

Über einige lokal verallgemeinernde Speicher und ihre Weiterentwicklung

Teil 2: Delaunay Triangulation

One some Locally Generalizing Storage Methods and their further Development Part 2: Delaunay Triangulation

Henning Tolle

Bei der Modellierung, Steuerung und Regelung nichtlinearer Prozesse werden häufig zwei- bzw. mehrdimensionale Kennfelder eingesetzt. Sie können äußerst effektiv in lokal verallgemeinernden Speichern abgelegt werden. Der Beitrag stellt an Hand von drei Beispielen und ihren Weiterentwicklungen dar, dass sehr verschiedenartige Ansätze möglich sind und die Auswahl gemäß ihren inherenten Vor- und Nachteilen von der ins Auge gefassten Anwendung bestimmt werden sollte. Teil II behandelt als dritten Ansatz eine Methode, die von einer mathematischen Darstellung beliebig geformter Flächen im Raum inspiriert wurde und fasst die Aussagen der beiden Teile des Aufsatzes zusammen.

For the modelling, feedforward and feedback control of nonlinear processes one uses frequently two- and/or multidimensional characteristics. Such characteristics can be represented effectively by locally generalizing storage methods. By three different examples and their further development it is shown in this paper, that very different approaches are possible and that taking into account the inherent advantages and disadvantages one should choose the most appropriate method according to the envisaged application. Part II deals as a third approach with a method, which has been inspired by some mathematical technique to represent arbitrarily formed surfaces in the three dimensional space and gives also a summary of both parts of the paper.

Schlagwörter: Kennfeldspeicherung, Delaunay Triangulierung, nichtlineare Regelung, automobiltechnische Regelungen

Keywords: Storage of characteristics, Delaunay Triangulation, nonlinear control, automotive systems control

Verfügbar unter: lediglich die vom Gesetz vorgesehenen Nutzungsrechte gemäß UrhG

1 Einleitung

In Teil I wurden mit CMAC/AMS und MIAS zwei lokal approximierende Speicher und zugehörige Weiterentwicklungen vorgestellt, die insbesondere zum Online-Lernen von nichtlinearen Prozessmodellen, Steuerungen und Regelungen als zwei- oder mehrdimensionale Kennfelder bei allgemeinen technischen Prozessen geeignet sind. In diesem zweiten Teil wird das spezielle Anwendungsgebiet der Automobilelektronik aufgegriffen,

das sich dadurch auszeichnet, dass durch die Serienproduktion der Kostengesichtspunkt noch mehr im Vordergrund steht, als bei anderen industriellen Anwendungen. Spezielle Untersuchungen dazu [4] führten deshalb auf einen weiteren, aus den mathematischen Ansätzen für die Freiformflächendarstellung hergeleiteten Ansatz [6]. Im Folgenden wird über diese Methodik und einige Ergebnisse aus [6] berichtet, um dann den Aufsatz mit einer allgemeinen Zusammenfassung abzuschließen.

2 Delaunay-Triangulation für die Automobilelektronik

Kennfelder haben in der Automobilelektronik eine weite Verbreitung – siehe z. B. [4]. Die Ursachen liegen – vgl. [6] – in

- einem stark nichtlinearen Prozessverhalten, insbesondere im Motorbereich,
- zunehmenden gesetzlichen Reglementierungen, wie Abgasnormen,
- kurzen Produktentwicklungszyklen, die eine datengestützte Synthese der Prozessmodelle und Regelungen zweckmäßig machen,
- enormem Kostendruck, der preisgünstige elektronische Komponenten erzwingt,
- strikter Echtzeit mit Abtastzeiten von wenigen Millisekunden in den digitalen Systemen,
- zeitvariantem Prozessverhalten durch Alterung und Verschleiß bei hoher Produktlebensdauer.

Der heutige Trend bei Arbeitsplatzrechnern zu immer höheren Rechenleistungen und Speicherkapazitäten bei gleichzeitig rückläufigen Kosten gilt für die in Kraftfahrzeugen eingesetzten Rechnersysteme nur bedingt; aus Kostengründen werden zumindest noch zurzeit im Allgemeinen 8- oder 16-bit Prozessoren verwendet und die Größe des Programm- und Datenspeichers ist auf einige k-Byte begrenzt. Allerdings kann man von niedrigen Eingangsdimensionen der Kennfelder ausgehen, da diese für die Entwurfsingenieure stets auf ihre physikalische Plausibilität hin überprüfbar sein müssen.

