

GEKOPPELTE PASSAGIERFLUSSSIMULATION ZUR OPTIMIERUNG DES TURNAROUNDPROZESSES

F. Rudolph, M. Jung*, A. B. Classen*

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Institut für Flugführung, Lilienthalplatz 7,
38108 Braunschweig, Deutschland

* Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Institut für Luftverkehr, Linder Höhe,
51147 Köln, Deutschland

Zusammenfassung

In den Einzelprozessen des Turnarounds nehmen die Passagierbewegungen des Boarding und des Deplaning eine zentrale Rolle ein, da sie auf dem kritischen Pfad des Turnarounds liegen. Kommt es in einem dieser Prozesse zu Verzögerungen, so wirkt sich dies sofort auf die Dauer des Gesamtprozesses aus. Ist die Verzögerung so groß, dass der geplante Take-Off Slot für diesen Flug verpasst wird, wächst die Verzögerung noch weiter, da ein neuer freier Slot zugewiesen werden muss und es damit zu einer weiteren Folgeverspätung kommt. Gleichwohl bewegen sich die Einzelprozesse im Terminal und in der Flugzeugkabine bereits in ihrem lokalen Optimum. Durch Kopplung einer Passagierflusssimulation im Terminal mit einer Boardingsimulation in der Flugzeugkabine soll untersucht werden, wie sich mögliche Entwicklungen und Restriktionen in einem dieser Bereiche auf die Gesamtprozesse der Reisekette des Passagiers auswirken können. Zusätzlich soll mit Hilfe dieser gekoppelten Simulation langfristig bewertet werden, ob Maßnahmen die bereits im Terminal vorbereitet werden können, helfen das Boarding in der Kabine effizienter zu gestalten.

Erste Anwendungen findet diese gekoppelte Simulation zum einen als Maßnahmenbewerter und zum anderen als Infektionsindikator. So werden pandemiebedingte Maßnahmen, wie sie bei der COVID-19 Pandemie eingeführt wurden, hinsichtlich ihres Zeit- und Platzbedarfes sowie ihres Risikos einer möglichen Virusinfektion bewertet. Das Maß zur Bewertung einer Virusinfektion durch Abstandsunterschreitung über die Zeit im gesamten Flughafenterminal orientiert sich dabei an dem Algorithmus der in Deutschland angewendeten „Corona Warn App“. Ziel ist es in diesem Anwendungsfall ein Optimum aus minimalem Infektionsrisiko bei möglichst geringem Aufwand an den Prozessstellen des Flughafens zu identifizieren. Dabei werden unterschiedliche Szenarien über festgelegte Restriktionen und deren Ausprägung sowie Auslastung simuliert und hinsichtlich ihres erfassten Infektionsrisikos miteinander verglichen.

Abschließend wird die technische Visualisierung beschrieben, die sich aus der Kopplung der Simulationen ergibt. Dazu werden gemeinsame Schnittstellen definiert und parametrisiert um einen Import zu einer nachgelagerten Visualisierungssoftware zu realisieren. Mit der ganzheitlichen Simulation werden unterschiedlichste Prozessoptimierungen (wie zum Beispiel bei der Sicherheitskontrolle oder beim Boarding) simulativ abgebildet und deren Auswirkung auf den gesamten Prozess definiert. Langfristiges Ziel ist es, einerseits aus lokalen Optimierungen ein globales Optimum über die gesamte Reisekette des Passagiers zu erzeugen. Andererseits wird mit dieser Kopplung ein Framework geschaffen, das es dem Flughafenbetreiber ermöglichen soll, auf mögliche zukünftige Pandemien effizient reagieren zu können.

1. EINLEITUNG

Die COVID-19-Pandemie hat den gesamten Transportsektor und insbesondere den weltweiten Passagierluftverkehr, mit einbrechenden Verkehrszahlen, weitreichenden Reisebeschränkungen und langanhaltenden Unsicherheiten getroffen [1]. Während sich der Luftverkehr von den starken Einbußen im Verkehrsaufkommen im Vergleich zum Jahr 2019, das der Pandemie vorausging, vorsichtig zu erholen beginnt und die Reisebeschränkungen gelockert werden, müssen die Luftverkehrsunternehmen sowohl die Sicherheit der Passagiere als auch der Beschäftigten im Luftverkehrssektor gewährleisten und sicherstellen, dass sie auf die nächste Pandemie vorbereitet sind. Die Weltgesundheitsorganisation (WHO) warnt zum Beispiel

vor Arboviren, die das Potenzial haben, die nächste Epidemie auszulösen, und es könnte nur eine Frage der Zeit sein, wann die nächste Pandemie ausbricht [2]. Flughäfen werden sich darauf vorbereiten müssen, mit der nächsten Pandemie effizient und effektiv umzugehen. Zu diesem Zweck wurde begonnen, ein Framework zur Analyse und Bewertung operativer Maßnahmen entlang der Reisekette am Flughafen zu entwickeln. In diesem Papier werden die möglichen Ansteckungsrisiken während des gesamten Reiseprozesses an Flughäfen – von der Sicherheitskontrolle bis zum Erreichen des Flugzeugsitz – simulativ untersucht. Dabei wird die Modellierung, der Algorithmus zur Berechnung der Kontaminationsrisiken sowie die Ergebnisse und Erkenntnisse die aus den Simulationsläufen entwickelt wurden, beschrieben. Es wird gezeigt, wie sich Ansteckungsrisiken, Kapazität, Wartezeiten und Warteplatzbedarf gegenseitig

beeinflussen. Ziel dieses Frameworks soll es sein, den Flughafenbetreibern eine Unterstützungs- und Entscheidungshilfe für die Herausforderungen die eine zukünftige Pandemie mit sich bringt, anzubieten.

