

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Fakultät für Informatik



Abschlussbericht: Wissenschaftliches Individualprojekt

VR-Navigation in der menschlichen Schädelbasis

Autor:

Manuel Kosta

14.10.2016

Betreuer:

Prof. Dr.-Ing. Bernhard Preim
Institut für Simulation und Graphik

Patrick Saalfeld, M.Sc
Institut für Simulation und Graphik

Kurzfassung

Diese Arbeit beschreibt die Entwicklung einer prototypischen VR-Applikation welche Medizinstudierende dabei unterstützen soll die anatomischen Strukturen der Schädelbasis zu lernen. In der Applikation können Nutzer sich durch ein annotiertes virtuelles Modell des menschlichen Schädels im Maßstab 1:200 bewegen. Es wird insbesondere auf die Methode zur virtuellen Fortbewegung eingegangen. Einerseits sollte diese nicht zu Symptomen der Simulatorkrankheit führen. Andererseits muss sie eine gute räumliche Orientierung ermöglichen. Eine Teleportationsmethode und eine Plattform, die sich durch Zeigegesten bewegen lässt wurden dafür entwickelt. Bei einer Demonstration wurde die Applikation von Lehrpersonen aus der Anatomie informell evaluiert. Aufgrund der intuitiven dreidimensionalen Darstellung und Interaktion stuften sie die Applikation als hilfreiche Lernunterstützung ein. Die Lehrpersonen bevorzugten die Plattform als Fortbewegungsmethode, da die kontinuierliche Bewegung entlang der Zeigerichtung als intuitiver empfunden wurde als die abrupten Positionswechsel bei der Teleportation. Abschließend wird ein Konzept für eine formelle Evaluation vorgestellt, welche fundiertere Erkenntnisse liefern soll.

Inhaltsverzeichnis

1	Motivation	1
2	Grundlagen	2
2.1	Anatomiestudium	2
2.2	Methoden zur Fortbewegung in immersiven virtuellen Welten . .	3
3	Anforderungsanalyse	7
4	Konzept	8
4.1	Minimap	9
4.2	Labels	9
4.3	Fortbewegung	10
4.3.1	Teleportation	11
4.3.2	Plattform	12
5	Evaluierung	14
5.1	Informelle Evaluation	14
5.2	Konzept für formelle Evaluation	15
6	Ausblick	16
7	Zusammenfassung	16

1 Motivation

Anatomisches Wissen ist die Grundvoraussetzung für das Verständnis von klinischen Problemen [8] und daher Grundbestandteil des Medizinstudiums [22]. Diese Arbeit behandelt insbesondere die anatomische Lehre der Schädelbasis mit Fokus auf der Bezeichnung der knöchernen Strukturen, sowie der Nerven und Blutgefäße, welche durch Knochenöffnungen treten, denn diese Strukturen sind mit herkömmlichen Lernmitteln schwer zu begreifen.

In der Anatomieausbildung müssen Medizinstudierende viele Fakten lernen um sich ein anatomisches Wissen aufzubauen. Nach [17] gibt es zwei unterschiedliche Arten des Anatomiewissens, *räumliches* und *symbolisches*. Unter räumlichem Wissen werden die Form, Größe, Textur, Unterteilung, sowie interne und externe morphologische Eigenschaften zusammengefasst. Das symbolische Wissen umfasst hingegen die Bezeichnungen und Beziehungen zwischen Strukturen. Für das symbolische Wissen haben sich Vorlesungen, Diskussionen und Lehrbücher als effektivste Lernmethoden bewährt, während das räumliche Wissen am besten bei der Sektion eines Körperspenders gelernt wird. In jüngster Zeit gibt es verstärkte Anstrengungen Sektionen durch andere Lehrmethoden zu ergänzen oder sie komplett zu ersetzen. Zum einen sind Sektionen sehr zeitaufwendig, kostenintensiv und benötigen geschultes Trainingspersonal, zum anderen gibt es nicht immer Körperspender sowie ethische Bedenken. Außerdem sind die Studierenden bei der Sektion potentiell gesundheitsgefährdenden Formalindämpfen ausgesetzt [7]. Bereiche, die bei einer Sektion schwer zugänglich sind, wie die Schädelbasis, müssen ohnehin eher über andere Ressourcen gelernt werden. Physische und virtuelle Modelle werden häufig als Ergänzung zu Büchern verwendet, da sie die räumlichen Gegebenheiten besser darstellen können. Virtuelle Modelle bieten den Vorteil, dass sie, mit Hilfe von Annotationen und begleitenden Texten direkt am Modell, neben dem räumlichen Wissen auch zusätzliches symbolisches Wissen vermitteln können. Allerdings gestaltet sich die Darstellung und Navigation der 3D Daten auf einem 2D Monitor problematisch [7]. Daher eignen sich physische Modelle noch eher um die räumliche Komponente zu lernen. Auch weil der Tastsinn der Studierenden mit einbezogen wird.

Die Technologie der immersiven virtuellen Realität (VR) hat das Potential die Darstellung virtueller Modelle plastischer und die Interaktion mit ihnen natürlicher zu gestalten. Mit einer VR-Brille können Nutzer bspw. eine virtuelle Welt auf die gleiche Weise betrachten wie die reale. Die Kopfbewegungen des Nutzers werden auf eine virtuelle Kamera übertragen und das Bild dieser Kamera wird in stereoskopischem 3D in der Brille angezeigt. So wird die visuelle Wahrnehmung der Realität nachgeahmt und beim Nutzer stellt sich ein Gefühl der Präsenz ein. Über Eingabegeräte, welche ihre eigene Position und Orientierung im Raum erfassen (6 Freiheitsgrade), können auch die Hände mit in die virtuelle Welt abgebildet werden, wodurch das Gefühl der Präsenz gesteigert wird.

In dieser Arbeit wird die natürliche dreidimensionale Darstellung und Interaktion moderner VR Brillen verwendet um einen Prototypen zu entwickeln, der das Selbststudium der anatomischen Strukturen in der Schädelbasis unterstützt. In dem entwickelten Prototypen bewegt sich der Nutzer durch einen überdimensional großen Schädel und kann anhand von Labels die vorhandenen Strukturen lernen. Da die VR-Brille allerdings nur in einem begrenztem Bereich

verfolgt werden kann, werden Methoden der virtuellen Fortbewegung benötigt um sich in der virtuellen Welt über diesen begrenzten Bereich hinaus bewegen zu können. Bewegungsmethoden in VR sind ein aktuelles Thema in der Forschung [20], daher werden in dem entwickelten Prototypen zwei ausgewählte Methoden miteinander verglichen. Generell ist darauf zu achten, dass Nutzern nicht durch die Simulatorkrankheit schlecht wird [12]. Außerdem spielen im Zusammenhang mit der Anatomielehre die räumliche Orientierung und die einfache Bedienung eine wichtige Rolle.

2 Grundlagen

Dieser Abschnitt dient als Grundlage für das Verständnis der Designentscheidungen, die später bei der Beschreibung des Prototypenkonzeptes getroffen werden. Zum einen wird die standardmäßige Verfahrensweise, sowie aktuelle Entwicklungen in der Anatomielehre beschrieben. Zum anderen wird das Forschungsfeld der VR-Fortbewegungsmethoden näher beleuchtet.

2.1 Anatomiestudium

In jüngerer Vergangenheit schrumpft der Teil der Anatomielehre im Curriculum der Medizinstudierenden immer weiter, sodass Effizienz und Effektivität der Lehrmethoden mehr Bedeutung zukommt [7]. Eine der größten Herausforderungen für die Medizinstudierenden ist es, sich die Bezeichnungen der Vielzahl an anatomischen Strukturen zu merken [1]. Traditionell werden diese, neben dem Kursangebot der Universität, im Selbststudium aus diversen Büchern gelernt. Diese Bücher lassen sich in zwei Kategorien einteilen. Einerseits lernen die Studierenden die Bezeichnungen und Funktionen anatomischer Strukturen aus Lehrbüchern, in denen diese meist in Textform beschrieben sind. Andererseits lernen sie mit Hilfe von beschrifteten Abbildungen in Anatomieatlanten die Bezeichnungen der Strukturen und wo im Körper sie sich befinden. Auch Mischformen, sogenannte „Lernatlanten“, die sowohl beschriftete Abbildungen als auch erklärenden Text beinhalten werden eingesetzt.

