Die stille Machtergreifung der Neo-Modernisten

Trial-and-Error ist out. Stattdessen wird in den Erfahrungs- und Ingenieurwissenschaften die mathematische Modellierung immer wichtiger. Denn dank höherer Mathematik gelingt heute zunehmend das, wovon Modernisten im Sinne Descartes schon immer träumten: Die Optimierung komplexester Vorgänge und Produkte vom Schreibtisch aus. Grazer Forscher haben in den vergangenen 10 Jahren wichtige Beiträge dazu geliefert.

Fröhlich war die Postmoderne über die Planungsphantasien des modernen Zeitalters hergezogen. Die Zukunft ließe sich nicht berechnen, lautete eine der Standardphrasen der frühen Achtzigerjahre; weder auf der gesellschaftlichen, noch auf der natürlichen, noch auf irgendeiner anderen Ebene. Alternierend und je nach philosophischer Grundausrichtung Ludwig Wittgenstein, Martin Heidegger oder Paul Feyerabend als Kronzeugen aufrufend, stimmten deshalb die postmodernen Denker mitsamt ihrer Gefolgschaft gleichsam das hohe Lied der Lokalität und Kontextualität an: Keine großen Weltentwürfe mehr, hieß es in dessen erster Zeile; keine größenwahnsinnigen Versuche, komplexe Systeme planbar und steuerbar zu machen, in seiner zweiten. Und Finger weg von Formalisierungen und zu weit führenden Abstraktionen lautete der Refrain, der wieder und wieder kam.

Stattdessen wurde ein vorsichtiges Vortasten in lokalen Lebenswelten gepredigt und eine hermeneutische Sensibilität für den Umgang mit Lebenssituationen aller Art empfohlen, ist doch, so die Philosophie dahinter, jede Situation einzigartig und einmalig, was als besondere Trumpfkarte gegen die Verallgemeinerungs- und Modellierungsversuche der naturwissenschaftsverliebten Moderne ins Spiel gebracht wurde.

Fast scheint es aber, als ob die postmoderne Party vorbei ist.

An allen möglichen Orten und in allen möglichen Zusammenhängen werden sie plötzlich wieder sichtbar, die Modernisten, die zwar nicht gleich die Welt, aber doch kleine Ausschnitte von ihr mathematisch modellieren wollen; auch dann, wenn es sich um komplexe, nicht-lineare Systeme handelt.

Beispielsweise in der Wirtschaft. Weil etwa die Autoindustrie von ihren Zulieferern fordert, dass selbst Millionen-Mengen von Bauteilen de facto fehlerfrei zu sein haben, designen die Zulieferer ihre Produkte heute immer häufiger mit Werkzeugen wie „Six Sigma“. Bei diesem handelt es sich um ein Projektmanagementtool, das intensiv statistische Methoden nutzt und dabei helfen soll, quasi am Schreibtisch ein perfektes Produkt zu entwickeln:
So wird etwa schon in der so genannten Definitionsphase des Bauteils mit Risikoanalysen gearbeitet, die systematisch und mit präziser Rechenarbeit jene Strukturen aufzeigen, auf deren Optimierung

bei der Herstellung besonderes Augenmerk gelegt werden muss – einfach, weil sie „critical“ sind, wie die Amerikaner zu sagen pflegen. Konsequent werden in weiterer Folge die Prozessparameter herausgearbeitet, die im Zuge der Herstellung diese Strukturen am stärksten beeinflussen können. Mit Hilfe statistischer Konzepte und auf der Basis von Messdaten wird schließlich untersucht, was diese Parameter tatsächlich bewirken – wodurch man frühzeitig Auskunft darüber erhält, welche Herstellungsprozessschritte verändert werden müssen oder wo notfalls eine Änderung der Struktur des Produkts ansteht. Am Ende kommt so ein Bauteil heraus, der schon funktioniert, bevor ihn noch jemand getestet hat.

Dabei ist „Six Sigma“ erst der Anfang. Fleißig wird in den verschiedensten Forschungseinrichtungen dieser Welt an mathematischen Optimierungsstrategien gearbeitet, die das gängige Prozedere aus „probieren, verändern und neuerlich testen“ ersetzen sollen. So auch in Graz, wo über 10 Jahre lang der Spezialforschungsbereich (SFB) „Optimierung und Kontrolle“ lief, den Franz Kappel, Professor am Institut für Mathematik und wissenschaftliches Rechnen der Karl-Franzens-Universität Graz, 1994 ins Leben gerufen hatte und der dieser Tage zu Ende geht. Auch in diesem SFB ging es wesentlich um die Frage, was die Mathematik heute im Feld der Optimierung leisten kann – und ob sie in der Praxis hält, was sie in der Theorie verspricht.

