

17 Best-Price Ticketingsysteme: Erst fahren, dann zahlen!

Das Reisen mit dem öffentlichen Personenverkehr wird mit modernen Ticketing-Systemen leicht gemacht: Einchecken per App, um eine Fahrtberechtigung zu erhalten, und dann einfach losfahren. Der garantiert günstigste Preis für die Gesamtheit aller Reisen des Tages, auch über Tarifgrenzen und Verkehrsmittel hinweg, wird im Nachhinein berechnet.

Frau Dr. Petra Bauer arbeitet bei Siemens Technology, der Zentralabteilung für Forschung und Entwicklung der Siemens AG, in einem Team von Experten für Mathematische Optimierung. Sie berichtet hier über Siemens Next Generation Ticketing, eine moderne Ticketing-Lösung von Siemens Mobility, für die sie mathematische Algorithmen entwickelt hat.

„Welche Fahrkarte benötige ich, um von Zürich Stadelhofen nach Winterthur zu fahren? Gibt es für Hin- und Rückfahrt eine Fahrkarte, die günstiger ist als zwei Einzelfahrten? Möglicherweise fahre ich abends noch zu einer Kollegin nach Oerlikon. Lohnt sich in diesem Fall eine Tageskarte? Wie wahrscheinlich ist es, dass ich sie tatsächlich besuche?“

Wer kennt nicht diese oder ähnliche Überlegungen vor Antritt einer Fahrt mit öffentlichen Verkehrsmitteln, insbesondere in Städten oder Regionen, deren Tarifsysteem uns nicht vertraut ist. Mit modernen Ticketingsystemen ist die Nutzung öffentlicher Verkehrssysteme ganz einfach: für jede Fahrt an der Starthaltestelle per Ticketing-App einchecken, einsteigen und, evtl. nach Umstiegen, an der Zielhaltestelle aussteigen. Mathematische Verfahren übernehmen die Identifikation der durchgeführten Fahrten und die Berechnung des günstigsten Gesamtpreises.



Abbildung 17: Einfach per Ticketing-App einchecken und losfahren.

Check-In/Be-Out-Systeme

Die oben beschriebene Variante eines Ticketingsystems ist ein so genanntes Check-In/Be-Out-System (CiBo), bei dem der Nutzer das System über den Fahrtantritt informiert (Check-In), das System jedoch das Ende der Fahrt erkennt (Be-Out).

Gesammelte Daten

Um die Fahrten identifizieren und den günstigsten Preis berechnen zu können, werden während einer Fahrt, beginnend mit dem Check-In, Daten durch die Ticketing-App gesammelt, an das Hintergrundsystem sicher übermittelt und anschließend ausgewertet.

Die wichtigsten der gesammelten Daten sind GPS-Koordinaten, die Auskunft darüber geben, zu welcher Zeit der Fahrgast an welchem Ort war. Sind die GPS-Koordinaten genau, alle Verkehrsmittel pünktlich und haben diese ausreichend zeitlichen und räumlichen Abstand, so geben die GPS-Daten schon recht gut Aufschluss.

Was aber, wenn U-Bahnen Teil des Verkehrssystems sind und dort der GPS-Empfang eingeschränkt ist, oder wenn wir entscheiden müssen, ob ein sich langsam fortbewegender Fahrgast einen Teil der Strecke läuft oder in einem Fahrzeug sitzt, das im Stau steht?

Bei der Beantwortung dieser und ähnlicher Fragen helfen zwei weitere Datenquellen: im Untergrund liefern an den Stationen installierte Bluetooth-Low-Energy (BLE) Beacons Auskunft, kleine Funksender, die Informationen aussenden, die von in der Nähe befindlichen Smartphones empfangen werden können. Scheut man die Kosten nicht, so können BLE Beacons auch in Fahrzeugen installiert werden, um z.B. besser entscheiden zu können, ob ein Fahrgast innerhalb oder außerhalb eines Fahrzeuges war oder ob er das Fahrzeug gewechselt hat. Zudem liefern Sensoren des Smartphones Daten, die Rückschlüsse auf Bewegungsmuster zulassen. Man erhält so Wahrscheinlichkeiten für einzelne Fortbewegungsarten („Activities“), wie beispielsweise Laufen oder Fahrradfahren.

