

Modellierung und Simulation von Museumsführungen

Diplomarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades
Diplom-Informatiker (Dipl. Inf.)

eingereicht von: Moritz W. Lemm

geboren am:

geboren in:

Gutachter: Prof. Dr. sc. nat. Joachim Fischer
Prof. Dr. rer. nat. Jens-Peter Redlich

eingereicht am: verteidigt am:

Ich kann freilich nicht sagen, ob es besser werden wird, wenn es anders wird; aber soviel kann ich sagen: es muss anders werden, wenn es gut werden soll.

- Otto Leixner von Grünberg (1847 – 1907)

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	5
1.1. Museumsführungen	5
1.2. Motivation	8
1.3. Problemstellung	9
1.4. Aufbau der Arbeit	10
2. Analyse des derzeitigen Lösungsansatzes	11
2.1. Praxis in der Gedenkstätte Berlin-Hohenschönhausen	11
2.2. Vor- und Nachteile der derzeitigen Praxis	15
3. Computergestützte Evaluation von Führungsangeboten	18
3.1. Vorüberlegungen	18
3.2. Anforderungen	19
3.3. Eingesetzte Werkzeuge	20
3.4. Modellierung von Museen	20
3.5. Spezialisierung für Gedenkstätten	24
3.6. Modellierung der Gedenkstätte Berlin-Hohenschönhausen	27
3.7. Implementation	35
4. Evaluation und Experimente am Fallbeispiel	43
4.1. Feldstudie	43
4.2. Simulationsexperimente	46
4.2.1. Experiment: Validierung des Simulators	49
4.2.2. Experiment: Validierung des Curriculums	51
4.2.3. Experiment: Belastungstest	53
4.2.4. Experiment: Auslastungsreihe für Slots pro Stunde	53
4.2.5. Experiment: Auslastungsreihe für Teilnehmer pro Stunde	55
4.2.6. Zusammenfassung & Auswertung	56
5. Fazit	58
A. Annotierte Grundrisse des Gedenkstättengeländes	59
B. Aktivitätsdiagramme Standardtour	63
C. Quellcode und Dokumentation	72
Literatur	73

Abbildungsverzeichnis

1.	Jährliche Gesamtbesucherzahl der Gedenkstätte	8
2.	Monatliche Gesamtbesucherzahl der Gedenkstätte	9
3.	Luftbild des Gedenkstättenengeländes	11
4.	Besucheranteil Schüler	14
5.	Zellengänge	15
6.	Besucher im Zellentrakt	16
7.	UML-Klassendiagramm des Simulatorframeworks	22
8.	Motivation Verteilerknoten	26
9.	UML-Klassendiagramm für Gedenkstätten	28
10.	Informaler Tourgraph	29
11.	Messen der Kantenlängen mit Google Earth	30
12.	Ausschnitt Grundriss Gefängnisneubau	31
13.	Aktivitätsdiagramm Standardführung	33
14.	Visualisierung des Tourgraphen	37
15.	Ausschnitt eines exportierten Tourgraphen	41
16.	Ausschnitt einer Traceausgabe	42
17.	Ausgefüllter Datenbogen.	43
18.	Histogramme Gruppenankunftszeiten und Bearbeitungszeiten . .	47
19.	Streudiagramm durchschnittliche Laufgeschwindigkeiten	48
20.	Gegenüberstellung von Messung und Simulation	50
21.	Simulationsergebnisse der Standardtour	52
22.	Verklebungen in Abhängigkeit von Slots pro Stunde	54
23.	Reibung in Abhängigkeit von Slots pro Stunde	55
24.	Verklebungsrates in Abhängigkeit von der Teilnehmerzahl pro Slot	56
25.	Reibung in Abhängigkeit von der Teilnehmerzahl pro Slot	57
26.	Grundriss des Kellergefängnisses	60
27.	Grundriss Erdgeschoss Neubau	61
28.	Grundriss 1. OG Neubau	62
29.	Aktivitätsdiagramm Standardtour	64
30.	Aktivitätsdiagramm Einführung	65
31.	Aktivitätsdiagramm U-Boot Hauptzugang	66
32.	Aktivitätsdiagramm U-Boot Schleusenzugang	67
33.	Aktivitätsdiagramm Gebäudewechsel	68
34.	Aktivitätsdiagramm Neubau Erdgeschoss	69
35.	Aktivitätsdiagramm Neubau 1. OG	70
36.	Aktivitätsdiagramm Freigangzellen	71

Zusammenfassung

In Museen entsteht oft das Problem, dass sich Gruppen während ihrer geführten Rundgänge gegenseitig den Weg versperren, was zu einem gestörten Betriebsablauf durch Wartezeiten und Rückstaus führen kann. Das Thema dieser Arbeit ist die Erstellung eines Modellierungs- und Simulationswerkzeugs, mit dem der Führungsbetrieb in Museen nachgebildet und die Erprobung von Führungsangeboten per Simulation durchgeführt werden kann. Ich verwende die Simulationssprache SLX zum Implementieren eines Simulatorframeworks, mit dem sich Museen modellieren und der tägliche Führungsbetrieb simulieren lassen soll. Dabei gehe ich auf Herausforderungen und Designentscheidungen ein und demonstriere den Einsatz durch die Nachbildung eines konkreten Museums. Es wird eine Feldstudie durchgeführt und erfolgreich getestet, ob der Simulator grundsätzlich in der Lage ist, zuverlässige Ergebnisse zu liefern.

1. Einleitung

Der Lehrstuhl für Systemanalyse von Prof. Joachim Fischer am Institut für Informatik der Humboldt-Universität zu Berlin beschäftigt sich unter anderem mit der Modellierung und Simulation zeitdiskreter, zeitkontinuierlicher und gemischter Systeme. In den Lehrveranstaltungen wird ein Bezug der vorgestellten Modellierungs- und Simulationswerkzeuge zu konkreten Anwendungen hergestellt. Diese Werkzeuge bieten sich an, um auf eine aktuelle Problemstellung in Museen angewendet zu werden. Diese haben bei zunehmendem Besucheraufkommen das Problem, ihr Führungsangebot anzupassen, ohne dabei den reibungsfreien Betriebsablauf zu gefährden. Ziel dieser Arbeit ist es, ein Simulatorframework zu schaffen, mit dem Simulationsmodelle erstellt werden können, die die Auswirkungen von Führungsangeboten untersuchen.

1.1. Museumsführungen

Ein Museum ist eine öffentliche Einrichtung, in der zu Bildungszwecken Exponate ausgestellt werden. Um einen geregelten Besucherverkehr zu ermöglichen, werden bestimmte Strukturen benötigt, die daher in den meisten Museen vorhanden sind. So gehören z. B. Anmeldeschalter, Wartebereiche und ein Museumsshop üblicherweise zur Grundausstattung. Besucher interagieren während ihres Besuches mit diesen Elementen. So beginnt der Besuch mit der Anmeldung und dem Kauf einer Eintrittskarte am Anmeldeschalter, gefolgt vom Ablaufen mehrerer Exponate und endet mit dem Passieren eines Souvenirshops, der üblicherweise in der unmittelbaren Nähe zum Ausgang platziert ist.

Museen können entweder von den Besuchern selbstständig erkundet oder in Form eines geführten Rundgangs besucht werden. Im Rahmen des Rundgangs werden die Besucher von Besucherreferenten in Gruppen durch das Gelände

geführt und erfahren dabei Fakten und Zusammenhänge zum Ort und den ausgestellten Exponaten. Dabei hat der Besucherreferent zwar gewisse Freiräume zur Gestaltung der Führung, muss sich aber in der Regel an einige Vorgaben halten. So können die zu vermittelnden Kerninhalte, die Route und die Dauer der Führung in einem Tourplan festgelegt sein. Die während der Führung angelaufenen Stationen und Passagen sind geteilte Ressourcen und können meist nur von einer Gruppe gleichzeitig belegt werden. Das ist insbesondere für Wegkreuzungen und schmale Durchgänge problematisch, die zwar keine Stationen im eigentlichen Sinne sind, aber mehrmals während einer Führung passiert werden müssen, um bestimmte Orte auf dem Gelände erreichen zu können. Dabei kann es leicht zu gegenseitigen Behinderungen kommen, auch wenn die betroffenen Gruppen ihre jeweiligen Führungen zu unterschiedlichen Zeiten begonnen haben. Ein Museum kann verschiedene Führungsvarianten anbieten, die sich unter anderem durch Route, Dauer und vermittelte Inhalte unterscheiden können.

Um einen reibungsfreien Besuchsablauf zu ermöglichen, ist vorab eine Planungsphase notwendig und daher folglich auch ein Anmeldeprozess für die Besuchergruppen. Durch die Zuteilung von Terminen können die Referenteneinsätze vorab festgelegt und organisatorische Richtwerte eingehalten werden. Alle buchbaren Termine sind in der Regel in einem Buchungsraster strukturiert, das vorgibt, zu welchen Uhrzeiten und mit welchen Rahmenbedingungen, wie z. B. der maximal zulässigen Teilnehmerzahl, Termine vergeben werden können. Alle getätigten Buchungen für einen Öffnungstag sind mitsamt Details, wie z. B. Teilnehmerzahl, Dauer und Starttermin, in einer Buchungstabelle zusammengefasst.

Das Führungsangebot eines Museums ist die Gesamtheit aus allen angebotenen Führungen und allen möglichen Terminen eines Buchungsrasters. Es ist die Menge aller möglichen Belegungen der verfügbaren Terminslots mit allen möglichen Führungsvarianten. Die Realisierbarkeit eines Führungsangebots bezieht sich auf die Verzögerungen von Besucherbewegungen auf dem Gelände und bezeichnet die Einhaltung eines akzeptablen Grenzwerts dieser Verzögerungen. Dabei obliegt die Beurteilung, ab wann Verzögerungen den reibungslosen Betriebsablauf gefährden, allein dem Anwender.

Begriffe im Rahmen dieser Arbeit

Station Stationen repräsentieren genaue räumliche Positionen. Sie definieren und unterscheiden sich durch ihre Aufnahmekapazitäten von Personen oder Gruppen sowie der erwarteten, benötigten Verweildauer dort. Stationen sind eine Generalisierung. Spezialisierungen von Stationen, die sich durch zusätzliche Eigenschaften auszeichnen, sind z. B. Exponate, Schalter oder Seminarräume.

Tourgraph Ein Tourgraph ist die Menge von Stationen sowie aller bestehenden begehbaren Verbindungen zwischen diesen. Das Modell eines Museums kann aus einem oder mehreren Tourgraphen bestehen.

Tourplan Ein Tourplan ist eine Untermenge eines Tourgraphen und beschreibt einen Kantenzug bzw. eine Menge von möglichen Kantenzügen durch den Tourgraphen. Er repräsentiert die Strecke, die bei einem geführten Rundgang abgelaufen wird und kann Verzweigungen beinhalten. Diese erlauben den Besuchern ein dynamisches Verhalten, da sie situationsabhängig wählen können, welche Abzweigung genommen wird. Dabei ist es nicht der Besucher, sondern der Tourplan selbst, in dem die Regeln für dieses dynamische Verhalten definiert und ausgestaltet werden.

Besucher Besucher sind alle Entitäten, die sich durch den Tourgraphen bewegen und Stationen belegen können. Das können Einzelbesucher, Gruppen oder andere vom Anwender spezifizierte Sonderfälle sein.

Gruppe Eine Gruppe ist eine Zusammenfassung von Einzelbesuchern und wird geschlossen von einem Besucherreferenten anhand eines Tourplans durch das Museum geführt. Sie ist eine Spezialisierung von Besucher.

Besucherreferent Ein Besucherreferent führt eine Gruppe anhand eines Tourplans durch ein Museum. Im realen System hat er Weisungsbefugnisse und steuert den Ablauf der Führung, bzw. trifft alle dynamischen Entscheidungen, die während der Führung entstehen.

Buchung Eine Buchung ist ein verbindlicher Vertrag über eine geplante Museumsführung. In einer Buchung werden alle Informationen hinterlegt, die für die Planung und Durchführung einer Museumsführung nötig sind. Hierzu gehören unter anderem die Gruppengröße, der Startzeitpunkt und das gewählte Produkt, respektive der gewählte Tourplan.

Buchungstabelle Eine Buchungstabelle ist die Menge aller Buchungen für einen gegebenen Zeitraum. Typischerweise werden die Buchungen für einen Öffnungstag in einer Buchungstabelle zusammengefasst.

Buchungsraster Die Menge aller möglichen Termine, also eine „leere“ Buchungstabelle, wird als Buchungsraster bezeichnet, um Verwechslungen mit einer „belegten“ Buchungstabelle vorzubeugen. Die unbelegten Positionen in diesem Buchungsraster heißen Slots.

Führungsangebot Das Führungsangebot eines Museums ist die Kombination aller vorhandenen Tourgraphen, Tourpläne und Buchungsraster. Es ist also die Menge aller möglichen Belegungen der verfügbaren Terminslots des Buchungsrasters mit allen möglichen Führungsvarianten, die Teilmengen der vorgegebenen Tourgraphen sind.

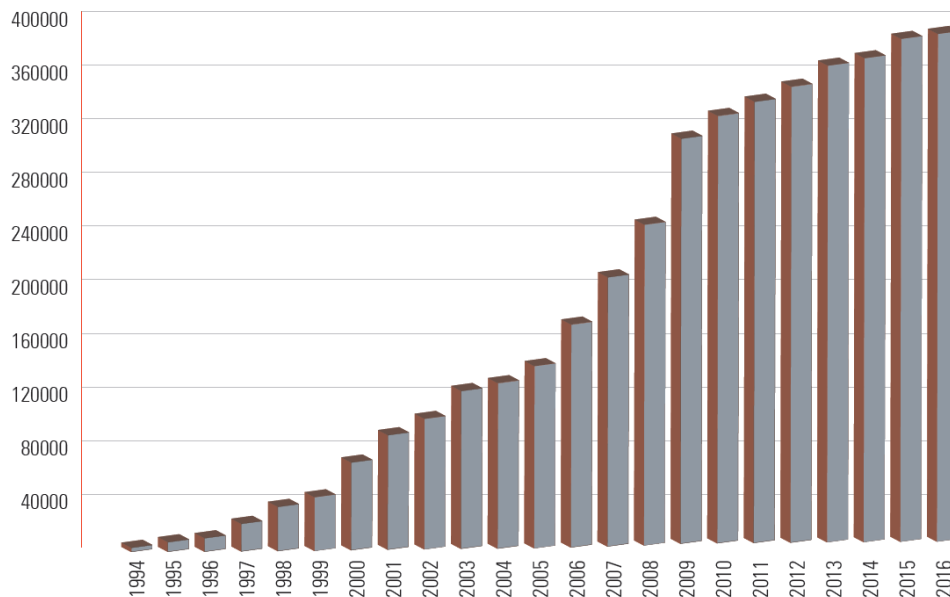


Abbildung 1: *Jährliche Gesamtbesucherzahl der Führungen durch die Gedenkstätte Berlin-Hohenschönhausen von 1994 bis 2016 [KB17, S. 23].*

1.2. Motivation

Ich habe mehrere Jahre in der Gedenkstätte Berlin-Hohenschönhausen gearbeitet, einem ehemaligen Untersuchungsgefängnis des Ministeriums für Staatssicherheit der DDR in Ost-Berlin, durch das heute Besuchergruppen geführt werden. Ich kenne daher aus eigener Erfahrung die Probleme, die sich ergeben, wenn historische Gebäude für den Publikumsverkehr geöffnet werden, die baulich nicht dafür ausgelegt sind. In der Gedenkstätte wird ein Führungskonzept angewendet, um auf Umbaumaßnahmen verzichten und das Gelände so weit wie möglich im Originalzustand erhalten zu können. Dabei werden entlang einer festgelegten Route vorgegebene Exponate in einem vorgegebenen Zeitrahmen abgelaufen.

Der große Nachteil eines auf Führungen basierenden Besuchs ergibt sich aus dem begrenzten Platz des Ortes. In einem Museum oder Baudenkmal sind in der Praxis nur eine begrenzte Anzahl an Besichtigungspunkten und nutzbaren Routen zwischen diesen Punkten vorhanden. Besuchergruppen, die sich zeitgleich auf dem Gelände befinden und in der Regel dieselben Besichtigungspunkte sehen wollen, laufen sich also mit hoher Wahrscheinlichkeit über den Weg und blockieren sich dann gegenseitig. Durch die potentiell möglichen Staus und Wartezeiten bei Überlastung ist für einen reibungsfreien Betriebsablauf die Besucherzahl auf ein gewisses Maximum begrenzt, welches mittelbar von dem angewendeten Führungskonzept abhängt. Umgekehrt erfordern sich ändernde Besucherzahlen oft eine Anpassung des Führungsangebotes. Wie in Abbildung 1 verdeutlicht wird, nimmt die Besucherzahl durch die zunehmende Bekanntheit des Ortes seit

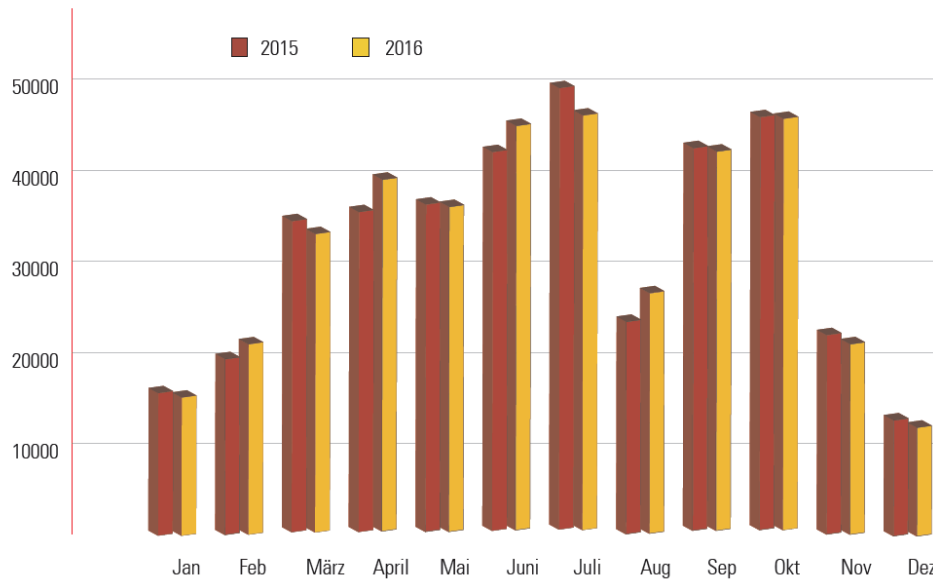


Abbildung 2: Monatliche Gesamtbesucherzahl der Führungen durch die Gedenkstätte Berlin-Hohenschönhausen von 2015 und 2016 [KB17, S. 24].

Jahren stetig zu. Durch saisonale Gründe, wie z. B. der Urlaubszeit im Sommer, gibt es auch in besucherstarken Jahren Schwankungen, wie Abbildung 2 zeigt. Ein gutes Führungsangebot muss sowohl für ein hohes als auch für ein niedriges Besucheraufkommen geeignet sein.

Bedeutete eine volle Besucherauslastung in der Gedenkstätte Berlin-Hohenschönhausen im Jahr 2012 noch ca. 60 Buchungen und 1800 bis 2200 Besucher pro Tag, so sind es 2017 bereits 80 Buchungen und 2200 bis 2600 Besucher pro Tag [KB17, S.23-25]. Die Anpassung an immer größer werdende Besucherströme ist also ein reales Problem, dem bisher mit kleinen testweisen Anpassungen im Tagesbetrieb begegnet wird. Änderungen des Führungskonzeptes per Simulation testen zu können, wäre eine große Erleichterung beim Finden von Lösungsstrategien und ein geeignetes Werkzeug zur Optimierung.

1.3. Problemstellung

Gegeben sei ein real existierendes Museum mit Besucherverkehr. Gewünscht ist eine Methode zum Modellieren und Evaluieren eines Führungsangebotes für dieses Museum.

Mein Lösungsvorschlag ist die Erstellung eines Simulatorframeworks, mit dem Simulatoren für konkrete Museen abgeleitet werden können. Im abgeleiteten Simulator sollen die Topologie des Geländes und das Führungsangebot modelliert sein und das Führungsangebot auf seine Realisierbarkeit hin überprüft werden können.

1.4. Aufbau der Arbeit

In Abschnitt 2 wird die derzeit existierende Lösung der Gedenkstätte Berlin-Hohenschönhausen vorgestellt. In Abschnitt 3 werden die Anforderungen für die Modellierung und Simulation von Museen und Führungen diskutiert und die implementierte Lösung für ein konkretes Museum auszugsweise demonstriert. In Abschnitt 4 werden mit dem erstellten Modell Simulationsexperimente durchgeführt und mit Messungen des realen Systems verglichen. In Abschnitt 5 wird ein Fazit gezogen und ein Ausblick auf mögliche zukünftige Arbeiten gegeben.

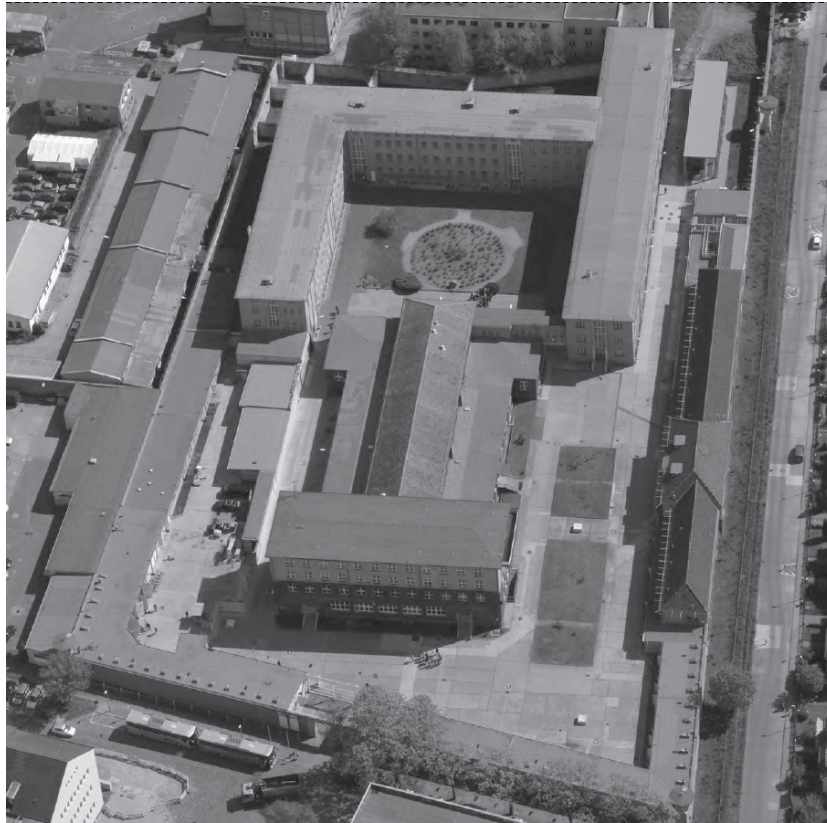


Abbildung 3: Luftbild des Gedenkstättengebietes [KKRO15, S. 2].

2. Analyse des derzeitigen Lösungsansatzes

2.1. Praxis in der Gedenkstätte Berlin-Hohenschönhausen

Rahmenbedingungen

Abbildung 3 zeigt das Gelände der Gedenkstätte Berlin-Hohenschönhausen. Hier gibt es ein Führungskonzept mit festgelegter Route. Die Rahmenbedingungen und Details des Führungsablaufes sind im Curriculum, den offiziellen *Leitlinien zu Inhalt und Form geführter Rundgänge*, festgehalten und für Referenten verbindlich [Erl10]. Die Führungsstationen liegen in vier größeren zusammenhängenden Bereichen und sollen in ca. 90 Minuten abgelaufen werden. Für die Bereiche gibt es Zeitvorgaben, für die einzelnen Stationen aber nicht. Auf welchem Weg der Referent von einer Station zur anderen kommt, ist ihm überlassen. Aus Mangel an Routenoptionen läuft der überwiegende Großteil aller geführten Besuchergruppen allerdings eine größtenteils identische Strecke ab. Deshalb ist es erforderlich, dass die Besuchergruppen ihre Führungen zeitlich versetzt starten. Organisatorisch wird das durch ein Buchungssystem realisiert: Besuchergruppen müssen einen Besuchstermin mit der Gedenkstätte vereinbaren und diesen verbindlich buchen. Für die möglichen Termine gibt es ein Buchungsraster mit festen

Zeitslots, über die der zeitliche Abstand zwischen den Gruppen gesteuert werden kann. Derzeit werden Termine für Führungen mit Einführungsfilm halbstündlich, zur vollen und halben Stunde angeboten. Die Anzahl der möglichen Buchungen sowie die Besucherzahl pro Zeitslot sind begrenzt. Es gibt zwei Kenngrößen, die unabhängig voneinander bei Überschreitung eines Schwellwertes zur Ausbuchung eines Zeitslots führen können. Pro Startzeitpunkt sind es derzeit maximal drei Buchungen, deren Gesamtteilnehmerzahl nicht mehr als 75 Personen sein darf. So kann ein Zeitslot bereits mit einer Gruppe von 75 Personen ausgebucht sein oder auch mit drei Buchungen mit jeweils nur 15 Personen. Zusätzlich gibt es noch Termine ohne Einführungsfilm zur viertel und dreiviertel Stunde, die nur Platz für eine Gruppe haben.

Ein Besucherreferent kann Gruppen bis maximal 25 Personen durch das Gelände führen. Ist eine Besuchergruppe größer, so wird sie in mehrere Teilgruppen aufgeteilt und entsprechend mehrere Referenten zur Betreuung eingeplant. Die Referenten haben typischerweise zwei bis vier Einsätze pro Arbeitstag in Abhängigkeit von der Besucherauslastung und der Referentenverfügbarkeit an diesem Tag.

