



Schlussbericht

Verbund: 05M2013 - E-MOTION

Zuwendungsempfänger:	Konrad-Zuse-Zentrum für Informationstechnik Berlin (ZIB)
Projektleitung:	Prof. Dr. Ralf Borndörfer
E-Mail:	borndoerfer@zib.de
Förderkennzeichen:	05M13ZAB
Förderzeitraum:	01.07.2013 - 30.06.2016
Zuwendung:	149.241,21 €
Projektträger:	Projektträger DESY
Zusätzlicher Kontakt:	a.steinke@zib.de
Zusätzlicher Name:	Annerose Steinke

Genutzte Großgeräte:	Labor	Gerät	Experiment
Diplomarbeiten:	0		
Dissertationen:	1		
Habilitationen:	0		
Referierte Publikationen:	2		
Andere Veröffentlichungen:	1		
Patente:	0		
Bachelorarbeiten:	0		
Masterarbeiten:	3		
Staatsexamen:	0		

Dieser Bericht wurde beim Projektträger über einen individuellen Online-Zugang vom Projektleiter eingereicht und am 10.02.2017 18:48 für eine Veröffentlichung freigegeben.

Schlussbericht

Zuwendungsempfänger: *Konrad-Zuse-Zentrum für Informationstechnik Berlin*

Projektleitung: Prof. Dr. Ralf Borndörfer

Verbund: 05M2013 - E-MOTION

Thema: ATN-Flugroutenplanung

Zusammenfassung

Das Teilprojekt ATN-Flugroutenplanung des Forschungsverbundes Energieeffiziente Mobilität (E-Motion) befasste sich mit dem Problem, eine kostenminimale Flugtrajektorie zwischen Startflughafen und Zielflughafen in einem Luftwege-Netzwerk (ATN = Airway Traffic Network) zu bestimmen. In Kooperation mit unserem Industriepartner Lufthansa Systems AG wurde die Problemstellung definiert und die benötigten Daten spezifiziert und vom Projektpartner gesammelt und bereitgestellt. Diese Datenbank war Grundlage und Basis für die Forschungsarbeit an mathematischen Algorithmen. Sie umfasste unter anderem Informationen zum Netzwerk, Wetter, Performance-Eigenschaften der Flugzeuge, Routingregeln im Netzwerk und Kostenfaktoren der Airlines.

Das Flugroutenplanungsproblem stellt uns vor mehrere einzigartige Herausforderungen. An jedem Zeitpunkt muss das genaue Gewicht des Flugzeugs und die aktuelle Wetterlage beachtet werden, um Flugzeit und Treibstoffverbrauch genau berechnen zu können. Dies macht es viel schwieriger, eine Preprocessing-Phase im Algorithmus zu entwerfen, als das zum Beispiel bei klassischen Routingproblemen auf Straßennetzwerken der Fall ist. Des Weiteren gibt es eine große Menge von Restriktionen, die beachtet werden müssen und die mathematische Komplexität des Problems wesentlich erhöhen. Die Klassifikation und Untersuchung dieser Restriktionen war ein wichtiger Bestandteil des Forschungsprojektes. Interessant ist auch die Betrachtung von Überfluggebühren, die auf ein neuartiges mathematisches Problem führt, das in der Wissenschaft bisher nicht betrachtet worden ist, aber für Fluggesellschaften eine wichtige Rolle spielt.

Unterschiedliche algorithmische Ansätze basierend auf vorhandene kürzeste-Wege-Algorithmen wurden entwickelt und getestet. Einer der Ansätze, der sich für die Anwendung als besonders effizient erwiesen hat, ist ein neues Verfahren für die Berechnung des Treibstoffverbrauchs. Dieses Verfahren basiert auf der Approximation von nichtlinearen Funktionen mit stückweise linearen Funktionen und auf der Identifizierung von optimalen Wetterlagen. Damit kann man sehr gute untere Schranken für

den A*-Algorithmus berechnen. In [2] sind diese algorithmischen Verfahren beschrieben und veröffentlicht worden. Diese Arbeit wurde beim jährlich stattfindenden internationalen ATMOS Workshop mit dem Best Paper Award 2016 ausgezeichnet. Wir bereiten derzeit eine Veröffentlichung der dort verwendeten Testdaten für die wissenschaftliche Community vor. Alle Ansätze und Algorithmen wurden in einem Software-Prototyp VOLAR (Versatile Optimization of Least-consumption Aircraft Routes) implementiert. VOLAR wird derzeit in das Flugplanungstool Lido/Flight der Lufthansa Systems AG integriert.

Auf der theoretischen Seite wurden eine neue vollständige lineare Beschreibung des Path Avoiding Forbidden Pairs Problems [1] gefunden, welches ein wichtiges Teilproblem der Flugroutenplanung darstellt. Für das Thema Überfluggebühren haben wir die ersten Komplexitätsaussagen und effizienten Algorithmen in [3] präsentiert.

