

Efficient Airplane Boarding

als
Semesterarbeit
am
Departement Informatik
der ETH Zürich

von
Andreas Westhoff
von Luzern/LU
im 8. Semester
Matrikelnummer: 98-914-237

Studienadresse
Hirzenbachstrasse 77/14
8051 Zürich
(079 318 32 56)

Zürich, 9. September 2002

1 Zusammenfassung

Da Flugzeuge nur Profit bringen, wenn sie in der Luft sind, wird versucht die Zeit, welche ein Flugzeug am Boden verbringt, möglichst kurz zu halten. Um den Abfertigungsprozess eines Flugzeugs am Boden zu minimieren, muss der hemmende Boardingprozess, also das Einsteigen der Passagiere ins Flugzeug, optimiert werden.

Diese Arbeit befasst sich konkret mit diesem Boardingprozess. Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, die in der Praxis zur Anwendung kommenden Boarding-Strategien zu analysieren und wenn möglich, sinnvolle Verbesserungen oder neue Strategien zu entwickeln.

Um dieses Ziel zu erreichen, wird zuerst ein theoretisches Modell erstellt und anschliessend werden anhand einer Simulation, welche das Modell versucht umzusetzen, alte und neue Strategien getestet und bewertet.

2 Einleitung

2.1 Ausgangslage und Rahmenbedingungen

Unter „Airplane Turn Time“ versteht man die Zeit, die ein Flugzeug am Boden verbringt. In dieser Zeit wird das Flugzeug abgefertigt und wieder startklar gemacht. Flugzeuge bringen schlussendlich nur in der Luft Profit und deshalb gilt es, die „Airplane Turn Time“ möglichst gering zu halten.

Für viele Fluggesellschaften ist nicht wie vielleicht angenommen das Ent- und Verladen des Gepäcks oder das Auftanken der Flugzeuge die „bremsende“ Grösse, sondern das Passagierhandling, sprich der Boardingvorgang.

2.2 Ziel dieser Arbeit

Diese Semesterarbeit befasst sich nun mit dem „reinen“ Einsteigen der Passagiere ins Flugzeug. Das Ziel ist es, anhand einer Simulation die in der Praxis angewandten Boardingverfahren zu vergleichen und neue, wenn möglich effizientere Verfahren abzuleiten.

2.3 Abgrenzung der Arbeit

Diese Arbeit begrenzt sich grundsätzlich auf die Modellierung und Simulation des Boardingvorgangs und deren Strategien.

Weiter werden die verschiedenen Boardingstrategien bezüglich Effizienz und praktischer Umsetzbarkeit miteinander verglichen.

2.4 Gliederung der Arbeit

Die Gliederung dieser Arbeit entspricht weitestgehend dem Vorgehen bei der Erarbeitung des Themas und des Zieles. Es wurde versucht einen logischen und intuitiven Ablauf einzuhalten und vom Allgemeinen langsam auf das Konkrete zu schliessen.

In Kapitel 3 „Boardingstrategien in der Praxis“ werden von Fluggesellschaften angewandte Boardingstrategien aufgezeigt.

Kapitel 4 „Modellierung des Problems „Airplane Boarding““ setzt sich konkret mit dem Problem auseinander und versucht es in eine Form zu bringen, mit der sich arbeiten lässt.

Im darauffolgenden Kapitel 5 „Effizienz und Kompliziertheit einer Strategie“ wird versucht, die wichtigsten Kriterien welche eine Boardingstrategie erfüllen muss, abzustecken.

In Kapitel 6 „Theoretische Betrachtung des Boardingprozesses“ wird versucht, Grenzwerte für den Boardingprozess in der modellierten Umgebung festzulegen, welche anschliessend als Testwerte für die Simulation dienen.

Kapitel 7 „Die Simulation“ beschreibt kurz in allgemeiner Weise das Simulationsprogramm und die implementierten Strategien.

Im nachfolgenden Kapitel 8 „Resultate der Simulation“ werden die Simulationsdurchläufe besprochen und daraus Schlussfolgerungen gezogen.

Die Arbeit wird mit dem Kapitel 9 „Mögliche Weiterführungen der Arbeit und Ausbau der Simulation“, welches Gedanken zu einer möglichen Weiterbearbeitung des Themas enthält und einer kurzen Schlussbemerkung, abgeschlossen.

3 Boardingstrategien in der Praxis

Um an Informationen über Boardingstrategien, welche in der Praxis zur Anwendung kommen, zu gelangen, wurden gegen 20 Fluggesellschaften per E-Mail befragt. Dabei stellte sich heraus, dass nicht die Fluggesellschaften selbst für den Boardingprozess zuständig sind, sondern dass es für die Flugzeugabfertigung am Boden

spezialisierte Firmen gibt. *Jet Aviation* ist eine solche Firma.

Nach einer Anfrage bei *Jet Aviation* wurde ich einen Tag auf den *Flughafen Zürich Kloten* eingeladen, um den ganzen Ablauf einer Flugzeugabfertigung am Boden „live“ miterleben zu können.

Bei diesem Besuch stellte sich heraus, dass es drei „Standardverfahren“ des Boardingprozesses gibt.

- 1) Das Flugzeug wird für ein bestimmtes Zeitintervall geöffnet. In dieser Zeit haben alle Passagiere die Gelegenheit an Board zugehen. Diese Strategie ist jedoch veraltet und wird kaum noch angewandt.
- 2) Die Passagiere die früher „einchecken“, haben beim Boarding auch das Recht früher einzusteigen. Dabei ist zu beachten, dass die Sitzplätze nicht nummeriert sind und der Passagier freie Wahl hat, wo er sich hinsetzen will. Damit das ganze Prozedere einigermaßen geordnet abläuft, werden die Passagier in Gruppen à 30 Personen eingeteilt, das heisst, die ersten 30 am Check-In sind auch die ersten im Flugzeug.
- 3) Das Flugzeug wird reihenweise von hinten nach vorne aufgefüllt. Dabei werden die Passagiere in drei Gruppen eingeteilt, welche dann nacheinander aufgerufen werden, damit der Rückstau der Passagiere unter Kontrolle gehalten werden kann. Dieses Verfahren wird in der Praxis am meisten angewandt.

4 Modellierung des Problems „Airplane Boarding“

Um Boardingstrategien gegeneinander abschätzen und simulieren zu können, braucht es eine passende Modellierung des Vorganges. Als erstes gilt es die Umgebung, sprich das Flugzeug zu modellieren. Weiter müssen die Passagiere, konkret ihr Verhalten, also die Aktionen welche ausgeführt werden können, modelliert werden.

