

MODELLIERUNG VON PERSONENBEWEGUNGEN ZUR UNTERSTÜTZUNG DES FLUGZEUGKABINENTWURFSPROZESSES

F. Rudolph, F. Reimer*, I. Moerland-Masic*, T.-M. Bock*,

DLR Institut für Verkehrssystemtechnik, Lilienthalplatz 7 38108 Braunschweig,

* DLR Institut für Systemarchitekturen in der Luftfahrt, Hein-Saß-Weg 22 21129 Hamburg,
Deutschland

Zusammenfassung

Mit den bereits beginnenden gesellschaftlichen Veränderungen, wie zum Beispiel der demographische Wandel [1] und die COVID-19 Pandemie, wird der Entwurfsprozess einer Flugzeugkabine vor neue Anforderungen gestellt. So soll ein zukünftiges Kabinendesign ein modulares Konzept beinhalten aber auch Ansprüche an Komfort und vor allem Sicherheit werden neu definiert. Ziel ist es, ein sich veränderndes Anforderungsprofil des zukünftigen Nutzerspektrums bereits in frühen Entwurfsstadien zu identifizieren und simulativ auf neue Kabinenkonzepte zu übertragen. Die frühzeitige Modellierung von Personenbewegungen liefert dann schon in der Anfangsphase des Designprozesses ein wichtiges Unterstützungswerkzeug. Essentiell sind dabei zwei wesentliche Randbedingungen. Zum einen stellt der Boarding- und Deplaningprozess beim Turnaround einen bedeutsamen Bestandteil in der Passagierabfertigung dar. Zum anderen müssen Auflagen bei der Entfluchtung der Flugzeugkabine eingehalten werden. So fokussiert sich die im Paper vorgestellte Modellierung genau auf diese beiden Aspekte.

Mit der Modellierung und Simulation von Personenbewegungen kann wirksam untersucht werden, wie leistungsfähig frühe neuartige und auch unkonventionelle Designkonzepte bezüglich der Schnittstellenprozesse des Boarding und Deplaning sind. Es kann erfasst werden, welche Strategie am erfolgsversprechenden ist, wenn es darum geht, den Turnaround-Prozess zu optimieren und vor allem den kritischen Pfad nicht negativ zu beeinflussen. Weiterhin wird untersucht, ob die Wahl bestimmter Randbedingungen und Sicherheitsaspekte Rückschlüsse auf zu favorisierende Konzeptideen zulässt. So kann gezeigt werden, welche Designentscheidungen sich positiv auf den Passagierfluss auswirken, und welche ihn negativ beeinflussen. Ein fundamentales Kriterium ist dabei die Entfluchtung des Flugzeuges innerhalb von 90 Sekunden bei halber Anzahl der verfügbaren Ausgänge [13], dessen Berücksichtigung so bereits in allen Phasen des Designs gewährleistet ist. Dies gilt ebenso für die Weiterentwicklung bestehender Flugzeugtypen oder für komplett neue Flugzeugkonzepte.

Personenbewegungen können durch Verwendung geeigneter Meilensteine beim Boarding und Deplaning sowie bei der Entfluchtung in einzelne Abschnitte eingeteilt werden. Setzt man diese Meilensteine dann in Relation zueinander, lassen sich daraus Performance-Indikatoren berechnen, die die Leistungsfähigkeit eines Entwurfskonzeptes frühzeitig bewerten.

In dieser Arbeit wird das Modellierungskonzept vorgestellt, es werden Meilensteine definiert die zur Bestimmung aussagekräftiger Key Performance-Indikatoren genutzt werden. Damit wird die Simulation von Personenbewegungen als wichtiges Unterstützungswerkzeug im frühen Entwurfsprozess neuartiger Kabinenkonzepte integriert. Schließlich wird durch den Vergleich der Performance-Indikatoren in einer beispielhaften Auswahl von erstellten Konzeptideen der Einfluss der Modellierung zur Entscheidungsunterstützung skizziert.

1. EINLEITUNG

Die Entwicklung neuartiger Flugzeugkabinendesigns der Zukunft ist ein komplexer Prozess. Neben der Berücksichtigung zahlreicher Interessengruppen muss ein neues Kabinendesign der Zukunft unterschiedliche Anforderungen aus den Bereichen Sicherheit, Wirtschaftlichkeit, Komfort und Erlebnis (Pax Experience) erfüllen. Aufgrund der meist langen Entwicklungsdauer von Flugzeugkabinen bis zum letztendlichen Einsatz gilt es dabei schon heute, vor allem zukünftige Trends, Nutzerbedürfnisse und Anforderungen zu erkennen und in den Konzeptentwurfsprozess zu überführen. Der zukünftige Nutzer dieser Flugzeugkabinen spielt dementsprechend eine zentrale Rolle im Entwurfsprozess und entscheidet letztendlich über Erfolg oder Misserfolg

des Produkts. In Zeiten von globalen Krisen wie der COVID-19 Pandemie, dem demographischen Wandel oder dem Klimawandel müssen Airlines vor allem den Nutzer beobachten, ihn verstehen und seine veränderten Bedürfnisse von Beginn an in den Entwurf zukünftiger Kabinenkonzepte integrieren [1]. Gleichzeitig müssen diese Konzepte flexibel gestaltet sein, um schnell und effektiv auf ein verändertes Anforderungsspektrum reagieren zu können.

Im Rahmen des Projekts InDiCaD (Innovative Digital Cabin Design) befasst sich das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) mit dieser Herausforderung. Mithilfe einer angepassten und nutzerzentrierten Entwurfsmethode, dem sechsstufigen „Design-Thinking-Layer-Ansatz“ [18], bildet der Nutzer und die

genaue Kenntnis der Bedürfnisse die Grundlage für den Entwurfsprozess. Aufgrund des dynamischen und sich verändernden Anforderungsspektrums seitens der Nutzer sind somit flexible und digitale Test- sowie Bewertungsmethoden notwendig.

2. HINTERGRUND

Blickt man auf die Entwicklung der Luftfahrt in den letzten Jahren, so konnten die Prognosen für die Branche bisher nicht besser sein. Schätzungen zu Folge sollte sich die Anzahl weltweiter Fluggäste laut der International Air Transport Association (IATA) bis 2037 auf 8,2 Mrd. Fluggäste pro Jahr nahezu verdoppeln [3].

