

FREIE

BAHN

FREIE BAHN

KOMPLEXITÄT BEHERRSCHEN

EKATERINA KOSTINA

Allein in Deutschland ist die Anzahl der Flüge im letzten Jahrzehnt um fünfzig Prozent gestiegen. Das stellt an Fluglotsen und Flugplaner große Anforderungen. Damit sie den Flugverkehr optimal bewältigen können, sind dringend leistungsfähige Werkzeuge erforderlich, die ihnen helfen, Konflikte frühzeitig zu erkennen und zu lösen. Neue mathematische Entscheidungssysteme können dazu beitragen, Probleme derart großer Komplexität zu lösen und den Flugverkehr auch künftig im Fluss zu halten.



PROF. DR. EKATERINA KOSTINA folgte im Jahr 2015 dem Ruf der Universität Heidelberg auf eine Professur für Numerische Mathematik. Nach dem Studium und der Promotion in Mathematik in Minsk wechselte sie im Jahr 1997 als Wissenschaftliche Assistentin an das Interdisziplinäre Zentrum für Wissenschaftliches Rechnen (IWR) der Universität Heidelberg. Zwischen 2006 und 2015 war sie Inhaberin des Lehrstuhls Numerische Optimierung der Universität Marburg. Sie ist Gründungsmitglied des nationalen Komitees für Mathematische Modellierung, Simulation und Optimierung (KoMSO). Ihre Forschungsschwerpunkte sind die Entwicklung von numerischen Methoden der nichtlinearen Optimierung und optimalen Steuerung und deren Anwendung auf komplexe dynamische Prozesse in Wissenschaft und Technik. Zusammen mit Kollegen des IWR engagiert sie sich für das Heidelberg Collaboratory for Industrial Optimization (HCO).

Kontakt: ekaterina.kostina@iwr.uni-heidelberg.de

M

Mobilität gehört zu unserem täglichen Leben – und ein Leben ohne zu fliegen können wir uns in einer international vernetzten Gesellschaft kaum mehr vorstellen. Allein in Deutschland ist die Anzahl der Flüge in den letzten zehn Jahren um fünfzig Prozent gestiegen. Mittlerweile zählen wir hierzulande mehr als drei Millionen Flüge pro Jahr. Das bedeutet, dass jeden Tag mehr als 10.000 Flugzeuge starten, landen oder Deutschland überfliegen. Experten erwarten in den nächsten Jahren eine weitere jährliche Wachstumsrate von 2,5 Prozent. Trotz des immer stärker anwachsenden Luftverkehrs – das Fliegen ist immer noch die sicherste Reisemöglichkeit, nicht zuletzt dank der Fluglotsen. Sie überwachen jeden einzelnen Flug, identifizieren Konflikte, lösen sie frühzeitig und sorgen dafür, dass alle Flugzeuge zu jeder Zeit genügend Abstand voneinander halten.

Jederzeit die Sicherheit zu gewährleisten ist nicht die einzige Herausforderung, die sich im Flugverkehr stellt: Eine einzige Boeing 747 verbraucht pro Jahr rund fünfzig Millionen Liter Treibstoff. Das entspricht dem durchschnittlichen Verbrauch einer Flotte von 50.000 Mittelklasse-PKWs. Der hohe Treibstoffeinsatz ist nicht nur ein erheblicher Kostenfaktor – der Stickoxid- und Kohlendioxid-Ausstoß belastet auch die Umwelt. Viel Treibstoff wird vor allem in den Start- und Landephase gebraucht. Hier können Fluglotsen und Flugplaner entscheidend dazu beitragen, die Belastung zu reduzieren.

Eine weitere Herausforderung für die Flugsicherung und Flugplanung ist es, die Kapazität des Luftraums und der Flughäfen bei ständig steigender Flugdichte bestmöglich auszunutzen. So lassen sich Verspätungen am Boden und in der Luft verringern, die operative Effizienz verbessern und Kosten reduzieren. Dies stellt enorme Ansprüche an Lotsen und Planer. Damit sie den Verkehrsfluss optimal bewältigen können, brauchen sie dringend leistungsfähige Werkzeuge, die sie bei ihren Entscheidungen unterstützen.

