



**FH Salzburg**  
MultiMediaTechnology

# ***Übertragbarkeit des Gesetz von Fitts für die Interaktion im 3D-Raum***

## **Bachelorarbeit 2**

Autor: Lukas Günter Machegger  
Betreuer: DI Michael Domhardt

Salzburg, Österreich, 30.07.2018

## **Eidesstattliche Erklärung**

Ich erkläre hiermit eidesstattlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst, und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Weiter versichere ich hiermit, dass ich die den benutzten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungskommission weder im In- noch im Ausland vorgelegt und auch nicht veröffentlicht.

\_\_\_\_\_  
*Datum*

\_\_\_\_\_  
*Unterschrift*

\_\_\_\_\_  
*Vorname* *Nachname*

## Kurzfassung

Fitt's Gesetz besagt, dass es einen linearen Zusammenhang zwischen der Zeit um ein Ziel zu erreichen (Bewegungszeit) und der Schwierigkeit der Aufgabe (Index of Difficulty) gibt. Die Schwierigkeit einer Aufgabe ist abhängig von der Distanz zu dem Ziel und dessen Größe. Das Gesetz ist grundsätzlich eindimensional, wurde aber für zweidimensionale Anwendungsfälle erweitert. Es gibt nur wenige Arbeiten zu Fitt's Gesetz im dreidimensionalen Raum, wovon keine dieser Arbeiten Fitt's Gesetz für Virtual Reality Anwendungen evaluiert.

Um die Übertragbarkeit von Fitt's Gesetz auf dreidimensionale Anwendungsfälle unter Verwendung einer Virtual Reality Brille zu überprüfen, wird in dieser Arbeit ein Prototyp in der Unity-3D Engine entwickelt und eine Benutzerstudie durchgeführt. In der Benutzerstudie sollten die Testpersonen, mithilfe einer VR-Brille und einem Controller der einen Strahl aussendet, Ziele möglichst schnell und präzise treffen. Gemessen wurde die Bewegungszeit und ob das Ziel getroffen wurde. Es wurden zwei Versuche durchgeführt, der erste Versuch hatte einen eingeschränkten Bereich von  $80^\circ$  in dem Ziele positioniert wurden. Der zweite Versuch verwendete  $360^\circ$  zum Positionieren der Ziele. Die Ziele konnten an drei verschiedenen Höhen und mit drei unterschiedlichen Abständen zur Versuchsperson positioniert werden.

In einem Vergleich des eindimensionalen Fitt's Gesetz und einem für dreidimensionale Aufgaben optimierten Fitt's Gesetz zeigte sich, dass mithilfe letzterem höhere Werte für die Korrelation zwischen dem Index of Difficulty und der Bewegungszeit erzielt werden konnten. Die Korrelationskoeffizienten des Versuches, der  $360^\circ$  verwendete, lagen deutlich unter denen des Versuches mit einem eingeschränkten Zielbereich von  $80^\circ$ . Die Korrelation zwischen dem Index of Difficulty und den Fehlerraten war nur schwach. Die Fehlerraten stiegen mit dem Erhöhen des Abstandes zwischen Ziel und Versuchsperson an, diese Beobachtung war jedoch nur im  $360^\circ$  Versuch statistisch signifikant. Die Bewegungszeiten stiegen ebenfalls mit dem Erhöhen des Abstandes zwischen Ziel und Versuchsperson an, diese Feststellung war in beiden Versuchen statistisch signifikant.

**Schlüsselwörter:** *Fitt's Gesetz, Virtual Reality, Ray-Cast Interaktion*

## Abstract

Fitt's law is a model to predict the time taken to point onto a target. This movement time has a linear correlation with the index of difficulty, that is calculated from the width of the target and the distance to the target. Fitt's law is one dimensional but was extended to fit for two- and three dimensional tasks.

To see if Fitt's law is transferable for tasks with virtual reality devices and raycast interaction, a prototype was developed in the Unity-3D engine and a userstudy was accomplished. In the userstudy participants had to point onto targets as fast and precise as possible. The movement time was measured as well as if the target was hit. Two different trials were accomplished, the first one had an area of  $80^\circ$  where targets could be placed, in the second one the targets were placed around the participants ( $360^\circ$ ). Targets were placed in three different heights and three different distances to the subjects.

A comparison between a one dimensional Fitt's law model and a three dimensional model showed, that the 3D model leads to higher correlation coefficients between the index of difficulty and the movement time. For the trial where targets were placed  $360^\circ$  around the subjects, correlation coefficients were much lower than on the trial with the  $80^\circ$  field. The error rates were increasing with the distance between the targets and the subject, this finding was only statistically significant for the  $360^\circ$  trial. Movement times were as well increasing with a higher distance between the targets and the participants, this finding was statistically significant in both trials.

**Keywords:** *Fitt's law, virtual reality, raycast interaction*

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Theoretische Grundlage zum Gesetz von Fitts</b>	<b>2</b>
2.1	Fitts' Gesetz im eindimensionalen Raum . . . . .	2
2.2	Fitts' Gesetz im zweidimensionalen Raum . . . . .	4
2.3	Fitts' Gesetz im dreidimensionalen Raum . . . . .	6
<b>3</b>	<b>Benutzerstudie</b>	<b>8</b>
3.1	Design der Benutzerstudie . . . . .	9
3.2	Versuchspersonen und Ablauf . . . . .	12
3.3	Zielparameter . . . . .	13
<b>4</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>15</b>
4.1	Fehlerraten . . . . .	15
4.2	Bewegungszeiten . . . . .	17
4.3	Korrelation zwischen ID und MT . . . . .	19
4.3.1	Eindimensionaler Index of Difficulty . . . . .	19
4.3.2	Dreidimensionaler Index of Difficulty . . . . .	21
<b>5</b>	<b>Diskussion</b>	<b>29</b>
5.1	Literatur . . . . .	29
5.2	Implementierung des Prototypen . . . . .	29
5.3	Studie . . . . .	30
5.4	Ergebnisse . . . . .	31
5.5	Ausblick . . . . .	32
	<b>Appendices</b>	<b>39</b>
A	git-Repository . . . . .	39
B	Vorlagen für Studienmaterial . . . . .	39
C	Archivierte Webseiten . . . . .	42

## 1 Einleitung

Mit dem Apple Macintosh begann 1984 die Verbreitung von grafischen Benutzeroberflächen (GUI). Hauptmerkmal dieser GUIs ist die „Zeige und Klicke“ Interaktion. Das Gerät, das für diese Interaktion dient, ist grundsätzlich meist die Computermaus (MacKenzie, Kauppinen und Silfverberg 2001, 1). Die Vorteile einer Computermaus gegenüber anderer Eingabegeräte wurden von English, Engelbart und Berman (1967, 7-13) in einer Vergleichsstudie erstmals belegt. Gemessen wurden die durchschnittlichen Zeiten für die „Zeige-Interaktion“ und die Fehlerraten, mit dem Ergebnis, dass die Maus das schnellste der getesteten Eingabegeräte für die „Zeige-Interaktion“ war. Dabei wurde das Gesetz von Fitts verwendet (Fitts 1954). Das Gesetz von Fitts ist eines der wichtigsten Modelle zur Auswertung der Schnelligkeit und der Fehlerrate von Eingabegeräten im Feld der Mensch-Computer Interaktion (Bützler u. a. 2012, 2).

Für zielgerichtete Zeigebewegungen besagt Fitts' Gesetz, dass es einen linearen Zusammenhang zwischen der Bewegungszeit (movement time, MT) und der Schwierigkeit der Aufgabe (Index of Difficulty, ID) gibt:

$$MT = a + b * ID$$

In dieser Gleichung ist MT die durchschnittliche Zeit um das Ziel mit dem Zeigegerät zu treffen. a und b sind Konstanten, die sich aus linearer Regression ergeben. Der nachfolgende Term beinhaltet die Schwierigkeit der Aufgabe, den Index of Difficulty, der die Amplitude der Bewegung, sowie die Größe des Ziels beinhaltet (Bützler u. a. 2012, 2). Laut MacKenzie und Buxton (1992, 1-2, 5) ist ein Nachteil dieses Modells, dass es grundsätzlich eindimensional ist. MacKenzie und Buxton (1992, 4-5) haben verschiedene Modelle getestet, um Fitts' Gesetz auf zweidimensionale Anwendungsfälle zu erweitern. Dafür werden verschiedene Interpretationen der Größe des Ziels in Fitts' Gesetz, bei variierenden Annäherungswinkeln, miteinander verglichen.

Mit der Einführung von dreidimensionalen virtuellen Umgebungen ergaben sich neue Kon-

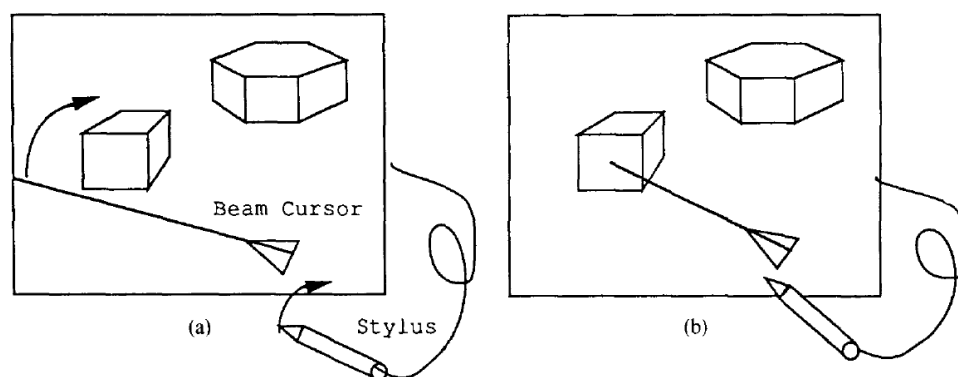


Abbildung 1: Ray-Cast Interaktion: In Darstellung (a) wird entlang des Strahls nach getroffenen Objekten gesucht. Bei Abbildung (b) wird ein Objekt getroffen und selektiert.

zepte und Möglichkeiten zur Mensch-Computer Interaktion (Bryson 1996, 1-4). Hand (1997, 1, 3) beschreibt den „Ray-Cast“, welcher wie ein Laserpointer funktioniert, als eine der grundlegendsten Interaktionsmethoden im dreidimensionalen Raum. Das erste Objekt, das sich mit dem Strahl kreuzt, wird selektiert. In Abbildung 1 funktioniert die Ray-Cast Interaktion mithilfe

eines Stifts, mit dem man auf das Display des Computers zeigt. Der Vorteil der Interaktion im dreidimensionalen Raum ist laut Yoshimura, Nakamura und Sugiura (1994, 3), dass die Benutzer und Benutzerinnen leichter erkennen können was im Moment selektiert wird, als mit der Auswahl eines Objekts mithilfe eines Mauszeigers.

