

PANDEMIEGERECHTE PASSAGIERPROZESSE IN DER FLUGZEUGKABINE

M. Schultz*, M. Soolaki[†], J. Fuchte[‡], O. Michler[§], P. Schwarzbach[§]

* Professur für Luftverkehrskonzepte, Universität der Bundeswehr München

[†] School of Architecture and Cities, University of Westminster, London

[‡] Diehl Aviation, Hamburg

[§] Professur für Informationstechnik für Verkehrssysteme, Technische Universität Dresden

Zusammenfassung

In der Flugzeugkabine müssen sich die Passagiere während des Einsteigens, des Flugs und des Aussteigens eine enge Umgebung mit anderen Passagieren teilen, was ein Risiko für die Übertragung von Viren darstellt und angemessene Strategien zur Risikominderung erfordert. Abstände zwischen den Passagieren während des Ein- und Aussteigens verringern das Übertragungsrisiko, und eine optimierte Reihenfolge von Passagieren und Passagiergruppen trägt dazu bei, die Prozesszeiten erheblich zu verkürzen. Die Betrachtung von zusammen reisenden Gruppen ist dabei ein wichtiger Einflussfaktor. Die Grundidee unseres Konzeptes ist, dass die Mitglieder einer Reisegruppe nicht getrennt werden sollten, da diese bereits vor dem Betreten des Flugzeugs in engem Kontakt standen. Um jedoch den COVID-19-Vorschriften zu genügen, sollten die verschiedenen Passagiergruppen weiterhin räumlich getrennt werden. Der Ausstiegsvorgang stellt hierbei eine besondere Herausforderung dar, da die Passagiergruppen direkt informiert werden müssen, wann sie aussteigen dürfen. Bereits heute könnte die Kabinenbeleuchtung für diesen Informationsprozess genutzt werden, aber in einer zukünftigen, digital vernetzten Kabine könnten die Passagiere direkt über ihre mobilen Geräte informiert werden. Diese Geräte könnten auch dazu verwendet werden, die erforderlichen Abstände zwischen den Passagieren zu überprüfen. In der entwickelten Simulationsumgebung können wir zeigen, dass die Umsetzung einer optimierten Gruppensequenzierung unter COVID-19-Randbedingungen das Potenzial hat, die Prozesszeiten um bis zu 59% und das Übertragungsrisiko um bis zu 85% zu verkürzen.

Keywords

Flughafen; Passagiere; Abfertigung; COVID-19; Flugzeugkabine; Virusübertragung

1. EINLEITUNG

Die COVID-19-Pandemie wird nachhaltige Auswirkungen auf den Luftverkehr im Allgemeinen und auf den Flughafenbetrieb (Flugzeugabfertigung) und die Passagierabfertigung im Besonderen haben. Die derzeitige Pandemiesituation erfordert zwei wesentliche Änderungen der normalen Flugzeugabfertigungsverfahren: (1) Die Fluggäste müssen beim Ein- und Aussteigen einen bestimmten Abstand einhalten und (2) zusätzlich zu den normalen Reinigungsverfahren muss die Flugzeugkabine desinfiziert werden.

Die geforderten Prozessänderungen werden sich erheblich auf die Bodenabfertigung (Turnaround) der Flugzeuge auswirken, da diese Prozesse Teil des kritischen Betriebswegs sind. Die Fluggesellschaften haben versucht, verschiedene infrastrukturelle Veränderungen in der Flugzeugkabine vorzunehmen, um das Übertragungsrisiko zu verringern, aber die meisten dieser Ideen sind weit davon entfernt, eine flexible und standardisierte Lösung für die Luftfahrtindustrie zu sein. Aus betrieblicher Sicht ist es wahrscheinlicher, dass Fluggesellschaften und Flughäfen angepasste

Boarding-Strategien in die Praxis umsetzen als eine veränderte Kabinenausstattung. Das Aussteigen ist durch Vorschriften schwieriger zu kontrollieren, und die Fluggäste zeigen wenig Disziplin und wenig Bereitschaft, sich beim Verlassen des Flugzeugs regelkonform zu verhalten. Dies ist besonders bemerkenswert, weil das Risiko einer Virusübertragung beim unkontrollierten Aussteigen viel höher ist als beim kontrollierten Einsteigen in das Flugzeug. Im Rahmen der künftigen Passagierabfertigung in der engen Flugzeugumgebung wird eine effiziente Sensorumgebung (digitale Kabine) dazu beitragen, diese Situationen mit einem verbesserten Bewusstsein für die Systembedingungen zu bewältigen, z. B. durch individuelle Abstandsmessungen, Überwachung der Gangbelegung oder Bereitstellung des Gepäckraumstatus.

Die Flugzeugabfertigung besteht aus fünf klassischen Hauptaufgaben: Entladen, Einladen der Verpflegung, Reinigung, Betankung und Einsteigen. Während der erste und der letzte Prozess durch das Verhalten und die Erfahrung der Passagiere bestimmt werden, werden die mittleren Prozesse von ausgebildetem Personal der Bodenabfertiger durchgeführt. Heutzutage un-

terscheiden sich die Vorstellungen von angemessener Verpflegung zwischen Passagieren und Fluggesellschaften erheblich voneinander. Insbesondere auf Kurz- und Mittelstreckenflügen innerhalb Europas bieten die Fluggesellschaften lediglich eine kleine Flasche Wasser und einen "Snack" (Keks, Schokolade) an. Der hiermit verbundene Ladevorgang hat somit keine betriebliche Relevanz mehr. Ähnlich verhält es sich mit der Reinigung des Flugzeuges, die aus Gründen der Zeiteffizienz auf ein Minimum reduziert wird. Die COVID-19-Pandemie führte jedoch dazu, dass eine zusätzliche Desinfektion während der Reinigung erforderlich ist. Somit wurde die Reinigung wieder zu einem kritischen Prozess in der Abfertigung. Abbildung 1 verdeutlicht die betrieblichen Abläufe während der Flugzeugabfertigung und zeigt den zusätzlichen Aufwand, der mit den geforderten Prozessanpassungen aufgrund der Pandemie einhergeht [1]. Störungen entlang des kritischen Pfades führen zu erheblichen Auswirkungen auf die Flugzeugabfertigung (z.B. verlängerte Bodenzeiten), den Flughafenbetrieb (z.B. verpasste Slots) oder auf das Netz (z.B. Verspätungen im Umlauf).