Die Öffnungszeiten der Gedenkstätte werden in eine Nebensaison und Hauptsaison unterteilt. Von November bis März und während der Sommerferien ist die Zahl der Besucher geringer. In der Zeit von April bis Oktober ist sie sehr hoch. In der Nebensaison ist die Gedenkstätte von 09:00 bis 18:00 Uhr geöffnet und in der Hauptsaison von 09:00 bis 20:00 Uhr.

Besuchsablauf aus Sicht der Besuchergruppe

Vor ihrem Besuch muss die Gruppe einen Termin in der Gedenkstätte buchen. Das kann entweder telefonisch oder per Online-Anmeldeformular erfolgen. Ist ein freier Termin gefunden und erfolgreich eingebucht, erhält die Gruppe mit der Buchungsbestätigung ihre Rechnung und Anfahrsbeschreibung.

Der Besuch beginnt mit der Anmeldung am Empfangsschalter. Dort wird vom Personal die aktuelle Teilnehmerzahl abgefragt, evtl. ausstehende Entgelte kassiert und der Ablauf des Besuchs erklärt. Im Regelfall kommt eine Besuchergruppe mit genügend zeitlichem Vorlauf vor dem Termin an und hat dementsprechend noch eine gewisse Wartezeit vor dem Start der Führung. Diese Wartezeit wird in den vorgesehenen Wartebereichen, den Ausstellungsräumen oder im Shop überbrückt. Zum gebuchten Starttermin und noch bevor die eigentliche Führung beginnt, schaut sich die Besuchergruppe alleine einen ca. 30-minütigen Einführungsfilm in einem Seminarraum an. Im Anschluss wird sie dort von dem oder den Referenten in Empfang genommen. Es folgt die 90-minütige Führung unter Leitung der Referenten, bis diese die Teilgruppen im Ein- und Ausgangsbereich des Geländes entlassen. Die Teilgruppen können sich dort wieder zu ihrer ursprünglichen Gesamtgruppe formieren, die Ausstellung oder den Shop besuchen oder das Gelände direkt verlassen.

Öffentliche Rundgänge ohne Anmeldeprozess

Da der Buchungsprozess für Einzelpersonen, Familien und andere Kleinstgruppen durch deren schiere Menge aus organisatorischer Sicht zu aufwändig wäre, gibt es fest eingeplante Termine für unangemeldete Besucher – die sogenannten *öffentlichen Rundgänge*. Die Idee ist, dass diese Termine ähnlich wie Privatgruppen im System eingebucht werden, aber ohne, dass die Teilnehmerzahl vorab bekannt ist. Die Termine dieser öffentlichen Führungen sind fixiert und für interessierte Besucher auf Faltblättern oder im Internet auffindbar. Einzelbesucher, die zu einem öffentlichen Rundgang erscheinen, werden zum Führungsbeginn in eine oder mehrere Gruppen eingeteilt und wie jede andere gebuchte Besuchergruppe betreut. Da die Teilnehmerzahl vorab nicht bekannt ist, muss die Anzahl der benötigten Referenten nach Erfahrung und „Augenmaß“ abgeschätzt werden. So entsteht oft die Situation, dass zum Führungsbeginn zu viele oder zu wenig Besucherreferenten bereitstehen. Sobald sich die Unterbesetzung andeutet, meist im Bereich von 30 bis 60 Minuten vor Führungsbeginn, ist es äußerst schwer, zusätzliche Referenten zu organisieren. Im Gegensatz zu gebuchten Besuchergruppen starten öffentliche Rundgänge immer pünktlich, da es keinen Anmelder gibt, auf den bei Verspätungen gewartet werden muss. Einzelbesucher, die den Führungsstart verpassen, müssen auf den Start des nächsten öffentlichen Rundgangs warten.

Die öffentlichen Rundgänge finden täglich statt. In der Nebensaison drei Mal pro Tag und in der Hauptsaison sowie an Wochenenden stündlich.

Erläuterungen

Viele der vorgestellten Regelungen sind im laufenden Besucherbetrieb über die Jahre gewachsen und verfeinert worden. Ihre Sinnhaftigkeit ist auf den ersten Blick oft nicht gut nachvollziehbar, daher wird im folgenden Abschnitt detailliert darauf eingegangen.

Einführungsfilm

Abbildung 4 zeigt, dass ca. 60 % aller Besuchergruppen in der Gedenkstätte Schulklassen sind. Im Betriebsalltag hat sich gezeigt, dass eine großen Anzahl von Schülergruppen unvorbereitet anreist und deshalb mit der Führung überfordert ist. Aus diesem Grund wurde dem Besuch der Einführungsfilm hinzugefügt, um unvorbereiteten Besuchern einen besseren Einstieg in das Thema zu ermöglichen. Darüber hinaus hat die Filmvorführung in der Praxis noch weitere Vorteile. So hat sie sich als guter Zeitpuffer bewährt, durch den Verspätungen bei der Anreise unkompliziert kompensiert werden können. Bei Verspätungen von bis zu einer halben Stunde kann die Filmvorführung weglassen werden, ohne dass die tatsächliche Führungszeit betroffen ist. Darüber hinaus muss durch den

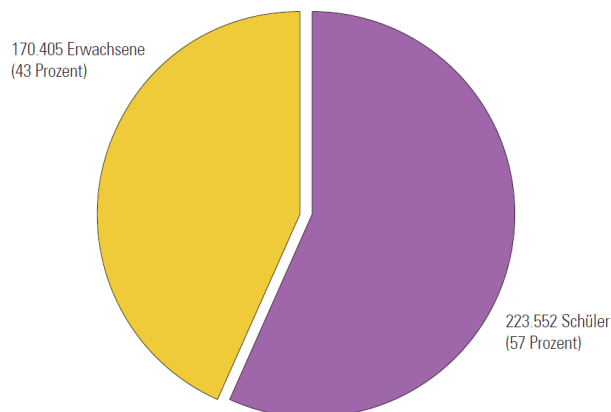


Abbildung 4: Anteil der Schüler und Erwachsenen an den Führungen im Jahr 2016 [KB17, S. 27].

Besucherreferenten keine umfassende Einführung mehr gegeben werden, was in der Vergangenheit oft zu zeitlichen und räumlichen Konflikten geführt hat.

Terminaktung

Die Terminaktung leitet sich direkt aus der Länge des Einführungsfilms und der Anzahl der zur Filmvorführung benötigten Seminarräume ab. Da ursprünglich alle Besuchergruppen den Einführungsfilm sehen sollten und es zu dessen Einführung nur drei Seminarräume gab, konnten diese auch nur alle halbe Stunde neu belegt werden.

Weil die Besucherzahlen über die Jahre stark gestiegen sind und die Anzahl der Filmräume nicht im gleichen Maße erhöht werden konnte, wurde das Führungsangebot um Führungen ohne Einführungsfilm ergänzt, um mehr Besuchstermine ermöglichen zu können. Diese Termine ohne Einführungsfilm sind halbstündlich zur viertel und dreiviertel Stunde, um den bestmöglichen zeitlichen Versatz zu den regulären Terminen zu erreichen.

Größe der Teilgruppen

Die Größe der Teilgruppen, die ein Besucherreferent alleine führen kann, ist auf 25 Personen beschränkt. Die Zahl ist direkt aus den Erfahrungen im Besucherbetrieb abgeleitet worden und ergibt sich aus der räumlichen Ausdehnung der Gruppen. Der Besucherreferent soll für alle Gruppenteilnehmer gut hörbar sein, ohne dass er dafür seine Stimme erheben muss. Das ist insbesondere im Freien ein Problem, wo die Teilnehmer intuitiv mit größeren Abständen zueinander stehen und keine Wände vorhanden sind, die den Schall zurückwerfen können. Darüber hinaus sind die Flure und Zellen nur von beschränkter Größe, wie in



Abbildung 5: Links ist ein Zellengang im Kellergefängnis, mittig eine Einzelzelle im Kellergefängnis und rechts ein Zellengang im Gefängnisneubau zu sehen[KKRO15, S. 28-29].

Abbildung 5 und 6 gut zu erkennen ist. In die Zellen und Vernehmungszimmer passen 25 Personen noch knapp hinein.

Buchungslimits pro Terminslot

Es hat sich im täglichen Besucherbetrieb gezeigt, dass sich ca. drei bis vier Teilgruppen zeitgleich und parallel zueinander im selben Bereich aufhalten können, ohne sich gegenseitig allzu sehr zu behindern. Dabei ist es nicht entscheidend, wie groß die einzelnen Teilgruppen sind. So reichen auch drei kleine Gruppen mit nur zehn Personen aus, um Schlüsselstellen entlang der Führungsrouten für andere Gruppen zu blockieren, wenn sie sich in einer zu besichtigenden Zelle befinden oder einen der engen Flure passieren. Abbildung 6 zeigt, wie eine Gruppe ausreicht, um einen Flur des Zellentraktes zu blockieren.

Saisonale Öffnungszeiten

Wie Abbildung 2 zu entnehmen ist, schwanken die Besucherzahlen zum Teil sehr deutlich mit der Jahreszeit. Da der Ort nur begrenzte Möglichkeiten bietet, sind verlängerte Öffnungszeiten während der Hauptsaison die einzige Möglichkeit, die Besucherzahl pro Tag zu erhöhen.

2.2. Vor- und Nachteile der derzeitigen Praxis

Vorteile

Durch die zentral gestaltete Lösung ist die Umsetzung einer einheitlichen Führung einfach umsetzbar. Wenn sich alle Besucherreferenten entsprechend ihrer Vorgaben verhalten, sind die Besucherbewegungen auf dem Gelände gut vorhersehbar. Auch die Effekte, die von Änderungen am Buchungsraster oder an der Routenführung ausgelöst werden, lassen sich in Grenzen abschätzen und vorhersagen.



Abbildung 6: Besuchergruppe während einer Führung durch die Flure des Zellentraktes in Hohenschönhausen. Im Vordergrund ist gut zu erkennen, wie eine Gruppe den Flur vollständig blockiert. Im Hintergrund sieht man eine Gruppe auf dem Weg zur nächsten Station. Gegenseitiges Überholen ist an dieser Stelle nicht möglich [KCF14, S. 11].

Der Einführungsfilm ermöglicht es, kleine Verspätungen gut zu kompensieren, ohne dass es zu Verzögerungen bei der eigentlichen Führung über das Gelände kommt.

Die Buchungstabelle ermöglicht eine gute Vorbereitung auf die Besucherströme eines Öffnungstages und bietet darüber hinaus eine gewisse Steuerbarkeit. So können potentielle Besucher bei der Anmeldung auf schwach gebuchte Tageszeiten gelenkt werden, um das Besucheraufkommen besser zu verteilen. Durch die strikte zeitliche Taktung der Besuchergruppen kann ein hoher Besucherdurchsatz gewährleistet werden.

Nachteile

Das Führungssystem sorgt für einen stark begrenzten Besucherdurchsatz im Vergleich zu einem Besuch ohne obligatorische Führung, bei dem sich die Besucher frei auf dem Gelände bewegen können. Zwar sind die zu erwartenden Effekte von Änderungen in Grenzen absehbar, allerdings können mögliche Dominoeffekte ohne Tests nur sehr schlecht identifiziert werden. Änderungen müssen daher direkt in der Praxis getestet werden und das immer nur in sehr kleinen Schritten. Parallele oder ausweichende Routenführungen sind nicht vorgesehen, daher ist es in der Praxis für die Besucherreferenten oft nicht möglich, mit ihrer Gruppe eine blockierte Engstelle zu passieren, ohne dabei die Führungsrouten kurzfristig

anzupassen und zu „improvisieren“. Andernfalls müssten sie beträchtliche Wartezeiten und Rückstaus in Kauf nehmen. Eigenständige alternative Führungsrouten müssten, aufgrund der engen Bedingungen des Ortes, die Standardroute mehrfach kreuzen oder Teilstrecken dieser mitbenutzen und sind daher schwer zu erstellen und auf ihre Realisierbarkeit überprüfbar. Bis auf eine Ausnahme sind daher alle Führungsrouten lediglich kleinere Variationen der Standardroute.

Das Zeitraster, nach dem die Besuchstermine vergeben werden, sorgt vor Ort zu stoßweisen Systembelastungen an den Stationen und insbesondere am Anmeldeschalter. Auch Verspätungen und kurzfristige Ausfälle von Besucherreferenten führen schnell zu punktuellen Überschreitungen der zulässigen Kapazitäten und sind oft Auslöser für Blockaden und Gedränge auf dem Gelände.

Die Teilnehmerzahlen zu öffentlichen Rundgängen sind aufgrund ihrer natürlichen Schwankungen nur schwer kalkulierbar und werden daher in der Buchungstabelle immer mit derselben Einheitsgröße abgeschätzt. Auch das führt oft zu punktuellen Überlastungen, wenn mehr Besucher erscheinen, als erwartet und eingeplant wurden.

3. Computergestützte Evaluation von Führungsangeboten

3.1. Vorüberlegungen

Die Analyse des Betriebsablaufs in der Gedenkstätte Berlin-Hohenschönhausen im vorherigen Abschnitt zeigt, dass die Möglichkeit, Besucherströme zu simulieren, große Vorteile bieten kann. Vor allem mittel- und langfristige Effekte von Änderungen im Betriebsablauf lassen sich auf dem Papier nur schwer abschätzen und in der Praxis nur mit Aufwand testen. Das Versuch-und-Irrtum-Prinzip wird zunächst nicht in Frage gestellt, sondern nur das Versuchsfeld verlegt. Ursachenforschung zu unerwünschten Ergebnissen und Bemühungen zur Optimierung obliegt weiter dem Anwender. Für die Experimente reicht dabei die Betrachtung eines einzelnen Besuchstages vom Öffnen bis zum Schließen des Museums, da sich Verspätungen und Staus nicht auf den nächsten Besuchstag auswirken können.

Es müssen mehrere Schritte unternommen werden, um ein Modell für ein Museum zu entwickeln, in dem Struktur und Verhalten hinsichtlich des Untersuchungsziels analog abgebildet werden. Die Topologie des Geländes, die Route der Führung und die Aufenthaltsdauer pro Stationen müssen in geeigneter Weise abgebildet werden. Die Gruppen sind ab einem bestimmten Zeitpunkt bereit, von ihrem Besucherreferenten abgeholt zu werden. Sollte dieser dann noch nicht verfügbar sein, muss die Gruppe warten. Die Art, mit der das Modell mit Besuchern gefüllt wird, sollte sich an den Organisationsmechanismen des modellierten Museums orientieren. Das bedeutet, dass real existierende Buchungstabellen in das Modell übernehmbar sein sollen. Der Zeitverbrauch von Aktivitäten, wie das Laufen von einer Station zur nächsten, und Zeitereignissen, wie Gruppenankünfte am Anmeldeschalter, sollen in realistischer Weise zufälligen Schwankungen unterliegen. Da sich Besucherreferenten in der Realität nicht immer an den vorgeschriebenen Führungsablauf halten können und gelegentlich improvisieren müssen, bedarf es einer Möglichkeit, Regeln für dynamisches Verhalten in bestimmten Situationen zu definieren. Es müssen Statistiken gesammelt und ausgegeben werden, um größere Stichproben durchführen und auswerten zu können. Zuletzt bedarf es einer geeigneten Ausgabe, um den Weg einzelner Gruppen nachvollziehen zu können, damit der Ablauf auf Korrektheit überprüft werden kann.

Für die Entwicklung wurde die objektorientierte Simulationssprache SLX gewählt. Sie bietet mit der Möglichkeit zur Spracherweiterung gute Voraussetzungen, um dem Anwender Eingabeschnittstellen bereitzustellen. Als dedizierte Sprache zur Erstellung von eventbasierten Simulationen stellt sie ein natives Koroutinen-Konzept für nebenläufige Prozesse und Werkzeuge für statistische Auswertungen bereit.

3.2. Anforderungen

Das Simulatorframework soll das Erstellen eines Simulators ermöglichen, der in der Lage ist, die Besucherbewegungen innerhalb eines Museums nachzubilden und korrekte Vorhersagen zu treffen. Aus den Vorüberlegungen lassen sich die folgenden Anforderungen an einen mit dem Framework erstellten Simulator ableiten:

1. Die Topologie eines Museums soll sich inkrementell modellieren lassen.

Der Anwender soll die statischen Strukturen des Museums auf intuitive Weise, nach und nach eingeben können. So wird etwa das Anlegen von Kanten erlaubt, auch wenn deren Länge noch nicht bekannt ist.

2. Es sollen sich Tourpläne modellieren lassen, die Regeln für dynamisches Verhalten beinhalten können.

Im realen System gibt es Variationspunkte entlang der Führungsrouten, wie z. B. mehrfach vorhandene Exponate, von denen eines ausgewählt werden muss. Auch das Anfragen und Binden von Besucherreferenten ist vom Kontext abhängig und somit dynamisch.

3. Das erstellte Modell soll durch die Angabe einer Buchungstabelle mit Besuchern gefüllt werden. Buchungstabellen sollen in konkreter Form angegeben oder generisch erzeugt werden können.

Die Buchungsregeln sind Teil des Führungsangebotes und manifestieren sich in den ausgefüllten Buchungstabellen. Die Angabe konkreter Buchungstabellen ist für die Validierung eines vollständigen Buchungstages notwendig, generische Buchungstabellen zudem für das Erstellen von Experimenten.

4. Für stochastische Prozesse sollen Zufallsverteilungen erstellt und parametrisiert werden können.

Gruppenankünfte und Aufenthaltszeiten an Stationen sind zu einem gewissen Grad dem Zufall unterworfen, der durch die Angabe von Zufallsverteilungen nachgebildet werden soll.

5. Das Modell soll korrekt ausgeführt werden.

Die Belegung und Blockierung von Stationen durch Besucher sowie der Stationswechsel müssen nachbildet werden.

6. Der Anwender soll bei Problemen informiert und unterstützt werden, durch die Ausgabe eines detaillierten Traces der Gruppenbewegungen und Warnung bei inkorrekt angelegten Tourgraphen.

Fehler bei der Modellierung sind nicht zwingend bei der Ausführung erkennbar. Um dem Anwender die Möglichkeit der Kontrolle zu geben, sollen Gruppenbewegungen bei Bedarf ausgegeben werden können. Fehler an statischen

Strukturen, wie falsch gesetzte Kanten, die ins Leere laufen, sollen bereits zur Übersetzungszeit zu Fehlermeldungen führen.

7. Es sollen statistische Auswertungen und Ausgaben bereitgestellt werden.

Um statistisch belastbare Aussagen treffen zu können, müssen große Stichproben durchgeführt werden. Dazu bedarf es der Sammlung von statistischen Maßzahlen und deren übersichtlicher Ausgabe.

3.3. Eingesetzte Werkzeuge

Das Simulatorframework wurde in der Simulationssprache SLX Version 2.3 geschrieben. Die Erstellung der UML-Diagramme des semiformalen Modells wurde in MagicDraw Version 18.0 vorgenommen. Für die Generierung einer grafischen Ausgabe des Tourgraphen wurde GraphViz Version 23.8 benutzt. Für den Simulator wurde eine Spracherweiterung entwickelt, die GraphViz-Quellcode erzeugt und so eine automatische Visualisierung der angelegten Graphen ermöglicht. Zum Ausmessen der Abstände auf dem Museumsgelände wurden Satellitenbilder von Google Earth benutzt sowie Grundrisse der Gebäude, die von der Gedenkstätte Berlin-Hohenschönhausen bereitgestellt wurden.

3.4. Modellierung von Museen

Graphendarstellung

Für die Abstrahierung von Orten und Abständen sowie deren spezifischen Eigenschaften bieten sich Graphen an mit den zu besuchenden Stationen als Knoten und den möglichen Wegen zwischen den Stationen als Kanten. Knoten haben als Attribute die Stationeigenschaften, wie z. B. die maximale Anzahl von Personen, die sich dort aufhalten können oder die Zeit, die ein Besucherreferent mit seiner Gruppe an dieser Station verbringen soll. Die Kantenlänge ist als Verteilung abstrahiert, was es ermöglicht, eine empirische Zeitverteilung für einzelne Kanten anzugeben. Unter Nutzung der konstanten Verteilung, die lediglich den angegebenen Erwartungswert zurückgibt, ohne diesen tatsächlich zu verteilen, ist ebenso die Angabe in Metern möglich.

Besucher & Besucherreferenten

In einer vereinfachten Modellsicht sind Besucher die einzigen Entitäten, die sich durch ein Museum bewegen. Nur sie nutzen die vorhandenen Strukturen und interagieren miteinander. Wollen sie an einem geführten Rundgang teilnehmen, sind sie zwar von der Verfügbarkeit eines Besucherreferenten abhängig, müssen ihn aber lediglich binden und sonst keine weitere Kooperation eingehen. Besucherreferenten können auf die Rolle einer Ressource reduziert und jegliche Aktivität im Besucher realisiert werden.

Buchungen & Buchungstabellen

Buchungen können die Rolle des Gedächtnisses von Besuchern einnehmen. In der Realität werden alle Informationen, die über einen Besucher bekannt sind, in der Buchung zusammengefasst. Auch besondere Vorkommnisse, wie Verspätungen oder Zahlungsverzug, werden dort dokumentiert. Da das Modell die Sicht auf den Besuchsverlauf abstrahieren soll, kann auf das meiste davon verzichtet werden. Der Termin, die tatsächliche Ankunftszeit und die Zuordnung eines konkreten Besuchers bleiben aber erhalten.

Mit Buchungstabellen wird eine Menge von Buchungen zu einer semantischen Einheit zusammengebunden, typischerweise ist das die Darstellung eines Öffnungstages. Sie können aber auch genutzt werden, um Buchungen anderweitig zu strukturieren, z. B. in Privatführungen, VIP-Führungen und öffentlichen Rundgängen.

Klassenmodell

Abbildung 7 zeigt das UML-Klassendiagramm des Simulatorframeworks. Die drei zentralen Klassen der statischen Struktur sind Guidepool, Tourgraph und Timetable – also die Liste der Besucherreferenten, der Tourgraph und die Buchungstabelle. Alle anderen Klassen sind als Komponenten in einer dieser drei Klassen eingebunden. Somit bündeln sich in diesen drei Klassen alle Modellbeschreibungsgößen. Die Klassen Visitor, Guided und Distribution wurden bewusst als abstrakte Basisklassen angelegt, damit der Anwender beim Modellieren seines Simulators keinen Einschränkungen unterliegt und früh gezwungen ist, Designentscheidungen zu treffen. Das Klassendiagramm ist auf die Anwendersicht reduziert. Hilfsstrukturen, die der Anwender nicht selbst benutzen muss, werden hier nicht gezeigt.

StationEN StationEN ist ein Aufzählungstyp für Stationsnamen. Dadurch können Arrays von Stationen bequem indexiert werden.

GuideEN GuideEN ist ein Aufzählungstyp für Guidenamen. Dadurch können Arrays von Guides bequem indexiert werden.

SectionEN SectionEN ist ein Aufzählungstyp für Bereiche des Tourgraphen. Dadurch können Arrays von Bereichen bequem indexiert werden.

Guide Ein Guide ist eine passive Klasse, die den Besucherreferenten repräsentiert und benötigt wird, um die Abhängigkeiten bei geführten Rundgängen nachzubilden. Ein Guide ist mit seinem Namen in GuideEN registriert. Das Anfragen und Binden eines Guides durch eine Gruppe wird mit der facility *guideDuty* und den Methoden *seize()* und *release()* realisiert. Die Methoden *bookable()* und

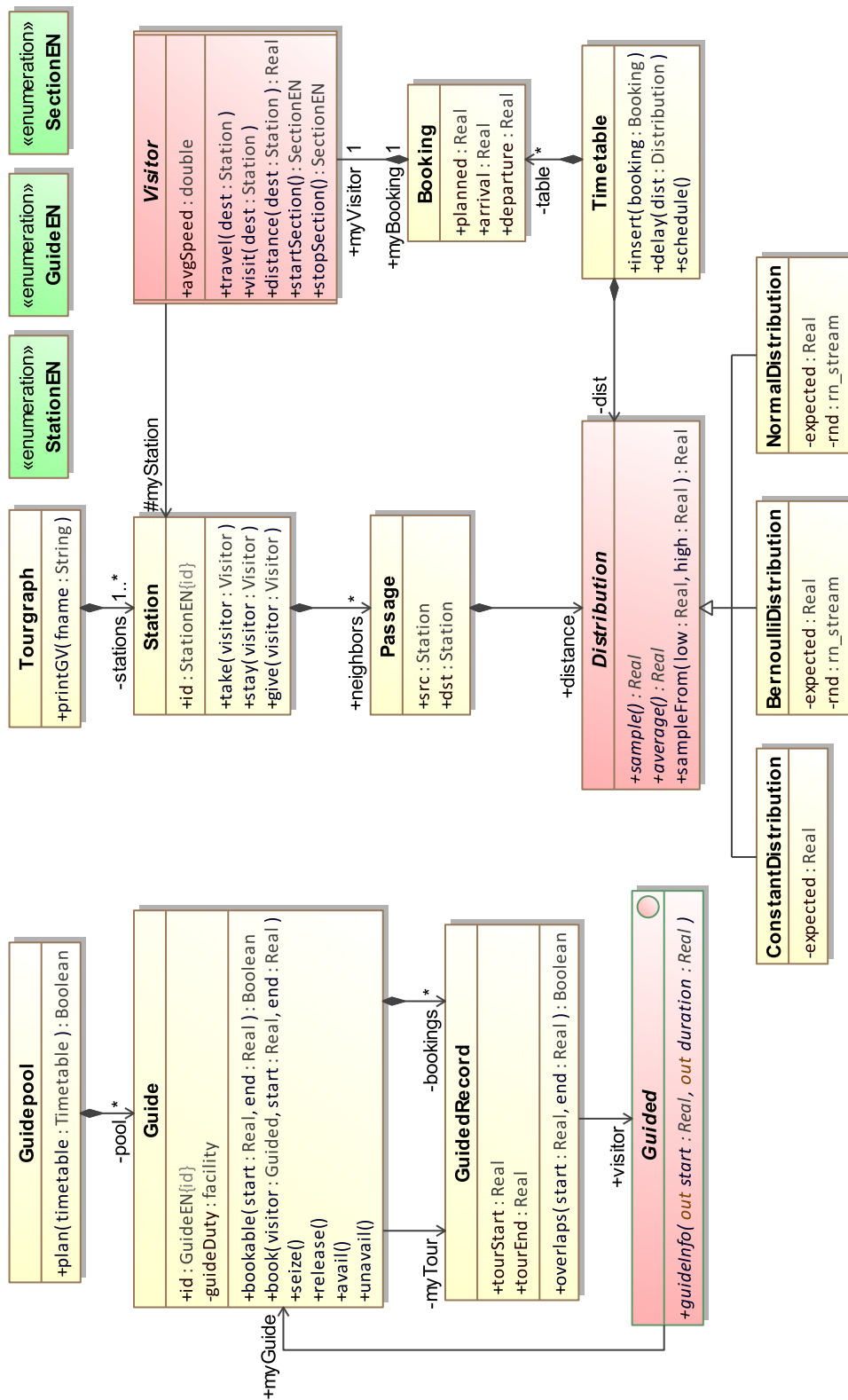


Abbildung 7: UML-Klassendiagramm des Simulatorframeworks. Abstrakte Klassen sind rot eingefärbt, konkrete Klassen gelb und Aufzählungstypen grün.

book() sind für das Zuteilen der Guides in die Buchungen einer Buchungstabelle nötig und werden dazu von *plan()* gerufen. Mit *bookable()* wird die Verfügbarkeit des Guides für ein angefragtes Zeitfenster getestet. Bei erfolgreichem Test wird er mit *book()* einer Buchung zugeteilt. Die Methoden *avail()* und *unavail()* haben analoge Bedeutung zu den gleichnamigen SLX-Spracherweiterungen.