4.1 Ziele

Anhand der modellierten Passagiere und Umgebung sollen dann die verschiedenen Strategien untereinander verglichen werden. Da es schwierig ist die Zeit für verschiedene Vorgänge abzuschätzen, soll die Modellierung wie auch die daraus folgenden Berechnungen und Simulationen Werte liefern, anhand derer

eine relative Beziehung zwischen den Strategien abgeleitet werden kann.

4.2 Umgebung

Die Umgebung wird durch das Flugzeug definiert. Es gibt Türen, Gänge, Gepäckablagen und Sitzplätze. Die Umgebung wie auch die Zeit werden diskret dargestellt.

Konkret bedeutet das, dass die ganze Umgebung (Gänge und Sitzplätze) durch quadratische Felder repräsentiert wird. In einem Feld darf sich höchstens ein Passagier befinden.

Im Fall der Zeit bedeutet dies, dass eine Zeiteinheit definiert wird. In jeder Zeiteinheit kommen alle Passagiere einmal zum Zug. Bei jedem Zug kann eine Aktion ausgeführt werden. Was unter einer Aktion verstanden wird, ist im folgenden Kapitel 4.3 „Passagiere“ erklärt.

Die Flugzeugtüre befindet sich vorne beim Flugzeug.

Die Gepäckablagen befinden sich immer am Ort des zugehörigen Sitzplatzes, obwohl in der Realität die Gepäckablagen beliebig benutzt werden können.

Weiter sind die Sitzplätze fix den Passagieren zugeordnet und es besteht keine Möglichkeit, dass die Passagiere die Plätze untereinander tauschen.

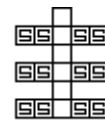


Bild 1: Beispiel für ein Flugzeug mit drei Reihen à 4 Sitzen, auf jeder Seite zwei: Oben Mitte befindet sich die Türe, S steht für die Sitzplätze, leere Felder repräsentieren den Gang.

Kurz zusammengefasst:

- Diskrete Umgebung
- Diskrete Zeit
- Türe vorne
- Gepäckablage zu Sitz zugeordnet

4.3 Passagiere

Um das Verhalten der Passagiere im Allgemeinen zu vereinfachen, werden diese als Einzelpersonen betrachtet. Das heisst, es gibt keine Zugehörigkeit unter den Passagieren, also keine Familien oder Reisegruppen.

Weiter wird bei den Passagieren von gleichen körperlichen Voraussetzungen ausgegangen, beispielsweise haben alle Passagiere das gleiche Gehtempo.

Ein Passagier wird konkret durch Aktionen beziehungsweise Funktionen definiert. Als die wichtigsten Aktionen, die ein Passagier in der modellierten Welt des Boardings in der Lage sein sollte, auszuführen, wurden die folgenden ausgewählt: „Gehen“, „Warten“, „Gepäckverstauen“, „Hinsetzen“, „Platztauschen“. Die Aktionen sind zusätzlich mit einer Ausführzeit belegt. Die Ausführzeit gibt an, wie viele Zeiteinheiten ein Passagier braucht, um eine Aktion komplett durchzuführen. Wenn beispielsweise die Ausführzeit der Aktion Gehen 3 Einheiten beträgt, so braucht der Passagier 3 Zeiteinheiten um ein Feld vorzurücken. Im folgenden werden diese fünf Aktionen noch etwas genauer, auch im Bezug auf die modellierte Umgebung, beschrieben:

- *Gehen*: Der Gang im Flugzeug besteht aus aneinandergereihten Feldern. Das Gehen ist so definiert, dass der Passagier nur nach vorne gehen kann. Der Passagier kann so lange von der Aktion „Gehen“ Gebrauch machen, wie er noch nicht seine Sitzreihe erreicht hat.
- *Warten*: Die Aktion „Warten“ ist die Negation der Aktion „Gehen“. Solange das Feld vor einem Passagier besetzt ist, muss er warten bis das Feld vor ihm frei ist. Überholen oder „vorbeizwängeln“ geht nicht.
- *Gepäckverstauen*: Wenn ein Passagier die Position vor seiner Sitzreihe inne hat, so kann er sein Gepäck verstauen.
- *Hinsetzen*: Wenn der Passagier sich auf dem Feld vor seiner Sitzreihe befindet und er sein Gepäck verstaute hat, so kann er sich hinsetzen. Er kann sich setzen, egal welcher Sitz in der Reihe ihm gehört, Hauptsache kein Platz zwischen ihm und seinem Sitz ist belegt.
- *Platztauschen*: Wenn sich ein Passagier hinsetzen will und zwischen ihm und seinem Sitz befindet sich schon mindestens ein sitzender Passagier, so beginnt die Aktion „Platztauschen“. Solange die Aktion „Platztauschen“ ausgeführt wird, blockieren diese Passagiere das Feld im Gang vor der Sitzreihe. Dies aus dem Grund, weil sich der eine Passagier erheben muss, um dem Anderen Platz zu schaffen. Wenn der Passagier, der sich setzen will, mehrere Passagiere überwinden muss um an seinen Platz zu gelangen, so verlängert sich die

Blockade um die Anzahl der Platztauschungen.

4.4 Algorithmen

Um nun das Boarding in der modellierten Umgebung mit den modellierten Passagieren durchzuführen, benötigt man einen bestimmten Ablauf. Dieser Ablauf umfasst zwei Algorithmen, den „Passagier-Algorithmus“ und den „Boarding-Algorithmus“. Diese beiden Algorithmen werden im folgenden allgemein dargestellt und erläutert.

„Passagier-Algorithmus“:

- 1) Gehen
- 2) Gepäckverstauen
- 3) Hinsetzen
- 4) Platztauschen
- 5) Warten

Die Aktionen werden nach der Prioritätsliste abgearbeitet und wenn möglich ausgeführt. Pro Zeiteinheit kann höchstens eine Aktion oder ein Teil einer Aktion ausgeführt werden. Beim nächsten Takt, sofern die Aktion in der vorangegangenen Zeiteinheit beendet wurde, wird wieder oben in der Liste mit der Abarbeitung begonnen. Wenn keine Aktion ausgeführt werden kann, wird gewartet.

„Boarding-Algorithmus“:

- 1) Auswahl der „Airplane Boarding Strategie“
- 2) Aufruf der Strategie
- 3) Einreihung der Passagiere vor der Flugzeugsür soweit wie möglich gemäss der Strategie und der Rest zufällig
- 4) Eintritt des ersten Passagiers ins Flugzeug
- 5) Abarbeitung des „Passagier-Algorithmuses“ für jeden einzelnen Passagier, bis alle sitzen

Der „Boarding-Algorithmus“ ruft also für jeden Passagier immer wieder den „Passagier-Algorithmus“ auf, bis alle Fluggäste im Flugzeug Platz genommen haben.