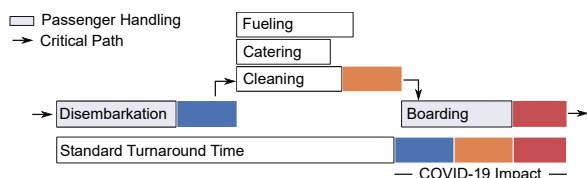


BILD 1. Auswirkungen der COVID-19-Anforderungen auf die Flugzeugabfertigung [1].

Während für die Prozesse außerhalb der Flugzeugkabine eine geeignete Datenbasis existiert, sind die Prozesse innerhalb der Kabine heute so gut wie nicht erfasst und somit undokumentiert. Die beengten Verhältnisse in der Kabine sind hierbei nicht die einzige Herausforderung an die für die Erfassung notwendige Sensorik. Auch die Vielzahl, der an den Kabinenprozessen beteiligten Personen (Crew (Experten), Passagiere (Nicht-Experten)) muss koordiniert werden können, um einen optimierten Ablauf zu gewährleisten. Die zunehmende Digitalisierung und die Verfügbarkeit von (mobilen) Technologien bietet grundlegende Werkzeuge zur Zustandserfassung und -überwachung auch innerhalb der Kabine. Eine digitale, vernetzte Flugzeugkabine ist eine notwendige Infrastruktur, um den Kabinenbetrieb weiter zu optimieren, ein innovatives Passagiermanagement zu ermöglichen und die Operateure hierbei maßgeblich zu unterstützen [2, 3].

Das hierfür notwendige Kommunikationsnetzwerk, muss die verschiedenen Geräte in der Kabine miteinander verbinden: von mobilen Geräten der Passagiere über Steuergeräte der Besatzung bis hin zu Inflight-Entertainment-Systemen oder Wartungssensoren [4]. Die für die Zustandserfassung erforderlichen Sensoren werden bereits in verschiedenen Bereichen eingesetzt und könnten für die Flugzeugumgebung angepasst werden (siehe Abbildung 2). Angesichts der Möglichkeiten heutiger Technologien birgt der Einsatz

integrierter drahtloser Sensornetze in der vernetzten Flugzeugkabine ein erhebliches operationelles Verbesserungspotenzial. Dieses würde beispielsweise auch eine dynamische Steuerung der Ein- und Ausstiegsprozesse ermöglichen, selbst (oder gerade) unter Berücksichtigung von Pandemieszenarien [5, 6].

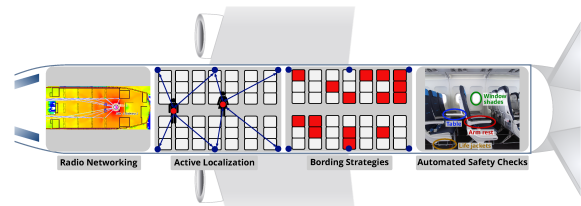


BILD 2. Einsatzmöglichkeiten einer integrierten Kommunikation, Lokalisierung und Sensorik [4].

1.1. Stand der Technik

Bei den Studien zum Coronavirus mit Bezug zur Luftfahrtindustrie lag der Schwerpunkt auf dem Einbruch der Flugreisenachfrage, den Auswirkungen auf die weltweite Luftfahrtindustrie sowie auf der Abschätzung und Prognose der Entwicklung des Luftverkehrs und der damit verbundenen sozioökonomischen Auswirkungen. Die Pandemie hat erhebliche Auswirkungen auf die Flughafenkapazität [7], und insbesondere auf die Zukunft der Flugzeugabfertigung aufgrund der (post-)pandemischen Anforderungen [1]. In diesem Zusammenhang werden neue Technologien benötigt, um den Aufenthaltsort von Passagieren in Innenräumen und engen Flugzeugkabinen effizient zu bestimmen [3]. Da die physische Distanz ein großes Potenzial besitzt, die Ausbreitung des Coronavirus unter den Menschen zu verringern, wurde diese Maßnahme in einem breiten Spektrum wissenschaftlicher Arbeiten untersucht, einschließlich politischer, wirtschaftlicher und sozialer Herausforderungen [8] und ethischer Aspekte der räumlichen Isolation [9, 10].

Die Studien zum Boarding von Flugzeugen konzentrieren sich auf die Minimierung der Boardingzeit von Passagieren, um die Betriebskosten von Fluggesellschaften zu senken, die durch die Abfertigungszeit von Flugzeugen entstehen [1, 11].

Passagiere haben im Allgemeinen zwei Möglichkeiten zum Flugzeug zu gelangen. Je nach Abstellposition kommen Fluggastbrücken für den Transfer vom Terminal zum Flugzeug zum Einsatz [12–19] oder es wird der Einsatz von pendelnden Vorfeldbussen für den Passagiertransport angenommen [20–22].

Das Boarding selbst kann in einem nachfolgenden Schritt in verschiedene Problemstellungen untergliedert werden. So befassen sich Forschungsarbeiten mit (a) unterschiedlicher Sitzbelegung und Sitzplatzzuweisung [19, 23–27], (b) der Annahme, dass Passagiere durch eine Tür oder sowohl durch die vordere als auch die hintere Tür eines Flugzeugs einsteigen [22, 28–30], (c) individuellen Merkmalen von Fluggästen, einschließlich Geschwindigkeiten und der Anzahl von Handgepäckstücken [11, 14, 23, 31] und (d) der Annahme, dass Passagiere in Gruppen reisen und hierbei selbstorganisierende Effekte das Boarding beeinflus-

sen können [19, 32–34]. Diese Untersuchungen haben jedoch nicht nur isolierte Aspekte im Fokus, sondern berücksichtigen zumeist mehrere Problemstellungen. Die pandemischen Anforderungen, insbesondere die Forderung nach ausreichenden Abständen zwischen den Passagieren bzw. Passagiergruppen, wirken sich nachhaltig auf die Prozessabläufe und Zeiten für das Ein- und Aussteigen aus. Vorrangiges Ziel ist es hierbei, das Übertragungsrisiko so weit wie möglich zu minimieren und entsprechend angepasste Prozessabläufe zu entwickeln [10, 35, 36].

