

Modellbasierte Online-Optimierung moderner Verbrennungsmotoren

Teil 2: Grenzen des fahrbaren Suchraums

Der erste Teil dieses zweiteiligen Beitrags stellte die Basis des mbminimize-Algorithmus vor, der von der Universität Tübingen in Zusammenarbeit mit der BMW Group zur modellbasierten Online-Optimierung von Verbrennungsmotoren entwickelt wurde. Der vorliegende Artikel beschreibt die Erweiterungen hinsichtlich der Behandlung von Motorlimits wie zum Beispiel Motorklopfen. Den Schwerpunkt stellen Modelle für Motorlimits dar, die es erlauben, den Suchraum sukzessive und kontrollierbar einzuschränken.

1 Einführung

In den vergangenen Jahren wurde die Zahl der Einstellparameter des Motors drastisch erhöht, um den Anforderungen seitens des Gesetzes und seitens der Kunden gerecht zu werden. Zur Kalibrierung der Motorsteuergeräte etablierte sich die Methode der Offline-Optimierung, die eine Trennung zwischen Prüfstandsbetrieb und rechnergestützter Datenauswertung verfolgt [1], [2] und [3].

Automobilhersteller streben heute die vollautomatisierte Motorkalibrierung direkt am Prüfstand an. Bereits existente Online-Optimierungsverfahren sind das Cameo-System [5] und das Vega-System [6]. Im ersten Teil dieses Beitrags [4] wurde der *mbminimize*-Algorithmus als Online-Optimierungsalgorithmus eingeführt. Die zugrunde liegende Idee ist die Ausnutzung der bei Messungen gewonnenen Information für den weiteren Prozess. Dieses Vorgehen ist als Aktives Lernen oder Query bekannt. Aus Zielfunktionsmodellen wird der Informationsgewinn bestimmt, der durch eine neue Messung erreichbar ist. Punkte, die dieses so genannte Querykriterium maximieren, werden als nächstes am Prüfstand vermessen.

Motorlimits werden in Offline-Optimierungssystemen meist durch Modellbildung und den dadurch eingeschränkten Suchraum behandelt. Die manuelle Verifikationsmessung stellt sicher, dass wider Erwarten nichtfahrbare Optimalkandidaten erkannt werden und somit kein Motorschaden auftritt. Anders ist dies bei der Optimierung des Motors direkt am Prüfstand. Die bisher bekannten Verfahren

zur Suchraumeinschränkung erscheinen einerseits zu restriktiv und andererseits zu wenig mit dem eigentlichen Online-Optimierungsverfahren verschmolzen. Dieser Beitrag beschreibt die Limitbehandlung innerhalb des *mbminimize*-Algorithmus. Sie besteht aus einer kontrollierten Reaktion auf Limitverletzungen und einer robusten Limitmodellierung. In **Bild 1** ist exemplarisch die Möglichkeit einer geometrischen Suchraumeingrenzung gezeigt. Hier wurde zur reinen sternförmigen Hülle eine steuerbare Restriktivität ergänzt, die der Tatsache gerecht werden soll, dass nahe bestimmter Suchraumgrenzen oft sehr gute Verbrauchs- und Abgaswerte erzielt werden.

2 Klassifikation der Limitverletzungen

Die wichtigste Anforderung an eine Limitbehandlung ist die kontrollierte Reaktion auf erkannte Limitverletzungen. Mit einer robusten Verstellstrategie muss der Motor möglichst schnell zurück in fahrbare Bereiche gesteuert werden. Um weitere Limitverletzungen nach Möglichkeit zu vermeiden, ist es notwendig, den fahrbaren Suchraum möglichst genau zu identifizieren. Die Optimierung des Zielfunktionsmodells und der Prozess des aktiven Lernens werden dadurch zu Optimierungsproblemen mit eingeschränktem Suchraum.

Ein kontinuierliches, reellwertiges Minimierungsproblem in d Dimensionen mit beschränktem Suchraum ist durch die Angabe einer Zielfunktion f und eines Suchraums $S \subset \mathbb{R}^d$, der durch lineare und

Die Autoren



Dipl.-Phys. Kosmas Knödler war wissenschaftlicher Angestellter am Lehrstuhl für Rechnerarchitektur der Universität Tübingen.



Dr. Jan Poland war wissenschaftlicher Angestellter am Lehrstuhl für Rechnerarchitektur der Universität Tübingen.



Dipl.-Ing. Thomas Fleischhauer arbeitet als Ingenieur und Algorithmenentwickler bei der BMW Group.



Dr.-Ing. Alexander Mitterer arbeitet als Ingenieur und Algorithmenentwickler bei der BMW Group.



Dipl.-Ing. Stephan Ullmann ist Doktorand bei der BMW Group im Bereich Motorentwicklung.



Prof. Dr. Andreas Zell leitet den Lehrstuhl für Rechnerarchitektur der Universität Tübingen.