5 Effizienz und Kompliziertheit einer Strategie

Nach der Modellierung des Problems stellt sich nun die Frage, was in diesem Fall unter

Effizienz und unter Kompliziertheit einer Strategie zu verstehen ist. In den folgenden zwei Unterkapiteln werden verschiedene Ansätze aufgezeigt.

5.1 Effizienz einer Strategie

Für das Verständnis der Effizienz einer Strategie gibt es verschiedene Definitionsansätze, je nach Blickwinkel. Diese werden nun kurz aufgelistet.

Effizienz ist die/der kürzest mögliche

- Zeit des gesamten Boardingvorganges (vom Öffnen des Einstieges bis zum Zeitpunkt wo alle Passagiere sitzen). Diese Zeit wird später für die Schlussfolgerungen aus den Simulationsresultaten benutzt.
- durchschnittliche Wartezeit eines Passagiers (vom Hinsetzen bis zum Abflug).
- durchschnittliche Zeit, die ein Passagier im Flugzeuggang verbringt (vom Einsteigen bis zum Hinsetzen).
- durchschnittliche Weg der ein Passagier im Gang zurücklegt (vom Einsteig bis zum Zeitpunkt des Hinsetzens).
- durchschnittliche Zeit, die ein Sitz leer steht (vom Einstieg bis alle sitzen).
- durchschnittliche Aufenthaltszeit eines Passagiers im Flugzeug (vom Einstieg bis zum Abflug).

Bemerkung zu den Ansätzen:

- Der letzte erwähnte Ansatz ergibt sich aus der Addition der Ansätze 2 und 3.
- Ansatz 3 und 5 ergeben die gleiche Zeit.

5.2 Kompliziertheit einer Strategie

Wenn man sich Gedanken über die Definition der Kompliziertheit einer Boardingstrategie macht, stellt sich die Frage, ob es Sinn macht, alle Passagiere auf einmal aufzurufen oder jeden Passagier einzeln? Um die Kompliziertheit besser fassen zu können, wird eine einfache Formel angewandt.

- P: Anzahl Passagiere
 T: Anzahl Teilmengen aus der Menge aller Passagiere
 M: Anzahl der Passagiere in einer Teilmenge

Aus der Frage, wie P und M zueinander im Verhältnis stehen sollen, damit eine Strategie

als „vernünftig“¹ angeschaut werden kann, ergibt sich die Formel:

| |
|------------------|
| $P / M = T$ (F1) |
|------------------|

- Wenn $T = 1 \rightarrow M = P$:
Alle Passagiere werden zusammen aufgerufen, das heisst, es entsteht eine zufällige Reihenfolge des Passagiereinstiegs.
- Wenn $T = P \rightarrow M = 1$:
Jeder Passagier wird einzeln aufgerufen. Da die Passagiere so vor dem Einstieg sortiert werden können, ist dies sicher die effizienteste Einstiegsreihenfolge, wenn das „Sortieren“ ausser Acht gelassen wird.

Angenommen, das Sortieren der Passagiere vor dem Einstieg kann ausser Acht gelassen werden, so kann ein „Best-Case“ und ein „Worst-Case“ Szenario abgeleitet werden. Natürlich können diese beiden Situation auch im Fall $M = P$ ohne vorherige Sortierung entstehen, denn schliesslich sind diese beiden Reihenfolgen gleichwahrscheinlich wie jede beliebige andere. Die Herleitung des „Best- und Worst-Case“ folgt im nachfolgenden Kapitel.

6 Theoretische Betrachtung des Boardingprozesses

6.1 Parameter

Um die Formeln für den „Best-“, und den „Worst-Case“ herzuleiten, müssen zuerst verschiedene Variablen und Parameter festgelegt werden. Das Flugzeug sieht wie in Bild 1 dargestellt aus: Die Türe ist vorne vor der ersten Reihe und es führt ein Gang durch das ganze Flugzeug nach hinten. Auf beiden Seiten des Ganges befinden sich gleich viele Sitzplätze.

Flugzeugparameter:²

- R: Anzahl Sitzreihen
 n: Anzahl Sitze pro Reihe
 L: Längster Weg im Flugzeug, entspricht Ganglänge³

¹ Was in diesem Fall unter vernünftig zu verstehen ist, wird versucht, anhand der später durchgeführten Simulationen, herzuleiten

² Die Flugzeugparameter sind fix, je nach Typ des Flugzeugs.

K: Kürzester Weg im Flugzeug⁴

Zeitparameter/Aktionsdauer:⁵

V: Zeit die beim Gepäckverstauen und beim Hinsetzen vergeht

P: Zeit die beim Platztuschen vergeht

G: Zeit die beim Gehen vergeht

T: Resultat: Boarding-Zeit

6.2 „Best-Case“

Im Fall des „Best-Case“ soll T (Boarding-Zeit) minimal sein. Das kann erreicht werden, wenn so viele Passagiere wie möglich ihre jeweiligen Aktionen parallel ausführen und keine unnötigen Platztauschungen entstehen.

Dies kann erreicht werden, wenn pro Reihe im Flugzeug pro Durchgang immer zwei Personen ins Flugzeug geschickt werden. Die erste Person steht dann, wenn die eigene Sitzreihe erreicht ist, vor der Reihe und die zweite im Feld zwischen zwei Sitzreihen. Die Passagiere müssen so eintreten, dass das Flugzeug von hinten her aufgefüllt wird. Die Personen der selben Reihe müssen hintereinander eintreten, und zwar so, dass kein Tauschen der Plätze nötig ist. Wenn dann der ganze Gang mit Passagieren gefüllt ist, verstauen und setzen sich die Passagiere, die sich vor der Sitzreihe befinden, alle gemeinsam, also parallel. Es sind immer genau so viele Passagiere wie Reihen gemeinsam am Gepäckverstauen und sich Setzen. Das ergibt eine Zeit für das Verstauen des Gepäcks und für das Hinsetzen aller Passagiere von $V * n$.

Weiter muss nun noch die Zeit berechnet werden, bis der Gang das erste mal gefüllt wird. Das ergibt eine Zeit von $G * L$. Wenn nun die ersten Passagiere ihr Gepäck verstaut haben, dann rücken die Passagiere die hinter demjenigen gestanden sind, der sich soeben gesetzt hat, nach. Das ergibt noch einmal $1 * G$ für diese Passagiere. Wenn dies geschieht, so kann der erste Passagier der nachfolgenden Gruppe ein Feld ins Flugzeug treten, also brauchen die nachfolgenden Gruppen je nur noch $G * (L - 1)$ an Zeit, um zu ihrer Sitzreihe zu gelangen.