2. METHODEN

Für die Entwicklung des Frameworks wurde eine bereits verwendete Passagiersimulation der Sicherheitskontrolle eines europäischen Flughafens unter Restriktionen während der Corona-Pandemie, dem Pandemic Simulation Model (*Pandemic SIM* [3]), genutzt. Weiterhin wurde diese Simulation um typische Reiseabläufe bis zum Erreichen des Sitzplatzes im Flugzeug erweitert.

Zusätzlich wurde in dem Simulationsmodell ein Algorithmus implementiert, der die Ausbreitungswahrscheinlichkeit eines Virus durch Tröpfchen-, Luft- oder Kontaktübertragung, wie beispielsweise bei COVID-19, entlang der verschiedenen Prozesse der Reisekette am Flughafen abbildet. Der Algorithmus berücksichtigt verschiedene Infektionssituationen und Inzidenzwerte und ermöglicht eine Quantifizierung des Infektionsrisikos für jeden einzelnen simulierten Passagier. Durch diesen Algorithmus lassen sich zusammen mit den Kapazitätswerten der Simulation die Wirksamkeit von Maßnahmen wie zum Beispiel dem „Social Distancing“ und deren Folgen untersuchen und mögliche Folgemaßnahmen zur Minimierung des Ansteckungsrisikos ableiten.

Für die Untersuchung und Auswertung wurden drei Simulationsszenarien erstellt. Im ersten ursprünglichen Basisszenario wurden die Ansteckungsrisiken in Bezug zu den Prozesszeiten, wie sie vor der Pandemie üblicherweise Anwendung fanden, gemessen und untersucht. Anschließend wurden die resultierenden Werte mit denen der Pandemie-Szenarien verglichen. In diesen Szenarien wird das „Social Distancing“ mit zwei unterschiedlichen Abständen von einem Meter und eineinhalb Metern simuliert. Das Basisszenario selber wurde in früheren Arbeiten [4] zusammen mit Flughafenmitarbeitern unter den Bedingungen vor der COVID-19 Pandemie empirisch erarbeitet und an einem internationalen mittelgroßen europäischen Flughafen mit 12 Millionen Passagieren pro Jahr (Stand 2019) validiert.

Um das Verhalten der Passagiere am Flughafen, bis zum Betreten und Verlassen der Flugzeugkabine simulativ abzubilden, wurde wie in [5] die Simulationssoftware Anylogic [6] genutzt. Für die Modellierung wird dabei das Social Force Modell angewendet, welches das Verhalten von Personen durch Gleichungen der Newtonschen Mechanik beschreibt [7]. So wird sowohl die individuelle Richtung und Geschwindigkeit der Person vom eigentlichen Ziel sowie Anziehungs- und Abstoßungskräften durch Hindernisse und andere Personen beeinflusst. Ergänzend dazu stellt die Person wiederum eine Kraft dar, die auch auf andere Personen wirken kann.

Es wurde das Verhalten des Social Force Modells in Kombination mit der agentenbasierten Modellierung so angepasst und erweitert, dass es sowohl den allgemeinen als auch den lokalen Bedingungen der Prozesskette des Flughafens entspricht. Auf der Grundlage von Betriebsbeobachtungen entwickelten wir einen Entscheidungsalgorithmus zur Auswahl der

Warteschlangen für die Sicherheitsschleusen, der die Simulation mit dem realen Verhalten der Passagiere in den Warteschlangen und vor den Sicherheitskontrollen abbildet [4].

Die Simulation deckt die gesamte Prozesskette - von der Ankunft eines Passagiers im Terminal - dem Betreten des Wartebereichs vor der Sicherheitskontrolle über die Zutrittskontrolle - das Anstehen und Warten vor der Sicherheitsschleuse - das Vorbereiten und Abgeben des Handgepäcks sowie das Ablegen bestimmter Kleidungsstücke am Eingang dieser Sicherheitsschleuse - das Kontrollverfahren als solches mit einer angemessenen stochastischen Wiederholungsrate, sowohl für den Passagier als auch für das Handgepäck - bis zum Verlassen des Sicherheitskontrollbereichs ab. Zusätzlich wurde der modellierte Reiseprozess vervollständigt, indem die Bewegung der Passagiere durch den gesicherten Bereich des Terminals, vom Verlassen der Sicherheitskontrolle bis zum Erreichen des entsprechenden Gates einbezogen wurde. Zur Vollständigkeit wurde noch die Wartezeit dort, sowie das Boarding, bis alle Passagiere des untersuchten Fluges ihren Platz gefunden und eingenommen haben, modelliert.