1 Einführung

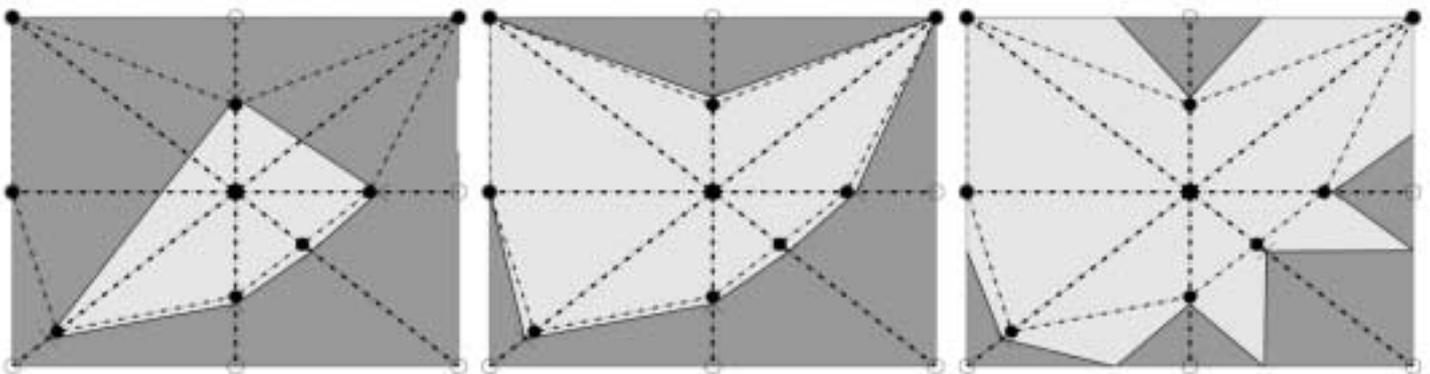


Bild 1: Von einem Zentralpunkt aus werden alle Punkte des Anfangsdesigns sternförmig angefahren. Große Punkte kennzeichnen die dabei aufgetretenen Limitverletzungen, der dunkelgraue Bereich den nichtfahrbaren Suchraum. Von links nach rechts nimmt die Restriktivität ab

Figure 1: The dotted lines show the paths from the central point to all points of the initial design. The fat marks represent limit violations, that are used afterwards to construct the dark grey labelled infeasible search space. The restrictivity is reduced from left to right

nichtlineare Funktionen begrenzt ist, definiert, Gl. (1).

$$\begin{aligned} \min_{\underline{x}} f(\underline{x}), \quad f: S \rightarrow \mathbb{R}, \quad \underline{x} \mapsto f(\underline{x}) \\ \underline{x}_{min} \leq \underline{x} \leq \underline{x}_{max} \\ A \cdot \underline{x} \leq \underline{b}, \\ c^i(\underline{x}) \leq 0, \quad i = 1, \dots, n \end{aligned} \quad \text{Gl. (1)}$$

Durch die Vektoren \underline{x}_{min} und \underline{x}_{max} , die physikalischen Grenzen der Einstellparameter, ist S auf einen Hyperkubus begrenzt. Die Matrix A und der Vektor \underline{b} definieren statische lineare Grenzen, die Funktionen $c(\underline{x})$ nichtlineare Grenzen. Beispiele für eine Zielfunktion f sind der zu minimierende Kraftstoffverbrauch oder das zu maximierende Drehmoment des Motors. Lineare Limits entsprechen funktionalen Abhängigkeiten bestimmter Motorparameter untereinander. Standardbeispiele für nichtlineare Limits sind das Motorklopfen, die Laufruhe oder die Abgastemperatur. Der Verlauf der Funktionen $c(\underline{x})$ ist vor Beginn des Optimierungsprozesses nur sehr ungenau oder überhaupt nicht bekannt. Im günstigsten Fall können Erfahrungswerte von einer früheren auf die neue Motorgeneration übertragen werden. Somit stellt die Behandlung dieser Limits eine besondere Herausforderung für ein System zur On-line-Optimierung dar.

Man kann Limits in drei Hauptklassen einteilen: die statischen und die dynamischen nichtlinearen Limits, wobei sich letztere weiter in harte und weiche Limits

aufspalten. Die Bezeichnung dynamisch soll hier andeuten, dass sich das System Informationen über diese Limits während des Prozesses dynamisch erarbeiten und somit die verwendeten Modelle zur Suchraumeinschränkung nach und nach verfeinern muss. Hart beziehungsweise weich bedeuten hohes beziehungsweise relativ niedriges Risiko hinsichtlich eventuellen Motorschäden.

Klasse 1: Statische (nicht-)lineare Motorlimits

Bereits vor Beginn des Optimierungsprozesses sind statische, also im Verlauf des Optimierungsprozesses unveränderliche, lineare und nichtlineare Grenzen des Suchraums bekannt. Ohne Modellbildung können diese Limits direkt während der Optimierung berücksichtigt werden.

Klasse 2: Harte dynamische Motorlimits

Klasse-2-Limits schränken einzelne Dimensionen des Suchraums ein. Das Standardbeispiel ist das Motorklopfen, das meist durch eine zu frühe Zündung, also einen zu großen Zündwinkelwert, hervorgerufen wird. Die kritische nichtlineare Schwelle ist als Funktion der übrigen $d-1$ Parameter bestimmbar, Gl. (2).

$$L: [0, 1]^{d-1} \rightarrow [0, 1] \quad \text{Gl. (2)}$$

Der ursprüngliche Hyperkubus wird durch diese Funktion entweder in der positiven oder der negativen Richtung der d -ten Dimension (dies sei hier die Zündwinkeldimension) eingeschränkt.