Da Passagiere zumeist in Gruppen reisen, wurde dieser Punkt besonders beachtet und ein analytischer Ansatz entwickelt, der Gruppen zu übergeordneten Elementen zusammenfasst und die Interaktionen mit anderen Gruppen optimiert [5]. Dieser Ansatz wurde in einem nächsten Schritt auch für die Untersuchung eines optimierten Ausstiegsprozesses (Sitzplatzverteilung und Passagiersgruppensequenz) unter Berücksichtigung der COVID-19-Vorschriften verwendet [6].

1.2. Fokus und Struktur des Dokuments

Dieses Dokument gibt einen Überblick über die Forschung im Bereich des Ein- und Aussteigens von Passagieren in Flugzeugkabine unter Berücksichtigung der COVID-19-Anforderungen. Nach der Einleitung und einer prägnanten Zusammenfassung aktueller Studien in Abschnitt 1 werden die Modelle für die Abbildung der Passagierbewegungen, des Übertragungsrisikos und der Sitzplatzzuweisung in der Flugzeugkabine beschrieben (Abschnitt 2). Die entwickelten Modelle wurden implementiert (Abschnitt 3) und die durchgeführten Optimierungen zeigen eine signifikante Verbesserung der Ein-/Ausstiegszeit bei gleichzeitiger Reduzierung des Übertragungsrisikos. Die erzielten Ergebnisse werden abschließend zusammengefasst (Abschnitt 4).

2. MODELLIERUNG

Das individuelle Bewegungsverhalten von Passagieren in der Flugzeugkabine wird durch Zellübergänge in einem zellulären Automaten modelliert. Es können damit sowohl kurzfristige (z.B. Kollisionsvermeidung, Gruppenverhalten) als auch weitreichende Interaktionen (z.B. Wegfindung und taktische -wahl) abgebildet werden. Im Modell des zellulären wird für jeden Passagier (Agent) eine individuelle Übergangsmatrix berechnet, die Übergangswahrscheinlichkeiten für die Bewegung in eine benachbarte Zelle (Position) enthält [19]. Das agentenbasierte Modell wurde mit Daten aus der Praxis kalibriert [18] und berücksichtigt neben den betrieblichen Randbedingungen von Prozessabläufen der Flugesellschaften (z. B. Sitzauslastung, Einhaltung des Boarding-Verfahrens) auch das nicht-deterministische Verhalten der zugrunde liegenden Passagierprozesse (z. B. unterschiedliche Zeiten beim Verstauen von Handgepäck). Um statistisch relevante Ergebnisse zu erzielen, wird jedes Einsteigeszenario 125.000-mal simuliert.

Die schrittweise optimierte Sitzplatzverteilung und die damit verbundene Passagierreihenfolgen werden nach der benötigten Zeit und des ermittelten Virusübertragungsrisikos bewertet. Diese Zielgrößen sind mit der Interaktion der Passagiere während der Bewegungen im Gang, der Dauer des Gepäckverstauens und der Einnahme des Sitzplatzes verbunden. Das Übertragungsrisiko kann durch die Nähe zum Indexfall und die Dauer der Kontaktzeit definiert werden. Der verwendete Modellansatz basiert auf einem Übertragungsmodell [37], dass die Ausbreitung des SARS-CoV2-Coronavirus als eine Funktion der Distanz definiert, wobei verschiedene Entfernungsmaße verwendet werden [38]. Dieser Ansatz wurde auf der Grundlage der Übertragungseignisse eines tatsächlichen Fluges angepasst und kalibriert [35]. Für die optimierte Sitzplatzverteilung in der Kabine wurden entsprechend dem Übertragungsmodell spezifische Übertragungsraten definiert, die das individuelle Übertragungsrisiko für die in der Nähe sitzenden Passagiere definieren (benachbarte Sitze und Reihen). Um das Problem der Sitzplatzverteilung zu lösen, wird ein gemischt-ganzzahliger Ansatz unter Berücksichtigung der COVID-19-Anforderungen definiert und gelöst. Da dieses Problem NP-hart ist und eine Lösung somit nicht in einer angemessenen Zeit bestimmt werden kann, muss zusätzlich ein genetischer Algorithmus entwickelt werden. Bei der gewählten Zielfunktion wird das Übertragungsrisiko minimiert, indem die Abstände zwischen den Passagieren/ Passagiergruppen maximiert werden. Die Sitzplatzverteilung wird in einem nächsten Schritt als Eingangsparameter für die agentenbasierte Simulation verwendet, die das stochastische Verhalten und die Interaktionen der Passagiere in der Flugzeugkabine berücksichtigt. In der Simulation werden dann verschiedene Sequenzen für Passagiere/Passagiergruppen (Ein-/Aussteigen) nach der benötigten Zeit und dem damit verbundenen Übertragungsrisiko getestet und bewertet.

2.1. Passagierbewegungen

Der zelluläre Automat für das Ein- und Aussteigen aus Flugzeugen basiert auf einem regelmäßigen Gitter (Abbildung 3), das aus gleichen Zellen mit einer Größe von 0,4 x 0,4 m besteht, wobei eine Zelle entweder leer sein oder genau einen Passagier enthalten kann.

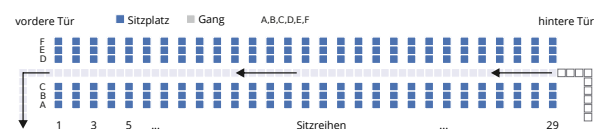


BILD 3. A320 Modell: 29 Sitzreihen, 6 Sitze pro Reihe.

Die Passagiere können sich pro Zeitschritt nur eine Zelle weit bewegen. Wenn die Zelle in Bewegungsrichtung besetzt ist, müssen die Passagiere anhalten.

Für den Prozessablauf beim Einsteigen wurde ein vereinfachtes Regelwerk für die Bewegung der Passagiere erstellt: (a) Betreten des Flugzeugs an der zugewiesenen Tür (basierend auf dem aktuellen Bordingszena-

rio), (b) Vorwärtsbewegung von Zelle zu Zelle entlang des Gangs bis zur zugewiesenen Sitzreihe, (c) Verstauen des Handgepäcks (Gang ist für andere Passagiere in dieser Zeit gesperrt) und Einnahme des Sitzplatzes. Die Verstauzeit für das Handgepäck hängt von der individuellen Anzahl der Handgepäckstücke ab. Das eigentliche Hinsetzen hängt von der Konstellation der bereits belegten Plätze in der entsprechenden Sitzreihe ab. Bevor die Simulation startet, werden die Passagiere gemäß der Boardingsequenz sortiert. Für die Abbildung von nicht-konformen Verhalten, wird ein bestimmter Prozentsatz der Passagiere aus dieser Sequenz herausgenommen und anderen Stellen eingefügt, die der aktuellen Sequenz widersprechen (z.B. Einfügen in einen anderen Boardingblock).