Die räumlichen Gegebenheiten von komplexen Strukturen allein aus zweidimensionalen Abbildungen zu lernen, erfordert von den Medizinstudierenden allerdings viel räumliches Vorstellungsvermögen und sie verbringen viel Zeit damit im Buch die Abbildungen der Struktur aus möglichst vielen Blickwinkeln zu suchen. Weiterhin vermindert die Monotonie beim Lernen allein aus Büchern die Lerneffektivität.

Mit der weiten Verbreitung von Computern heutzutage und deren Möglichkeit Inhalte dreidimensional und interaktiv darzustellen, werden computergestützte Lernmittel immer attraktiver. Das Spektrum computergestützter Lernmittel reicht von digitalen Versionen der Lehrbücher mit interaktiven Verknüpfungen zwischen Textpassagen und 2D Abbildungen bis hin zu webbasierten, interaktiven, dreidimensionalen, hochauflösenden Darstellungen realer Patientendaten. Eine Übersicht dazu ist beispielsweise in [15] zu finden. Zusätzliche Module, wie Quizzes oder Puzzels ergänzen diese Lernmittel außerdem um eine spielerische Komponente, welche Frust aus Langeweile bei den Studierenden vermeiden und damit die Effektivität steigern soll.

Je umfangreicher und komplexer die Inhalte der computergestützten Werkzeuge werden, desto schwieriger wird es bei ihrem Entwurf die Benutzerfreundlichkeit zu wahren, damit die Medizinstudierenden nicht mehr Zeit damit verbringen müssen die korrekte Anwendung des Lernmittels zu erlernen, als die eigentlich für ihr Studium wichtigen anatomischen Inhalte. Die Navigation in dreidimensionalen Inhalten auf zweidimensionalen Monitoren mit zweidimensionalen Eingabegeräten stellt beispielsweise eine immense Herausforderung dar.

2.2 Methoden zur Fortbewegung in immersiven virtuellen Welten

In immersiven Umgebungen wird ein Großteil oder sogar die komplette visuelle Wahrnehmung durch rein virtuelle Reize stimuliert, sodass der Nutzer sich in der virtuellen Welt präsent fühlt. Wie in traditionellen Desktop-VR Anwendungen, muss der Nutzer auch in immersiven virtuellen Welten in der Lage sein, seinen Blickwinkel auf die virtuelle Welt zu verändern. Methoden, die auf traditionelle Eingabegeräte wie Maus, Tastatur und Joystick setzen, sind in immersiven Umgebungen eher ungeeignet. Sie lösen schnell Symptome der Simulatorkrankheit aus, weil die Diskrepanz zwischen realer und der virtuell erlebten Bewegung, der sogenannten *Vektion*, zu groß ist. Zu den Symptomen der Simulatorkrankheit gehören unter anderem Schläfrigkeit, Ermüdung, Blässe Schwindelgefühl und Übelkeit bis hin zum Erbrechen. Wie genau die Simulatorkrankheit und Vektion zusammenhängen ist jedoch noch nicht genau erforscht [12].

Die traditionellen Desktop Methoden wirken durch diese Diskrepanz zusätzlich sehr unnatürlich für den Nutzer und brechen damit die Immersion. Die natürlichste Methode ist es, die Kopfbewegungen des Nutzers 1:1 in die virtuelle Welt zu übertragen. Beugt sich der Nutzer beispielsweise vor oder läuft einige Schritte, verändert sich die Sicht auf die virtuelle Welt entsprechend. Dies bringt allerdings den Nachteil mit sich, dass der benötigte physische Platz genau so groß ist, wie die virtuelle Welt. Meistens wollen Nutzer allerdings virtuelle Welten erkunden, die um ein vielfaches größer sind als der ihnen zur Verfügung stehende physische Raum, so auch im Anwendungsfall dieser Arbeit (siehe Abbildung 1).

Die aktuelle Technik kann außerdem die Bewegungen des Nutzers nur in einem begrenzten Bereich erfassen. Deshalb wird an natürlicheren Interaktionstechniken zur Fortbewegung in immersiven virtuellen Welten geforscht, die auch auf begrenztem Raum funktionieren. Dabei zu beachten ist unter anderem, dass die Fortbewegung für den Nutzer meistens eine Nebenaufgabe in einer konkreten Applikation darstellt, welche das Lösen der Hauptaufgabe unterstützt. Deshalb sollte die Interaktion zur Fortbewegung möglichst einfach und intuitiv sein um nicht von der eigentlichen Hauptaufgabe abzulenken [4, Kap. 6].

Die Werke [18], [2] und [4, Kap. 6] geben einen ausführlichen Überblick über dieses Forschungsfeld, der hier kurz zusammengefasst wird. Es ergeben sich im Grunde zwei Arten der Fortbewegung in VR. Einerseits die physische Bewegung in einem begrenztem Bereich, die 1:1 in die virtuelle Welt übertragen wird und andererseits die virtuelle Bewegung, die es dem Nutzer erlaubt sich in der virtuellen Welt über die physischen Grenzen hinweg zu bewegen. Dazu wurden in [18] beispielhaft die Koordinatensysteme (KOS) beschrieben, die üblicherweise in einem immersiven VR-Aufbau zu finden sind (siehe Abbildung 2). Diese Arbeit wird sich im weiteren Verlauf häufiger auf diese Koordinatensysteme beziehen. *Tracker Base* ist das Koordinatensystem des Sensors, welcher die Positionen der

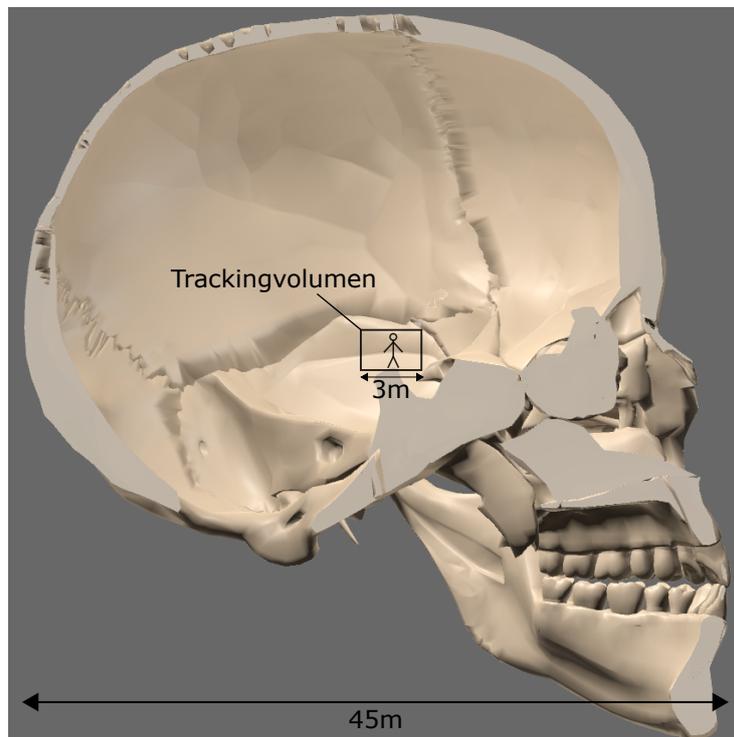


Abbildung 1: Größenverhältnisse bei der Navigation im menschlichen Schädel

zu trackenden Objekte relativ zu seiner eigenen Position bestimmt. Es ist fest im physischen Raum verortet. Zur besseren Handhabung der Nutzerposition, wird relativ zum Tracker Base KOS das *Display Center* KOS definiert, welches meist im Zentrum auf dem Boden des vom Sensor erfassbaren Bereichs gelegt wird. Die Nutzerposition, eingezeichnet als *User Ground Center*, wird relativ zum Display Center KOS angegeben. Das User Ground Center ist die Projektion der Position des Head Trackers auf die Bodenebene. Virtuelle Fortbewegungsmethoden bewegen das Display Center KOS relativ zu dem Welt-KOS der virtuellen Welt.