Zuletzt besitzt der Guide eine Menge von *GuidedTours*, die alle seine Führungseinsätze repräsentieren.

Guidepool Ein Guidepool ist eine Sammlung von Guides. Die Planung, welcher Guide für welche Buchung eingeteilt wird, wird in der Methode *plan()* des Guidepools realisiert.

GuidedRecord In dieser Klasse sind die notwendigen Details einer Buchung aus der Sicht des Guides hinterlegt. Das ist ein Zeiger auf den Besucher und das Zeitfenster, in dem der Guide gebunden sein soll. Diese Struktur ist notwendig, weil die Führung aus Besuchersicht anders aussieht und dessen Besuch eine andere Start- und Endzeit haben kann. Die Methode *bookable()* prüft mit Hilfe von *overlaps()*, ob sich eine bereits bestehende Einsatzzeit des Guides mit dem Zeitfenster eines potentiell weiteren Einsatzes überlappt.

Guided Das Interface Guided wird für Visitor benötigt, die für ihren Besuch einen Guide binden müssen. Implementiert ein Visitor die Methode *guideInfo()*, kann er damit die benötigte Einsatzzeit des Guides in Relation zu seiner eigenen Besuchszeit festlegen.

Passage Die Klasse Passage bildet gerichtete Kanten zwischen zwei Stationen ab. Die Attribute *src* und *dst* beinhalten die Namen der Start- und Zielstation. Die Kantenlänge wird als Verteilung *distance* gespeichert.

Station Station ist die Superklasse für alle Stationstypen. Sie hat einen Namen, mit dem sie in StationEN registriert ist, Kanten zu allen benachbarten Stationen und drei Methoden zur Steuerung von Besucherbelegung. Mit *take()* reservieren Visitor die Station und mit *give()* geben sie sie wieder frei. Mit *stay()* lösen Visitor den Besuch der Station aus. Alle drei Methoden sind als leere, überschreibbare Prototypen angelegt und müssen vom Anwender in Ableitungen von Station implementiert werden.

Tourgraph Ein Tourgraph hat Zugriff auf alle Stationen, die ihm zugeordnet sind. Mit der Methode *printGV()* werden die gespeicherten statistischen Daten seiner Stationen ausgelesen und in eine Quelldatei für das Programm GraphViz geschrieben. GraphViz kann aus dieser Quelldatei ein Bild des Tourgraphen erzeugen.

Distribution Die abstrakte Klasse *Distribution* gibt die abstrakten Methoden *sample()* und *average()* vor, die vom Anwender zu implementieren sind. Die Methode *sampleFrom()* gibt nur Werte zurück, die in einem geforderten Intervall liegen. Die abgeleiteten Klassen *BernoulliDistribution* und *NormalDistribution* implementieren die namensgebenden Zufallsverteilungen. *ConstantDistribution* gibt immer den Erwartungswert zurück und ist dafür gedacht, konstante Werte in einer Verteilung zu hinterlegen.

Visitor *Visitor* ist eine abstrakte Superklasse, die Besucher repräsentiert und von der der Anwender seine eigenen Besuchertypen ableiten muss. Es ist die einzige aktive Klasse, da sich nur Besucher durch das Modell bewegen. Alle Methoden dienen der Bewegung durch den Tourgraphen. Mit *travel()* wird eine Zielstation angelaufen, mit *visit()* wird sie angelaufen und ein Besuch ausgelöst und mit *distance()* wird der erwartete Zeitverbrauch zu einer benachbarten Station berechnet. Mit *startSection()* und *stopSection()* kann die Sammlung von statistischen Daten für einzelne Bereiche aktiviert werden.

Booking Eine Buchung enthält Attribute für die geplante Ankunftszeit, die tatsächliche Ankunftszeit und die Abreisezeit.

Timetable Die Buchungstabelle enthält eine Menge von Buchungen. Mit *insert()* werden Buchungen in die Buchungstabelle aufgenommen. Mit *delay()* wird für alle Buchungen einer Buchungstabelle eine Verspätung bzw. die tatsächliche Ankunftszeit erwürfelt. Mit *schedule()* werden alle die Buchungen gemäß ihrer tatsächlichen Ankunftszeit umsortiert.

3.5. Spezialisierung für Gedenkstätten

Im Unterabschnitt 3.4 wurden allgemeine Eigenschaften von Museen festgestellt und abstrahiert. Nun soll, mit Hinblick auf das Untersuchungsziel, die Sicht stärker auf Gedenkstätten beschränkt werden. In Gedenkstätten kann das Gelände nur noch in Gruppen und im Zuge eines geführten Rundgangs begangen werden. Stationen müssen unterschiedlichen, konkreten Verwendungszwecken gerecht werden und Verbindungswege können Einschränkungen haben.

Konkretisierung von Stationen: Knoten mit Kapazitäten

Zentrale Eigenschaften von Stationen und der Knoten, durch die sie repräsentiert werden, sind die Anzahl der Gruppen und Gesamtpersonen, die sich zeitgleich dort aufhalten können. Als Folge dessen müssen Gruppen die Kapazitäten des nächsten Knotens auf ihrer Route abfragen und dürfen diesen erst betreten, wenn die nötigen Ressourcen frei sind. Wie in Abschnitt 2.1 bereits erläutert, können auch kleine Besuchergruppen an Engstellen zu Blockierungen führen, auch wenn

sich dort prinzipiell mehr Personen aufhalten könnten. Es stellt sich daher die Frage, auf welche Art die Kapazitätsgrenzen für die Belegung von Stationen modelliert werden sollen. Hier gibt es mehrere Ansatzmöglichkeiten:

- Anzahl der maximal zulässigen Gruppen pro Station
- Anzahl der maximal zulässigen Personen pro Station
- zwei unabhängige Kapazitätsgrenzen für Gruppen und Personen
- Stationstyp legt die Art der Kapazitätsgrenzen fest

Für das Modell der Gedenkstätte wurde die letzte Variante gewählt, in der die unterschiedlichen Stationstypen ihre Kapazitätskriterien gemäß ihrer zugeordneten Rolle festlegen. Besonders anschaulich wird das bei Exponaten und Verteilerknoten. Bei Exponaten ist die Gruppenanzahl ein stärkeres Kriterium als die Teilnehmerzahl. Das liegt daran, dass die Besucherreferenten an den Exponaten Vorträge halten. Zwei Besucherreferenten im selben Raum würden sich gegenseitig akustisch stören, völlig unabhängig davon, wie viele Teilnehmer sie dabei haben. In Verteilerknoten ist die Gruppenanzahl dagegen völlig irrelevant, da sie im Modell zur Repräsentation von Wegen, Kreuzungen und Engpässen dienen. Hier kommt es nur auf die räumlichen Einschränkungen und somit auf die Personenzahl an.

Konkretisierung von Wegen, Kreuzungen & Engstellen

Für Wegkreuzungen auf dem Gelände, an denen der Besucherreferent eine Wahlmöglichkeit hat, gibt es mehrere Möglichkeiten der Modellierung, die in Abbildung 8 dargestellt sind:

- kreuzungsfreie Modellierung: alle durch Kreuzung verbundenen Stationen haben Direktverbindungen
- eine spezielle Knotenklasse für Kreuzungen: Knoten, für die keine Aufenthaltszeit vorgesehen ist

Die kreuzungsfreie Variante hat den entscheidenden Nachteil, dass Blockierungseffekte an sich schneidenden Wegen nicht abbildbar sind. In einem solchen Modell können sich Besucher ausschließlich an den Besuchsstationen gegenseitig blockieren, aber nicht auf den Wegen dazwischen. Da diese gegenseitigen Behinderungen beim Laufen aber im realen System beobachtet werden können, wurde die Variante mit Kreuzungs- bzw. Verteilerknoten gewählt.

Eine spezielle Knotenklasse für Kreuzungen hat zudem den Vorteil, dass die räumlichen Gegebenheiten präziser abgebildet werden können. Kreuzungen werden häufiger frequentiert und sind daher oft auch Engstellen, bei denen die Aufnahmekapazitäten eine große Rolle spielen. Da die Teilnehmerkapazität ein Attribut von Stationen sein kann, bietet es sich an, Engstellen und Wegkreuzungen als Stationen zu modellieren.

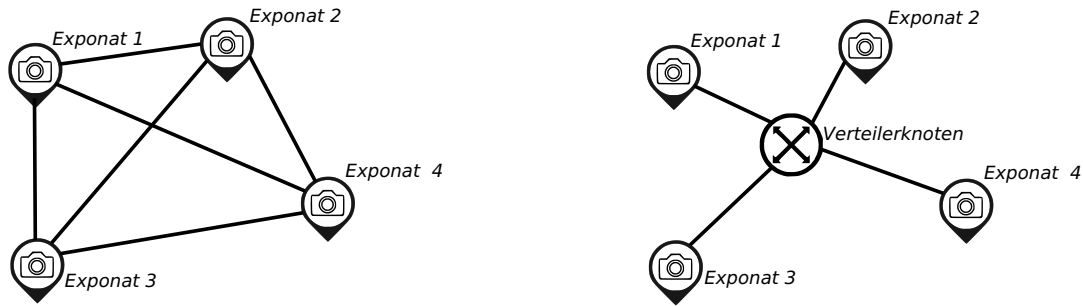


Abbildung 8: Motivation Verteilerknoten – Links die Variante ohne dedizierten Kreuzungs- bzw. Verteilerknoten, rechts mit. Da Gruppen nur die nächste angelaufene Station reservieren müssen, können sich in dieser Variante zwei Gruppen kreuzen, ohne sich gegenseitig zu behindern. In der rechten Variante muss von allen Gruppen der Verteilerknoten reserviert werden, was zu realistischen Blockierungssituationen an Kreuzungen führt. Darüber hinaus haben Stationen, im Gegensatz zu Kanten, Kapazitäten. Werden Passagen durch Verteilerknoten dargestellt, kann ihnen eine Kapazität zugeordnet werden, was die Nachbildung von engen Durchgängen ermöglicht.

Klassenmodell für Gedenkstätten

Abbildung 9 zeigt das UML-Klassendiagramm des für die Gedenkstätte erstellten Simulators. Es wurden Ableitungen von Guide sowie der abstrakten Klassen Station und Visitor erstellt.

Witness Die Klasse Witness hat ein zusätzliches Attribut, mit dem die Anzahl von Führungseinsätzen pro Buchungstabelle begrenzt werden kann. Die überschriebene Methode *bookable()* prüft bei einer Führungsanfrage an den Witness, ob diese Grenze bereits erreicht ist. In der Realität sind Besucherreferenten nicht beliebig verfügbar und stehen nur für eine bestimmte Anzahl von Führungen pro Tag zur Verfügung. Das muss bei der Planung berücksichtigt werden.

Group Die Klasse Group leitet von Visitor ab und implementiert das Interface Guided. Das Attribut *kind* vermerkt die Art der gebuchten Führung. Anhand dieser Führungsart wird in der Methode *guideInfo()* das Zeitfenster berechnet, in dem ein Besucherreferent benötigt wird. Die Verteilung *coinFlip()* stellt einen Münzwurf für zufällige Entscheidungen bereit. Mit *pauseDist()* wird eine kurze Pausenzeit für den Guide erwürfelt, in der dieser durch anfragende Gruppen nicht reservierbar ist.

Switch Switch ist die Klasse der Verteilerknoten. Die Belegung von Switches hängt von der Teilnehmerkapazität ab, welche durch das storage-Attribut *people* und die überschriebenen Methoden *give()* und *take()* gesteuert wird.

Exponat Im Gegensatz zu Switch hängt die Belegung von Exponaten von der Gruppenkapazität ab, die mit dem Attribut *groups* überwacht wird. Zusätzlich sind für Exponate Besuchszeiten vorgesehen, die mit *visitTime* erwürfelt und mit *stay()* verbraucht werden.

WaitingArea WaitingArea ist die Klasse für Wartebereiche. Diese haben keine vorgesehene Besuchszeit und eine Teilnehmerkapazität.

SeminarRoom Seminarräume verhalten sich wie Exponate, mit dem Unterschied, dass ihre Aufnahmekapazität durch eine maximale Personenanzahl definiert wird.

Desk Anmeldeschalter sind ein Eintrittspunkt für Gruppen in den Tourgraphen und haben deshalb weder Methoden zum Reservieren und Freigeben noch eine Kapazitätsgrenze – die Schlange am Schalter kann beliebig lang werden. Da immer nur ein Besucher zu einem Zeitpunkt bearbeitet werden kann, wird die Stationsbelegung mit einem *facility*-Attribut gesteuert.

3.6. Modellierung der Gedenkstätte Berlin-Hohenschönhausen

Im Unterabschnitt 3.5 wurden Gedenkstätten von Museen abgegrenzt und ihre Eigenschaften konkretisiert. Nun soll die Sicht noch weiter beschränkt werden – auf die Gedenkstätte Berlin-Hohenschönhausen.

Erstellung des Tourgraphen

Um einen abstrahierten Tourgraphen zu erstellen, wurden zunächst die ungefähren Positionen von Stationen ermittelt und welche Übergänge zwischen ihnen existieren. Abbildung 11 zeigt ein Satellitenfoto, mit dessen Hilfe die Abstände der Stationen zueinander ausgemessen wurden. Die Positionen der einzelnen Stationen wurden abgeleitet aus dem zur Verfügung stehendem Leitdokument für Besucherreferenten, den Beobachtungen bei der Datenerhebung und meinen persönlichen Erfahrungen als langjähriger Mitarbeiter in der Gedenkstätte. Abstände innerhalb von Gebäuden wurden mit Hilfe von vorhandenen Grundrissen bestimmt. In Abbildung 12 ist ein Grundrissausschnitt zu sehen. Mit Hilfe der Meterskalen konnten Abstände unkompliziert abgezählt werden. Das Gelände wurde mehrfach mit der sachkundigen Hilfe eines Besucherreferenten begangen, um die genaue Lage von Stationen und Entscheidungspunkten (Kreuzungen) entlang der Führungsrouten zu identifizieren. Die Genauigkeit der benutzten Satellitenbilder beläuft sich auf ca. ± 20 Zentimeter Abweichung pro 100 Meter.

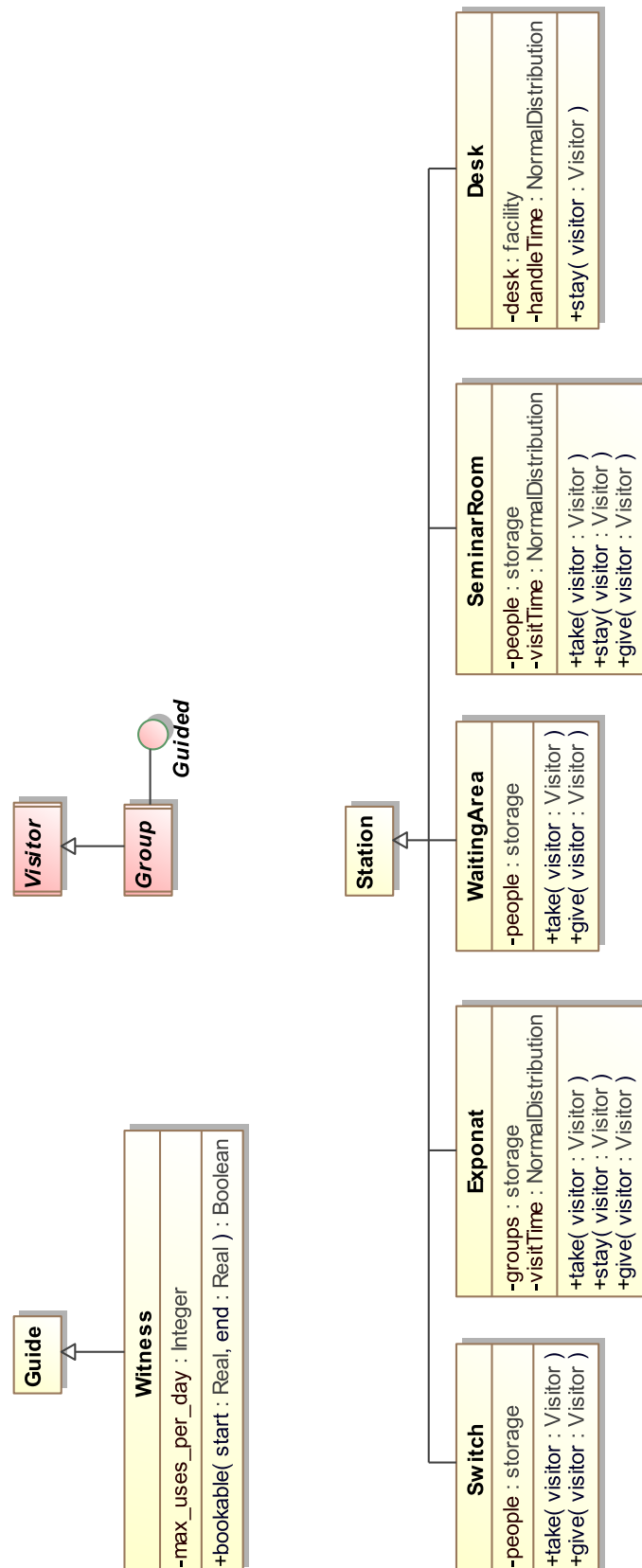
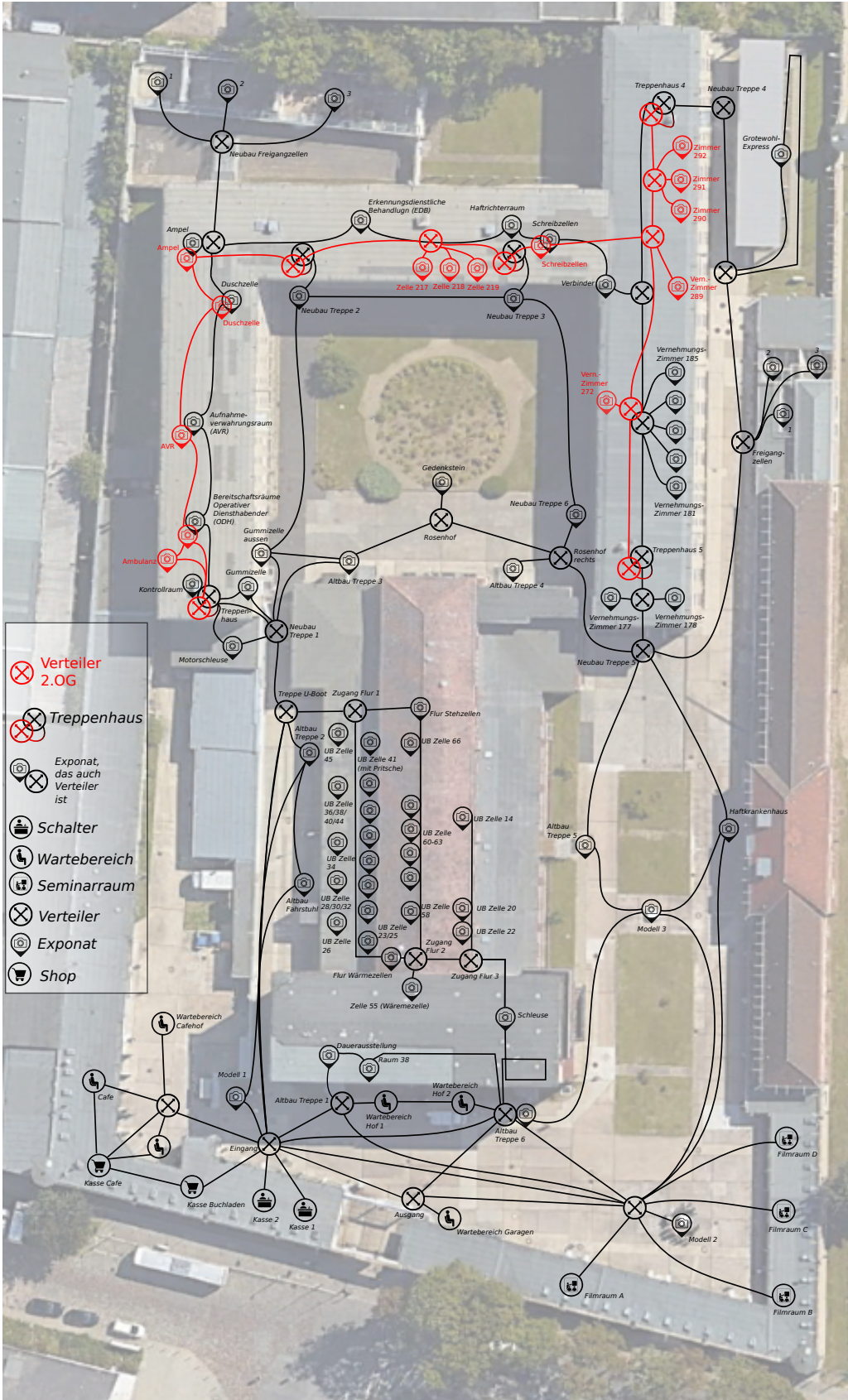


Abbildung 9: UML-Klassendiagramm für Gedenkstätten.



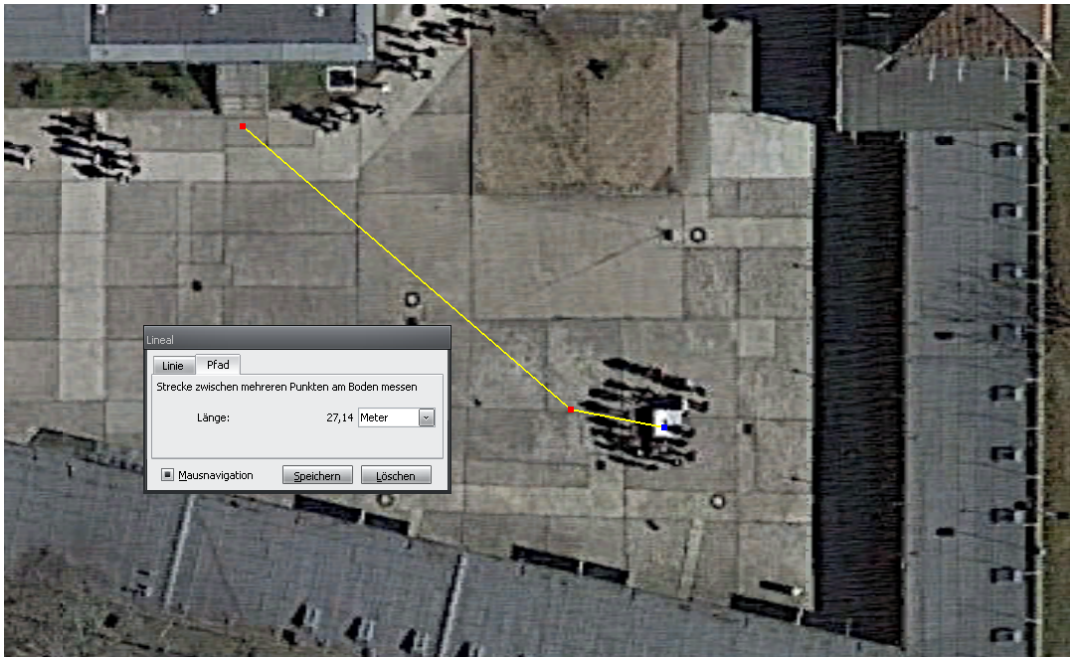


Abbildung 11: Messen der Kantenlängen mit Google Earth. Am Schattenwurf ist eine einzelne Besuchergruppe bei Modell 2 sowie ihre räumliche Ausdehnung gut zu erkennen.

Ermittelt wurde dies durch Abmessen einer Leichtathletik-100-Meter-Strecke auf demselben Satellitenbild. Da die ermittelten Distanzen innerhalb von Gebäuden nur auf einen Meter genau sind, kann die Genauigkeit der Kantenabstände insgesamt mit ± 1 Meter abgeschätzt werden.

