Konrad-Zuse-Zentrum
für Informationstechnik Berlin

Takustraße 7
D-14195 Berlin-Dahlem
Germany

MARTIN GRÖTSCHEL

Mathematik in der Industrie: interessante Branchen und zukünftige Einsatzfelder

ZIB-Report 00-44 (November 2000)

Mathematik in der Industrie: Interessante Branchen und zukünftige Einsatzfelder

Martin Grötschel

8. Dezember 2000

Vorbemerkungen

Dieser kurze Artikel hat keine umfassende Übersicht zum Ziel. Basierend auf eigenen Erfahrungen durch Projekte mit Industriefirmen möchte ich einige Branchen erwähnen, bei denen nach meiner Einschätzung Mathematik in Zukunft zunehmend Anwendung finden wird. Ich werde das anhand konkreter Beispiele erläutern. Mathematik ersetzt in der Regel traditionelle Analyse-, Planungs- und Entwurfstechniken. Den (nicht leichten) Schritt zum Einsatz mathematischer Methoden macht ein Praktiker nur, wenn es sich für ihn "lohnt". Wann sich dies lohnt, ist schwer abzuschätzen. Man kann aber einige Indikatoren dafür finden, ob eine Branche für den Einsatz von Mathematik "reif" ist. Ob es dann dazu kommt, hängt von vielen Faktoren ab, nicht zuletzt von der Psychologie und dem sozialen Umfeld der beteiligten Personen sowie der Bereitschaft, sich auf ein so schwieriges Terrain zu begeben und Kompromisse einzugehen. Gerade letzteres fällt Mathematikern gelegentlich schwer.

Eigener wissenschaftlicher Hintergrund

Bevor ich konkrete Einsatzfelder der Mathematik schildere, will ich kurz meinen eigenen beruflichen Hintergrund darstellen, aus dem heraus ich meine Einschätzung der Entwicklungschancen darstelle. Ich bin seit fast 20 Jahren Professor, seit beinahe zehn Jahren zu 75 Prozent meiner Arbeitszeit Vizepräsident eines Forschungsinstituts. Seit Beginn meiner akademischen Laufbahn hatte ich großes Interesse an Anwendungen der Mathematik. Ich habe mich in Forschung und Lehre bemüht, eine angemessene Balance zwischen Theorie und Anwendung zu finden. Die Beschäftigung mit praktischen Fragen, die für Industrie und Wirtschaft wichtig sind und die mit Standardmethoden nicht gelöst werden können, gibt der Forschungstätigkeit einen umfassenderen Horizont. Ich empfinde diese Aufgabe als Bereicherung meines akademischen Umfeldes. Meine Mitarbeiter und Studenten bekommen dadurch Einblicke, die sie im normalen Universitätsleben nicht erhalten. Für viele ergeben sich dadurch berufliche Perspektiven. Es ist außerdem sehr befriedigend, wenn man anderen bei der Lösung schwieriger Probleme wirklich helfen kann.

Projekterfahrungen

Ich habe in den letzten 15 Jahren über 30 Projekte mit verschiedenen Industriefirmen durchgeführt. Partner waren dabei Weltfirmen, große Mittelständler, aber auch kleine Unternehmen. Projekte dieser Art kann man kaum allein durchführen; je nach Zielsetzung und Umfang braucht man einige Mitarbeiter oder Kollegen, und man muss eng mit einem Team des industriellen Partners zusammenarbeiten. Ohne Teamarbeit geht nichts!
Gelegentlich kann man erstaunliche Erfolge erzielen. Ich habe Projekte erlebt, wo zwei Wissenschaftler und ein oder zwei Fachleute aus der Industrie Einsparungen erzielen konnten, die selbst bei größeren Firmen deutliche Prozente des Jahresumsatzes ausmachten.

Anwendungsbereiche

Basierend auf diesem Hintergrund will ich kurz über gegenwärtige und zukünftige Einsatzfelder der Mathematik berichten. Ich werde nicht über Branchen und Bereiche spekulieren, die ich nicht gut kenne (z.B. Biologie und Medizin), und auch nicht Anwendungen von Mathematik voraussagen, die ich nicht ausreichend beherrsche (z.B. das Lösen partieller Differentialgleichungen). Meine mathematischen Spezialdisziplinen sind Optimierung und Diskrete Mathematik, und hier insbesondere die Kombinatorische Optimierung. Die Umsetzung dieser Methoden im Verbund mit betriebs- und ingenieurwissenschaftlichen Methoden gehört auch dazu. Man nennt das häufig Operations Research. Derzeit führe ich mit meinen Mitarbeitern Projekte in folgenden Bereichen durch: Telekommunikation, Transport und Verkehr, flexible Fertigung, Produktion und innerbetriebliche Logistik.