Obwohl es einige Arbeiten (Cha und Myung 2013, 1; Looser, Cockburn und Savage 2005, 1; Grossman und Balakrishnan 2004, 1; 2006, 1) gibt, die Fitts' Gesetz für den Gebrauch in dreidimensionalen virtuellen Umgebungen erweitern, gibt es für Messungen der Effektivität der Ray-Cast Interaktion im dreidimensionalen Raum noch keine standardisierten Methoden.

Diese Arbeit wird sich damit beschäftigen, anhand einer Versuchsreihe mit einem in Unity zu implementierenden VR Prototypen, einen dreidimensionalen Ansatz für den Index of Difficulty mit einem eindimensionalen Ansatz für Index of Difficulty, bezüglich der Korrelation zwischen dem ID und der Bewegungszeit, zu vergleichen. Damit soll überprüft werden, ob das dreidimensionale Modell für den Index of Difficulty auch in einer VR Testumgebung eine adäquate Repräsentation darstellt. Zusätzlich wird von dieser Arbeit der Einfluss untersucht, den der Abstand von interaktiven Objekten zu den Benutzern und Benutzerinnen auf die Bewegungszeit und die Fehlerraten hat. Außerdem werden die Auswirkungen der Höhe (Winkel) der Ziele und des Winkels des Feldes, an dem die Objekte platziert werden können, auf die Bewegungszeit und die Fehlerraten analysiert. Die Ergebnisse dieser Arbeit helfen Designern und Designerinnen die Ausführung der Zeige-Interaktionen von Benutzern und Benutzerinnen korrekt vorrauszusagen, und das Design interaktiver Elemente in der dreidimensionalen virtuellen Realität für die Interaktion mit einem Ray-Cast zu optimieren.

## **2 Theoretische Grundlage zum Gesetz von Fitts**

Eine der grundlegenden Interaktionsmethoden in Benutzeroberflächen ist das Zeigen auf verschiedene Ziele, unter anderem Menüs, Schaltflächen und Texte (Grossman und Balakrishnan 2005, 1). In der Mensch-Computer Interaktion wird häufig Fitts' Gesetz (Fitts 1954, 1) genutzt, um Benutzeroberflächen zu modellieren und zu evaluieren. Laut Grossman und Balakrishnan (2005, 2) bestehen Benutzeroberflächen üblicherweise aus zwei- oder dreidimensionalen Zielen, die zur Interaktion dienen. Daher gibt es verschiedene Ansätze, das eindimensionale Gesetz von Fitts für mehrdimensionale Aufgaben zu erweitern.

### **2.1 Fitts' Gesetz im eindimensionalen Raum**

Obwohl es laut Fitts (1954, 3) schon viele Jahre bekannt war, dass die Genauigkeit von schnellen Bewegungen abhängig von der Amplitude ist, wurde der genaue Zusammenhang zwischen der Amplitude, der Geschwindigkeit und der Genauigkeit oftmals nicht festgestellt. Woodworth (1899, 66-67) war eine der ersten Arbeiten, die bei einer Versuchsreihe messen konnte, dass bei schnellen, visuell kontrollierten Bewegungen, die Fehlerrate mit der Amplitude und auch der Geschwindigkeit ansteigt.

In folgenden drei Experimenten, hat Fitts (1954, 4-7) diesen Zusammenhang belegt: In dem

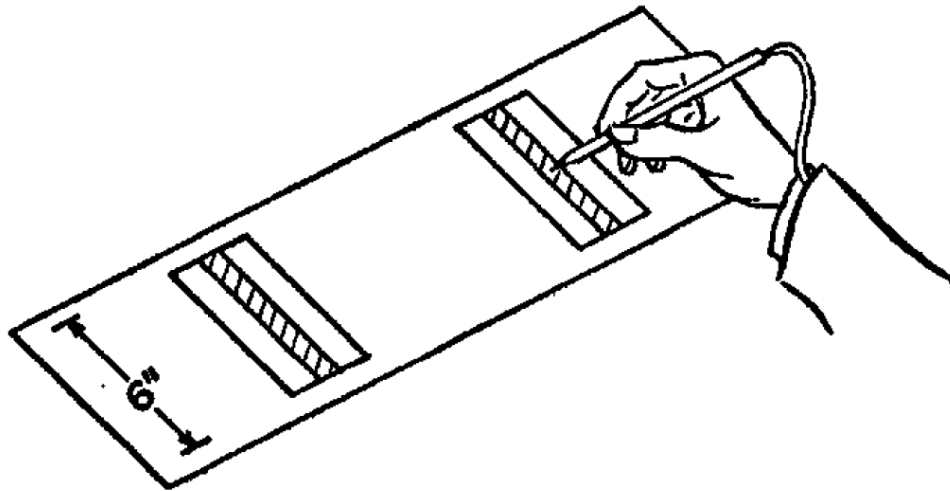


Abbildung 2: Die Aufgabe war es die mittleren Scheiben abwechselnd zu treffen, ohne die beiden seitlichen Scheiben zu berühren. (Fitts 1954, 4)

ersten und wohl bekanntesten Experiment (siehe Abbildung 2) , wurden 16 Probanden und Probandinnen aufgefordert, mit einer Nadel abwechselnd zwei rechteckige Metallscheiben zu berühren. Die Aufgabe war es, möglichst viele Berührungen innerhalb einer vorgegebenen Zeit von 55 Sekunden zu erreichen. Getestet wurde mit zwei Nadeln, die sich in ihrem Gewicht unterschieden. Der Versuch begann mit einer Testphase von 15 Sekunden, die die Probanden und Probandinnen auf ihre Aufgabe vorbereiten sollte. Nach der Testphase folgte der 55 Sekunden andauernde Test. Das Verfehlen der mittleren Scheibe wurde als Fehler gewertet. Am Ende des Tests wurde den Teilnehmern und Teilnehmerinnen die Anzahl ihrer Fehler mitgeteilt. Dieser Test wurde zwei Tage lang durchgeführt. Die Auswirkungen des Trainingseffekts wurden in den Ergebnissen nicht berücksichtigt, da sich dieses Experiment ausschließlich auf den Effekt der Amplitude auf die Fehlerraten und die Bewegungszeiten fokussierte. Der Test wurde in 16 verschiedenen Kombinationen der Breite der Metallplatten und deren Abstand voneinander ausgeführt. Aus diesen Kombinationen der Breite und des Abstandes ergaben sich verschiedene Schwierigkeitsgrade (ID - Index of Difficulty). Der höchste Schwierigkeitsgrad führte unter den Versuchspersonen auch zu der höchsten Fehlerrate. Mit dem Erhöhen des Abstandes der zwei Metallplatten erhöhte sich sowohl die für die Bewegung benötigte Zeit, als auch die Fehlerrate. Die durch den größeren Abstand erhöhte Fehlerrate lässt darauf schließen, dass Probanden und Probandinnen ihre Bewegungen nicht weit genug verlangsamt haben, um die erforderte Genauigkeit aufrecht erhalten zu können. Das mehrmalige Ausführen des Tests führte unter den Testpersonen zu einem Trainingseffekt, der sich aber nur gering auf die Leistung auswirkte. Die Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Testbedingungen verhielten sich sowohl für die leichtere, als auch für die schwerere Nadel gleich.

Das zweite Experiment von Fitts (1954, 6-7), in dem die Testpersonen Lochscheiben auf zwei verschiedene Bolzen stecken sollten, und das dritte Experiment, indem die Probanden und Probandinnen Bolzen in eine Reihe von Löchern stecken sollten, zeigten ähnliche Zusammenhänge zwischen der Distanz, der Fehlerrate und der Bewegungszeit.



Aus den oben genannten Experimenten, definiert Fitts (1954, 8) den Index of Difficulty als

$$ID = -\log_2(W/2A)$$

wobei  $W$  die Toleranz in Zoll, und  $A$  die durchschnittliche Amplitude der Bewegung ist. Der Index of Difficulty wird also anhand der Distanz zu dem Ziel und der Größe des Ziels definiert. Es wird davon ausgegangen, dass die Relation zwischen dem Index of Difficulty und der Bewegungszeit linear ist. Bezogen auf Fitts' Experiment, mit den beiden Nadeln und den Metallplatten, wäre  $W$  die Breite der Metallplatten und  $A$  die Distanz zwischen den beiden Metallplatten in Zoll, gemessen von deren Mittelpunkt (Fitts 1954, 4). Üblicherweise wird Fitts' Law als

$$MT = a + b \log_2(2A/W) \quad (1)$$

beschrieben, wobei  $a$  und  $b$  nicht-negative Konstanten sind, die empirisch ermittelt werden (Seow 2005, 20). Mithilfe dieser Gleichung kann, anhand der Breite des Ziels und der Distanz zum Ziel, die Zeit  $MT$  prognostiziert werden, die benötigt wird, um das Ziel zu selektieren.

Der Index of Difficulty ist der wichtigste Faktor, um die Bewegungszeit  $MT$  in verschiedenen Situationen vorausszusagen (Cha und Myung 2013, 2).