Die Logik, die in dieser Arbeit und Forschung zur Anwendung kommt, greift in ihrem Grundgefüge immer wieder auf ein bestimmtes Prinzip zurück: Es wird versucht, ein System mit Hilfe von Differentialgleichungen zu beschreiben. Was klarerweise dann besonders spannend wird, wenn es um die Verbesserung oder überhaupt um das Neudesign eines Systems geht. Denn gleich zum Start „lassen sich dann gute Werte erreichen", wie es Stefan Volkwein, Dozent am Institut für Mathematik und wissenschaftliches Rechnen der Uni Graz und einer der Mitarbeiter des SFB, formuliert. Einer der Clous der mathematischen Optimierung besteht ja darin, dass sie mit Gütekriterien arbeitet: Von Anfang an wird festgelegt, „was das mathematische Modell alles können soll", fügt Karl Kunisch, Professor an besagtem Mathematik-Institut und eine der treibenden Kräfte des SFB, ergänzend hinzu. Je höher die Güteklasse ausfällt, desto feiner wird das Modell sein, „was dann", so Volkwein, „auch ein Feintuning des geplanten Systems oder Produkts erlaubt". Mit anderen Worten: Wer beispielsweise ein Bauteil für ein Auto plant und auf eine mathematische Optimierung verzichtet, wird sich an die Feinheiten dieses Bauteils Schritt für Schritt durch Trial-and-Error herantasten müssen. Wer hingegen mit Hilfe der Mathematik optimiert, wird von Anfang an ein ausgefeiltes Bauteil haben; eben eines „mit guten Werten".

Beeindruckend ist vor allem, was sich die Mathematik heute alles zu optimieren zutraut. Von Formen wie den Tragflächen von Flugzeugen über chemische Prozesse bis hin zur Optimierung von Teilen, die es immer leichter zu machen und deshalb gleichsam

„zu löchern" gilt – alles hat man im Visier. Zumindest potentiell. Denn in Wirklichkeit tasten sich die mathematischen Neo-Modernisten nur ganz langsam an die Praxis heran. „Gerade die praktische Anwendung haben wir aus diesem Grund im SFB ins Zentrum gerückt", betont Karl Kunisch, um „einmal mit einfachen praktischen Beispielen aufwarten zu können, wo wir sonst nur technisch-theoretische Simulationen zu bieten haben".

Wobei das mit den „einfachen Beispielen" relativ ist:

Jenes, um das sich Kunisch und Volkwein angenommen haben, ist die Laserhärtung von Stahl. Bei dieser gleitet ein Laserstrahl über die Stahloberfläche und hinterlässt eine winzige „erhitzte Zone". Dadurch kommt es zu einem Phasenübergang; der Stahl tritt in die Hochtemperaturphase, die auch „Austenit" genannt wird. Diese Phase hält jedoch nur kurz an; weil die Spur des Lasers extrem schmal ist, löscht sich die Hitzespur gleichsam selbst sofort wieder aus, wodurch der nächste Phasenübergang stattfindet: Es erfolgt eine Härtung des Stahls, die dauerhaft ist und den Stahl zu einem „harten Stahl" („Martensit") macht.

Wer diesen Prozess nun optimieren will, steht einmal vor der Aufgabe, die genau richtige Dosis zu finden: Der Laser soll die notwendige Temperatur erzeugen, auf dass es zu den genannten Phasenübergängen kommt, wobei – bedingt durch diverse strukturelle Unterschiede im Stahl – die „Menge" an eingesetztem Laser nicht überall gleich groß

sein wird müssen. Es gilt also als erstes einmal, die „Bewegung“ des Lasers zu optimieren.
Gleichzeitig ist zumindest auch zu berücksichtigen, dass der Laser vielleicht einmal „verrutscht“ und neu ausgerichtet werden muss.
Ein mathematisches Modell, das eine optimale Steuerung dieses Prozesses erlaubt, wird also ganz verschiedene Aspekte der Laserhärtung beschreiben können müssen; Aspekte, bei denen es sich noch dazu nicht um einfache lineare Prozesse handelt, sondern um solche, die man heute als „komplex“ bezeichnet.