Mit den gewonnenen Informationen wurde zunächst ein informaler Tourgraph erstellt, der in Abbildung 10 zu sehen ist. Hier musste abgewogen werden, wie umfangreich und feingranular der Tourgraph das reale Gelände abbilden soll. Die sehr große Anzahl an möglichen Stationen setzt Grenzen für die Praktikabilität. So gibt es allein im Neubau des ehemaligen Gefängnisses ca. 100 Zellen und 120 Vernehmungszimmer, von denen aber nur ein Bruchteil begehbar oder gut erreichbar ist. Die Anzahl der Stationen im Tourgraphen wurde daher eingeschränkt. Im Tourgraphen *nicht* als Stationen abgebildet werden unter anderem:

- nicht begehbare bzw. verschlossene Räume
- Orte, die in keiner der gemessenen Führungen angelaufen wurden
- Orte, die nicht relevant sind für Bewegungen von Besucherströmen

Eine Problematik war die räumliche Abgrenzung der Stationen von- und zu- einander. Da die Besuchergruppen selbst eine räumliche Ausdehnung haben, können die Stationen nicht beliebig nahe beieinander liegen. Besuchergruppen würden sonst zwangsläufig auf zwei Stationen gleichzeitig stehen. Aus Beobachtungserfahrung lässt sich sagen, dass eine Gruppe von 25 Personen eine



zusätzliche Informationsquellen genutzt werden. In erster Linie geschah dies durch die Teilnahme an mehreren Führungen während der Datenerhebung, worauf in Unterabschnitt 4.1 genauer eingegangen wird. Zusätzlich wurden gezielt Interviews mit verschiedenen Besucherreferenten geführt, um zu erfahren, wie diese ihre Führungen realisieren. Da der Tourgraph zu diesem Zeitpunkt bereits fixiert war, lag der Fokus auf der Feststellung der folgenden Parameter:

- Auswahl angelaufener Stationen
- Besuchsdauer an den jeweiligen Stationen
- Zeitverbrauch bei Stationswechseln

Die in der Feldstudie beobachteten Führungen haben sich zum Teil erheblich unterschieden, sowohl was die Besuchszeiten an den Stationen als auch die Routenführung angeht. Lediglich die Transitionszeiten bzw. die Bewegungsgeschwindigkeit der Gruppen ergaben ein durchweg einheitliches Bild. Bei der Erstellung des feingranularen Tourplans wurden die Führungen zum Vorbild genommen, die sich untereinander stark ähnelten und am ehesten den vorgegebenen Maßgaben des Curriculums entsprachen. Da die Bereichszeiten durch das Curriculum vorgegeben sind, ergab sich bereits an dieser Stelle die Fragestellung, ob die vorgegebenen Bereichszeiten mit der Summe der gemessenen Stationszeiten im entsprechenden Bereich in Einklang zu bringen sind. So ist es denkbar, dass die Summe der Besuchszeiten von Stationen, deren Besuch für die Erfüllung der inhaltlichen Vorgaben zwingend notwendig ist, kleiner oder größer ausfällt, als für den Bereich insgesamt vorgesehen ist.

Des Weiteren war die Modellierung der Variationspunkte entlang der Tour und des Ausweichverhaltens bei Blockaden von besonderer Bedeutung. Es musste bestimmt werden, an welcher Stelle im Gelände welche Auswahlmöglichkeiten bestehen und nach welcher Strategie sie von den Besucherreferenten gewählt werden. Aus den Erfahrungen während der Feldstudie wurde ein detailliertes Aktivitätsdiagramm des Führungsablaufs erstellt, das bei der Programmierung als Vorlage diente und in Abbildung 13 zu sehen ist. Die dargestellte globale Sicht auf die Führung entspricht dem groben Detailgrad des Curriculums. Die feingranulare Sicht entsteht durch die Schachtelung von Aktivitäten, bei der weitere Details in eine tiefere Ebene ausgelagert werden. Viele der Aktionen beinhalten wiederum ein Aktivitätsdiagramm, das die inneren Abläufe der Aktion präziser beschreibt. Alle feingranularen Aktivitätsdiagramme der tieferen Ebene sind im Anhang B zu finden.

Buchungstabellen

Buchungstabellen konnten aus dem Buchungssystem der Gedenkstätte übertragen werden. Zu Testzwecken wurden repräsentative Buchungstabellen von leeren und halbvollen Öffnungstagen eingepflegt, wie in Algorithmus 1 exemplarisch

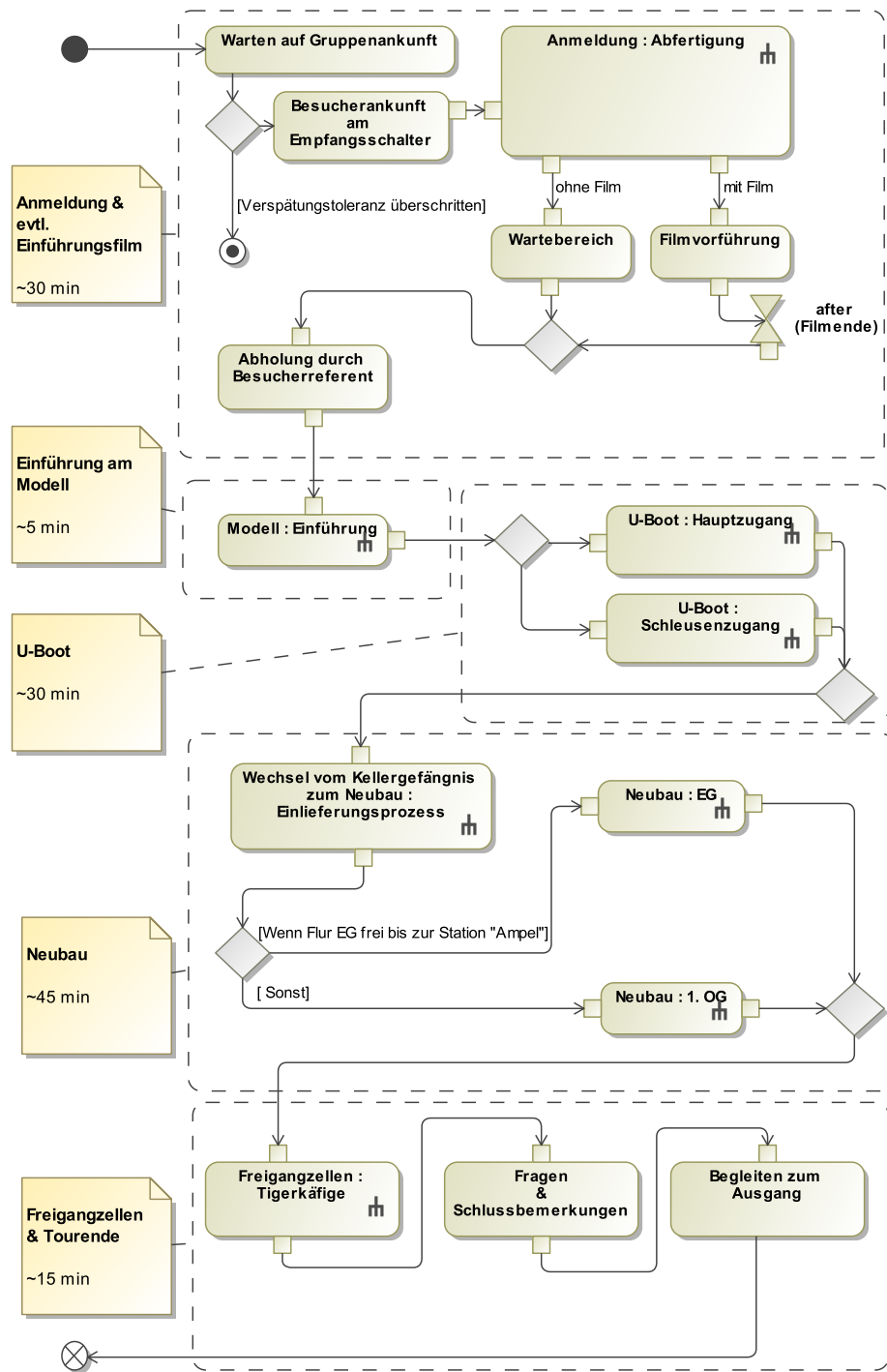


Abbildung 13: Aktivitätsdiagramm des abgeleiteten Tourplans für die Standardführung. Einzelne Boxen sind Aktionen, die durch die Verbindung mit Kanten zu einer Aktivität werden – dem geführten Rundgang. Die gestrichelten Boxen umranden die Aktionen, entsprechend welchem Bereich des Curriculums sie zugeordnet sind. Aktionen mit Rechensymbol beinhalten ihrerseits wieder Aktivitäten.

dargestellt. Größere Buchungen mit mehr als 25 Teilnehmern mussten von Hand auf kleinere Teilgruppen aufgeteilt werden. Diesen Prozess zu Automatisieren ist nicht trivial, daher wurde entschieden, darauf zu verzichten.

Algorithmus 2 zeigt ein Beispiel, wie generische Buchungstabellen erstellt werden können. Im Gegensatz zu konkreten Zeiten kann auch eine Zeitspanne angegeben werden. Innerhalb dieser Zeitspanne werden in festen Zeitabständen Buchungen angelegt und in die Buchungstabelle eingetragen. Wie lang dieser Zeitabstand ist, wird mit *every* gesteuert. Das Beispiel zeigt einen ausgebuchten Tag und wurde in Experiment drei benutzt (siehe 4.2.3). Die öffentlichen Rundgänge sind in einer eigenen Buchungstabelle angelegt, weil das Würfeln von Verspätungen für alle Einträge einer Buchungstabelle geschieht. Da öffentliche Rundgänge für unangemeldete Einzelbesucher immer pünktlich starten, wird diese Buchungstabelle keine Verspätung für die in ihr enthaltenen Buchungen würfeln.

```
1  timetable tuesday21th (  
2      10:00 = GroupStandard(25, TOUR_STANDARD, 20*Second),  
3      10:00 = GroupStandard(20, TOUR_STANDARD, 20*Second),  
4      10:00 = GroupStandard(20, TOUR_STANDARD, 20*Second),  
5  
6      10:00 = GroupStandard(13, TOUR_PUBLIC, 20*Second),  
7      10:00 = GroupStandard(13, TOUR_PUBLIC, 20*Second),  
8  
9      10:15 = GroupStandard(15, TOUR_WITHOUT_FILM, 20*Second),  
10     10:15 = GroupStandard(14, TOUR_WITHOUT_FILM, 20*Second),  
11     ...  
12 );
```

Algorithmus 1 : Codebeispiel einer konkreten, der Realität entnommenen Buchungstabelle. Der erste Parameter ist die Teilnehmerzahl, der zweite der gewählte Tourplan. Zuletzt kommt eine Timeoutangabe, die angibt, nach welcher Wartezeit bestimmte Stationen des Tourplans übersprungen werden sollen.

```
1  timetable Standard (  
2      09:00 to 18:00 every 30 = GroupStandard(25, TOUR_STANDARD, INFINITY),  
3      09:00 to 18:00 every 30 = GroupStandard(25, TOUR_STANDARD, INFINITY),  
4      09:00 to 18:00 every 30 = GroupStandard(25, TOUR_STANDARD, INFINITY),  
5      09:15 to 18:15 every 30 = GroupStandard(25, TOUR_WITHOUT_FILM, INFINITY)  
6  );  
7  timetable Öffentlich (  
8      10:00 to 16:00 every 1*Hour = GroupStandard(25, TOUR_PUBLIC, INFINITY),  
9      10:30 to 14:30 every 2*Hour = GroupStandard(25, TOUR_PUBLIC, INFINITY)  
10 );
```

Algorithmus 2 : Codebeispiel einer generisch erzeugten Buchungstabelle. Ist der letzte Parameter auf INFINITY gesetzt, ist das Überspringen von Stationen grundsätzlich verboten bzw. die strenge Variante des Tourplans wird befolgt.

3.7. Implementation

In diesem Abschnitt wird das grundlegende Vorgehen bei der Implementation des Simulators mit der Simulationssprache SLX diskutiert und auf eine Auswahl von Problemen eingegangen, die sich bei der Realisierung ergeben haben. An ausgewählten Beispielen wird gezeigt, wo sich Freiheitsgrade aufgetan haben und mögliche Designentscheidungen gegeneinander abgewogen werden mussten.

Struktureller Aufbau des Frameworks

Das Simulatorframework gliedert sich in mehrere Module auf:

- MetricUnits
- MuseumModel
- StasiMemorial

Das Modul MetricUnits enthält metrische Konstanten für Zeiten und Entfernungen sowie Prozeduren zum einfachen Formatieren von Zeitstempeln. Das Modul MuseumModel ist das Herzstück des Simulators und der Bibliothek. Hier wird die Bibliothek zum Erstellen und Ausführen eines Simulators bereitstellt. StasiMemorial ist ein Anwendungsbeispiel für die Werkzeuge der Programmbibliothek mit Ableitungen der Basisklassen. In diesem Modul wurde ein Modell der Gedenkstätte Berlin-Hohenschönhausen erstellt und es wurden Simulationsexperimente durchgeführt.

Spracherweiterung zum Anlegen von Tourgraphen

Das von SLX bereitgestellte Spracherweiterungsfeature wurde an mehreren Stellen benutzt. Eine davon war das Anlegen des Tourgraphen. Dieser Modellierungsschritt soll für den Anwender möglichst intuitiv und schrittweise geschehen können. Es soll nicht der volle Detailgrad zum Erstellen der Struktur nötig sein müssen, sodass der Anwender die Strukturdetails nach und nach einpflegen kann. So ist es leicht vorstellbar, dass während des Modellierungsprozesses nicht von Anfang an alle topologischen Gegebenheiten bekannt sind. So könnten die Stationen und ihre Verbindungen zueinander bekannt, die Abstände zwischen ihnen aber noch nicht gemessen worden sein. Eine Spracherweiterung zur erleichterten Eingabe sollte also in der Lage sein, auch aus unvollständigen Angaben Datenstrukturen zu erstellen. Darüber hinaus ist es von Vorteil, wenn statische Fehler bereits zur Übersetzungszeit abgefangen werden. Deshalb werden die angegebenen Kanten bereits bei der Objekterstellung daraufhin überprüft, ob die Stationen, die durch sie verbunden werden sollen, auch tatsächlich existieren. Sollte ein Fehler auftreten, wird eine entsprechende Fehlerausgabe generiert, die die betroffenen Kanten angibt und welche der Stationen nicht existieren. Dieser

Schritt ist wichtig, weil nicht alle im Tourgraphen angelegten Kantenverbindungen während einer Simulation zwangsläufig genutzt werden und etwaige Fehler daher nicht sofort auffallen müssen. Der Anwender bekommt im schlimmsten Fall den Eindruck, mit einem korrekt arbeitenden Modell zu experimentieren. Tritt dieser Fehler dann scheinbar zufällig zur Laufzeit auf, ist die Fehlersuche unnötig schwer und zeitaufwendig.

Das Anlegen des Tourgraphen geschieht durch Angabe einer Liste von Stationen und Kanten. Algorithmus 3 zeigt das Statement und Algorithmus 4 die Anwendung. Abhängig vom Stationstyp müssen entweder die Teilnehmer- oder Gruppenkapazität und die Verteilung der erwarteten Aufenthaltszeit angegeben werden. Werden Kanten angelegt, ist der Standardfall, dass immer zwei Kanten angelegt werden, sowohl für die Hin- als auch für die Rückrichtung. Die Kanten werden dabei von der Station besessen, von der sie wegzeigen. Mit *oneway* wird angewiesen, dass nur eine gerichtete Kante ohne Rückrichtung angelegt werden soll. Die Spracherweiterung expandiert die Kurznotation und legt die entsprechenden Objekte an. Abbildung 14 zeigt eine Visualisierung des so angelegten Tourgraphen. Da die Kante von Modell 1 nach Ausgang als *oneway* angelegt wurde, hat sie nur eine Pfeilspitze.

```
1  statement tourgraph #name (  
2      {#src [{ = #init} | { : #dst [ = #dist ] [<#dir oneway>]}]}, ...  
3  )
```

Algorithmus 3 : Das *tourgraph*-Statement zum Anlegen eines Tourgraphen. Es wird eine Liste von parametrisierten Stationen und Kanten erwartet, die in beliebiger Reihenfolge angegeben werden können..

```
1  tourgraph BeispielGraph (  
2      Eingang = Switch(100),  
3      Kasse_1 = Desk(1*Minute + 39*Second, 57*Second),  
4      Cafehof = WaitingArea(100),  
5      Modell_1 = Exponat(6*Minute + 6*Second, 3*Minute + 25*Second, 1),  
6      Ausgang = Switch(100),  
7  
8      Kasse_1: Eingang = 3*Meter,  
9      Eingang: Cafehof = 20*Meter,  
10     Eingang: Modell_1 = 5*Meter,  
11     Modell_1: Ausgang = 32*Meter oneway,  
12     Eingang: Ausgang = 30*Meter  
13 );
```

Algorithmus 4 : Anlegen eines Tourgraphen per Spracherweiterung. Abschnitt Stationen: Links der Stationsname, rechts die Parametrisierung in Form des Stationstyps und Details für die Konstruktoren. Abschnitt Kanten: links die Ausgangsstation, rechts die Zielstation und der Abstand.

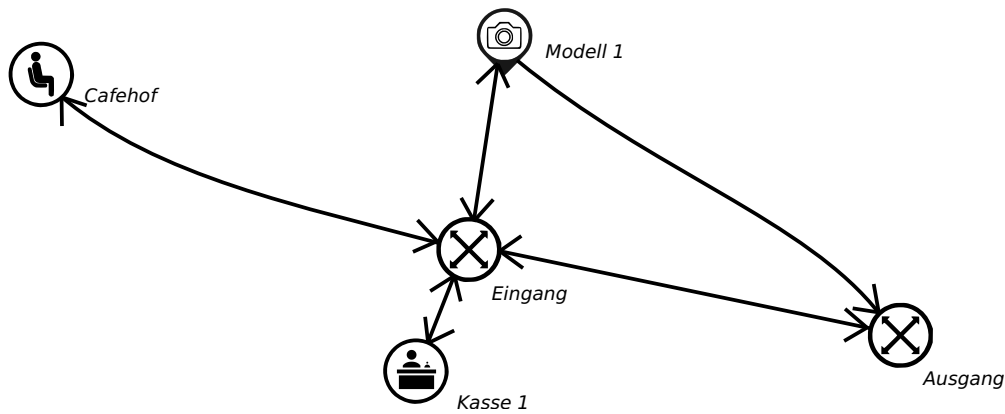


Abbildung 14: Visualisierung des Tourgraphen, der in Algorithmus 4 angelegt wurde.

Besucherbewegungen

Das zentrale Element des Simulators ist die Bewegung bzw. das Verschieben von Besuchern innerhalb des modellierten Graphen. Gewechselt werden kann nur zwischen benachbarten Stationen bzw. Knoten im Graphen, die direkt mit einer Kante verbunden sind. Für Stationen, die weiter auseinanderliegen, wird mittels Dijkstra-Algorithmus der kürzeste Kantenzug ermittelt und als Kette von Stationswechseln abgelaufen, bis die Zielstation erreicht ist. Dies stellt eine Erleichterung für den Anwender dar, weil er nicht genötigt ist, den Kantenzug in atomaren Schritten vorzugeben, auch wenn diese Möglichkeit weiterhin besteht. Modellanpassungen im Tourgraphen ziehen so wesentlich seltener Anpassungen in den Tourplänen nach sich, da diese nicht mehr davon „kaputt gehen“ können, wenn sich die Nachbarschaftsverhältnisse von Stationen ändern.

Für die Nachbildung von Stationsbelegung und Stationswechsel bedarf es nur weniger grundsätzlicher Methoden. Wichtig ist, dass eine Station erst freigegeben wird, wenn die nächste Station erfolgreich belegt wurde. Nur so wird sichergestellt, dass sich der Besucher immer im Tourgraphen befindet und nicht ungewollt verschwindet. Es wird wie folgt vorgegangen:

1. Anforderung der nächsten Station
2. Warten auf erfolgreiche Belegung der nächsten Station
3. Transition mit Zeitverbrauch
4. Freigabe der alten Station
5. Zeitverbrauch an der neuen Station (optional)

Die Regeln, nach denen eine Station angefordert und belegt werden kann, sind eine Eigenschaft der Station selbst – nur sie „kennt“ ihre speziellen Eigenschaften und „weiß“, worauf bei einer Belegung durch Besucher geachtet werden

muß. Deshalb wurden im Basistyp der Station Prototypen für diese Methoden vorgegeben, die der Anwender nach seinen eigenen Anforderungen in eigenen Stationsableitungen implementieren kann. Obwohl es nahelegt, SLX-eigene Sprachelemente, wie z. B. *storage* oder *facility*, direkt an dieser Stelle zu benutzen, wurde in der Basisklasse bewusst darauf verzichtet. So hat der Anwender keine Einschränkungen, ob und welche Sprachelemente er in seinen Ableitungen für die Modellierung der Stationsbelegung benutzt.

Eine Herausforderung war die Entwicklung eines Steuerungsmechanismus für den Zeitverbrauch an einer Station. Nicht an jeder Station, die betreten wird bzw. passiert werden muß, soll zwangsläufig auch Zeit verbraucht werden. Wie auch bei der Belegungssteuerung geht die Steuerung der Besuchszeit von der Station aus, da jede Station selbst am besten „weiß“, wie viel Zeit an ihr verbraucht werden muß. Durch verschiedene Ableitungen von Station lassen sich so verschiedene Verhaltensweisen nachbilden. Zum Beispiel wird an Wegkreuzungen keine Zeit für einen Besuch verbraucht, sondern diese nur passiert. In Wartebereichen wird zwar Zeit verbraucht, aber für eine unbestimmte Zeit. An Exponaten wird die Zeit anhand einer vorgegebenen Verteilung verbraucht. Dieser Ansatz könnte für einfache Modelle bereits genügen, ermöglicht aber nicht das zeitlose Passieren von Stationen, die eine Besuchszeit vorgeben. Dieses Problem könnte man noch umgehen, indem man Stationen mit Besuchszeit konsequent Verteilerstationen ohne Besuchszeit in der Rolle eines Zugangs vorlagert. Neben einer evtl. problematischen Aufblähung des Tourgraphen entstünde dadurch aber das Problem, dass Blockierungen, ausgelöst durch Stationsbelegungen, nicht mehr korrekt modelliert werden könnten. Die vorgelagerten Verteilerstationen könnten immer passiert werden, weil die Besucher nicht diese blockieren, sondern die nachgelagerte Station. Als Lösung für dieses Problem wurden der Besucherklasse zwei Methoden bereitgestellt: eine zum reinen Betreten und eine zum Betreten inklusive Auslösen des durch die Station vorgegebenen Zeitverbrauchs. Durch manuelles Betreten und „manuellem“ Zeitverbrauch können vom Anwender auch Tourpläne mit angepassten Besuchszeiten erstellt werden, die von den durch die Stationen vorgegebenen Zeiten abweichen. Ein naheliegender Anwendungsfall sind Sonderführungen, die einen besonderen Schwerpunkt auf bestimmte Exponate legen und dort mehr Zeit verbrauchen sollen, als gewöhnlich vorgesehen.

Auch bei der Modellierung des Zeitverbrauchs beim Stationswechsel, also dem Ablaufen der Kanten im Tourgraphen, mußten Designentscheidungen getroffen werden. So hängt der Zeitverbrauch für das Ablaufen einer festgelegten Strecke durch eine Besuchergruppe von mehreren Parametern ab, deren genauer Einfluss unbekannt sein kann. Mögliche Parameter sind:

- Distanz
- Laufgeschwindigkeit der Gruppe
- Passierbarkeit des Weges

Die Distanz ist aus offensichtlichen Gründen einer der wichtigsten Parameter, taugt aber nur im Zusammenhang mit einer Laufgeschwindigkeit für das Erstellen von Zeitverteilungen. Auch eventuell vorhandene Engstellen und schwer passierbare Flaschenhälse sind nur schwer modellierbar. Dagegen sind die durchschnittlichen Zeiten, die für das Ablaufen einer gegebenen Kante benötigt werden, sowie die sich daraus ergebenden durchschnittlichen Laufgeschwindigkeiten durch Messungen vor Ort relativ leicht ermittelbar. Aus diesem Grund sind Kantenlängen im Simulatorframework als Verteilungen implementiert worden. Da dem Anwender bei der Art der Verteilung keine Vorgaben gemacht werden, können das empirische Zeitverteilungen sein oder eine als Verteilung „verpackte“ Kantenlänge in Metern. Eine spannende Frage ist, ob die Gruppengröße die durchschnittliche Laufgeschwindigkeit beeinflusst. Dies wurde in der Feldstudie in Abschnitt 4.1 betrachtet und ist in die Modellierung eingeflossen.

Dynamischer Tourplan

Eine große Herausforderung war die Umsetzung von Variationsmöglichkeiten innerhalb eines fixierten Tourplans. Ein Verzicht auf diese Variationsmöglichkeiten hat sich bereits früh als nicht sinnvoll herausgestellt, da bei starren Tourplänen Verklemmungen äußerst schnell auftreten. Dieser Lösungsansatz tendiert nicht zu den in der Realität beobachteten Verzögerungen und Verspätungen des Betriebsablaufs, sondern zu den Extremen: entweder konfliktfreier, perfekter Ablauf oder vollständige Verklemmung.