Bis vor wenigen Jahren war für viele Fluggesellschaften die Effizienz der entscheidende Treiber beim Kabinendesign, es galt möglichst viele Passagiere zu transportieren, und die Sitze wurden auf das Gewicht hin optimiert. Auf die wachsende Rolle von verstärktem nutzerzentriertem Entwurf von Flugzeugkabinen konnte eine Umfrage des Bundesverbands der Deutschen Luftverkehrswirtschaft bereits im Jahre 2018 andeuten [1]. So sank die Kundenzufriedenheit zwischen 2014 und 2018 von 90% auf 83%. Anknüpfend daran konnten im Zuge einer Umfrage der IATA dabei unter anderem die Verstaumung des Handgepäckes, fehlender Sitzkomfort, lange Wartezeiten beim Boarding und Deplaning sowie die Schlangenbildung in der Fluggastbrücke als zentrale Problemstellungen identifiziert werden [5].

Mit Beginn der globalen COVID-19 Pandemie Anfang 2020 ging der weltweite Flugverkehr um bis zu 60% zurück und stellt die Luftfahrt der Zukunft vor nie dagewesenen Herausforderungen [6]. Neben den wachsenden Anforderungen an den Komfort, den Herausforderungen durch den Demografischen Wandel [1] oder dem Klimawandel gilt es daher, das Vertrauen der Menschen an die Luftfahrt zurück zu gewinnen [7].

In diesem Paper wird der digitale Test- und Bewertungsprozess mithilfe einer agentenbasierten Boarding- und Deplaningsimulation auf Grundlage neuartiger Flugzeugkabinenkonzepte vorgestellt.

Um die Effizienz der Passagierprozesse begleitend zu den Entwurfsphasen zu berücksichtigen, werden Simulationsmodelle für Personenbewegungen entwickelt. Diese Modelle bewerten entsprechende Konzepte hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit beim Ein- und Aussteigeprozess und haben damit auch einen signifikanten Einfluss auf die Konzeptphase. In diesem Paper wird eine Auswahl der Simulationsszenarien vorgestellt und es skizziert, wie sie bei der Konzeptionierung der Kabine die Entwürfe bewerten können. Nach Abschluss der konzeptionellen Phase werden Detailmodelle der Kabinensimulation entwickelt, die begleitend auf prozedurale oder topologische Engpässe des Personenflusses hinweisen sollen.

Eine digitale und agentenbasierten Simulation von Beginn an und parallel zum ersten Entwurfsprozess soll die Lücke zwischen wirtschaftlichen, sicherheitsrelevanten und nutzerspezifischen Anforderungen schließen.

3. PROBLEMSTELLUNG UND ANFORDERUNGEN

In diesem Kapitel werden die Anforderungen des Passagierflusses beim Entwurf einer Flugzeugkabine skizziert. Es wird der Einfluss der personenbezogenen Prozesse im täglichen Betrieb beschrieben, der Fokus liegt dabei bei dem Ein- und Aussteigen aus der Flugzeugkabine. Diese beiden Passagierflüsse lassen sich gut simulativ abbilden und haben einen großen Einfluss auf die bodengebundenen Prozesse.

3.1. Rahmenbedingungen

Im Entwurfsprozess dieser neuartigen Gesamtkabinenkonzepte der Zukunft gibt es zahlreiche Möglichkeiten zur Positionierung und Dimensionierung von Modulen und Monumenten in der Flugzeugkabine. Zur Qualitätssicherung der Konzepte bereits im frühen Entwurfsstadium gelten dabei folgende bereits existierende und sicherheitsrelevante Randbedingungen, die aus allgemeinen Zertifizierungsstandards für Flugzeugkabinen und bestehenden Restriktionen adaptiert werden.

- Boarding-Rate: 12 Personen pro Minute pro Tür [8]
- Deplaning-Rate: 20 Personen pro Minute pro Tür [8]
- Entfluchtungszeit unter 90 Sekunden bei der Hälfte der verfügbaren Türen [13]
- Flugzeuge >20 Passagiere: Gangbreite_{Min1} = 38 cm (bei eine Höhe h ≤ 64 cm), Gangbreite_{Min2} = 51 cm (bei einer Höhe h > 64 cm)

Aktuellen Entwicklungen der COVID-19 Pandemie geschuldet, können die Rahmenbedingungen auch unter Einhaltung des Abstands von 1.5 Metern wie sie von der Bundesregierung vorgeschlagen beim Boarding und Deplaning untersucht werden [10].

3.2. Boarding und Deplaning

Ein wesentlicher Zeitfaktor im gesamten Turnaround eines Flugzeuges sind die passagierbezogenen Prozesse, wie das Boarding und das Deplaning.

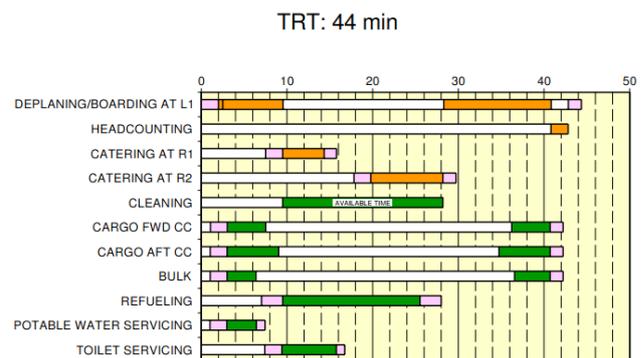


BILD 1. Turnaround A320-200 [8]

BILD 1 zeigt die Aufteilung der einzelnen Prozesse des Turnarounds beim A320-200. Die gesamte Dauer ist dabei mit 44 Minuten angegeben und dabei werden für das Verlassen und Betreten des Flugzeuges durch die Passagiere insgesamt 21 Minuten, also fast die Hälfte der gesamten verfügbaren Zeit angenommen. Weiterhin stehen Folgeprozesse in direkter Abhängigkeit zu diesen

Prozessen, so kann zum Beispiel das Betanken erst beginnen, wenn alle Passagiere das Flugzeug verlassen haben. Es wird deutlich, dass Verzögerungen in den beiden Prozessen direkten Einfluss auf die gesamte Dauer des Turnarounds haben. Dies könnte zu wirtschaftlichen Nachteilen für Airlines durch längere Standzeiten und Verzögerungen folgen.