Stand der Technik sind dreidimensionale Rasterkennfelder, die Messpunkte über einem regelmäßigen Rechteckgitter auftragen (Bild 1) und bei Anfragen durch bilineare Interpolation den gewünschten Kennfeldwert generieren. Probleme der Rasterkennfelder sind, dass einerseits die Erfassung geeigneter Messdaten zur Kennfeldgenerierung aufwändig ist, da die vermessenen Betriebspunkte den festgelegten Gitterpunkten möglichst nahe kommen sollten, und andererseits dies bei einer eventuell gewünschten On-line-Adaption des Kennfeldes überhaupt nicht zu erwarten ist. Bild 2 zeigt das Beispiel einer Motorkennfeldvermessung.

Man erkennt, dass die Daten keineswegs gleichmäßig in der Eingangsebene verteilt sind. Es fehlen zudem Messpunkte im Bereich mittlerer und hoher Drehzahlen bei kleinen Drosselklappenwinkelwerten, da diese Betriebspunkte stationär nicht erreicht werden, obwohl eine physikalisch sinnvolle Approximation notwendig ist, da sie im Fahrbetrieb auftreten können. Auch reduziert der Applikationsingenieur den Messaufwand bei mittleren und großen Drosselklappenwinkeln, da sich das Drehmoment dort nur unwesentlich ändert.

Die Delaunay-Triangulation ermöglicht eine direkte Anpassung an Messpunkte und Datendichte, erlaubt also eine Reduzierung des Aufwandes in der Off-line-Kennfelderstellung bei mindestens gleich guter Kennfelddarstellung und

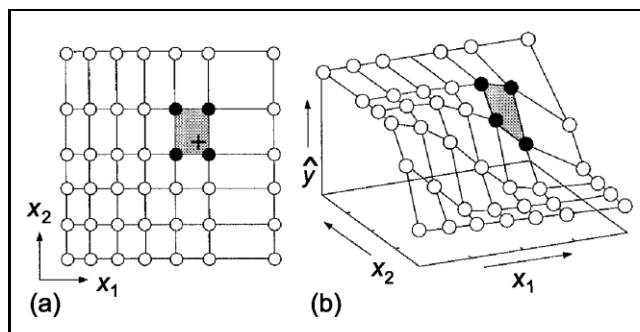


Bild 1: Prinzip des Rasterkennfelds; a) Rechteckgitter, b) darüber aufgespanntes Kennfeld; + Anfragepunkt – aus [6].

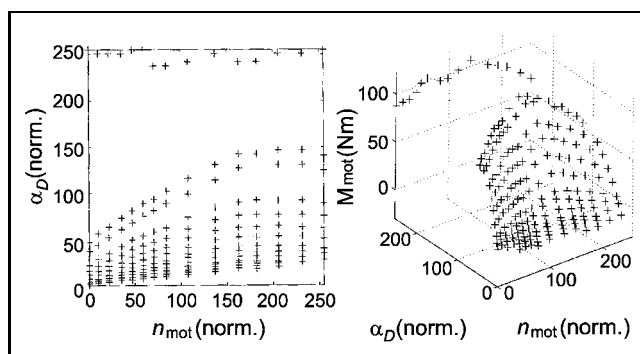


Bild 2: Ergebnisse einer Vermessung des stationären Drehmoments M_{mot} in Abhängigkeit von der normierten Motordrehzahl n_{mot} und dem normierten Drosselklappenwinkel α_D – aus [6].

genauso geringem Rechen- und Speicheraufwand in der On-line-Anwendung; bei On-line-Adaptionen sind sie flexibler als Rasterkennfelder.

Das hier nur für zwei Eingänge erläuterte, im Prinzip aber auf beliebig viele Eingänge erweiterbare Konzept, dem jedoch rechenaufwandsmäßig bei mehr als drei Eingängen eine praktische Grenze gesetzt ist, beruht auf einer Triangulierung des Eingangsraums (Bild 3) und lokaler Interpolation in den Dreiecken (Simplexen im dreidimensionalen Fall) zur Berechnung des Kennfeldwertes für einen Anfragepunkt.

Eine generelle Beschreibung der datengetriebenen Generierung von Kennfeldern mit Delaunay-Triangulierungen

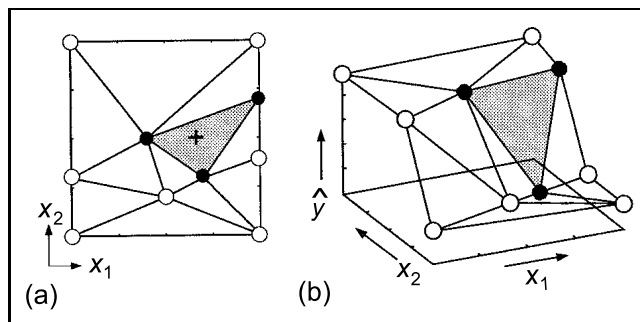


Bild 3: Eingangraumtriangulierung, zugehörige Kennfelddarstellung und Anfragepunkt + (aus [6]).

findet sich in [5]. Hier sollen nur einige wesentliche Gesichtspunkte erläutert werden, um dann in [5] noch nicht erfasste Entwicklungen aus [6] kurz darzustellen.

