

Einführung

Die Nachfrage im Luftverkehr ist ungebrochen und viele Flughäfen weltweit wiesen 2024 neue Passagierrekorde auf. Gleichzeitig kämpft die Branche vor allem im Personalbereich weiterhin mit den Nachwirkungen der Corona-Pandemie. Um die Nachfrage zu bedienen, sind die Prozessabläufe daher so effizient wie möglich zu gestalten. In der operativen Flugzeugabfertigung ist dabei unter anderem der Ladeservice betroffen, welcher für die Be- und Entladung von Passiergepäck wie auch von Frachtgütern verantwortlich ist. Die Koordination des Ladeservices ist insbesondere an Großflughäfen eine komplexe Aufgabe und kann bei schlechter Planung zu einer Vielzahl an Verspätungen oder gar Ausfällen führen.



Abbildung 1. Container-Beladung eines Großraumflugzeugs mittels Hubwagens [1].

Zielsetzung

Ziel der Arbeit ist die Entwicklung einer untertägigen Personalbedarfsprognose, um Lastspitzen und Kapazitätsengpässe frühzeitig zu erkennen. Der Prognosezeitraum soll vier Stunden umfassen, um ausreichend Vorlaufzeit für kurzfristig zu ergreifende Maßnahmen zu gewährleisten. Die Vorhersage dient der übergeordneten Steuerung der operativen Disposition mit dem Ziel, zu jeder Zeit einen stabilen Betrieb aufrechtzuerhalten. Potenzielle Maßnahmen dienen einer temporären Kapazitätserhöhung, beispielsweise durch Pausensteuerung, Schichtverlängerungen oder Verschiebungen von Schulungen und Abstellungen.

Modellierung der Bodenabfertigung als Warteschlangensystem

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Flugzeugabfertigung durch ein Warteschlangenmodell abgebildet. Dabei werden Flüge als Kunden verstanden, welche von den Abfertigungskräften bedient werden. Eine wesentliche Herausforderung bildet dabei die Heterogenität sowohl auf Kunden- als auch auf Bedienerseite. Flugzeuge setzen je nach Flugzeugtyp und Airline unterschiedliche Qualifikationen für deren Abfertigung voraus. Dazu zählt beispielsweise ein Hubwagenführerschein für die Containerbe- und Entladung (vgl. Abbildung 1). Abfertigungskräfte können durch eine Vielzahl von individuellen und nicht-verschachtelten Qualifikationspfaden nicht klassifiziert werden. Zur genaueren Modellierung wird daher ein flexibles Multi-Bediener-Netzwerk entwickelt [2]. Dieses erlaubt die Berücksichtigung komplexerer Qualifikationsstrukturen gemeinsam mit Kollaborationsbedingungen in der Flugzeugabfertigung. Letztere spielen im Ladeservice eine maßgebliche Rolle, da für dessen Durchführung stets mindestens zwei Personen notwendig sind.

Zur Durchführung der Prognose wird eine optimale Zuordnung von Mitarbeitern zu Abfertigungen berechnet, woraus sich in Summe der Abfertigungsbedarf ergibt. Gleichzeitig wird in Form der Warteschlangenlänge die Anzahl der verspätet abgefertigten Flüge sichtbar. Herausfordernd ist dabei die Problemgröße von Schicht-abhängig bis zu 500 Abfertigungskräften auf rund 200 Flüge innerhalb des vierstündigen Prognosezeitraums. Zu Spitzenlastzeiten findet minütlich durchschnittlich eine Start oder Landung statt (vgl. Abbildung 2).

Implementierung

Das Prognosesystem unterliegt einer modularen Architektur, aufgeteilt in Lade-, Vorverarbeitungs-, Optimierungs- und Visualisierungsmodul. Zur Erhöhung der Modellrobustheit findet innerhalb des Vorverarbeitungsmoduls eine zusätzliche Datenmanipulation der Ankunftszeiten und Abfertigungsdauern statt, welche für die Bodenabfertigung zwei maßgebliche stochastische Größen darstellen. Dabei werden zuvor analysierte empirische Verteilungen angenommen. Um für das Optimierungsmodul eine Lösungslaufzeit von unter 15 Minuten zu erreichen, werden durch Aggregation über die Mitarbeiter-Qualifikationen die Probleminstanzen reduziert.