Betrachtet man die positive Richtung und ist $c(\underline{x})$ aus Gl. (1) definiert durch Gl. (3) und gilt zusätzlich $c(\underline{x}^i) > 0$, so liegt bei \underline{x}^i eine Limitverletzung vor.

$$c(\underline{x}) := x_d - L(x_1, \dots, x_{d-1}) \quad \text{Gl. (3)}$$

Durch die geringe Zahl an Messpunkten laufen Modelle für diese Limitklasse in Gefahr, Suchraum unkontrolliert als nicht-fahrbar zu deklarieren, Bild 1 links. In Abschnitt 3.2 werden Konfidenzmodelle und Hüllenmodelle beschrieben, deren Restriktivität sehr gut steuerbar ist.

Klasse 3: Weiche dynamische Motorlimits

Weiche dynamische Motorlimits sind Suchraumgrenzen, die durch Schwellen für sekundäre Zielfunktionen, wie zum Beispiel die Emissionswerte, definiert sind. Analog zur primären Zielfunktion f sind die Funktionen, die von allen Motorparametern abhängen können. Klasse-3-Limits werden durch eine kritische Schwelle L_0 und eine Funktion $L(\underline{x})$ der Motorparameter \underline{x} beschrieben. Ist die Ungleichung, Gl. (4), erfüllt, so liegt bei \underline{x}^i eine Limitverletzung vor.

$$c(\underline{x}^i) := L_0 - L(\underline{x}^i) > 0 \quad \text{Gl. (4)}$$

Bei jeder Messung am Prüfstand wird die entsprechende Größe L gemessen, wodurch relativ viele Daten zur Modellbildung bereit stehen. Weitere Beispiele für Klasse-3-Limits sind die Laufruhe, gemessen an der Varianz des indizierten Mitteldrucks im Zylinder, und die Abgastempera-

3.2.1 Modelle für Klasse-2-Limits

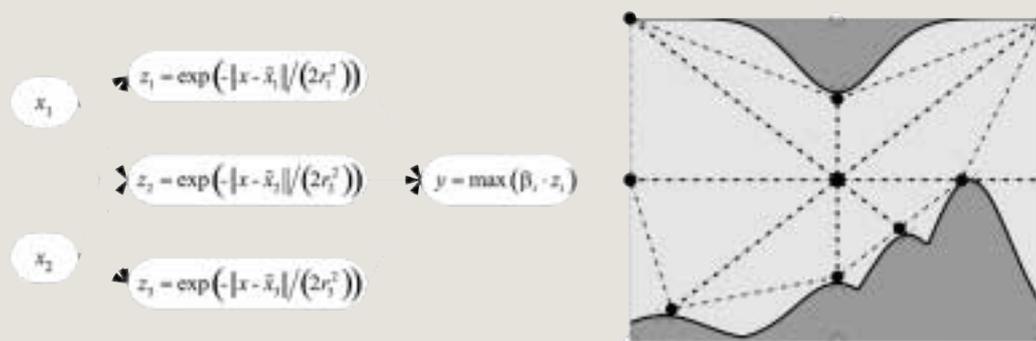


Bild 2: Links: Beispiel für ein RBF-max-Netz. Rechts: Zwei RBF-max-Netze als Modelle für zwei Limits in positive und negative Richtung der y -Dimension. Die dunkelgrauen Flächen repräsentieren den nichtfahrbaren Suchraum

Figure 2: Left: An example for an RBF-max-Network. Right: Two RBF-max-Networks as models for two limits. The dark grey areas represent the infeasible search space

3.2.1 Modelle für Klasse-2-Limits

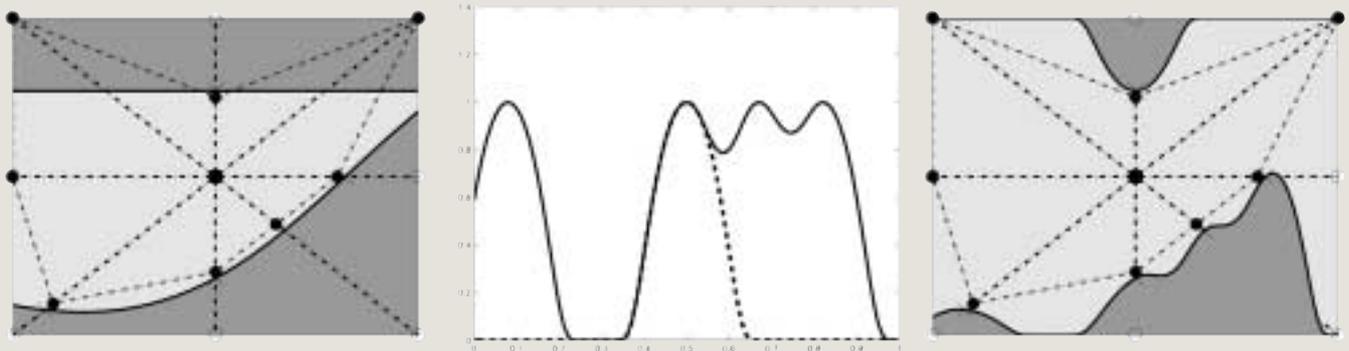


Bild 3: Links: Die beiden Regressionsmodelle. Mitte: Die Werte der Konfidenzterme $\text{conf}(x)$. Rechts: Visualisierung der nichtfahrbaren Bereiche, wie sie durch zwei Konfidenznetze bestimmt sind. Sie berechnen sich aus Gl. (5) als Produkt aus $\text{conf}(x)$ und $h(x)$
 Figure 3: Left: The regression models. Middle: The values of the confidence terms $\text{conf}(x)$. Right: The infeasible regions of the search space defined by two confidence nets. They are calculated from Eq. (5) as product of $\text{conf}(x)$ and $h(x)$

tur. Geeignete Modelle für diese Limitklasse sind Regressionsmodelle. Diese werden ebenfalls in Abschnitt 3.2 diskutiert.