Bowman hat Methoden der Fortbewegung in Teilaufgaben zerlegt (siehe Abbildung 3). Eine generische Fortbewegungsmethode erlaubt es dem Nutzer die virtuelle Bewegung zu starten und zu stoppen, sowie eine Zielposition und -orientierung anzugeben. In immersiven Umgebungen, die eine VR-Brille verwenden, kann der Nutzer sich uneingeschränkt drehen, sodass eine virtuelle Rotation meist überflüssig ist. Jede der Teilaufgaben kann durch unterschiedliche Methoden realisiert werden. Start und Stopp der Bewegung kann explizit (bspw. über einen separaten Knopf oder eine Geste) oder implizit (mit Auswahl und bei Erreichen der Zielposition) erfolgen. Die Zielposition kann direkt angegeben werden oder indirekt, über eine Richtung und Geschwindigkeit oder Beschleunigung. Für jede dieser Varianten gibt es dann wiederum unterschiedliche konkrete UI-Elemente. Die Richtung kann bspw. durch zeigen mit einem 6-dof-Eingabegerät, durch einen Joystick oder durch ein Steuerkreuz angegeben werden.

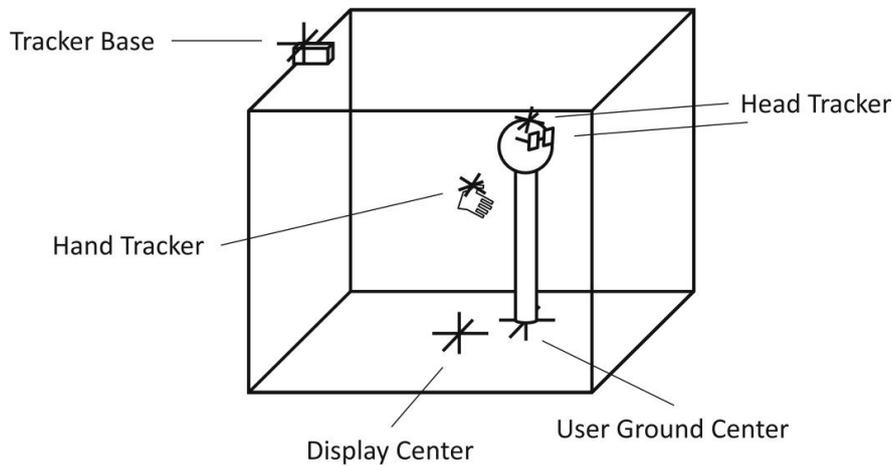


Abbildung 2: Koordinatensysteme in einem üblichen VR-Aufbau [18]

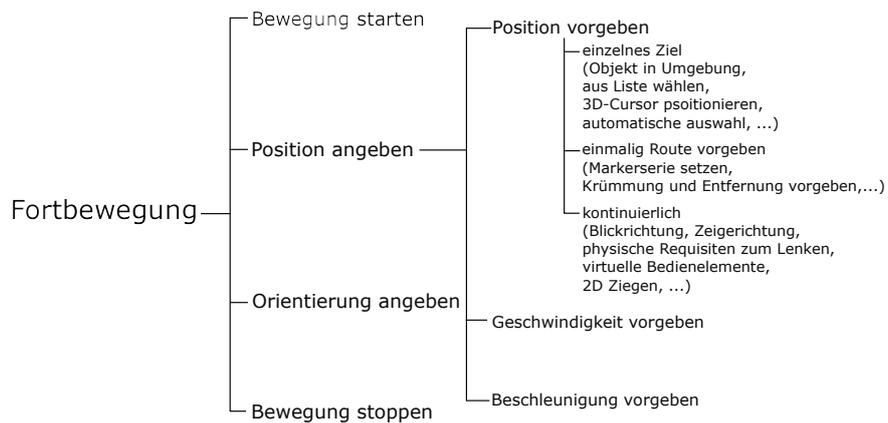


Abbildung 3: Teilaufgaben einer Methode zur Fortbewegung) [3, eigene Übersetzung]

Bowman et. al. [4, Kap.6] klassifizieren diese Fülle an Fortbewegungsmethoden anhand der Metaphern, nach denen sie entworfen wurden in die folgenden Kategorien:

- physisch
- steering
- Routenplanung
- zielbasiert
- manuelle Manipulation

Dabei können sich die verschiedenen Kategorien durchaus überschneiden. Beispielsweise können physische Methoden und Methoden der manuellen Manipulation auch als steering Methoden angesehen werden. Und Fortbewegung mittels Routenplanung ist im Grunde nur ein Spezialfall der Zielbasierten Fortbewegung, bei der zusätzlich zum Ziel die gewünschte Route mit vorgegeben wird.

Unter *physischen Methoden* werden diejenigen verstanden, bei denen der Nutzer seinen Körper genau so, oder zumindest so ähnlich, bewegt als würde er natürlich gehen. Diese eignen sich für Anwendungen immer dann, wenn der Nutzer sich beim Bewegen durch die virtuelle Welt anstrengen soll, wie zum Beispiel in Trainingssimulatoren für das Militär. Unter die physischen Methoden fallen das natürliche Laufen, sowie sogenannte Walking in place Methoden [24], bei denen der Nutzer die natürlichen Laufbewegungen imitiert, aber sich nicht fortbewegt, bspw. indem er auf der Stelle tritt. Auch spezielle Geräte, die dem Nutzer erlauben auf der Stelle zu laufen (bspw. Laufbänder) wie sie unter anderem in [10] beschrieben werden gehören dazu. Eine Möglichkeit natürlich durch virtuelle Welten zu laufen, die größer sind als der zur Verfügung stehende Raum bietet Redirected Walking [16, 23]. Diese Methode nutzt die Ungenauigkeit der menschlichen Wahrnehmung der eigenen Körperbewegungen aus. Durch vom Nutzer unbemerkte Rotationen des Sichtfelds, wird er in der Realität auf eine gekrümmte Bahn, gelenkt während er glaubt in der virtuellen Welt gerade aus zu laufen. Nach Steinecke et. al. [19] muss der Bahnradius mindestens 22m betragen damit die künstliche Rotation dem Nutzer nicht auffällt.

Steering Methoden zeichnen sich dadurch aus, dass der Nutzer kontinuierlich die Bewegungsrichtung vorgeben kann. Häufig werden dafür die Blick-, Torso- oder Zeigerichtung des Nutzers verwendet. Das Lenken kann aber auch über einen virtuellen Joystick oder Lehnbewegungen realisiert werden. Steering Methoden sind einfach zu verstehen und geben dem Nutzer das Höchstmaß an Kontrolle über seine Bewegung.

Eine andere Kategorie von Methoden zur Fortbewegung erlaubt es dem Nutzer eine Route zu planen, welche die virtuelle Kamera anschließend automatisch abfährt. Die Route kann auf unterschiedliche Weisen angegeben werden. Beispielsweise kann der Nutzer sie mit Hilfe von Raycasting direkt in die virtuelle Umgebung, in eine Karte von dieser oder in eine „world in miniature“ [21] einzeichnen. Andererseits kann der Nutzer aber auch nur einzelne Punkte angeben aus denen eine Route interpoliert wird. Weil der Nutzer sich bei der eigentlichen Bewegung keine Gedanken mehr um die Steuerung dieser machen muss, kann er sich während der Bewegung auf andere Aufgaben konzentrieren.

Eine Generalisierung der Fortbewegung mittels Routenplanung sind die zielbasierten Methoden. Bei diesen gibt der Nutzer nur den gewünschten Zielpunkt

der Bewegung vor, nicht aber die Route dorthin. Entweder wird eine Route zwischen Start und Zielpunkt automatisch generiert und abgefahren oder der Nutzer wird direkt zur Zielposition teleportiert. Die Teleportation hat die Eigenschaft, dass sie beim Nutzer keine Vektion auslöst, sodass die Gefahr der Simulatorkrankheit verringert wird [12]. Allerdings zeigt eine Studie von Bowman et. al [3], dass dies auch die räumliche Orientierung des Nutzers stark negativ beeinflusst. Zielbasierte Methoden eignen sich besonders gut für Applikationen, bei denen der Nutzer nur an bestimmten, räumlich sehr begrenzten Orten in der virtuellen Welt Aufgaben erledigen muss und der Weg zwischen diesen Orten uninteressant ist.