Um den Flugverkehr der Zukunft zu meistern, bedarf es neuer Methoden der mathematischen Technologie der „Modellierung, Simulation und Optimierung“, kurz MSO. Die Flugsicherung und -planung zu optimieren ist ein höchst komplexes Unterfangen. Mit neu entwickelten

Verfahren der MSO haben wir uns in einem gemeinsamen Projekt mit der Deutschen Flugsicherung (DFS) zunächst einer Kernaufgabe angenommen, die sich in der Flugsicherung stellt: der Optimierung und optimalen Steuerung des sogenannten „Separation Managements“. Separation Management meint: Alle Flugzeuge in einem Sektor müssen so geleitet werden, dass definierte vertikale und horizontale Mindestabstände sicher eingehalten und Konfliktsituationen vermieden werden können. Es geht also darum, konfliktfreie Flugbahnen, sogenannte Trajektorien, zu berechnen.

Modellierung, Simulation und Optimierung

Drei Grundbausteine bilden den Kern der mathematischen Technologie MSO – einer Schlüsseltechnologie des 21. Jahrhunderts:

„M“ wie **Modellierung**: Mathematische Modelle beschreiben in Form von Gleichungen, wie sich Prozesse räumlich und zeitlich entwickeln; hier: die Bewegungen aller Flugzeuge im gegebenen Luftraum. In unserer Anwendung sind dies die nichtlinearen Systeme von Differentialgleichungen der Flugdynamik.

„S“ wie **Simulation**: Komplexe Gleichungen dieser Art lassen sich in der Regel nur auf einem leistungsfähigen Computer mithilfe intelligenter, adaptiver numerischer Approximationsmethoden lösen.

„O“ wie **Optimierung**: Mit raffinierten mathematischen Methoden der Optimierung und optimalen Steuerung werden diese Prozesse dann so gesteuert (das heißt die Entscheidungsvariablen und -optionen so gewählt), dass das Wunschkriterium (in unserem Fall eine möglichst geringe Abweichung von den ursprünglich geplanten Flugbahnen) bestmöglich realisiert wird. Dabei müssen zahlreiche Nebenbedingungen – vor allem die sicheren Mindestabstände – strikt eingehalten werden.

Wie lassen sich konfliktfreie Trajektorien berechnen? Dazu betrachtet man die simultane Optimierung sich überschneidender Flugbahnen aller Flugzeuge in einem überwachten Luftraumsektor. Das primäre Ziel dabei ist, konfliktfreie Flugbahnen zu berechnen. Diese Aufgabe lässt sich als „Optimalsteuerungsproblem“ formulieren. Das Optimierungsszenario umfasst dabei einen zwei- beziehungsweise dreidimensionalen Sektor, der von einer prinzipiell beliebigen Anzahl von Flugzeugen unterschiedlichen Typs zu beliebigen Zeitpunkten durchflogen wird.

Die Bewegung jedes Flugzeugs im Sektor führt mathematisch auf ein Differentialgleichungssystem. Das System beschreibt, wie sich die Flugrichtung und die räumliche Position zeitlich entwickeln. Das Flugzeug kann gesteuert werden, indem man seine Geschwindigkeit und seinen

Neigungswinkel ändert. Die Flugbahnen oder Trajektorien des Flugzeugs müssen dabei viele Nebenbedingungen erfüllen. Die wichtigste Nebenbedingung ist die „Bahnbeschränkung“: Zwischen zwei Flugzeugen muss jederzeit ein Mindestabstand von mindestens 300 Metern vertikal und zwischen drei und acht nautischen Meilen (5,6 und 14,8 Kilometer) horizontal bestehen. Weitere Nebenbedingungen sind die Anfangs- und Endzustände der Positionen und die Geschwindigkeiten der Flugzeuge.

Dritte Säule der Wissenschaft: Das Wissenschaftliche Rechnen

Das Interdisziplinäre Zentrum für Wissenschaftliches Rechnen (IWR) wurde im Jahr 1987 als das bundesweit erste universitäre Forschungszentrum seiner Art gegründet. Die Forscher am IWR befassen sich mit Fragestellungen aus Natur-, Technik- und Geisteswissenschaften und bearbeiten sie mit dem Methodenrepertoire des Wissenschaftlichen Rechnens: der mathematischen Modellierung, Simulation und Optimierung, der Bild- und Datenverarbeitung sowie der Visualisierung. Als Querschnittsdisziplin trägt das Wissenschaftliche Rechnen entscheidend zur Lösung anspruchsvoller Probleme aus Wissenschaft und Technik bei und gilt damit als eine Schlüsseltechnologie des 21. Jahrhunderts. Seine Methoden kommen bei so unterschiedlichen Fragen zum Einsatz wie dem Entwurf effizienter Brennstoffzellen, der Simulation der Vorgänge beim Hirninfarkt, der Prognose des Pestizidabbaus im Boden oder der Optimierung von Bewegungsabläufen.