In späteren Simulationsmodellen wird dann versucht, die Passagierbewegungen ebenfalls während des Fluges abzubilden, um dort eventuelle Problemstellen im Layout zu identifizieren.

3.3. Aufgabenstellung

Ziel der Personensimulationen soll es daher im ersten Schritt sein, begleitend zum in [9] vorgestellten Konzeptentwurf simulative Parameterstudien zu entwickeln, die als Entscheidungsunterstützung für zu verfolgende Detailkonzepte dienen. Dabei werden eine unterschiedliche Anzahl von Gängen aber auch Gangbreitenvariationen auf ihre zeitliche Effizienz und ebenfalls auf ihre Stabilität in Bezug auf Abweichungen untersucht. Damit soll erreicht werden, dass auch bei Konzepten mit großer Passagieranzahl ein hoher Durchsatz, und für die Planbarkeit des Turnarounds eine hohe Stabilität in den Prozesszeiten erzielt wird.

Die leistungsfähigen Variationen werden dann in den nächste Entwurfsphase mit integriert und werden dann als Basis für zu verfolgende Detailuntersuchungen weiterentwickelt und auf fortgeschrittene Konstruktionen adaptiert. Dabei können Problemstellen des Layouts in Bezug auf den Passagierfluss identifiziert und Lösungsansätze abgeleitet werden.

4. SIMULATIONSUMGEBUNG KONZEPTPHASE

Um die Wechselwirkungen der Passagiere beim Betreten und Verlassen simulativ abzubilden, wird die Simulationssoftware Anylogic [11] verwendet. Für die Modellierung wird dabei das Social Force Modell angewendet, welches das Verhalten von Personen durch Gleichungen der Newtonschen Mechanik beschreibt [12]. So wird sowohl die individuelle Richtung und Geschwindigkeit der Person vom eigentlichen Ziel und Anziehungs- und Abstoßungskräften durch Hindernisse und anderen Personen beeinflusst. Dabei stellt die Person wiederum eine Kraft dar, die auch auf andere Personen wirken kann.

4.1. Kalibrierungsmodell A320 – 1 Gang

Zur Kalibrierung wird als erste Variante ein Modell des A320 mit einem Gang und insgesamt 180 Sitzen modelliert und hinsichtlich ihrer Boardingzeiten simuliert. Unterschieden wird dabei zwischen 2 Variationen, in der ersten Variation steigen die Personen streng geordnet, von den hinteren Sitzreihen nach vorne und vom Fensterplatz zum Gang ein, in der zweiten Variation hingegen erfolgt die Reihenfolge hingegen zufällig. Jede dieser Variationen wurden 100-mal simuliert und miteinander verglichen.

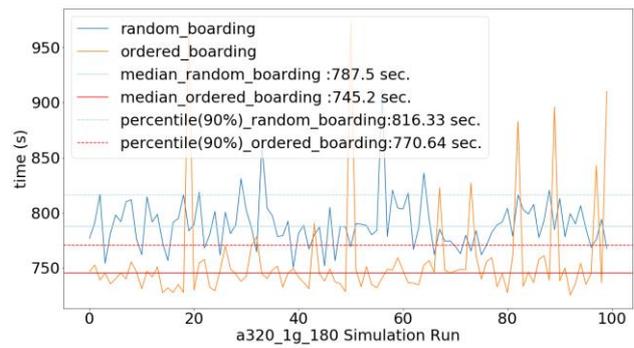


BILD 2. Boarding A320 – 1 Gang – Boardingzeiten

In BILD 2 sind die Zeiten der einzelnen Simulationen dargestellt, dabei wurden für die geordneten Läufe Orange und für die zufälligen Läufe Blau gewählt. Wertet man die Zeiten aus, so ergeben sich für die beiden Variationen folgende Werte:

Boarding in Sekunden	Median	Min	Max	Standardabweichung
geordnet	745.2	725.4	972.9	44
zufällig	787.5	750.3	911.7	22

TAB 1. Boarding A320 – 1 Gang - Ergebnisse

Die Aircraft-Characteristics [8] geben für das Boarding 12 Personen pro Minute an. Das entspricht im Wertebereich auch, sowohl im Minimum als auch Median, etwa den Simulationsergebnissen. Wie eigentlich auch zu erwarten war, sind die Werte für den geordneten Einsteigeprozess deutlich kleiner als bei der ungeordneten Variante. Allerdings sind beide Varianten ziemlich breit gestreut in ihrer Verteilung insbesondere die geordnete Variante hat häufiger sogenannte Ausreißer also Peaks nach oben. So ist auch die Standardabweichung in der geordneten Variante mit ca. 44 Sekunden doppelt so hoch wie bei der ungeordneten Variante, die bei 22 Sekunden liegt. Zusätzlich zu den Werten, wird durch Betrachtung der Graphen in BILD 2 deutlich das die geordnete Variante trotz der gesamt besseren Werte sehr instabil ist und zufällige Ereignisse große Auswirkungen haben können.

Schaut man sich diese Simulationsläufe im Detail an, so lässt sich gerade bei der geordneten Variation erkennen, dass bei gelegentlich stattfindenden Überholvorgängen im Gang, wenn eine deutlich schnellere Person hinter einer langsameren Person geht, diese Person selber später wieder den Gang versperrt, wenn das Verstauen des Handgepäcks simulativ abgebildet wird. Durch die strenge Reihenfolge sind so alle nachfolgenden Passagiere betroffen und die Gesamtdauer wird beeinträchtigt. Auch wenn dieser Effekt in der Realität eher nicht auftritt, so zeigt sich, dass dieses geordnete Einsteigen sehr anfällig gegenüber Störungen ist. Auf die Realität übertragen, würde schon eine kleine Änderung in der Reihenfolge beim Einsteigen diesen Effekt auslösen.

4.2. Untersuchung zusätzlicher Gang

Zum Vergleich dazu wird eine Bestuhlung mit zwei Gängen auf das Layout des A320 übertragen, diese Variante enthält 40 Plätze weniger, also insgesamt 140 Plätze.