Im Rahmen des Projektes wurden drei Masterarbeiten geschrieben und zahlreiche Vorträge bei nationalen und internationalen Tagungen gehalten. Die Doktorarbeit von Herrn Marco Blanco zum Thema „Dynamic Constrained Shortest-Path Algorithms for the Flight-Route-Planning Problem“ wird voraussichtlich im Jahr 2017 abgeschlossen; ebenso wie die Masterarbeit von Herrn Pedro Maristany zum Thema „Cost Minimal Aircraft Trajectories“.

Eine Fortsetzung des Projektes, finanziert von der Lufthansa Systems AG, ist für den März 2017 geplant.

Bericht

1 Aufgabenstellung und Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Aufgabe der ATN-Flugroutenplanung ist die Bestimmung einer Flugtrajektorie zwischen Startflughafen und Zielflughafen mit minimalen Kosten. Dabei sind Wettereinflüsse, Flugzeugeigenschaften, das Gewicht und zahlreiche Sicherheits- und operative Regeln zu berücksichtigen. Die wichtigsten Kostentypen, die bei der Optimierung betrachtet werden, sind Treibstoffkosten und Überflugkosten. Der benötigte Treibstoff stellt mit Abstand den größten Kostenfaktor dar. Eine energieeffiziente Planung der Flugrouten führt also direkt zu Kosteneinsparungen.

Flugrouten benutzen heute zum größten Teil Luftstraßen, die Wegpunkte in einem Air Traffic Network (ATN) verbinden. Dieses Netzwerk schreibt vor, wie eine zulässige Flugtrajektorie horizontal verlaufen darf. Auf der vertikalen Ebene gibt es eine Menge von ca. 40 möglichen Flughöhen, die für *Cruise* (also horizontalen Flug) verfügbar sind. Flugzeuge dürfen eine Steig- oder Sinkphase nur dann beginnen, wenn sie sich über einem Wegpunkt befinden. Der Steigwinkel ist von unterschiedlichen Faktoren wie Flugzeugtyp, Gewicht und Wetterlage abhängig.

Durch den ständig zunehmenden Flugverkehr wird der Luftraum zu einer immer knapperen Ressource. Deswegen wird von der Luftsicherung (in Europa Eurocontrol) versucht, den Flugverkehr gleichmäßig zu verteilen. Ein Ansatz dazu sind gegenseitige Ausschlüsse von möglichen Wegpunkten auf den Flugrouten. In Europa werden diese Restriktionen im sogenannten *Route Availability Document* (RAD) gesammelt und monatlich veröffentlicht. Durch die steigende Komplexität und Anzahl der Regeln (im Jahr 2016 im fünfstelligen Bereich) wird es für die Fluggesellschaften zunehmend schwieriger, optimale – manchmal überhaupt zulässige – Lösungen zu berechnen.

Zusätzlich zum Treibstoffverbrauch sind Überfluggebühren ein wichtiger Bestandteil der Kosten, die mit dem Verlauf einer Route verbunden sind. Die Grundidee ist, dass Staaten eine Bezahlung für die Nutzung ihres Luftraums verlangen. Diese Gebühren sind von unterschiedlichen Faktoren abhängig, z.B. vom Gewicht des Flugzeugs, vom Start- und Zielland und von der geflogenen Distanz im Luftraum. Es gibt kein einheitliches Kostenmodell, die Modelle variieren stark von Land zu Land.

Flugrouten müssen noch zahlreiche andere Bedingungen erfüllen. So ist es für die Passagiere unkomfortabel, wenn die Flughöhe zu oft oder zu stark geändert wird, manche Gebiete dürfen temporär nicht überflogen werden, und zahlreiche Sicherheitsregeln sind zu erfüllen, z. B. die Einhaltung von Mindestflughöhen, oder die Erreichbarkeit von Ersatzflughäfen in Notfällen.

Aus mathematischer Sicht handelt es sich bei der ATN-Flugroutenplanung um ein Kürzeste-Wege-Problem mit komplexen Nebenbedingungen in einem Digraphen mit dynamischen Kantenkosten. Die Herausforderung besteht erstens in der giganti-

schen Größe des zu betrachtenden Netzwerkes. Die rein räumlichen Netze bestehen typischerweise aus ca. 2,5 Mio. Knoten und mehr als 20 Mio. Kanten. Zweitens hängen die Kantenkosten stark vom Gewicht des Flugzeuges ab, insbesondere von der zu minimierenden Treibstoffmenge. Drittens sind die oben erwähnten Nebenbedingungen, insbesondere die RAD-Restriktionen, zu beachten. Viertens lassen sich die Kostenfunktionen von Überfluggebühren nicht *à priori* auf die Kanten umlegen, so dass maßgeschneiderte Algorithmen benötigt werden.