Das IWR umfasst heute mehr als fünfzig Forscherteams aus unterschiedlichen Fakultäten sowie neun von jungen Wissenschaftlern geführte Nachwuchsgruppen. Rund 500 Forscherinnen und Forscher arbeiten im Rahmen des Zentrums in interdisziplinären Kooperationen zusammen. Neben Mathematik, Physik, Chemie und Informatik sowie den Lebenswissenschaften sind hier zunehmend auch die Wirtschafts- und Sozialwissenschaften, die Psychologie, die Kognitionswissenschaften sowie die Geistes- und Kulturwissenschaften vertreten. Die Infrastruktur des IWR, auf welche die Forscher zurückgreifen können, umfasst unter anderem Hochleistungsrechner, dreidimensionale Graphiklabore sowie spezielle Laserscanner. Auf Initiative des IWR entstand 2007 die „Heidelberger Graduiertenschule der mathematischen und computergestützten Methoden in den Wissenschaften“ (HGS MathComp), die im Rahmen der Exzellenzinitiative gefördert wird. Hier forschen derzeit rund 150 Doktoranden aus allen am Zentrum vertretenen Fächern.

www.iwr.uni-heidelberg.de

Sie werden durch ihre Eintrittspunkte in den Sektor, ihre Geschwindigkeiten und die gewünschten Ziele bestimmt.

Andere Nebenbedingungen hängen von den individuellen Fähigkeiten des Flugzeugs, also vom Flugzeugtyp, ab. Da jedes Flugzeug einer „nominellen“ Bahn und Geschwindigkeit folgt, die vorab individuell optimiert wurde, ist es aus Sicherheits- und Effizienzgründen wünschenswert, solche konfliktfreien Bahnen zu berechnen, die möglichst wenig von der ursprünglich optimierten Bahn abweichen. Die Optimierung berücksichtigt Änderungen des Geschwindigkeitsprofils, der Flugbahn, der Durchflugzeit in Sektoren oder den Neigungswinkel.

Da wir Trajektorien vieler Flugzeuge simultan optimieren müssen, ist das Optimalsteuerungsproblem von hoher Komplexität. Für seine effiziente Lösung brauchen wir spezielle strukturausnutzende Methoden, an deren Entwicklung wir derzeit in Heidelberg arbeiten.

Von der Variationsrechnung zur optimalen Steuerung

Die modernen Methoden der optimalen Steuerung haben ihre Wurzeln in der Theorie der Variationsrechnung. Sie begann mit dem „Brachistochrone-Problem“, das im Jahr 1696 von dem Schweizer Mathematiker Johann Bernoulli formuliert wurde und die Frage stellt, wie eine Bahn in optimaler Weise geformt sein muss, damit ein Teilchen unter dem Einfluss der Schwerkraft in kürzester Zeit von einem Punkt A zu einem niedriger gelegenen Punkt B gelangt. Die Lösung des Brachistochrone-Problems durch Johann Bernoulli und seinen Bruder Jacob inspirierte herausragende Wissenschaftler wie Gottfried Wilhelm Leibniz und Isaac Newton. Die Mathematiker Leonhard Euler, Joseph-Louis Lagrange, Adrien-Marie Legendre und später Karl Theodor Weierstraß entwickelten im 18. und 19. Jahrhundert das grundlegende Variationskalkül, um optimale Trajektorien mithilfe notwendiger und hinreichender Bedingungen zu bestimmen. Dies führte schließlich zur modernen Optimierungstheorie.

In den frühen 1950er-Jahren wurde es notwendig, viele reale Anwendungsprobleme zu lösen, zum Beispiel in der Raumfahrt. So kam es zu einem weiteren Meilenstein, der Entwicklung des „Pontryaginschen Maximum-Prinzips“ der optimalen Steuerung. Auf diesem Prinzip basieren die sogenannten indirekten Lösungsverfahren. Bis in die 1980er-Jahre wurden diese Methoden mit teilweise spektakulären Ergebnissen eingesetzt, um nichtlineare Prozesse zu optimieren. Die optimale Steuerung muss dabei allerdings „indirekt“ aus einem nur sehr schwer aufzustellenden und zu lösenden Randwertproblem mit adjungierten Gleichungen bestimmt werden. Mit der wachsenden Komplexität praktischer Anwendungen erwies sich dieser Ansatz als nicht mehr problemgerecht. Er wurde deshalb von Verfahren abgelöst, bei denen die