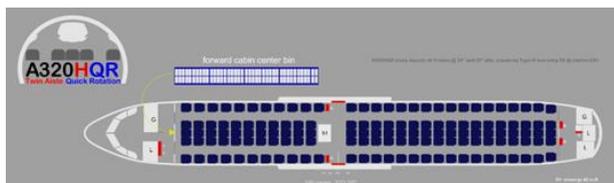


BILD 3. A320 – 2 Gang – Layout

BILD 3 zeigt das entsprechende Layout, es ist jeweils ein Fensterplatz vorgesehen und 3 Plätze in der Mitte der Kabine. Das Vorgehen ist genauso wie bei der Variante mit einem Gang, es gibt wieder 2 Variationen geordnet und zufällig und jede wird ebenfalls 100-mal simuliert.

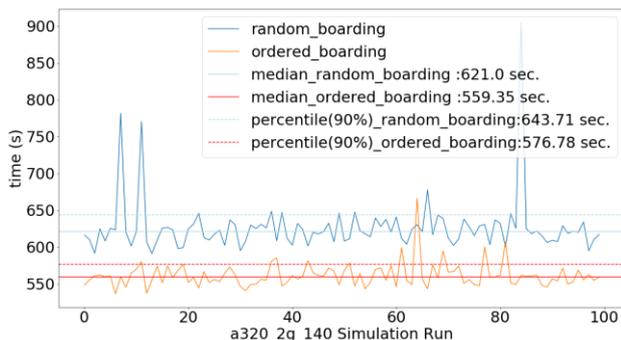


BILD 4. Boarding A320 – 2 Gänge – Boardingzeiten

BILD 4 stellt die entsprechenden Boardingzeiten der 100 Simulationsläufe dar, es ergibt sich bis auf 3 Ausnahmen beim zufälligen Einsteigen ein deutlich homogeneres Bild als bei der Variante mit einem Gang. In der Auswertung ergeben sich damit folgende Werte.

Boarding in Sekunden	Median	Min	Max	Standardabweichung
geordnet	559.3	536.7	666.4	16
zufällig	621.0	591.3	904.8	38

TAB 2. Boarding A320 – 2 Gänge – Ergebnisse

Auch hier verläuft das Boarding in der geordneten Variante deutlich schneller als beim zufälligen Einsteigen. Bemerkenswert ist die deutlich gleichmäßigere Verteilung bei der geordneten Variation, sie enthält deutlich weniger und auch kleinere Peaks. Bestätigt wird dies durch die Standardabweichung von 16 Sekunden.

Bei genauerer Betrachtung zeigt sich, dass bei dieser Sitzanordnung zwar ebenfalls Überholvorgänge zu betrachten sind, doch wirkt sich ein eventuelles Versperren des Ganges nicht mehr auf alle nachfolgenden Passagiere sondern verteilt sich maximal auf ein Viertel der Passagier, wie in den 4 Bereichen der Gänge auf BILD 3 zu erkennen. Es zeigt sich, dass ein zweiter Gang einen deutlich positiven Effekt auf den Einsteigeprozess hat, sowohl in der Gesamtzeit des Prozesses in den passagierbezogenen Zeiten aber auch in der Stabilität. Verstärkt wird dieser Effekt noch durch den freien Raum in der Kabinenmitte, der zum einen gut als Puffer funktioniert und zum anderen einen Gangwechsel in der Kabine erlaubt. Die Präferenz liegt daher auf Basis der Konzeptsimulationen bei einem Entwurf, der zwei Gänge verwendet.

4.3. Gangbreite

Ergänzend wurde untersucht, ob und wie groß sich der Einfluss unterschiedlicher Gangbreiten auf den gesamten Boardingprozess auswirkt. Ausgangspunkt ist das in 4.1 vorgestellte Kalibrierungsmodell auf Basis des A320. In den Aircraft-Characteristics [8] wird die Gangbreite mit 64 cm für die Economy-Class und mit 69 cm für die First-Class angegeben.

Davon ausgehend wurde die Gangbreite um 50 cm erhöht und damit simulativ auch der Rumpf erweitert, die Anzahl und Variationen der Simulationen wurden wie in den vorangegangenen Varianten erstellt, das Ergebnis überraschte zunächst.

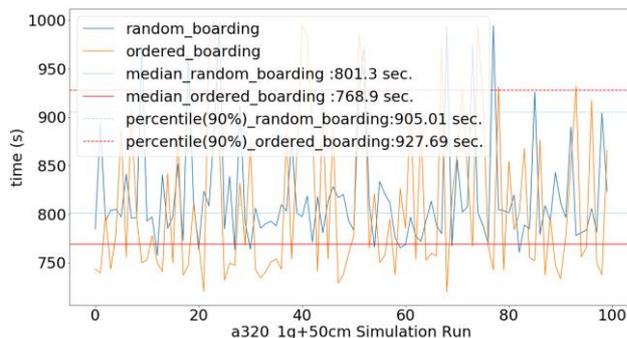


BILD 5. Boarding A320 – 1 Gang – zusätzlich 50 cm

Wie in BILD 5 zu sehen, verliefen die Simulationsläufe in beiden Variationen sehr inhomogen, es gibt keine klare Tendenz und die Zeiten für das Boarding sind über alle Simulationen breit gestreut, auch die Auswertung bestätigte dies.

Boarding in Sekunden	Median	Min	Max	Standardabweichung
geordnet	768.9	719.7	997.8	78.0
zufällig	801.3	757.5	997.2	56.6

TAB 3. Boarding A320 – 1 Gang + 50 cm – Ergebnisse

Während die Ergebnisse im Vergleich zur Kalibrierungsvariante ähnlich waren und sich um etwa 15-20 Sekunden im Median unterschieden, liefert die Standardabweichung sehr hohe Werte mit 56.6 Sekunden für die zufällige Variation und sogar 78 Sekunden im geordneten Einsteigen. Bei genauerer Betrachtung der einzelnen Simulationen wird deutlich, dass der erhöhte Platz im Gang dazu führt, dass häufiger Überholvorgänge stattfanden. Auf der anderen Seite war der Platz wiederum noch nicht ausreichend genug, so dass die Personen, die andere überholt haben die Nachfolger später doch behinderten.

Zusätzlich wurde in einer weiteren Variante die Gangbreite um insgesamt 90 cm erhöht, diese Variante wurde ebenfalls in den 2 Variationen 100-mal simuliert.