Das Teilprojekt wurde in der Abteilung Mathematical Optimization des Konrad-Zuse-Zentrums für Informationstechnik Berlin unter der Leitung von Prof. Dr. Ralf Borndörfer im Rahmen des Verbundprojektes Energieeffiziente Mobilität (E-MOTION) durchgeführt. In diesem Verbund kooperierten die Technische Universität Chemnitz, die Technische Universität Braunschweig, die Friedrich-Alexander-Universität Erlangen (FAU), die Helmut-Schmidt-Universität Hamburg und das Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen (IIS) / Fraunhofer-Arbeitsgruppe für Supply Chain Services (SCS). Als Industriepartner waren die Lufthansa Systems AG, die Deutsche Bahn AG und die Kombiverkehr mbH & Co KG beteiligt. Verbundkoordinator war Prof. Dr. Alexander Martin (FAU). Die Laufzeit des Vorhabens war vom 01.09.2013 bis zum 30.06.2016. Mit den Personalmitteln des Teilvorhabens „ATN-Flugroutenplanung“ wurde Herr MMath Marco Blanco als wissenschaftlicher Mitarbeiter eingestellt.

Die Lufthansa Systems AG ist mit dem System Lido/Flight Weltmarktführer für die Optimierung von Flugzeugtrajektorien zur Einsparung von Treibstoff. Die wachsende Reichweite der Flugzeuge, zunehmende Regulierung, neue Anforderungen in Bezug auf die Sicherheit und die Lärmminimierung, innovative Betriebsformen des Free Flight, der Single European Sky etc. erfordern die Entwicklung einer neuen Generation von performanten Planungssystemen. Dadurch kann langfristig der nationale und internationale Flugverkehr energieeffizient und ressourcenschonend durchgeführt werden.

2 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Das Flugtrajektorienoptimierungsproblem wird zurzeit vorwiegend in der Industrie und weniger in der Wissenschaft untersucht. Daher ist die Anzahl an relevanten aktuellen wissenschaftlichen Publikationen gering. Dies ist wahrscheinlich darauf zurückzuführen, dass es nur eine kleine Menge von Unternehmen gibt, die sich mit der Frage in der Praxis beschäftigen. Das Problem ist so komplex, dass die meisten Fluggesellschaften Tools von Anbietern wie unserem Industriepartner benutzen. Dies führt auch dazu, dass es für Wissenschaftler ohne direkten Kontakt zu diesen Unternehmen nicht einfach ist, an die relevanten Daten und Definitionen zu kommen. Einige davon, wie z.B. Flugzeug-Performancedaten, sind in der Regel nicht öffentlich verfügbar. Andere, wie die Netzwerkdaten, die Modelle für Überfluggebühren, oder die Restriktionen sind zwar im Prinzip für verfügbar. In der Praxis ist es aber so, dass diese Daten von zahlreichen unterschiedlichen Behörden veröffentlicht werden und erst von den Fluggesellschaften und Flugplanungsunternehmen gesammelt und or-

ganisiert werden. Zuletzt gibt es auch Daten, wie z.B. Wettervorhersagen, die mit geringem Aufwand beschafft werden können. Es besteht allerdings das Problem, dass für die konkrete Anwendung komplexe Interpolationsalgorithmen verwendet werden müssen, die von Anwender zu Anwender variieren können.

Der größte Teil der Veröffentlichungen, die sich mit dem Flugroutenplanungsproblem beschäftigen, ist für dieses Projekt von wenig Relevanz, weil das Problem zu stark vereinfacht wird oder Modelle (z.B. zur Treibstoffberechnung) verwendet werden, die von unserem Industriepartner nicht akzeptiert werden.

Eine sehr gute Übersicht des Problems wird in

- Stefan E. Karisch, Stephen S. Altus, Goran Stojković, and Mirela Stojković. Operations. In Cynthia Barnhart and Barry Smith, editors, Quantitative Problem Solving Methods in the Airline Industry, volume 169 of International Series in Operations Research & Management Science, pages 283–383. Springer US, 2012

dargestellt. Allerdings wird in dieser Publikation nur auf einem sehr hohen Niveau erklärt, was die algorithmischen Probleme sind.

Beim Flugroutenplanungsproblem handelt es sich um ein Problem der kombinatorischen Optimierung, das dem klassischen Feld des Routings zugeordnet werden kann. Dort kamen schon früh grundlegende algorithmische Ideen wie z.B. der Dijkstra-Algorithmus oder A*-Methoden zum Einsatz. Durch die Einführung von immer mehr Routingregeln und immer komplexerer Kostenmodelle z.B. für den Überflug stoßen die bekannten Algorithmen jedoch an ihre Grenzen. Die notwendigen Erweiterungen und Anpassung der Modelle und Algorithmen sind ein spannendes Forschungsfeld der angewandten Mathematik im Übergangsbereich von mathematischer Theorie und praktischer Informatik.