Komplexen Systemen kann man sich nun aus der Sicht der mathematischen Optimierung auf zweierlei Weisen nähern. „Einerseits kann man versuchen, eine optimale Kontrolle oder Steuerung zu erreichen“, was laut Kunisch aber umso unmöglicher wird, je komplexer das System ist. Optimale Steuerung setzt nämlich voraus, dass man ein System möglichst detailreich beschreibt und alle Parameter mitabbildet. Bei komplexen Systemen ist das jedoch so gut wie unmöglich, „und selbst wenn es gelänge“, so Kunisch, „wäre es vom Rechenaufwand her nicht mehr zu bewältigen“. Aus diesem Grund gibt man sich bei komplexen Systemen in der Regel mit einer suboptimalen Steuerung zufrieden, das heißt: Man arbeitet mit einer so genannten „Modellreduktion“. In diesem Fall „konzentriert man sich auf die wesentlichen Charakteristika des zu modellierenden Systems oder Prozesses“, erklärt Kunisch, was mathematisch einer „Reduktion der Freihheitsgrade“ im Modell entspricht. Damit erfolgt eine Reduktion der Komplexität, die in weiterer Folge eine rechnerische Bearbeitung des freilich auch weiterhin komplexen Systems erlaubt.

Im SFB hat man sich dementsprechend der Laserhärtung in einem ersten Schritt mit dem Konzept der Modellreduktion genähert. Macht man das aber, so tun sich laut Kunisch zwei verschiedene Strategien auf, mit denen man arbeiten kann: „Im Bereich der suboptimalen Steuerung existiert einerseits die so genannte ‚Open-Loop-Strategie'". Darunter fallen alle offenen Steuerungen, die einen Prozess von seinem Anfangs- oder Nullpunkt aus leiten und regulieren. „Eine ‚Open-Loop-Strategie'", so erläutert Stefan Volkwein an Kunisch anschließend, „wird beispielsweise für die Grundführung des Lasers gebraucht". Also dafür, dass der Laser an der richtigen Stelle die richtige Temperatur produziert, auf dass es zu einer Härtung des Stahls kommt.

Andererseits gibt es so genannte „Closed-Loop-Strategien", die nach Darstellung Volkweins immer dann zum Einsatz kommen, „wenn man urplötzlich vor der Situation steht, dass z.B. durch irgendeinen Außenfaktor etwas verändert wird". Das ist, wie Volkwein weiter ausführt, etwa dann der Fall, wenn der Laser aus irgendeinem Grund aus der Bahn geworfen wurde und mehr oder minder spontan eine neue Steuerung errechnet werden muss. „Closed-Loop-Strategien" werden deshalb auch Rückkoppelungssteuerungen genannt und sind das große und noch keineswegs bewältigte Thema für nicht-lineare dynamische Prozesse aller Art.

Bei einer suboptimalen Steuerung der Laserhärtung kommen mithin sowohl „Open-Loop-“ als auch „Closed-Loop-Strategien“ zum Einsatz. Diese suboptimale Steuerung zu realisieren bedeutet folglich, mathematische Lösungen für diese Strategien zu entwickeln. Was eine Reihe von mathematischen Herausforderungen mit sich bringt, die laut Volkwein „prinzipiell nicht neu sind, für den konkreten Anwendungsfall Laserhärtung jedoch nie bearbeitet wurden“. Eine dieser Herausforderungen ergibt sich etwa aus der Tatsache, dass ein Modell des optimalen Lasereinsatzes auf jeden Fall das Steuerungsproblem an sich (die Bewegung, die Intensität an der richtigen Stelle usw.) in der Form einer Differentialgleichung beschreiben muss, zugleich aber auch – wieder in Form einer Differentialgleichung – die Temperaturthematik wiederzugeben hat. „Erst beide Gleichungen zusammen ergeben die Lösung“, was nach der Darstellung von Volkwein und Kunisch bei der Lösungssuche den Einsatz „iterativer Verfahren 2ter Ordnung notwendig macht“. Denn je höher die Ordnung ausfällt, desto effizienter ist das numerische Verfahren. Damit wurde aber auch mathematisches Neuland betreten, mussten doch bekannte Verfahren 1ter Ordnung zu solchen 2ter Ordnung weiterentwickelt werden.

Der Aufwand hat sich auf jeden Fall gelohnt: Die Härtung von Stahl mittels Laser kann heute ohne große Trial-and-Error-Prozesse optimiert werden; sie ist tatsächlich durchrechenbar geworden – auch wenn, wie Volkwein erklärt, „die definitive Anwendung noch nicht erfolgt ist“.

Von nicht ganz so angewandtem Charakter sind jene Forschungen, die im SFB rund um das Thema „Gestalt- und Formoptimierung“ erfolgt sind. Auch hier geht es letztlich darum, das „Feintuning“ schon im Vorhinein, am Schreibtisch, realisieren zu können.