Methoden, die sonst zu Objektmanipulation eingesetzt werden können auch zur Fortbewegung genutzt werden, indem statt eines Objektes die Perspektive verändert wird. Beispielsweise würde ein Nutzer beim Greifen nach bestimmten Objekten nicht die Objekte aufheben, sondern entsprechend seiner Handbewegung die Perspektive so verändern, als würde er sich am gegriffenen Objekt durch die virtuelle Welt ziehen. Diese Art der Fortbewegung führt sich somit nahtlos in die restlichen Interaktion mit ein.

An dieser Übersicht lässt sich erkennen, dass es nicht “die beste“ Fortbewegungsmethode gibt, sondern, dass beim Entwerfen einer VR Anwendung darauf geachtet werden muss, die passende Fortbewegungsmethode anhand der Applikationsanforderungen auszuwählen.

3 Anforderungsanalyse

Um einen Einblick in die Anatomielehre zu erhalten und die Anforderungen beim Lernen der Schädelbasis zu erarbeiten, wurde eine Lehrperson des *Instituts für Anatomie* der *Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg* interviewt. Dabei wurde einerseits der zu vermittelnde Lehrstoff thematisiert, welche Strukturen und Eigenschaften dieser für Studierende von Bedeutung sind sowie die Methoden mit denen dieser Stoff bisher gelernt wird. Weiterhin wurden auch Ansprüche an die Darstellungsweise festgehalten. Dieser Abschnitt fasst die Erkenntnisse aus dem Interview zusammen.

Medizinstudierende müssen lernen, welche Blutgefäße und Nerven durch welche Öffnungen im Schädel verlaufen. Dabei ist es unwichtig, wo genau sie innerhalb einer Öffnung verlaufen. Wichtiger ist es, ihren weiteren Verlauf zu kennen und welche Organe sie versorgen. Um die Position im Schädel zu beschreiben, sollten die Öffnungen außerdem den Schädelgruben zugeordnet werden können. Bei den Nerven spielt zusätzlich noch eine Rolle, welche Aufgaben diese erfüllen, ihre sogenannte Faserqualität. Steuern sie Muskeln oder Drüsen an oder sind sie sensibel und transportieren Sinneseindrücke zum Gehirn?

Dieses Wissen hilft Medizinstudierende in ihrer weiteren Karriere um von den Symptomen eines Krankheitsbildes auf die anatomischen Ursachen zu schließen und so die korrekte Behandlung durchzuführen. Angehende Chirurgen nutzen das gelernte Wissen außerdem um Eingriffe zu planen und durchzuführen. Daher ist die Anatomie Grundbestandteil des Medizinstudiums. Zu Beginn des Studienjahres kaufen sich Studenten meist ein Lehrbuch mit erklärenden Texten sowie einen Atlas mit anatomischen Zeichnungen aus verschiedenen Perspektiven. Damit lernen sie den Stoff im Selbststudium neben den Seminaren mit Präsentationen und anschließenden Diskussionen, die von der Universität an-

geboden werden. Das Lernen aus Büchern ist allerdings zeitaufwendig, weil der Verlauf der Knochenöffnungen im Schädel auf den Zeichnungen schwer zu erkennen ist. Einige Studierende lernen daher zusätzlich mit anatomischen Plastikmodellen des Schädels, weil die räumlichen Beziehungen der Strukturen zueinander natürlicher begreifbar sind. Im Buch sind meistens mehrere Ansichten aus unterschiedlichen Perspektiven notwendig, damit sich der Student den korrekten dreidimensionalen Verlauf mental vorstellen kann. Die entsprechenden Ansichten sind dabei außerdem meist auf weit auseinander liegenden Seiten im Buch verteilt, sodass viel Zeit bei der Suche danach verloren geht. Besonders schwierig ist es den Namen einer bestimmten Struktur zu finden, die beispielsweise bei einer Sektion entdeckt wurde. Dann kann nicht mehr auf das Register des Buches zurück gegriffen werden, sondern man muss im Buch blättern bis eine Abbildung gefunden wurde, welche die gesuchte Struktur zeigt.

Bestimmte Darstellungsarten sollten aus den Lehrbüchern und Atlanten in ein VR Modell übernommen werden, weil Medizinstudierende mit ihnen vertraut sind und sich so schneller zurecht finden. Beispielsweise wurde es als sinnvoll erachtet, die Einfärbung von Blutgefäßen, Nerven und Knochen zu übernehmen — blau für Venen, rot für Arterien und gelb für Nerven. Eine feine Detailtreue in der Oberflächenform und Struktur sei außerdem nicht von Nöten. Weiterhin wäre eine permanent sichtbare Anzeige der Schädelgrube, in der sich der Nutzer gerade befindet hilfreich.

Zusammengefasst ergeben sich aus dem Interview folgende Anforderungen an den Prototypen:

- schnelle Vermittlung der Bezeichnung und des räumlichen Verlaufs von Nerven und Blutgefäßen durch Knochenöffnungen innerhalb der Schädelbasis
- räumliche Orientierung innerhalb des Schädels besonders relevant
- aus Lehrbüchern und Atlanten bekannte Farbschemata wiederverwenden
- geringer Wert auf Oberflächendetails der anatomischen Strukturen

4 Konzept

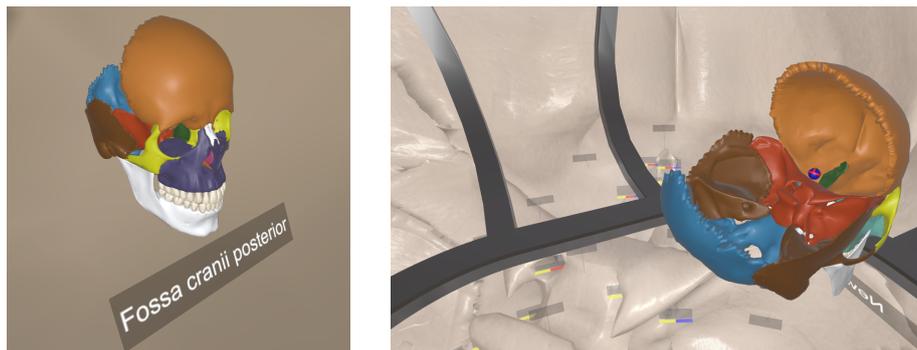
In diesem Abschnitt wird das entwickelte Konzept für den Prototypen beschrieben. Es werden Methoden zur Fortbewegung in immersiven virtuellen Umgebungen entsprechend der Anforderungen ausgewählt und erläutert. Weiterhin werden davon unabhängig eingesetzte UI-Elemente beschrieben.

Der Prototyp wurde für eine VR-Brille mit einem 6-DOF Eingabegerät zum Tracken der dominanten Hand entwickelt. Zusätzlich zur Orientierung wird die Position der Brille in einem Volumen von ca. $3m \times 2m \times 2m$ erfasst. In dem Prototyp kann sich der Nutzer durch ein überdimensionales Schädelmodell im Maßstab 1:200 bewegen. Wichtige Strukturen sind mit Labels annotiert, sodass der Nutzer durch freie Exploration die Anatomie der Schädelknochen kennen lernen kann. Weil Methoden der Fortbewegung in VR noch ein aktuelles Forschungsthema sind, wurden in dem Prototypen zwei ausgewählte miteinander verglichen. Einerseits eine Form der Teleportation um Vektoren zu minimieren und andererseits eine Plattformmetapher. Eine Minimap, entsprechend der

World in Miniature Metapher [21] unterstützt den Nutzer dabei sich in der ungewohnten Umgebung zu orientieren. Sie zeigt ihm seine aktuelle Position und Orientierung bezüglich des überdimensionierten Schädels.

4.1 Minimap

Die Minimap ist einem anatomischen Puzzle Modell nachempfunden. Sie wird vom Nutzer in der Originalgröße eines menschlichen Schädels wahrgenommen und die einzelnen Knochen sind ähnlich zu dem Puzzle Modell eingefärbt (siehe Abbildung 4a). Anders als bei dem Modell kann der Nutzer den Schädel der Minimap nicht zerlegen, sonst würde die Funktion als Orientierungshilfe verloren gehen. Allerdings kann die Minimap mit dem Controller aufgenommen und frei im Raum positioniert und rotiert werden. Wenn sie abgelegt wurde, behält sie ihre Pose im Display Center KOS immer bei. Das heißt, sie bewegt sich mit, wenn der Nutzer sich mit Hilfe der virtuellen Bewegungsmethoden fortbewegt. Eine kleine Kugel mit abstrakter VR-Brille dient als Indikator für die aktuelle Kopfposition und Blickrichtung des Nutzers innerhalb des großen Schädels (siehe Abbildung 4b). Zusätzlich enthält die Minimap ein Textfeld, welches den Namen der Schädelgrube anzeigt, in der sich der Nutzer aktuell befindet.