3 Einflüsse der Limitbehandlung auf die Online-Optimierung

Funktionen des mbminimize-Algorithmus, die durch Berücksichtigung von Motorlimits zu ergänzen beziehungsweise anzupassen sind, sind die Limitbehandlung selbst sowie die Funktionen Query und Optimierung. In den letzten beiden werden die in der Limitbehandlung ermittelten Informationen über den fahrbaren Suchraum ausgenutzt, um bezüglich der Limitmodelle fahrbare Punkte auszuwählen.

Der mbminimize-Algorithmus bietet die Möglichkeit, mit einer robusten sternförmigen Verstellstrategie zu arbeiten. Optional kann diese um eine Optimierung des Verstellweges ergänzt werden, bei der die bekannten nichtfahrbaren Bereiche umfahren werden (vgl. Abschnitt 4) und nur im Falle einer Verletzung über den sicheren Zentralpunkt verfahren wird. Bereits während der Abarbeitung eines Anfangsdesigns reagiert die Funktion Limitbehandlung auf erkannte Limitverletzungen und berechnet Modelle zur Definition des nichtfahrbaren Suchraums.

3.1 Limitbehandlung

Die Limitbehandlung beinhaltet das Modul Limitüberwachung, in dem Signale des Prüfstands über Limitverletzungen

Ein Durchbruch

in der Technologie von Lecktest und Durchflusstest



Stehen Sie unter Druck, da Sie Produktivität erhöhen, Qualität verbessern und Kosten reduzieren müssen ?
– Dann brauchen Sie den Vector !

LEISTUNGSSTÄRKER – Der Vector bringt die Leistung, die Ihnen hilft: bis zu 10 getrennte Testkanäle und die Möglichkeit, eine große Bandbreite von Testarten in einem einzelnen Gerät zu vereinen.

SCHNELLER – Der Vector sprintet für Sie: In seinem ansprechenden Design steht der bisher einzigartige Advanced Leak Detector (ALD) in den Startlöchern, um Undichtigkeiten wesentlich schneller zu entdecken als bisher in der Branche möglich.

FLEXIBLER – Mit dem Vector sind Sie heute und in Zukunft flexibel. Leicht zugängliche Plug-in Hardware, modulare Software und die Möglichkeit, eine unbegrenzte Anzahl von Test-Konfigurationen zu speichern.

Setzen Sie sich noch heute mit uns in Verbindung und lassen Sie den Vector für sich arbeiten.



VECTOR

Uson GmbH Hellersbergstrasse 6
 41460 Neuss Germany
 Tel : 02131 170150 Fax : 02131 1701520
 vector@uson.com www.usonvector.com

3.2.1 Modelle für Klasse-2-Limits

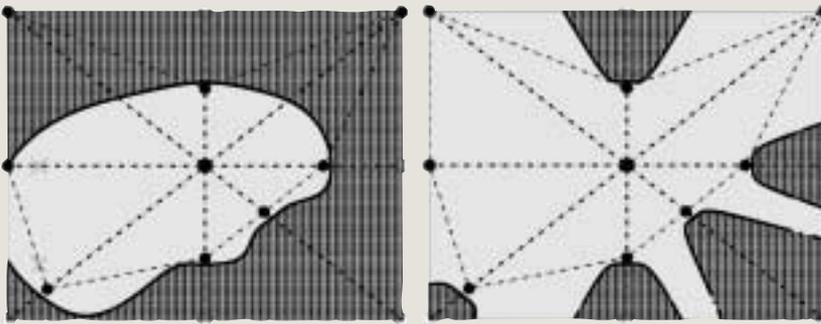


Bild 4: Links: Das Kartoffelmodell für Klasse-2-Limits. Die tatsächlich gemessenen Verletzungspunkte werden genau wiedergegeben.

Rechts: Das deformierte Kartoffelmodell mit steuerbarer Restriktivität

Figure 4: left: The potato model as a model for type 2 limits. The measured limit violations are represented exactly. Right: The deformed potato model with well controlled restrictivity

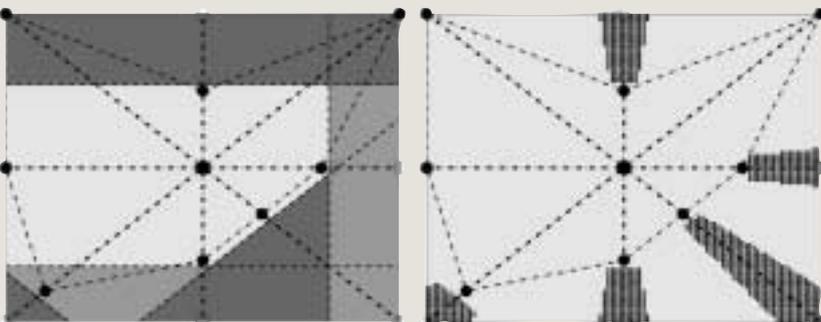


Bild 5: Links: Der Hyperkubus wird mithilfe von Facetten beschnitten.