Die Delaunay-Triangulierung ist in gewissem Sinn eine optimale Triangulierung, die u. a. in der geometrischen Datenverarbeitung bei der Freiformflächenmodellierung – vgl. [2] – angewandt wird. Sie imitiert also keine neuronalen Vorgänge, sondern ist rein mathematisch basiert.

Nehmen wir an, wir hätten N Punkte, die die Triangulation im 2- oder 3-dimensionalen Eingangsraum beschreiben. Dann ergibt sich der geschätzte Ausgangswert $\hat{y}(\underline{x})$ für einen Anfragepunkt \underline{x} im Eingangsraum aus:

$$\hat{y}(\underline{x}) = \underline{w}^T(\underline{x}) \cdot \underline{y} \quad (1)$$

mit y_i den Ausgangswertattributen in den eintrainierten N Punkten und $\underline{w}(\underline{x})$ einem bekannten (berechenbaren) Gewichtungsvektor, der in den Eckpunkten des den Anfragepunkt umschließenden Dreiecks/Simplexes die zugehörigen baryzentrischen Koordinaten – vgl. [5] – und an allen anderen Triangulationspunkten eine Null enthält.

Die Ausgangswertattribute für die Triangulationspunkte lassen sich optimieren, da im Allgemeinen wesentlich mehr Messwerte M als Triangulationspunkte N vorliegen. Bezeichnet man mit $y_{mes,k}$ den entsprechenden Messwert, d. h. den an der Stelle $\underline{x}_{mes,k}$ nachzubildenden Funktionswert, so erhält man aus (1) das folgende überbestimmte Gleichungssystem:

$$y_{mes,k} = \underline{w}^T(\underline{x}_{mes,k}) \cdot \underline{y} \quad k = 1, 2, \dots, M \quad (2)$$

woraus im Sinne der Optimierung nach der Methode der kleinsten Quadrate (Least Squares) durch Zusammenfassung der Vektoren \underline{w} zu einer Matrix W und der Messwerte $y_{i,mes,k}$ zu einem Vektor $\underline{y}_{mes,k}$ optimale Attributwerte $y_{i,opt}$ für die N Triangulationspunkte folgen als:

$$\underline{y}_{opt} = (W^T W)^{-1} W^T \underline{y}_{mes}, \quad (3)$$

die in (1) zur günstigen Netzbeschreibung benutzt werden können.

Die zweckmäßigste Wahl der Triangulationspunkte ist ein heuristisch zu lösendes Problem. Ein konstruktiver Ansatz, der in [5] vorgestellt wurde, geht so vor:

Man wählt – bezieht man sich zur Vereinfachung auf ein Problem mit zwei Eingängen, mit je einem Minimal- und einem Maximalwert – die vier Eckpunkte des Eingangswertrechtecks als erste Triangulationspunkte und eine der zugehörigen Diagonalen als erste Aufteilung in Dreiecke. Mit den Messwerten bestimmt man dafür \underline{y}_{opt} nach (3). Als nächster einzufügender Knoten wird der Messpunkt gewählt, an dem sich die größte Abweichung von dem so gegebenen einfachen Interpolationskennfeld ergibt. Damit steigt N von 4 auf 5 und man berechnet wieder \underline{y}_{opt} aus (3), mit nun 5 statt 4 Elementen. Dies setzt man solange fort, bis die Abweichungen der Messwerte von den zugehörigen Interpolationswerten unter eine bestimmte Schranke gefallen sind, oder bis eine

maximal zulässige Zahl von Knoten erreicht ist, wie sie sich z. B. aus dem dafür verfügbaren Speicherumfang des On-line-Mikrocontrollers ergibt. Bild 4 zeigt für die in Bild 2 dargestellten Drehmoment-Messpunkte das mit 34 Triangulationspunkten generierte Delaunay-Eingangsraumnetz und das so interpolierte Kennfeld, das bezüglich der 186 Messpunkte eine Approximationsgenauigkeit von $RMSE = 1,05 \text{ Nm}$ (das sind ca. 1% bezogen auf den Maximalwert) erreicht mit

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{j=1}^M (M_{mot,j} - \hat{M}_{mot,j})^2}, \quad (4)$$

wobei $M_{mot,j}$ die gemessenen und $\hat{M}_{mot,j}$ die dem Kennfeld entnommenen Drehmomentwerte sind. Die Delaunay-Triangulierung und Kennfeldgenerierung benötigte 560 sec CPU-Zeit auf einer Ultra-Sparc-Workstation (140 MHz).