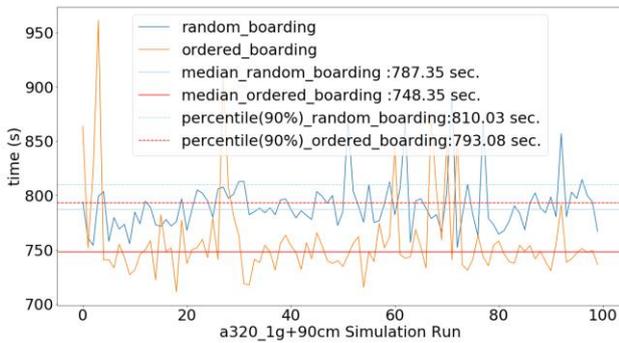


BILD 6. Boarding A320 – 1 Gang – zusätzlich 90 cm

Sieht man sich die Einzelergebnisse des Boarding an, so ergibt sich ein ähnliches Bild wie in der Kalibrierungsvariante. Dies wird ebenfalls durch die berechneten Werte bestätigt.

Boarding in Sekunden	Median	Min	Max	Standard-abweichung
geordnet	748.35	711.3	961.2	38.8
zufällig	787.35	752.1	894.9	23.7

TAB 4. Boarding A320 – 1 Gang + 90 cm – Ergebnisse

Kommt es Aufgrund der sehr hohen Gangbreite bei Überholvorgängen zu noch weniger Versperrungen, so entsprechen die Werte sowohl in absoluten Zahlen als auch in der Standardabweichung weitestgehend der Charakteristik des Kalibrierungslaufes mit einer Gangbreite von 80 cm.

Abschließend zeigt sich, dass die Installation mehrerer Gänge einen größeren Effekt hat, als die Verbreiterung eines Gangs, die eher auch negativen Einfluss auf die Gesamtperformance beim Boarding hat. Die A320-Variante bildet damit die Grundlage für weitere Untersuchungen, wie im nachfolgenden Abschnitt.

4.4. Türenlayout

Als nächstes Kriterium wird simulativ untersucht, wie sich die Platzierung einer zusätzlichen Tür auf das Verlassen des Flugzeuges auswirkt. Ausgangspunkt des Layouts ist dabei die Variante mit zwei Gängen und 140 Sitzplätzen. Ausgehend von diesem Layout wird eine weitere Türreihe zuerst am Ende der Kabine installiert. Der Begriff Türreihe meint in diesem Fall, dass die Türen an dieser Position sowohl auf der linken als auch auf der rechten Seite der Kabine zu finden sind. In einer weiteren Variante wird die Türreihe in der Mitte der Kabine platziert. Richtwert ist dabei wie in den Rahmenbedingungen (Kapitel 3.1) genannt, die Entfluchtung der Kabine innerhalb von 90 Sekunden, bei halber Anzahl der Verfügbaren Ausgänge wie sie für die Zulassung eines Luftfahrzeugs durch einen mit realen Personen durchgeführten Test nachgewiesen wird [13].

In dieser Simulationsreihe werden die Einzelereignisse als Meilensteine aller Passagiere erfasst und so die Deplaningzeiten individuell berechnet. Das Erfassen der Meilensteine wird in Kapitel 5.1 beschrieben. So wurden für jede Variante 127 Zeiten gemessen. In der Auswertung ergibt sich dann das folgende Bild.

Deplaning in Sekunden	Median	90% Percentile	Standard-abweichung
A320 eine Tür	76.7	116.3	32.2
A320 zwei Türen (rear)	51.8	92.6	26.5
A320 zwei Türen (middle)	39.2	67.1	19.3

TAB 5. Deplaning A320 – Türenlayout – Ergebnisse

TAB 5 zeigt die ausgewerteten Ergebnisse der jeweiligen Variationen. Während die Simulation für eine Tür deutlich zu hohe Werte liefert – so haben 90 Prozent der Passagiere erst nach 116 Sekunden das Flugzeug verlassen, zeigen die Varianten mit zwei Türreihen ein in etwa zu erwartendes Bild, d.h. nach etwa 92 Sekunden haben 90 Prozent der Passagiere das Flugzeug mit der Tür am Ende der Kabine verlassen. In der Variante mit der zweiten Tür in der Mitte sind es nur etwa 67 Sekunden.

Bei genauerer Betrachtung der Simulationen mit der zweiten Tür am Ende der Kabine lässt sich folgender Effekt beobachten: es kommt vor, dass sich Passagiere auf den hinteren Plätzen für den vorderen Ausgang entscheiden, während Passagiere auf den vorderen Plätzen des hinteren Ausgang wählen. Dies führt zu gegenläufigen Bewegungen untereinander und führt immer wieder zu Versperrungen der Gänge und somit zu einer nicht optimalen Erreichung der Ausgänge. Bei der Variante mit der zweiten Tür in der Mitte tritt dieser Effekt, dass sich Passagierbewegungen kreuzen, nicht auf. Da sich aber auch Passagiere aus den vorderen Reihen für die Tür in der Mitte entscheiden können, wird diese Tür deutlich stärker belastet, trotzdem liefert diese Variante die besten Ergebnisse.

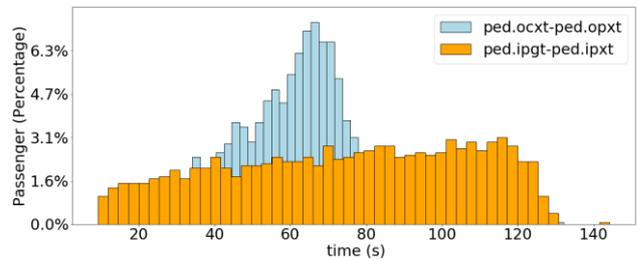


BILD 7. Verteilung eine Tür

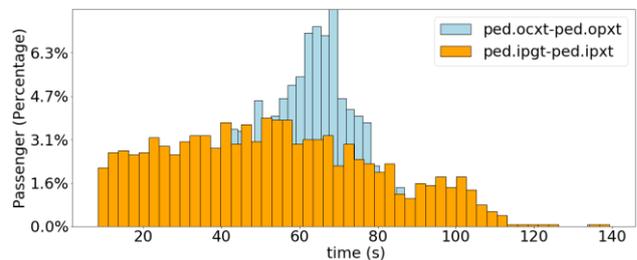


BILD 8. Verteilung zwei Türen (rear)