Was wird in Anwendungsprojekten gemacht?

In einem Forschungsinstitut wie dem ZIB beschäftigen wir uns nicht mit "Trivialprojekten" (das sind für uns solche Projekte, die mit bekannten Methoden aus Lehrbüchern oder mit kommerziell verfügbarer Software gelöst werden können). Zu uns kommen Firmen, die Probleme haben, die sie mit den vorhandenen Mitteln nicht zufriedenstellend lösen können. Unsere Hilfe besteht in der Regel in der Entwicklung neuer mathematischer Methoden (die dann in der Form von Computercodes eingesetzt werden); fast immer gehört dazu auch Beratung. Das heißt, wir versuchen, durch intensive Untersuchung der praktischen Aufgabe ein mathematisches Modell zu entwickeln, das der Firmen-Zielsetzung angemessen ist. Dies erfordert eine enge Zusammenarbeit mit dem industriellen Partner und ist nicht immer einfach. Es ergeben sich insbesondere psychologische Probleme. Die Fachleute aus der Praxis bekommen gelegentlich das Gefühl, dass ihre Expertise durch die präzisen Detailfragen und Analysen der Mathematiker in Frage gestellt wird. Manche befürchten sogar, dass sich "ihre Lösungen" als nicht gut erweisen und sich z.B. herausstellt, dass ihre Firma über Jahre hätte kostengünstiger produzieren können. Einer solchen Gefahr will man sich nicht aussetzen und blockiert lieber das Vorhaben. Hier ist also Fingerspitzengefühl erforderlich, um nicht gleich am Anfang zu scheitern. Wo ist nun in den genannten Anwendungsfeldern die Mathematik? Ich gebe hierzu ein paar Beispiele.

Beispiel: Telekommunikation

Als vor nunmehr über zehn Jahren bei Telefongesellschaften (damals noch sehr teure) Glasfaser mit hoher Kapazität zum Einsatz kam, wurden relativ "dünne" Netze gebaut. Es geschah danach mehrfach, dass durch Baggerarbeiten Kabel durchtrennt wurden oder dass Fehler (z.B. Feuer) in Schaltzentralen auftraten und dadurch ganze Stadt- oder Landesteile nicht mehr erreichbar waren. Der wirtschaftliche Schaden war immens. Wir entwickelten in Zusammenarbeit mit einer amerikanischen Telekommunikationsfirma ein (erstes) mathematisches Modell zur Berechnung kostengünstiger Netze mit gewünschter Ausfallsicherheit. Dieses Modell hat sich über die Jahre hin durch technologische Veränderungen (und Zusammenarbeit mit weiteren Firmen) weiter entwickelt und wird in Kürze durch eine Ausgründung das Standbein einer neuen Firma werden. In Deutschland war damals mit dieser Methodik "nichts zu ernten". Es herrschten noch Monopolzeiten. Heute ist dies völlig anders. Wir arbeiten inzwischen mit verschiedenen Telekommunikationsfirmen zusammen. Der hohe Wettbewerbsdruck macht den Einsatz von Optimierung lebensnotwendig. Gleichzeitig arbeiten wir an Planungsmethoden für neue Technologien, die erst in ein paar Jahren zum Einsatz kommen werden. Die Partnerfirmen wollen gleich zu Einsatzbeginn fitßein, das heißt, sie wollen neue Technologien sofort optimal (kostengünstig und kundenfreundlich) einsetzen, ohne den langen (und bisher vielfach üblichen) Weg von "Versuch und Irrtum"zu gehen. Bereits aus dieser kurzen Geschichte kann man zwei Lehren ziehen, die sich auf vielfache Weise in anderen Projekten bewahrheitet haben.

Wettbewerb und technologischer Fortschritt als Triebfedern für den Einsatz von mehr Mathematik

Technologischer Fortschritt (z.B. der Einsatz von Glasfasern, die Entwicklung neuer optischer Netze und optischer Schalttechnologien) führt automatisch zu neuen mathematischen Fragen. Selten sind Werkzeuge zu deren Lösung im mathematischen Werkzeugkasten zu finden. Wenn der Anpassungsdruck groß ist, reichen die traditionellen Planungstechniken nicht aus. Sie werden durch mathematische Methoden ergänzt oder ersetzt, um die neuen Technologien wirksam zum Einsatz zu bringen. Ohne Wettbewerb besteht nur wenig Anreiz, Ressourcen kostengünstig einzusetzen und zu rationalisieren. Man braucht sich auch hier nur die Telekommunikation anzusehen. Hätten wir ohne Marktöffnung heute Internet-fähige Handys mit hohen Datenraten zu günstigen Preisen? Daraus kann man sofort schließen, dass in allen Feldern, wo der Staat noch monopolartige Zustände erhält, in nicht allzu langer Zeit der Einsatz mathematischer Methoden sprunghaft ansteigen wird. Hierzu zähle ich insbesondere den Energie- und den Verkehrssektor.