Rechts: Das Ecken- beziehungsweise Kantenabschneideverfahren mit steuerbarer Restriktivität

Figure 5: Left: The hyper cube is cut by facets. Right: The edge cutting method with well controlled restrictivity

3.2.2 Modelle für Klasse-3-Limits

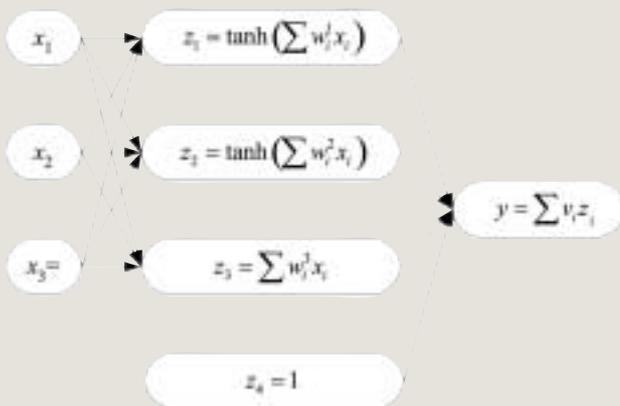


Bild 6: Ein Modell für ein Feed-Forward-Netzwerk: Die Eingabeschicht besteht aus zwei Eingabeneuronen und einem On-Neuron, die verdeckte Schicht aus zwei tanh-, einem linearen und einem On-Neuron, die Ausgabeschicht aus einem linearen Neuron

Figure 6: A model for a feed-forward network: The input layer consists of two input neurons and one on-neuron, the hidden layer of two tanh-neurons, one linear neuron and one on-neuron, and the output layer of one linear neuron

ausgewertet werden. Sollte eine Limitverletzung erkannt worden sein, so wird ein zuvor passierter Zwischenpunkt als Rückzugspunkt an die Prüfstandsautomatik geliefert. Hystereseeffekte werden durch den sukzessiven Rückzug in Richtung eines sicheren Zentralpunkts abgefangen.

Das Ziel ist eine möglichst genaue Identifikation des fahrbaren Suchraums. Ein erkanntes Limit wird daher in zwei Schritten vermessen: Im ersten erfolgt die erneute Annäherung mit deutlich reduzierter Schrittweite. Tritt zum zweiten Mal eine Limitverletzung auf, so wird der aktuelle Punkt als Grenzpunkt zwischen fahrbarem und nichtfahrbarem Bereich deklariert und zur Modellbildung für entsprechende Limits herangezogen. Im zweiten Schritt, der Fahrtplanung, wird eine 3-zurück-2-vor-Strategie mit ebenfalls kleiner Schrittweite verfolgt. Dadurch wird ein Punkt vermessen, der hinreichend nah am nichtfahrbaren Bereich und somit am gewünschten Zielpunkt liegt.

3.2 Modellierung der Suchraumgrenzen

Wie in [4] beschrieben, wird bei der Modellierung von Zielgrößen im Allgemeinen ein Regressionsansatz verfolgt. Dabei kommt es auf die globale Modellgüte und weniger auf die exakte Wiedergabe der gemessenen Funktionswerte an. Für die weichen Motorlimits der Klasse 3 trifft dies auch zu, durch die deutlich geringere Punktezahl ist die Situation für Klasse 2 Limits aber eine andere. Die wenigen Verletzungspunkte sollen durch das Modell sehr genau wiedergegeben werden, um weitere Limitverletzungen in diesen Bereichen zu vermeiden.

Die Modelle für die beiden Klassen müssen also deutlich unterschiedliche Anforderungen erfüllen. Für Klasse-2-Limits eignen sich Konfidenzmodelle, von denen hier RBF-max-Netze und Konfidenznetze betrachtet werden, und verschiedene Hüllenmodelle. Zur Modellierung von Limits der Klasse 3 kommen Regressionsmodelle wie zum Beispiel neuronale Netze [7] zum Einsatz.

3.2.1 Modelle für Klasse-2-Limits

Sternförmige Hülle:

Wie Bild 1 zeigt, hat die reine sternförmige Hülle zwar die Eigenschaft, gemessene Limitverletzungen genau wiederzugeben, allerdings werden große Bereiche zwischen den Verletzungspunkten unbegründet verworfen. Durch Ergänzung eines Rasters auf dem Rand des Hyperkubus kann diese Schwachstelle behoben werden.