Diese Gedanken alle zusammengefasst, ergibt die Formel

$$G * L + V + G + V + \left(\frac{n}{2} - 1\right) * (G * (L - 1) + V + G + V) =$$

$$\boxed{\left(\frac{n}{2}\right) * (G * L + 2 * V) + G} \quad (F2)$$

für den „Best-Case“.

6.3 „Worst-Case“

Die Überlegungen, um den „Worst-Case“ zu erreichen, folgen dem gleichen Muster wie die Gedanken zum „Best-Case“, nur dass sie gegenteilig sind. Denn um den „Worst-Case“ zu erhalten, müssen die Passagiere möglichst wenig Aktionen gemeinsam ausführen, möglichst oft die Plätze tauschen und zusätzlich möglichst lange den Gang blockieren, respektive die Zeit mit Warten verbringen.

Damit dieses „Ziel“ erreicht wird, muss das Flugzeug von vorne nach hinten aufgefüllt werden und immer der Passagier zuerst in die Sitzreihe sitzen, der am meisten Platztauschungen auslöst.

Die Besetzung der ersten Reihe unterscheidet sich ein wenig von der Besetzung der restlichen Reihen. Dies aus dem Grund, da der erste Passagier einer Reihe im Fall der ersten Reihe $G * K$ Zeit braucht, bis er die Reihe erreicht. Bei den nachfolgenden Reihen muss nur die Zeit für den zusätzlichen Weg vom Wartepunkt bis zum Erreichen der eigenen Reihe miteinbezogen werden. Diese beträgt $G * (K + 1)$. Der Weg zwischen zwei Reihen beträgt genau K , aber der Passagier der weiter nach hinten muss, kommt zuerst noch an der Reihe des Passagiers vorbei, hinter dem er warten musste, das ergibt also die $K + 1$.

Alle Passagiere einer Reihe, die nicht als erste ihre Reihe erreichen, fügen der Gesamtzeit nur $G * (K - 1)$, also genau G zu, da ihr bis anhin zurückgelegter Weg schon in der Gesamtzeit enthalten ist.

Dann kommt für jeden Passagier noch die Zeit V für das Gepäckverstauen und das Hinsetzen dazu.

Weiter kommen die Zeiten für die Platztauschungen dazu. Damit wir auch den „Worst-Case“ erhalten, sind dies pro Sitzreihe also die maximale Anzahl an Platztauschungen. Die maximale Anzahl an Platztauschungen beträgt zweimal den Erwartungswert, bzw. zweimal die durchschnittliche Anzahl der Platztauschungen

³ Gemäss dem in Kapitel 4 erstellten Flugzeugmodell entspricht die Ganglänge immer einem Vielfachen von zwei, genauer $2R$.

⁴ In unserem Modell entspricht dies genau 2.

⁵ Die Aktionsdauer kann frei festgelegt werden, je nachdem wie die Eigenschaften der Passagiere gesehen werden.

pro Reihe, also $2 * E[n]$, wobei $E[n] = \sum_{i=1}^{n/2-1} i$.

Diesen Erwartungswert bekommt man aus den Wahrscheinlichkeiten, welche zeigen wie häufig die verschiedenen Platztauschungssituationen in einer Reihe auftreten.⁶

Daraus ergibt sich die Formel

$$G * K + (R - 1) * G * (K + 1) + R * (n - 1) * G + n * R * V + n * R * E[n] * P \quad (F3)$$

für den „Worst-Case“.

6.4 Schlussfolgerung

Der „Best-Case“ scheint auf den ersten Blick recht gut, aber die Zeit die gewonnen wird, geht beim Einreihen der Passagiere in die richtige Reihenfolge wieder verloren. In der Realität macht es keinen Sinn, jeden Passagier einzeln aufzurufen, denn dabei gehen zuviel Zeit und Nerven verloren.

Es gilt also, die Wahrscheinlichkeit, dass der „Worst-Case“ auftritt, zu minimieren. Dies kann erreicht werden, in dem das dritte Standardverfahren, nämlich die Passagiere in Gruppen, welche einem Flugzeubereich entsprechen, aufzuteilen, um so das Eintreten des „Worst-Cases“ zu verhindern. Nun stellt sich die Frage, wie gross ist eine optimale Gruppe oder wie viele Gruppen sind optimal. Diese Fragen werden in den nächsten Kapiteln und anhand einer Simulation versucht zu beantworten.

7 Die Simulation

Um verschiedene Strategien auszuprobieren und sie untereinander vergleichen zu können, wurde eine Simulation geschrieben. Die Simulation wurde in Java programmiert. Es wurde versucht das in Kapitel 4 „Modellierung des Problems „Airplane Boarding““ aufgestellt

⁶ Beispiel: Sitzplatznummer wie folgt: 12_34 (links vom Gang Platz 1 und 2, rechts Platz 3 und 4). $P[12] = \frac{1}{2} \rightarrow$ WSK, dass Passagier von Sitzplatz 1 vor Passagier von Sitzplatz 2 ankommt. $P[21] = P[34] = P[43] = \frac{1}{2}$. Daraus folgen die WSK für Platztauschungen (PT): Kein PT: $P[12\&43] = \frac{1}{4}$; Ein PT: $P[12\&34] + P[21\&43] = \frac{1}{2}$; Zwei PT: $P[21\&34] = \frac{1}{4}$. Daraus folgt der Erwartungswert für die Anzahl Platztauschungen für eine Sitzreihe à 4 Sitzen durch: $E[n] = 0 * \frac{1}{4} + 1 * \frac{1}{2} + 2 * \frac{1}{4} = 1$.

Modell umzusetzen. Wie die Simulation aufgebaut ist und welche Strategien implementiert wurden, wird in den folgenden Kapiteln erläutert.

7.1 Aufbau der Simulation

Wie oben erwähnt, wurde versucht, das in Kapitel 4 „Modellierung des Problems „Airplane Boarding““ aufgestellte Modell umzusetzen, das bedeutet konkret, dass das Simulationsprogramm aus zwei Algorithmen besteht.

Die Klasse *PassagierVerhalten* repräsentiert den „Passagier-Algorithmus“ welcher von der Klasse *Simulator*, der dem „Boarding-Algorithmus“ entspricht, aufgerufen wird.

Die Passagiere werden durch ein Variablenset repräsentiert. Je nach Zustand und Aktion, die der Passagier momentan durchführt, wird dieses Variablenset entsprechend gesetzt. Die verwendeten Variablen werden in der Klasse *Passagier* zusammengefasst.