„Mittlerweile zählen wir hierzulande mehr als drei Millionen Flüge pro Jahr: Das bedeutet, dass jeden Tag mehr als zehntausend Flugzeuge starten, landen oder Deutschland überfliegen.“

„Mit Computerlösungen sind wesentlich bessere Ergebnisse zu erzielen als mit Konfliktbewältigungsstrategien von Experten.“

optimalen Steuerungen „direkt“ als Entscheidungsvariablen berechnet werden. Aktuell sind Verfahren, die auf der „direkten Mehrzielmethode“ beruhen, einer in den 1980er-Jahren von dem Heidelberger Mathematiker Hans Georg Bock eingeführten Methode. Am Interdisziplinären Zentrum für Wissenschaftliches Rechnen der Universität Heidelberg werden hocheffiziente Verfahren dieser Art von meiner und anderen Forschungsgruppen für zahlreiche verschiedene Problem- und Komplexitätsklassen erarbeitet und weiterentwickelt.

Computer versus Experten

In unserem gemeinsam mit der Deutschen Flugsicherung durchgeführten Projekt haben wir verschiedene Szenarien komplizierter Konfliktsituationen untersucht. Das Ziel dabei war, Lösungen, die wir mit direkten Verfahren der optimalen Steuerung schnell und zuverlässig berechnet haben (Computerlösungen), mit den Konfliktbewältigungsstrategien von erfahrenen Fluglotsen (Expertenlösungen) zu vergleichen. Das Resultat der Studie ist aufschlussreich: Es zeigt sich eine deutliche Überlegenheit der Computerlösungen. Zum einen werden bei diesen alle Sicherheitsabstände strikt eingehalten – und gleichzeitig vollständig ausgenutzt, zum anderen ergeben sich wesentlich geringere Abweichungen von den ursprünglichen Flugbahnen. Dadurch verursachte Verspätungen sind deutlich seltener, der Luftverkehr wird flüssiger. Auch der Flugwegüberschuss –

die zusätzlich geflogenen Strecken aller Flugzeuge – lässt sich reduzieren. Der verfügbare Luftraum kann somit effizienter genutzt und die Systemkapazität erhöht werden. Dies demonstriert bereits eindrucksvoll das Potenzial der mathematischen MSO gegenüber heuristischen Lösungen.

Ein Industry-on-Campus-Projekt: das HCO

Die Modellierung, Simulation und Optimierung (MSO) als mathematische Schlüsseltechnologie des 21. Jahrhunderts hat die Forschungs- und Entwicklungsarbeit in vielen Bereichen der Industrie und Wirtschaft nachhaltig verändert. Innovative Verfahren der MSO spielen heute eine entscheidende Rolle bei der Lösung komplexer wissenschaftlich-technischer Probleme. Dies gilt insbesondere für den Einsatz der modellgestützten numerischen Optimierung zur schnelleren, besseren und letztlich kostengünstigeren Entwicklung von industriellen Produkten und Prozessen unter Einhaltung zahlreicher Restriktionen. Wichtige Kriterien dabei sind Produktqualität, Minimierung von Energie- und Ressourcenverbrauch, Schadstoffvermeidung und Sicherheit. Umgekehrt bilden die immer komplexeren Prozesse und Lösungsanforderungen aus Industrie und Wirtschaft inzwischen eine der wichtigsten Triebkräfte für die aktuelle Grundlagenforschung in der Optimierung.

Die Idee des Industry-on-Campus-Konzepts des Heidelberg Collaboratory for Industrial Optimization (HCO) ist es, Forscher und Entwickler aus der Industrie mit den Methodenentwicklern an der Universität Heidelberg zusammenzubringen. Ein intensiver Austausch über Erfahrungen und Erwartungen soll dazu beitragen, frühzeitig den Forschungsbedarf für aktuell und künftig benötigte Methoden zu identifizieren und gemeinsame Forschungsprojekte zu initiieren. Rund achtzig Wissenschaftler aus elf Forschergruppen des Interdisziplinären Zentrums für Wissenschaftliches Rechnen der Universität Heidelberg (IWR) sind am HCO beteiligt. Sie arbeiten an gemeinsamen Projekten mit DAX-Unternehmen ebenso wie mit kleinen und mittelständischen Unternehmen, darunter ABB, BASF, Bayer, Daimler, DFS, EnBW, ESA, Lufthansa, Octapharma, Össur, Rockwell-Collins, SAP und TLK Energy. Neben konkreten Forschungs- und Entwicklungsvorhaben bestehen die Kooperationen in gemeinsamen Aus- und Weiterbildungsveranstaltungen und in der Mitwirkung an den sogenannten Challenge Workshops und Netzwerkaktivitäten des nationalen Komitees für Mathematische Modellierung, Simulation und Optimierung (KoMSO).