3.2.1 Modelle für Klasse-2-Limits

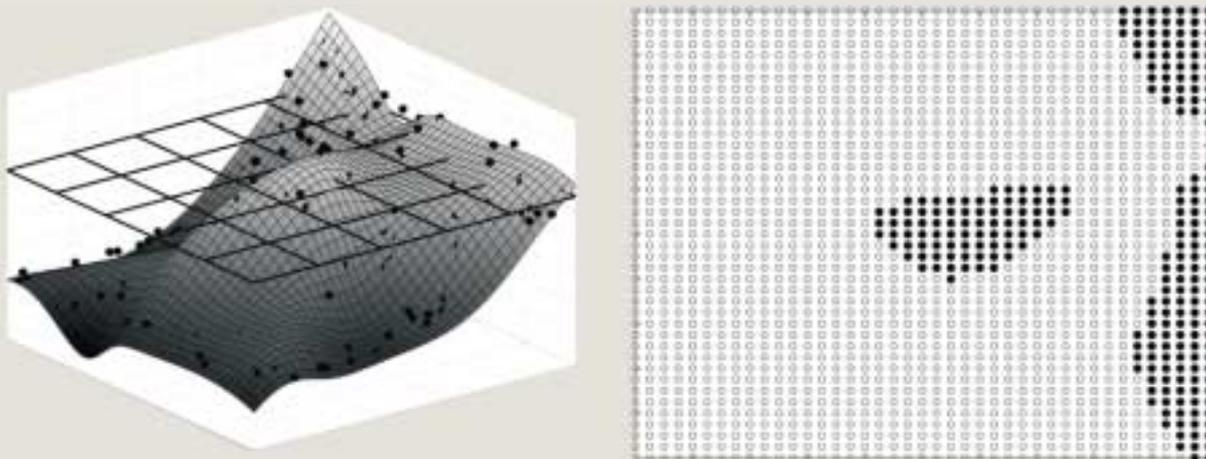


Bild 7: Links: Regressionsmodell für ein Klasse-3-Limit $L(x)$ (zum Beispiel Abgastemperatur). Das schwarze Gitter stellt die kritische, hier konstante Temperaturschwelle L_0 dar.

Rechts: Die schwarzen Punkte grenzen den nichtfahrbaren Bereich ab

Figure 7: Left: Regression model for a type 3 limit (e.g. exhaust temperature).

The black mesh represents the critical temperature threshold L_0 .

Right: The black points show the infeasible region of the search space

4 Optimierte Fahrtplanung

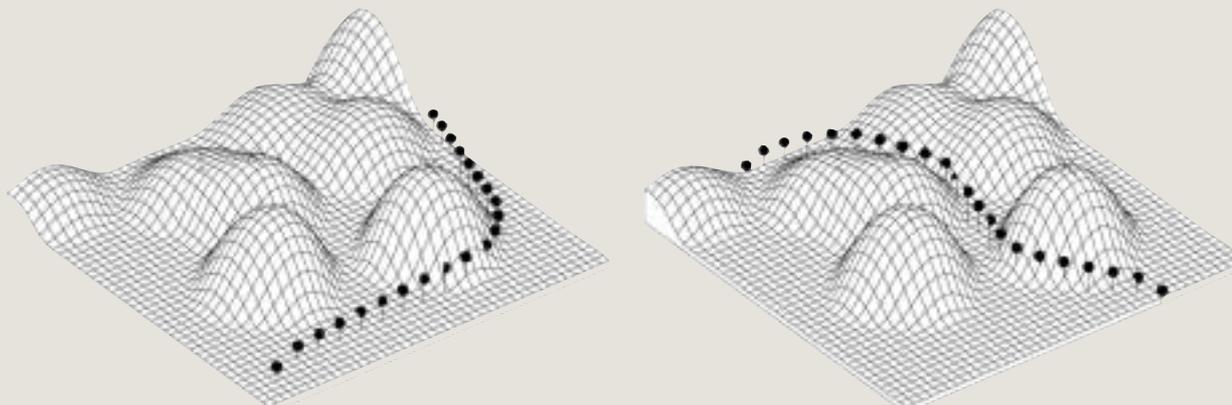


Bild 8: Die schwarzen Punkte kennzeichnen zwei optimierte Verstellwege durch ein Limitgebirge

Figure 8: The black dots label two optimized paths passing through a limit landscape

Konfidenzmodelle:

Eine Suchraumgrenze wie das Motorklopfen kann dadurch modelliert werden, dass nach Gl. (3) eine Funktion des kritischen Zündwinkels in Abhängigkeit der restlichen $d-1$ -Parameter bestimmt wird. Konfidenzmodelle zeichnen sich dadurch aus, dass sie in Bereichen, in denen Messdaten vorliegen, sehr restriktiv sind, während sie in Bereichen ohne Daten keine Aussage machen.

Das RBF-max-Netz beruht, wie der Name bereits andeutet, auf einem RBF-Netz [7], wobei die Aktivierungsfunktion des Ausgabeneurons das Maximum seiner gewichteten Eingaben berechnet. **Bild 2** zeigt links ein Beispielnetz und rechts den Verlauf zweier RBF-max-Netze für Limitverletzungen χ^i .

Konfidenznetze lassen sich dagegen schreiben als ein Produkt aus einem Regressionsmodell $h(\underline{x})$ für die Suchraum-

grenze und einem Konfidenzterm $conf(\underline{x})$, Gl. (5).

$$g(\underline{x}) = conf(\underline{x}) \cdot h(\underline{x}) \quad \text{Gl. (5)}$$

Der Konfidenzterm hat die Eigenschaft, dass seine Werte für Verletzungspunkte \underline{x}^i beziehungsweise für Punkte nahe der \underline{x}^i bei Eins, beziehungsweise nahe Eins liegen. Für weiter weg befindliche Punkte verschwindet der Wert des Konfidenz-

terms. Im linken Teil von **Bild 3** sind die Regressionsmodelle, im mittleren die Konfidenzterme und im rechten die daraus gewonnenen Konfidenznetze für zwei Limits dargestellt.