## 2.2 Fitts' Gesetz im zweidimensionalen Raum

Das Gesetz von Fitts wird in der Mensch-Computer Interaktion häufig verwendet um, oftmals auch zweidimensionale, Benutzeroberflächen zu modellieren und zu evaluieren. MacKenzie und Buxton (1992, 1-2) haben jedoch gezeigt, dass Fitts' Gesetz (Fitts 1954, 1) eindimensional ist, da die Amplitude (Distanz) und die Breite des Ziels auf der selben Achse liegen (siehe Abbildung 3). Eine spezielle Gruppe von Zielen sind Objekte mit gleicher Breite und Höhe, wie zum Beispiel Quadrate oder Kreise. Diese Ziele wurden in Studien verwendet (Jagacinski und Monk 1985, 1), da das eindimensionale Fitts' Gesetz in diesen Spezialfällen intakt bleibt. Üblicherweise wird hier der Durchmesser des Innkreises als Wert für  $W$  in Fitts' Gesetz verwendet. Bei Zielen mit unterschiedlicher Breite und Höhe entsteht jedoch ein Problem: Wie in Abbildung 4 von MacKenzie und Buxton (1992, 2) gezeigt, kann sich die Rolle von der Breite und Höhe des Ziels, bei unterschiedlichen Annäherungswinkeln, vertauschen. Bei Fitts' Gesetz liegen die Amplitude und die Breite des Ziels jedoch immer auf der selben Achse. Während das Modell des ID für kreisförmige Ziele, sowie für quadratische Ziele mit einem Annäherungswinkel von 0, 90, 270 oder 360°, intakt bleibt, ergeben sich für zweidimensionale rechteckige Ziele unrealistisch niedrige, sowie negative Werte für ID. Als Beispiel dafür führen MacKenzie und Buxton (1992, 2) die Auswahl eines rechteckigen Ziels, mit der Breite von 2.46cm, aus einer Entfernung von 1cm an: Der sich daraus ergebende Index of Difficulty ist bei Fitts' Modell als

$$ID = \log_2(2A/W) = \log_2(2/2.46) = -0.29$$

negativ. Da die Bedeutung eines negativen Wertes für ID nicht klar ist gibt es verschiedene Formulierungen der Gleichung für ID, die negative Ergebnisse verhindern sollen: Die „Shannon Formulierung“

$$MT = a + b \log_2(A/W + 1) \quad (2)$$

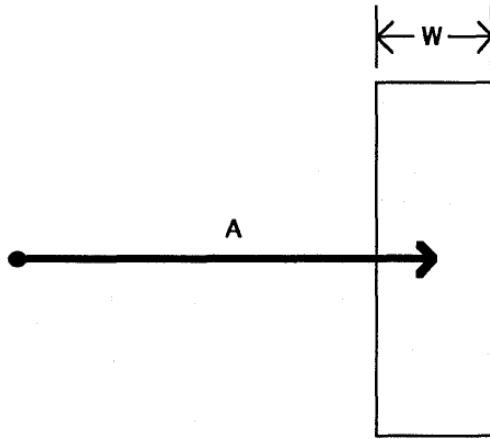


Abbildung 3: Fitts' Gesetz ist von Natur aus eindimensional, da die Amplitude (A) und die Breite des Ziels (W) auf der selben Achse liegen, MacKenzie und Buxton (1992, 2).

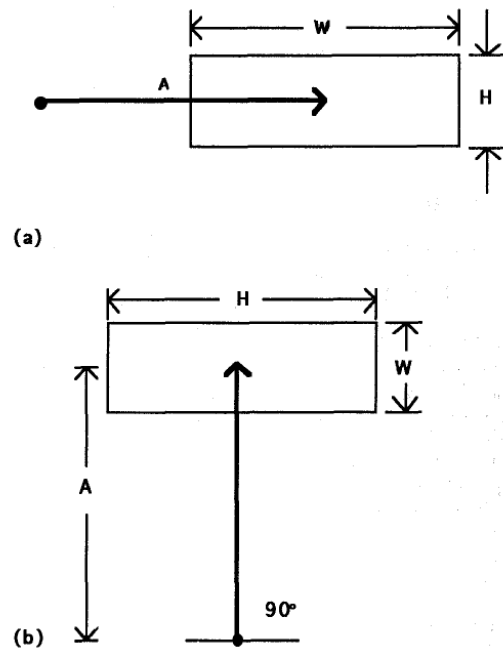


Abbildung 4: In der Gleichung für den ID wechselt die Rolle von W und H als Breite, wenn sich der Annäherungswinkel von 0° auf 90° ändert, MacKenzie und Buxton (1992, 2).

sorgt dafür, dass der Index of Difficulty immer positiv ist. Zudem liefert die Shannon Formulierung eine etwas bessere Anpassung an die Beobachtungen und entspricht genau dem Informationssatz dem Fitts' Gesetz zugrunde liegt (Mac Kenzie 1989, 1; Shannon 1948, 1).

Murata (1996, 4) hat unten stehende Varianten für die Berechnung des Index of Difficulty gesammelt und miteinander verglichen:

Jagacinski u. a. (1980, 1) hat für die Prognostizierung der Bewegungszeit folgendes Modell verwendet:

$$MT = a + b * A + c(1/W - 1) \quad (3)$$

Das anschließende Modell wurde von Kvålseth (1981, 1) für das Vorhersagen der Bewegungszeit verwendet:

$$MT = a * A^b * W^c \quad (4)$$

Murata (1996, 1) hat für die Prognostizierung der Bewegungszeit folgendes Modell verwendet:

$$MT = a + b * A + c * (1/W) \quad (5)$$

In den Gleichungen 1, 2, 3, 4 und 5 ist der Parameter MT die prognostizierte Bewegungszeit, der Parameter A die Amplitude, beziehungsweise die Distanz zum Zielobjekt und der Parameter W die Größe des Zielobjektes. Bei den Modellen 1 und 2 werden die empirischen Konstanten, für die Parameter a und b, durch lineare Regression berechnet. Bei den Modellen 3, 4 und 5

sind die Parameter  $a$ ,  $b$  und  $c$  Werte, die durch multiple Regressionsanalyse ermittelt werden. Murata (1996, 3-11) hat verschiedene Modelle, die zum Prognostizieren der Bewegungszeit dienen, miteinander verglichen. Als Kriterien für den Vergleich dienten der quadrierte Korrelationskoeffizient ( $R^2$ ) und die Standardabweichung (SE). Insgesamt war die Anpassung an die experimentellen Daten der Modelle 3, 4 und 5 besser, als bei den Modellen 1 und 2. Modell 3 passte am besten zu den experimentellen Daten.

Ein zusätzlicher Schritt, um Fitts' Law auf zweidimensionale Anwendungsfälle zu erweitern, ist  $W$  durch einen konsistenteren Wert zu ersetzen. MacKenzie und Buxton (1992, 3-5) haben verschiedene Repräsentationen des Wertes  $W$  miteinander verglichen:

$$W = W' \quad (6)$$

$$W = \min(W, H) \quad (7)$$

$$W = W + H \quad (8)$$

$$W = W * H \quad (9)$$

In den Gleichungen 6, 7, 8 und 9 sind die Variablen  $W$  und  $H$  die Größe des zweidimensionalen Ziels (siehe Abbildung 4). In einem Vergleich haben MacKenzie und Buxton (1992, 3-5) festgestellt, dass sich das SMALLER-OF Modell (Gleichung 7) und das  $W'$  Modell (Gleichung 6) am besten als Repräsentation für  $W$  eignen. Gleichung 6 wirkt attraktiv, da sie eine eindimensionale Interpretation einer zweidimensionalen Aufgabe ermöglicht. Das SMALLER-OF Modell (Gleichung 7) nimmt hingegen den kleineren der beiden Werte, da dieser mehr Einfluss auf den Index of Difficulty hat. Das SMALLER-OF Modell hat den Vorteil, dass der Annäherungswinkel für die Ermittlung von  $W$  nicht benötigt wird, allerdings ist es, anders als das  $W'$  Modell, auf rechteckige Ziele limitiert.

Murata (1996, 5-13) hat in einer Gegenüberstellung der oben genannten Modelle für  $W$  eine weitere Gleichung für  $W$  definiert:

$$W = \sqrt{W * H} \quad (10)$$

Die Gleichungen 9 und 10 haben den Vorteil, dass sie nicht auf rechteckige Ziele limitiert sind. Murata (1996, 8-15) hat die Standardabweichung und den quadrierten Korrelationskoeffizienten verschiedener Modelle verglichen, indem die Repräsentationen für  $W$  (Gleichungen 6, 7, 8, 9 und 10) in den Modellen 1, 2, 3, 4 und 5 verwendet wurden. Gleichung 10 hat für alle Gleichungen, die zur Ermittlung von  $MT$  dienen, den höchsten quadrierten Korrelationskoeffizienten und damit den höchsten linearen Zusammenhang. Gleichung 3 zeigte für alle Repräsentationen von  $W$  den größten linearen Zusammenhang. Hinsichtlich der Standardabweichung ergab sich dieselbe Tendenz. Diese war für Modell 3, für alle Repräsentationen von  $W$ , am niedrigsten. Zusätzlich zeigte die Gleichung 10 für  $W$  die geringste Standardabweichung.

## 2.3 Fitts' Gesetz im dreidimensionalen Raum

Laut Murata und Iwase (2001, 2) benötigt man, um dreidimensionale Zeigebewegungen zu beschreiben, drei Achsen ( $x$ ,  $y$  und  $z$ ; siehe Abbildung 5). Je mehr Dimensionen eine Aufgabe

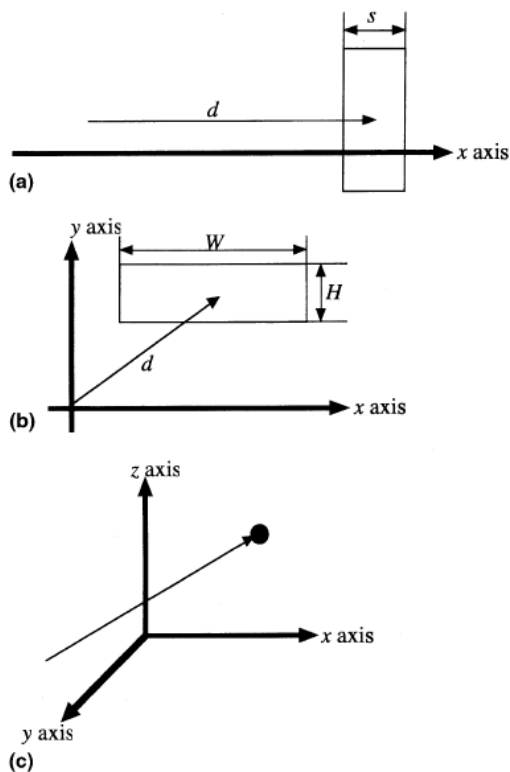


Abbildung 5: Die Definition von 1D, 2D und 3D Zeige-Aufgaben. (a) 1D Aufgabe: Die Bewegung entlang einer Achse. (b) 2D Aufgabe: Die Bewegung auf einer zweidimensionalen Ebene. (c) 3D Aufgabe: Die Bewegung im dreidimensionalen Raum (Murata und Iwase 2001, 2).