<http://hco.iwr.uni-heidelberg.de>

CLEARING THE AIR

OPTIMISATION MASTERS COMPLEXITY

EKATERINA KOSTINA

Mobility is essential in our everyday life – and in our internationally networked society, flying in particular has become an indispensable form of travel. In Germany alone, this results in more than 10,000 flights that take off, land or fly over national territory every day. The steady increase in air traffic, coupled with strict requirements regarding safety, efficiency, capacities and environmental protection, represents a formidable challenge to air traffic management. Mastering this challenge will require sophisticated methods of decision support, planning and control, which can only be developed based on innovative methods of mathematical modelling, simulation and optimisation (MSO).

In a joint project with the German Air Navigation Services (Deutsche Flugsicherung), my research group was the first to investigate the potential of applying modern direct methods of mathematical optimisation and optimal control to the core problem of air traffic control, the so-called separation management. This is the task of separating all aircraft in an allocated airspace as efficiently as possible in order to avoid conflict situations, something that can be modelled as a very large and complex optimal control problem with numerous state constraints. The results of the study are very promising and reveal an enormous potential of improving air traffic control. They also prove that mathematical methods can solve these very difficult problems reliably, in real time and with more efficiency than human controllers. Indeed, the methods safely resolve complex conflicts in separation management involving several aircraft. They maintain prescribed separation margins while requiring only minimal deviations from original flight plans. As an added bonus, they also lead to remarkable fuel savings of up to five per cent.

However, there are still many challenges to the mathematical methods that must be mastered before the vision of an automated reliable decision support system can become a reality. My group in collaboration with other research groups at the Heidelberg Collaboratory for Industrial Optimization are prepared to address these challenges. ●

PROF. DR EKATERINA KOSTINA is Professor of Numerical Analysis at Heidelberg University. After completing her university studies and PhD in mathematics in Minsk (Belarus), she accepted a position as research assistant at Heidelberg University's Interdisciplinary Center for Scientific Computing (IWR) in 1997. From 2006 to 2015 she held the Chair of Numerical Optimisation at the University of Marburg. She is a founding member of the national Committee for Mathematical Modeling, Simulation and Optimization (KoMSO). Prof. Kostina's research focuses on the development of numerical methods of non-linear optimisation and optimal control and their application to complex dynamic processes in science and technology. Along with colleagues from the IWR, she also contributes to the Heidelberg Collaboratory for Industrial Optimization (HCO).

Contact: ekaterina.kostina@iwr.uni-heidelberg.de

“Our aim is to provide powerful decision support systems that are able to cope with the rapidly growing air traffic and can identify and solve conflicts automatically.”

Ein weiterer großer qualitativer Unterschied zwischen mathematischer und menschlicher Konfliktbewältigung ist die ungleiche Verteilung der Lasten: Die Mathematik behandelt alle Flugzeuge prinzipiell gleich – menschliche Lotsen aber neigen dazu, bei der Lösung eines Problems einzelne Flugzeuge stärker als andere zu belasten. Die mathematische Lösung wird daher von den Piloten eher als „fair“ eingeschätzt und findet eine höhere Akzeptanz. Eine gleichmäßigere Verteilung hat darüber hinaus noch zwei weitere Vorteile: Erstens bewirken Kurskorrekturen, die notwendig werden, geringere Abweichungen von den nominellen Flugplänen – Fluglinien und Flugraumnutzer können dann effektiver vorausplanen, was die gesamte Planbarkeit des Flugverkehrssystems erhöht; zweitens entstehen seltener Dominoeffekte durch einzelne, besonders stark verspätete Flüge, die das gesamte System beeinträchtigen.

Wichtige positive Nebeneffekte unseres Ansatzes sind darüber hinaus, dass der niedrigere Flugwegüberschuss Treibstoff merklich einsparen lässt und weniger Korrekturmanöver notwendig macht. Im Durchschnitt können die Treibstoffeinsparungen der mathematischen gegenüber der menschlichen Lösung auf fünf Prozent geschätzt werden.