Die effiziente Berechnung von kürzesten Wegen ist ein thematisch naheliegendes Forschungsfeld. In den letzten 10 Jahren wurden dort zahlreiche neue Algorithmen entwickelt, die auf umfangreichen Preprocessingphasen basieren. Dabei wird das Netzwerk vorverarbeitet, ohne Kenntnis von den Knotenpaaren zu haben, zwischen denen kürzeste-Wege berechnet werden. Die Ergebnisse werden in Datenstrukturen gespeichert, die es dann ermöglichen, kürzeste Wege in einer extrem kurzen Zeit zu berechnen. Solche Methoden werden vor allem für Routings in Straßennetzwerken angewandt. Dadurch wird teilweise ein Beschleunigungsfaktor von 40000 im Vergleich zum Dijkstra-Algorithmus erreicht. Zu den bekanntesten und effektivsten Ansätzen aus diesem Bereich gehören *Contraction Hierarchies* und *Hub Labeling*:

- G. Veit Bätz, Robert Geisberger, Peter Sanders, and Christian Vetter. Minimum time-dependent travel times with contraction hierarchies. J. Exp. Algorithmics, 18:1.4:1.1–1.4:1.43, April 2013.
- Ittai Abraham, Daniel Delling, Andrew V. Goldberg, and Renato F. Werneck. Algorithms – ESA 2012: 20th Annual European Symposium, 2012. Proceedings, chapter Hierarchical Hub Labelings for Shortest Paths, pages 24–35. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2012.

Eine gute Übersicht findet man in:

- Hannah Bast, Daniel Delling, Andrew V. Goldberg, Matthias Müller-Hannemann, Thomas Pajor, Peter Sanders, Dorothea Wagner, and Renato F. Werneck. Route planning in transportation networks. CoRR, abs/1504.05140, 2015.

Besonders interessant für unser Teilvorhaben war der Contraction Hierarchies Ansatz, weil er in der Lage ist, auch zeitabhängige kürzeste-Wege Probleme zu lösen.

3 Planung und Ablauf des Vorhabens sowie Kooperation mit Dritten

Im Ablauf des Teilvorhabens wurden die im Projektantrag formulierten Meilensteine erreicht. Während der Projektphase fanden regelmäßige Arbeitstreffen aller Kooperationspartner statt, in denen über den aktuellen Stand der Forschung und des Projektes berichtet und diskutiert wurde. Insbesondere lag das Teilvorhaben „Freeflight“, in der HSU Hamburg, thematisch nah an unserem Teilvorhaben, welches zu einem sehr produktiven Austausch zwischen den beiden Teilprojekten führte. Ebenso fand eine intensive Zusammenarbeit mit dem Industriepartner Lufthansa Systems AG mit regelmäßigen bilateralen Treffen in Berlin und Frankfurt statt. Gleich zu Beginn des Projektes nutzten Herr Marco Blanco und Herr Zhi Yuan (HSU) die Chance, drei Wochen direkt beim Praxispartner Lufthansa Systems in Frankfurt zu verbringen, um das Softwaresystem Lido/Flight zur Flugroutenplanung kennenzulernen und alle Aspekte, die für die Optimierung relevant sind, aus erster Hand erläutert zu bekommen. Auch mit anderen Teilprojekten wurde produktive Zusammenarbeit geführt. So hatten wir zum Beispiel zielführende Ideenaustausche mit den Mitarbeitern des Teilprojektes „Optimierung von Zugfahrplänen zur Senkung der Spitzenlasten im Bahnstromnetz“, die sich wie wir mit der Approximation von nichtlinearen Funktionen durch stückweise linearer Funktionen beschäftigt haben; oder mit Herrn Dr. Michael Drexl (Teilprojekt „Energieeffiziente Netzplanung für den kombinierten Verkehr“), dessen Erfahrung mit dem *Resource Constrained Shortest Path* Problem für die Treibstoffoptimierung in unserem Projekt sehr wertvoll war.

Prof. Dr. Ralf Borndörfer wurde in Mai 2014 von Lufthansa Systems zur *Lido/Flight User Group Conference 2014* in Prag eingeladen. Dies ist eine jährliche Veranstaltung, auf der sich die Entwickler von Lido/Flight mit ihren Kunden treffen, um über die neusten Entwicklungen zu berichten. Herr Borndörfer konnte dort über die mathematischen Fragestellungen und die neuesten algorithmischen Ansätze, die in diesem Teilprojekt untersucht werden, vortragen. Das Interesse der Anwender, in diesem Fall Flugplanungsexperten verschiedener internationaler Airlines, war enorm.

Die erzielten wissenschaftlichen Ergebnisse wurden im Rahmen nationaler und internationaler Konferenzen vorgestellt, um die Forschungsergebnisse vor Fachpublikum zu präsentieren und zu diskutieren, siehe Abschnitt 9.4.

4 Verwendung der Zuwendung (wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises, z.B. Investitionen, Personalmittel)

Das Teilprojekt wurde am Konrad-Zuse-Zentrum für Informationstechnik Berlin unter der Leitung von Prof. Dr. Ralf Borndörfer durchgeführt. Aus den Personalmitteln des Teilvorhabens „ATN-Flugroutenplanung“ wurde Herr MMath. Marco Blanco an der Abteilung „Mathematical Optimization“ eingestellt.

5 Erzielte Ergebnisse mit Gegenüberstellung der vereinbarten Ziele

Ziel des Projekts war es, mathematische Modelle zur Bestimmung optimaler Flugrouten in einem Netzwerk zu untersuchen und ggf. neu zu entwickeln, siehe Abschnitt 9. Dieses Ziel wurde erreicht. Aufgrund der positiven Einschätzungen des Praxispartners Lufthansa Systems AG wurden weitere Schritte eingeleitet, um den Wissenstransfer der Resultate dieses Forschungsprojektes in die Praxis zu ermöglichen, siehe Abschnitt 7.