Der Netzkonfigurierungsaufwand kann durch die Betrachtung nicht aller, sondern nur lokaler Fehler (siehe [6]) bei etwas anderer Triangulationspunktwahl und etwa gleicher Fehlergröße stark vermindert werden. Bild 5 zeigt eine entsprechende Delaunay-Triangulierung mit 43 Triangulationspunkten und einem $RMSE$ von 1,08 Nm, für die auf dem Rechner nur 8 sec CPU-Zeit benötigt wird, sodass der Applikationsingenieur den Vorgang unmittelbar auf dem Rechner verfolgen kann, was für die Grundkonfigurierung der Kennfelder außerordentlich hilfreich ist.

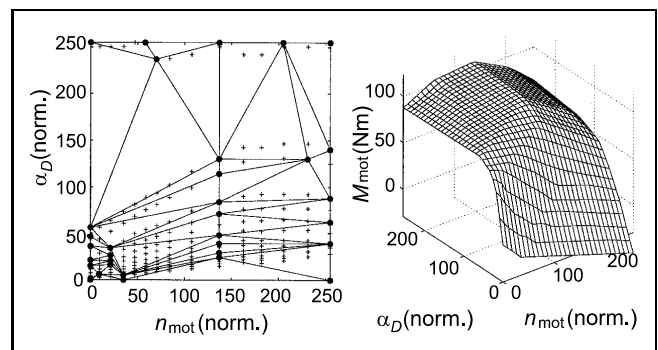


Bild 4: Delaunay-Triangulierung und resultierendes Kennfeld mit einem maximalen mittleren quadratischen Fehler von 1,05 Nm in den Messpunkten bei Benutzung von 34 Triangulationspunkten für das Drehmoment aus Bild 2 – aus [6].

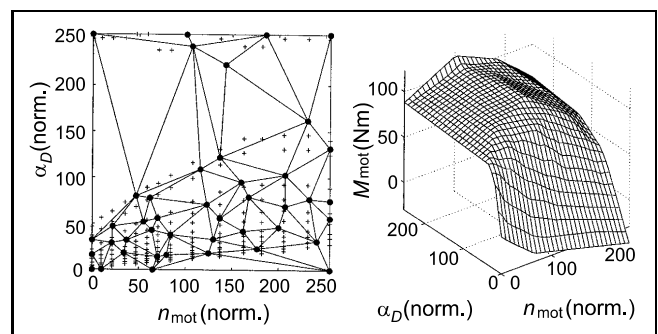


Bild 5: Alternative schnelle Netzgenerierung mit 43 Triangulationspunkten und einem $RSME$ von 1,08 Nm – aus [6].

Eine ergänzende Bearbeitung ist notwendig, weil die nicht vollständige Abdeckung des interessierenden Bereichs mit Messpunkten und der Rauscheffekt in den Messdaten eine gewisse Welligkeit des Kennfeldes und physikalisch nicht plausible Daten generieren kann, ein Problem, das nicht an der Delaunay-Methodik festzumachen ist, sondern auch bei anderen Modellierungsansätzen auftritt.

T. Ullrich schlägt dazu vor, eine Glättung über ein von ihm definiertes Maß der lokalen Welligkeit mittels Regularisierung vorzunehmen, indem das auf (3) führende Gütekriterium um einen Term $\eta \cdot E_p$ erweitert wird und in E_p die lokale Welligkeit eingeht. Die optimale Gewichtung η kann durch Minimierung der Konditionszahl der so erweiterten quadrierten Messmatrix automatisch festgelegt werden. Für die mathematischen Details muss hier auf [6] verwiesen werden.

Physikalisch nicht plausible Ergebnisse, wie die negativen Motormomentwerte bei kleiner Drosselwinkelstellung und großer Motordrehzahl, die sich in Bild 4 und Bild 5 aus einer Extrapolation infolge fehlender Messwerte in diesem Bereich ergeben, können durch Nebenbedingungen bei der Regularisierung berücksichtigt werden, wobei sowohl Plausibilitätsintervalle als auch plausible Gradientenwerte in die Rechnungen eingebracht werden können.

Bild 6a zeigt die Festlegung des Regularisierungskoeffizienten η mithilfe der Konditionszahl, Bild 6b das mit dieser Regularisierung und Berücksichtigung der Tatsache, dass keine negativen Drehmomente auftreten können, gewonnene Kennfeld. Es versteht sich von selbst, dass durch diese Maßnahmen nicht die Triangulierung, sondern nur der in den Triangulierungspunkten abgelegte Ausgangswert verändert wird.