Eine passive Datenstruktur wäre für den Tourplan zwar im Prinzip ausreichend, würde das Realisieren von Variationspunkten innerhalb des Tourplans aber sehr umständlich gestalten. Jede Variation würde zur Realisierung einen neuen, fixierten Tourplan benötigen und die Variabilität müsste mit dem Erstellen einer großen Menge verschiedener Tourpläne erkauft werden. Auch der Entscheidungsprozess aus Sicht des Besucherreferenten ließe sich mit einer passiven Datenstruktur nur schwer umsetzen. Typische Entscheidungsmuster eines Besucherreferenten sind z. B.:

- Wenn die nächste geplante Station besetzt ist, gehe ich erst einmal zur nächsten und probiere es hier später noch einmal.
- Habe ich die Wahl aus mehreren gleichwertigen Zellen, also nehme ich eine, die leer ist und möglichst nahe.
- Die besetzte Station ist wichtig, also warte ich eine gewisse Zeit, bis sie frei wird, aber nicht beliebig lange.

Da sich solche Entscheidungsmuster leicht durch *if*-Abfragen und Schleifen konstruieren lassen, wurden die Tourpläne nicht als eigenständige, passive Datenstruktur implementiert, sondern als Eigenschaft von Gruppen bzw. in deren Actions-Property. Da dort die gesamte Komplexität der Programmiersprache zur

Verfügung steht, können beliebige Bedingungen formuliert werden und beliebige Zustandsvariablen Einfluss nehmen. Ein gutes Beispiel ist die Situation an Clustern von Stationen, wo der Besucherreferent eine Auswahl an gleichwertigen Stationen hat und eine davon auswählen muss. Dafür wurde per Spracherweiterung das *choose*-Statement hinzugefügt, das in Algorithmus 5 zu sehen ist. Mit ihm kann eine Auswahl von möglichen Stationen angegeben werden, von denen eine belegt werden soll. Sind alle Stationen der Liste belegt, wird gewartet und die erste frei werdende Station sofort belegt. In Algorithmus 6 ist ein Anwendungsbeispiel zu sehen, wie mit *choose* ein Filmraum unter Berücksichtigung weiterer Bedingungen ausgewählt wird. Die *where*-Bedingung gibt an, dass nur ein Filmraum in Frage kommt, in dem noch genug Platz für alle Teilnehmer der Gruppe ist. Mit *timeout* wird die Zeit festgelegt, nach der das Warten abgebrochen und der Stationscluster übersprungen wird, sofern keiner der Filmräume bis dahin frei wird. Falls mehrere der Stationen verfügbar sind, kann eine genauere Auswahl definiert werden. In diesem Beispiel wird die Station mit der kürzesten Distanz ausgewählt.

```
1  statement choose #variable [: #stationType]
2      @from #station, ...
3      @where #pred [@timeout #timeout] [{<#order
4      @minimize> | <#order @maximize>} #expr]
```

Algorithmus 5 : Das *choose*-Statement. Das *choose*-Statement nimmt eine Liste von Stationen, aus der eine zur Belegung ausgewählt werden soll. Dabei kann mit *where* eine beliebige Bedingung angegeben werden. Optional können Zeitlimits mit *timeout* und Abstandsbedingungen mit *minimize* oder *maximize* formuliert werden.

Export eines visuellen Tourgraphen

Ein besonderes Hilfsmittel zur Nachverfolgung des Systemzustands ist die Ausgabe des Tourgraphen in Bildform. In dieser Darstellung wird ein Teil der statistischen Ergebnisse angezeigt. Das erleichtert die Suche nach Auslösern für Staus und Verklemmungen und ermöglicht ein besseres Verständnis für die Eigenschaften des Geländes. Abbildung 15 zeigt einen Ausschnitt des exportierten Tourgraphen. Die Stationen *Modell 1* und *Kontrollraum* sind leicht rötlich eingefärbt, weil dort Wartezeiten angefallen sind. Die dicke Umrandung des Verteilerknotens *Neubau Treppe 1* zeigt an, dass viele Gruppen diese Station betreten haben.

Recorder & Trace

Bei unerwarteten Simulationsergebnissen ist es unabdingbar, die Gruppenbewegungen detailliert nachvollziehen zu können. Gebraucht wird also eine Trace-

```

1  if (film)
2  {
3      startSection(Film);
4      travel(Filmräume);
5      choose station: SeminarRoom
6      from
7          Filmraum_A,
8          Filmraum_B,
9          Filmraum_C,
10         Filmraum_D
11     where R(station->people) >= members
12     minimize S(station->people);
13
14     visit(station);
15     travel(Filmräume);
16     stopSection(Film);
17 }

```

Algorithmus 6 : Anwendung des *choose*-Statements. Das *choose*-Statement wird benutzt, um einen von vier möglichen Filmräumen zu belegen. Die Methoden *startSection()* und *stopSection()* funktionieren vergleichbar zu Intervallen in SLX und sammeln Statistiken für vordefinierte Sektionen.

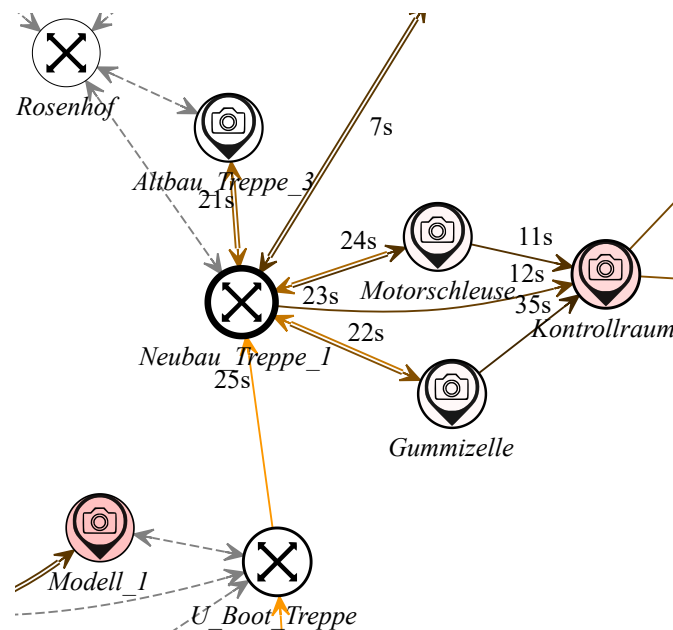


Abbildung 15: Ausschnitt eines exportierten Tourgraphen. Statistische Ergebnisse werden durch unterschiedliche Strichstärken und Farben dargestellt. Die Sekundenangabe an den Kanten entspricht der durchschnittlich benötigten Dauer zum Ablaufen. Je heller eine Kante eingefärbt ist, desto häufiger wurde sie abgelaufen. Gestrichelte Kanten wurden niemals benutzt. Knoten mit Kamerasymbol sind Exponate. Knoten mit Doppelpfeil sind Verteilerknoten.

Zeitstempel	Besucher	Aktivität	Station	Anmerkungen
(1) 08:11:21	GroupStandard 5/1	Anreise	Kasse_1	betrete Gelände
(1) 08:12:51	GroupStandard 5/1	Verlassen	Kasse_1	-> Eingang [Aufenthaltsdauer: 1m 29s]
(1) 08:12:56	GroupStandard 5/1	Betreten	Eingang	<- Kasse_1 [Laufzeit: 4s]
(1) 08:12:56	GroupStandard 5/1	Verlassen	Eingang	-> Cafehof
(1) 08:13:24	GroupStandard 5/1	Betreten	Cafehof	<- Eingang [Laufzeit: 28s]
(1) 08:13:24	GroupStandard 5/1	Verlassen	Cafehof	-> Wartebereich_Cafehof
(1) 08:13:46	GroupStandard 5/1	Betreten	Wartebereich_Cafehof	<- Cafehof [Laufzeit: 21s]
(1) 08:23:33	GroupStandard 1/1	Anreise	Kasse_1	betrete Gelände
(1) 08:24:23	GroupStandard 1/1	Verlassen	Kasse_1	-> Eingang [Aufenthaltsdauer: 50s]
(1) 08:24:27	GroupStandard 1/1	Betreten	Eingang	<- Kasse_1 [Laufzeit: 4s]
(1) 08:24:27	GroupStandard 1/1	Verlassen	Eingang	-> Altbau_Treppe_1
(1) 08:24:39	GroupStandard 1/1	Betreten	Altbau_Treppe_1	<- Eingang [Laufzeit: 11s]
(1) 08:24:39	GroupStandard 1/1	Verlassen	Altbau_Treppe_1	-> Wartebereich_Hof_1
(1) 08:24:49	GroupStandard 1/1	Betreten	Wartebereich_Hof_1	<- Altbau_Treppe_1 [Laufzeit: 10s]
(1) 08:35:14	GroupStandard 6/1	Anreise	Kasse_1	betrete Gelände
(1) 08:36:21	GroupStandard 6/1	Verlassen	Kasse_1	-> Eingang [Aufenthaltsdauer: 1m 7s]
(1) 08:36:27	GroupStandard 6/1	Betreten	Eingang	<- Kasse_1 [Laufzeit: 5s]
(1) 08:36:27	GroupStandard 6/1	Verlassen	Eingang	-> Altbau_Treppe_1
(1) 08:36:43	GroupStandard 6/1	Betreten	Altbau_Treppe_1	<- Eingang [Laufzeit: 15s]
(1) 08:36:43	GroupStandard 6/1	Verlassen	Altbau_Treppe_1	-> Wartebereich_Hof_1
(1) 08:36:56	GroupStandard 6/1	Betreten	Wartebereich_Hof_1	<- Altbau_Treppe_1 [Laufzeit: 13s]
(1) 08:36:56	GroupStandard 6/1	Verlassen	Wartebereich_Hof_1	-> Wartebereich_Hof_2
(1) 08:37:20	GroupStandard 6/1	Betreten	Wartebereich_Hof_2	<- Wartebereich_Hof_1 [Laufzeit: 23s]
(1) 08:40:50	GroupStandard 3/1	Anreise	Kasse_1	betrete Gelände
(1) 08:41:49	GroupStandard 3/1	Verlassen	Kasse_1	-> Eingang [Aufenthaltsdauer: 58s]
(1) 08:41:54	GroupStandard 3/1	Betreten	Eingang	<- Kasse_1 [Laufzeit: 5s]
(1) 08:41:54	GroupStandard 3/1	Verlassen	Eingang	-> Ausgang
(1) 08:42:45	GroupStandard 3/1	Betreten	Ausgang	<- Eingang [Laufzeit: 50s]
(1) 08:42:45	GroupStandard 3/1	Verlassen	Ausgang	-> Wartebereich_Garagen
(1) 08:42:59	GroupStandard 3/1	Betreten	Wartebereich_Garagen	<- Ausgang [Laufzeit: 13s]
(1) 08:51:05	GroupStandard 4/1	Anreise	Kasse_1	betrete Gelände
(1) 08:52:43	GroupStandard 4/1	Verlassen	Kasse_1	-> Eingang [Aufenthaltsdauer: 1m 38s]
(1) 08:52:48	GroupStandard 4/1	Betreten	Eingang	<- Kasse_1 [Laufzeit: 4s]
(1) 08:52:48	GroupStandard 4/1	Verlassen	Eingang	-> Cafehof
(1) 08:53:18	GroupStandard 4/1	Betreten	Cafehof	<- Eingang [Laufzeit: 30s]
(1) 08:53:18	GroupStandard 4/1	Verlassen	Cafehof	-> Cafe
(1) 08:53:33	GroupStandard 4/1	Betreten	Cafe	<- Cafehof [Laufzeit: 15s]
(1) 08:58:00	GroupStandard 5/1	Guide	Wartebereich_Cafehof	Anforderung: Sandra_Czech
(1) 08:58:00	GroupStandard 5/1	Guide	Wartebereich_Cafehof	Abholung: Sandra_Czech

Abbildung 16: Ausschnitt einer Traceausgabe. Rote Zeilen markieren das Betreten von Stationen. In der Spalte Anmerkungen werden Details zum jeweiligen Ereignis ausgegeben.

Ausgabe, in der jeder Schritt der Gruppen dokumentiert ist. Zu diesem Zweck wurde die Klasse Recorder implementiert. Algorithmus 7 zeigt, wie der Anwender bei Bedarf einen Recorder einrichten kann. Er muss sich dabei nur um das Starten der Aufnahme kümmern. Sollen nur die Bewegungen einer ganz bestimmten Gruppe in die Trace-Ausgabe geschrieben werden, lässt sich das mit der Filtermethode *restrict()* realisieren. Mit der Methode *redirect()* wird der Trace in eine Datei umgeleitet. Abbildung 16 zeigt die Ausgabe des Traces. Wurde eine Station betreten, wird in der Spalte Anmerkungen die Herkunftsstation und die Transitionszeit angegeben. Beim Verlassen einer Station wird an dieser Stelle die Zielstation und die Aufenthaltsdauer an der aktuellen Station ausgegeben. In den letzten beiden Zeilen ist zu sehen, wie eine Gruppe ihren Besucherreferenten anfordert und von diesem abgeholt wird.

```

1  Recorder rec;
2  rec.record();
3  rec.restrict("PublicTour 3");
4  rec.redirect("SingleRunTrace.rtf");

```

Algorithmus 7 : Einrichten eines Recorders.

13819
28.05.19
16.29

Musterbogen Feldstudie für Gruppe

Station-Nr.	Station-Name	Warten	Betreten	Verlassen	Laufen (von-bis)
1	Yale CT	---	14:31:46	14:25:52	---
2	Leam A	---	15:02:03	15:10:08	---
3	Wang	---	15:12:48	15:15:48	---
4	Wang	---	15:17:01	15:21:10	---
5	Wang	---	15:25:16	15:26:33	---
6	Wang	---	15:27:37	15:36:10	---
7	Wang	---	15:37:55	15:40:16	---
8	Wang	---	15:41:40	15:46:10	---
9	Wang	---	15:47:21	15:51:13	---
10	Wang	---	15:52:10	15:56:28	---
11	Wang	---	15:57:02	16:01:37	---
12	Wang	---	16:02:45	16:05:44	---
13	Wang	---	16:07:01	16:08:21	---
14	Wang	---	16:10:30	16:18:20	---
15	Wang	---	16:18:41	16:27:11	---
16	Wang	---	---	---	---

EURE

Abbildung 17: Ausgefüllter Datenbogen.

4. Evaluation und Experimente am Fallbeispiel

4.1. Feldstudie

Die Erhebung von Daten vor Ort hat mehrere Motivationen. Neben den örtlichen Gegebenheiten und Abläufen müssen auch statistische Maßzahlen ermittelt werden, um das formale Modell später konfigurieren zu können. Die Besuchszeiten an den einzelnen Exponaten sind den Besucherreferenten nicht exakt vorgegeben. Da die Menge an Informationen, die ein Besucherreferent an einem Exponat vermitteln kann, begrenzt ist, ist davon auszugehen, dass es sich hierbei um Normalverteilungen handelt, wobei die Erwartungswerte und Standardabweichungen jeder Station durch Messung ermittelt werden können. Darüber hinaus müssen die Bewegungszeiten zwischen den Stationen ermittelt werden, bzw. wie schnell sich die Gruppen durch das Gelände bewegen. Beim Erstellen eines Tourgraphen können die Kantengewichte sowohl in Metern als auch als Zeitverteilung angegeben werden. Im zweiten Fall braucht man konkrete Zeitmessungen für die entsprechenden Kanten, im ersten Fall neben den gemessenen Abständen in Metern auch eine durchschnittliche Bewegungsgeschwindigkeit. Für beides sind Messungen des Besucherbetriebes erforderlich. Die Laufgeschwindigkeit könnte neben den örtlichen Gegebenheiten (z. B. engen Durchgängen) auch vom Besu-

cherreferenten und der Gruppe oder Gruppengröße abhängen. Ob und welche Abhängigkeiten tatsächlich bestehen, soll durch Messung ermittelt werden.

Eine weitere Motivation für eine Datenerhebung ist es, die Vorhersagen des Simulators überprüfen zu können. Nur, wenn der Simulator plausible und nachprüfbare Vorhersagen trifft, kann er sinnvoll für Experimente eingesetzt werden. Zu diesem Zweck werden die vor Ort gemessenen Führungen nachmodelliert und im Simulator ausgeführt. Sofern der Simulator korrekt arbeitet und konfiguriert ist, sollten die berechneten Vorhersagen mit den vor Ort gemessenen Zeiten übereinstimmen.

Aufbau der Studie

Die Datenerhebung vor Ort konnte nicht automatisiert werden und fand daher mit Stift und Klemmbrett statt. Die Menge der erhobenen Daten ist folglich nur sehr gering, ohne statistische Relevanz und ihre Auswertung hat nur einen exemplarischen Wert. Allerdings kann damit durchaus eine erste Abschätzung stattfinden, ob der Simulator plausible Ergebnisse berechnet.

Es wurden zwei verschiedene Arten von Messungen durchgeführt. Zum einen wurden die Ankunfts- und Bearbeitungszeiten am Empfangsschalter protokolliert. Dies wurde ausschließlich an stark gebuchten Tagen umgesetzt, an denen mit vielen Ankünften zu rechnen war. Zum anderen wurden geführte Rundgänge begleitet und die Besuchszeiten an den einzelnen Stationen sowie die Bewegungszeiten zwischen den Stationen protokolliert.

Um konstante Bedingungen bei den Messungen zu erhalten und Seiteneffekte durch parallel laufende Gruppen bzw. gegenseitige Blockaden und Wartezeiten auszuschließen, wurden die Rundgänge ausschließlich zu besucherschwachen Zeiten an Montagen und Freitagen protokolliert. Zwischen den Messungen wurde als einziger Parameter der Besucherreferent bewusst verändert. Auf die Teilnehmerzahl der Gruppen konnte kein Einfluss genommen werden. Ein möglicher Einfluss der Gruppengröße auf die Geschwindigkeit wird in der Auswertung behandelt.

Die Zeiten wurden von einer digitalen Funkuhr mit Sekundenanzeige abgelesen und handschriftlich protokolliert. Es wurden immer absolute Uhrzeiten notiert, sobald ein Ereignis stattgefunden hat, also eine Station betreten oder verlassen wurde. Abbildung 17 zeigt einen auf diese Weise ausgefüllten Datenbogen. Durch die Zeitdifferenzen ließen sich sowohl die Aufenthaltszeiten als auch die Bewegungszeiten zwischen den Stationen errechnen. Es wurden 14 Messungen von Gruppenführungen und 32 Messungen von Gruppenankünften im Kassenbereich durchgeführt.

Verlauf & Herausforderungen

Da ein geführter Rundgang etwa zwei Stunden dauert, war die Datenerhebung sehr zeitaufwändig. Es wurden an vier Tagen Messungen durchgeführt, wobei

pro Tag im Schnitt drei Gruppen begleitet wurden.

Die Orte, an denen der Besucherreferent mit der Gruppe stehengeblieben ist, um etwas vorzutragen, wurden auf einem Lageplan markiert. In der Regel konnten sie direkt einer Station des abstrahierten Tourgraphen zugeordnet werden, aber nicht immer. In diesem Fall musste die Zuordnung im Nachhinein geschehen, wobei entweder die nächstgelegene Station des modellierten Tourgraphen zugeordnet wurde (sofern der Abstand nur wenige Meter betrug) oder eine neue Station dem Tourgraphen hinzugefügt wurde.

Wo sich die Gruppe genau befunden hat, war nicht immer präzise feststellbar, besonders innerhalb der Gebäude. Hier wurden die Nummern der nächstgelegenen Zellen oder Räume als Stationsname notiert und die Lage auf dem Gelände nachträglich zugeordnet. Ein weiteres Problem waren unvermittelte Pausen des Besucherreferenten entlang des Weges. Dies ist meistens passiert, wenn dem Besucherreferenten beim Verlassen der Station noch etwas eingefallen ist oder ein Besucher während des Laufens eine Frage gestellt hat. In diesem Fall musste spontan entschieden werden, ob die Zeit genommen wird oder ob die kurze Unterbrechung der Zeit des Laufweges zugeschlagen werden soll.

Erst bei der Durchführung von Messungen offenbarte sich, dass sich die Vortragsstile zum Teil erheblich unterschieden. Sie lassen sich grob in zwei Klassen unterteilen: den stationsbezogenen Stil und den vortragsbezogenen Stil. Bei stationsbezogenen Führungen steht das Besichtigen der Stationen im Vordergrund. Es werden tendenziell mehr Stationen angelaufen, wobei der Aufenthalt jeweils kürzer ausfällt. Vortragsbezogene Führungen besuchen weniger Stationen und vermitteln dort auch weniger ortsgebundene Informationen. Stattdessen wird an weniger Stationen mit jeweils längerer Aufenthaltszeit vorgetragen und ein Gesamtzusammenhang herausgearbeitet. Auch die abgelaufenen Routen unterschieden sich zum Teil sehr stark, wobei stationsbezogene Führungen untereinander große Ähnlichkeiten aufwiesen und eher bei vortragsbezogenen Führungen ungewöhnliche Routen gelaufen wurden.

Einige wenige Stationen wurden von fast allen Führungen besucht, was sich darauf zurückführen lässt, dass sie nur einmal auf dem Gelände existieren und es keine Alternativen für sie gibt. Bei Stationen, die inhaltlich gleich und oft vorhanden sind, wie z. B. Zellen oder Vernehmerzimmer, werden die jeweiligen Stationen proportional zu ihrer Häufigkeit seltener besucht.

Die Messungen der Gruppenankunftszeiten am Schalter waren wesentlich weniger zeitaufwändig, weil der Anmeldeprozess wesentlich kürzer ist als die ganze Führung. Hier wurde an zwei Tagen gemessen.

Auswertung & Ergebnisse

Da sich die Führungen in der Gedenkstätte zeitlich überschneiden und nur eine Person die Messungen durchgeführt hat, konnte kein Öffnungstag vollständig gemessen werden. Daher kann mit den vorhandenen Daten nur der Ablauf einzelner

Führungen validiert werden, die keine Berührungspunkte und Ressourcenkonflikte mit anderen parallel stattfindenden Führungen hatten.

Durch die geringe Anzahl an gemessenen Führungen ergeben sich mehrere Probleme bei der Konfiguration des Simulators und der Auswertung. Zunächst ist die Konfiguration des Simulators mit empirischen Verteilungen bei so wenig Daten nicht sinnvoll. Für die Stationsbesuchszeiten und Laufzeiten zwischen den Stationen wurden Normalverteilungen angenommen.

Auch liegen für viele einzelne Stationen und Kanten im Graphen zu wenig Daten vor, um sinnvolle Durchschnittszeiten für sie zu ermitteln. Deshalb wurden die durchschnittlichen Laufgeschwindigkeiten der einzelnen Gruppen über die Kantenlaufzeiten der gesamten Führungen ermittelt. Es hat sich gezeigt, dass die durchschnittliche Laufgeschwindigkeit einer Gruppe mit der Teilnehmeranzahl korreliert. Die Funktion der in Abbildung 19 dargestellten Trendlinie dient im Simulationsmodell als Berechnungsgrundlage zur Bestimmung der Transitionszeiten zwischen den Stationen. Dieser Zusammenhang wurde ins Modell übernommen. Bei den durchschnittlichen Besuchszeiten wurden die Zeiten von ähnlichen Stationen zusammengefasst, wie z. B. den Kellerzellen oder Vernehmerzimmern. Diese sind mehrfach in gleicher Ausstattung auf dem Gelände vorhanden und die Ausführungen des Besucherreferenten unterscheiden sich inhaltlich nicht, weshalb dieselbe Zeitverteilung angenommen werden kann.