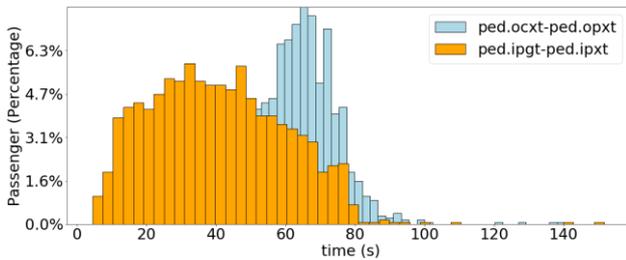


BILD 9. Verteilung zwei Türen (middle)

Dieses Resultat wird zusätzlich bestätigt, wenn man in BILD 7 bis BILD 9 die Verteilung der Deplaning-Zeiten (in Orange) betrachtet. Es ist zu erkennen, dass die Streuung der Zeiten in der Variante mit der zweiten Tür in der Mitte (BILD 9) am geringsten ist, was einer hohen Stabilität entspricht. Bestätigt wird dieses Ergebnis durch die geringe Standardabweichung von etwa 19.3 Sekunden.

4.5. Simulationsergebnisse

Fasst man die Erkenntnisse dieser vorgestellten Simulationen zusammen, so lassen sich für die nächste Entwurfsphase folgende Aussagen treffen:

- Breite Gänge können kontraproduktiv wirken.
- Zwei Gänge effektiver als ein breiter Gang.
- Geordnetes Einsteigen verstärkt den positiven Effekt bei zwei Gängen.
- Zweite Tür eher in der Kabinenmitte

Diese vier Aussagen haben direkten Einfluss auf die simulierten Ein- und Aussteigeprozesse der Kabine, sowohl in ihren absoluten Werten als auch in ihrer Stabilität, erkennbar durch die geringere Standardabweichung. Ziel sollte es daher sein, diese konzeptionellen Simulationsergebnisse auch im Entwurf für das Kabinendesign zu berücksichtigen.

5. SIMULATIONSUMGEBUNG ENTWURF

In diesem Kapitel wird der ausgewählte Entwurf beschrieben und wie die in Kapitel 4 vorgestellten Ergebnisse auf diesen Entwurf wirken. Weiterhin wird der aktuelle Stand der Detailsimulation erläutert und skizziert wie die Simulation den Entwurf weiterhin beeinflusst.

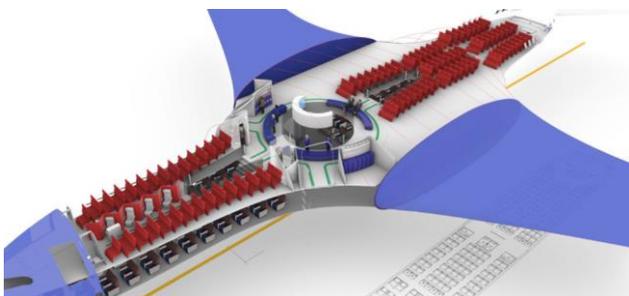


BILD 10. Entwurf Flugzeugkabine

BILD 10 zeigt den derzeitigen Stand des Entwurfsansatzes für die Langstrecken-Variante wie er unter Verwendung der in [9] beschriebenen Techniken entwickelt wurde. Der Rumpf der Maschine basiert im Wesentlichen auf einen A380 und besteht aus 2 Ebenen.

Die Business-Class befindet sich auf dem unteren Deck und der Economy-Class auf dem Oberen. Ausgehend von diesem Modell wurde den Rumpf in seiner Breite erweitert. Bei der Bestuhlung wurde eine Konfiguration gewählt, die die Thesen aus den Simulationen der Konzeptphase berücksichtigt. Die Bestuhlung besteht auf beiden Ebenen aus zwei Gängen und eine zweite Türreihe in der Mitte der Kabine wurde eingefügt. Wobei diese Türen in diesem Entwurf auch als Haupt-Ein- und Ausgangstüren genutzt werden sollen. Zentrales Element des gezeigten Kabinendesigns ist der Empfangsbereich in der Kabinenmitte, in dem die Passagiere weiterführende Informationen erhalten und auch ein direkter Austausch mit dem Personal oder den Passagieren untereinander erfolgen kann. Darüber hinaus wurde der Bereich der Flügelwurzel über beide Stockwerke vergrößert, um neuartige Konzepte wie Schlaf-, Arbeits-, Fitness- und Unterhaltungsbereiche in der Kabine zu integrieren. Die Integration dieser Bereiche in die Kabine hat somit keinen Einfluss auf die Bestuhlungsanzahl in der Gesamtkabine und fördert zudem den Komfort und das Reiseerlebnis der Flugreisenden.

Für diesen Entwurf wird ein detailliertes Simulationsmodell entwickelt, welches sich auf die agentenbasierten Einzelereignisse fokussiert. Dabei werden für jeden Agenten individuelle Messpunkte innerhalb des Ein- und Aussteigeprozesses erfasst um damit die Leistungsfähigkeit bestimmen zu können. Weiterhin wird die Topologie des Entwurfes untersucht, um Anomalien, wie zum Beispiel einer sehr hohen Personendichte, lokal erfassen zu können.

Aufbauend auf der entwickelten Konzeptmodelle wird für diese Simulation erneut die Software Anylogic [11] und die darin genutzte Pedestrian-Library, zur Berücksichtigung der Interaktion der Personen (Agenten) untereinander, verwendet. Erweitert wird dieses Modell mit der Abbildung individueller Eigenschaften. Die Ausprägung dieser individuellen Eigenschaften wird durch Personas definiert. Dabei werden agentenbasierte State-Charts verwendet. Durch die objektorientierten Modellierungsmöglichkeiten, kann so jedem simulierten Agenten ein eigenes Statusdiagramm zugeordnet werden. Dieses Statusdiagramm bildet seinen aktuellen Zustand und noch zu erreichende Zustände in Wechselwirkung mit den anderen Agenten ab.

5.1. Zustandsmeilensteine

Während des Ein- und Aussteigeprozesses durchläuft jeder Agent mehrere Meilensteine. Beim Erreichen eines Meilensteines wird der entsprechende Zeitpunkt gespeichert und dem Agenten zugeordnet. In der Notation orientieren sie sich an bereits etablierte Meilensteine aus dem Verkehrsmanagement [14], die wiederum aus den Meilensteinen des A-CDM Manual der Eurocontrol abgeleitet wurden [15], und somit Ursprung aus der Luftfahrt haben.