Während die Konfigurierung off-line vorab erfolgt und im Kraftfahrzeug abgespeichert vorliegt, ist es nun im Kraftfahrzeugbetrieb erforderlich, das Dreieck (den Simplex) zu bestimmen, in dem der Anfragepunkt liegt und dann die Kennfeldantwort per Interpolation aus den Kennfeldwerten in den Eckpunkten zu bestimmen.

Dazu werden die baryzentrischen Koordinaten des Anfragepunktes bezüglich jedes Dreiecks (Simplexes) in der

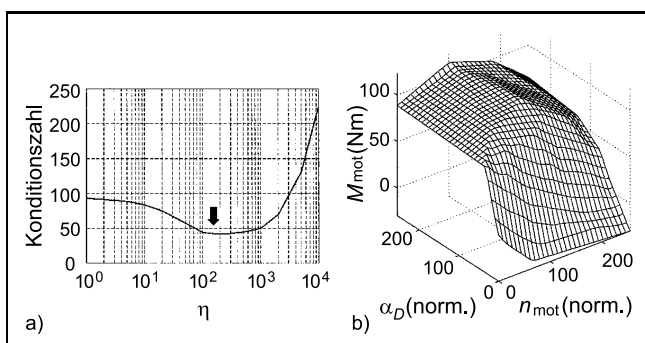


Bild 6: a) Bestimmung eines günstigen Regularisierungskoeffizienten (Pfeil) aus der Konditionszahl der erweiterten quadrierten Messmatrix. b) Kennfeld aus Bild 5 nach Regularisierung unter Berücksichtigung, dass negative Drehmomente physikalisch nicht sinnvoll sind – aus [6].

Eingangsebene bestimmt. Für das Dreieck (den Simplex), für das alle Koordinaten positiv sind, gilt, dass es den Punkt umschließt. Es sind also nur Vorzeichenuntersuchungen notwendig, um das richtige Eingangstriangulationselement zu finden, aus dessen Eckpunktkennfeldwerten dann der Kennfeldwert zum Anfragepunkt interpoliert wird.

Die relativ aufwendige Durchsuchung aller Dreiecke (Simplexe) kann vermieden werden, wenn man bedenkt, dass sich physikalische Größen im Prinzip kontinuierlich verändern, sodass neue Anfragepunkte vielfach noch im selben Eingangswertedreieck (Simplex) bzw. in einem unmittelbar benachbarten Dreieck (Simplex) liegen. Damit ergibt sich eine minimale, eine maximale und eine mittlere Antwortzeit des Kennfeldes.

Um die Effizienz des Delaunay-Netz-Ansatzes zu testen, hat *T. Ullrich* in [6] das in Bild 7 dargestellte von *M. Schmidt* in [4] dafür vorgeschlagene Kennfeld betrachtet, für das durch seine mathematische Grundlage eine einfache Erweiterung auf drei Eingänge möglich ist und das in gewisser Weise das bisher in dem Aufsatz betrachtete, reale Motorkennfeld widerspiegelt.

Da die Antwortzeiten der Delaunay-Netz-Kennfeldspeicherung entscheidend von der Änderungsgeschwindigkeit abhängen, wurde in den Tests ein Zeitverlauf von Drosselklappenwinkel und Motordrehzahl verwendet, wie er in einem Versuchsfahrzeug gemessen wurde. Bei den Untersuchungen mit drei Eingangsgrößen wurde derselbe Signalverlauf um fünf Abtastschritte zeitversetzt als dritte Eingangsgröße verwendet, wodurch realitätsnahe Anfragepunkttrajektorien, wie sie in einem dynamischen System auftreten würden, simuliert wurden.

Als Hardware-Plattform für die Messung der Antwortzeiten wurde ein T805 Prozessor mit einer Taktfrequenz von 30 MHz eingesetzt, der Zeitaufösungen von $1 \mu\text{sec}$ ermöglichte und heute (2003) zumindest bei hochwertigen Automobilen realitätsnah ist.

Aus den Ergebnissen der Untersuchungen wird im Folgenden ein Vergleich des Delaunay-Netz-Ansatzes mit einer gleich guten Darstellung des Kennfeldes durch den CMAC/AMS angeführt, wobei eine geeignete Verallgemeinerung ρ dafür durch Tests vorab ermittelt wurde.

Man erkennt aus Tabelle 1, dass der Delaunay-Netz-Ansatz den Speicheraufwand um einen Faktor 20 reduziert, ohne

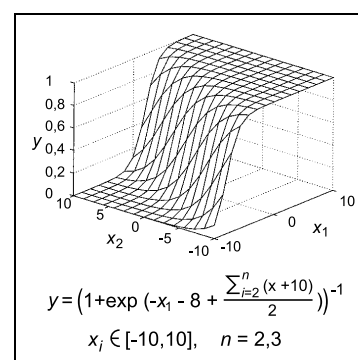


Bild 7: Zur systematischen Analyse verwendete Testfunktion mit bildlicher Darstellung für $n = 2$ – aus [6].