Für das Verkehrsszenario wurde ein repräsentativer Betriebstag mit einer Auslastung der Flughafeninfrastruktur von deutlich über 80% und zwei Spitzen mit leichter Überlastung gewählt. Das Verkehrsszenario stellt einen realen Tagesflugplan (16. März 2015) des genannten Flughafens dar, der den Zeitplan der Flüge, die Anzahl der für jeden Flug gebuchten Passagiere, die Öffnungszeiten der einzelnen Sicherheitskontrollspuren und die Bearbeitungszeiten pro Sicherheitsschleuse enthält.

Insgesamt läuft das betrachtete Verkehrsszenario von 1:00 Uhr bis 15:30 Uhr - was die kritischen Betriebszeiten in Bezug auf Kapazität und Arbeitsbelastung für das zu untersuchende Terminal darstellt. Es umfasst insgesamt 4.936 Passagiere, die auf 54 Flüge gebucht sind. Diese Eingabedaten basieren auf Daten des oben beschriebenen europäischen Flughafens. Auch das Layout des Terminals basiert auf diesem realen Flughafen. Die Verteilung der ankommenden Passagiere pro Flug basiert auf Daten aus Passagierbefragungen und historisch beobachteten Mustern. Die Prozessparameter, zum Beispiel die Details der Handgepäckabfertigung, die Geschwindigkeit der Förderbänder und auch die Raten der Nachkontrolle, basieren auf [8].

3. ALGORITHMUS ZUR BERECHNUNG VON ANSTECKUNGSRIKISKEN

Zur Berechnung des Ansteckungsrisikos wird der Algorithmus zur Bestimmung von Corona-Risikobegegnungen angewendet, der sich aus einer Kombination von zu geringem Abstand und der Dauer der Abstandsunterschreitung zusammensetzt, und der in der Corona-Warn-App zur Anwendung kommt [9].

Die Corona-Warn-App ist eine App, herausgegeben vom Robert-Koch Institut (RKI), die helfen soll, Infektionsketten des Corona-Virus in Deutschland nachzuverfolgen und zu unterbrechen. Die App basiert auf Technologien mit einem dezentralisierten Ansatz und informiert Personen, wenn sie mit einer infizierten Person in Kontakt standen. Das

bedeutet, wenn der Nutzer anderen Menschen zu nah kommt, werden über Bluetooth pseudonyme Codes ausgetauscht und in der App hinterlegt. Sobald eine Begegnung der letzten 14 Tage anonym ein positives Testergebnis meldet, wird der Nutzer gewarnt.

Der Datenaustausch zwischen den Nutzern erfolgt über Bluetooth mit dem Exposure Notification Framework (ENF) als Schnittstelle. Das ENF wurde von Apple Inc. und Google [10] als Protokollspezifikation entwickelt, um die digitale Kontaktverfolgung während der COVID-19-Pandemie zu erleichtern. Alle Erfassungsereignisse werden von dem ENF intern erfasst und in sogenannte "Expositionsfenster" aufgeteilt, die alle Fälle darstellen, in denen ein anderes spezifisches Gerät (ohne bekannte Identität) innerhalb eines 30-Minuten-Fensters entdeckt wurde. Jedes dieser Expositionsfenster enthält dabei die folgenden Informationen:

- *infectiousness and report type* - diese Parameter werden von der sendenden App an den jeweiligen Diagnoseschlüssel angehängt.
- *day of the exposure* - dieser Parameter wird von dem ENF auf der Grundlage des Zeitpunkts bestimmt, zu dem der jeweilige Identifizierungsschlüssel (Rolling Proximity Identifier – RPI) empfangen wurde. Zu beachten ist, dass in dem ENF zwar genaue Zeitstempelinformationen vorhanden sind, aber nur der Tag selbst angegeben wird.
- *multiple scan instances* - dieser Parameter steht für Ereignisse, bei denen das andere Gerät während des Scanvorgangs aktiv identifiziert wurde. Eine Scan-Instanz besteht aus "Sekunden seit dem letzten Scan", d. h. wie lange das andere Gerät identifiziert wurde, und Dämpfungsinformationen als Maß für die Entfernung zwischen den Geräten.

Für die Bestimmung, ob der in dem Expositionsfenster des ENF erfasste Kontakt als Risikokontakt zu klassifizieren ist, wird eine Risikokalkulation durchgeführt, die sich aus der Dauer des Kontaktes, der Signaldämpfung zur Distanzberechnung und des Übertragungsrisikos (Transmission Risk Level, TRL) zusammensetzt.

Zur Gewichtungsberechnung eines Signals, als Indikator für die Distanz, gelten folgende Regeln der Signaldämpfung. Zeiten mit einer Dämpfung < 63 dB werden mit 80 % gewichtet. Zeiten mit einer Dämpfung >= 63 dB und <73 dB werden mit 100 % gewichtet. Und Zeiten mit einer Dämpfung >= 73 dB und <79 dB werden mit 10 % gewichtet. Zeiten mit einer Dämpfung > 79 dB werden nicht berücksichtigt.