Für das Aussteigen der Passagiere gelten die folgenden Bewegungsregeln: (a) alle Passagiere sitzen im Flugzeug gemäß einer zuvor erstellten Sitzplatzzuweisung, (b) die Passagiere können den Gang betreten, wenn sie ihre Sitzreihe verlassen können (Sitze sind freigegeben) und der Gang nicht durch andere Passagiere blockiert ist, (c) wenn die Passagiere den Gang betreten, nehmen sie ihre Handgepäckstücke aus dem Gepäckfach und blockieren in dieser Zeit die entsprechende Position auf dem Gang, (d) wurden alle Handgepäckstücke aufgenommen, bewegen sich die Passagiere in Richtung der zugewiesenen Flugzeugtür, indem sie leere Zellen des Gangs vor ihnen betreten.

Die maximale, freie Gehgeschwindigkeit im Gang beträgt 0,8 m/s [2], der Zeitschritt in der Simulation entspricht 0,5 s in der Realzeit. Vor jedem Simulationsschritt wird die Aktualisierungsreihenfolge der Passagiere zufällig durchmischt, um ein paralleles Aktualisierungsverhalten (random-sequential update) für die diskrete Zeitdynamik nachzubilden [39, 40]. Jedes ein Ein-/Ausstiegsszenario wird 125.000-mal simuliert, um statistisch relevante Ergebnisse zu erhalten. Als Bewertungskennzahl ist die durchschnittliche Ein-/Ausstiegszeit definiert. Weitere Einzelheiten zum allgemeinen Bewegungsmodell, zu den gewählten Parametern und zur Simulationsumgebung sind in [19] zu finden.

Um die COVID-19-Szenarien abbilden zu können wird zusätzlich angenommen, dass eine Zelle blockiert wird, wenn das Betreten oder Bewegen im Gang den notwendigen Abstand zwischen Passagieren oder Passagiergruppen (z. B. Familien oder Paaren) verletzen würde. Die International Aviation Transport Association (IATA) fordert einen Mindestabstand von 1 m [41] und die Federal Aviation Administration (FAA) einen Mindestabstand von 6 Fuß (2 m) [42]. Unter Berücksichtigung des zellulären Automatenmodells mit seiner regelmäßigen Gitterstruktur (Zellenabstand von 0,4 m) und um die Vergleichbarkeit mit unseren früheren Ergebnissen aufrechtzuerhalten [1, 5, 35], wurde der minimale Abstand auf 1,6 m (4 Zellen) festgelegt. Der Abstand von 1,6 m entspricht auch ungefähr dem Abstand zwischen 2 Sitzreihen, was den Passagieren auch eine ausreichend visuelle Unterstützung für die Einhaltung des Abstands bietet.

2.2. Transmissionsmodell

Das Übertragungsrisiko kann im Allgemeinen durch die Nähe zum Indexfall (infizierter Passagier) und die Dauer des Kontakts definiert werden. Der gewählte Ansatz basiert auf einem Übertragungsmodell [37], das die Ausbreitung des SARS-CoV2-Coronavirus als Funktion der Entfernung zum Indexfall definiert [38]. Dabei wird die Wahrscheinlichkeit, dass eine Person n von einer Person m infiziert wird, durch (1) beschrieben.

$$(1) P_n = 1 - \exp\left(-\theta \sum_m \sum_t SR_{m,t} i_{nm,t} t_{nm,t}\right)$$

definiert durch:

- P_n Wahrscheinlichkeit der Person n , eine infektiöse Dosis zu erhalten. Damit ist nicht die "Infektionswahrscheinlichkeit" gemeint, da diese stark von der Immunantwort der betroffenen Person abhängt.
- θ Kalibrierungsfaktor für die spezifische Krankheit.
- $SR_{m,t}$ Shedding-Rate, die Menge des Virus, die die Person m während des Zeitschritts t verbreitet.
- $i_{nm,t}$ Intensität des Kontakts zwischen n und m während des Zeitschritts t . Im Modell durch die Entfernung der Beteiligten abgebildet.
- $t_{nm,t}$ Dauer, in der Person n mit Person m im Zeitschritt t interagiert.

Unter Berücksichtigung dieses Modellansatzes definieren wir die Shedding-Rate SR als eine normierte, glockenförmige Funktion mit $z \in (x, y)$ für die Längs- bzw. Querdimension (2). Die Parameter sind a (Skalierungsfaktor), b (Steigung der ansteigenden und abfallenden Flanke) und c (Versatz) zur Bestimmung der Kurvenform.

$$(2) SR_{xy} = \prod_{z \in (x,y)} \left(1 + \frac{|z - c_z|^{2b_z}}{a_z}\right)^{-1}$$

Die Shedding-Rate SR wurde in einer früheren Studie [35] auf Grundlage der Übertragungsereignisse während eines tatsächlichen Fluges kalibriert [43]. Daraus ergeben sich für (2) die entsprechenden Parameter zu $a_x = 0.6$, $b_x = 2.5$, $c_x = 0.25$, $a_y = 0.65$, $b_y = 2.7$ und $c_y = 0$.