Tabelle 1: Vergleich Delaunay-Ansatz, CMAC/AMS für die Testfunktion aus Bild 7 – nach [6].

	Eingang Dimens.	2	3
Delaunay- Netz- Ansatz	Triang.-Punkte	20	48
	Speicheraufw. [Byte]	189	1493
	Mittl. Zugriffszeit [msec]	0,019	0,051
	Max. Zugriffszeit [msec]	0,268	0,83
CMAC/ AMS	Lokale Verallgem. ρ	53	50
	Speicheraufwand [Byte]	3816	34 300
	Zugriffszeit [msec]	0,751	0,980

dass die maximale Zugriffszeit – d. h. der Rechenaufwand – die Werte des CMAC/AMS übersteigt, wobei die mittleren Zugriffszeiten um den Faktor 15 unter den maximalen Zugriffszeiten liegen. Man kann im Übrigen den Speicheraufwand noch zu Lasten der Zugriffszeiten verkleinern, indem man von der Eingangsraumtriangulation nur ein Grundnetz abspeichert und das detaillierte Netz beim Zugriff lokal on-line aufbaut [6].

Wegen ihrer auf den Kraftfahrzeugbedarf abgestellten geringen Anforderungen an die eingesetzten Mikroprozessoren können Delaunay-Kennfelder auch für On-line-Adaptionen im Kraftfahrzeug eingesetzt werden. Auch hierzu wurden in [6] Untersuchungen angestellt. Da im Rahmen einer Dissertation Langzeit-Experimente zum Auffangen von Alterungs- und Verschleisserscheinungen problematisch sind, wurde die Adaption an Exemplarstreuungen bei Motorzylindern betrachtet. In einem vom Fachgebiet Regelungstechnik und Prozessautomatisierung der TU-Darmstadt (*Professor Dr.-Ing. Dr. h.c. R. Isermann*) betriebenen und geeignet ausgerüsteten Versuchsfahrzeug wurde die optimale Zündwinkleinstellung für die einzelnen Zylinder betrachtet. Die betriebspunktabhängige Einstellung des Zündwinkels ist eine typische Anwendung, in der eine kennfeldbasierte Vorsteuerung zur Anwendung

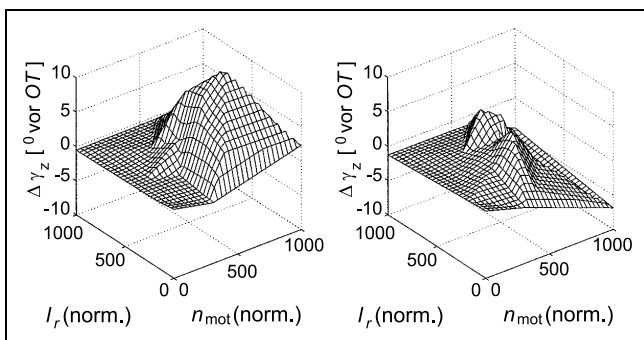


Bild 8: Kennfelder für zwei Zylinder eines Kraftfahrzeugs zur Korrektur $\Delta\gamma_z$ gegenüber dem optimalen Wert aus einem für alle Zylinder gleichen Grundkennfeld in Grad vor dem oberen Totpunkt OT, aufgetragen über der normierten Motorlast $I_r(\text{norm.})$ und der normierten Drehzahl $n_{\text{mot}}(\text{norm.})$. On-line gewonnene Werte bei vorgegebener, für alle Zylinder gleicher Triangulation – aus [6].

kommt. Das für alle Zylinder gleiche Grundkennfeld wurde durch zylinderspezifische Korrekturkennfelder ergänzt. Dabei wurden die Triangulationspunktzahl und -verteilung aus einer typischen Datenverteilung über dem aus Drehzahl n_{mot} und Motorlast I_r aufgespannten Eingangsraum abgeleitet und die Adaption für alle Zylinder über dieser gleichen, festen Triangulation in einer Messfahrt bestimmt. Bild 8 stellt die Ergebnisse für zwei Zylinder dar, die sich bei weiteren Messfahrten nicht mehr veränderten und damit anzeigen, dass tatsächlich der vom Grundkennfeld eingestellte Zündwinkel γ_z nicht gleichzeitig für alle Zylinder optimal ist.

Bei der On-line-Adaption handelt es sich um erste Ergebnisse, die noch ein weites Feld für vertiefte Untersuchungen offen lassen.