Im Folgenden präsentieren wir die wichtigsten wissenschaftlichen Ergebnisse, die im Projekt erreicht wurden.

Integrierter Suchalgorithmus für die Lösung von Flugroutenplanungsproblemen

Ein komplexer Algorithmus wurde entwickelt, der alle Kostenfaktoren und Nebenbedingungen betrachtet, die in enger Zusammenarbeit mit dem Industriepartner definiert wurden. Der Lösungsansatz basiert auf dem Dijkstra-Algorithmus und dem A*-Algorithmus. Durch speziell entwickelte Preprocessingverfahren und Knotenpotenziale wird das Modell reduziert, so dass der Suchraum wesentlich kleiner wird, ohne auf Optimalität zu verzichten.

Preprocessingtechniken (Super-optimaler Wind)

Wir haben viele unterschiedliche Preprocessingtechniken entwickelt, die unabhängig vom Start- und Zielflughafen sind und in der konkreten Anwendung zum Beispiel einmal am Tag oder einmal im Monat durchgeführt werden können. Dadurch wird die Lösungszeit wesentlich verringert. Eine der wichtigsten dieser Techniken ist die Unterschätzung der Flugzeit entlang einer Kante auf einer bestimmten Flughöhe. Für eine konstante Fluggeschwindigkeit ändert sich die Flugzeit als Funktion der Zeit durch den Einfluss des Windes. Unser Verfahren basiert darauf, einen sogenannten *Super-optimal Wind* zu berechnen, welcher ein „imaginärer“ Windvektor ist, der eine kleinere Flugzeit auf der Kante verursacht, als alle Windvektoren im zu betrachtenden Zeitintervall. Dies wird durch eine sorgfältige Fallunterscheidung und geeignete numerische Verfahren sichergestellt. Die Methode ermöglicht es, für jeden Wegpunkt im ATN-Netzwerk eine untere Schranke für die benötigte Flugzeit (und somit für den benötigten Treibstoff) bis zum Ziel sehr effizient zu berechnen. Die so berechneten Daten können dann sowohl von einem A*-Algorithmus als auch bei einer *à priori* Suchraumbeschränkung (die zusätzlich eine gute obere Schranke benötigt) angewandt werden.

A*-Algorithmus

Der A*-Algorithmus für die Lösung von kürzesten Wegen ist seit vielen Jahrzehnten bekannt und hat in zahlreichen Gebieten eine Anwendung gefunden. Die Schwierigkeit besteht darin, eine gute nicht-triviale Potentialfunktion zu bestimmen; diese muss problemspezifisch entworfen werden. In unserem Problem nutzen wir die Eigenschaft aus, dass die Menge von möglichen Zielen (also die Menge der Flughäfen) im Vergleich zur gesamten Menge der Knoten im Graphen sehr klein ist. Dies ermöglicht uns, gültige Potentiale zu berechnen indem wir aus jedem Flughafen eine Rückwärts-Dijkstra-Suche mit Kantenkosten ausführen, die mit dem Super-optimal Wind Ansatz berechnet werden.

Instance	DIJK _{PWL}		TCH		A* _{PWL}		
	query (ms)	prep (min)	query (ms)	speedup ×	prep (s)	query (ms)	speedup ×
I-29-Dec-1	4.91	380.48	4.08	1.20	1.82	0.22	21.51
I-34-Dec-1	4.91	451.82	4.27	1.15	1.83	0.24	20.24
I-39-Dec-1	4.93	195.75	3.23	1.53	1.81	0.16	30.15
I-29-Feb-1	4.90	414.78	3.94	1.25	1.87	0.21	22.96
I-34-Feb-1	4.86	466.95	3.96	1.23	1.72	0.21	22.23
I-39-Feb-1	4.92	184.20	3.01	1.63	1.72	0.15	31.50
I-29-Mar-1	4.55	216.57	2.82	1.61	1.50	0.16	27.27
I-34-Mar-1	4.55	189.18	2.92	1.55	1.56	0.18	24.38
I-39-Mar-1	4.58	127.38	2.52	1.81	1.54	0.15	29.45
I-29-Dec-3	4.36	312.40	2.67	1.63	1.54	0.19	22.03
I-34-Dec-3	4.38	351.70	2.80	1.56	1.54	0.21	20.85
I-39-Dec-3	4.38	160.20	2.30	1.90	1.54	0.14	30.87
I-29-Feb-3	4.31	328.47	2.66	1.62	1.51	0.18	23.09
I-34-Feb-3	4.28	372.15	2.92	1.47	1.60	0.19	21.68
I-39-Feb-3	4.33	155.07	2.20	1.97	1.52	0.13	31.94
I-29-Mar-3	4.22	179.45	2.31	1.82	1.34	0.14	28.39
I-34-Mar-3	4.26	146.52	2.33	1.83	1.37	0.16	26.68
I-39-Mar-3	4.26	96.80	2.03	2.10	1.35	0.13	31.02
Summary							
Average	4.55	262.77	2.94	1.60	1.59	0.18	25.90
Minimum	4.22	96.8	2.03	1.15	1.34	0.13	20.24
Maximum	4.93	466.95	4.27	2.10	1.87	0.24	31.94