Alles was mit der Zeit im Zusammenhang steht, Aktionszeiten und Gesamtzeit des Vorgangs, wird in der Klasse *Timer* gespeichert.

Die restlichen Klassen mit dem Namensbeginn *Flugzeug* oder *Strategie* stellen die verschiedenen Flugzeugtypen und Strategien dar. Welche Strategien implementiert wurden, wird im nachfolgenden Kapitel näher erklärt.

Wer genaure Informationen zum gesamten Programm sucht, findet diese im Quellcode und den eingefügten Kommentaren.

7.2 Implementierte Strategien

Es wurden insgesamt 11 verschiedene Strategien implementiert, wobei die Strategien 7 bis 11 im engeren Zusammenhang mit dem Standardverfahren 3 stehen. Die Strategien werden nun kurz erklärt:

Strategie 1: Die Strategie 1 entspricht dem in Kapitel 6.2 „Best-Case“ hergeleiteten Fall, also dem „Best-Case“.

Strategie 2: Auch dieser Fall wurde oben schon besprochen. Die Strategie entspricht dem „Worst-Case“.

Strategie 3: Die Strategie 3 entspricht einem der Standardverfahren aus Kapitel 3 „Boardingstrategien in der Praxis“, nämlich dem Verfahren 1. Die Passagiere steigen in einer zufälligen Reihenfolge alle zusammen ins Flugzeug.

Strategie 4: Diese Strategie entspricht dem Standardverfahren 2. Die Passagiere steigen ein und können dann ihren Platz frei wählen. Die Strategie wurde so implementiert, dass den beliebteren Plätzen (bspw. Fensterplätze) eine höhere Auswahlwahrscheinlichkeit zugeordnet wurde.

Strategie 5: Bei der Strategie 5 entspricht die Einstiegsreihenfolge auch der Platznummerierung, der erste Passagier hat den ersten Platz, der zweite den zweiten, der dritte den dritten, usw..

Strategie 6: Diese Strategie ist der Versuch, das Flugzeug von hinten nach vorne reihenweise aufzufüllen. Dabei kommen die Passagier in der richtigen Reihenfolge ins Flugzeug, das heisst, es sind keine zeitraubenden Platz-tauschungen nötig.

Strategie 7: Diese Strategie ist vom Standardverfahren 3 abgeleitet. Das Flugzeug wird in Teilbereiche von hinten nach vorne aufgeteilt und die Passagiere des hintersten Teils werden zuerst ins Flugzeug gelassen. Die Strategie 7 teilt das Flugzeug in zwei Bereiche, in einen hinteren und einen vorderen Teil.

Strategie 8: Funktioniert wie Strategie 7, nur wird das Flugzeug in 3 Teile aufgeteilt. Dies entspricht genau dem Standardverfahren 3.

Strategie 9: Wie Strategie 7, nur wird das Flugzeug in 4 Teile getrennt.

Strategie 10: Wie Strategie 7, nur wird das Flugzeug in 5 Teile getrennt.

Strategie 11: Wie Strategie 7, nur wird das Flugzeug in 6 Teile getrennt.

Die Strategien 1 und 2 („Best- und Worst-Case“) wurden vorwiegend gebraucht, um das Simulationsprogramm zu testen und um auch einen Bezugswert für die anderen Strategien zu erhalten.

7.3 Begründung der Auswahl der Strategien

Zuerst ein paar Erläuterungen zur Auswahl der Strategien, bevor im nächsten Kapitel die Resultate aufgeführt und besprochen werden.

Die Strategien 1, 2, 5 und 6 machen in der Realität keinen grossen Sinn, da nicht davon ausgegangen werden kann, dass die Passagiere vor dem Einstieg ins Flugzeug „vorsortiert“ werden. Das richtige Einreihen würde zuviel Zeit in Anspruch nehmen. Diese Strategien wurden aus Vergleichszwecken, aus spielerischen Gründen und zu Testzwecken implementiert.

Wirklich interessant sind die restlichen Strategien. Zuerst wurden die Standardverfahren implementiert, um herauszufinden, wie diese zueinander stehen. Weiter wurde versucht, das in der Praxis am häufigsten angewandte Standardverfahren 3 mit wenig Aufwand zu verbessern. Ob das gelungen ist, sehen wir im nächsten Kapitel.

8 Resultate der Simulation

8.1 Resultat der Strategien

Die Strategien wurden für die zwei Flugzeugtypen mit vier verschiedenen Zeitsets von Aktionszeiten laufen gelassen. Für jedes Zeitset wurden für jede Strategie 100 Durchläufe ausgeführt und dann die Durchschnittszeit berechnet. Die Idee hinter verschiedenen Zeitsets besteht darin, auch mögliche Abhängigkeiten der Strategien mit verschiedenen Aktionszeiten zu erkennen.

Die vier Sets sehen wie folgt aus (Gehen, Verpacken, Platztausch):

- Set 1: 1, 10, 4
- Set 2: 1, 1, 1
- Set 3: 4, 10, 1
- Set 4: 1, 1, 4

Set 1 soll die "Realität" widerspiegeln. Das „Gehen“ ist die Aktion die am schnellsten vor sich geht, das „Gepäckverstauen“ dauert sicher am längsten und das „Plätzetauschen“ dauert auch seine Zeit.

Das Set 2 soll dazu dienen, die Strategien zu beurteilen, wenn alle Aktionen gleich schnell ablaufen.

Die anderen zwei Sets sind „Spielereien“ um vielleicht interessante Effekte zu beobachten.

Hier nun die Resultate:

| Flugzeugtyp 2_2: | | | | |
|------------------|--------|--------|--------|--------|
| Rang: | Set 1: | Set 2: | Set 3: | Set 4: |
| 1. | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2. | 7+8 | 9+10 | 8 | 9 |
| 3. | - | - | 7+9 | 10 |
| 4. | 4 | 8 | - | 8 |
| 5. | 9 | 7 | 10 | 11 |
| 6. | 3 | 11 | 11 | 7 |
| 7. | 10 | 4 | 3 | 4 |
| 8. | 11 | 3 | 4 | 6 |
| 9. | 6 | 6 | 6 | 3 |
| 10. | 5 | 5 | 5 | 5 |
| 11. | 2 | 2 | 2 | 2 |

Tabelle 1: Rangliste der Strategien für jedes Set für den Flugzeugtypen mit 4 Sitzen pro Reihe.

| Flugzeugtyp 2_2, Standardverfahren: | | | | |
|-------------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| Rang: | Set 1: | Set 2: | Set 3: | Set 4: |
| 1. | 8 | 8 | 8 | 8 |
| 2. | 4 | 4 | 3 | 4 |
| 3. | 3 | 3 | 4 | 3 |