Dies führt dazu, dass die Ausdehnung in y-Richtung (quer zur Bewegungsrichtung) kleiner ist als in x-Richtung (in Bewegungsrichtung), ebenso wie die Ausdehnung entgegen und in Bewegungsrichtung. Wenn die Passagiere ihre Sitzreihe erreichen und das Handgepäck verstauen oder ihre Sitzreihe betreten, wird angenommen, dass sich die Bewegungsrichtung um 90° in Richtung des Flugzeugfensters ändert. Die individuelle Wahrscheinlichkeit einer Virusübertragung P_n entspricht der spezifischen Intensität Θ pro

Zeitschritt (3).

$$(3) \quad P_n = \Theta \text{SR}_{xy} \alpha$$

In Übereinstimmung mit [35] wird Θ auf $\frac{1}{20}$ gesetzt. Ein Passagier erreicht somit die maximale Wahrscheinlichkeit von $P_n = 1$, wenn er 20 s in geringer Entfernung vor einem infizierten Passagier steht ($\text{SR}_{xy} = 1$). Der Parameter $\alpha \in \{1, 2\}$ ist grundsätzlich auf 1 gesetzt und wird auf 2 erhöht, wenn der Passagier sein Gepäck verstaut oder die Sitzreihe betritt. Die so verdoppelte Shedding-Rate spiegelt die Konsequenzen der höheren körperlichen Aktivitäten in unmittelbarer Nähe zu den umgebenden Passagieren wider. Der Wert der Wahrscheinlichkeit P_n ist auf 100% begrenzt und wird bei Überschreiten in (3) auf diesen Wert fixiert.

2.3. Optimierte Sitzplatzzuweisung

Mit dem Ziel das Risiko der Virusübertragung durch eine Maximierung der Abstände zwischen Passagieren/Passagiergruppen zu minimieren, wurde in Anlehnung an das Übertragungsmodell für Passagiere auch ein Modell zur Bestimmung einer optimalen Verteilung der nutzbaren Sitzplätze in der Kabine entwickelt und umgesetzt [5]. Abbildung 5 zeigt eine geeignete Lösung unter der Annahme das 50% der Sitze genutzt werden. Jedoch bleibt es an dieser Stelle offen, in welcher Reihenfolge die Passagiere ein- und aussteigen sollten, um die individuellen Kontaktzeiten so kurz wie möglich zu halten.

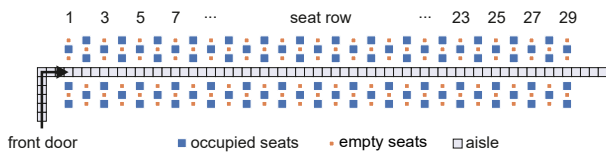


BILD 4. Die Hälfte der verfügbaren Sitze wurden unter COVID19 Randbedingungen nach dem Prinzip "nächster freier Sitzplatz" zugewiesen, wobei eine maximale räumliche Trennung eingehalten wird.

Passagiere reisen oft in Gruppen (z.B. Familien), was sich nachhaltig auf die Sitzplatzzuweisung und die Ein-/Ausstiegsreihenfolgen auswirkt. Da Gruppenmitglieder bereits vor dem Betreten der Kabine in engem Kontakt zueinander standen, ist es kritisch zu hinterfragen, ob die räumlichen Abstandsregeln innerhalb einer Gruppe gelten sollten.

Die in Abbildung 4 abgeleitete allgemeine Lösung kann verbessert werden, wenn Gruppen in der Optimierung berücksichtigt werden. Das zuvor eingeführte Modell der Virusübertragung (Shedding-Rate) kann in leicht abgewandelter Form auch auf das Problem der Sitzplatzzuweisung angewendet werden. Abbildung 5 zeigt die unterschiedlichen Shedding-Raten in Abhängigkeit von verschiedenen Sitzpositionen des Indexfalls (Fenster-, Mittel-, oder Gangplatz). Sitzt der infizierte Passagier beispielsweise auf dem Gangplatz 21C, sind Passagiere anderer Gruppen betroffen, wenn sie in derselben oder in der Reihe davor sitzen.

Die entsprechenden Shedding-Raten werden aufgrund der räumlichen Lage zum Indexfall bestimmt (siehe hellorangefarbene Sitze in Abbildung 5, indiziert von 1 bis 6).

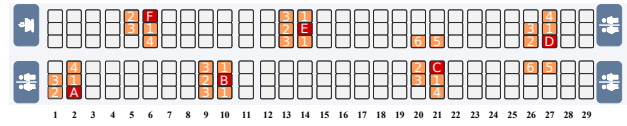


BILD 5. Transmissionspotentiale (orange) in der Flugzeugkabine rund um die infizierten Passagiere (rot) unter Berücksichtigung verschiedener Sitzpositionen: neben (1 und 4), vor (2), schräg vor (3) und gegenüber des Gangs (5 und 6) [5].

Ausgehend von diesen Annahmen wurden Optimierungsmodelle für das Einsteigen [5] und Aussteigen [6] der Passagiere aufgestellt. Die Lösung dieser mathematischen Modelle für ein mittelgroßes Problem (z. B. 10 Gruppen, 10 Sitzreihen) führte zu hohen Berechnungszeiten und die verwendete Optimierungssoftware (GAMS mit CPLEX-Solver) konnte keine optimale Lösung in angemessener Zeit (10 Stunden) finden.

Für die vorliegenden Anwendungsfälle in der A320-Kabine wurde daher ein Genetischer Algorithmus (GA) entwickelt und umgesetzt. Die Probleme wurden auf einem Computer mit AMD Ryzen 7, 3700U, 2.30GHz CPU, 16 GB RAM und der Software Matlab 2013 gelöst.

In Abbildung 6 ist eine optimierte Sitzplatzzuweisung mit einem minimierten Virenübertragungsrisiko dargestellt. Es wurden wieder die Hälfte der Sitze (87 Passagiere) als Eingangsgröße verwendet und die Passagiere dabei in 31 beispielhafte Gruppen aufgeteilt.

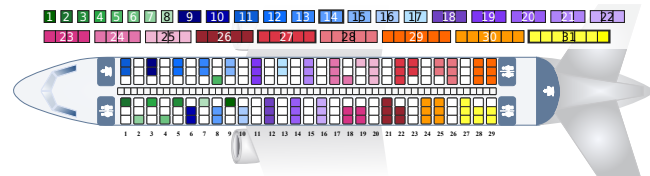


BILD 6. Optimiertes Boarding von 87 Passagieren in 31 Gruppen unter Berücksichtigung von 1,6 m Abstand zwischen den Passagieren verschiedener Gruppen.