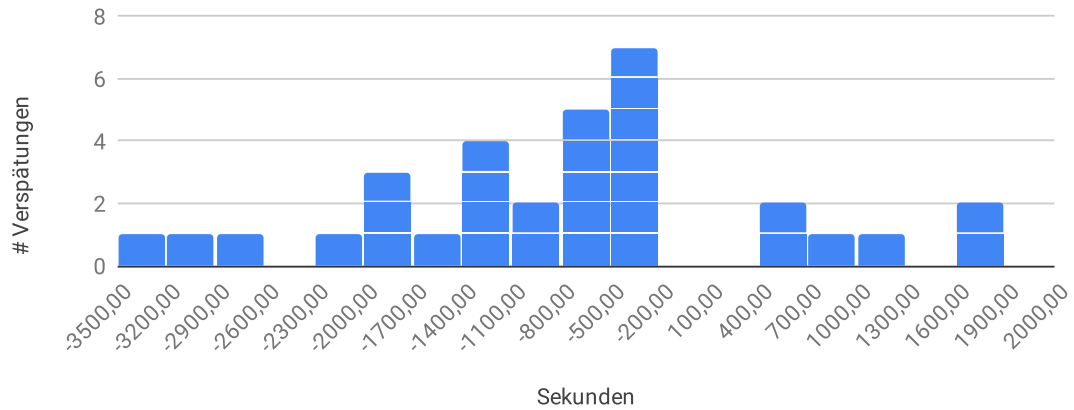
4.2. Simulationsexperimente

Aufbau

Es wurde eine Serie von fünf Experimenten mit dem Simulator vorgenommen. Zunächst, um zu überprüfen, ob dieser zuverlässige Vorhersagen trifft. Deshalb wurde im ersten Experiment eine Validierung anhand der in der Feldstudie gewonnenen Stichprobe von realen Rundgängen durchgeführt. Unter der Annahme, dass die realen Tourpläne im Modell exakt abgebildet worden sind, arbeitete der Simulator korrekt. Er lieferte plausible Ergebnisse in Bezug auf die Aufenthalts- und Transitionszeiten. Die Simulationsergebnisse der nachmodellierten Touren lagen im selben Bereich wie die der empirisch gemessenen Touren. Unter der Annahme, dass der Simulator korrekt funktioniert, wurde im zweiten Experiment der allgemeine Tourplan auf Basis des Curriculums modelliert und auf Korrektheit getestet. Unter der Annahme, dass der Simulator validiert ist, wurden weitere Experimente durchgeführt. Zunächst ein Belastungstest, der die Situation der vollständig ausgebuchten Gedenkstätte nachgestellt. Diese Untersuchung wurde dann verallgemeinert. Es wurde versucht, Vorhersagen zu treffen, wie sich das System bei zunehmender Besucherauslastung verhält und welchen Einfluss ausgewählte Parameter darauf haben. Untersucht wurde der Einfluss der Terminslots pro Stunde, die Anzahl der Teilnehmer pro Stunde und ob der Tourplan streng oder lose befolgt wurde. Um bei diesen Untersuchungen eine Bewertung vornehmen zu können, wie reibungsfrei sich die Gruppen durchschnittlich durch

Verspätungen der anreisenden Gruppen

Klassen: 5 min



Bearbeitungszeit an der Kasse

Klassen: 30 s

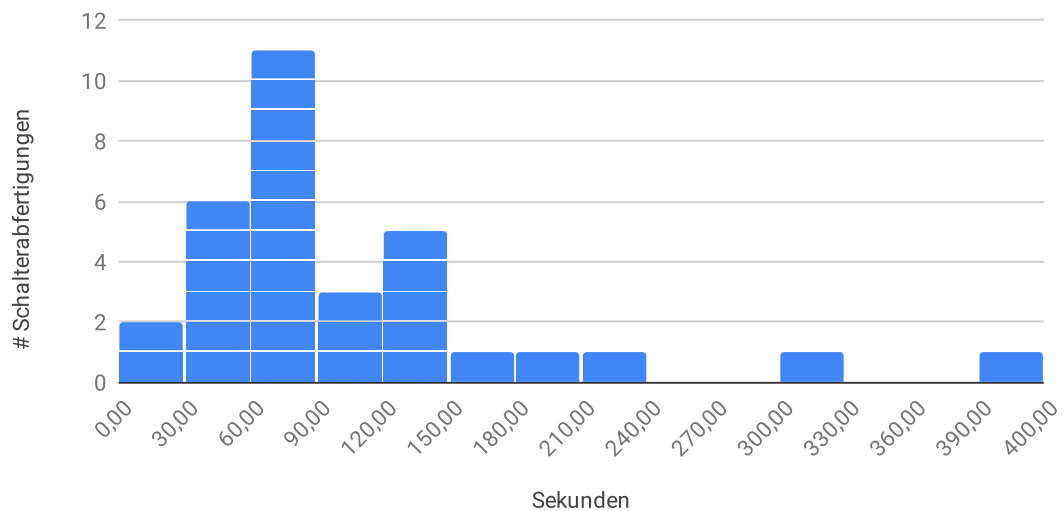


Abbildung 18: Histogramme der Gruppenankunftszeiten am Anmeldeschalter und der dortigen Bearbeitungszeit. Gebuchte Gruppen sind im Durchschnitt zwölf Minuten vor dem Termin am Schalter erschienen und wurden in zwei Minuten dort abgefertigt.

Streudiagramm Gruppenlaufgeschwindigkeit

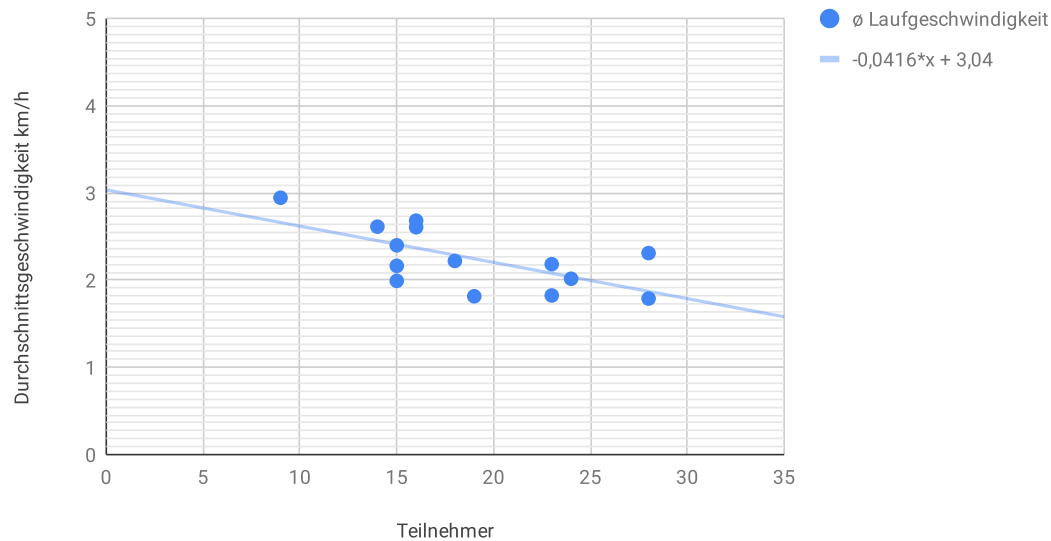


Abbildung 19: Streudiagramm der durchschnittlichen Laufgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Gruppengröße. Der Trend geht zu niedrigeren Laufgeschwindigkeiten, je größer die Gruppe ist.

das Gelände bewegen, wurde eine Bewertungsmetrik erstellt, die Blockierungen und Wartezeiten erfasst. Abschließend werden die Ergebnisse der Versuchsreihen zusammengefasst, analysiert und diskutiert.

Bewertungsmetrik für Auslastungsexperimente

Für die Experimente, welche die Systemreaktion auf wachsenden Besucherdurchsatz untersuchen, bedurfte es einer Metrik, mit der die Systembelastung erfasst werden konnte. Sie basiert auf der Auswertung von zwei Messgrößen:

- Verklemmungsrate: prozentuale Anzahl von Läufen mit Deadlocks in einer Stichprobe
- Reibung: durchschnittliche Gesamtwarezeit pro Lauf (Deadlock-Läufe nicht gewertet)

Versperren sich zwei Gruppen im realen System gegenseitig den Weg, sprechen sich die betroffenen Besucherreferenten kurz miteinander ab und finden meist schnell einen Weg, ihre Gruppen zügig aneinander vorbei zu leiten. In manchen Fällen kommt es dabei auch zu Streit, wer auszuweichen hat. In jedem Fall entstehen Verzögerungen und Blockierungen mit Rückstaupotential. Im Simulator gibt es keine Vorkehrungen, Blockierungen aufzulösen, denn das Ziel ist lediglich,

solche Blockierungen zu erkennen, da sie ein guter Indikator für ein nicht optimales Führungsangebot sind – im Optimalfall sollen solche Situationen gar nicht erst auftreten. Ohne Ausweichstrategien im Tourplan zieht eine Verklemmung in der Regel einen Dominoeffekt von sich aufstauenden Gruppen nach sich, der schlussendlich das gesamte System erfasst. Der Einfachheit halber wurde deshalb jeder Simulationslauf, bei dem nicht alle Gruppen nach Ende der 24-stündigen Simulationszeit das Gelände verlassen hatten, als Deadlock gewertet. Ausgewertet wurde, wie hoch der prozentuale Anteil von Simulationsläufen innerhalb einer Stichprobe war, bei denen ein Deadlock aufgetreten ist.

Wenn keine Verklemmungen auftreten, sind die durchschnittlichen Wartezeiten ein guter Gradmesser dafür, wie reibungsfrei der Betriebsablauf vonstatten geht. Wartezeiten entstehen, wenn die zu besuchende Station von einer anderen Gruppe besetzt ist und es keine alternativen Stationen zum Ausweichen gibt. Ausgewertet wurde die durchschnittliche Gesamtwartezeit eines Laufs bzw. eines Buchungstages.

4.2.1. Experiment: Validierung des Simulators

Vorbetrachtung Die Qualität der Validierung steht und fällt mit der Qualität der Feldstudie. Da die Datenerhebung vor Ort nur eingeschränkt möglich war und die gewonnene Stichprobe sehr klein ist, hat die durchgeführte Validierung nur exemplarischen Charakter und ist lediglich geeignet, den Simulator auf Plausibilität zu überprüfen. Mit einer größeren Stichprobe ließe sich der Simulator korrekt validieren, wobei die Vorgehensweise die gleiche bliebe. Insbesondere, um die Wechselwirkungen der Besuchergruppen untereinander korrekt zu erfassen, müssen sämtliche Gruppen eines Buchungstages gemessen werden. Ohne automatisierten Messaufbau würde das bei bis zu 80 Gruppen pro Tag mindestens 20 Helfer benötigen, welche die Gruppen begleiten, um die Zeitmessungen vorzunehmen. Eine Erhebung von 1000 Stichproben einzelner Führungen würde mindestens drei bis vier Wochen dauern und die Erhebung von 1000 Stichproben ganzer Buchungstage ca. drei Jahre.

Aufbau Da die Messung jeder einzelnen Gruppe eines Buchungstages nicht gewährleistet werden konnte, kann der Simulator mit der vorhandenen Stichprobe nicht für einen vollständigen Buchungstag bzw. die korrekte Nachbildung von Wechselwirkungen validiert werden. Stattdessen wurde nur der Ablauf einzelner, von Wechselwirkungen „ungestörter“ Führungen validiert. Unter diesem Vorzeichen wurden die Messungen der Feldstudie bewusst unter möglichst niedriger Besucherauslastung durchgeführt, um Begegnungen mit anderen Besuchergruppen soweit wie möglich auszuschließen. Ausgewählte Führungen der Feldstudie wurden in atomaren Schritten, also Station für Station, nachmodelliert. Die so erstellten Tourpläne beinhalten keine Variationspunkte und ausschließlich die Verweil- und Laufzeiten sind dem Zufall ausgesetzt. Die statistischen Verteilungen

Termin	20.08.18 - 14:30					Gesamtaufenthalt	01:57:39	
Nr.	11					Führungszeit mit Guide	01:27:02	
Gruppe	öffentlicher Rundgang engl.					Stationszeiten Σ	01:36:54	
Teilnehmer	14					Laufzeiten Σ	00:20:45	
Referent	Richter, B.					Laufgeschw. \emptyset	2,613975904	
Bemerkung	gute, stationsbezogene Führung							
Stations-Nr.	Stationsname	Betreten	Verlassen	Aufenthaltszeit	Laufzeit zur nächst. Station	Abstand [m]	Geschwindigkeit [km/h]	Bemerkung
1	Cafe		14:30:56		00:02:01	104	3,094214876	
2	Filmraum D	14:32:57	14:59:31	00:26:34	00:03:07	173	3,330481283	
3	U-Boot / Zelle 33	15:02:38	15:12:50	00:10:12	00:00:40	36	3,24	
4	U-Boot / Zugang Flur 2 / Wärmehaube	15:13:30	15:17:39	00:04:09	00:00:48	29	2,175	
5	U-Boot / Zelle 63	15:18:27	15:22:06	00:03:39	00:00:52	34	2,353846154	
6	U-Boot / Zelle 41	15:22:58	15:27:02	00:04:04	00:00:28	16	2,057142857	
7	U-Boot / Stehzellen	15:27:30	15:31:53	00:04:23	00:01:02	41	2,380645161	
8	Gummizelle aussen	15:32:55	15:37:49	00:04:54	00:00:38	19	1,8	
9	Gummizelle	15:38:27	15:41:41	00:03:14	00:01:05	29	1,606153846	
10	Motorschleuse	15:42:46	15:46:45	00:03:59	00:01:42	39	1,376470588	
11	1.OG / Zelle 202	15:48:27	15:50:43	00:02:16	00:00:23	30	4,695652174	
12	1.OG / Zelle 227 / Duschzelle	15:51:06	15:53:35	00:02:29	00:00:20	5	0,9	
13	1.OG / Ampel	15:53:55	15:58:05	00:04:10	00:00:58	35	2,172413793	
14	1.OG / Zelle 218	15:59:03	16:06:01	00:06:58	00:01:48	77	2,566666667	
15	1.OG / Vernehmungszimmer 272	16:07:49	16:19:14	00:11:25	00:02:51	92	1,936842105	
16	Freigangzelle 1	16:22:05	16:26:33	00:04:28	00:02:02	145	4,278688525	Ende der Führung
17	Ausgang	16:28:35						
			01:57:39	01:36:54	00:20:45	904	2,613975904	
Referent/ Sektion	Moment (statistisch)	Aufenthalt (Sektion)	Laufzeit (nur Kanten)	Besichtigung (nur Stationen)	Verzögerung (nur Stationen)	Laufweg (Sektion)		
Bärbel Richter gesamt	\emptyset	1h 55m 35s	22m 22s	1h 33m 12s	0s	904 m		
	$stdev$	11m 40s	2m 41s	11m 20s	0s	0 m		
	95% CI	$\pm 13s$	$\pm 3s$	$\pm 13s$	$\pm 0s$	$\pm 0 m$		
	99% CI	$\pm 18s$	$\pm 4s$	$\pm 17s$	$\pm 0s$	$\pm 0 m$		
	min	1h 16m 59s	17m 44s	56m 1s	0s	904 m		
	max	2h 41m 7s	29m 11s	2h 13m 5s	0s	904 m		

Abbildung 20: Gegenüberstellung von Messung und Simulation. Oben ist die gemessene, unten die simulierte Führung aufgeführt (10000 Läufe).

für die zu erwartenden Zeitverbräuche wurden aus den Daten der Feldstudie ermittelt, wobei durchgehend Normalverteilungen angenommen wurden. Es wurden 10000 Simulationsläufe durchgeführt.

Resultate Die Simulationsergebnisse der nachmodellierten Touren lagen im selben Bereich wie die entsprechenden, empirisch gemessenen Touren. Manche Ergebnisse waren fast deckungsgleich, wie in Abbildung 20 zu sehen ist. Andere lagen innerhalb der Standardabweichung oder leicht darüber.

Diskussion Größere Abweichungen ließen sich gut nachvollziehen, da sie insbesondere dort auftraten, wo sich die Besucherreferenten nicht streng an das Curriculum gehalten haben bzw. sich deutlich anders verhielten als der Durchschnitt. Insgesamt lieferte der Simulator plausible Vorhersagen für Führungen ohne Wechselwirkungen, weshalb er als vertrauenswürdig genug eingestuft wurde, um weitere Experimente durchzuführen.

4.2.2. Experiment: Validierung des Curriculums

Vorbetrachtung Das Curriculum der Gedenkstätte ist, wie bereits in Unterabschnitt 3.6 erwähnt, nicht sehr spezifisch was die einzelnen Stationen angeht und gibt nur für größere Bereiche Zeitvorgaben sowie vereinzelte, wichtige Stationen innerhalb eines Bereiches vor. Es war daher eine interessante erste Fragestellung, ob die zeitlichen Vorgaben tatsächlich eingehalten werden können, wenn alle inhaltlich notwendigen Stationen innerhalb eines Bereichs besichtigt werden. Als erstes fällt auf, dass die Summe der vorgegebenen Bereichszeiten nicht 90, sondern 95 Minuten beträgt. Das steht im Widerspruch zur Betriebspraxis, wo die Führungszeit des Besucherreferenten mit 90 Minuten angesetzt und geplant wird.

Aufbau Aus dem Curriculum und den Erfahrungen der Feldstudie sind drei Tourpläne abgeleitet worden:

- Standartour mit Einführungsfilm
- Standardtour ohne Einführungsfilm
- Öffentliche Rundgänge ohne Verspätungen

Alle drei Tourpläne wurden auf dieselbe Weise validiert wie die Touren aus dem ersten Experiment. Alle statistischen Maßzahlen wurden sowohl für den Gesamtaufenthalt als auch für vorab definierte Sektionen gesammelt, wobei die Sektionen entsprechend der Bereichsgliederung des Curriculums festgelegt wurden. Auf diese Weise konnten die Besuchszeiten aller Bereiche einzeln überprüft und schnell ermittelt werden, wo genau Abweichungen aufgetreten sind.

Resultate Es hat sich herausgestellt, dass die simulierten Touren im Schnitt ca. 15 Minuten länger dauern, als sie sollten, wobei sich fünf Minuten davon durch die bereits erwähnten Widersprüche von Curriculum und Betriebspraxis erklären lassen. Der Bereich Neubau dauert ca. zehn Minuten länger, als vorgegeben und der Bereich Freigangzellen fünf Minuten weniger. Abbildung 20 zeigt die Ergebnisse der Standardtour mit Einführungsfilm.

Diskussion Die Ergebnisse spiegeln die Erfahrungen der Feldstudie gut wieder, in welcher insbesondere im Bereich Neubau vereinzelte Stationen von den Besucherreferenten ausgelassen wurden. Sieht man von diesen nachvollziehbaren Unterschieden ab, liegen die Ergebnisse für die Standardtours im selben Bereich wie die nachmodellierten Führungen des ersten Experiments. Um alle Stationen in angemessener Zeit besichtigen zu können, müsste die Führung in der Praxis ca. 15 Minuten länger dauern oder die inhaltlichen Vorgaben zur Führung müssten reduziert werden. In der derzeitigen Form sind die Vorgaben nicht vollständig einhaltbar und werden von den Besucherreferenten nur durch das Inkaufnehmen von Abstrichen während der Führung erreicht.

Referent/ Sektion	Moment (statistisch)	Aufenthalt (Sektion)	Laufzeit (nur Kanten)	Besichtigung (nur Stationen)	Verzögerung (nur Stationen)	Laufweg (Sektion)
Standardtour gesamt	\emptyset	2h 14m 11s	22m 55s	1h 51m 16s	0s	750 m
	stdev	12m 2s	3m 33s	11m 37s	0s	35 m
	95% CI	$\pm 14s$	$\pm 4s$	$\pm 13s$	$\pm 0s$	$\pm 1 m$
	99% CI	$\pm 18s$	$\pm 5s$	$\pm 17s$	$\pm 0s$	$\pm 1 m$
	min	1h 23m 27s	16m 30s	1h 1m 46s	0s	715 m
	max	3h 15m 28s	33m 37s	2h 47m 45s	0s	785 m
Führung	\emptyset	1h 41m 10s	20m 12s	1h 20m 58s	0s	661 m
	stdev	11m 35s	3m 10s	11m 16s	0s	35 m
	95% CI	$\pm 13s$	$\pm 3s$	$\pm 13s$	$\pm 0s$	$\pm 1 m$
	99% CI	$\pm 17s$	$\pm 4s$	$\pm 17s$	$\pm 0s$	$\pm 1 m$
	min	53m 40s	14m 26s	34m 26s	0s	626 m
	max	2h 39m 15s	29m 48s	2h 15m 15s	0s	696 m
Film	\emptyset	31m 10s	2m 37s	28m 33s	0s	86 m
	stdev	42s	23s	35s	0s	0 m
	95% CI	$\pm 0s$	$\pm 0s$	$\pm 0s$	$\pm 0s$	$\pm 0 m$
	99% CI	$\pm 1s$	$\pm 0s$	$\pm 0s$	$\pm 0s$	$\pm 0 m$
	min	28m 31s	1m 59s	26m 8s	0s	86 m
	max	34m 15s	3m 41s	30m 38s	0s	86 m
Einführung	\emptyset	6m 34s	9s	6m 25s	0s	5 m
	stdev	3m 8s	1s	3m 8s	0s	0 m
	95% CI	$\pm 3s$	$\pm 0s$	$\pm 3s$	$\pm 0s$	$\pm 0 m$
	99% CI	$\pm 4s$	$\pm 0s$	$\pm 4s$	$\pm 0s$	$\pm 0 m$
	min	7s	6s	0s	0s	5 m
	max	18m 28s	12s	18m 19s	0s	5 m
U_Boot	\emptyset	28m 34s	6m 14s	22m 20s	0s	204 m
	stdev	5m 37s	1m 25s	5m 39s	0s	35 m
	95% CI	$\pm 6s$	$\pm 1s$	$\pm 6s$	$\pm 0s$	$\pm 1 m$
	99% CI	$\pm 8s$	$\pm 2s$	$\pm 8s$	$\pm 0s$	$\pm 1 m$
	min	9m 10s	3m 54s	2m 34s	0s	169 m
	max	51m 29s	10m 14s	46m 8s	0s	239 m
Neubau	\emptyset	53m 42s	8m 4s	45m 38s	0s	264 m
	stdev	7m 49s	1m 11s	7m 43s	0s	0 m
	95% CI	$\pm 9s$	$\pm 1s$	$\pm 9s$	$\pm 0s$	$\pm 0 m$
	99% CI	$\pm 12s$	$\pm 1s$	$\pm 11s$	$\pm 0s$	$\pm 0 m$
	min	25m 59s	6m 5s	16m 43s	0s	264 m
	max	1h 30m 26s	11m 18s	1h 20m 21s	0s	264 m
Freigangzellen	\emptyset	9m 51s	3m 18s	6m 33s	0s	108 m
	stdev	3m 15s	29s	3m 13s	0s	0 m
	95% CI	$\pm 3s$	$\pm 0s$	$\pm 3s$	$\pm 0s$	$\pm 0 m$
	99% CI	$\pm 5s$	$\pm 0s$	$\pm 4s$	$\pm 0s$	$\pm 0 m$
	min	2m 36s	2m 29s	0s	0s	108 m
	max	21m 59s	4m 37s	18m 48s	0s	108 m

Abbildung 21: Simulationsergebnisse der Standardtour mit Einführungsfilm (Stichprobe mit 10000 Läufen).

4.2.3. Experiment: Belastungstest

Vorbetrachtung Die nächste interessante Fragestellung war, ob der Simulator plausible Ergebnisse für einen vollständig ausgebuchten Tag vorhersagt. Zwar gibt es keine real gemessene Stichprobe eines solchen Tages zum Vergleich, wohl aber den Erfahrungswert, dass ein solcher Tag in der Gedenkstätte erfolgreich realisiert wird, auch wenn das unter Mühen und eines erhöhten Beschwerdeaufkommens seitens der Besucher und Besucherreferenten geschieht. Eine Simulation müsste entsprechend hohe Reibungen und eine gewisse Verklemmungsrate vorhersagen, aber kein vollständiges Blockieren des Betriebsablaufes.

Aufbau Das Experiment wurde sowohl mit einer strengen Version des Tourplans durchgeführt, bei der jede Station zwingend zu besuchen ist, als auch einer weniger strengen Variante, bei der einzelne, bereits besetzte Stationen nach einer kurzen Wartezeit von 20 Sekunden ausgelassen und übersprungen werden dürfen.

Resultate In der Simulation zeigten sich Verklemmungsraten von 32,5% für die strenge und 10,05% für die weniger strenge Tourplanvariante. Die Reibung der strengen Tourvariante betrug 11 Stunden und 46 Minuten, die der weniger strengen Variante 11 Stunden und 10 Minuten.

Diskussion Die Unterschiede bei der Verklemmungsrate zeigen, dass das Überspringen von blockierten Stationen ein wirksames Mittel ist, um Besuchergruppen zu entzerren und Blockierungen auf dem Gelände zu vermeiden. Überraschend war, dass sich die Reibung mit der weniger strengen Tourplanvariante kaum verbessert hat: es wurden lediglich 5% der Wartezeit eingespart. In den folgenden Experimenten wurde dieser Zusammenhang näher untersucht.

4.2.4. Experiment: Auslastungsreihe für Slots pro Stunde

Vorbetrachtung Die Experimente vier und fünf verallgemeinern den Belastungstest und untersuchen das Systemverhalten bei zunehmenden Besucherzahlen. Da der Besucherdurchsatz von mehreren Parametern der Buchungstabelle abhängt, wurden für jeden dieser Parameter Versuchsreihen durchgeführt. Untersucht wurde die Systemreaktion auf verschiedene Kombinationen folgender Eingabegrößen:

- Anzahl der Terminslots pro Stunde (Gruppenanzahl)
- Anzahl der Teilnehmer pro Terminslot (Gruppengrößen)
- strikte oder lose Befolgung des vorgegebenen Tourplans

Auslastungsreihe Slots / h

Deadlocks in Abhängigkeit von Slots / h

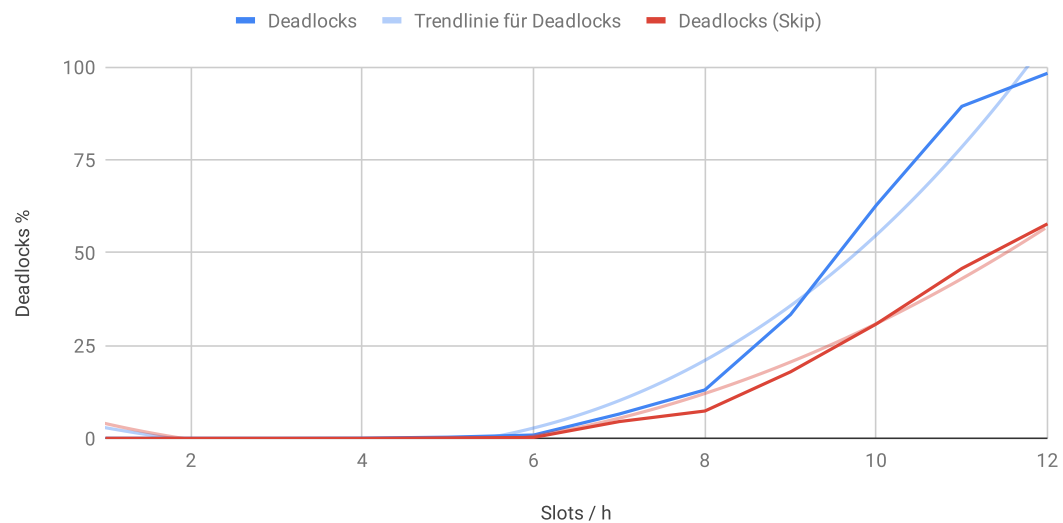


Abbildung 22: Verklemmungen in Abhängigkeit von Slots pro Stunde. Blau: Tourplan mit strenger Befolgung des Curriculums. Rot: Tourplanvariante, in der das Überspringen belegter Stationen erlaubt ist.

Aufbau Bei der Untersuchung der Terminslots pro Stunde wurde immer die maximale Teilnehmeranzahl von 25 Personen angenommen. Darüber hinaus wurden die Slots immer mit möglichst großem zeitlichen Abstand zueinander angelegt, so wie es auch in der Realität Praxis ist – erst halbstündlich, dann viertelstündlich.

