen. Als vielversprechend gelten die sogenannten Lolimot-Netze, die das Bild 7 darstellt. Bei diesem Verfahren wird zunächst die Motorcharakteristik durch die einfachst mögliche Funktion angenähert - im dargestellten 2-D-Raum (Bild 7 links) wird also eine Kurve durch eine Gerade angenähert. Stellt man rechnerisch fest, daß diese Annäherung nicht ausreichend und mit zu großen Ungenauigkeiten behaftet ist, so wird der Raum geteilt und die Motorcharakteristik durch 2 Flächen beschrieben. Bei weiterhin zu großen Abweichungen wird weiter geteilt. Die Modellierung komplizierter, zerklüfteter Motorcharakteristiken ist so einfach möglich. Das Verfahren funktioniert natürlich auch im n-dimensionalen Raum, ist von der Rechenintensität her vertretbar und arbeitet stabil. Darüberhinaus ist es einfach zu applizieren.

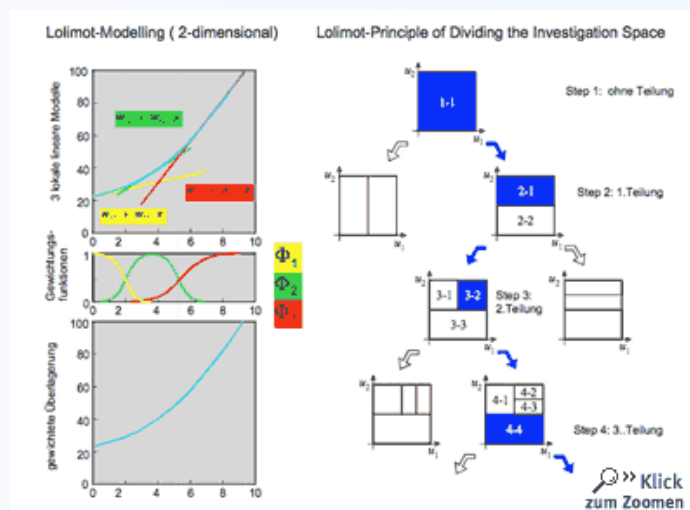


Bild 7: Modellierung nach dem Prinzip der Lolimot-Netze [3]

4.4 Optimierung

Bei der Optimierung von Motorverstellparametern handelt es sich um ein multivariables, nichtlineares Optimierungsproblem mit Nebenbedingungen. Die verschiedenen Optimierungsziele wie Kraftstoffverbrauch und Emissionen sollen dabei nach einem Ansatz von Lagrange zu einer einzigen Gütefunktion zusammengesetzt werden, deren Minimum im Raum das absolute Optimum der Parametereinstellung darstellt.

Zu klären ist, wie die im Markt verfügbaren Optimierungsverfahren mit den zunehmenden Meßwertungenauigkeiten, mit denen in der Nähe der Laufgrenze gerechnet werden muß, zurechtkommen. Gegebenenfalls ist für den Anwendungsfall der Brennverfahrensentwicklung in Grenzbereichen ein mehrstufiges Optimierungs-verfahren zu entwickeln.

5. Definition eines Projektes zur Erstellung eines KFO-Systems für die Brennverfahrensentwicklung

Die ElingKlinger Motortechnik GmbH beschäftigt sich bereits seit mehr als 5 Jahren mit

der rechnergestützten Motorkennfeldoptimierung. Sie setzt sowohl Schenck-Vega-Systeme als auch AVL-Cameo-Systeme ein.

Im Rahmen eines FVV-Forschungsvorhabens arbeitet sie in Zusammenarbeit mit dem IAT der Hochschule Darmstadt an der Erstellung neuer Verfahren und Algorithmen, mit denen bestehende KFO-Systeme in die Lage versetzt werden, Aufgabenstellungen aus der Brennverfahrensentwicklung bearbeiten zu können. Das Vorhaben wurde im Sept. 2004 begonnen und hat eine Laufzeit von 2 Jahren.

Als Versuchsträger wird ein 0,55 ltr.-1Zyl.-Ottomotor mit frei variablem Ventiltrieb eingesetzt. Dieser Motor wurde ausgewählt, um eine möglichst hohe Anzahl von Motorverstellparametern realisieren zu können und um auf dem Bereich der Brennverfahrensentwicklung ein breites Anwendungsspektrum zu haben. Mit diesem Versuchsträger ist es möglich:

- drosselfreie Laststeuerung
- variable interne Abgasrückführung
- Impulsaufladung an der Vollast
- variablen Drall
- Verbrennungsabläufe nach dem Miller-Verfahren

zu realisieren, um nur einige der Features zu nennen. Dabei steht nicht die wirkliche Brennverfahrensentwicklung im Focus sondern das Erproben des KFO-Systems und seiner neuen Algorithmen. Die Untersuchungen konzentrieren sich auf die im Kapitel 4 diskutierten Punkte. Zusätzlich ist aufzuzeigen, inwieweit Simulationsrechnungen, deren Ergebnisse gleichfalls einer Kennfeldoptimierung unterzogen werden können, die Anzahl der Prüfläufe am Motorprüfstand weiter reduzieren können. Denkbar ist eine Unterstützung durch Simulationsrechnungen bei der Versuchsraumbestimmung, bei der Laufgrenzenermittlung und bei der Ermittlung eines absoluten Optimums in stark zerklüfteten Kennfeldern. Das Bild 8 zeigt die beispielhafte Einbindung von Simulationsrechnungen in einen Optimierungslauf.