(a) Frontansicht der Minimap. Das Textfeld zeigt den Namen der Schädelgrube, in der sich der Nutzer aktuell befindet. (b) Blick in die MiniMap hinein. Die Blaue Kugel zeigt die aktuelle Position des Nutzers innerhalb des Schädels.

Abbildung 4: Die Minimap

4.2 Labels

Gegenüber Plastikmodellen haben virtuelle Modell den Vorteil, dass sie durch gezieltes Einblenden von Text zusätzlich zu dem räumlichen anatomischen Wissen auch symbolisches Wissen vermitteln können. Im entwickelten Prototypen weisen Labels an den Knochenöffnungen im Schädel auf ihre Bezeichnung und die hindurch verlaufenden Blutgefäße und Nerven hin. Die Label sind in die dreidimensionale Szene eingebettet und befinden sich in einer fest definierten Position relativ zur annotierten Knochenöffnung, denn Erkenntnisse aus [13] suggerieren, dass Labels in immersiven Umgebungen am besten statisch und relativ zum zu annotierenden Objekt positioniert werden. Die Labels drehen sich

außerdem wie Billboards immer zum Nutzer, sodass sie von überall lesbar sind, solange sie nicht verdeckt werden. Um sich anhand der Strukturnamen orientieren können, sind die Labels immer sichtbar. Bewegt sich der Nutzer jedoch zu weit von einem Label weg, kommt es am Text zu störenden Aliasingeffekten. Denn die Auflösung der verwendeten VR-Brille von 1080×1200 Pixeln pro Auge bei einem Sichtfeld von 110° ist relativ zu herkömmlichen Desktopmonitoren relativ gering. Um diese zu vermeiden, verblasst der Text ab einer bestimmten Entfernung zum Nutzer. Nur der Rahmen des Labels bleibt weiterhin sichtbar, damit der Nutzer darüber informiert ist, dass dort eine interessante Struktur liegt. Standardmäßig zeigen die Labels nur die Bezeichnung der annotierten Knochenöffnung, sowie farbige Felder unter der Bezeichnung, die auf die Art der hindurch verlaufenden Struktur hinweisen (siehe Abbildung 5a). Wie aus dem Interview mit einer Lehrperson aus der Anatomie hervorgegangen, werden Arterien rot, Venen blau und Nerven gelb dargestellt. Der Nutzer kann das Label selektieren, indem er mit dem Eingabegerät darauf zeigt und einen Knopf drückt. Dadurch klappt das Label auf, die farbigen Felder vergrößern sich und es werden zusätzlich die Bezeichnungen der hindurch verlaufenden Strukturen in den entsprechenden Feldern angezeigt. Durch die Selektion des Labels wird außerdem die entsprechende Knochenöffnung farblich hervorgehoben (siehe Abbildung 5b).



(a) Im zugeklappten Zustand zeigen die Labels die Bezeichnung der Knochenöffnung und farbige Felder weisen auf die Art der hindurch tretenden Strukturen hin.

(b) Im aufgeklappten Zustand stehen in den farbigen Feldern die Bezeichnungen der Strukturen, welche durch die Knochenöffnung verlaufen.

Abbildung 5: Das Labeldesign

4.3 Fortbewegung

Die im Prototypen verwendeten Methoden der Fortbewegung wurden anhand der folgenden Anforderungen ausgewählt:

1. erfordert keine zusätzliche Hardware
2. erlaubt eine schnelle Exploration
3. für eine Hohlraumumgebung geeignet
4. wirkt nicht ermüdend
5. verbraucht möglichst wenig Platz

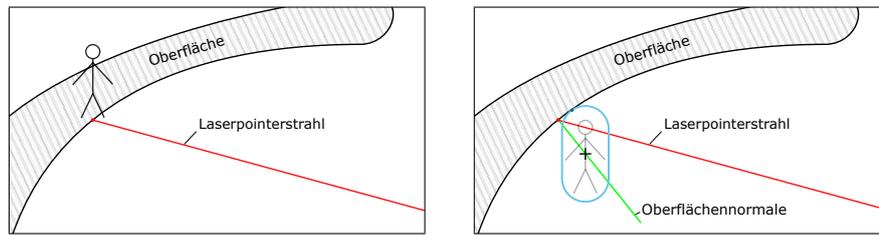
Physische Fortbewegungsmethoden können diese Anforderungen nicht erfüllen, da sie einerseits spezialisierte Hardware oder viel Platz benötigen. Andererseits sollen sie das natürliche Gehen imitieren und sind damit eher langsam in der Fortbewegung und führen schnell zur Ermüdung der Nutzer. Außerdem erlauben sie eine Fortbewegung in Hohlräumen nur am Boden, nicht aber an Wänden und Decken. Methoden, die auf Routenplanung basieren, scheitern an der zweiten Anforderung, denn ihr Konzept steht im Gegensatz zu der ungeplanten Bewegung während einer naiven Exploration. Steering Methoden ermöglichen eine intuitive Fortbewegung in allen drei Dimensionen und sind daher gut für die Exploration in Hohlräumen geeignet, weshalb im Prototypen auch eine Steering-Methode verwendet wird. Allerdings können diese Methoden unter Umständen beim Nutzer zu Symptomen der Simulatorkrankheit führen. Eine Gondel, die dem Nutzer fixe Referenzpunkte bietet, soll dies im Prototypen verhindern. Als Alternative zum Steering-Ansatz wurde eine zielbasierte Methode mit einem Teleportationsansatz implementiert, denn diese erlaubt eine schnellere Bewegung von Punkt zu Punkt und die Wahrscheinlichkeit der Simulatorkrankheit ist durch die geringe visuell wahrnehmbare Bewegung kleiner.

4.3.1 Teleportation

Die Teleportation gehört zu den zielbasierten Fortbewegungsmethoden. In vielen Umsetzungen wird die Zielposition angegeben, indem auf einen Punkt einer Oberfläche der virtuellen Umgebung gezeigt wird. Im Prototypen verwendet der Nutzer dafür das Eingabegerät mit 6 Freiheitsgraden als virtuellen Laserpointer. Das Display Center KOS wird beim Teleportieren dann so verschoben, dass das User Ground Center KOS in der Zielposition auf der Oberfläche liegt. Auf etwa horizontalen Oberflächen, die so etwas wie einen Boden repräsentieren funktioniert diese Methode ohne Probleme. Im Hohlraum des Schädels kann es jedoch vorkommen, dass Nutzer sich an Wände oder Decken teleportieren um diese näher zu inspizieren oder um sich einen Überblick über die restliche Umgebung zu verschaffen. Mit der beschriebenen Methode befinden sich die Füße nach der Teleportation an der Oberfläche, während der Oberkörper ungewollt die Oberfläche durchdringt (siehe Abbildung 6a). Daher wurde für die Fortbewegung innerhalb der Schädelhöhle eine neue Teleportationsmethode entworfen, welche das ungewollte Durchdringen weitestgehend vermeidet.

Trifft der Laserpointer auf die Schädeloberfläche, wird eine Kapsel, welche die räumliche Ausdehnung des Nutzers approximiert, entlang der Oberflächennormalen auf den Punkt zu gecasted. Der Start des Casts liegt dabei mindestens so weit von der Oberfläche entfernt, wie die Kapsel hoch ist, um Teleportationen an die Decke zu ermöglichen. Nach dem Cast berührt die Kapsel die Schädeloberfläche in den meisten Fällen in nur einem Punkt und liegt vollständig innerhalb der Höhle. Der Nutzer wird an die Position der Kapsel teleportiert, sodass er sich nach der Teleportation ebenfalls vollständig innerhalb der Höhle befindet. Als visuelles Feedback wird die Kapsel dem Nutzer während des Zeigens mit dem Laserpointer auch angezeigt. Außerdem werden ihm die physischen Begrenzungen an der neuen Position angezeigt, damit er weiß wie weit er sich nach der Teleportation physisch bewegen kann (siehe Abbildung 7a).