Fahrtenrekonstruktion

GPS-Koordinaten, Sichtungen von BLE-Beacons und Activity-Daten werden als „Felddaten“ bezeichnet. Unter Heranziehung der Infrastrukturdaten (Lage der Haltestellen) und der Fahrpläne berechnen Verfahren der kombinatorischen Optimierung und der Stochastik die gemäß Datenlage wahrscheinlichste Abfolge von Fahrplanfahrten (z.B. S8, Zürich Hbf bis Oerlikon, planmäßige Abfahrt 9:00, Id 000011:18830:101) und sonstigen Fortbewegungsarten (wie z.B. Laufen beim Umsteigevorgang).

Die besondere Herausforderung liegt in der Verarbeitung sehr großer Datenmengen und im Umgang mit Unsicherheiten. Nebel, ein Nutzer, der etwas zu spät eincheckt, kurzfristig verlegte Haltestellen, z.B. wegen eines Unfalls, sind Fehlerquellen, auf die die Verfahren robust reagieren müssen. Der Fahrgast kennt die eine, richtige Lösung und diese muss mit sehr hoher Zuverlässigkeit gefunden werden.

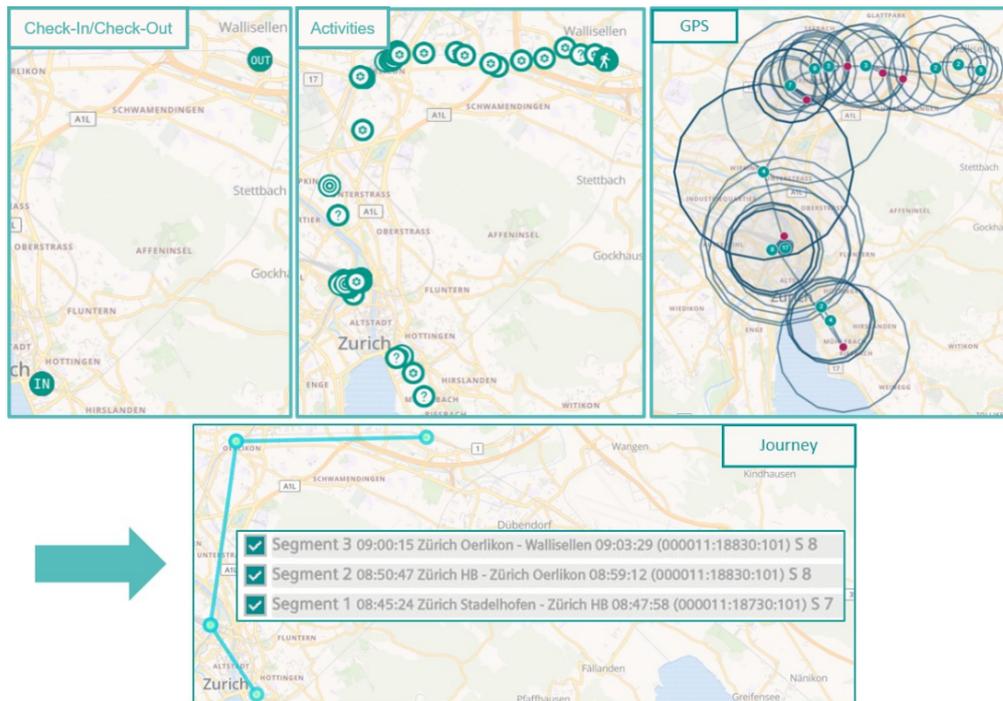


Abbildung 18: Oben Felddaten (Check-In/Be-Out, Activities, GPS-Koordinaten); unten: Ergebnis der Fahrtrrekonstruktion

Bestimmung des günstigsten Preises

Der Reiz dieser modernen Ticketingsysteme liegt in Ihrer Einfachheit für den Nutzer („einfach losfahren“) und im Versprechen, im Nachhinein den günstigsten Preis verrechnet zu bekommen.