Allerdings ist Formoptimierung vielleicht noch eine Spur komplexer als die suboptimale Steuerung von Prozessen. Denn bei ihr wird das Ziel verfolgt, Teile von – z.B. – Autos noch leichter zu machen – nämlich dann, wenn alle anderen Einsparungspotentiale bereits ausgeschöpft sind. „Gewichtseinsparungen sind heute ja nur mehr möglich, wenn man es irgendwie schafft, Material wegzunehmen, indem man es etwa wegschneidet, also Löcher hinein macht“, erläutert ein anderer Mitarbeiter des SFB und des Mathematik-Instituts der Karl-Franzens-Universität, Professor Gunther Peichl, das Ausgangsproblem, bei dem die moderne Formoptimierung ansetzt. Was auch verständlich macht, weshalb im Feld der Gewichtsoptimierung eine mathematische Optimierung besonders interessant ist. Denn Löcher lassen sich bekanntlich größer, aber nicht mehr kleiner machen, weshalb Trial-and-Error hier rasch zu Destroyed-after-the-Error werden kann.

Nun hat eine solche Formoptimierung jedoch mit einer ganzen Reihe von Tücken aufzuwarten, wenn sie denn mathematisch-modellierend erfolgen soll. Denn ein Loch, oder genauer gesagt: ein Ausschnitt aus einer Form, ist eine geometrische Variable und keine numerische. „Man steht deshalb vor der Aufgabe, numerische Verfahren für diese geometrischen Probleme zu adaptieren", führt Peichl aus, was noch dadurch erschwert wird, dass man hier zwar prinzipiell mit Differentialgleichungen arbeiten kann und muss, „sich der Definitionsbereich der Differentialgleichungen aber sofort ändert, wenn etwas aus der Form herausgeschnitten wird". Als zusätzliche Aufgabe kommt folglich noch hinzu, die numerischen Verfahren auch an diesen noch unbekannten Definitionsrahmen anzupassen, was mathematisch besehen das Rechnen mit Unbekannten, die sich wieder auf Unbekannte beziehen, bedeutet. Um mit diesen Herausforderungen zu Rande zu kommen, hat man deshalb im Rahmen des SFB beispielsweise mit „Einbettungsverfahren" zu arbeiten begonnen, was laut Peichl „in diesem Zusammenhang neu war".

Praktisch bedeutet das nichts anderes, als dass man Gitter eingesetzt hat: Über den Entwurf eines Bauteils, in den gewissermaßen Löcher geschnitten werden sollen, wird ein Gitternetz gelegt, was einer Veränderung der Geometrie entspricht. „Auf diese Weise wird die komplexe Struktur in die viel günstigere rechteckige Struktur eingebettet", wodurch, so Peichl, aber auch wieder all jenen effizienten Rechenverfahren anwendbar werden, die für eine „rechteckige Geometrie" erfunden wurden und sich dort bewährt haben. Auch Formen können so vom Schreibtisch aus optimiert werden, „weil es das Gitter erlaubt, die

Differentialgleichungen auszuweiten. Und zwar in dem Sinn, dass die Gleichungen, die das innere Gebiet und damit die zu optimierende Form beschreiben, auf das äußere Gebiet eben dieses Gitters ‚ausgeweitet' werden. Was, wenn es dann wieder zu einer Reduktion auf das innere Gebiet kommt, auch dieses mathematisch beschreibbar macht".

Anders als die Laserhärtung ist diese Optimierungsrechnung noch ohne Praxisanbindung. Dennoch: Ihr Potential lässt sich bereits erahnen, wenn man beispielsweise an die zeitgenössische Architektur denkt, die gerne mit völlig neuartigen Materialien oder Formen spielt, deren erster Test meist der Einsatz am realen Gebäude ist. Hier ist die Möglichkeit, eine Modellierung und Optimierung schon am Schreibtisch vornehmen zu können, wohl mehr als nur gerne gesehen.

Womit wieder das Thema Moderne im Raum steht. Schließlich waren es ja die Architekten, die als eine der ersten großen gesellschaftlichen Gruppen von der Moderne und ihrer auch mathematischen Strenge abzurücken begannen.

Vergegenwärtigt man sich nun, dass viele dieser Optimierungsbestrebungen erst ein Anfang sind und es nicht unvorstellbar ist, dass dank höherer Mathematik und geradezu unerschöpflicher Rechnerkapazitäten immer komplexere Systeme berechenbar werden, ist es vielleicht einmal angebracht darüber nachzudenken, ob nicht in Großprojekten wie dem Spezialforschungsbereich „Optimierung und Kontrolle“ – bewusst oder unbewusst – eine Art Paradigmenwechsel hin zu einer neuen Moderne vorbereitet wird.

Zu einer neuen Moderne, die erfüllt, was die Protagonisten der ersten Moderne erträumt hatten.