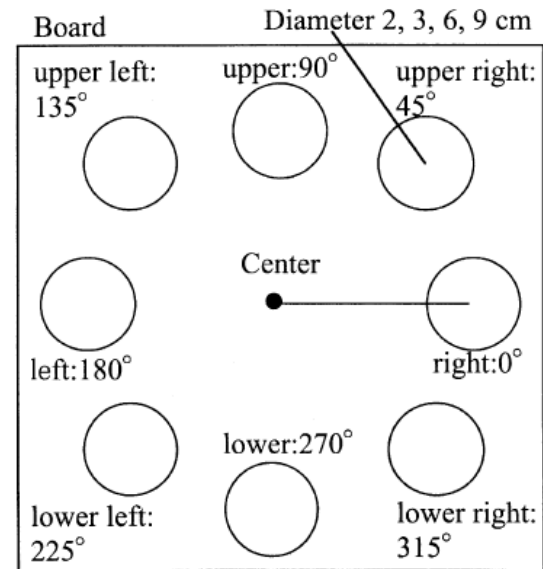


Abbildung 6: Die verschiedenen Positionen der Ziele im Experiment von Murata und Iwase (2001, 2).  $\theta$  entspricht den angegebenen Winkeln.

hat, desto komplizierter wird die Kontrolle über die Amplitude und die Dauer der erzeugten Kräfte. Aus der Arbeit von Galen und Jong (1995, 1) geht hervor, dass bei dreidimensionalen Zeige-Aufgaben mehr Muskelkraft erforderlich ist, was zu variablen Bewegungsbahnen und deshalb auch zu größeren Schwankungen der Bewegungszeiten führt.

Murata und Iwase (2001, 4) haben deshalb die Hypothese erstellt, dass die Dauer von dreidimensionalen Zeigebewegungen nicht nur stärker schwankt, sondern auch stärker durch die Bewegungsrichtung beeinflusst wird, als die Dauer von eindimensionalen oder zweidimensionalen Aufgaben. Nachdem Murata und Iwase (2001, 4, 8-9) das eindimensionale Fitt's Gesetz für die Bestimmung der benötigten Dauer der dreidimensionalen Bewegungen verwendet haben, hat sich, wie zu erwarten, gezeigt, dass Fitt's Gesetz mit der Shannon Formulierung für dreidimensionale Aufgaben nur mäßig geeignet ist. Das liegt sowohl an den stark variierenden Ergebnissen, als auch daran, dass die Bewegungsrichtung große Auswirkungen auf die Bewegungszeit hat, welche von dem eindimensionalen Fitt's Modell jedoch ignoriert wird. Murata

und Iwase (2001, 1) haben nach diesem Ergebnis die Beziehung zwischen der Bewegungszeit und der Richtung des Ziels untersucht, um Fitts' Modell für dreidimensionale Aufgaben zu erweitern. Ein Vergleich der durchschnittlichen Bewegungszeiten bei verschiedenen Bewegungsrichtungen zeigte eine systematische Beziehung. Das bedeutet, dass ein Modell, welches die Bewegungsrichtung in die Ermittlung des Index of Difficulty einfließen lässt, zu exakteren Ergebnissen führt. Murata und Iwase (2001, 10) repräsentieren den Index of Difficulty mithilfe folgender Gleichung:

$$ID = \log_2(A/W + 1) + c \sin(\theta) \quad (11)$$

Hierbei ist  $c$  eine Konstante, die durch lineare Regression bestimmt wird. Murata und Iwase (2001, 10) haben für  $\theta$  den Winkel, an dem sich das Ziel befand, verwendet (siehe Abbildung 6). Genau genommen ist die Bewegungsrichtung nicht identisch mit  $\theta$ . Laut Murata und Iwase (2001, 10) variiert die tatsächliche Bewegungsrichtung, bei einer vorgegebenen Zielentfernung, nur durch  $\theta$ . Deswegen haben Murata und Iwase (2001, 10) entschieden, die Bewegungsrichtung mithilfe von  $\theta$ , in die Gleichung für den Index of Difficulty zu integrieren.

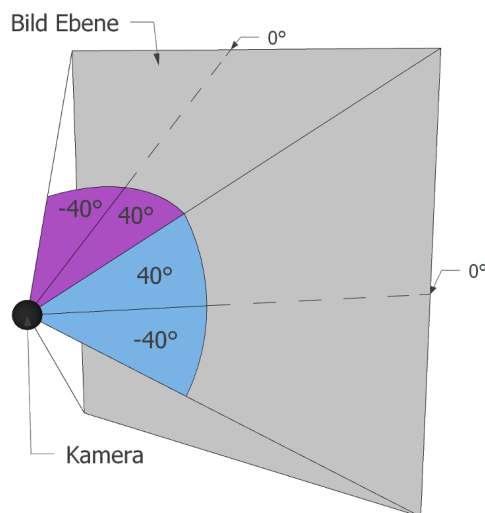


Abbildung 7: Das Sichtfeld der VR-Brille. Horizontal 80° (-40° bis 40°) und vertikal 80° (-40° bis 40°).

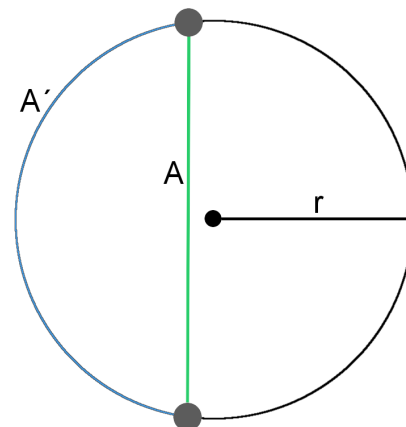


Abbildung 8: Die Distanz zwischen zwei Zielen in unterschiedlichen Varianten. Direkte Distanz A (grün). Distanz entlang des Umfangs A' (blau).

### 3 Benutzerstudie

Um zu testen, ob der dreidimensionale Ansatz des Index of Difficulty (siehe Kapitel 2.3), für den Gebrauch von Fitt's Gesetz in VR Anwendungen, dem eindimensionalen Ansatz für den Index of Difficulty (siehe Kapitel 2.1) vorzuziehen ist, wurde eine Benutzerstudie durchgeführt.

Ein Prototyp zur Durchführung der Benutzerstudie wurde in der Unity 3D Engine<sup>1</sup> angefertigt. In Verbindung mit dem Prototypen wurde als Virtual Reality Brille die HTC Vive<sup>2</sup> verwendet. Die grundsätzliche Funktionsweise dieser VR-Brille ist wie folgt: Eine Basisstation sendet Laserstrahlen aus, die von den, mit Photosensoren ausgestatteten, Headset und Controllern erkannt werden. Die exakte Position und Orientierung der Geräte wird dann, mithilfe der zeitlichen Differenz, zwischen dem Auftreffen der Laserstrahlen auf den jeweiligen Sensoren, berechnet. Für den Prototypen der Benutzerstudie wurden zwei Basisstationen verwendet, um ein fehlerfreies Verfolgen der Geräte, in einem Feld von 360°, zu erzielen.

### 3.1 Design der Benutzerstudie

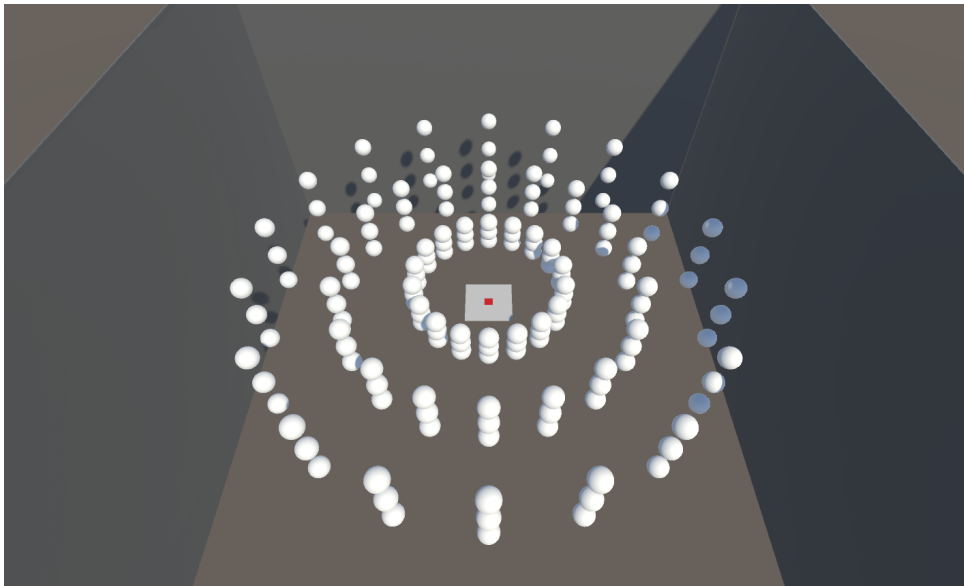


Abbildung 9: Die in Unity entwickelte Testumgebung.