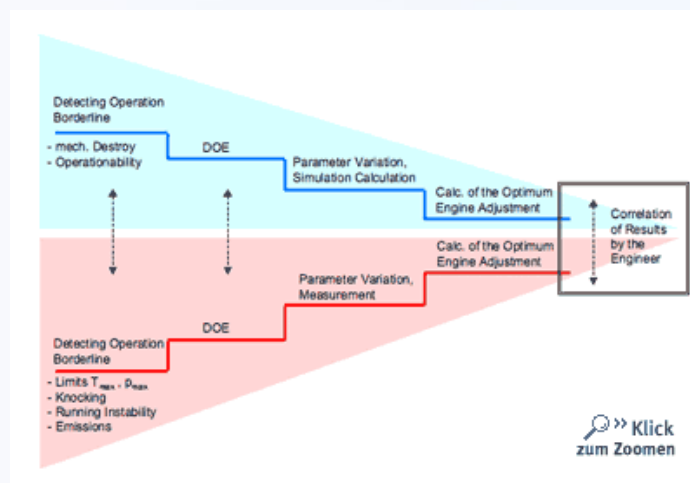


Bild 8: Optimierungslauf in der Brennverfahrensentwicklung unter Einbindung von Simulationsrechnungen

6. Versuchsaufbau

Bild 9 zeigt den realisierten Versuchsaufbau. Eingesetzt wird ein AVL-Cameo-System, das in der Lage ist den Prüfstand im Online-Betrieb zu fahren. Ein kompletter Optimierungslauf kann also vollautomatisiert vom KFO-System selbst initiiert und durchgeführt werden. Der Prüfstand ist mit einer Asynchronmaschine zur Darstellung eines gefeuerten und geschleppten Motorbetriebes ausgestattet. Der Prüfstand besitzt ansonsten die konventionelle Temperatur-, Druck-, Durchfluß- und Kraftstoffverbrauchs-Meßtechnik. Desweiteren ist eine Abgasanalyseanlage installiert.

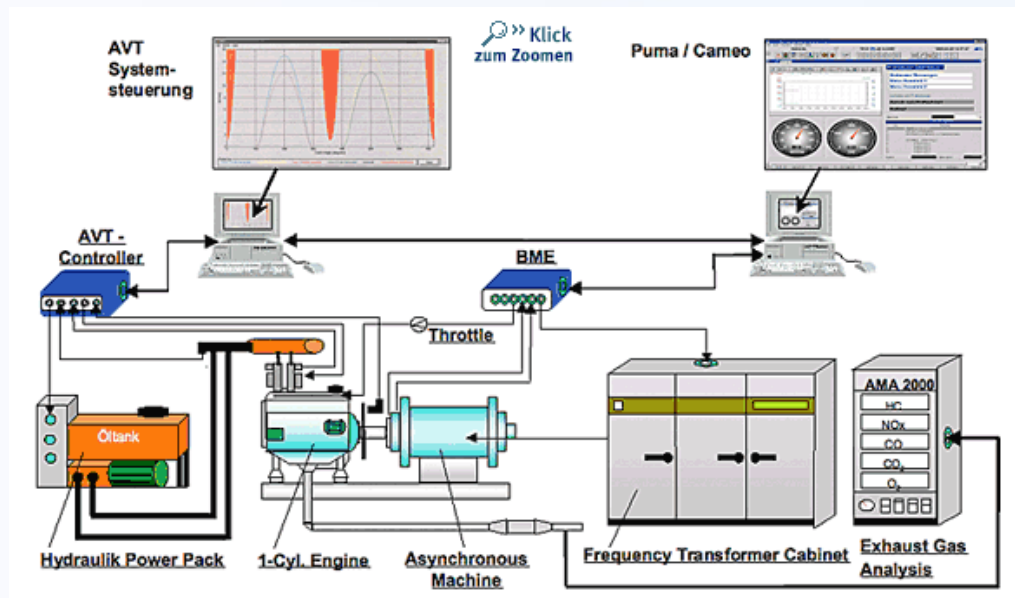


Bild 9: Prüfstands Aufbau

Links im Bild 9 sind die Aufbauten des vollvariablen, hydraulischen Ventiltriebs dargestellt. Aus einem Hydraulikreservoir werden die hydraulischen Schaltventile des Motorventiltriebs versorgt. Die Freigabe der hydraulischen Ventile übernehmen Pilot-Magnetventile, die durch den AVT-Systemrechner geschaltet werden. Dieser Rechner steht seinerseits in Verbindung mit dem Cameo-System und bekommt seine Anweisungen zur Parameterverstellung während eines automatisierten Versuchslaufes von dort.