3 Zusammenfassung

Konzentriert man sich auf die On-line-Steuerung/Regelung technischer Anlagen, bei denen stärkere Nichtlinearitäten vorhanden sind, die in Kennfeldern modelliert oder mittels Kennfeldern in den Griff bekommen werden sollen, so haben lokal verallgemeinernde Speicher Vorteile vor Ansätzen mit globalen Stützfunktionen: Lernen an einer Stelle beeinflusst weit entfernte Werte nicht, d. h. es tritt nur eine örtlich beschränkte Extrapolation auf und man kann zur Unterstützung der Sicherheits- und Überwachungsebene einen Trainingsindikator nutzen. Die fehlende Beeinflussung weit entfernt liegender Punkte durch neue Trainingsdaten ist im Übrigen nicht nur für das On-line-Lernen von Bedeutung. Auch die Off-line-Konfigurierung von Kennfeldern wird so beschleunigt, was den dabei entstehenden Ingenieuraufwand verringert.

Erfahrungsgemäß gibt es für keine Problemstellung eine Lösung, die nur Vorteile hat. Es wurde deshalb auf drei Ansätze eingegangen, bei denen Weiterentwicklungen vorgestellt wurden.

CMAC/AMS hat den Vorteil, schnelle Zugriffe bei fester Zugriffszeit zu ermöglichen bei einfacher Integration eines Trainingsindikators. Trotz aller Speichergrößenreduktionsmaßnahmen benötigt er aber relativ viel Speicherplatz und erlaubt keine unmittelbare Orientierung an der Dichtedichte. Er hat sich bei uns außer in Simulationen auch bei Einsätzen in der Robotik im Labor bewährt, wobei maximal eine Eingangsdimension der Größe 18 benutzt wurde. Realistisch sind im Allgemeinen aber wohl eher Eingangsdimensionen < 10 .

MIAS erlaubt die unmittelbare Orientierung an der Dichtedichte. Der Speicherbedarf liegt wesentlich niedriger als beim CMAC/AMS, stärkere Extrapolationen bei ungünstiger Lage der Messwerte im Eingangsraum können vermieden werden, eine Rauschunterdrückung bewirkende Zusammenfassung von Eingangsdaten beschränkt die Anzahl der zu durchsuchenden Eingangswerte bei der Generierung einer Kennfeldantwort, die den Hauptnachteil von

MIAS darstellt. Dadurch ist die Antwortzeit nicht fest, sondern von der vorhandenen Datenmenge abhängig, was beim On-line-Lernen zu Problemen führt, eine feste Taktzeit in schnellen Regelkreisen einzuhalten. In den betrachteten Anwendungen, biotechnologischen Fermentationen, stellte dies wegen der relativ großen Abtastzeit aber kein Problem dar. Ein Trainingsindikator ist vorhanden, das Speicherkonzept wurde erfolgreich für Eingangsdimensionen bis zur Größe 8 eingesetzt, höhere Dimensionen traten in der Applikation nicht auf.

Die Delaunay-Triangulation stellt eine Alternative zu MIAS dar, die auf minimalen Speicher- und Rechenaufwand hin optimiert ist unter Beachtung der Forderung nach kleinen Rechenzeiten. Da sie sich an der Datendichte orientiert, ist allerdings die Antwortzeit wieder variabel. Der geringe Aufwand ist jedoch nur für Eingangsdimensionen der Größe 2 und 3 zu erreichen. Dies sind aber auch die Eingangsdimensionen, die in der Kraftfahrzeugelektronik für Kennfelder benutzt werden, da im Allgemeinen die physikalische Korrektheit nur für diese Dimensionen durch den Applikationsingenieur noch beurteilt werden kann. Die Eingangsdimension kann höher sein, wenn die Nichtlinearität in ihrer Struktur mathematisch beschreibbar ist und sich ihre Variabilität nur in zwei oder drei zugehörigen Parametern ausdrückt, die dann als Delaunay-Triangulationen abgelegt werden können.

Kennfelder bedeuten vielfach, dass man theoretische Überlegungen und Berechnungen aus mathematischen Modellierungen durch eine einfache geeignete Abspeicherung ersetzt (Speichern statt Rechnen) und damit neben einer Reduktion des Ingenieuraufwandes bei Erarbeitung einer geeigneten Lösung auch eine Verringerung der Zugriffszeit im On-line-Betrieb erreicht. Das entbindet aber nicht von Stabilitätsüberlegungen im Regelkreis, der Entwicklung geeigneter Abfang- bzw. Sicherheitsstrategien für den Fall, dass die Kennfelder nicht vollständig korrekt oder durch Veränderungen im Prozess sogar unkorrekt sind und man sollte immer überlegen, inwieweit der Kennfeldansatz nicht durch ergänzende Maßnahmen vereinfacht werden kann. So ist, wie erläutert, unter Umständen eine Aufspaltung in ein Grundkennfeld und ein ergänzendes Kennfeld, die Unterlagerung des Kennfeldansatzes durch ein Modell, sodass nur dessen Parameter in Kennfeldern abgelegt werden oder aber die Nutzung des Kennfeldes nur zur Ergänzung eines linearen Modells zweckmäßig, da so sowohl die Übersichtlichkeit der Lösung, als auch die Generierung der Kennfelder aus Daten wesentlich verbessert bzw. verkürzt werden kann.