In der Benutzerstudie führten Probanden und Probandinnen, unter der Verwendung einer VR-Brille und eines Controllers, Zeige- und Klickbewegungen aus. Mit der Anweisung, die Ziele möglichst schnell und möglichst fehlerlos zu treffen, mussten die Teilnehmer und Teilnehmerinnen den Strahl, der als Verlängerung des Controllers angezeigt wurde, auf die kugelförmigen Ziele richten und anschließend mit dem Drücken einer Taste am Controller die Bewegung abschließen. Als Ziele wurden Kugeln verwendet um, unabhängig vom Annäherungswinkel, immer denselben Wert für die Größe des Objekts ( $W = 1$ ) verwenden zu können. Somit sind die in Kapitel 2.2 beschriebenen Repräsentationen für die Variable  $W$ , in der Formel für den Index of Difficulty, für diesen Versuch nicht notwendig. Auch Murata und Iwase (2001, 1) haben in ihrem Versuch kreisförmige Ziele verwendet, um den Versuch vom Annäherungswinkel unabhängig durchführen zu können.

1. <https://unity3d.com>; in der Version 2017.3.0f3

2. <https://www.vive.com/product/>

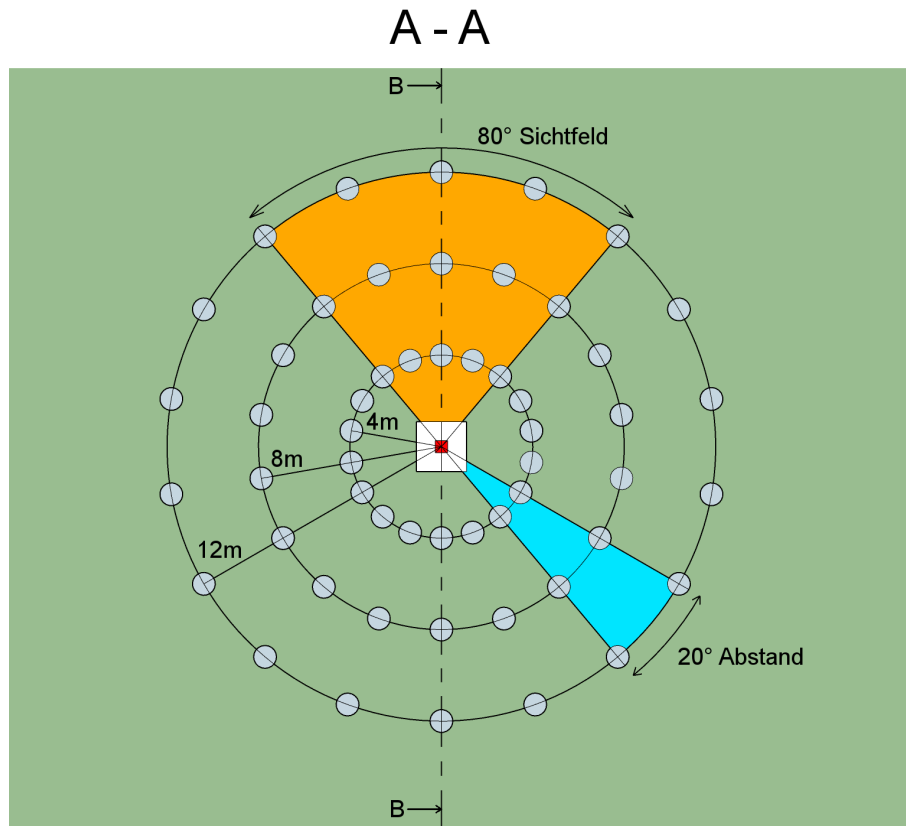


Abbildung 10: Die in Unity entwickelte Testumgebung von oben.

Die Benutzerstudie wurde in zwei Varianten durchgeführt: Bei der ersten Variante befanden sich die Ziele innerhalb eines 80° Bereiches (10, orange markiert). Die zweite Variante nutzte für die Ziele das gesamte Feld von 360° aus. Das Feld von 80° ergibt sich aus dem zuvor getesteten Sichtfeld der VR-Brille. Das getestete Sichtfeld reichte, wie in Abbildung 7 zu sehen ist, von -40° bis 40°, sowohl horizontal als auch vertikal. Der Test mit dem Feld von 360° wurde zusätzlich durchgeführt, um das volle Spektrum der VR-Umgebung zu verwenden.

Mit dem Drücken der Taste des Controllers, wurde das aktuelle Ziel als abgeschlossen gewertet und ein neues Ziel generiert (ähnlich wie bei der Computermouse, mit der man zuerst auf ein Ziel zeigt und dieses anschließend mit dem Drücken einer Taste bestätigt). Die Zeit zwischen dem Drücken der Taste des Controllers wurde gemessen und als Bewegungszeit gewertet. Die Aufgabe wurde von den Benutzern hauptsächlich durch Bewegungen des Unterarmes durchgeführt. Bewegungen in Oberarm und Schulter wurden vermieden, dennoch haben sie sich marginal mit dem Unterarm mitbewegt. Reichte eine Bewegung des Unterarmes nicht aus, um auf das Ziel zu zeigen, wurde der ganze Oberkörper in Richtung Ziel gedreht.

In der Abbildung 10 ist die Testumgebung für die Benutzerstudie von oben zu sehen. Die Probanden und Probandinnen standen im rot markierten Mittelpunkt. Um den Mittelpunkt herum befanden sich alle 162 Positionen der kugelförmigen Ziele. Jeder 360° Ring bestand aus 18 x 3 Zielen. Die 18 Ziele waren in einem Winkelabstand, der 20° betrug, auf die Ringe aufgeteilt

## B - B

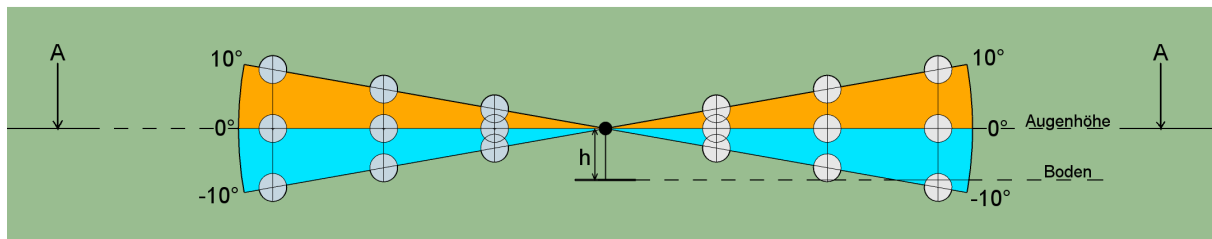


Abbildung 11: Die Seitenansicht der in Unity entwickelten Testumgebung.

(Abbildung 10, blau markiert). Zusätzlich gab es für jedes dieser 18 Ziele, drei unterschiedliche Höhen (siehe Abbildung 11). Die drei Ringe unterschieden sich in ihrem Radius: der innerste Ring hatte einen Radius von 4 Metern, der Mittlere hatte einen Radius von 8 Metern und der Radius des äußersten Rings betrug 12 Meter. Jedes kugelförmige Ziel hatte einen Radius von einem Meter. Angewandt auf eine der gängigen Formeln für den Index of Difficulty ( $ID = \log_2(A/W + 1)$ ) (Mac Kenzie 1989, 1; Shannon 1948, 1), war A der Abstand zwischen dem letzten und dem aktuellen Ziel und W der Radius der kugelförmigen Ziele. A war somit variabel, W hingegen war konstant ( $W = 1$  Meter). In der Abbildung 11 ist der Höhenunterschied der Kugeln in Grad ersichtlich. Der Höhenunterschied betrug, ausgehend von der Augenhöhe des Probanden oder der Probandin, einen Winkelabstand von  $10^\circ$ . Da die Höhenverschiebung der Ziele mit einer Höhe von  $10^\circ$  und  $-10^\circ$ , ausgehend von dem Ziel mit einer Höhe von  $0^\circ$ , nur entlang einer Achse erfolgte, war der Abstand der Ziele bei unterschiedlichen Höhen nicht konstant. Während die Ziele auf der neutralen Höhe von  $0^\circ$  vier, acht oder zwölf Meter von den Probanden und Probandinnen entfernt waren, betrug der Abstand bei Zielen mit einer Höhe von  $10^\circ$  oder  $-10^\circ$  4,06, 8,12, oder 12,18 Meter. Das entspricht einer Ungenauigkeit von 1,5%. Damit ein Ziel bei einer Höhe von  $0^\circ$  für jeden Teilnehmer und jede Teilnehmerin, unabhängig von deren Körpergröße und Augenhöhe, auf der Augenhöhe der jeweiligen Versuchsperson lag, wurde die Höhe der Ziele an die Körpergröße der Probanden und Probandinnen angepasst. Bevor der eigentliche Test startete, befand sich eine grüne Kugel, die zum Starten des Tests diente, in der virtuellen Umgebung vor der Versuchsperson. Sobald die Versuchsperson auf die grüne Kugel zeigte und die Bestätigungstaste drückte, wurde die Höhe des Mittelpunktes der Kreise, an denen die Ziele erscheinen konnten, auf die Höhe der VR-Brille und somit auf die virtuelle Kopfhöhe der Teilnehmer und Teilnehmerinnen gesetzt. In der Abbildung 11 ist die Höhe der VR-Brille in der Mitte als „h“ eingezeichnet.

Die Reihenfolge, in der die Ziele zu treffen sind, wurde einmalig zufällig ausgewählt und in eine Datei geschrieben. Damit jedoch jeder Proband und jede Probandin die Studie unter den gleichen Bedingungen durchführen konnte, wurde die gleiche randomisierte Reihenfolge für jede Person aus der Datei gelesen und verwendet.

Die Teilnehmer und Teilnehmerinnen verwendeten die HTC Vive als VR-Brille und einen dazugehörigen Controller als Eingabegerät. Vom Controller ausgehend wurde den Teilnehmern und Teilnehmerinnen ein Strahl, der als Verlängerung des Controllers diente, dargestellt. Dieser Strahl diente dazu, die Interaktion im dreidimensionalen Raum zu erleichtern und funktioniert



wie ein Laser-Pointer. Indem ein Proband oder eine Probandin mit dem Strahl auf das Ziel zeigt und eine Taste zur Bestätigung drückt, werden die Ziele der Reihe nach abgearbeitet.