3. IMPLEMENTIERUNG UND ERGEBNISSE

Boarding-Szenarien können prinzipiell aus drei Hauptansätzen und deren Kombinationen abgeleitet werden: Boarding nach Reihen (aggregiert zu Blöcken), Boarding nach Sitzen (Fenster, Mitte, Gang) und Sequenzen bestimmter Sitze. In Abbildung 7 sind verschiedene Boarding-Strategien dargestellt. Die Sitzplätze sind farblich hervorgehoben, um die Reihenfolge der Sitzplatzeinnahme bei der jeweiligen Boarding-Sequenz zu verdeutlichen. Im Allgemeinen werden sechs verschiedene Boarding-Strategien in Betracht gezogen: zufällig (*random*); von hinten nach vorne (*back to front*), basierend auf 2 Blöcken; optimierte Blockreihenfolge (*optimized block*), basierend auf 6 Blöcken; von außen nach innen (*outside in*),

Fensterplätze zuerst, Gangplätze zuletzt; umgekehrte Pyramide (*reverse pyramid*), von hinten nach vorne und von außen nach innen mit 6 Blöcken; individuelle Sequenz (*individual*), abwechselnd und versetzt.

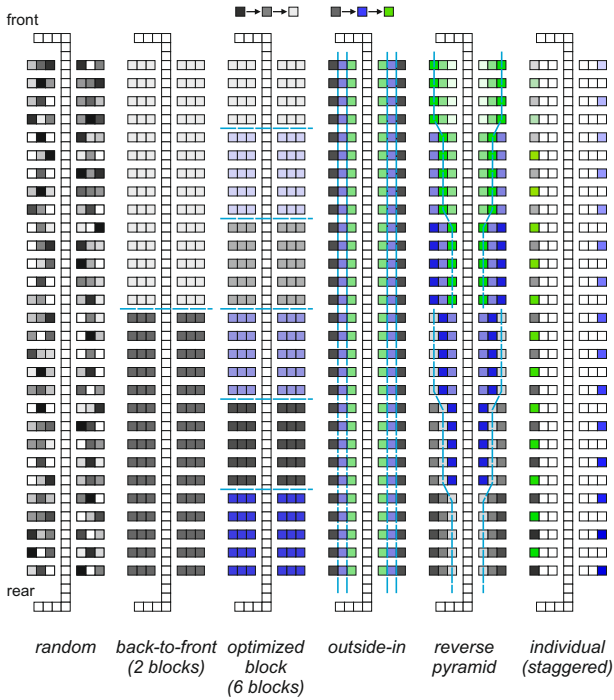


BILD 7. Verschiedene Boarding-Strategien: Schwarz vor Blau, gefolgt von Grün, wobei dunkler eingefärbten Sitzplätze zuerst genutzt werden (cf. [19]).

Diese sechs Hauptszenarien werden als Referenz für die Bewertung von Übertragungsrisiken beim Boarding unter COVID-19-Randbedingungen genutzt. Das Aussteigen erfolgt zunächst ohne besondere Passagiersequenzen. Die Passagiere stehen von ihren Sitzen auf und betreten den Gang, sobald sich ihnen die Gelegenheit bietet. In diesen Referenzsimulationen wurden 148 Passagiere (85% Auslastung, Airbus 320, 29 Sitzreihen) ohne Gruppenzugehörigkeit modelliert, was einen Vergleich mit früheren Studien ermöglicht (vgl. [19]). Tabelle 1 zeigt die Bewertung des Übertragungsrisikos unter Berücksichtigung eines infizierten Passagiers, der in jedem Simulationslauf zufällig in der Flugzeugkabine platziert wird. Zwei verschiedene Szenarien werden im Vergleich zur jeweiligen Referenzimplementierung (R) [19] bewertet: (A) Umsetzung des geforderten Mindestabstands zwischen zwei Passagieren von 1,6 m und (B) zusätzlich zum Mindestabstand wird die Anzahl der Handgepäckstücke noch um 50% reduziert (umgesetzt durch eine Reduzierung der Zeit zum Verstauen um 50%). Die Szenarien A und B werden dann zusätzlich noch durch die Verwendung von zwei Flugzeuggtüren (eine vorne und eine hinten) während des Ein-/Aussteigens erweitert (Szenarien A2 und B2). Als Bewertungskriterien werden das Übertragungsrisiko und die Zeit für das Ein-/Aussteigen herangezogen [35]. Die Analyse zeigt, dass insbesondere die *back to front*-Sequenz (2 Blöcke: vorderer Block mit Reihen 1-15, hinterer Block mit Reihen 16-29) nied-

rigere Werte für das Übertragungsrisiko aufweist als die optimierte Blocksequenz (unter Verwendung von 6 Blöcken von Sitzreihen).

Wenn die Passagiere (blockweise) von hinten nach vorne einsteigen, reduziert sich die Wahrscheinlichkeit eine infizierte Person zu passieren auf ein Minimum, was durch die geringeren Werte des Übertragungsrisikos in Tabelle 1 bestätigt wird. Dieser Effekt ist auch ein Hauptgrund für die geringen Übertragungsrisiken bei den *outside in*-, *reverse pyramid*- und *individual*-Boardingsequenzen. Wird die notwendige räumliche Entfernung zwischen den Passagieren berücksichtigt (Szenario A), so verlängert sich die Zeit für das Ein- und Aussteigen erheblich. Ohne geeignete Gegenmaßnahmen verdoppeln sich die Zeiten in fast allen Szenarien mindestens. Die zusätzliche Nutzung der hinteren Tür zum Ein- und Aussteigen mildert diesen zeitlichen Effekt weiter ab. Die Zeiten des Referenzszenarios R könnten erreicht werden, wenn zusätzlich die Anzahl der Handgepäckstücke reduziert wird (Szenario B2).

TAB 1. Übertragungsrisikos in der Kabine bei einem zufällig platzierten, mit SARS-CoV2 infiziertem Passagier. Abstufung nach fünf Sequenzkategorien: zufällige, block-, reihen- und individuenbasierte Sequenzen sowie Deboarding.