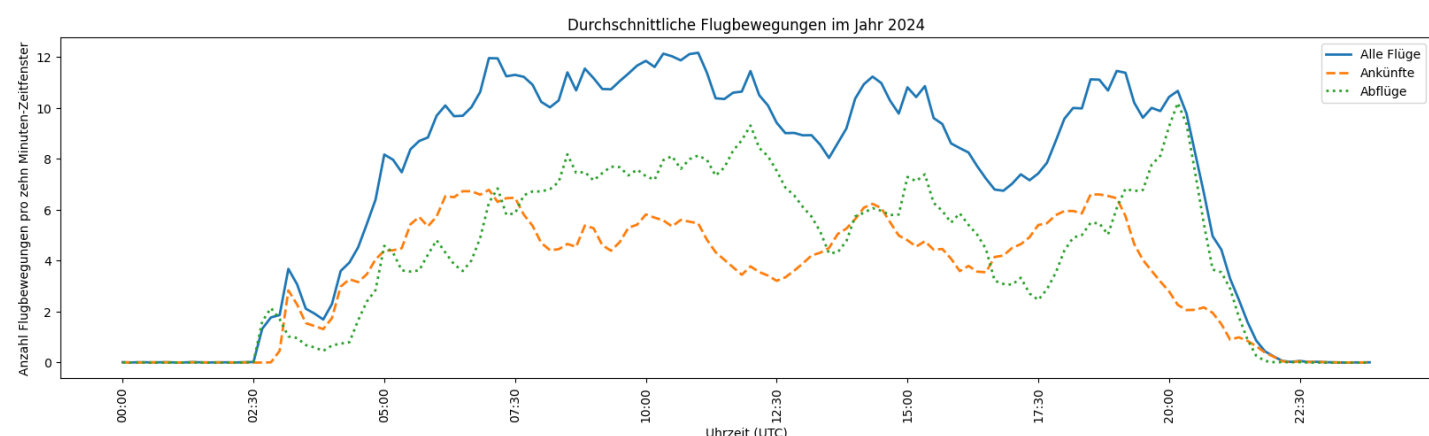


Abbildung 2. Verlauf der Ankunfts- und Abflugrate am Frankfurter Flughafen.

Erweiterung: Pausenintegration

Pausen müssen für jeden Mitarbeiter innerhalb eines gewissen Zeitfensters vergeben werden. Sie stellen eine signifikante Kapazitätsreduktion dar, weswegen die Berücksichtigung der Pausenplanung unabdingbar für die Prognose sowie Optimierung des Betriebsverlaufs ist. Insbesondere innerhalb der Frühschicht ist eine optimale Pausenvergabe herausfordernd, da im Gegensatz zur Spätschicht ein durchgängig hohes Verkehrsaufkommen vorliegt (vgl. Abbildung 2). Um eine Erhöhung der Modellkomplexität zu vermeiden, wurden Pausen in dieser Arbeit durch zusätzliche fiktive Flugabfertigungen modelliert.

Erweiterung: Ensemble-Modell

Der Flugverkehr wird durch eine Vielzahl externer Faktoren beeinflusst. Dazu zählen beispielsweise das Wetterbedingungen, Anflugbeschränkungen der Flugsicherung oder auch Sperrungen von Start-/Landebahn oder Rollwegen durch Sanierungen. Eine direkte Integration der Faktoren in das Warteschlangenmodell gestaltet sich aufgrund der komplexen wechselseitigen Beziehungen jedoch komplex. Stattdessen wurde ein xgboost-Modell entwickelt, welches die Einflüsse von exogenen Merkmalen über das Training historischen Datensatzes implizit erlernt. In Form eines Ensemble-Modells werden Warteschlangen- und xgboost-Modell kombiniert.