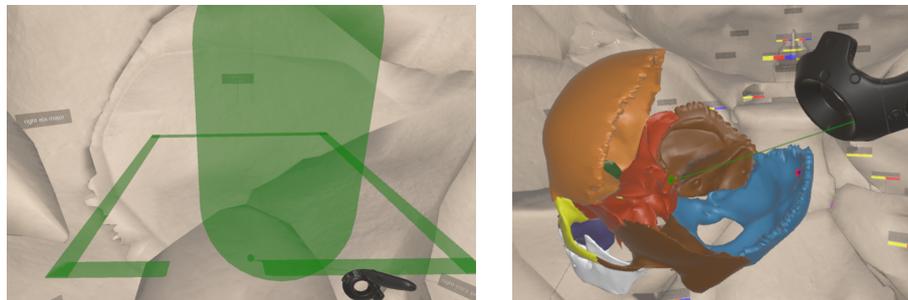
Um die Navigation in dem Schädel zu vereinfachen, kann der Nutzer auch in der Minimap auf die gewünschte Zielposition zeigen (siehe Abbildung 7b).



(a) Standard Teleportationen bewegen den Nutzer ungewollt in die Oberfläche an der Decke.

(b) Durch den Cast einer Kapsel entlang der Oberflächennormale, durchdringt der Nutzer nach der Teleportation nicht die Oberfläche.

Abbildung 6: Schematische Darstellung der Teleportation an Decken und Wände



(a) Als visuelles Feedback für die neue Position wird eine Kapsel angezeigt, sowie die Begrenzungen des verfügbaren physischen Raums.

(b) Der Nutzer kann in die Minimap zeigen um sich an die entsprechende Position zu teleportieren.

Abbildung 7: Interaktion zur Fortbewegung mittels Teleportation

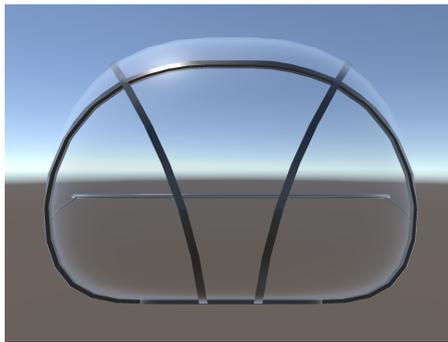
Er wird dann an die entsprechende Position im großen Schädel teleportiert. Weil ein abrupter Positionswechsel ohne glatten Übergang die den Nutzer stark desorientieren kann [3], wird der Nutzer im Prototypen mit einer sehr hohen, konstanten Geschwindigkeit auf einem linearen Pfad zur Zielposition bewegt, sodass er spüren kann, in welche Richtung er sich bewegt hat.

4.3.2 Plattform

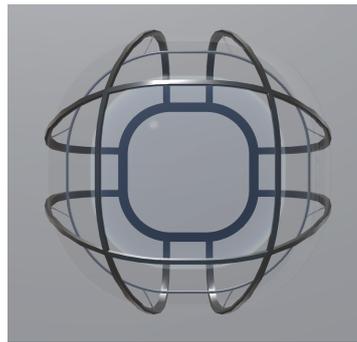
Als alternative Fortbewegungsmethode wurde ein steering basierter Ansatz gewählt. Der Nutzer zeigt mit dem Eingabegerät in die Richtung in die er sich bewegen will und drückt auf ein Touchpad um die Bewegung auszulösen. Je nachdem wo er auf das Touchpad drückt, bewegt er sich schneller oder langsamer in die Richtung in die er zeigt. Eine Rückwärtsbewegung, entgegen der angezeigten Richtung ist so ebenfalls möglich. Ein Pfeil am der virtuellen Repräsentation des Eingabegerätes signalisiert dem Nutzer, in welche Richtung er sich bewegt, siehe Abbildung 8c.

Aufgrund der andauernden, rein visuell wahrgenommenen Bewegung bei dieser Fortbewegungsmethode, zeigen Nutzer potentiell schneller Symptome der Simulatorkrankheit. Um dem entgegen zu wirken, wird in der VR-Spiele-Industrie

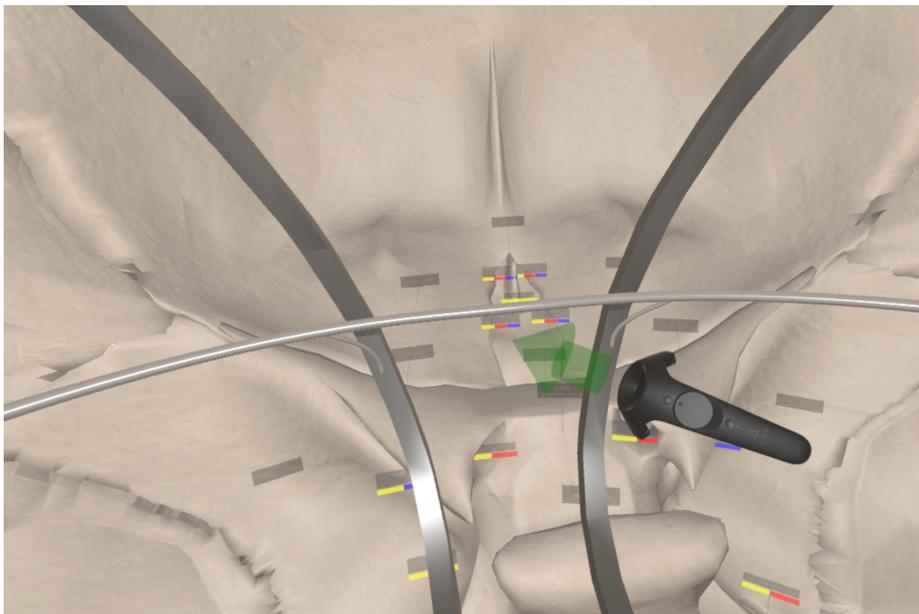
empfohlen [25], statische Referenzpunkte im Sichtfeld des Nutzers zu platzieren, die ihre Position im physischen Raum nicht verändern. Wenn der Anwendungsfall es zulässt wird dies oft über eine Art Cockpit realisiert. Für den Prototypen wurde daher eine Gondel entworfen, in welcher sich der Nutzer durch den Schädel bewegt. Beim Entwurf der Gondel wurde darauf geachtet, dass unabhängig von der Blickrichtung des Nutzers möglichst immer Teile der Gondel im Sichtfeld als Referenzpunkte bleiben. Gleichzeitig soll die Gondel nicht den Blick auf die Umgebung versperren. Der Entwurf ist in Abbildung 8 zu sehen.



(a) Gondel aus der Seitenansicht



(b) Gondel aus der Draufsicht



(c) Gondel aus der Nutzersicht mit Indikatorpfeil für die aktuelle Bewegungsrichtung

Abbildung 8: Entwurf der Gondel

5 Evaluierung

Zu Evaluationszwecken wurde der entwickelte Prototyp einer Gruppe von Lehrpersonen des *Instituts für Anatomie* der *Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg* gezeigt. Auch wissenschaftliche Mitarbeiter des Lehrstuhls für Visualisierung am *Instituts für Simulation und Grafik*, sowie Mitarbeiter der *Dornheim Medical Images GmbH* nahmen an der Demonstration teil. Dabei hatten sie die Gelegenheit, den Prototypen auszuprobieren und in einem informellen Rahmen ihre kritische Meinung, sowie Verbesserungsvorschläge mitzuteilen. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse sind in Abschnitt 5.1 zusammengefasst.

Um fundiertere Erkenntnisse über die Benutzerfreundlichkeit und Anwendbarkeit im Medizinstudium zu erlangen, ist eine formelle Nutzerstudie allerdings unerlässlich. In Abschnitt 5.2 wird daher ein Konzept für eine Nutzerstudie vorgestellt, welche die Benutzerfreundlichkeit bewerten und darüber hinaus feststellen soll, welche Fortbewegungsmethode eine bessere räumliche Orientierung ermöglicht.