Beispiel: Energiesektor

Im Energiesektor wird, speziell bei ingenieurwissenschaftlichen Fragen, bereits mit anspruchsvoller Mathematik gearbeitet; aber im Planungsbereich, bei der Energieverteilung und insbesondere dann, wenn im Handel mit Energie richtiger Wettbewerb herrschen wird, werden sich starke Veränderungen ergeben. Der Einsatz von Mathematik bei Energieerzeugung, -handel und -verteilung bietet hier handfesten ökonomischen

Vorteil; und wenn die Margen knapper werden, kann dies ein entscheidender Faktor werden.

Beispiel: Transport und Verkehr

In den Bereichen des Verkehrssektors - hierzu rechne ich insbesondere Luftfahrt, Bahn und öffentlichen Nahverkehr - werden schon viele mathematische Methoden eingesetzt. Beispiele hierzu sind: Einsatzplanung von Flugzeugen, Routenplanung, Fahrzeugbesatzungsplanung, Fahrplanerstellung, Busumlaufplanung und Personal-Einsatzplanung. Am weitesten ist natürlich die Luftfahrtindustrie. Hier gibt es seit vielen Jahren echten internationalen Wettbewerb. Im Luftfahrtbereich benutzen die meisten Fluggesellschaften mathematische Planungstechniken für die operative, aber auch bereits für die strategische Planung und insbesondere im Marketing. Beispiel: Öffentlicher Nahverkehr/Eisenbahnen Im öffentlichen Nahverkehr ist die Idee der Optimierung noch nicht sehr weit verbreitet. Nur die führenden Verkehrsbetriebe haben erkannt, dass durch den Einsatz von Mathematik erhebliche Einsparungen (ohne Verminderung der Serviceleistungen) erzielbar sind. Bei den Eisenbahnen, die fast überall in Europa noch national monopolartige Stellungen haben, ist es ähnlich. Würden die Zugangsregeln zum Schienennetz so gestaltet, dass die Deutsche Bahn wirklich Konkurrenz bekommen könnte, dann müsste sie z.B. jedes halbe Jahr völlig neue Fahrpläne erstellen. Das kann sie (wie auch alle anderen Bahnen der Welt) nicht. Neue Fahrpläne, Zugumlaufpläne, Lokführer- und Schaffner-Einsatzpläne werden derzeit immer nur graduell an alte angepasst. In Zukunft - bei einsetzender Konkurrenz - wird man aber den operativen Betrieb deutlich kundenfreundlicher (z.B. geringere Wartezeiten beim Umsteigen) und kostengünstiger (preiswerterer Material- und Personaleinsatz) betreiben müssen. Das gilt natürlich ebenso für den ÖPNV und seine Verknüpfung mit überregionalen Verkehrssystemen.

Mathematische Herausforderungen

Im Verkehrssektor besteht großer Bedarf an der Weiterentwicklung mathematischer Lösungsverfahren, insbesondere weil die auftretenden mathematischen Optimierungsprobleme riesig sind. Zur optimalen Buseinsatzplanung der Berliner Verkehrsbetriebe (BVG), um ein konkretes Beispiel zu nennen, müssen wir am Konrad-Zuse-Zentrum Optimierungsprobleme mit rund 100 Millionen ganzzahligen Variablen lösen. Würden wir die Fahrereinsatzplanung für die BVG wirklich exakt modellieren, müssten wir Milliarden von Variablen betrachten (das können wir derzeit nicht). Aber eigentlich möchte man die beiden Aufgaben nicht nacheinander, sondern auf einmal lösen. Niemand weiß derzeit, ob man das wirklich schaffen kann. Hierzu ist die Weiterentwicklung der dazu notwendigen algorithmischen Mathematik notwendig. Große Herausforderungen ergeben sich analog, wenn man verschiedene Verkehrssysteme integriert planen möchte.

Forschungsthema Online-Planung

Ähnlich schwierige Probleme treten auch bei der Auslegung von Fuhrparks (wie viele Fahrzeuge welchen Typs werden wo stationiert?) und deren Einsatzplanung auf. Hier, wie auch im übrigen Verkehrsbereich, wird Online-Planung immer wichtiger.