Zusätzlich zur Signalgewichtung wird noch das Übertragungsrisiko (Transmission Risk Level) als Indikator hinzugefügt, der anhand des Zeitpunkts des Hochladens der Identifizierungsschlüssel und der Angabe des Tages erster Symptome definiert wird. Über die Tabelle in BILD 1 lässt sich das jeweilige Risikolevel bestimmen. Der Nutzer trägt sein positives Testergebnis und den Zeitpunkt der ersten Symptome in die CWA ein und daraus ergibt sich dann für alle erfassten Kontakte das individuelle Übertragungsrisiko.

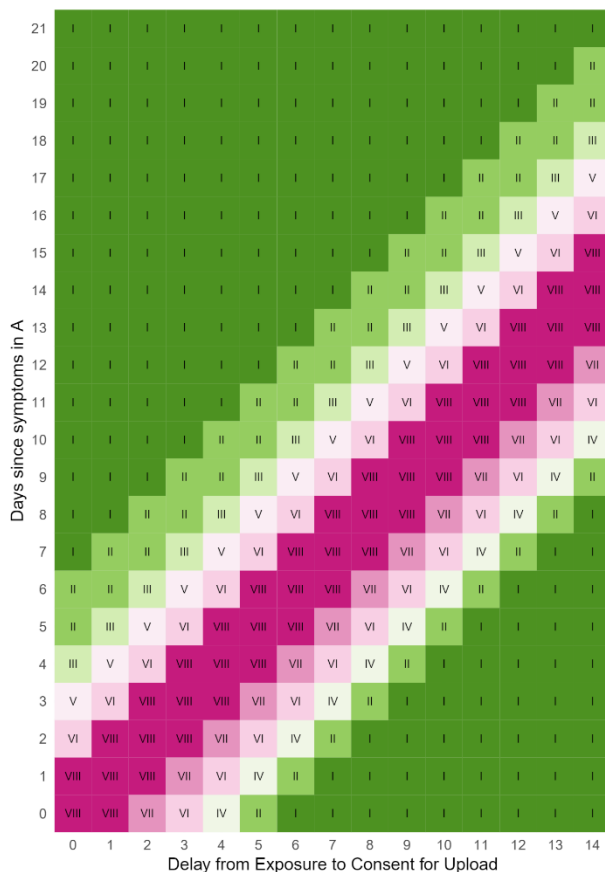


BILD 1. TRL-Bestimmung [11]

Ein Beispiel könnte folgendermaßen beschrieben werden: der Nutzer der App hat 4 Tage nach den ersten Symptomen das positive Ergebnis seines PCR-Tests erhalten und es wird umgehend in der CWA eingetragen. Dann lässt sich bei der Zeile mit der Bezeichnung 4, für die Anzahl der Tage seit den ersten Symptomen, direkt ablesen, welchen TRL die Kontakte an den jeweiligen Tagen der vorhergehenden zwei Wochen hatten. So werden Kontakte, die direkt am aktuellen Tag erfasst wurden, mit einem TRL von 3 bewertet, für den Tag davor ergibt sich ein TRL von 5, bei zwei Tagen davor liegt der TRL bei 6. Für den Zeitraum von 4-6 Tagen bevor das Testergebnis eingetragen wurde, hat das Übertragungsrisiko den höchsten Wert mit 8. Ab dem 7. Tag sinkt der TRL wieder, bis er dann bei 10 Tagen zuvor den Wert 1 als Minimum erreicht. Anhand des TRLs ergibt sich dann ein weiterer Multiplikator, der dann wie in der folgenden Tabelle bestimmt wird.

TRL	1	2	3	4	5	6	7	8
TRV	0.0	0.0	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6

TAB 1. Multiplikator aus TRL

Damit erhält man dann folgende Formel zur Bestimmung des Risikokontaktes in der CWA, wobei $count(K)$ der Anzahl der Begegnungen mit einem Kontakt in einem Expositionsfenster (also innerhalb von 30 Minuten) entspricht.

$$\left(\sum_{i=1}^{count(K)} (t_i * att) \right) * TRV = risk_value$$

$count(K) = \text{Encounter count}$
 $t_i = \text{Encounter duration}$
 $att = \text{attenuation}$
 $TRV = \text{Transmission Risk Level (TRL) to Value (TRV)}$

Als Ergebnis lässt sich dann der *risk_value* berechnen, der aussagt ob es sich bei dieser erfassten Begegnung um einen Risikokontakt handelt oder nicht. Ist dieser Wert größer als 9, war es eine Begegnung mit hohem Risiko. Liegt der Wert zwischen 5 und 9 war es eine Begegnung mit niedrigem Risiko. Ist der Wert kleiner als 5 so gilt der Kontakt als Nicht-Risiko-Begegnung.