Tabelle 2: Rangliste der Standardverfahren in jedem Set für den Flugzeugtypen mit 4 Sitzen pro Reihe. Das Standardverfahren 1 entspricht der Strategie 3, das Verfahren 2 der Strategie 4 und das dritte Standardverfahren der Strategie 8.

| Flugzeugtyp 2_2, Top 3: | | | | |
|-------------------------|--------|--------|--------|--------|
| Rang: | Set 1: | Set 2: | Set 3: | Set 4: |
| 1. | 7+8 | 9+10 | 8 | 9 |
| 2. | 4 | 8 | 7+9 | 10 |
| 3. | - | - | - | 8 |

Tabelle 3: Die Top 3 der „relevanten“ Strategien (nicht relevant sind die Strategien 1, 2, 5 und 6).

| Flugzeugtyp 3_3: | | | | |
|------------------|--------|--------|--------|--------|
| Rang: | Set 1: | Set 2: | Set 3: | Set 4: |
| 1. | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2. | 4 | 7 | 7 | 7 |
| 3. | 3 | 8 | 8 | 4 |
| 4. | 7 | 9 | 4 | 8 |
| 5. | 8 | 4 | 3 | 9 |
| 6. | 9 | 3+10 | 9 | 3 |
| 7. | 10 | - | 10 | 10 |
| 8. | 11 | 11 | 11 | 11 |
| 9. | 6 | 6 | 6 | 6 |
| 10. | 5 | 5 | 5 | 5 |
| 11. | 2 | 2 | 2 | 2 |

Tabelle 4: Rangliste der Strategien für jedes Set für den Flugzeugtypen mit 6 Sitzen pro Reihe.

| Flugzeugtyp 3_3, Standardverfahren: | | | | |
|-------------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| Rang: | Set 1: | Set 2: | Set 3: | Set 4: |
| 1. | 4 | 8 | 8 | 4 |
| 2. | 3 | 4 | 4 | 8 |
| 3. | 8 | 3 | 3 | 3 |

Tabelle 5: Rangliste der Standardverfahren in jedem Set für den Flugzeugtypen mit 6 Sitzen pro Reihe. Das Standardverfahren 1 entspricht der Strategie 3, das Verfahren 2 der Strategie 4 und das dritte Standardverfahren der Strategie 8.

| Flugzeugtyp 3_3, Top 3: | | | | |
|-------------------------|--------|--------|--------|--------|
| Rang: | Set 1: | Set 2: | Set 3: | Set 4: |
| 1. | 4 | 7 | 7 | 7 |
| 2. | 3 | 8 | 8 | 4 |
| 3. | 7 | 9 | 4 | 8 |

Tabelle 6: Die Top 3 der „relevanten“ Strategien (nicht relevant sind die Strategien 1, 2, 5 und 6).

Hier wurde nur immer die Gesamtzeit eines Boardingvorgangs betrachtet. Für die Fluggesellschaften ist diese Zeit wichtig und nicht, wie lange ein Passagier im Gang gestanden ist oder wie lange er in seinem Sitz warten musste, bis der Flug startete.

Die konkreten Zahlen zu den Strategien, welche die Simulation ergab, finden sich im Beiblatt „Simulationsresultate“.

8.2 Schlussfolgerungen aus den Resultaten

Zuerst wollen wir die in der Praxis angewandten Verfahren vergleichen.

| Flugzeugtyp 2_2, Standardverfahren: | | | |
|-------------------------------------|------------|---------|---------|
| Rang: | Strategie: | Ø-Rang: | Ø-Zeit: |
| 1. | 8 | 1 | 303.5 |
| 2. | 4 | 2.25 | 330.25 |
| 3. | 3 | 2.75 | 338.5 |

Tabelle 7: Rangliste der Standardverfahren über alle Sets für den Flugzeugtypen mit 4 Sitzen pro Reihe.

Flugzeugtyp 3_3, Standardverfahren:

| Rang: | Strategie: | Ø-Rang: | Ø-Zeit: |
|-------|------------|---------|---------|
| 1. | 4 | 1.5 | 480.75 |
| 2. | 8 | 1.75 | 491.5 |
| 3. | 3 | 2.75 | 487.25 |

Tabelle 8: Rangliste der Standardverfahren über alle Sets für den Flugzeugtypen mit 6 Sitzen pro Reihe.

Standardverfahren unabhängig von Flugzeugtyp:

| Rang: | Strategie: | Ø-Rang: | Ø-Zeit: |
|-------|------------|---------|---------|
| 1. | 8 | 1.375 | 392.125 |
| 2. | 4 | 1.875 | 397.5 |
| 3. | 3 | 2.75 | 412.875 |

Tabelle 9: Rangliste der Standardverfahren über alle Sets und Flugzeugtypen.

Quantitativer Vergleich

Flugzeugtyp 2_2, Standardverfahren:

| Strategie: | Ø-Zeit: | bzgl. Best-Case: | bzgl. BV: |
|------------|---------|------------------|-----------|
| 1 | 167.75 | | |
| 8 | 303.5 | +80.92% | |
| 4 | 330.25 | +96.87% | +8.81% |
| 3 | 338.5 | +101.79% | +11.53% |

Flugzeugtyp 3_3, Standardverfahren:

| Strategie: | Ø-Zeit: | bzgl. Best-Case: | bzgl. BV: |
|------------|---------|------------------|-----------|
| 1 | 250.75 | | |
| 4 | 480.75 | +91.72% | |
| 8 | 491.5 | +96.01% | +2.24% |
| 3 | 487.25 | +94.32% | +1.35% |

Standardverfahren unabhängig von Flugzeugtyp:

| Strategie: | Ø-Zeit: | bzgl. Best-Case: | bzgl. BV: |
|------------|---------|------------------|-----------|
| 1 | 209.25 | | |
| 8 | 392.125 | +87.40% | |
| 4 | 397.5 | +89.96% | +1.37% |
| 3 | 412.875 | +97.31% | +5.29% |

Tabelle 10: Prozentualer Vergleich der Standardverfahren bzgl. des Best-Case und bzgl. des besten Verfahrens (BV).

Beim Flugzeug mit weniger Sitzen ist die Strategie 8 effizienter als die Strategie 4, was hingegen beim grösseren Flugzeug umgekehrt ist. Wenn nun das Resultat über beide Flugzeugtypen betrachtet wird, so ist die Strategie 8, also Standardverfahren 3 am effizientesten.

Wenn die Durchschnittszeiten betrachtet werden, sieht man, dass die Boarding-Strategien zeitlich sehr nah beieinander liegen. Es kommt also nicht unbedingt drauf an, welche Strategie gewählt wird, denn wenn die Passagiere zufällig einsteigen, dauert es nur etwa 5% länger, als wenn sie nach dem Standardverfahren 3 einsteigen.