Die Anwendbarkeit im Medizinstudium ließe sich nur mit einer Studie ähnlich der von Davis et. al. [6] prüfen. Dazu würde der Prototyp einer Gruppe von Medizinstudenten zur Prüfungsvorbereitung zur Verfügung gestellt um über Fragebögen den subjektiven Nutzen festzustellen. Für eine Studie mit diesem Ausmaß fehlen dem Prototypen allerdings noch weitere Funktionen, wie bspw. ein Quiz, welche das Lernen explizit unterstützen.

5.1 Informelle Evaluation

Generell war die Resonanz zu dem Prototypen eher positiv. Die intuitive, räumliche Darstellung, sowie die Möglichkeit sich auch durch die Knochenöffnungen hindurch zu bewegen, wurde als besonders hilfreich erachtet um den räumlichen Verlauf der Knochenöffnungen und der hindurch tretenden Strukturen zu begreifen. Genau dieses räumliche Verständnis fällt bei der Anwendung anderer Lehrmittel schwerer. Die Label, mit den Bezeichnungen der Blutgefäße und Nerven, sind laut den Teilnehmern ebenfalls für das räumliche Verständnis hilfreich, da sie direkt im dreidimensionalen Raum an den Öffnungen stehen, durch die sie verlaufen. Die Teilnehmer merkten außerdem an, dass das Prinzip der virtuellen Exploration in einem riesigen Modell auch auf andere Hohlraumstrukturen des menschlichen Körpers, wie bspw. der Bauchhöhle oder dem Herzen, anwendbar ist. Jedoch führe die enorme Skalierung auch zu Orientierungslosigkeit beim Nutzer. Im Prototyp sollte die Minimap dem entgegenwirken. Allerdings fiel bei Beobachtung der Teilnehmer auf, dass sie die Minimap kaum beachteten. Entweder haben sie das Potential dieser nicht wahrgenommen, oder der Mehrwert für die Nutzer wurde beim Entwurf überschätzt.

Als Fortbewegungsmethode wurde die Plattform klar favorisiert, weil die Bewegung intuitiver und weniger Anfällig für Bedienungsfehler ist. Beim Teleportieren hingegen passierte es schnell, dass sich Nutzer an eine ungewollte Position teleportiert haben und nicht sofort wussten, wie sie zurück zur Ausgangsposition kommen. Während der Nutzung traten bei den Teilnehmern bei beiden Fortbewegungsmethoden keine Symptome der Simulatorkrankheit auf, überraschenderweise sogar nicht als die Gondel absichtlich ausgeblendet wurde. Die Gondel wurde aber auch nicht als störend empfunden.

Als Verbesserungs- und Erweiterungsvorschläge wurde unter anderem das

Einblenden von Nachbarschaftsinformationen genannt. So hätten die Teilnehmer bspw. gerne gewusst, in welcher anatomischer Region sie landen, wenn sie sich durch eine Knochenöffnung oder eine Knochenwand hindurch bewegen. Weiterhin könnten Navigationshilfen die Suche nach einer bestimmten Struktur unterstützen. Bspw. indem der Nutzer den Namen der gesuchten Struktur angibt, woraufhin ein Navigationspfeil im Sichtfeld des Nutzers auf die Position der ausgewählten Struktur verweist. Zu Lernzwecken sollte es außerdem möglich sein die Label auszublenden und nur bei Bedarf anzuzeigen, sodass Studierende ihr Wissen in einer Art Quiz prüfen können.

5.2 Konzept für formelle Evaluation

Die Nutzerstudie soll dazu dienen, festzustellen welche Auswirkungen die Fortbewegungsmethode auf die räumliche Orientierung der Nutzer hat und ob das Auftreten der Simulatorkrankheit erfolgreich verhindert wird. Außerdem kann sie genutzt werden um allgemeine Probleme im User Interface des Prototypen aufzudecken.

Das Konzept orientiert sich an ähnlichen Studien aus der Literatur, welche Fortbewegungsmethoden in VR vergleichen [3, 14, 9, 26]. Die Studie wird im within-subject-design ausgeführt. Das heißt, jeder Proband muss mehrfach eine bestimmte Aufgabe erfüllen, wobei die Fortbewegungsmethode mit jeder Durchführung wechselt. Mit Hilfe verschiedener Metriken wird die Eignung der Fortbewegungsmethoden für die Aufgabe quantitativ ermittelt. Als weitere Modalität kann der Prototyp auch an traditionellen Ein-/und Ausgabegeräten (Bildschirm, Tastatur, Maus, Gamepad) bedient werden um einen Referenzwert zu haben. Die Aufgabe besteht darin, mehrere Objekte in der virtuellen Umgebung zu finden und sich ihre Position zu merken. Hat der Proband alle Objekte gefunden, wird er dazu aufgefordert auf die Position eines zufällig ausgewählten Objektes zu zeigen. Zu jedem Zeitpunkt ist immer nur ein Objekt sichtbar. Erst wenn der Proband das Objekt selektiert, bspw. durch eine Berührung mit dem Eingabegerät, wird das nächste angezeigt. Die Zeit, die der Proband braucht um alle Objekte zu finden, wird gemessen um die Eignung der Fortbewegungsmethode für die Exploration einer unbekanntenen Umgebung festzustellen. Je länger der Proband braucht, desto weniger eignet sich die Fortbewegungsmethode für eine schnelle Exploration. Als Metrik für die räumliche Orientierung wird die Abweichung zwischen der vom Probanden angezeigten Position und der tatsächlichen Position des ausgewählten Objektes verwendet. Je größer die Abweichung ist, desto schlechter ist die räumliche Orientierung. Zusätzlich erfassen Fragebögen, wie beispielsweise die von Kennedy et. al. [11] und Brooke et. al. [5], wie stark die Simulatorkrankheit bei den Probanden ausgeprägt ist und wie zufrieden sie im allgemeinen mit der Bedienung des Prototypen sind.

Vermutet wird, dass die Plattform bei dieser Aufgabe der naiven Exploration schneller ist, als die Teleportation, weil sie konzeptionell näher an der natürlichen Fortbewegung ist. Auch die räumliche Orientierung wird mit der Plattform, aufgrund der kontinuierlichen Bewegung durch den dreidimensionalen Raum, voraussichtlich besser ausfallen. Aber gerade dieser visuelle Stimulus der Bewegung ohne korrespondierenden vestibulären Stimulus führt wahrscheinlich zu einer stärkeren Ausprägung von Symptomen der Simulatorkrankheit.

6 Ausblick

Der Prototyp fokussiert sich auf die naive Exploration der annotierten Strukturen und soll dabei helfen, das Potential der VR-Technologie für die Anatomielehre auszuloten. Um Studierende weitergehend beim Lernen der Strukturen zu unterstützen sind einige Erweiterungen des Prototypen denkbar. Zunächst sind hier Lernspiele zu nennen, die auch während der informellen Evaluation von den Teilnehmern vorgeschlagen wurden. Sie sollen den Studierenden durch spielerische Elemente, wie bspw. einem Quiz, dazu anregen sich mehr mit dem Stoff auseinanderzusetzen. Weiterhin können Studierende bei der Navigation mehr unterstützt werden. Möchten sie bspw. schnell eine bestimmte Struktur finden, könnte ein Register, in dem alle annotierten Strukturen alphabetisch aufgelistet sind, dabei helfen, indem eine Navigationshilfe sie zu der gesuchten Struktur führt, wenn sie im Register ausgewählt wurde. Da im Interview der Verlauf der Blutgefäße und Nerven als besonders wichtig erachtet wurde, könnten diese ebenfalls dreidimensional dargestellt werden, wenn eine Knochenöffnung ausgewählt wird, statt nur die Bezeichnungen im Label anzuzeigen. Voraussetzung dafür ist allerdings, dass die dafür benötigten Daten bspw. aus segmentierten MRT-Bildern zur Verfügung stehen. Über die Anwendung als Lernhilfe hinaus wäre es weiterhin denkbar, eine weiter entwickelte Version des Prototypen als Prüfungsumgebung für Medizinstudierende zu verwenden, in der Studierende vom Prüfer vorgegebene Strukturen entweder identifizieren oder verorten müssen. Zu diesem Zweck müsste eine zusätzliche Nutzerschnittstelle für den Prüfer entwickelt werden, mit der es möglich ist, einzelne Strukturen und Labels ein- und auszublenden sowie hervorzuheben.

Insgesamt bietet der vorgestellte Prototyp viel Potential für Weiterentwicklungen, die Medizinstudierenden beim Lernen des umfangreichen Stoffes unterstützen können.