Resultate Es zeigte sich eine progressive Systemreaktion sowohl bei der Verklemmungsrate als auch bei der Reibung. Bis zu einer bestimmten Besucherbelastung gibt es keine messbaren Verklemmungen. In Abbildung 22 ist gut zu erkennen, wie ab sechs Buchungen pro Stunde die ersten Blockierungseffekte eintreten. Die Reibung reagiert ähnlich, aber etwas früher – ab vier Buchungen pro Stunde, was in Abbildung 23 zu sehen ist. Auffällig ist, dass die weniger strenge Tourplanvariante überhaupt keinen Einfluss auf die Reibung zu haben scheint, der positive Einfluss auf die Verklemmungsrate aber sehr deutlich ist.

Diskussion Über die Gründe für die Ergebnisse kann ohne genauere Untersuchung nur spekuliert werden. Vorstellbar ist, dass betroffene Gruppen lediglich die letzten Stationen eines mehrere Stationen langen Rückstaus überspringen, bis sie an eine Station kommen, wo das Überspringen nicht mehr möglich ist.

Auslastungsreihe Slots / h

Reibung in Abhängigkeit von Slots / h

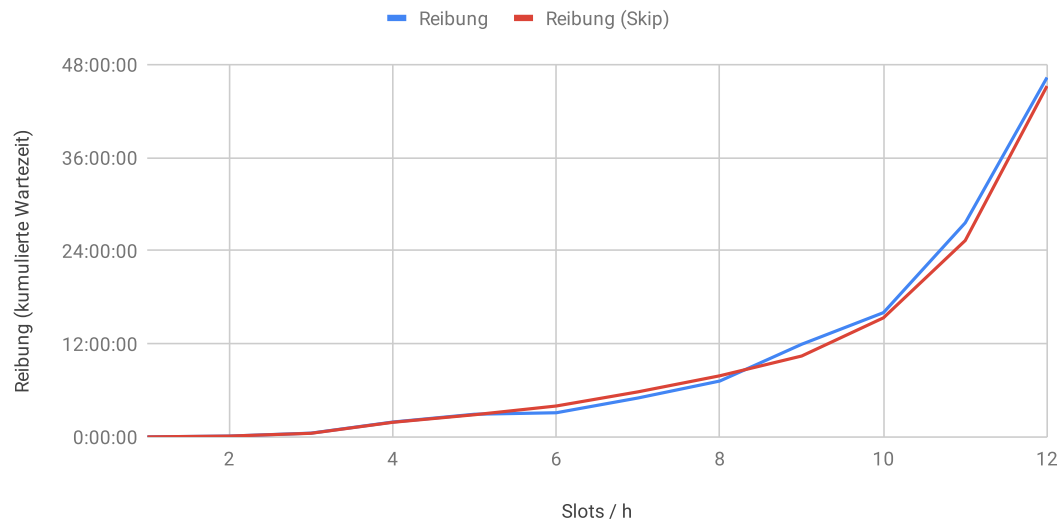


Abbildung 23: *Reibung (akkumulierte Wartezeit eines Buchungstages) in Abhängigkeit von Slots pro Stunde.*

4.2.5. Experiment: Auslastungsreihe für Teilnehmer pro Stunde

Vorbetrachtung Die Untersuchung der Teilnehmer pro Terminslot stellt eine Verfeinerung der bisherigen Auslastungsuntersuchung in Experiment vier dar.

Aufbau Für eine vollständige Untersuchung müssten alle Kombinationen von Slots pro Stunde mit Teilnehmerzahl pro Slot simuliert werden. Aus praktischen Erwägungen wurden nur drei Simulationsreihen durchgeführt: für vier, acht und zwölf Slots pro Stunde. Das entspricht einer geringen, hohen und übermäßigen Systembelastung durch Gruppen.

Resultate Es zeigte sich, dass die Teilnehmerzahl geringeren Einfluss hat, als erwartet wurde. Insbesondere bei geringer bis mittlerer Auslastung mit Gruppen fällt sie kaum ins Gewicht. Erst bei einer hohen Gruppenbelastung macht auch die Teilnehmerzahl einen Unterschied.

Diskussion Grund ist vermutlich, dass die Belegung von Exponaten nur von der Gruppenanzahl abhängt, während die Teilnehmeranzahl lediglich für die Verteilerknoten und Wartebereiche von Bedeutung ist. Da Verteilerknoten und

Auslastungsreihe Teilnehmer / Slot (8 Slots / h)

Deadlocks in Abhängigkeit von Teilnehmer / Slot

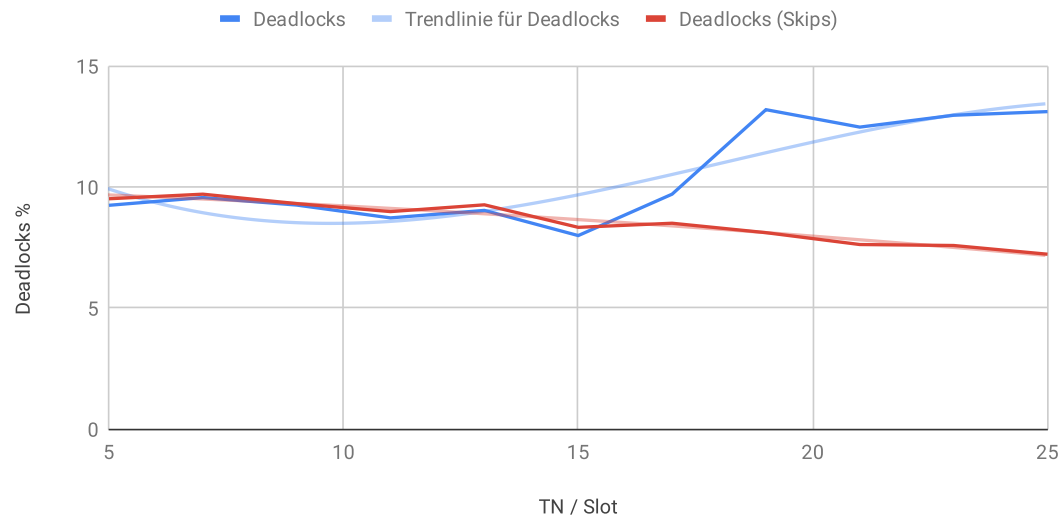


Abbildung 24: Verklemmungsrate in Abhängigkeit von der Teilnehmerzahl pro Slot. Erst ab mittlerer Systemlast fällt die Teilnehmerzahl ins Gewicht und das auch nur in der strengen Tourvariante (blau).

Wartebereiche wesentlich größere Kapazitäten haben als Exponate, ist zu erwarten, dass diese erst später an ihre Auslastungsgrenzen stoßen. Die Reibung ist im Wesentlichen unbeeinflusst von der Teilnehmerzahl und scheint dem Zufall unterworfen. Erst bei extremer Besucherauslastung zeigt sich ein Zusammenhang.

4.2.6. Zusammenfassung & Auswertung

Die Simulationsexperimente haben ergeben, dass die Vorhersagen des Simulators als plausibel einzuschätzen sind. Die gemessenen Zeiten von Führungen im realen System fallen in denselben Bereich, der für ihre simulierten Gegenstücke vorhergesagt wird.

Die Simulationsergebnisse legen nahe, dass das Leitliniendokument für den Führungsablauf in der derzeitigen Betriebspraxis nicht erfüllbar ist, weil für die korrekte Umsetzung mehr Zeit benötigt wird, als derzeit zur Verfügung steht. Dieser Widerspruch wird von den Besucherreferenten derzeit durch inhaltliche Auslassungen aufgelöst. Sinnvoller wäre eine inhaltliche Reduzierung in den Leitlinien oder eine Erhöhung der Führungszeit um ca. 15 Minuten.

Da keine Messdaten für einen vollständigen Buchungstag vorliegen, können die in der Simulation vorhergesagten Blockierungs- und Verzögerungseffekte zwischen Besuchergruppen nicht validiert werden. Die Vorhersagen sind aber insofern plausibel, dass sie sich mit meinen persönlichen Erfahrungen in der

Auslastungsreihe Teilnehmer / Slot (12 Slots / h)

Reibung in Abhängigkeit von Teilnehmer / Slot

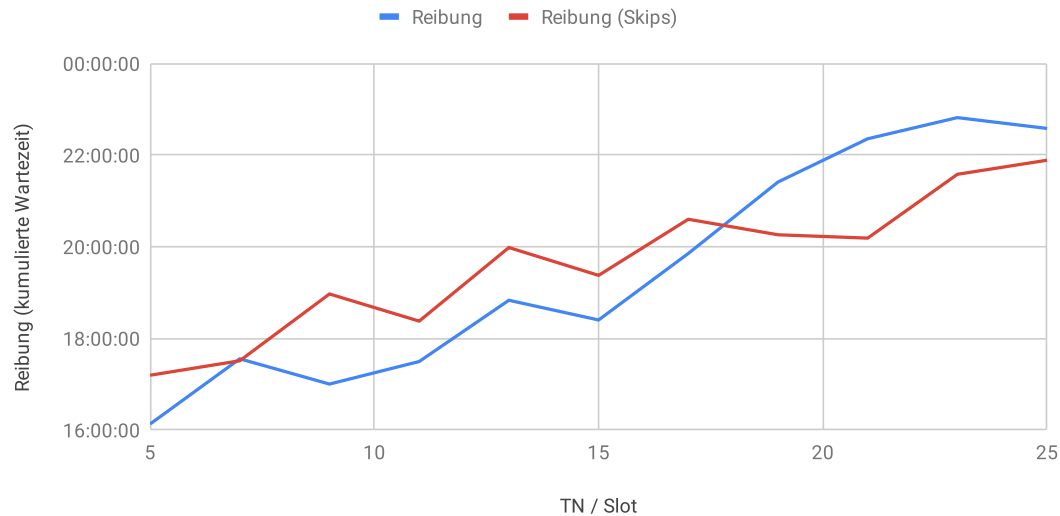


Abbildung 25: Reibung in Abhängigkeit von der Teilnehmerzahl pro Slot. Erst bei hoher bis sehr hoher Systemlast fällt die Teilnehmerzahl ins Gewicht.

untersuchten Gedenkstätte decken. Die Auslastungsexperimente zeigen einen raschen Anstieg von Reibung und Verklemmungen, sobald ein bestimmtes Besucheraufkommen überschritten wird. Interessant ist, dass die Gruppenobergrenze in der Gedenkstätte genau in dem Bereich liegt, der sich in den Auslastungsexperimenten als effektive Zone herausstellte. In dieser Zone von 8 Gruppenslots pro Stunde treten zwar bereits deutliche Reibungseffekte auf, welche aber noch tolerierbar sind.

Überraschend war die Feststellung, dass die Teilnehmerzahl pro Gruppe wesentlich geringeren Einfluss auf Reibung und Verklemmungen hat, als die Gruppenanzahl pro Stunde. Die fällt tatsächlich erst ins Gewicht, wenn Reibung und Verklemmungsrate den tolerierbaren Bereich längst überschritten haben.

5. Fazit

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Methoden zum Modellieren und Evaluieren von Führungsangeboten in Museen untersucht. Dazu wurde ein Simulatorframework geschaffen und mit diesem ein Simulator zur Untersuchung eines konkreten Museums erstellt. Durch Simulationsexperimente wurde die Realisierbarkeit des derzeitigen Führungsangebotes überprüft, bewertet und Vorhersagen gemacht.

Die folgenden, auf Seite 19 gestellten Anforderungen wurden erfüllt:

- Die Topologie eines Museums lässt sich inkrementell erstellen und sukzessive erweitern.
- Es können Führungspläne mit dynamischem Verhalten erstellt werden.
- Buchungstabellen können in konkreter Form eingegeben und auch generiert werden.
- Ankunftszeiten, Besuchs- und Laufzeiten werden als stochastische Prozesse nachgebildet.
- Statistische Daten werden automatisch gesammelt und ausgegeben.

Nicht abschließend validiert wurde die korrekte Ausführung des Modells. Die durchgeführte Feldstudie und damit auch die gewonnene Stichprobe waren dafür zu klein. Es war nicht möglich, einen vollständigen Vergleich der empirischen mit der simulativen Stichprobe durchzuführen. Die Ergebnisse wurden zwar als plausibel eingestuft, darüber hinaus konnte jedoch keine belastbare Aussage getroffen werden. Der Simulator ließe sich mit der angewandten Methode und einer umfangreicheren empirischen Stichprobe validieren.

Die benutzte Metrik zur Beurteilung der Verklemmungsrate und Reibung könnte verbessert werden. Insbesondere die Verklemmungsrate lässt nur schwer in die Realität übertragen, da Verklemmungen nicht in der absoluten Form auftreten, sondern sich in Spannungen zwischen Besucherreferenten und Besuchern manifestieren.

Für weitere Untersuchungen werden daher folgende Verbesserungen vorgeschlagen:

- Eine größere empirische Stichprobe mit einem automatisierten Aufbau der Messung. Vorstellbar sind Annäherungssensoren, die vorbeilaufende Besucher registrieren und zu diesem Zweck an Schlüsselstellen im Gelände verteilt werden können.
- Es sollte eine verbesserte Metrik zur Bewertung der Reibung während des Besucherbetriebs gefunden werden. Vorstellbar wäre z. B. die Auswertung der durchschnittlichen Nähe von Besuchergruppen zueinander, gewichtet mit der Teilnehmerzahl. Da überfüllte Räume und große Menschenansammlungen ein Stressfaktor sind, könnten sie eventuell besser vermitteln, wie „voll“ sich das Museum für den einzelnen Besucher anfühlt.

A. Annotierte Grundrisse des Gedenkstättenengeländes

Mit den Grundrissen der Gebäude konnten die Positionen der einzelnen Stationen sowie deren relativer Abstand zueinander bestimmt werden. Während der Erstellung des Tourgraphen wurden die Grundrisse mit zusätzlichen Informationen angereichert. So wurden die Positionen von Stationen grün markiert und beim, in Abbildung 26 zu sehenden, Grundriss des Kellergefängnisses die Zellennummern hinzugefügt.

Da keine Maßstäbe vorhanden waren, um Abstände bestimmen zu können, wurden die Außenmaße der Gebäude per Satellitenbild ausgemessen und dann auf eine Meterskala übertragen. So beträgt die Länge des nördlichen Flügels des Neubaus genau 67 Meter, wie auf Abbildung 27 zu sehen ist. Die Skala mit äquidistanten Markierungen wurde von Hand erstellt und dann so skaliert, dass 67 Markierungen von Wand zu Wand reichen. Abbildung 28 zeigt den Grundriss des ersten Obergeschosses im Neubau, welcher mit dem des Erdgeschosses fast identisch ist. Anhand der grünen Markierungen ist gut zu erkennen, dass dort viele Stationen an anderen Positionen liegen, besonders im mittleren und unteren Flügel.

Die Grundrisse wurden von der Gedenkstätte Berlin-Hohenschönhausen bereitgestellt.



Abbildung 26: Grundriss des Kellergefängnisses (U-Boot).

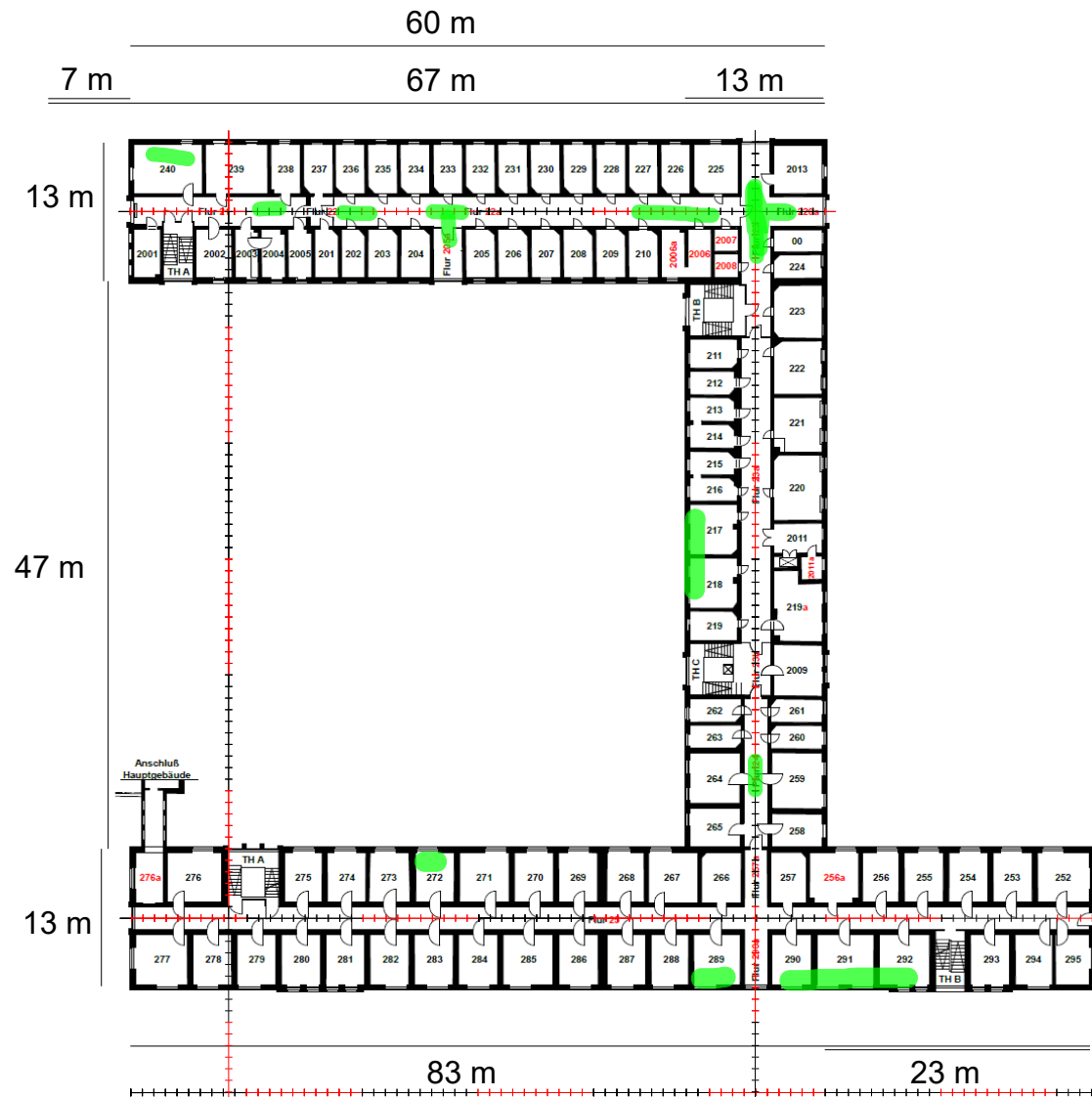


Abbildung 28: Grundriss des ersten Obergeschosses des Neubaus.

B. Aktivitätsdiagramme Standardtour

Aktivitätsdiagramm Standardtour

Das Aktivitätsdiagramm in Abbildung 29 zeigt die globale Sicht auf einen geführten Rundgang, von der Ankunft der Besuchergruppe bis zum Verlassen des Geländes. Einzelne Aktivitäten sind in weiteren Aktivitätsdiagrammen genauer beschrieben.

Einführung

Das Aktivitätsdiagramm in Abbildung 30 zeigt die Optionen des Besucherreferenten bei der Wahl eines Modells, an dem die Einführung stattfinden soll. Auf dem Gelände existieren drei dieser Modelle, die das Gedenkstätten Gelände und den ehemaligen Sperrbezirk zeigen.

U-Boot Hauptzugang

Je nachdem, ob das Kellergefängnis über den Hauptzugang oder den Schleusenzugang betreten wird, ergibt sich eine andere Reihenfolge beim Ablaufen der einzelnen Kellerstationen. Es wird pro Flur eine Zelle gezeigt, wobei hier eine große Auswahl an Optionen besteht. Die Variante, bei der das Kellergefängnis über den Hauptzugang betreten wird, ist in Abbildung 31 zu sehen.

U-Boot Schleusenzugang

Wird das Kellergefängnis über den Schleusenzugang betreten, gibt es weniger Optionen für den Besucherreferenten, da auf dieser Seite des Kellers weniger begehbare Zellen vorhanden sind. Abbildung 32 zeigt das Aktivitätsdiagramm dieser Variante.

Wechsel vom Kellergefängnis zum Neubau

Der Übergang vom Kellergefängnis zum Neubau ist der brisanteste Flaschenhals des Geländes. Die Gebäude und ihre Zugänge liegen nur wenige Meter auseinander, weshalb an dieser Stelle sehr wenig Platz ist. Ungünstigerweise liegen genau hier zwei inhaltlich wichtige Stationen, die nur einmalig auf dem Gelände vorhanden sind und von jeder Gruppe besucht werden müssen. Besucherreferenten verschaffen sich an dieser Stelle deshalb kurz einen Überblick und steuern die am nächsten liegende, freie Station an. Das Aktivitätsdiagramm in Abbildung 33 zeigt, wie sich dieser Prozess so lange wiederholt, bis alle Stationen dieses Bereichs besucht worden sind.

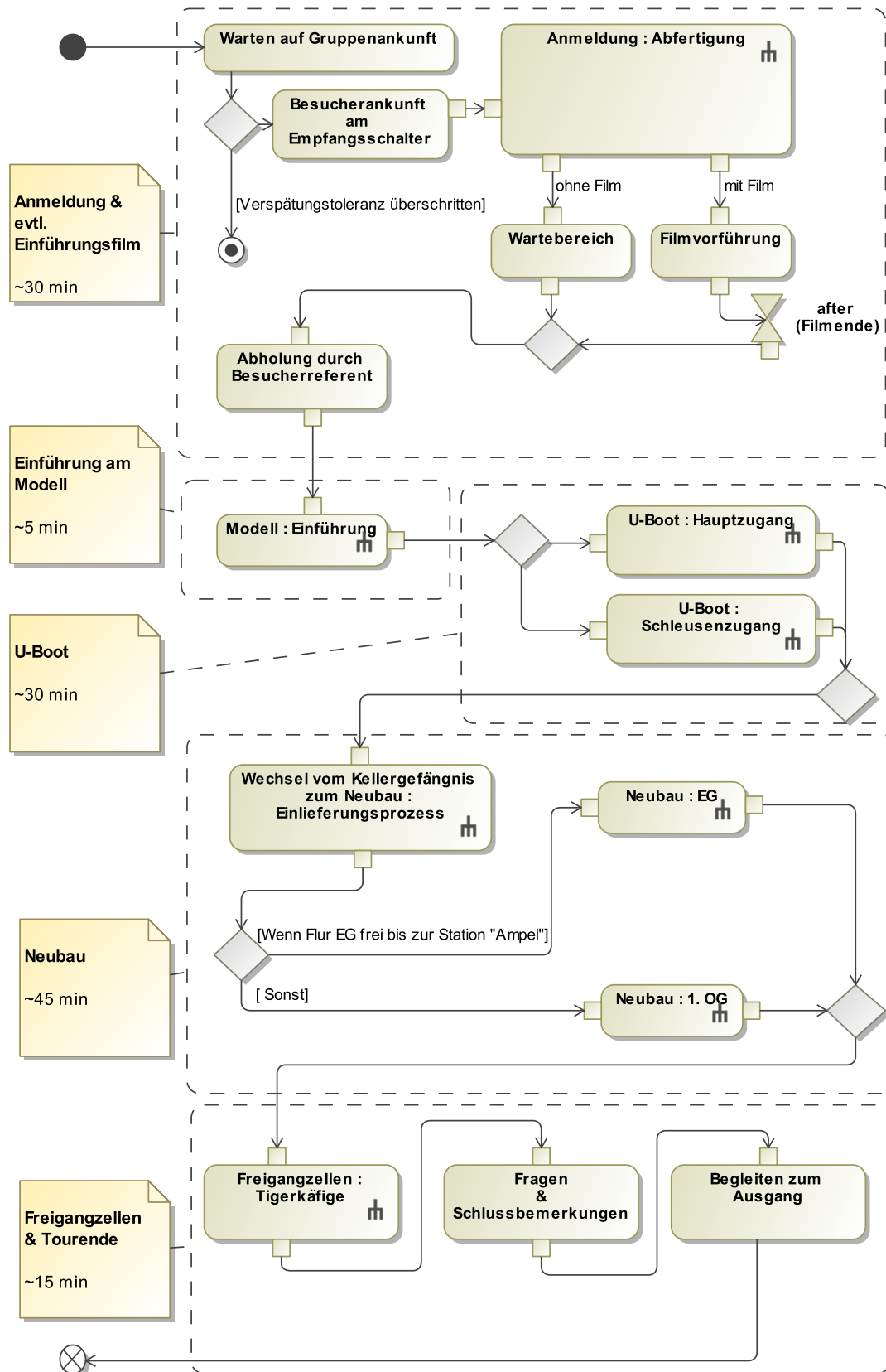


Abbildung 29: Aktivitätsdiagramm der Standardtour.