Für die Ermittlung wird der gesamte Personenfluss im Terminal und in der Flugzeugkabine simuliert und mit einem Algorithmus für einen pseudonymen Nachrichtenaustausch (sogenannte *code_shares*) erweitert, der auf der Beschreibung des CWA basiert. Die generierten *code_shares* wurden in einer Datenbank im nachfolgenden Listenformat für die weitere Auswertung gesichert:

$[(id,) (sim_time), (pax_ID_1), (milestone_pax_1)$
 $(pax_ID_2), (milestone_pax_1), (pos_pax_1),$
 $(pos_pax_2), (dist), (run_nr), (module)]$

- *id* : Id des Datensatzes
- *sim_time* : Simulationszeit an dem der *code_share* stattfand.
- *pax_ID_1* und *pax_ID_2*: beteiligte Passagiere an dem *code_share*.
- *milestone_pax_1* und *milestone_pax_2* : Prozessmeilenstein nach [12]
- *dist* : Entfernung zwischen den Passagieren, aus der sich die Signaldämpfung ableitet..
- *run_nr* : Nummer des Simulationslaufes
- *module* : Simulationsmodul in dem der *code_share* erzeugt wurde.

Die beschriebene Notation orientiert sich dabei an dem in [13] definierten Format, wobei es für die hier beschriebene Untersuchung erweitert wurde. Zur Vergleichbarkeit der *code_shares* gelten folgende Annahmen:

- Dämpfung/Gewichtung wird über Distanz berücksichtigt.
- TRL wird nicht betrachtet.
- Zum Vergleich wird die Anzahl der *code_shares* gezählt und verglichen.

Dabei ist anzunehmen, dass ein kausaler Zusammenhang zwischen der Anzahl der *code_shares* und der Erkennung von Risikokontakten besteht. Aus weniger erfassten *code_shares* werden weniger Warnungen in der CWA generiert, was wiederum auf weniger Risikokontakte schließen lässt. Das der Transmission Risk Level nicht betrachtet wird, liegt daran, dass ein Tagesszenario von 1:00 bis 15:30 Uhr betrachtet wird. Die Auswirkungen des TRLs sind erst Tage später mit dem Eintragen eines positiven Testergebnisses erfassbar.

4. SIMULATIONSLÄUFE

Zuerst wurde die ursprüngliche Baseline, als "doNothing-scenario" ohne jegliche Einschränkungen oder Pandemieeffekte simuliert, um Wartezeiten und mögliche

Infektionen entlang der Reisekette zu analysieren. Darauf aufbauend wurden die zwei Pandemieszenarien erstellt, um die Fähigkeiten der *Pandemic SiM* durch die Berechnung und den Vergleich von Ansteckungsrisiken sowie Wartezeiten in Abhängigkeit von verschiedenen Einschränkungen und Verfahrensänderungen zu zeigen. In den beiden Szenarien haben wir die in [14] beschriebenen Anforderungen der EASA – wie ebenfalls in [3] – umgesetzt. Beim Boarding wurde eine neue zusätzliche Maßnahme definiert: Die Passagiere erhalten Sauerstoffmasken, sobald sie auf dem ihnen zugewiesenen Platz im Flugzeug Platz genommen haben, um weitere Infektionen während des Fluges zu verhindern. Daher wird der Austausch von Warnmeldungen gestoppt, sobald sich ein Passagier an seinem Platz im Flugzeug befindet. Für die Simulation des Boardings wurde ein Airbus A320 Flugzeug mit einer typischen Konfiguration von 180 Sitzen in 30 Reihen und einer Belegung von 158 Passagieren verwendet. Die beiden Pandemieszenarien unterscheiden sich im „Social Distancing“ von einem Meter beziehungsweise eineinhalb Meter. Nach den Erfahrungen aus früheren Untersuchungen [3] mussten wir die Wartebereiche in großen Teilen des Terminals massiv vergrößern, um die benötigten Kapazitätsanforderungen zu erfüllen.

In der Baseline hat ein Passagier in der Regel eine kreisförmige Fläche mit einem Radius von 0,5 m eingenommen, was zu einem Flächenverbrauch von 0,2 m² pro simulierten Passagier führt. Dies entspricht in etwa einer elliptischen Form mit einem Durchmesser von 0,3 m für die flache Seite und 0,5 m für die breite Seite [15]. Für das erste Pandemieszenario mit einem Meter Abstand verwendeten wir eine Ellipse mit einem reinen Körperradius von 0,25 m plus 0,5 m Zusatzabstand, was der Hälfte des erforderlichen Abstand von 1 m entspricht und für das zweite Pandemieszenario von eineinhalb Meter entsprechend 0,25 m plus 0,75 m Zusatzabstand. Dies ist ausreichend, da zwei Personen, die in der Simulation miteinander interagieren, jeweils von der Hälfte des erforderlichen Abstands umgeben sind, was sich dann zum vollen erforderlichen Mindestabstand addiert.