### 3.2 Versuchspersonen und Ablauf

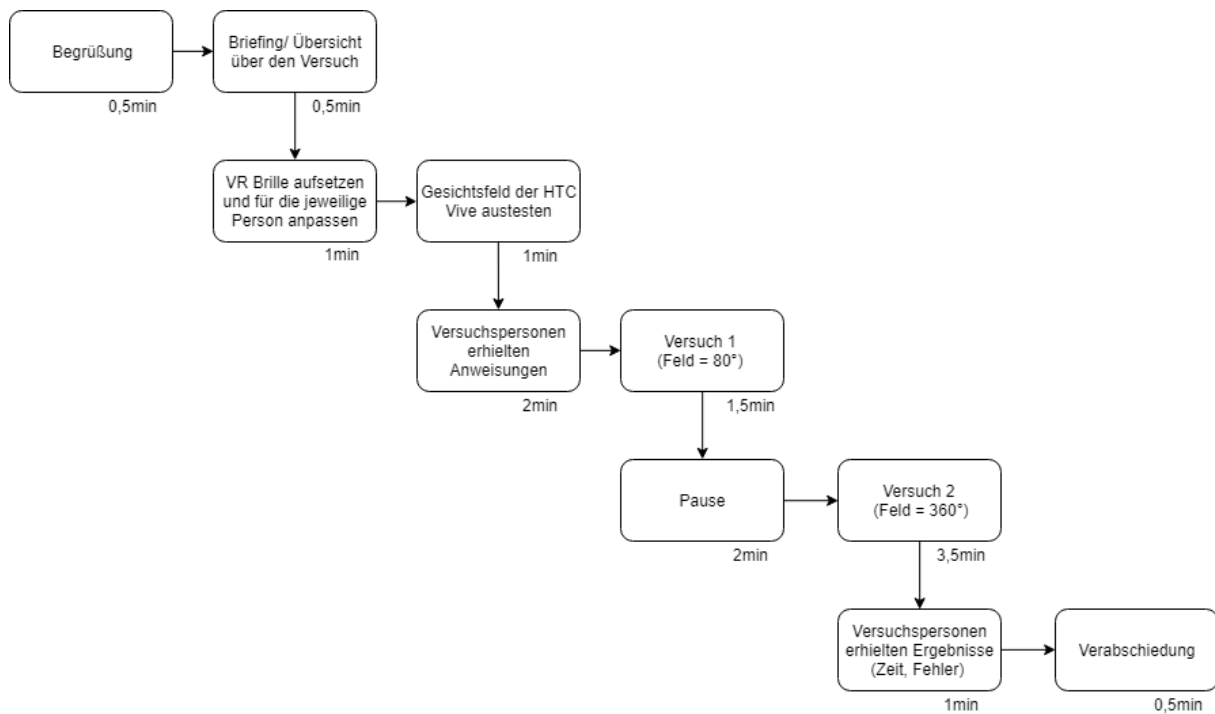


Abbildung 12: Der Ablauf der Benutzerstudie.

Sowohl der erste Test, bei dem die Ziele in einem eingegrenzten Bereich von  $80^\circ$  platziert wurden (siehe Abbildung 10, orange markiert), als auch der zweite Test mit einem Platzierungs-Feld von  $360^\circ$ , wurden von zehn Testpersonen durchgeführt. Die insgesamt zehn Testpersonen waren aufgeteilt in sechs Teilnehmer und vier Teilnehmerinnen, im Alter von 20 bis 25 Jahren (Standardabweichung  $\sigma = 1,7$ ). Alle Probanden und Probandinnen hatten bereits Erfahrung mit VR Applikationen oder VR Spielen. Jeder der Teilnehmer und Teilnehmerinnen war Rechtshänder, und benutzten sowohl die Computermouse, als auch den Controller der HTC Vive bevorzugt mit der rechten Hand.

Der Ablauf der Benutzerstudie ist in der Abbildung 12 dargestellt. Unter den einzelnen Schritten ist die geschätzte durchschnittliche Dauer in Minuten vermerkt. Nach der Begrüßung folgte das Briefing, in dem die Probanden und Probandinnen über ihre Aufgabe und den Zweck der Studie informiert wurden. Danach hatten die Teilnehmer und Teilnehmerinnen die Möglichkeit die VR-Brille anzupassen. Einige der Versuchspersonen waren Brillenträger, weshalb die individuelle Anpassung der VR-Brille etwas länger dauerte. Vor der eigentlichen Benutzerstudie wurde, mithilfe der VR-Brille und einem simplen Prototypen, ein Test durchgeführt, der Aufschluss über das horizontale und vertikale Sichtfeld der VR-Brille geben sollte. Dieser Test war schnell durchgeführt und dauerte ungefähr eine Minute. Das Sichtfeld der HTC Vive war für

alle Teilnehmer und Teilnehmerinnen der Studie  $80^\circ$ , sowohl horizontal als auch vertikal. Dieser Wert wurde dann verwendet, um im ersten Test die kugelförmigen Ziele nur in einem  $80^\circ$  Bereich darstellen zu lassen (siehe Abbildung 10, orange markiert).

Nach diesem kleinen Vor-Test wurde den Teilnehmern und Teilnehmerinnen die Anweisungen für die folgenden beiden Tests geschildert, danach begann die eigentliche Studie: Die Probanden und Probandinnen erhielten die Anweisung, alle Ziele so schnell und präzise wie möglich zu treffen. Nachdem der Teilnehmer oder die Teilnehmerin die VR-Brille aufgesetzt hatte und die Testumgebung gestartet wurde, begann die Benutzerstudie. Diese startete mit einer grünen Kugel als Ziel, dabei wurde die Zeit noch nicht gemessen. Die Versuchspersonen sollten hier die Möglichkeit haben, sich in der Testumgebung einzufinden und eventuell noch kleine Anpassungen am Setup der HTC Vive vorzunehmen, wie zum Beispiel die VR-Brille noch enger oder lockerer zu stellen.

Sobald die Probanden und Probandinnen bereit waren, sollten sie auf das grüne Ziel zeigen, um den ersten Test zu starten. Als der erste Test gestartet wurde, mussten die Teilnehmer und Teilnehmerinnen insgesamt 132 Ziele anvisieren und bestätigen. Diese Aufgabe wurde dabei hauptsächlich durch Bewegungen des Unterarmes durchgeführt. Beim ersten Test, erschienen die Ziele nur in einem Bereich von  $80^\circ$ , um dafür zu sorgen, dass möglichst jedes Ziel, das neu platziert wurde, schon im Sichtfeld der Teilnehmer und Teilnehmerinnen positioniert war. Die ersten 44 der 132 Ziele, befanden sich in vier Metern Abstand zu den Probanden und Probandinnen. Die Ziele 45 bis 88 hatten acht Meter Abstand zu den Testpersonen und die letzten 44 Ziele hatten einen Abstand von zwölf Metern.

Nachdem die Teilnehmer und Teilnehmerinnen die Aufgabe bewältigt hatten, hatten diese eine Pause von zwei Minuten. Anschließend wurde der zweite Test durchgeführt. Dieser verwendete, im Gegensatz zum ersten Test, für jeden Ring den vollen  $360^\circ$  Bereich zum Platzieren der Ziele. Auch bei diesem Durchgang mussten die Probanden und Probandinnen insgesamt 132 Ziele anvisieren und zu bestätigen: 44 Ziele mit vier Metern Abstand, 44 mit acht Metern Abstand und 44 mit zwölf Metern Abstand.

Nach dem Abschließen des Tests mit der Feldgröße von  $360^\circ$ , wurde den Teilnehmern und Teilnehmerinnen ihre Leistung mitgeteilt. Sie erhielten Information über die von ihnen benötigte Zeit zum Absolvieren der zwei Tests. Zusätzlich wurde ihnen ebenfalls mitgeteilt, wie viele der 132 Ziele pro Test getroffen wurden. Die Dauer des gesamten Ablaufes lag bei ungefähr 13 Minuten, davon wurden ca. 5 Minuten für die zwei eigentlichen Testphasen beansprucht.

### 3.3 Zielparameter

Bei jedem Teilnehmer und jeder Teilnehmerin wurden, wie in Abbildung 1 ersichtlich, für jedes Ziel folgende Daten aufgezeichnet: Der Wert „Radius ID“ war der Abstand zwischen Versuchsperson und Ziel in Metern und diente dazu, Rückschlüsse auf die Auswirkungen dieses Abstandes, in Bezug auf die Fehlerraten und Bewegungszeiten, ziehen zu können.

Die „Height ID“ enthielt die Information, auf welcher der 3 möglichen Höhen sich das aktuelle Ziel befand, um eine mögliche Korrelation zwischen den verschiedenen Höhen mit den Fehlerraten und Bewegungszeiten zu beobachten.

Der Wert „Distance“ enthielt die direkte Distanz A (siehe Abbildung 8) zwischen dem vorheri-

gen und dem aktuellen Ziel in Metern.

„Angle of object“ gab an, an welcher Winkelposition ( $0^\circ$  -  $359^\circ$ ) sich das aktuelle Ziel befand. Das diente dazu, den Winkelabstand zwischen den Zielen zu berechnen. „Angle distance“ war der Winkelabstand zwischen dem vorherigen Ziel und dem aktuellen Ziel, berechnet anhand der Werte von „Angle of object“. Der Abstand zwischen zwei Zielen ergab immer zwei mögliche Winkelabstände, abhängig davon ob man den Winkelabstand im, oder gegen den Uhrzeigersinn maß. Als Wert für „Angle distance“ wurde immer der kurzstmögliche Weg entlang des Kreises verwendet. Die „Angle distance“ wurde in Grad gemessen. Für die tatsächliche Verwendung in den Formeln für den Index of Difficulty, musste dieser Wert dann noch in Metern berechnet werden.