Abbildung 1: Vergleich von TCH und A* auf 18 Instanzen

Der A*-Algorithmus in Kombination mit dem Super-optimal Wind Ansatz wurde auf der ATMOS 2016 Konferenz vorgetragen. Der dazugehörige Proceedingsartikel [2] hat dabei den *Best Paper Award* gewonnen. In der Arbeit wurde unser A*-Algorithmus mit dem Time-Dependent-Contraction Hierarchies (TCH) Algorithmus auf dem ATN-Netzwerk verglichen. Dabei hat sich herausgestellt, dass der A*-Algorithmus um einen Faktor 16 schneller als TCH ist. Der Vortrag wurde vom Publi-

kum mit großem Interesse verfolgt. Aus dem Vortrag sind Kontakte zu den führenden Arbeitsgruppen im Bereich der Algorithmen für zeitabhängige kürzeste Wegen entstanden. Es besteht ein großes Interesse an einer wissenschaftlichen Zusammenarbeit. Wir werden deshalb demnächst unsere Testdaten der wissenschaftlichen Community zur Verfügung stellen.

In Abbildung 1 werden die wichtigsten Rechenergebnisse aus [2] dargestellt. Für unterschiedliche Instanzen wird die Laufzeit des klassischen Dijkstra-Algorithmus mit der eines effizienten TCH und unseres A*-Algorithmus verglichen. Bei den letzten beiden Verfahren ist nicht nur die *Query*-Zeit von Interesse (also die Durchschnittszeit für die Berechnung eines bestimmten kürzesten Weges), sondern auch die Pre-processingzeit. Nach beiden Kriterien ist unser A*-Algorithmus offensichtlich wesentlich besser als die etablierten Methoden.

Treibstoffberechnung durch Approximation mit stückweise-linearen Funktionen

Die Berechnung des Treibstoffverbrauchs während der Cruise-Phase wird in der Praxis mit Hilfe von Tabellen, die vom Flugzeughersteller erstellt werden, durchgeführt. Um den Verbrauch exakt zu berechnen, müsste man das Integral einer nichtlinearen Funktion berechnen, die durch Tabellenwerte gegeben ist, zwischen den interpoliert wird. Aktuell wird dieses Integral mit einem sehr elementaren Verfahren approximiert. Wir haben einen Ansatz entwickelt, der die Stammfunktion mit einer stückweise linearen Funktion approximiert und diese für die Treibstoffberechnung verwendet. Nach zahlreichen Tests hat sich herausgestellt, dass unser Verfahren sowohl schneller als auch genauer ist. Die Ergebnisse wurden bei der Vorbereitung von [4] erzielt und werden aktuell für die Veröffentlichung in einer wissenschaftlichen Zeitschrift überarbeitet.

Behandlung von Restriktionen

Eine komplexe Herausforderung und einer der Hauptgründe, warum Lufthansa Systems auf der Suche nach neuen Algorithmen für den Optimierungskern in Lido/Flight ist, sind die Restriktionen im RAD-Dokument (siehe 1.). Eines der Ziele des Projektes war eine Klassifizierung solcher Regeln sowie die Entwicklung stabiler Algorithmen für deren Behandlung.

Bei der Untersuchung der Daten hat sich herausgestellt, dass ca. 25% der Regeln sich in einem *Shortest Path with Forbidden Pairs*-Modell darstellen lassen. Bei diesem Problem ist das Ziel, einen kürzesten Weg in einem gerichteten Graphen zu bestimmen, wobei es eine Menge von Knotenpaaren gibt, so dass ein gültiger Pfad höchstens einen Knoten aus jedem Paar enthalten darf. Dieses Problem ist seit vielen Jahren bekannt und im Allgemeinen NP-schwer. Nur in bestimmten Fällen lässt es sich in polynomieller Zeit lösen. Obwohl es in der Literatur für solche Fällen kombinatorische Algorithmen gibt, die das Problem exakt lösen, wurde das Problem noch nicht aus der Sicht der ganzzahligen Programmierung erforscht. In [2] haben wir gezeigt, wie sich das Polytop der ganzzahligen Lösungen des Problems mit linearen

Ungleichungen darstellen lässt. Dieses Polytop hat zwar eine exponentielle Anzahl an Restriktionen, ist aber trotzdem in polynomieller Zeit behandelbar. Diese Resultate basieren auf einer neuen Familie von Ungleichungen und neuen Beweistechniken, die von den Gutachtern als besonders kreativ und innovativ bewertet wurden.