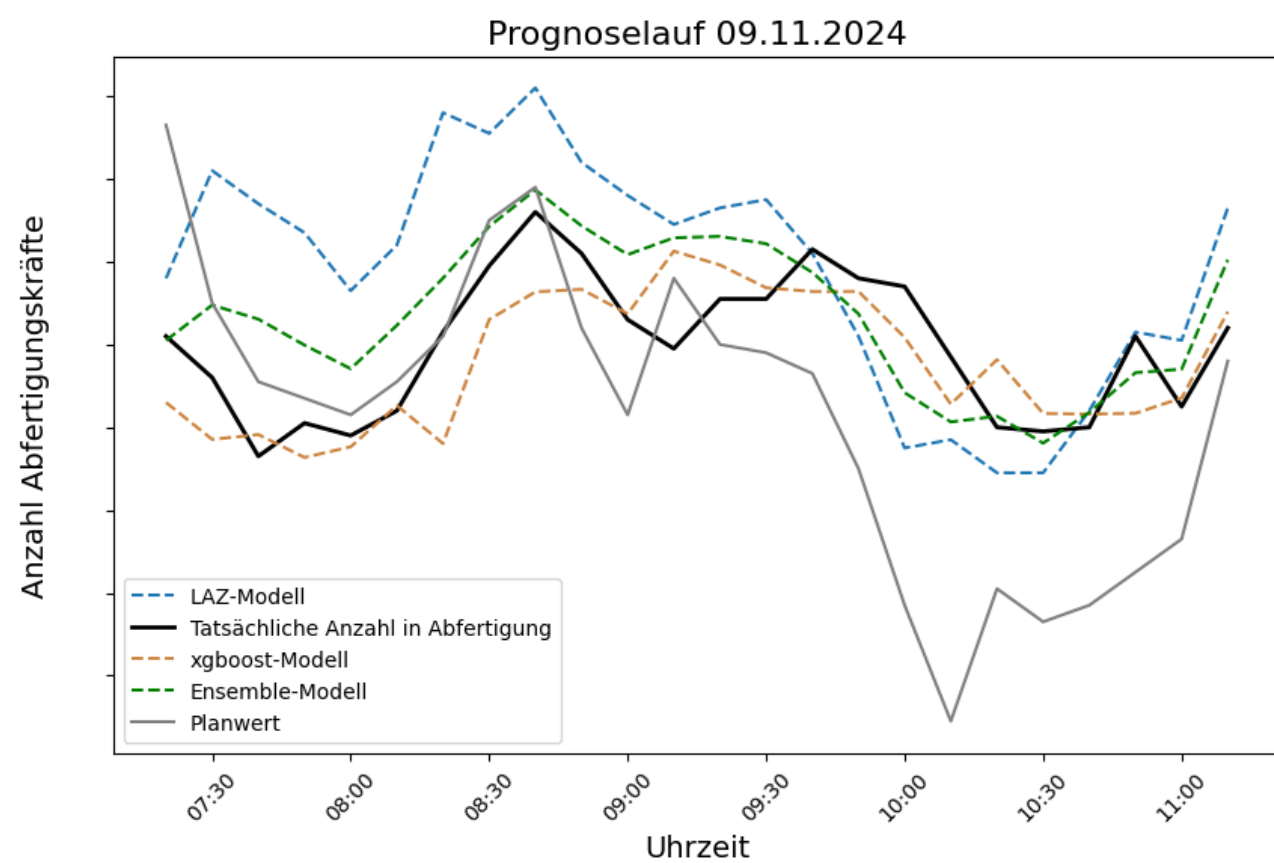


Abbildung 3. Prognose des Abfertigungsbedarfs in der Frühschicht am 09.11.2024.

Ergebnisse

Das Warteschlangenmodell liefert für den Zeitraum der Frühschicht in der Qualität stark variierende Ergebnisse. Dies gilt auch für den Fall der integrierten Pausenbedingung. Im Zeitraum der Spätschicht konnte hingegen eine hohe Prognosegenauigkeit erzielt werden. Die Kombination mit einem xgboost-Modell führte anschließend insbesondere im Zeitraum der Frühschicht zu einer signifikanten Verbesserung. Abbildung 3 stellt beispielhaft eine Prognose der Frühschicht dar, wobei eine gegenseitige Korrektur der Komponenten erkennbar ist.

Modell	Frühschicht	Spätschicht
Warteschlangen-Modell	24,68	17,72
Warteschlangen-Modell mit Pausenintegration	24,63	-
Ensemble-Modell	17,85	17,59
xgboost-Modell	18,66	25,13
Planwert (Referenzwert)	24,28	22,85

Tabelle 1. Mittlerer absoluter Fehler im Zeitraum der Früh- und Spätschicht.

Fazit

In Form eines Ensemblemodells konnte eine robuste Prognose entwickelt werden. Dabei ist hervorzuheben, dass für beide Zeiträume eine höhere Qualität als die der Einzelkomponenten erzielt werden konnte. Die Pausenintegration führte zu sehr variierenden Ergebnissen, vor allem bedingt durch eine in der Realität vom Modell abweichende Pausenplanung. In diesem Rahmen liefert die Prognose eine Optimierung der Pausenvergabe und stellt eine Möglichkeit für weitere Untersuchungen dar.

Quellen

- [1] Fraport AG; Fototeam. Ladeservice. Unternehmensinternes Intranet, 2024.
- [2] Itai Gurvich and Jan A Van Mieghem. Collaboration and multitasking in networks: Architectures, bottlenecks, and capacity. *Manufacturing & Service Operations Management*, 17(1):16–33, 2015.