Boardingszenarios:	R	A	B	A2	B2	R	A	B	A2	B2
Einstiegssequenz	Transmissionrisiko (a.u.)					Boardingzeit (%)				
Random	5.9	1.6	1.1	1.4	1.0	100	198	154	133	103
Back-to-front (2 blocks)	5.6	1.4	1.0	1.2	0.8	96	220	169	153	116
Optimized block (6 blocks)	6.5	2.3	1.5	1.5	1.0	95	279	210	166	125
Outside-in	3.5	0.4	0.2	0.3	0.1	80	161	116	107	77
Reverse pyramid	3.0	0.2	0.1	0.2	0.1	75	185	128	119	82
Individual	2.0	0.2	0.1	0.2	0.1	66	114	104	103	74
Deboarding	10.0	9.7	7.8	7.6	6.0	55	97	68	52	36

Die Verwendung von zwei Flugzeuggtüren für das Boarding bietet eine geeignete und kostengünstige Lösung, um das Übertragungsrisiko innerhalb und außerhalb der Kabine zu minimieren. Besonders dann, wenn die Passagiere direkt vom Gate über das Vorfeld zum Flugzeug gehen können. Diese Art des "Walk Boarding" verhindert auch, dass die Fluggäste während des Einsteigens in der schlecht belüfteten Fluggastbrücke stehen oder in einem Bus zu einer entfernten Abstellposition gefahren werden. Das Aussteigen lässt sich nur schwer durch spezielle Verfahren kontrollieren, da die Fluggäste zumeist wenig Disziplin zeigen und das Flugzeug schnell verlassen wollen. Gerade hier sollten auch neue Verfahren oder technische Lösungen entwickelt werden, um eine bessere Kontrolle des Vorgangs zu ermöglichen (siehe [6]).

Um die positiven Auswirkungen von Passagiergruppen und den hiermit verbundenen Boardingsequenzen zu verdeutlichen, wird die bereits vorgestellte Idee eines "nächsten freien Sitzplatzes" (siehe Abbildung 4) verwendet und mit der optimierten Sitzplatzzuweisung

aus Abbildung 6) verglichen. Zunächst wird in beiden Szenarien eine zufällige Einstiegsreihenfolge simuliert. Wie Tabelle 2 zeigt, ist das Übertragungsrisiko während des Einsteigens bei beiden Szenarien nahezu auf gleichem Niveau. Jedoch führt die Berücksichtigung der Passagiergruppen zu einer nachhaltigen Verkürzung der Boardingzeit um 31%. Dies ist vor allem auf die im Mittel verkürzten Abstände zwischen den Passagieren (innerhalb einer Gruppe 0 m, zwischen Gruppen 1,6 m) und der Selbstorganisation in den Gruppen zurückzuführen. Gruppenmitglieder organisieren sich untereinander und nehmen ihre Plätze in der geeignetsten Reihenfolge ein. Wird darüber hinaus noch die Einstiegssequenz an die Gruppenkonstellation angepasst, kann die Boardingzeit insgesamt um 59% und das Transmissionsrisiko um 85% reduziert werden.

TAB 2. Durchschnittliche Boardingzeiten und Übertragungsrisiken bei 50% Auslastung. Annahme: ein zufällig ausgewählter Indexfall.

Boardingszenario	Zeit (%)	Transmissionsrisiko (a.u.)
Einzelne Passagiere, nächster Platz frei zufällige Boardingsequenz	100.0	0.58
Gruppen, optimale Sitzplatzverteilung zufällige Boardingsequenz	69.0	0.57
Gruppen, optimale Sitzplatzverteilung beste Boardingsequenz	41.1	0.09

Diese Ergebnisse können auch auf das Deboarding übertragen werden [6]. Abbildung 8 zeigt die optimierte Sitzplatzzuweisung und eine entsprechend optimierte Ausstiegssequenz. Wie eingangs erwähnt, wäre eine geeignete Information der Passagiere/Passagiergruppen über das Kabinenmanagementsystem schon heute möglich (bspw. mit Durchsagen oder durch das Einschalten der Lichter über den Plätzen).

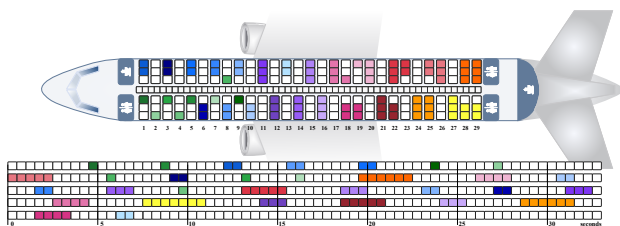


BILD 8. Deboarding mit fünf Chargen unter der Berücksichtigung von 87 Passagieren in 31 Gruppen mit optimierter Sitzplatzverteilung [6].

4. ZUSAMMENFASSUNG

In der Flugzeugkabine müssen sich die Passagiere während des Einsteigens, des Flugs und des Aussteigens eine enge Umgebung mit anderen Passagieren teilen. Dies stellt mit Bezug auf eine Virusübertragung ein Risiko dar und es müssen Strategien zur geeigneten Risikominderung entwickelt und umgesetzt werden. Abstände zwischen Passagieren/ Passagiergruppen während des Ein-/Aussteigens verringern das Übertragungsrisiko und optimierte Passagiersequenzen

können die Prozesszeiten erheblich verkürzen. Eine räumliche Distanz zwischen den Passagieren und gestaffelte Sitzplatzverteilungen sind Teil der Risikominderungsstrategien von Airlines. Jedoch führen diese Strategien mindestens zu einer Verdoppelung der Prozesszeiten. Mit den entwickelten Modellen konnten sowohl die Sitzplatzverteilung (geringe Transmissionen) als auch die Passagiersequenzen (geringe Transmissionen und schnellere Prozesszeiten) optimiert werden. Unter Berücksichtigung der Passagiergruppen konnte das Übertragungsrisiko um 85% vermindert und die Einstiegszeiten um 59% verbessert werden. Für das Bodenmanagement von (Turnaround) ist die hiermit verbundenen verbesserte Passagierabfertigung ein wesentliches Element, um den durch die COVID-19-Restriktionen verursachten verlängerten Bodenzeiten entgegenzuwirken.