7 Zusammenfassung

In diesem Bericht wurde ein VR-Prototyp vorgestellt, welcher mit Hilfe von moderner VR-Technologie Medizinstudierenden beim Lernen anatomischer Strukturen in der Schädelbasis unterstützen soll. Die Studierenden können sich mit Hilfe eines Eingabegerätes mit 6 Freiheitsgraden durch ein übergroßes Modell des menschlichen Schädels bewegen und dabei die Bezeichnungen und die räumliche Lage der anatomischen Strukturen lernen. Der Prototyp bietet zwei alternative Fortbewegungsmethoden, die jeweils Vor- und Nachteile besitzen. Die Plattform, welche sich über Zeigegesten steuern lässt, wurde von Lehrenden der Anatomie an der Otto-von-Guericke-Universität bei einer informellen Demonstration aufgrund der einfachen Bedienung bevorzugt. Studien legen allerdings nahe, dass die illusionäre Eigenbewegung verstärkt zu Symptomen der Simulatorkrankheit führt [12]. Um diese zu vermeiden wurde als Alternative eine Teleportationsmethode verwendet, welche weitestgehend keine Bewegungsilusionen auslöst. Sie hat allerdings den Nachteil, dass Nutzer durch die abrupte Positionsänderung ihre Orientierung verlieren.

Die Lehrpersonen bestätigten, dass der Prototyp durch die räumliche Darstellung und Annotation der anatomischen Strukturen ein großes Potenzial als Lernhilfe hat, nicht nur für die Schädelbasis sondern auch anderer Hohlräume.

strukturen, wie dem Herzen oder der Bauchhöhle. Exploration der annotierten Strukturen alleine reicht aber nicht aus, daher soll der Prototyp noch um Funktionen ergänzt werden, welche die Studierenden aktiv beim Lernen unterstützen.

Literatur

- [1] C. Adamczyk, M. Holzer, R. Putz, and M. R. Fischer, “Student learning preferences and the impact of a multimedia learning tool in the dissection course at the university of munich,” *Annals of anatomy = Anatomischer Anzeiger : official organ of the Anatomische Gesellschaft*, vol. 191, no. 4, pp. 339–348, 2009.
- [2] D. Bowman, “Principles for the design of performance-oriented interaction techniques,” in *Handbook of virtual environments*, ser. Human factors and ergonomics, K. M. Stanney, Ed. Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, 2002, p. 277.
- [3] D. A. Bowman, E. T. Davis, L. F. Hodges, and A. N. Badre, “Maintaining spatial orientation during travel in an immersive virtual environment,” *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, vol. 8, no. 6, pp. 618–631, 1999.
- [4] D. A. Bowman, E. Kruijff, J. J. LaViola, and I. Poupyrev, *3D user interfaces: Theory and practice*. Boston San Francisco, New York, Toronto, Montreal, London, Munich, Paris, Madrid, Capetown, Sydney, Tokyo, Singapore, Mexico City: Addison-Wesley, 2005.
- [5] J. Brooke *et al.*, “Sus-a quick and dirty usability scale,” *Usability evaluation in industry*, vol. 189, no. 194, pp. 4–7, 1996.
- [6] C. R. Davis, A. S. Bates, H. Ellis, and A. M. Roberts, “Human anatomy: let the students tell us how to teach,” *Anatomical sciences education*, vol. 7, no. 4, pp. 262–272, 2014.
- [7] M. Estai and S. Bunt, “Best teaching practices in anatomy education: A critical review,” *Annals of anatomy = Anatomischer Anzeiger : official organ of the Anatomische Gesellschaft*, 2016.
- [8] T. Hasan, H. Ageely, and I. Bani, “Effective anatomy education—a review of medical literature,” *Rawal Medical Journal*, vol. 36, no. 3, pp. 225–229, 2011.
- [9] E. Hodgson, E. Bachmann, and D. Waller, “Redirected walking to explore virtual environments: Assessing the potential for spatial interference,” *ACM Transactions on Applied Perception*, vol. 8, no. 4, pp. 1–22, 2011.
- [10] H. Iwata, “Locomotion interfaces,” in *Human Walking in Virtual Environments*, F. Steinicke, Y. Visell, J. Campos, and A. Lécuyer, Eds. New York, NY: Springer New York, 2013, pp. 199–219.
- [11] R. S. Kennedy, N. E. Lane, K. S. Berbaum, and M. G. Lilienthal, “Simulator sickness questionnaire: An enhanced method for quantifying simulator sickness,” *The International Journal of Aviation Psychology*, vol. 3, no. 3, pp. 203–220, 1993.
- [12] B. Keshavarz, B. E. Riecke, L. J. Hettinger, and J. L. Campos, “Vection and visually induced motion sickness: how are they related?” *Frontiers in psychology*, vol. 6, p. 472, 2015.

- [13] J. B. Madsen, M. Tatzqern, C. B. Madsen, D. Schmalstieg, and D. Kalkofen, “Temporal coherence strategies for augmented reality labeling,” *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, vol. 22, no. 4, pp. 1415–1423, 2016.
- [14] M. Nabioyuni and D. A. Bowman, “An evaluation of the effects of hypernatural components of interaction fidelity on locomotion performance in virtual reality,” in *Proceedings of the 25th International Conference on Artificial Reality and Telexistence and 20th Eurographics Symposium on Virtual Environments*, ser. ICAT - EGVE '15. Aire-la-Ville, Switzerland, Switzerland: Eurographics Association, 2015, pp. 167–174.
- [15] B. Preim and C. Botha, “Computer-assisted medical education,” in *Visual computing for medicine*, ser. The Morgan Kaufmann Series in Computer Graphics. Amsterdam: Elsevier/Morgan Kaufmann, 2014, pp. e101–e169.
- [16] S. Razzaque, Z. Kohn, and M. C. Whitton, “Redirected walking,” in *Proceedings of EUROGRAPHICS*, vol. 9, 2001, pp. 105–106.
- [17] C. Rosse, “The potential of computerized representations of anatomy in the training of health care providers,” *Academic Medicine*, vol. 70, no. 6, pp. 499–505, 1995.
- [18] A. Steed and D. A. Bowman, “Displays and interaction for virtual travel,” in *Human Walking in Virtual Environments*, F. Steinicke, Y. Visell, J. Campos, and A. Lécuyer, Eds. New York, NY: Springer New York, 2013, pp. 147–175.
- [19] F. Steinicke, G. Bruder, J. Jerald, H. Frenz, and M. Lappe, “Estimation of detection thresholds for redirected walking techniques,” *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, vol. 16, no. 1, pp. 17–27, 2010.
- [20] F. Steinicke, Y. Visell, J. Campos, and A. Lécuyer, Eds., *Human Walking in Virtual Environments*. New York, NY: Springer New York, 2013.
- [21] R. Stoakley, M. J. Conway, and R. Pausch, “Virtual reality on a wim: Interactive worlds in miniature,” in *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, 1995, pp. 265–272.
- [22] K. Sugand, P. Abrahams, and A. Khurana, “The anatomy of anatomy: a review for its modernization,” *Anatomical sciences education*, vol. 3, no. 2, pp. 83–93, 2010.
- [23] E. A. Suma, D. M. Krum, and M. Bolas, “Redirected walking in mixed reality training applications,” in *Human Walking in Virtual Environments*, F. Steinicke, Y. Visell, J. Campos, and A. Lécuyer, Eds. New York, NY: Springer New York, 2013, pp. 319–331.
- [24] J. N. Templeman, P. S. Denbrook, and L. E. Sibert, “Virtual locomotion: Walking in place through virtual environments,” *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, vol. 8, no. 6, pp. 598–617, 1999.
- [25] Will Mason, “Five ways to reduce motion sickness in vr,” UploadVR, 2015. [Online]. Available: <http://uploadvr.com/five-ways-to-reduce-motion-sickness-in-vr/>

- [26] B. Williams, G. Narasimham, T. P. McNamara, T. H. Carr, J. J. Rieser, and B. Bodenheimer, “Updating orientation in large virtual environments using scaled translational gain,” in *Proceedings of the 3rd symposium on Applied perception in graphics and visualization*, R. W. Fleming, Ed. New York, NY: ACM, 2006, pp. 21–28.