Vergleichen wir nun die Top 3 Resultate:

Flugzeugtyp 2_2, Top 3:

| Rang: | Strategie: | # der Erscheinungen: | Ø-Zeit: |
|-------|------------|----------------------|-----------|
| 1. | 8 | 4 | 303.5 |
| 2. | 9 | 3 | 307.25 |
| 3. | 7+10 | 2 | 306.5+312 |
| 5. | 4 | 1 | 330.25 |

Tabelle 11: Rangliste der Top 3 über alle Sets für den Flugzeugtypen mit 4 Sitzen pro Reihe.

Flugzeugtyp 3_3, Top 3:

| Rang: | Strategie: | # der Erscheinungen: | Ø-Zeit: |
|-------|------------|----------------------|---------|
| 1. | 7 | 4 | 478.25 |
| 2. | 4 | 3 | 480.75 |
| 3. | 8 | 3 | 491.25 |
| 4. | 3 | 1 | 487.25 |
| 5. | 9 | 1 | 506.75 |

Tabelle 12: Rangliste der Top 3 über alle Sets für den Flugzeugtypen mit 6 Sitzen pro Reihe.

Top 3 unabhängig von Flugzeugtyp:

| Rang: | Strategie: | # der Erscheinungen: | Ø-Zeit: |
|-------|------------|----------------------|-----------|
| 1. | 8 | 7 | 392.125 |
| 2. | 7 | 6 | 392.375 |
| 3. | 4+9 | 4 | 397.5+407 |
| 5. | 10 | 2 | 419.625 |
| 6. | 3 | 1 | 412.825 |

Tabelle 13: Rangliste der Top 3 über alle Sets und Flugzeugtypen.

Quantitativer Vergleich

Flugzeugtyp 2_2, Top 3:

| Strategie: | Ø-Zeit: | bzgl. Best-Case: | bzgl. BV: |
|------------|---------|------------------|-----------|
| 1 | 167.75 | | |
| 8 | 303.5 | +80.92% | |
| 9 | 307.25 | +83.16% | +1.24% |
| 7 | 306.5 | +82.71% | +0.91% |
| 10 | 312 | +85.99% | +2.80% |
| 4 | 330.25 | +96.87% | +8.81% |

Flugzeugtyp 3_3, Top 3:

| Strategie: | Ø-Zeit: | bzgl. Best-Case: | bzgl. BV: |
|------------|---------|------------------|-----------|
| 1 | 250.75 | | |
| 7 | 478.25 | +90.73% | |
| 4 | 480.75 | +91.71% | +0.52% |
| 8 | 491.25 | +96.01% | +2.71% |
| 3 | 487.25 | +94.32% | +1.88% |
| 9 | 506.75 | +102.09% | +5.96% |

Top 3 unabhängig von Flugzeugtyp:

| Strategie: | Ø-Zeit: | bzgl. Best-Case: | bzgl. BV: |
|------------|---------|------------------|-----------|
| 1 | 209.25 | | |
| 8 | 392.125 | +87.40% | |
| 7 | 392.375 | +87.51% | +0.06% |
| 4 | 397.5 | +89.96% | +1.37% |
| 9 | 407 | +94.50% | +3.79% |
| 10 | 419.625 | +100.54% | +7.01% |
| 3 | 412.825 | +97.31% | +5.28% |

Tabelle 14: Prozentualer Vergleich der besten Verfahren bzgl. des Best-Case und bzgl. des besten Verfahrens (BV).

Auch hier ist die Strategie 8 nicht bei beiden Flugzeugtypen top, aber im Ganzen gesehen, ist die Strategie 8 die beste.

So gesehen, nutzen die Fluggesellschaften bereits die effizienteste Methode für den Boardingvorgang.

Wenn aber nur Set 1, welches der „Realität“ am nächsten kommen soll, betrachtet wird, so kann gesagt werden, dass es reichen würde, das Flugzeug in zwei Bereiche anstatt in drei aufzuteilen.

Wenn auch hier die Durchschnittszeiten betrachtet werden, stellt man fest, dass fünf Strategien (3,4,7,8,9) sich um höchstens 5% unterscheiden.

Kurz zusammengefasst kann also gesagt werden, dass die drei Standardverfahren alle irgendwo in den Top 3 erscheinen und das davon die Strategie 8 die beste ist. Die Strategie 8 ist sogar besser als die neuen zusätzlich getesteten Verfahren. Wobei man vielleicht die Aufteilung des Flugzeugs in Teilbereiche je nach Flugzeugtyp etwas variieren könnte (Variation zwischen Strategie 7 und 8).

Weiter sieht man, dass das Herumspielen mit den Aktionszeiten bezüglich des „Rankings“ keine grossen Änderungen mit sich bringt. Die Strategien verschieben sich höchstens um 2 bis 3 Positionen.

9 Mögliche Weiterführungen der Arbeit und Ausbau der Simulation

Vorweg muss gesagt werden, dass bei der Erstellung des Simulationsprogramms nicht darauf geachtet wurde, es in solch einer Weise zu implementieren, dass es in Zukunft leicht erweiterbar ist.

Das Modell der Simulation, wie es bis jetzt besteht, ist sehr einfach und viele Faktoren wurden vernachlässigt. Nachfolgend sind einige Gedanken aufgeführt, was als nächstes zum Modell hinzugefügt werden könnte.

9.1 Passagiere

Die Simulation geht bis anhin von stereotypen Passagieren aus, die alle die gleichen Eigenschaften haben.

Da in Wahrheit nicht alle Menschen gleich sind, wäre eine sinnvolle Erweiterung der Simulation, eine sinnvolle Verteilung verschiedener „Menschentypen“ (verschiedene Ausführungszeiten), welche das Fortbewegungsmittel Flugzeug gebrauchen, zu modellieren.

Weiter wurde in der Simulation jeder Passagier unabhängig zu den anderen Passagieren betrachtet. In der Realität jedoch gibt es sehr oft Reisegemeinschaften in Form von Familien, Reisegruppen, Geschäftsleuten und so weiter. Diese Eigenschaft der Zusammengehörigkeit einzubinden, wird die Simulation sicher auf interessante Weise beeinflussen.

Auch haben die Passagiere bezüglich Grösse und Gewicht unterschiedliche Gepäcke, was die Verstauezeit in positiver oder negativer Weise beeinflusst.

Aber nicht nur die Eigenschaften der Passagiere können erweitert werden, sondern auch die Flugzeuge.