Meilenstein	Name	Beschreibung
OPWT	Outbound Passenger at Waiting Time	Passagier hat den Wartebereich erreicht.

OPGT	Outbound Passenger at Gate Time	Passagier steht für die Bordkartenkontrolle an.
OCGT	Outbound Checked at Gate Time	Passagier hat die Bordkartenkontrolle passiert.
OPXT	Outbound Passenger to Seat Time	Passagier hat das Flugzeug erreicht und ist auf dem Weg zu seinem Platz.
OCXT	Outbound Passenger Checked at Seat Time	Passagier hat seinen Sitzplatz erreicht.
IPXT	Inbound Passenger at Seat Time	Passagier verlässt seinen Sitzplatz. Start des Deplanings.
IPGT	Inbound Passenger at Gate Time	Passagier erreicht das Gate. Ende des Deplanings.

TAB 6. Prozessmeilensteine Ein- und Ausstieg

TAB 6 beschreibt die erfassten Meilensteine die während der Simulation aufgezeichnet werden. Outbound meint hier Passagiere die den Flughafen luftseitig verlassen, während Inbound den Weg vom Flugzeug über den Flughafen ins Land beschreibt. Die Meilensteine werden dabei in Sekunden ab Simulationsbeginn angegeben. Setzt man jetzt bestimmte Meilensteine in Relation zueinander, lässt sich die Leistungsfähigkeit bestimmter Variationen in Bezug auf den Ein- und Aussteigeprozess bestimmen. Zum Beispiel berechnet sich die Dauer vom Betreten der Kabine bis zum Erreichen des Sitzplatzes als Differenz zwischen der OCXT und der OPXT, dieser Wert bildet damit den Key Performance Indikator (KPI) *time_to_seat* ab. Umgekehrt ergibt sich für die andere Richtung vom Verlassen des Sitzplatzes bis zum Verlassen der Kabine folgende Berechnung: IPGT – IPXT, die wiederum dem KPI *time_from_seat* entspricht. Diese individuellen personenbezogenen Meilensteine lassen sich dann zur Gesamtbewertung einer Variante wie in Kapitel 4 beim Türenlayout geschehen über alle betrachteten Passagiere aggregiert zusammenfügen.

Name	Wert
id	3431
seat	52
opwt	50
opgt	62
ocgt	143
opxt	272
ocxt	307
ipxt	2500
ipgt	2561
time_to_seat	35
time_from_seat	61

TAB 7. Exemplarischer Datensatz für Pax 3431

In der Tabelle TAB 7 ist ein Beispiel für einen Meilenstein-Datensatz angegeben. Es handelt sich dabei um den Passagier mit der ID 3431 der den Sitzplatz 52 gebucht hat. Die Meilensteine sind in Sekunden ab Simulationsbeginn dargestellt. So betritt dieser Passagier zur Simulationssekunde 272 (OPXT) die Flugzeugkabine

und erreicht dann zur gemessenen Simulationssekunde 307 seinen entsprechenden Sitzplatz (OCXT). Der KPI *time_to_seat* des Passagiers liegt damit bei 35 Sekunden. Analog berechnet sich der KPI *time_from_seat*, der Passagier verlässt zur Sekunde 2500 seinen Sitzplatz und 61 Sekunden später (IPGT = 2561) die Flugzeugkabine.

5.2. Topologie

In der Topologie des Modells wird unter anderem die Personendichte innerhalb der Kabine beim Boarding und Deplaning untersucht. Durch den sequenziellen und streng geordneten Boardingprozess ist die Personendichte beim Besteigen des Flugzeuges über den gesamten Zeitraum relativ unkritisch. Es kommt lediglich an der Fluggastbrücke auf dem Weg zur Kabine zu hohen Dichten.

Ein anderes Bild ergibt sich mit der aktuellen Konfiguration bei der Betrachtung der Aussteigeprozesse, insbesondere für die schnelle Entfluchtung der Kabine.

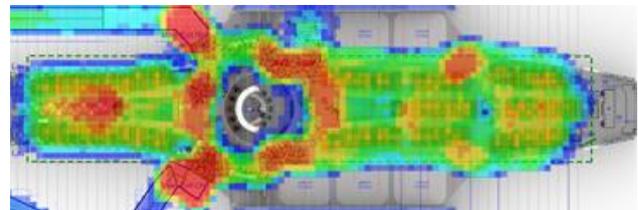


BILD 11. Heatmap Upper-Deck

BILD 11 zeigt das Layout des oberen Decks mit einer Heatmap als Overlay, die von grün über gelb bis rot die Personendichte zur Simulationszeit wiedergibt. Das Bild wurde während dem Deplaning der Kabine erstellt. Rote Bereiche markieren ein Personendichte mit mehr als 5 Personen pro Quadratmeter. Bei dieser Personendichte kann sich eine einzelne Person durchaus noch bewegen, sie übt allerdings bereits selbst wiederum Kräfte auf die benachbarten Personen aus. Das bedeutet, dass bei weiterhin zunehmender Personendichte ein Ableiten der auftretenden Kräfte unmöglich wird, weil dann kein Bewegungsspielraum mehr für die einzelnen Personen selbst bleibt [16]. Dieser Grenzwert markiert damit die kritische Dichte, ab dann ist kein geordnetes, koordiniertes Bewegen mehr möglich und es bildet sich ein Stau innerhalb der Kabine. Somit wird die gesamte Prozessdauer erheblich verzögert.

Zusätzlich zu den erwartbaren hohen Dichten am Ausgangsbereich kommt es im hinteren Bereich des oberen Decks ausgehend von den Treppenaufgängen am Empfangsbereich vorbei in Richtung der Ausgänge zu einer unerwarteten und starken Personendichte, die nahezu den gesamten Prozess über erhalten bleibt und damit die Leistungsfähigkeit deutlich negativ beeinflusst. Es zeigt sich, dass vor allem dort noch Optimierungspotential besteht, um diese Ballung zu minimieren. Der vordere Treppenaufgang zeigt zwar auch eine hohe Dichte, diese bleibt allerdings nicht über den gesamten Aussteigeprozess bestehen. Im Wesentlichen liegt es auch daran, dass insgesamt weniger Personen einen Sitzplatz vor dem Empfangsbereich haben als dahinter. So ist diese Treppe weniger belastet als die Vordere. Das untere Deck zeigt sich hinsichtlich der Personendichte unauffällig, es werden keine Grenzwerte mit mehr als 5 Personen pro Quadratmeter erreicht, die Dimensionierung

der Treppen als solche erscheint damit ausreichend. Für das gesamte Flugzeug erscheint es daher ratsam, auch im unteren Deck zwei temporäre Ausgänge zu installieren, damit das obere Deck entlastet wird.