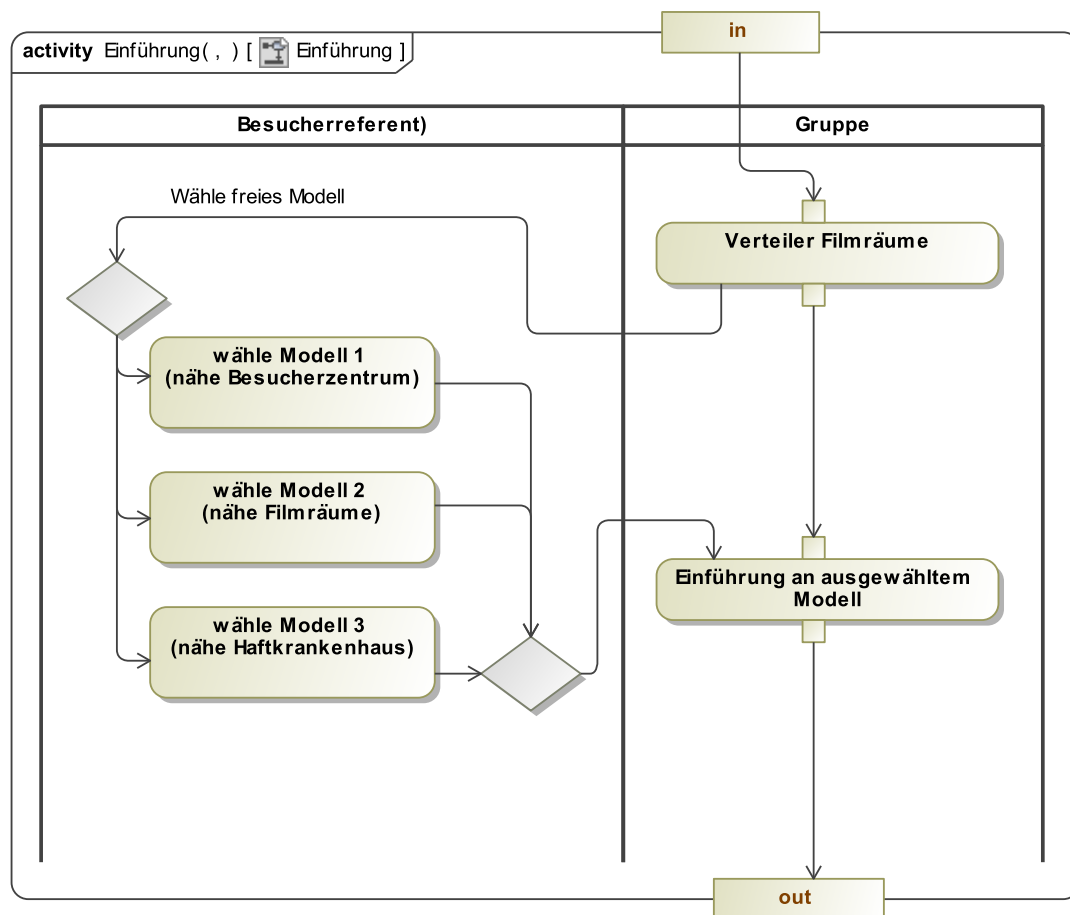


Abbildung 30: Aktivitätsdiagramm der Einführung.

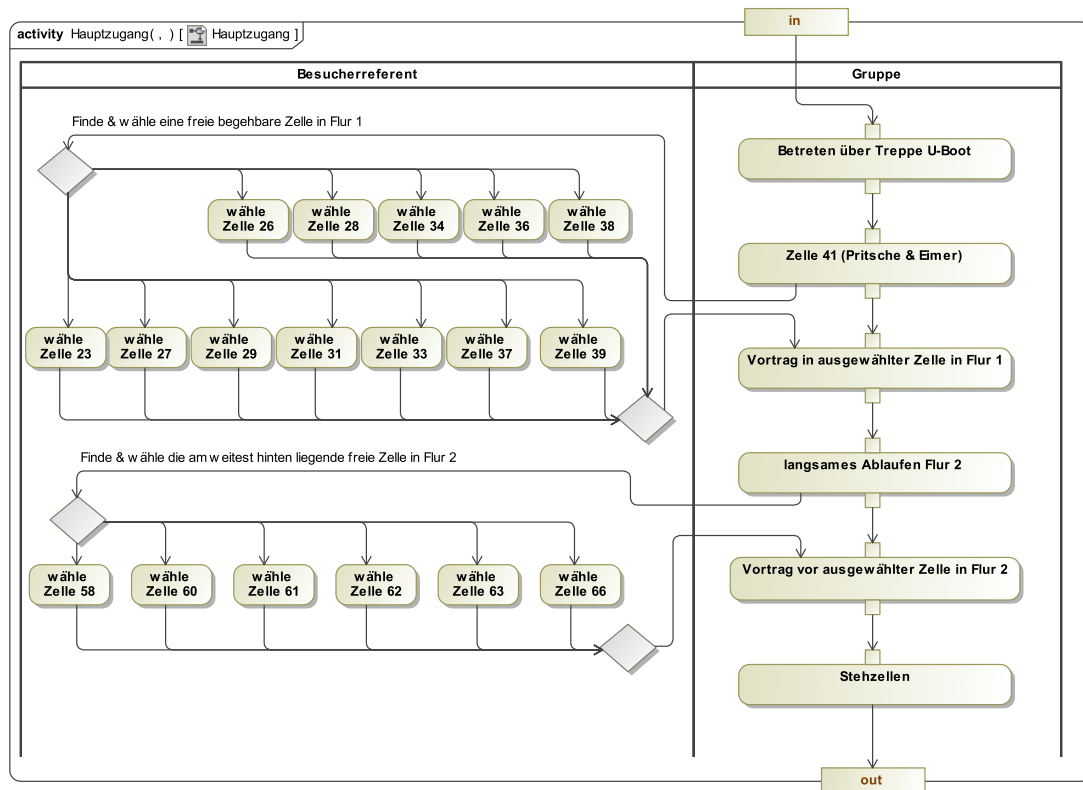


Abbildung 31: Aktivitätsdiagramm der Führungsvariante, bei der das U-Boot über den Hauptzugang betreten wird.

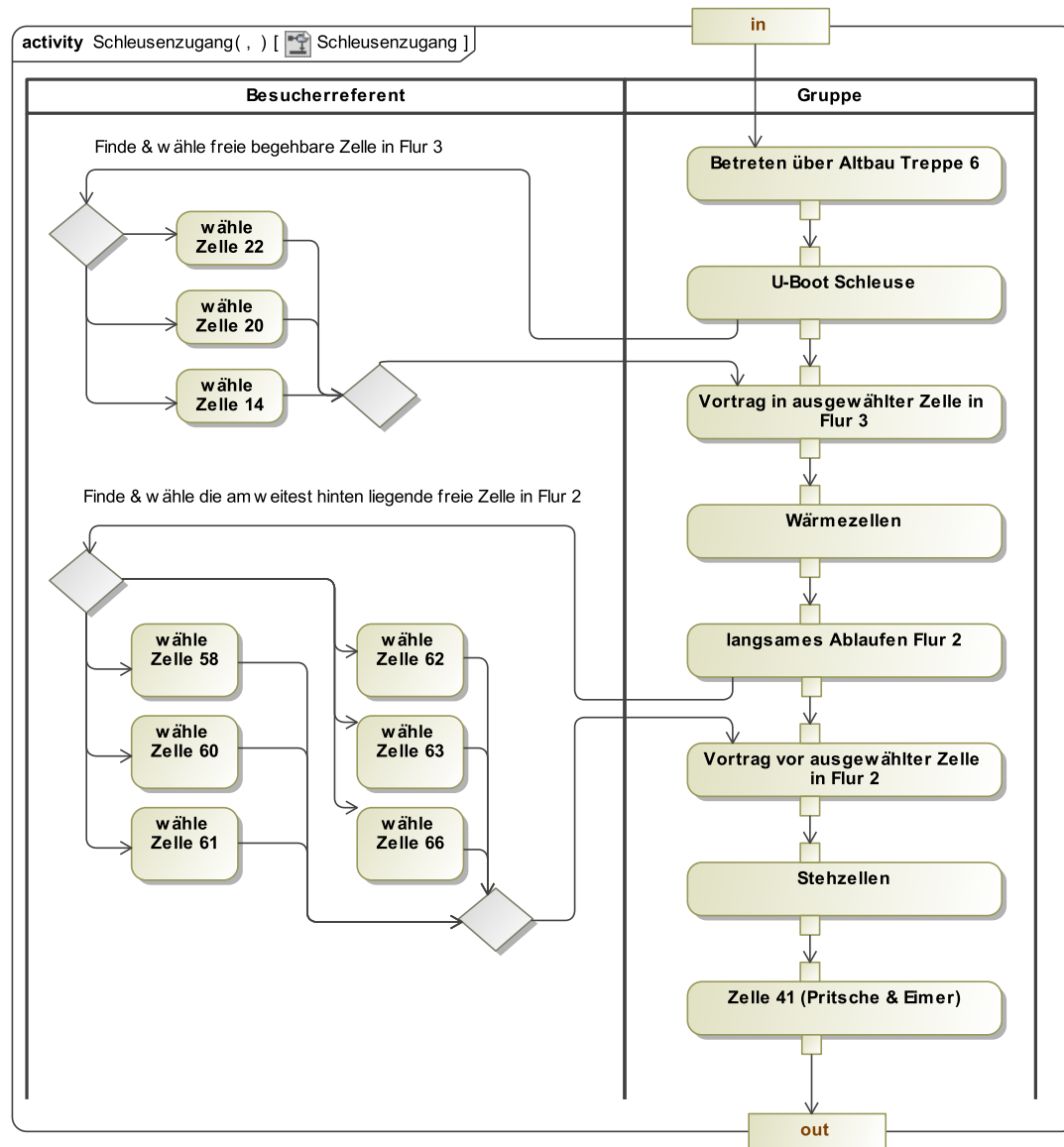


Abbildung 32: Aktivitätsdiagramm der Führungsvariante, bei der das U-Boot über den Schleusenzugang betreten wird.

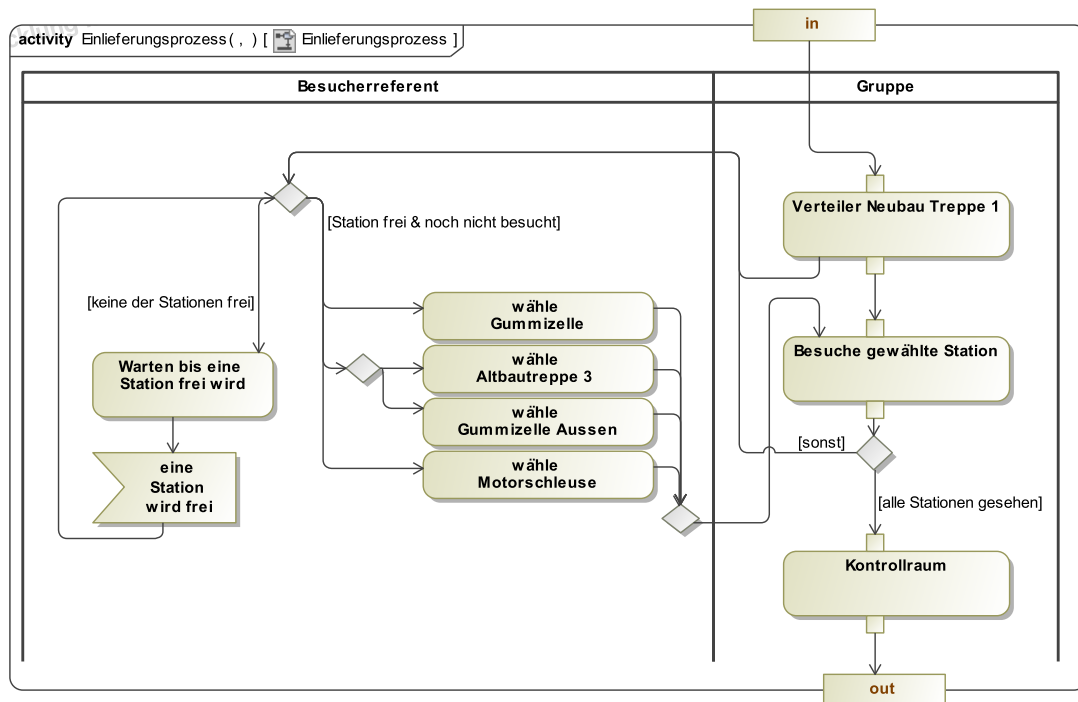


Abbildung 33: Aktivitätsdiagramm, das den Wechsel zwischen dem Kellergefängnis und dem Neubau beschreibt.

Neubau Erdgeschoss

Innerhalb des Neubaus ist die Route weitgehend linear und ohne Verzweigungen, wie in Abbildung 34 gut zu erkennen ist. Lediglich kurz vor dem Verlassen des Gebäudes gibt es eine Auswahl von mehreren Vernehmerzimmern.

Neubau 1. Obergeschoss

Ist beim Betreten des Neubaus ersichtlich, dass das Erdgeschoss überfüllt ist, kann der Besucherreferent auf das 1. Obergeschoss ausweichen. Die Topologie ist dort weitestgehend gleich, allerdings sind manche, inhaltlich äquivalente Stationen im Obergeschoss nicht vorhanden, wie z. B. der Haftrichterraum. In Abbildung 35 wird dieser Unterschied deutlich sichtbar.

Freigangzellen

Das Aktivitätsdiagramm in Abbildung 35 zeigt, dass bei den Freigangzellen aus drei Zellen ausgewählt werden kann.

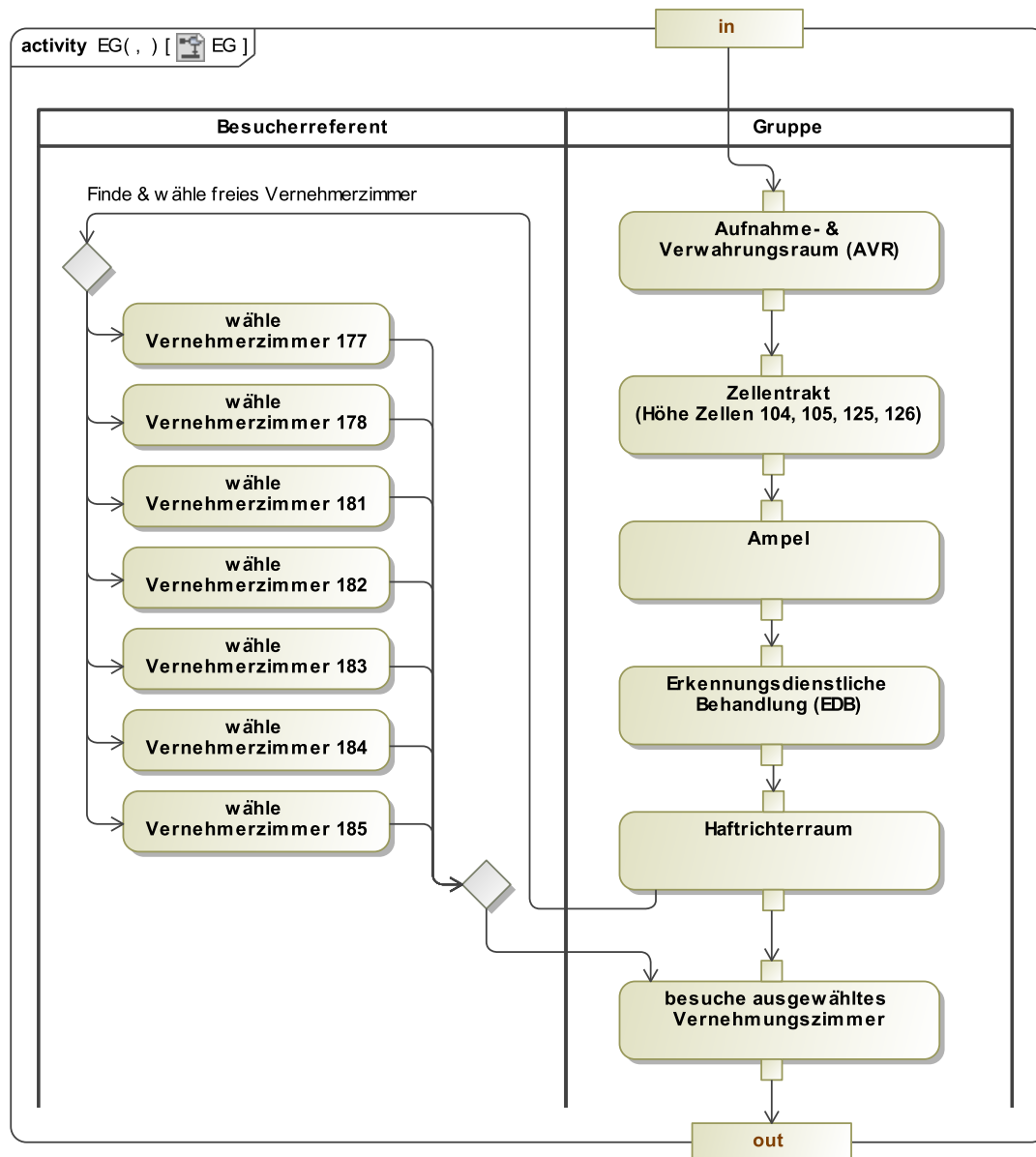


Abbildung 34: Aktivitätsdiagramm für den Besuch des Erdgeschosses.

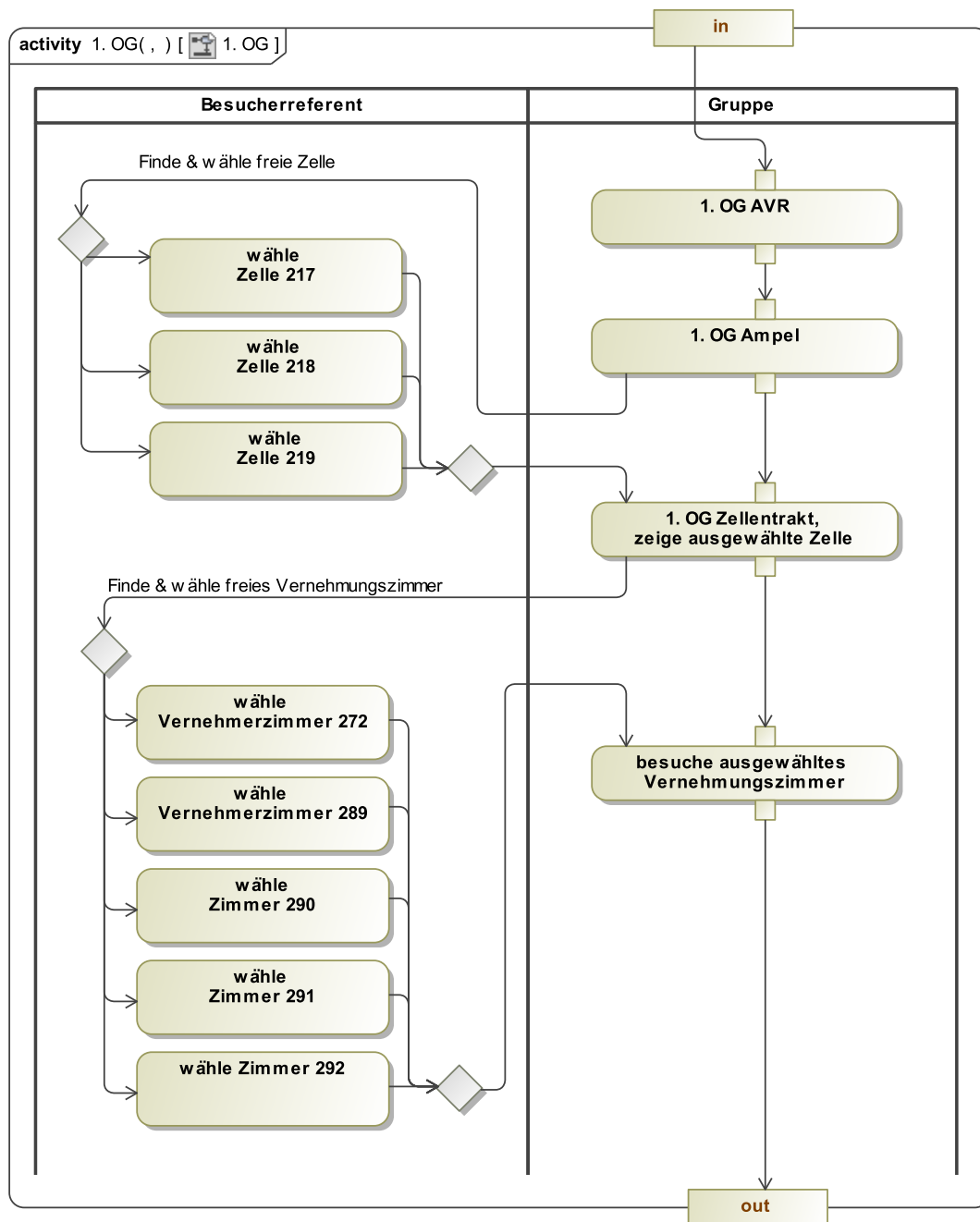


Abbildung 35: Aktivitätsdiagramm für den Besuch des ersten Obergeschosses.

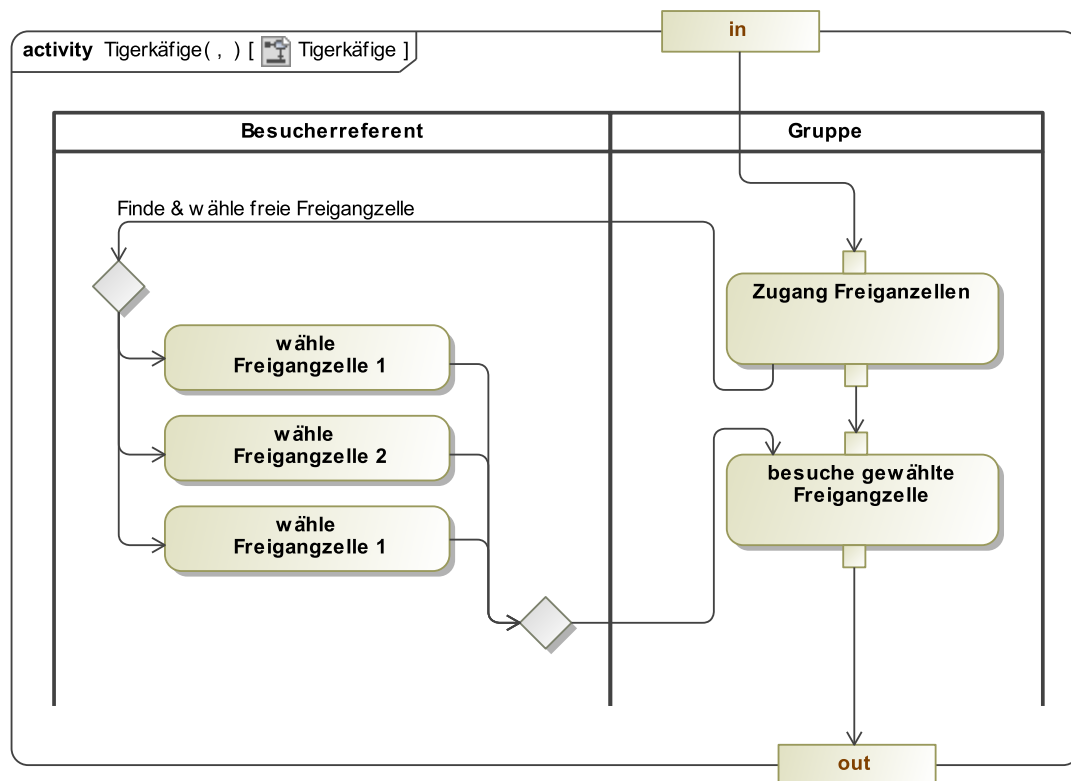


Abbildung 36: Aktivitätsdiagramm für den Besuch der Freigangzellen.

C. Quellcode und Dokumentation

Alle für diese Arbeit verwendeten Dokumente liegen in digitaler Form auf der beigefügten CD vor.

Das sind:

1. die gescannten Datenbögen der Feldstudie,
2. die Kalkulationstabellen mit der statistischen Auswertung der Feldstudie,
3. Quellen der Gedenkstätte Berlin-Hohenschönhausen,
4. UML-Klassen- und Aktivitätsdiagramme,
5. die SLX-Quelldateien des erstellten Simulatorframeworks,
6. die Ergebnisse der Simulationsexperimente als rtf- und PDF-Dateien,
7. diese Diplomarbeit als PDF-Datei.

Literatur

- [Erl10] ERLER, Peter ; GEDENKSTÄTTE BERLIN-HOHENSCHÖNHAUSEN (Hrsg.): *Leitlinien über Inhalt und Form geführter Rundgänge durch die ehemalige Untersuchungsanstalt des Ministeriums für Staatssicherheit*. Gedenkstätte Berlin-Hohenschönhausen, 2010
- [KB17] KOCKISCH, André ; BERTHEL, Beatrice: 8. Tätigkeitsbericht (2015/2016) / Stiftung Gedenkstätte Berlin-Hohenschönhausen. 2017. – Forschungsbericht
- [KCF14] KOCKISCH, André ; CONU, Katharina ; FREYBE, Ulrike: 6. Tätigkeitsbericht (2011/2012) / Stiftung Gedenkstätte Berlin-Hohenschönhausen. 2014. – Forschungsbericht
- [KKRO15] KOCKISCH, André ; KUNZE, Jennifer ; REICHHEIM, Julia ; OLSSON, Magnus: 7. Tätigkeitsbericht (2012/2014) / Stiftung Gedenkstätte Berlin-Hohenschönhausen. 2015. – Forschungsbericht

Selbständigkeitserklärung

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und noch nicht für andere Prüfungen eingereicht habe. Sämtliche Quellen einschließlich Internetquellen, die unverändert oder abgewandelt wiedergegeben werden, insbesondere Quellen für Texte, Grafiken, Tabellen und Bilder, sind als solche kenntlich gemacht. Mir ist bekannt, dass bei Verstößen gegen diese Grundsätze ein Verfahren wegen Täuschungsversuchs bzw. Täuschung eingeleitet wird.

Berlin, den 28. Januar 2019

Statement of authorship

I hereby proclaim my sole authorship of this thesis and that I have not submitted it for examination elsewhere. All sources, including internet sources, that have been copied or reproduced, especially sources for text, graphics, tables and pictures, have been correctly cited. I understand that the violation of these principles can lead to a legal process due to fraud or the attempt of fraud.

Berlin, January 28, 2019