9.2 Flugzeuge

Bis anhin wurden nur Flugzeuge mit einer Fronttüre und einem Gang betrachtet. Die Simulation kann durch weitere Flugzeugtypen erweitert werden. Ein Flugzeug kann beispielsweise zusätzlich eine zweite Türe haben, so dass das Flugzeug auch von hinten her aufgefüllt werden kann. Weiter gibt es auch Flugzeugtypen, welche zwei Gänge besitzen.

Diese verschiedenen Flugzeugvarianten können schon mit der vorhandenen Simulation, durch variieren der Parameter und anschliessendem verrechnen der Resultate, erreicht werden. Beispielsweise kann ein Flugzeug mit Türen im vorderen und hinteren Bereich simuliert werden, indem man die halbe Ganglänge des Flugzeuges nimmt. Denn das Auffüllen der beiden Bereiche sollte in etwa gleich lange dauern.

In der Praxis wird der Einstieg der Passagiere nur immer über die Fronttür zugelassen. Wenn aber das Flugzeug über beide Türen, hinten und vorne, aufgefüllt wird, so wäre die Boardingzeit drastisch zu verringern.

10 Schlussbemerkung

So wie es aussieht, sind die in der Praxis angewandten Verfahren bezüglich der Effizienz und der Kompliziertheit recht gut.

Natürlich ist, wenn nur das reine Einsteigen der Passagiere ins Flugzeug betrachtet wird, der „Best-Case“ um einiges effizienter als alle anderen Strategien, jedoch kann nicht davon ausgegangen werden, dass es

möglich ist, die Passagiere in der „richtigen“ Reihenfolge ins Flugzeug zu bekommen.

Die einzig reale Möglichkeit die ganze Angelegenheit effizienter zu machen, scheint die zu sein, an den Menschenverstand der Fluggäste zu appellieren.

Simulationsresultate*

| | Strategie1 | Strategie2 | Strategie3 | Strategie4 | Strategie5 | Strategie6 | Strategie7 | Strategie8 | Strategie9 | Strategie10 | Strategie11 |
|--|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------|-------------|
| Set 1: 1,10,4 | | | | | | | | | | | |
| F2_2: | | | | | | | | | | | |
| Gesamt-Durchschnittszeit: | 125 | 1159 | 363 | 346 | 1079 | 543 | 341 | 341 | 353 | 365 | 375 |
| Durchschnittszeit pro Passagier im Sitz: | 37 | 573 | 178 | 164 | 534 | 246 | 156 | 153 | 156 | 159 | 162 |
| Durchschnittszeit pro Passagier im Gang: | 38 | 205 | 61 | 59 | 191 | 145 | 77 | 84 | 90 | 95 | 100 |
| F3_3: | | | | | | | | | | | |
| Gesamt-Durchschnittszeit: | 187 | 1959 | 534 | 527 | 1719 | 1023 | 549 | 579 | 616 | 651 | 688 |
| Durchschnittszeit pro Passagier im Sitz: | 68 | 973 | 270 | 264 | 856 | 486 | 264 | 272 | 289 | 305 | 317 |
| Durchschnittszeit pro Passagier im Gang: | 38 | 260 | 64 | 65 | 227 | 181 | 86 | 98 | 106 | 114 | 123 |
| Set 2: 1,1,1 | | | | | | | | | | | |
| F2_2: | | | | | | | | | | | |
| Gesamt-Durchschnittszeit: | 89 | 319 | 155 | 152 | 299 | 165 | 136 | 135 | 134 | 134 | 138 |
| Durchschnittszeit pro Passagier im Sitz: | 23 | 157 | 72 | 70 | 147 | 61 | 54 | 51 | 48 | 48 | 49 |
| Durchschnittszeit pro Passagier im Gang: | 25 | 57 | 28 | 28 | 54 | 44 | 31 | 32 | 34 | 34 | 36 |
| F3_3: | | | | | | | | | | | |
| Gesamt-Durchschnittszeit: | 133 | 519 | 219 | 217 | 459 | 285 | 207 | 211 | 214 | 219 | 227 |
| Durchschnittszeit pro Passagier im Sitz: | 45 | 257 | 106 | 104 | 228 | 121 | 91 | 90 | 89 | 91 | 94 |
| Durchschnittszeit pro Passagier im Gang: | 25 | 70 | 29 | 29 | 61 | 51 | 33 | 35 | 37 | 38 | 40 |
| Set 3: 4,10,1 | | | | | | | | | | | |
| F2_2: | | | | | | | | | | | |
| Gesamt-Durchschnittszeit: | 368 | 1396 | 659 | 661 | 1376 | 786 | 592 | 586 | 592 | 598 | 610 |
| Durchschnittszeit pro Passagier im Sitz: | 98 | 688 | 308 | 309 | 678 | 307 | 237 | 227 | 224 | 221 | 225 |
| Durchschnittszeit pro Passagier im Gang: | 99 | 245 | 114 | 114 | 242 | 206 | 131 | 138 | 144 | 149 | 155 |
| F3_3: | | | | | | | | | | | |
| Gesamt-Durchschnittszeit: | 550 | 2076 | 923 | 914 | 2016 | 1386 | 896 | 910 | 928 | 963 | 993 |
| Durchschnittszeit pro Passagier im Sitz: | 109 | 1028 | 438 | 435 | 999 | 607 | 390 | 388 | 391 | 404 | 416 |
| Durchschnittszeit pro Passagier im Gang: | 99 | 272 | 116 | 115 | 264 | 241 | 137 | 148 | 154 | 163 | 170 |
| Set 4: 1,1,1 | | | | | | | | | | | |
| F2_2: | | | | | | | | | | | |
| Gesamt-Durchschnittszeit: | 89 | 439 | 177 | 162 | 359 | 165 | 157 | 152 | 150 | 151 | 156 |
| Durchschnittszeit pro Passagier im Sitz: | 23 | 217 | 86 | 76 | 178 | 61 | 66 | 62 | 58 | 57 | 60 |
| Durchschnittszeit pro Passagier im Gang: | 25 | 78 | 31 | 29 | 64 | 44 | 35 | 36 | 38 | 39 | 40 |
| F3_3: | | | | | | | | | | | |
| Gesamt-Durchschnittszeit: | 133 | 879 | 273 | 263 | 639 | 285 | 261 | 266 | 269 | 276 | 284 |
| Durchschnittszeit pro Passagier im Sitz: | 45 | 438 | 143 | 135 | 320 | 121 | 124 | 123 | 121 | 123 | 126 |
| Durchschnittszeit pro Passagier im Gang: | 25 | 116 | 34 | 33 | 85 | 51 | 40 | 43 | 46 | 47 | 49 |

* 100 Durchläufe pro Strategie