Ein Blick in die Zukunft

Ein mittelfristiges, auch von den Flugaufsichtsbehörden gewünschtes Ziel ist es, leistungsfähige Systeme zur Entscheidungsunterstützung bereitzustellen, die dem rapide zunehmenden Flugverkehr gewachsen sind und Konfliktsituationen automatisch erkennen und lösen. Derartige Systeme lassen sich nach unseren bisherigen Forschungsergebnissen nur auf der Basis innovativer Verfahren der modellgestützten Optimierung und optimalen Steuerung realisieren. Auf dem Weg dahin sind noch zahlreiche Hürden, auch mathematischer Art, zu nehmen. Einige der Herausforderungen, die künftig zu bewältigen sind, seien nachfolgend beschrieben. Wir haben sie auf einem sogenannten Challenge Workshop zum Thema „Mathematical MSO for Air Traffic Management“ herausgearbeitet, das kürzlich gemeinsam mit Lufthansa Systems stattfand.

Die bislang von uns berechneten optimalen Konfliktlösungen beruhen zunächst auf kontinuierlichen Kursänderungen. Die entsprechenden Korrekturen können aber bei der verbalen Kommunikation zwischen einem Fluglotsen und einem Piloten nur mit einem endlichen Repertoire von Kommandos übermittelt werden. Die Modellierung dieses Prozesses führt mathematisch auf das grundsätzlich viel schwierigere Problem der optimalen Steuerung mit „diskreten“ Entscheidungsvariablen: Hierfür müssen neue Methoden entwickelt werden, die etwa auf intelligenten Relaxierungen und auf Rundung beruhen.

Das Realisieren optimaler Konfliktlösungen birgt zahlreiche Fehlerquellen. So variieren die Modelle für die

verschiedenen Flugzeugtypen sehr stark. Hinzu kommt, dass die aktuelle Flugleistung von der abnehmenden Treibstoffmasse abhängt. Inputdaten, etwa der Eintritt des Flugzeugs in den Sektor, werden zudem ungenau und zeitversetzt übermittelt – wobei eine Zeitverzögerung von dreißig Sekunden bei einer Geschwindigkeit von 840 Kilometern pro Stunde bereits sieben Kilometer ausmacht. Auch das Umsetzen der Korrekturmanöver geschieht zeitversetzt. Solche Ungenauigkeiten und Unsicherheiten müssen bei der Optimierung von vornherein einkalkuliert und kompensiert werden. Dies führt auf Probleme der „robusten“ Optimierung – ein weiteres aktuelles Forschungsgebiet meiner Arbeitsgruppe.

Andere mögliche Fehlerquellen sind äußere Einflüsse und Störungen, die nicht vorherzusehen sind. Wind- und Wetterdaten beispielsweise können sich lokal schnell ändern und haben großen Einfluss auf die Flugdynamik. Dies zu berücksichtigen, erfordert nicht allein ein dichtes Datennetz. Notwendig ist es auch, die aktuelle Situation schnell und zuverlässig einzuschätzen und die optimale Lösung an die Störung mit echtzeitfähigen Methoden anzupassen („Feedback“). Bei der Entwicklung solcher Verfahren haben wir in den letzten Jahren bereits enorme Fortschritte erzielt.

Langfristig gesehen realisiert man den größten gesellschaftlichen Nutzen nur durch eine simultane Optimierung und optimale Steuerung zur antizipativen Flugplanung für alle Flugzeuge und Fluglinien über einen längeren Zeitraum und eine größere räumliche Ausdehnung. Auch Sicherheit, Komfort, Umweltkonsequenzen und Kosten sind dabei zu berücksichtigen. Wegen der stets möglichen Störungen ist dies nur mit einem Optimierungsverfahren vorstellbar, das echtzeitfähig und robust ist und räumliche und zeitlich lokale Konflikte auflösen kann.

Ein solcher strategischer Ansatz wird derzeit diskutiert. Er setzt voraus, dass Flugplanung und Flugsicherung weitgehend reorganisiert werden und eine aufwendige Informations- und Kommunikationstechnik vorhanden ist. Echte Durchbrüche für den Flugverkehr der Zukunft hängen allerdings in erster Linie davon ab, dass auf dem Gebiet der mathematischen Verfahren zur Optimierung und optimalen Steuerung Fortschritte erzielt werden. Nur dann lassen sich Probleme solcher Komplexität lösen – wir arbeiten daran. ●

„Unser Ziel ist es, leistungsfähige Systeme zur Entscheidungsunterstützung bereitzustellen, die dem rapide wachsenden Flugverkehr gewachsen sind und Konfliktsituationen automatisch lösen.“