6. FAZIT UND AUSBLICK

Die durchgeführten Konzeptsimulationen mit der unterschiedlichen Anzahl von Gängen und den verschiedenen Gangbreiten sowie der idealen Platzierung einer zusätzlichen Türreihe haben einen direkten Einfluss auf den letztendlich finalen Entwurf gehabt, indem die empfohlene Bestuhlung mit zwei Gängen und die zusätzliche Türreihe in der Mitte der Kabine umgesetzt wurden. Die Detailsimulation zeigt bereits während der Entwicklung deutlich, in welchen Bereichen die Entwürfe noch nachgebessert werden sollten.

Ziel der nächsten Entwicklungsstufen der Simulation wird neben der qualitativen Erweiterung um zusätzliche Funktionen, wie in Kapitel 5 beschrieben, die Umsetzung von Automatismen im Szenariodesign sein. Dabei werden die Beschreibungsdaten der Topologie einer Kabine über das CPACS Datenformat [17] importiert. Ziel dieses Automatismus soll es sein, dass kleinere Detailänderungen am Entwurf ohne manuelle und zeitintensive Anpassungen der Simulation realisiert werden können.

Im Zuge weiterer entwurfsbegleitender Simulationen gilt es zudem, sicherheitsspezifische Parameter (Boarding, Deplaning, Evakuierung) und zentrale Komfortaspekte zu verbinden. In den nächsten Dimensionierungsschritten könnten somit unterschiedliche Szenarien für Sitzabstände und Sitzbreiten untersucht werden. Darüber hinaus kann eine Beschleunigung des Boarding- und Deplaning-Prozesses zur Reduktion von Wartezeiten im Gangbereich führen. Neben dem physischen Diskomfort für Personen mit eingeschränkter Mobilität (ältere Personen, Personen mit Übergewicht u.a.) dürfte auch der psychische Diskomfort durch fehlende Abstände in Zeiten möglicher Pandemien deutlich reduziert werden.

Zusätzlich zum Input etablierter Datenformate sollen zukünftige Simulationen als Output zu den bereits beschriebenen Meilensteinen auch komplette Bewegungspfade der Passagiere in der Flugzeugkabine ausgeben. Dazu können die diskreten Positionsdaten aller Passagiere über die Zeit erfasst und dann in Bewegungsvektoren umgerechnet werden. Ziel dieses Outputs ist es, die Simulationsergebnisse zu Validierungszwecken und zur Erlebnis erfahrung in VR-Umgebungen als kontinuierlich animierten Bewegungspfad zu importieren. So bietet ein virtuelles Kabinendesign neben der Architektur ebenfalls die Möglichkeit der Darstellung von Passagierbewegungen innerhalb der Kabine.

Die Erfassung der Bewegungspfade erlaubt es auch, Distanzen der Passagiere untereinander über die Zeit zu berechnen. Damit könnten Personenströme dahingehend optimiert werden, die in [10] erhobenen Regeln zur COVID-19 Pandemie effizient zu befolgen.

REFERENZEN

- [1] Robert Koch Institut - Demografischer Wandel https://www.rki.de/DE/Content/Gesundheitsmonitoring/Themen/Demografischer_Wandel/Demografischer_Wandel_node.html (Stand 9.2021)
- [2] Anthropological Approaches to Airline Product Development <https://apex.aero/articles/anthropological-approaches-airline-product-development/> (Stand 9.2021)
- [3] IATA Forecast Predicts 8.2 billion Air Travelers in 2037 <https://www.iata.org/en/pressroom/pr/2018-10-24-02/> (Stand 9.2021)
- [4] BDL Verbraucherumfrage 2018 <https://www.bdl.aero/de/publikation/verbraucherumfrage/> (Stand 8.2021)
- [5] IATA Global Passenger Survey 2018 – The Aircraft Experience
- [6] ICAO Economic Impacts of COVID-19 on Civil Aviation <https://www.icao.int/sustainability/Pages/Economic-Impacts-of-COVID-19.aspx> (Stand 8.2021)
- [7] Factors that predict passengers willingness to fly during and after the COVID-19 pandemic - T.L.Lamb et. Al.
- [8] AIRBUS A320 - AIRCRAFT CHARACTERISTICS - AIRPORT AND MAINTENANCE PLANNING (Rev. 5.2015)
- [9] Applikation des Design Thinking Ansatzes auf den Flugzeugkabinen Entwurfsprozess - F. Reimer, F. Rudolph, W. Granzeier, I.- M. Masic, F. Meller, B. Nagel (DLR 2020)
- [10] Coronavirus in Deutschland <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/coronavirus> (Stand 8.2021)
- [11] AnyLogic: Softwarewerkzeuge für Simulationsmodellierung & geschäftliche Lösungen <https://www.anylogic.de/>
- [12] Social Force Model for Pedestrian Dynamics D. Helbing, P. Molnár (Physical Review E 1995)
- [13] U.S. Congress Office of Technology Assessment: Aircraft evacuation testing: research and technology issues, Library of Congress, September 1993. Seite 17, Limitations of full-scale demonstrations
- [14] Trajectory-based Multimodal Transport Management for Resilient Transportation. Engler, E. und Gewies, S. und Banyś, P. und Grunewald, E. (2017) In: Transport Problems 2017. Transport Problems, 27.-30. Jun. 2017, Sulejów, Polen.
- [15] Airport collaborative decision-making (A-CDM) <https://www.eurocontrol.int/concept/airport-collaborative-decision-making> (Stand 8.2021)
- [16] Statische und dynamische Personendichten bei Großveranstaltungen - Dirk Oberhagemann (vfdB Technischer Bericht 13/01 März 2012)
- [17] CPACS <https://cpacs.de/> (Stand 8.2021)
- [18] R. Balcaitis, Design Thinking models. Stanford d.school <https://empathizeit.com/design-thinking-models-stanford-d-school/> (Stand 9.2021)