„ID 1D“ war der Index of Difficulty, berechnet anhand der Gleichung 2, für das eindimensionale Fitts' Modell. Der Index of Difficulty ergab sich hier aus der Formel  $ID = \log_2(A/W + 1)$  (Shannon 1948, 1), (Mac Kenzie 1989, 1).

„ID 3D“ beschrieb den Index of Difficulty anhand der Gleichung 11. Um den Wert für c zu ermitteln, wurde die Korrelation zwischen dem Index of Difficulty und der Bewegungszeit mit variierenden Werten für c berechnet. Für c wurde anschließend der Wert verwendet, mit dem sich die höchste Korrelation zwischen Index of Difficulty und der Bewegungszeit ergab.

„Has hit“ enthielt die Information, ob ein Ziel beim Drücken der Bestätigungstaste auch tatsächlich getroffen wurde. Diese Information diente dazu, um die Fehlerraten zu ermitteln. Um die Korrelation zwischen dem Index of Difficulty und der Bewegungszeit zu berechnen, wurden nur Ziele, die auch tatsächlich getroffen wurden, verwendet. „Was Obj Visible“ gab an, ob ein neues Zielobjekt in dem Moment als es platziert wurde, innerhalb des Sichtfeldes der VR-Brille war. War das neue Zielobjekt beim Platzieren nicht im Sichtfeld, mussten es die Teilnehmer und Teilnehmerinnen zuerst ausfindig machen, bevor die Zeigebewegung mit dem anschließenden Drücken der Bestätigungstaste ausgeführt werden konnte. Das würde in der Theorie zu höheren gemessenen Zeiten führen.

„Time in seconds“ war die Zeit, die für die Zeigebewegung und das Drücken der Taste benötigt wurde, in Sekunden. Gemessen wurde die Zeit, die zwischen dem vorigen Drücken der Bestätigungstaste bis zum aktuellen Drücken, vergangen ist.

Radius_ID	Height_ID	Distance	Angle_of_object	Angle_distance	ID_1D	ID_3D	Has_hit	WasObjVisible	Time_in_seconds	
0	0	2	0.000	0	0	0.000	0.000	False	True	0.402
1	0	2	2.736	20	40	1.901	1.715	True	True	0.648
2	0	2	1.389	0	20	1.256	1.028	True	True	0.414
3	0	1	1.553	20	20	1.352	1.124	True	True	0.379
4	0	1	2.736	60	40	1.901	1.715	True	True	0.424

Tabelle 1: Die aufgezeichneten Daten für jedes der 132 Ziele. Jede Zeile repräsentiert ein Ziel.

## 4 Ergebnisse

Um die Daten aus den beiden Tests zu analysieren und zu visualisieren, wurde die Programmiersprache Python mit den Bibliotheken „Pandas<sup>3</sup>“, „Matplotlib<sup>4</sup>“, „Numpy<sup>5</sup>“ und „Seaborn<sup>6</sup>“ verwendet. Bei der Analyse wurden die Fehlerraten, die Bewegungszeit (MT) und die Korrelation der Bewegungszeit mit dem Index of Difficulty beobachtet. Mit dem Kolmogorov-Smirnov Test wurden überprüft, ob bei den Datensätzen eine Normalverteilung vorliegt. Dies war bei keinem Datensatz der Fall, deshalb wurde für Signifikanztests anstelle des klassischen t-Tests, der Wilcoxon-Mann-Whitney-Test (u-Test) verwendet. Das Signifikanzniveau wurde auf 0,05 (5%) festgelegt.

### 4.1 Fehlerraten

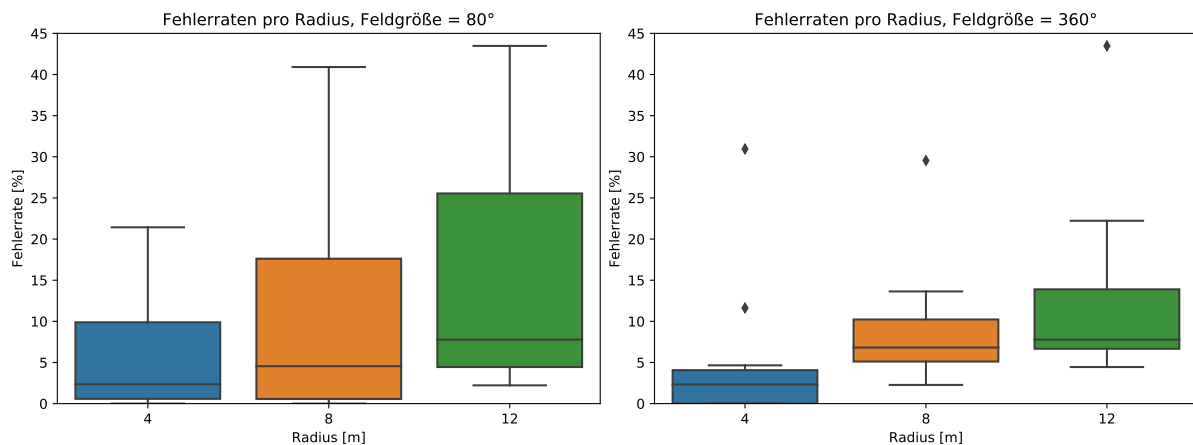


Abbildung 13: Die Fehlerraten bei variierendem Radius (n = 10, N = 2620).

Die höchste Fehlerrate wurde bei einem, nach der Formel  $ID = \log_2(A/W + 1)$  berechneten, Index of Difficulty von 4,65 bits pro Sekunde gemessen (siehe Abbildung 15, oben rechts). Dieser Wert ergab sich aus der zweitschwierigsten Aufgabenstellung ( $A = 24,09$ ,  $W = 1$ ), bei der eine Fehlerrate von 30% gemessen wurde.

Die Abbildung 13 zeigt die Fehlerraten der Teilnehmer und Teilnehmerinnen, bei verschiedenen Abständen zwischen ihnen und dem Ziel (Radius). Wie man dieser Abbildung entnehmen kann, stiegen die Fehlerraten mit dem Erhöhen des Radius an. So war die durchschnittliche Fehlerrate, sowohl beim Versuch mit einem Feld von 80°, als auch beim Versuch mit dem 360° Feld, bei den Zielen, die sich auf dem Kreis mit einem vier Meter Radius befanden, am niedrigsten. Am höchsten war die durchschnittliche Fehlerrate für beide Versuche bei einem Radius von zwölf Metern. Die Unterschiede in den Fehlerraten des Versuches mit einer Feldgröße von 80° und den

3. <https://pandas.pydata.org/>

4. <https://matplotlib.org/>

5. <http://www.numpy.org/>

6. <https://seaborn.pydata.org/>

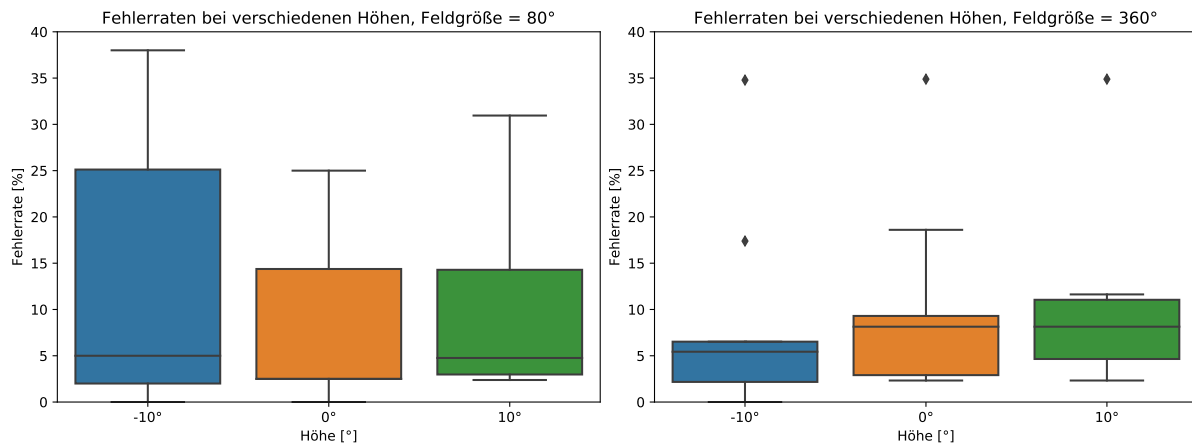


Abbildung 14: Die Fehlerraten bei variabler Höhe (n = 10, N = 2620).

Fehlerraten des Versuches mit einer Feldgröße von 360° sind jedoch nicht statistisch signifikant. Auffallend ist, dass, obwohl in dem Versuch mit einem Feld von 360° die Werte für den Index of Difficulty tendenziell höher waren, die Fehlerraten in diesem Versuch niedriger ausfielen, als in dem Versuch mit einer Feldgröße von 80°. Das könnte ein Indiz dafür sein, dass die Teilnehmer und Teilnehmerinnen durch das Training des ersten Versuches, im zweiten Versuch treffsicherer waren. Bei dem Versuch mit einer Feldgröße von 80° waren die Unterschiede zwischen den Fehlerraten bei den unterschiedlichen Radien nicht statistisch signifikant: Der ermittelte p-Wert, zwischen den Fehlerraten bei einem Radius von 4 Metern und den Fehlerraten bei einem Radius von 8 Metern, ergab beim Versuch mit einer Feldgröße von 80° einen Wert von p-Wert = 0,41. Der p-Wert zwischen den Fehlerraten bei einem Radius von acht und zwölf Metern entsprach einem Wert von 0,21. Bei einem Vergleich der Fehlerraten des Versuches mit einem 80° Feld bei einem Radius von 4 Metern und dem Radius von 12 Metern ergab sich ein p-Wert von 0,07. Bei dem Versuch mit einer Feldgröße von 360° waren zwei der drei Unterschiede der Fehlerraten bei unterschiedlichen Radien statistisch signifikant: Der Vergleich der Fehlerraten bei einem Radius von vier Metern und einem Radius von acht Metern ergab einen p-Wert von 0,026, das ist eine statistisch signifikante Beobachtung. Der p-Wert zwischen den Fehlerraten, bei einem Radius von acht und zwölf Metern, entsprach einem Wert von 0,42. Dieser Unterschied war nicht statistisch signifikant. Der Unterschied der Fehlerraten bei einem Radius von vier Metern und einem Radius von zwölf Metern war im Versuch mit einer Feldgröße von 360° statistisch signifikant, der Wilcoxon-Mann-Whitney-Test ergab einen p-Wert von 0,008, das entspricht einem hoch signifikanten Ergebnis.