Kontaktadresse:

michael.schultz@unibw.de

Literatur

- [1] M. Schultz et al. Future aircraft turnaround operations considering post-pandemic requirements. *J. Air Transp. Manag.*, 89:101886, 2020.
- [2] M. Schultz. Fast aircraft turnaround enabled by reliable passenger boarding. *Aerospace*, 5(1):8, 2018.
- [3] P. Schwarzbach et al. Evaluation of technology-supported distance measuring to ensure safe aircraft boarding during COVID-19 pandemic. *Sustainability*, 12(20), 2020.
- [4] J. Ninnemann et al. Multipath-assisted radio sensing and state detection for the connected aircraft cabin. *Sensors*, 22(8), 2022.
- [5] M. Schultz and M. Soolaki. Analytical approach to solve the problem of aircraft passenger boarding during the coronavirus pandemic. *Transp. Res. Part C Emerg.*, 124:102931, 2021.
- [6] M. Schultz and M. Soolaki. Optimized aircraft disembarkation considering COVID-19 regulations. *Transportmetrica B: Transport Dynamics*, 2021.
- [7] F. Serrano and A. Kazda. The future of airport post COVID-19. *J. Air Transp. Manag.*, 89:101900, 2020.
- [8] S. Yezli and A. Khan. COVID-19 social distancing in the kingdom of saudi arabia. *Travel Med Infect Dis*, 37:101692, 2020.
- [9] J.A. Lewnard and N.C. Lo. Scientific and ethical basis for social-distancing interventions against COVID-19. *The Lancet infectious diseases*, 20(6):631–633, 2020.
- [10] M. Salari et al. Social distancing in airplane seat assignments. *J. Air Transp. Manag.*, 89:101915, 2020.

- [11] L. Hutter, F. Jaehn, and S. Neumann. Influencing factors on airplane boarding times. *Omega*, 87:177–190, 2019.
- [12] E. Bachmat et al. Analysis of airplane boarding times. *Oper. Res.*, 57(2):499–513, 2009.
- [13] F. Jaehn and S. Neumann. Airplane boarding. *Eur. J. Oper. Res.*, 244(2):339–359, 2015.
- [14] R.J. Milne, M. Salari, and L. Kattan. Robust optimization of airplane passenger seating assignments. *Aerospace*, 5(3):80, 2018.
- [15] R.J. Milne and A.R. Kelly. A new method for boarding passengers onto an airplane. *J. Air Transp. Manag.*, 34:93–100, 2014.
- [16] R.J. Milne and M. Salari. Optimization of assigning passengers to seats on airplanes based on their carry-on luggage. *J. Air Transp. Manag.*, 54:104–110, 2016.
- [17] M. Salari, R.J. Milne, and L. Kattan. Airplane boarding optimization considering reserved seats and passengers’ carry-on bags. *Opsearch*, 56(3):806–823, 2019.
- [18] M. Schultz. Field trial measurements to validate a stochastic aircraft boarding model. *Aerospace*, 5(1), 2018.
- [19] M. Schultz. Implementation and application of a stochastic aircraft boarding model. *Transp. Res. Part C Emerg.*, 90:334–349, 2018.
- [20] C. Delcea et al. Methods for accelerating the airplane boarding process in the presence of apron buses. *IEEE Access*, 7:134372–134387, 2019.
- [21] C. Delcea et al. A two-door airplane boarding approach when using apron buses. *Sustainability*, 10(10):3619, 2018.
- [22] R.J. Milne et al. New methods for two-door airplane boarding using apron buses. *J. Air Transp. Manag.*, 80:101705, 2019.
- [23] A. Kierzkowski and T. Kisiel. The human factor in the passenger boarding process at the airport. *Procedia Eng.*, 187:348–355, 2017.
- [24] G. Notomista et al. A fast airplane boarding strategy using online seat assignment based on passenger classification. *J. Air Transp. Manag.*, 53:140–149, 2016.
- [25] S.-J. Qiang et al. Reducing airplane boarding time by accounting for passengers’ individual properties: a simulation based on cellular automaton. *J. Air Transp. Manag.*, 40:42–47, 2014.
- [26] P. Ferrari and K. Nagel. Robustness of efficient passenger boarding strategies for airplanes. *Transp. Res. Rec.*, 1915(1):44–54, 2005.
- [27] Jason H Steffen. Optimal boarding method for airline passengers. *J. Air Transp. Manag.*, 14(3):146–150, 2008.
- [28] C.-C. Kuo. An improved zero-one linear programming model for the plane boarding problem. *Appl. Manag. Sci.*, 17:53–69, 2015.
- [29] A. Steiner and M.I. Philipp. Speeding up the airplane boarding process by using pre-boarding areas. In *9th Swiss Transport Research Conference, Ascona, 9-11 September 2009*, pages 1–30, 2009.
- [30] M. Schultz, C. Schulz, and H. Fricke. Efficiency of aircraft boarding procedures. In *3rd ICRAT*, pages 371–377, Fairfax, 2008.
- [31] M. Schultz and Stefan Reitmann. Consideration of passenger interactions for the prediction of aircraft boarding time. *Aerospace*, 5(4):101, 2018.
- [32] T.-Q. Tang et al. An extended boarding strategy accounting for the luggage quantity and group behavior. *J. Adv. Transp.*, 2019:8908935, 2019.
- [33] T.-Q. Tang et al. An aircraft boarding model accounting for passengers’ individual properties. *Transp. Res. Part C Emerg.*, 22:1–16, 2012.
- [34] J. Wittmann. Customer-oriented optimization of the airplane boarding process. *J. Air Transp. Manag.*, 76:31–39, 2019.
- [35] M. Schultz and J. Fuchte. Evaluation of Aircraft Boarding Scenarios Considering Reduced Transmissions Risks. *Sustainability*, 12(13):5329, 2020.
- [36] R.J. Milne, C. Delcea, and L.-A. Cotfas. Airplane boarding methods that reduce risk from COVID-19. *Safety Science*, 134:105061, 2021.
- [37] T. Smieszek. A mechanistic model of infection: why duration and intensity of contacts should be included in models of disease spread. *Theor. Biol. Med. Model.*, 6(25), 2009.
- [38] S.A. Müller et al. Mobility traces and spreading of COVID-19. *medRxiv*, 2020.
- [39] M. Schultz. Entwicklung eines individuenbasierten Modells zur Abbildung des Bewegungsverhaltens von Passagieren im Flughafenterminal. PhD thesis, TU Dresden, Dresden, 2010.
- [40] M. Schultz. Stochastic transition model for pedestrian dynamics. In *PED*, pages 971–985. 2012.
- [41] IATA. Guidance for cabin operations during and post pandemic, ed. 4, 2020.
- [42] FAA. COVID-19: Updated interim occupational health and safety guidance for air carriers and crews, 2020.
- [43] S.J. Olsen et al. Transmission of the severe acute respiratory syndrome on aircraft. *NEJM*, 349(25):2416–2422, 2003.