Wichtig ist meines Erachtens, dass man sich bei jedem ingenieurtechnischen Problem überlegt, welche Werkzeuge man einsetzt. Dazu sind Vorabvergleiche der Vor- und Nachteile der Werkzeuge bezüglich der betrachteten Anwendung notwendig. In allen Dissertationen [1;3;4;6] finden sich dem entsprechend Vergleiche verschiedener denkbarer Konzepte, die auch Ansätze mit globalen Stütz-

funktionen, wie das Multilayer Perceptron, einschließen und die sicher eines detaillierten Nachlesens wert sind.

Abschließend möchte ich auf die bekannte Tatsache hinweisen, dass jedes Werkzeug einer ausgereiften Software und einer ausreichenden Erfahrung im Umgang damit benötigt. Jeder Ansatz hat freie Parameter, die geeignet eingestellt werden müssen. Das bedeutet, dass manchmal das einfachere Werkzeug trotz geringerer theoretischer Leistungsfähigkeit und mitunter sogar das nicht an die Anwendungen angepasste Werkzeug die beste Wahl sind, da der Ingenieuraufwand bei der Entwicklung einer Lösung und die Zuverlässigkeit der Lösung im industriellen Alltag nicht zu unterschätzende Kostenfaktoren darstellen.

Danksagung

Die Speicherung von Nichtlinearitäten in Kennfeldern, die über das Prinzip „Speichern statt Rechnen“ die On-line-Abfrage beschleunigen, hat meine Arbeitsgruppe beschäftigt seit einem Hinweis in den 70er Jahren von *Professor Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. W. Oppelt* auf die Arbeiten von *J.S. Albus*. Die CMAC-Modifikationen zum AMS haben *E. Ersü* und *J. Miltzer* entwickelt, an vertieften Überlegungen dazu haben *Professor P.C. Parks* und *Dr. E.D. Aved'yan* als Gäste mitgewirkt. MIAS wurde von *J. Miltzer* konzipiert, für den Delaunay-Netz-Ansatz leistete *M. Schmitt* wertvolle Vorarbeiten, indem er in [4] die Ablösung der in der Kraftfahrzeugtechnik üblichen Rasterkennfelder durch an der Datendichte orientierte Kennfelder wohl als erster betrachtete und vorschlug. *W.S. Mischo*, *S. Gehlen* und *T. Ullrich* haben liebenswürdigerweise die ihre Arbeiten betreffenden Abschnitte durchgesehen. Allen diesen Persönlichkeiten und einer großen Zahl von Studenten, die im Rahmen ihrer Studien- und Diplomarbeiten an den entsprechenden Untersuchungen mitgewirkt haben, bin ich zu Dank verpflichtet, genauso wie für die außerordentlich sorgfältige Begutachtung mit vielen wertvollen Hinweisen.

Literatur

- [1] Gehlen, S.: Untersuchungen zur wissensbasierten und lernenden Prozessführung in der Biotechnologie. Dissertation, VDI Fortschritt-Berichte Reihe 20 (Nr. 87), VDI-Verlag, 1993.
- [2] Hoschek, J. und Lasser, D.: Grundlagen der geometrischen Datenverarbeitung. B.G. Teubner, Stuttgart 1989.
- [3] Mischo, W. S.: Ein neuronaler Interpolationsspeicher für die lernende Regelung: Konzeptwahl und mikroelektronischer Entwurf. Dissertation, VDI Fortschritt-Berichte Reihe 9 (Nr. 249), VDI-Verlag, 1997.
- [4] Schmitt, M.: Untersuchungen zur Realisierung mehrdimensionaler lernfähiger Kennfelder in Großserien-Steuergeräten. Dissertation, VDI Fortschritt-Berichte Reihe 12 (Nr. 246), VDI-Verlag, 1995.
- [5] Ullrich, T.: Datengetriebene Modellierung nichtlinearer Strecken mit Delaunay-Netzen. Automatisierungstechnik (at), Bd. 45, Heft 5, 1997.
- [6] Ullrich, T.: Untersuchungen zur effizienten interpolierenden Speicherung von nichtlinearen Prozessmodellen und Vorsteuerstrategien: Konzeptentwurf und Anwendungen in der Automobilelektronik. Dissertation, Shaker Verlag, 1999.

Manuskripteingang: 21. Februar 2003.