5. SIMULATIONSERGEBNISSE

Wie zu erwarten war, zeigten die beiden Pandemieszenarien einen deutlich höheren Platzbedarf. So musste der Wartebereich vor der Sicherheitskontrolle deutlich vergrößert werden. Im Pandemieszenario mit einem Meter Abstand wurde die Fläche um etwa 60% von 950 m² auf 1.500 m² und im Pandemieszenario mit eineinhalb Meter Abstand um 90% von 950 m² auf 1.800 m² vergrößert, um die Verkehrsbelastung des jeweiligen Szenarios bewältigen zu können. Die Simulationsergebnisse zeigen deutlich höhere Wartezeiten für die Pandemieszenarien. BILD 2 zeigt einen Vergleich der durchschnittlichen Gesamtprozesszeiten - vom Eintritt in die Warteschlange an der Sicherheitskontrolle bis zum Verlassen des Sicherheitsbereichs - der drei Simulationsläufe, bei denen das ursprüngliche Verkehrsaufkommen in allen Simulationen unverändert gelassen wurde. Die Abbildung zeigt die durchschnittlichen Gesamtergebnisse von 30 Monte-Carlo-Simulationsläufen bei einer recht geringen Standardabweichung von 1,6. Das Basisszenario, dargestellt durch die orangefarbene Linie, zeigt die typischen Wartezeitenspitzen zwischen 5:00 - 7:30 und 9:30 - 11:00 und auch gegen 13:00 Uhr.

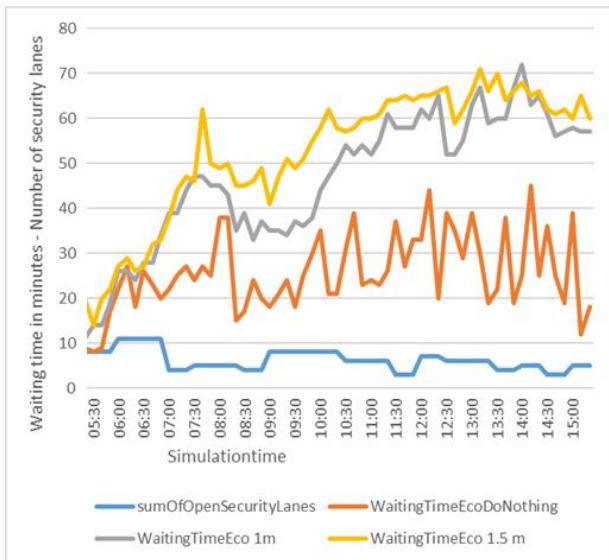


BILD 2. Vergleich der Gesamtprozesszeiten

Dies entspricht ebenfalls den Erfahrungen der Flughafenmitarbeiter im realen Betrieb. Das Pandemieszenario mit einem Meter Abstand ist in Grau und das Pandemieszenario mit eineinhalb Meter Abstand in Gelb dargestellt. Die Graphen stimmen mit den Spitzenwerten überein, aber beide können die zweite Spitze nicht abfangen, so dass die Wartezeiten bis 14:20 Uhr hoch bleiben. Aus Gründen der Vergleichbarkeit haben wir die Anzahl der aktiven Sicherheitsspuren in allen Szenarien auf dem gleichen Niveau gehalten (siehe blaue Linie). Die durchschnittliche Wartezeit der simulierten Passagiere beträgt im Baselineszenario 18,4 Minuten und erhöht sich auf 33,81 Minuten im Pandemieszenario mit einem Meter Abstand und 37,9 Minuten im Pandemieszenario mit eineinhalb Meter Abstand. Die Anzahl der ausgetauschten *code_shares* zur Berechnung des Ansteckungsrisikos beträgt 24.204 im Baselineszenario, 11.879 im Pandemieszenario mit einem Meter Abstand und 13.059 im Pandemieszenario mit eineinhalb Meter Abstand.

Auf den ersten Blick erscheint die Anzahl der *code_shares* relativ hoch, aber bei näherer Betrachtung lässt sich die Anzahl gut erklären. Die Nachrichten werden alle 30 Sekunden ausgetauscht. In unserer Simulation beziehen wir Personen ein, die sich näher beieinander aufhalten dürfen, wie zum Beispiel Familien. Zu diesem Zweck haben wir eine Segmentierung der Passagiere mit realen historischen Daten aus unserem Verkehrsszenario vorgenommen und ein agentenbasiertes Mapping der simulierten Passagiere verwendet. Die Attribute der einzelnen Passagiere werden in unserem Modell individuell zugewiesen. Auf diese Weise werden Ausnahmen von den Entfernungsregeln auf realistischer Basis berücksichtigt. So tauscht z.B. eine vierköpfige Familie, die 40 Minuten an der Sicherheitskontrolle wartet, bereits 320 Nachrichten aus.

Bemerkenswert ist, dass in dem Pandemieszenario mit eineinhalb Meter Abstand mehr Nachrichten ausgetauscht werden als im Pandemieszenario mit einem Meter Abstand. Der Grund dafür sind längere Wartezeiten an der Sicherheitskontrolle im Pandemieszenario mit eineinhalb Meter Abstand was dazu führt, dass über einen längeren Zeitraum *code_shares* erzeugt werden, die aber allesamt

über eine höhere Signaldämpfung verfügen, also aus größerem Abstand zueinander erfasst wurden und damit eine geringere Gewichtung haben, und weniger zur Berechnung des *risk_values* beitragen.