Bild 10: Prüfstand mit KFO-System zur Brennverfahrensentwicklung

7. Ausblick

Die Brennverfahrensentwicklung für moderne Motoren wird zukünftig durch den Einsatz von KFO-Systemen unterstützt werden können. Setzt man voraus, daß man für einen Motor mit 4 Verstellparametern auf konventionellem Wege ca. 1,5 Jahre Grundsatzuntersuchungen an einem Entwicklungsprüfstand durchführen muss, dann würden sich bei einer Parameteranzahl von 6 rechnerisch etwa ein Aufwand von 13 Jahren ergeben. Dies könnte der Einsatz von DOE-Verfahren auf geschätzte 3 bis 4 Jahre reduzieren. Den großen Vorteil aber verspricht die vollautomatisierte Abarbeitung der Versuchsläufe im 24-Stunden-Online-Betrieb, die die Erfüllung der Entwicklungsaufgaben in der gewünschten Zeit von 1,5 Jahren wieder möglich macht.

Der vollautomatisierte KFO-Prüfstand ist allerdings sowohl vom Invest als auch von der Personalbetreuung her deutlich teurer (ca. Faktor 2). Zusätzlich ist der Grad der Komplexität deutlich höher – die notwendigen Wartungsarbeiten sind umfangreicher und zeitintensiver.

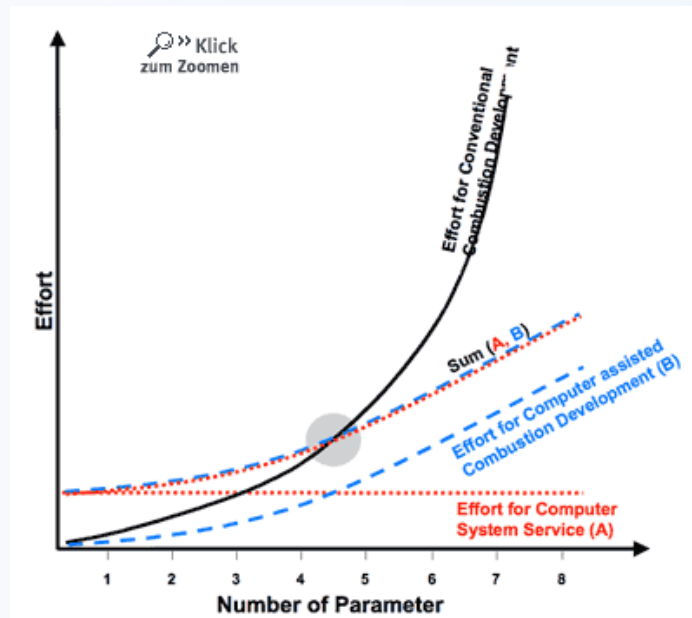


Bild 11: Qualitative Effektivitätskurve beim Einsatz eines KFO-Systems in der Brennverfahrensentwicklung

Deshalb wird sich sowohl unter Zeit- als auch unter Kostengesichtspunkten ein „Break Even-Point“ einstellen, ab welchem der Einsatz einer rechnergestützten Brennverfahrensentwicklung sinnvoll bzw. unerlässlich ist. Bild 11 zeigt, daß dieser Punkt etwa bei Aufgabenstellungen mit 4 bis 5 Verstellparametern liegen wird. Das vorgestellte FVV-Projekt wird genauere Aussagen zur Effektivität des Einsatzes der KFO-Systeme in der Brennverfahrensentwicklung erarbeiten.

Literatur

1. Market for Engineering Services in Engine Development Mercer Management Consulting 10/2003
2. AVL Cameo Adaptive DOE Gschweitl, Pflügl, Fortuna, Leithgöb DOE-Tagung Berlin 12/2001
3. Effiziente Motorapplikation mit lokalen linearen neuronalen Netzen Martini, Voß, Töpfer, Isermann MTZ 2003 S.406
4. Statistische Versuchsplanung für die Online-Optimierung von Verbrennungsmotoren Bredenbeck MTZ 1999 S.740
5. Verbesserung des Kraftstoffverbrauchs von Dieselmotoren durch den Einsatz eines rechnergestützten Kennfeldoptimierungssystems Steinbrink, Uberschär, Kopp, Eifler MTZ 2002 S.926 und S.1052