Die RAD-Restriktionen führen aber im allgemeinen Fall auf ein Problem, das viel komplizierter und allgemeiner als ein Forbidden-Pairs-Problem ist. Wir haben gezeigt, dass das kürzeste-Wege-Problem unter Betrachtung von RAD-Restriktionen sich als ein pseudoboolsches Optimierungsproblem modellieren lässt. Für die Lösung haben wir sowohl den akademischen Solver SCIP, welcher am Zuse-Institut Berlin entwickelt wird, als auch einen Branch & Bound-Algorithmus implementiert, der die pseudoboolsche Struktur ausnutzt. Obwohl der erste Ansatz gute Ergebnisse erzielt hat, haben wir uns letztendlich für den zweiten entschieden, da dieser eine größere Flexibilität bietet.

Ebenso wie andere wichtige Aspekte des Problems ist der Einfluss und die Optimierung der Überfluggebühren in der Wissenschaft bisher nicht untersucht worden. In unserem Teilprojekt wurde eine vollständige Klassifizierung der aktuell existierenden Gebührenmodelle durchgeführt. Dabei stellte sich heraus, dass das resultierende Problem sehr unterschiedliche Schwierigkeitsgrade haben kann, je nach Gebührenmodell. So ist z.B. Optimierung über Ländern wie Brasilien so schwer wie ein klassisches kürzeste-Wege-Problem, über Ländern wie Deutschland immer noch in polynomieller Zeit lösbar aber wesentlich schwieriger und über Länder wie Kongo NP-schwer. In [3] wird die oben genannte Klassifizierung präsentiert, und es werden unterschiedliche exakte und heuristische Algorithmen für die Lösung aller Problemvarianten vorgestellt. Des Weiteren wird aktuell ein Artikel zum Thema „Projected Costs“ fertiggestellt. Dieses ist ein neues heuristischer Verfahren, das in der Praxis sehr gute Ergebnisse erzielen konnte und welches in unserem Softwaretool VOLAR implementiert ist.

6 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Der Verlauf der Arbeit im Projekt verlief entsprechend der im Projektantrag formulierten Planung. Die im Arbeitsplan formulierten Aufgaben wurden erfolgreich bearbeitet. Somit waren keine zusätzlichen Ressourcen notwendig.

7 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit der Ergebnisse

Dieses Teilvorhaben leistet einen wesentlichen Beitrag zur Beantwortung konkreter Fragestellungen aus der Praxis. Dieses wird durch die Analyse von systemspezifischen Strukturen sowie die Entwicklung angepasster Lösungsverfahren ermöglicht. Gleichzeitig werden dabei aktuelle mathematische Fragestellungen aus der Grundlagenforschung bearbeitet.

Alle durchgeführten Arbeiten befinden sich im Übergangsbereich zwischen anwendungsbezogener mathematischer und betriebswirtschaftlicher Forschung. Durch die Einbeziehung unserer Praxispartner ist gewährleistet, dass sich die Forschung an

der konkreten Anwendung orientiert und sich an dem Fokus ausrichtet, eine prototypische Lösung der praktischen Fragestellung zu erzielen. Es ist zu erwarten, dass sie Ergebnisse von großem wirtschaftlichem Interesse sein werden, da in der Flugplanung bisher keine derartigen Lösungen zu dieser Problematik etabliert sind. Gleichzeitig wird damit ein wesentlicher Beitrag zu Energieeffizienz und zum Klimaschutz geleistet.

Der Software-Prototyp VOLAR, welcher im Rahmen des Projektes am Zuse-Institut Berlin entwickelt wurde, wird zur Zeit in das Flugplanungstool Lido/Flight von Lufthansa Systems AG integriert und bildet die Basis für die nächste Generation dieses Systems. Das stellt einen großen Transfererfolg der mathematischen Optimierung in die Airlineindustrie dar.

Insbesondere sind der 3D-Suchalgorithmus, die Suchraumbeschränkungsmethoden und die neuen Treibstoffberechnungsfunktionen mit sehr viel Interesse vom Industriepartner begrüßt und begleitet worden.

8 Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordene Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Wie in 2. bereits erwähnt, wurde das Flugroutenplanungsproblem in der Wissenschaft isher noch nicht intensiv erforscht, obwohl der Nutzen und die Relevanz für die Luftfahrtindustrie offensichtlich ist.

Die einzigen relevanten Veröffentlichungen, die uns im Laufe des Projektes bekannt wurden, sind:

- Anders Nicolai Knudsen, Marco Chiarandini, Kim S. Larsen: Vertical Optimization of Resource Dependent Flight Paths. ECAI 2016: 639-645
- Alberto Olivares, Manuel Soler, Ernesto Staffetti: Multiphase mixed-integer optimal control applied to 4D trajectory planning in air traffic management. ATACCS 2013: 85-94

Diese haben jedoch keinen direkten Einfluss auf unsere Forschung.

Knudsen et. al. verwendet ähnliche Techniken wie wir, zum Beispiel den A*-Algorithmus. Die Problemstellung, die wir im Projekt betrachtet haben, ist aber viel allgemeiner (z.B. die Betrachtung von Überfluggebühren, RAD-Restriktionen und horizontale Optimierung).