6. ERGEBNISVISUALISIERUNG

Neben der arithmetischen Auswertung bietet die Simulation auch die Möglichkeit zum Exportieren der Läufe. Damit können die gesamten XY-Koordinaten und Richtung der Passagiere sowie die Positionen der *code_shares* über die Zeit hinterlegt werden. Diese Daten lassen sich in eine Visualisierungs- und Animationssoftware wie zum Beispiel Blender [16] importieren, um daraus vulnerable Punkte im Flughafenterminal und im Flugzeug zu identifizieren. Dazu werden aus den Koordinaten und Richtung der Passagiere über die Zeit unter Verwendung von sogenannten Keyframes Vektoren erzeugt, die dann einen Bewegungspfad des Objektes abbilden. Keyframes sind Ankerpunkte in der Animation, so dass Zwischenschritte zwischen den jeweiligen Keyframes interpoliert werden. Durch die in Blender integrierte Skriptsprache Python, lässt sich dieser Import gut realisieren.

```
for item in bpy.data.objects:
    if (id in item.name) :
        counter += 1
        item.select_set(state = True)
        item.location = (x,y,0)
        item.rotation_euler = (0, 0, (rotz)*(-1))

        item.keyframe_insert(data_path="location", frame=int(round(float(time))))
        item.keyframe_insert(data_path="rotation_euler", frame=int(round(float(time))))
```

BILD 3. Codeausschnitt zum Importieren der Passagierpositionen und Richtung

BILD 3 zeigt den Code für das Erzeugen der Keyframes mit *item.keyframe_insert*. Diese Ankerpunkte werden zweimal erstellt. Einmal für die Position (*location*) und weiter für die Ausrichtung des Objektes (*location_euler*). Die Position und die Richtung des Objektes wird über *item.location* und *item.location_euler* gesetzt. Der Import der *code_shares* lässt sich vergleichbar umsetzen. Zur Übersicht der Darstellung ist zu beachten, dass die *code_shares* nur zu der ermittelten Zeitspanne in der Animation dargestellt (gerendert) werden sollen. Die damit temporäre Visualisierung wird ebenfalls über Keyframes und der Verwendung des Parameters *hide_render* gelöst, wie in BILD 4 zu sehen.

```
sender.location = (x_sen, y_sen, 1)

sender.hide_render = True
sender.keyframe_insert(data_path="hide_render", frame=1)
sender.hide_render = False
sender.keyframe_insert(data_path="hide_render", frame=frame_message)
sender.hide_render = True
sender.keyframe_insert(data_path="hide_render", frame=frame_message+300)
sender.name = id+'_sender_'+id_sen
```

BILD 4. Codeausschnitt zur temporären Visualisierung der *code_shares*

Ist der Import abgeschlossen, lässt sich daraus eine dreidimensionale Animation erzeugen, in der sich beliebige Bereiche im Szenario hinsichtlich des Platzbedarfs und der *code_shares* detaillierter betrachten lassen. Zum Schluss richtet man dann noch die virtuelle Kamera auf die zu überprüfenden Bereiche aus, um ein Video des Szenarios zu erzeugen.

BILD 5 zeigt ein Bild eines so erstellten Videos, welches den Zugangsbereich vor der Sicherheitskontrolle aus der Animation. Die einzelnen Passagiere werden in blau

dargestellt und erfasste code_shares leuchten als rote und gelbe Kugel zwischen den Passagieren auf. Es ist gut zu erkennen, wie Passagiere, die in der Warteschlange vor der Zugangskontrolle stehen, gegenseitig code_shares austauschen.

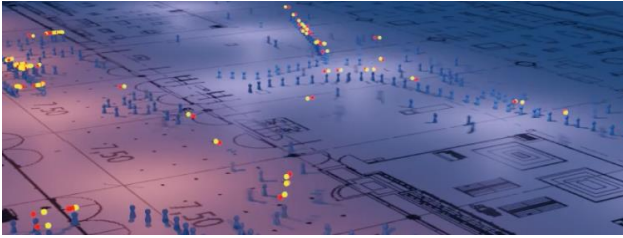


BILD 5. Visualisierung eines Simulationslaufes

7. FAZIT UND AUSBLICK

Mit dieser Ausarbeitung wurde das Potenzial der Verwendung einer miteinander gekoppelten Passagierflusssimulationen als Entscheidungshilfe untersucht. Dazu wurden die Ergebnisse von verschiedenen Simulationsläufen verglichen, mit dem Ziel, die Auswirkungen, die sich aus Änderungen im Passagiermanagement und bei den Pandemiemaßnahmen an Flughäfen ergeben, erkennbar zu machen. Weiterhin wurden die Ansteckungsrisiken in der Reisekette von Flughäfen bewertet. Betrachtet wurde dabei die gesamte Prozesskette am Flughafen, vom Betreten des Terminals, bis zum Erreichen des Sitzplatzes.