Das heißt, Fahrzeuge und Fahrer werden bereits eingesetzt, ohne dass man alle Aufträge des Planungshorizonts (ein Tag, eine Woche) kennt. Wie macht man das “richtig”? Das weiß heute noch keiner so genau, und die Frage einer guten Online-Planung ist Thema intensiver Forschung. Offensichtlich sind solche Fragen auch bei Einsatz- oder Hilfsdiensten (Feuerwehr, Gelbe Engel des ADAC, etc.) von besonderer Bedeutung. Die Kosten spielen auch hier eine immer größere Rolle!

Beispiel: Maschinensteuerung

Man könnte glauben, dass durch den Einsatz computergesteuerter Maschinen automatisch auch ihr effizienter Einsatz garantiert ist. Weit gefehlt! Die Hersteller solcher Maschinen haben nicht immer ein großes Interesse daran, ihre Maschinen besonders effizient einzusetzen. Sie könnten ja auch gut ein paar mehr verkaufen. Das hört sich abwegig an, ist aber Realität. Nicht nur einmal hat ein Hersteller eine Zusammenarbeit mit dem ZIB abgelehnt, “weil man derartige Verfahren nicht brauche”. Ich bin auch vom Verkäufer eines Busherstellers angegriffen worden, weil unsere Algorithmen zur optimalen Buseinsatzplanung sein Geschäft “verdorben” haben. Mathematische Optimierung hat also auch Gegner!

Beispiel: innerbetriebliche Logistik und Planung komplexer Systeme

Manchmal kommt auch der Zufall zu Hilfe. Als meine Arbeitsgruppe neue Methoden zur Produktionssteigerung von Bohr- und Bestückungsautomaten entwickelte, brachte ein Großauftrag an unsere Partnerfirma unsere Beschäftigung mit innerbetrieblicher Logistik in Gang. Es mussten Hochregallager-Bediengeräte, fahrerlose Fahrzeuge, Materialaufzüge und Horizontalförderer beschleunigt werden. Insbesondere musste ihr Zusammenspiel untereinander abgestimmt werden. Schnelle Lösungen waren gefragt. Auch Zeitdruck trägt zu erhöhtem Einsatz formaler Methoden bei. Mit Mathematik lässt sich einfach schneller planen!

Die Zukunft: Planung komplexer Systeme

Bei der Analyse der oben erwähnten Transportsysteme stellte sich heraus, dass es mit dem ingenieurmäßigen Entwurf derartiger Logistiksysteme nicht immer so gut bestellt ist, wie man annehmen sollte. So musste etwa bei einem Vertikalfördersystem von fünf Aufzügen (die in einer Reihe aufgebaut waren) der erste fast 50 Prozent aller Fahrten erledigen, während zum letzten kaum Aufträge durchdrangen, weil die Materialzuführung nicht richtig ausgelegt war. Hier ist ein weiteres Thema, bei dem Mathematik heute noch kaum eine Rolle spielt, wo sie in Zukunft aber eingesetzt werden muss: Planung komplexer Systeme, z.B. in der industriellen Fertigung, aber auch bei der Ablaufplanung von Großprojekten.

Mathematiker müssen sich ihre zukünftigen Betätigungsfelder erobern

Dies war ein Schnelldurchgang durch einige Anwendungsbereiche der Optimierung. Nirgendwo sehe ich ein "Ende der Mathematik". Auch in den Bereichen, wo schon viel mit Mathematik gearbeitet wird, gibt es noch große Ausdehnungsmöglichkeiten. Einige davon habe ich oben angedeutet. In der operativen Planung wird schon viel gemacht, bei taktischen oder gar strategischen Planungen kommt Mathematik nur selten zum Einsatz. Diese Felder fallen der Mathematik nicht automatisch zu. Mathematiker müssen sie sich "erobern": durch den Erwerb zusätzlicher Fachkenntnisse, durch gute Analysen, durch anwendungsgemäße Modelle und durch überlegene Konzepte. Auch zwischen den wissenschaftlichen Fachdisziplinen herrscht Konkurrenz. Ein Feld, das ein Betriebswirt oder ein Ingenieur "besetzt", wird er nicht ohne weiteres an jemand anderen weitergeben. Psychologie spielt auch hier eine größere Rolle, als man glauben mag. Die Fähigkeit zur Zusammenarbeit ist gefragt, die Fähigkeit zum gemeinsamen effizienten Einsatz verschiedener Fertigkeiten. Davon ist die Beherrschung mathematischer Methoden eine. Um ihren Einsatz muss auch gerungen werden. Nach meiner Einschätzung gehört den Unternehmen die Zukunft, die die Fähigkeiten der unterschiedlichsten Disziplinen am besten bündeln können. Ohne Mathematik werden sie im Nachteil sein.