Olivares et. al. verwendet Ansätze aus der optimalen Kontrolltheorie und der nichtlinearen ganzzahligen Programmierung. Das Modell, das untersucht wird, ist auch stark vereinfacht, und die Ergebnisse sind eher von theoretischem Interesse, da die Ansätze nicht kompetitiv genug für eine Anwendung in der Industrie sind.

9 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

Die gewonnenen Ergebnisse fließen maßgeblich in die Dissertation des verantwortlichen Projektmitarbeiters Herrn MMath. Marco Blanco ein, welche kurz vor der Fertigstellung steht. Zudem sind folgende Publikationen im Laufe des Projektes entstanden:

Die Publikationen ([1] und [2]) wurden in anerkannten und referierten Konferenzbänden veröffentlicht. Eine erweiterte Journalversion mit weiteren Beweisen wurde im Journal „Discrete Applied Mathematics“ eingereicht und befindet sich derzeit in der Begutachtung.

Die Arbeit [2] wurde mit den „Best Paper Award“ beim ATMOS Workshop 2016 ausgezeichnet. [3] ist zurzeit als Technical Report verfügbar und wird demnächst in einem mathematischen Journal eingereicht.

Die Masterarbeit von Pedro Maristany und die Doktorarbeit von Marco Blanco werden voraussichtlich im Jahr 2017 eingereicht und basieren auf Ergebnissen des Forschungsprojektes.

9.1 Referierte Publikationen (z.B. in Fachzeitschriften oder -büchern und referierte Konferenzproceedings)

[1] Marco Blanco, Ralf Borndörfer, Michael Brückner, Nam-Düng Hoang, and Thomas Schlechte. On the path avoiding forbidden pairs polytope. *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, 50:343 – 348, 2015. (*Journalversion befindet sich unter Review bei Discrete Applied Mathematics*)

[2] Marco Blanco, Ralf Borndörfer, Nam Dúng Hoang, Anton Kaier, Adam Schienle, Thomas Schlechte, and Swen Schlobach. Solving time dependent shortest path problems on airway networks using super-optimal wind. In *16th Workshop on Algorithmic Approaches for Transportation Modelling, Optimization, and Systems (ATMOS 2016)*, volume 54, 2016. in press. (Best Paper Award)

9.2 Andere Veröffentlichungen (z.B. Konferenzbeiträge wie Vorträge und Poster, unreferierte Proceedings, Conference Notes)

[3] Marco Blanco, Ralf Borndörfer, Nam Dúng Hoang, Anton Kaier, Thomas Schlechte, and Swen Schlobach. The shortest path problem with crossing costs. Technical Report 16-70, ZIB, Takustr.7, 14195 Berlin, 2016.

9.3 Abschlussarbeiten (Bachelor, Master, Diplom, Staatsexamen, Promotion, Habilitation)

[4] Christoph Spiegel. Approximating Primitive Integrals and Aircraft Performance. Masterarbeit, Freie Universität Berlin, 2015.

[5] Michael Brückner. On the Shortest Path Problem with Pair Constraints. Masterarbeit, Freie Universität Berlin, 2015.

[6] Adam Schienle. Shortest Paths on Airway Networks. Masterarbeit, Freie Universität Berlin, 2016.

9.4 Vorträge auf nationalen und internationalen Konferenzen:

1. Marco Blanco. Solving Time Dependent Shortest Path Problems on Airway Networks Using Super-Optimal Wind. Workshop on Algorithmic Approaches for Transportation Modelling, Optimization and Systems (ATMOS 2016), Aarhus, September 2016
2. Marco Blanco. The Course Constrained Shortest Path Problem. International Symposium on Mathematical Programming (ISMP 2015), Pittsburgh, Juli 2015.
3. Marco Blanco. The Path Avoiding Forbidden Pairs Polytope, Latin-American Algorithms, Graphs and Optimization Symposium (LAGOS 2015), Praia das Fontes, Mai 2015.
4. Marco Blanco. Algorithmic Methods for Flight Trajectory Optimization on the Airway Network, International Conference on Operations Research (OR 2015), Wien, September 2015.
5. Marco Blanco. The Flight Trajectory Optimization Problem. Annual Meeting of the Institute for Operations Research and the Management Sciences (INFORMS 2015), Philadelphia, September, 2015.
6. Thomas Schlechte. Flight Trajectory Optimization, (ISM Workshop), Tokyo, April 2015.
7. Ralf Borndörfer. Building a New Flight Trajectory Optimizer. Lido/Flight User Forum, Prag, Mai 2014.
8. Pedro Maristany. Mathe ist überall! - Beschreibung von Alltagsproblemen mit Hilfe von Mathematik. Tag der Mathematik 2016, Berlin, April 2016.
9. Ralf Borndörfer. VOLAR: A new algorithm for the 4D Business Trajectory calculation from Airspace User Perspective. Challenge Workshop "MSO for Air Traffic Management", Lufthansa Systems, July 2016
10. Ralf Borndörfer. Discrete-continuous optimization problems in flight planning. 1st ISM-ZIB-IMI-Joint Workshop on Optimization and Data-intensive High Performance Computing. Tokyo, Januar 2017.