Eine Menge von Fahrten kann mit unterschiedlichen Kombinationen von Tickets abgedeckt werden (Einzelfahrten, Tageskarten, länger gültige Zonentickets, Kurzstreckentickets, Sonderangebote auf bestimmten Teilstrecken etc.). Die Zahl der Möglichkeiten wird schnell sehr groß, doch mit Verfahren der kombinatorischen Optimierung kann, dank mathematischer Theorie, schnell eine beweisbar optimale Lösung, d.h. die preislich günstigste Kombination von Tickets, gefunden werden.

Reale Implementierungen von BiBo, CiCo und BiBo-Systemen

Neben den CiBo-Systemen gibt es auch CiCo-Systeme (Check-In/Check-Out) und sogar BiBo-Systeme (Be-In/Be-Out) sind möglich. Pauschal kann man sagen: je weniger der Fahrgast tun muss, desto mehr Equipment (z.B. Beacons) ist erforderlich, um die erforderliche Zuverlässigkeit des Systems zu erreichen.

Im April 2018 sind zeitgleich zwei von Siemens entwickelte Systeme in Betrieb gegangen: das weltweit erste BiBo-System auf den Strecken der Südostbahn Schweiz und ein schweizweites CiCo-System (inkl. Skilifte!). Die als „Proof of Concept“ dienenden Implementierungen haben im Echtbetrieb Ihre Eignung und Zuverlässigkeit bewiesen. Die Weiterentwicklung des CiCo-Systems durch die Siemens-Gesellschaften HaCon und eos.uptrade hat in der CiBo-Variante im Oktober 2020 in Osnabrück (VOS) den Betrieb aufgenommen und steht jedem Fahrgast zur Verfügung.

Es ist zu erwarten, dass in den kommenden Jahren viele weitere solcher Systeme, entwickelt durch unterschiedliche Unternehmen, den Betrieb aufnehmen.

Exkurs: Die kombinatorische Optimierung

Sowohl die Fahrrekonstruktion als auch die Bestimmung des besten Preises werden durch Verfahren der kombinatorischen Optimierung berechnet. Diese Verfahren ermöglichen es, dass oftmals unter Trillionen möglicher Lösungen für eine kombinatorische Fragestellung die optimale Lösung gefunden wird.

Ein berühmtes Beispiel hierfür ist das Traveling Salesman Problem. Ein Handlungsreisender muss die kürzeste Rundreise durch eine gegebene Menge von Städten finden. Schon bei 65 Städten hat er mehr Möglichkeiten ($64!/2$) als es geschätzt Atome im Universum gibt. Alle Möglichkeiten zu enumerieren ist also ausgeschlossen.

Die Komplexitätstheorie teilt die kombinatorischen Optimierungsprobleme in unterschiedliche Komplexitätsklassen ein. Für die Klasse der polynomiell lösbaren Probleme weiß man z.B., dass es schnelle Algorithmen gibt, die diese Probleme optimal lösen. Für die so genannten NP-schweren Probleme (zu ihnen gehört das Traveling Salesman Problem) nimmt man an, dass es keine Verfahren gibt, die diese Probleme generell schnell lösen. Jedoch zeigt sich, dass man auch für diese Komplexitätsklasse mit Hilfe mathematischer Verfahren in der Praxis oft optimale oder gute Lösungen (unter Angabe einer Gütegarantie) für konkrete Problemstellungen berechnen kann.

Die kombinatorische Optimierung hat viele reale Anwendungen in Logistik und Verkehr, Produktion, Kommunikation, Energieversorgung und anderen Bereichen.