Sowohl die RBF-max-Netze als auch die Konfidenznetze schränken den Suchraum deutlich kontrollierter ein als die reine sternförmige Hülle in Bild 1 links. Die Restriktivität kann jeweils über einen Parameter angepasst werden. RBF-max-Netze und Konfidenznetze können allerdings auch Bereiche im Suchraum definieren, die zwar fahrbar, allerdings auf einer geraden Verbindung zwischen zwei Punkten nicht erreichbar sind. Mithilfe des bereits angesprochenen optimierten Verstellweges können solche Punkte dennoch erreicht werden, siehe Abschnitt 4.

Hüllenmodelle:

Hüllenmodelle eignen sich ebenfalls sehr gut zur Darstellung harter Limits. Sie sind ideal in Zusammenhang mit einer sternförmigen geradlinigen Verstellstrategie. Gegenüber Konfidenzmodellen haben Sie den Vorteil, dass sie verschiedene Klasse-2-Limits gleichzeitig berücksichtigen können und keine Bereiche zulassen, die vom Zentralpunkt aus nicht geradlinig erreichbar sind. Hüllenmodelle wie die reine sternförmige Hülle in Bild 1 links oder konvexe Hüllen beschneiden den Suchraum zu unkontrolliert. Auch hier ist eine steuerbare Restriktivität wünschenswert. **Bild 4** links zeigt ein „Kartoffelmodell“, das wiederum mithilfe parametrierbarer Konfidenzterme zu der im rechten Teil des Bildes dargestellten Suchraumgrenze verändert wurde.

Ein Ecken- beziehungsweise Kantenabschneideverfahren ist in **Bild 5** visualisiert. Zunächst werden die Facetten zur Beschneidung der Ecken und Kanten des Hyperkubus berechnet, die senkrecht zur Verbindungsstrecke Verletzungspunkt-Zentralpunkt durch die Verletzungspunkte führen. Die dunkelgrauen Flächen im linken Teil zeigen die dadurch abgeschnittenen Bereiche. Um das Verfahren weniger restriktiv zu gestalten, werden nur Teile der Hyperebenen, die nahe des tatsächlichen Verletzungspunkts liegen berücksichtigt. Wie im rechten Teil von Bild 5 verdeutlicht, „krümmen“ sich die Facetten nach außen.

3.2.2 Modelle für Klasse-3-Limits

In diesem Abschnitt werden Modelle für weiche Motorlimits wie zum Beispiel die Laufruhe und die Abgastemperatur beschrieben. Die wahre Funktion wird in Abhängigkeit aller Motorparameter als

Regressionsmodell approximiert. Verwendet werden insbesondere Polynommodelle und Neuronale Netze [7]. In **Bild 6** ist ein Beispielmodell für ein Feed-Forward-Netzwerk *net* mit einer verdeckten Schicht von Neuronen dargestellt. Das weiche Motorlimit $L(x)$ in Gl. (4) wird also durch ein neuronales Netz modelliert. Gilt das Ungleichheitszeichen in Gl. (4), so liegt eine Verletzung des Limits in positiver Richtung vor.

Bild 7 links zeigt den dadurch approximierten Funktionsverlauf für ein Klasse-3-Limit und die dazugehörige kritische Schwelle L_0 . Dabei wurde ein neuronales Modell mithilfe der schwarz gezeichneten Messwerte trainiert und an einem Raster ausgewertet. Bereiche des Suchraums, in denen die Funktion oberhalb der Schwelle verläuft, definieren den nichtfahrbaren Bereich, schwarze Punkte im rechten Teil von Bild 7.

Probleme bei der Behandlung von Klasse-3-Limits sind einerseits die Trägheit, mit der sich die Messgrößen ändern (zum Beispiel Abgastemperatur), andererseits können Klasse-3-Limits den Suchraum in ein nicht zusammenhängendes fahrbares Gebiet verwandeln. Um nichtfahrbare Inseln umfahren zu können, ist auch hier ein optimierter, gekrümmter Verstellweg hilfreich.

4 Optimierte Fahrtplanung

Wie bereits weiter oben erwähnt und wie in den Abbildungen zu den verschiedenen Limitmodellen ersichtlich, können durch die verwendeten Modelle Bereiche des Suchraums entstehen, die zwar noch als fahrbar deklariert sind, die allerdings mit der geradlinigen Verstellstrategie nicht erreichbar sind. Es kann also wünschenswert sein, von der geradlinigen Fahrt abzuweichen und die Annäherung an dort befindliche Messpunkte auf einem im Raum gekrümmten Verstellweg durchzuführen. Mithilfe klassischer Optimierungsalgorithmen für allgemeine Probleme der nichtlinearen Programmierung (SQP-Verfahren) können Verstellwege unter Ausnutzung der aktuell vorliegenden Limitmodelle berechnet werden, die auch das Vordringen in diese Bereiche des Suchraums erlauben. **Bild 8** zeigt zwei mögliche optimierte Verstellwege, die sich durch ein Limitgebirge schlängeln.