Die Simulationsergebnisse zeigen deutlich höhere Wartezeiten für die Pandemieszenarien, da die durchschnittlichen Wartezeiten um bis zu 149% höher sind als im Baselineszenario. Zudem steigt der Platzbedarf an den Wartebereichen im simulierten Modell um bis zu 90%. Die Ergebnisse zeigen auch die Relevanz, die Prozesszeiten so kurz wie möglich zu halten, um das Ansteckungsrisiko und eine potenzielle Infektion zu verringern. Höhere Bearbeitungszeiten hingegen führen zu einer höheren Anfälligkeit, da sich die Wahrscheinlichkeit einer möglichen Infektion erhöht, wenn eine hohe Anzahl von Passagieren gemeinsam in einer Warteschlange stehen, wie auch durch die Animation gezeigt wurde.

So kann es für die Flughäfen und deren Passagiere negative Auswirkungen haben, wenn die Platzverhältnisse eine mögliche Vergrößerung der Wartebereiche nicht zulassen. Ein Verbesserungspotenzial zur Verkürzung der Wartezeiten könnte eine höhere Anzahl geöffneter Sicherheitsschleusen sein, was sich wiederum negativ auf ökonomische Aspekte auswirkt. Ebenfalls denkbar wäre die Nutzung mehrerer Zustiege in das Flugzeug beim Boarding. Wie in [5] gezeigt, verkürzt dies signifikant die Prozess- und Wartezeiten, und verringert damit auch die Infektionswahrscheinlichkeiten.

Ein nächster Schritt in unserer Modellentwicklung besteht darin, Optimierungsverfahren in die Simulationsläufe mit einzubeziehen um ein optimales Ressourcenmanagement durch Abwägen von Wartezeiten und Betriebskosten zu ermitteln. Weiterhin ermöglicht die Animationsvisualisierung einen tieferen analytischen Blick in die Simulationen, um so zu erkennen, wo und wann die meisten Infektionen stattfinden. Auch sollten ankommende

und umsteigende Passagiere in dem Simulationsmodell für weitere Untersuchungen mitberücksichtigt werden.

REFERENZEN

- [1] ICAO – Economic Impacts of COVID-19 on Civil Aviation
<https://www.icao.int/sustainability/Pages/Economic-Impacts-of-COVID-19.aspx> (Stand 8.2023)
- [2] V.S. Balakrishnan – WHO launches global initiative for arboviral diseases. *The Lancet Microbe*, 3, e407. 2022
- [3] A.B. Classen, M. Jung – Pandemic SiM-Impact analysis and improvement potentials for pandemic airport security processes. *Human Interaction and Emerging Technologies 2022: Proceedings of the 8th International Virtual Conference on Human Interaction and Emerging Technologies (IHET 2022)*
- [4] M. Jung, A.B. Classen, F. Rudolph – Creating and validating a microscopic pedestrian simulation to analyze an airport security checkpoint. (Winter Simulation Conference 2015)
- [5] F. Rudolph, F. Reimer, I. Moerland-Masic, T.M. Bock – Modellierung von Personenbewegungen zur Unterstützung des Flugzeugkabinenentwurfsprozesses (DLRK 2021)
- [6] AnyLogic – Software tools for simulation modelling & business solutions
<https://www.anylogic.de/> (Stand 8.2023)
- [7] D. Helbing, P. Molnár - Social Force Model for Pedestrian Dynamics (*Physical Review E* 1995)
- [8] T. Alers, S. Kellner, A.B. Classen – More input-generic data for microscopic airport simulation. 2013 (*Aviation Technology, Integration, and Operations Conference*, 2013)
- [9] Open-Source-Projekt Corona-Warn-App (coronawarn.app)
<https://www.coronawarn.app/de/> (Stand 5.2023)
- [10] Apple&Google. 2023. Exposure Notifications Cryptography Specification
https://blog.google/documents/69/Exposure_Notification_-_Cryptography_Specification_v1.2.1.pdf (Stand 5.2023)
- [11] CWA – Epidemiological Motivation of the Transmission Risk Level
<https://github.com/coronawarn-app/cwa-documentation> (Stand 5.2023)
- [12] F. Rudolph, E. Grunewald, Erik, D. Tremer – Dividing Journeys in Milestones - A passenger (agent) trajectory reference. (*Transport Research Arena* 2022)
- [13] F. Rudolph, F. Reimer, I. Moerland-Masic, T.M. Bock – Simulative Bewertung von Personenbewegungen in der Flugzeugkabine unter Berücksichtigung einer pandemischen Lage. (DLRK 2022)
- [14] EASA – Aviation Health Safety Protocol. Operational Guidelines for the Management of Air Passengers and Aviation Personnel in Relation to the COVID-19 Pandemic. 2021. Köln.
- [15] U, Weidmann – Transporttechnik der Fußgänger: transporttechnische Eigenschaften des Fußgängerverkehrs, Literaturswertung. (IVT Schriftenreihe, 90/1993)
- [16] blender.org – Free and Open 3D Creation Software <https://www.blender.org/> (Stand 8.2023)