5 Zusammenfassung

In diesem Beitrag wird beschrieben, welche Art von Limitbehandlung in den mbminimize-Algorithmus integriert ist. Sie besteht insbesondere aus einer kontrollierten Reaktion auf Limitverletzungen

und aus einer robusten Limitmodellierung. Der in dieser Form erweiterte Algorithmus wurde mithilfe zahlreicher Testzenarien überprüft. Sowohl die Verstellstrategien, insbesondere die Optimierung des Verstellweges, als auch die beschriebenen Limitmodelle haben sich dabei als sehr leistungsfähig für den automatisierten Prüfstandeseinsatz gezeigt. Darüber hinaus wurden bereits erste Versuche am realen System durchgeführt, die sehr vielversprechend sind.

Diese Arbeit wurde vom BMBF gefördert (Kennziffer 01 IB 805 A/1).

Literaturhinweise

- [1] Mitterer, A.; Zuber-Goos, F.: Modellgestützte Kennfeld-Optimierung – ein neuer Ansatz zur Steigerung der Effizienz in der Steuergeräteeaplikation. In: ATZ 102 (2000), Nr. 3
- [2] Schüler, M.; Hafner, M.; Isermann, R.: Einsatz schneller neuronaler Netze zur modellbasierten Optimierung von Verbrennungsmotoren, Teil 1: Modellbildung des Motor- und Abgasverhaltens. In: MTZ 61 (2000), Nr. 10
- [3] M. Schüler, M.; Hafner, M.; Isermann, R.: Einsatz schneller neuronaler Netze zur modellbasierten Optimierung von Verbrennungsmotoren, Teil 2: Stationäre und dynamische Optimierung von Verbrauch und Emissionen. In: MTZ 61 (2000), Nr. 11
- [4] Poland, J.; Knödler, K.; Zell, A.; Fleischhauer, Th.; Mitterer, A.; Ullmann, S: Modellbasierte Online-Optimierung moderner Verbrennungsmotoren, Teil 1: Aktives Lernen, In: MTZ 105 (2003), Nr. 5
- [5] Gschweilt, K.; Pfluegl, H.; Fortuna, T.; Leithgoeb, R.: Steigerung der Effizienz in der modellbasierten Motorenanwendung durch die neue Cameo-Online-DoE-Toolbox. In: ATZ 103 (2001), Nr. 7/8
- [6] Bredenbeck, J.: Statistische Versuchsplanung für die Online-Optimierung von Verbrennungsmotoren. In: MTZ 60 (1999), Nr. 11
- [7] Zell, A.: Simulation Neuronaler Netze, Addison-Wesley, Bonn, 1994

For an English version of this article, see **MTZ worldwide**
 For information on subscriptions, just call us or send an email or fax.



MTZ Vieweg Verlag · Postfach 1546 · D-65172 Wiesbaden
 Hotline 06 11778 78-151 Fax 06 11778 78-423
 email: vieweg.service@bertelsmann.de



Die neuen Seiten des Controlling

Fundiertes Know-How

Die neue Fachzeitschrift „Controlling & Management“ ist schnell, aktuell und lösungsorientiert und bietet für jeden Bedarf die richtige Informationstiefe.

Magazin

Der neue Magazinteil liefert einen umfassenden Überblick über Themen, Trends, Tools, Unternehmen und Strategien, Köpfe und Meinungen.

Praxis

Controlling & Management „Praxis“ beschreibt fundiert Methoden, Instrumente und neue Entwicklungen des Controlling und enthält Praxisberichte zu aktuellen Themen.

Wissenschaft

Controlling & Management „Wissenschaft“ liefert den State of the Art aus Controlling-Forschung und Wissenschaft.

Nachgewiesene Kompetenz

Der renommierte Herausgeber Prof. Dr. Jürgen Weber bringt die Experten der Community zusammen.

zfcM-online

Mit einem Klick alles im Blick: Nutzen Sie unser Volltextarchiv im Internet: www.zfcM.de

Ja, ich möchte **Controlling & Management** testen. Bitte schicken Sie mir die nächste Ausgabe, damit ich sie in Ruhe prüfen kann. Wenn Sie dann nichts mehr von mir hören, möchte ich die Zeitschrift weiter beziehen: jährlicher Bezugspreis 108,00 EUR, ermäßigt 72,00 EUR (bitte Studienbescheinigung beilegen). **Controlling & Management** erscheint 6 x pro Jahr. Die Rechnungsstellung erfolgt jährlich. Wenn mir die Zeitschrift nicht gefällt, schicke ich innerhalb von 14 Tagen nach Erhalt des Heftes eine Postkarte. Das Testheft darf ich behalten. Kosten entstehen mir keine.

Name, Vorname 311 03 400

Firma, Abteilung

Straße, Postfach

PLZ, Ort

Datum X Unterschrift

Vertrauensgarantie: Dieser Auftrag kann schriftlich innerhalb von 10 Tagen nach Bestelldatum beim Gabler Verlag widerrufen werden. Zur Fristwahrung genügt die rechtzeitige Absendung des Widerrufs. Die Kenntnisnahme dieses Hinweises bestätige ich mit meiner zweiten Unterschrift.

Datum X Unterschrift

**Jetzt kostenlos testen:
Bestell-Fax: 0611.7878-423**

**Gabler Verlag
Kundenservice
Abraham-Lincoln-Str. 46
65189 Wiesbaden**

**Tel.: 06 11.78 78-615
www.zfcM.de**