Die Abbildung 14 zeigt die Fehlerraten bei den drei unterschiedlichen Höhen, an denen die Ziele positioniert werden konnten. Sowohl zwischen den verschiedenen Höhen, als auch zwischen dem Versuch mit dem 80° Feld und dem Versuch mit dem 360° Feld, gab es keine statistisch signifikanten Beobachtungen. Bei dem Versuch mit einer Feldgröße von 80°, liegt bei einer Höhe von 0° der Median genau auf dem unteren Quartil. Das heißt, 50% der Teilnehmer und Teilnehmerinnen hatten eine Fehlerrate die niedriger oder gleich dem Median war. Bei dem Versuch mit einer Feldgröße von 360°, liegt bei einer Höhe von -10° der obere „Whisker“ exakt auf dem oberen Quartil.

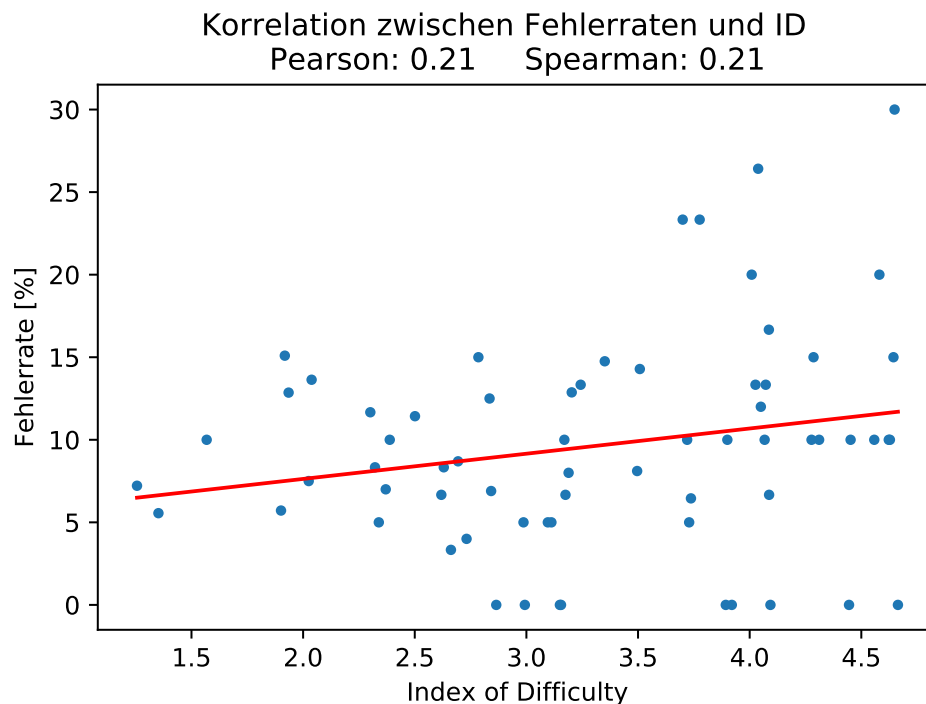


Abbildung 15: Die Korrelation zwischen den Fehlerraten (Y-Achse) und dem Index of Difficulty (X-Achse); Regressionsgerade:  $y = 1,53x + 4,58$ ;  $n = 10$ ,  $N = 2620$ .

In Abbildung 15 ist die Korrelation zwischen der Fehlerrate und den verschiedenen Werten für den Index of Difficulty dargestellt. Zwischen der Fehlerrate und dem Index of Difficulty gibt es nur einen schwachen linearen Zusammenhang. Sowohl Pearson's Korrelationskoeffizient als auch Spearman's Korrelationskoeffizient liegen bei einem Wert von 0,21.

Die Fehlerraten hängen also mehr von der Distanz von der Versuchsperson zum Ziel ab, als von dem Index of Difficulty selbst. Das heißt, dass die Distanz zwischen dem letzten und dem aktuellen Ziel nur eine geringe Auswirkung auf die Fehlerrate hat.

## 4.2 Bewegungszeiten

Als Bewegungszeit gemessen wurde die Zeit, die zwischen dem Drücken der Bestätigungstaste vergangen ist. Bewegungen, bei denen das Ziel nicht getroffen wurde, wurden von den folgenden Messungen ausgeschlossen.

Die Abbildung 16 zeigt die Bewegungszeiten im ersten Versuch (mit einer Feldgröße von  $80^\circ$ ) und im zweiten Versuch (mit einer Feldgröße von  $360^\circ$ ). Vergleicht man das linke Diagramm mit dem rechten Diagramm (die Y-Achsen sind unterschiedlich skaliert) sieht man, dass die Bewegungszeiten, beim Versuch mit einer Feldgröße von  $360^\circ$ , deutlich höher liegen, als die Bewegungszeiten des Versuches mit einem  $80^\circ$  Feld: Während die durchschnittliche Bewegungszeit der Probanden und Probandinnen bei einer Distanz zum Ziel von 4 Metern im ersten Versuch 0,56 Sekunden beträgt, liegt die durchschnittliche Bewegungszeit im zweiten Versuch

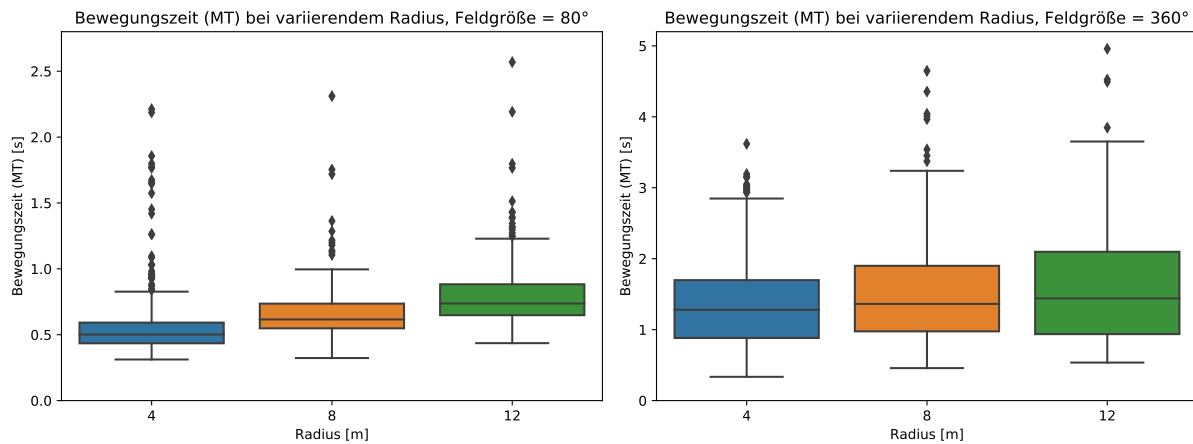


Abbildung 16: Die drei verschiedenen Radien auf der X-Achse und deren Bewegungszeiten auf der Y-Achse ( $n = 10$ ,  $N = 2357$ ). Die Y-Achse der beiden Diagramme ist unterschiedlich skaliert.

bei 1,34 Sekunden. Das entspricht einer Erhöhung der Dauer von 139,3%. Ein Signifikanztest für diese Beobachtung lieferte einen p-Wert von  $2,03 \cdot 10^{-87}$ . Damit ist diese Beobachtung hoch signifikant. Bei einer Distanz von acht Metern erhöht sich die durchschnittliche Bewegungszeit von 0,66 Sekunden im ersten Versuch, auf 1,50 Sekunden im zweiten Versuch, mit einem p-Wert von  $1,53 \cdot 10^{-85}$ . Bei einer Distanz von 12 Metern, beträgt die durchschnittliche Bewegungszeit 0,80 Sekunden im ersten Versuch und erhöht sich auf 1,61 Sekunden im zweiten Versuch, mit einem p-Wert von  $5,47 \cdot 10^{-66}$ . Diese drei Beobachtungen sind statistisch hoch signifikant.

Die Abbildung 16 zeigt zusätzlich, dass mit einem größeren Abstand von den Teilnehmern und Teilnehmerinnen zum Ziel, die durchschnittliche Bewegungszeit ansteigt. Diese Beobachtung gilt sowohl für den ersten (linkes Diagramm), als auch für den zweiten Versuch (rechtes Diagramm).

In der Abbildung 17 werden die Zeiten von den Zielen, die sich beim Erscheinen im Blickfeld befanden, mit den Zielen, die sich beim Erscheinen außerhalb des Blickfeldes der Teilnehmer und Teilnehmerinnen befanden, verglichen. Hierbei zeichnet sich ein deutlicher Unterschied im Bezug auf die Bewegungszeiten ab. Während die Testpersonen, bei einer Feldgröße von  $80^\circ$ , für ein Ziel, das sich beim Erscheinen innerhalb des Blickfeldes befand, im Durchschnitt 0,62 Sekunden für die Bewegung benötigten, stieg die benötigte Zeit bei Zielen außerhalb des Blickfeldes um durchschnittlich 0,5 Sekunden an (auf 1,12 Sekunden). Ein durchgeführter Signifikanztest ergab einen p-Wert von  $5,47 \cdot 10^{-53}$ , das deutet auf eine statistisch hoch signifikante Beobachtung hin. Auch die Bewegungszeiten des zweiten Versuches verhielten sich ähnlich: Für die sichtbaren Ziele benötigten die Probanden und Probandinnen durchschnittlich 0,86 Sekunden, für die Ziele die außerhalb des Blickfeldes aktiv wurden 1,71 Sekunden. Das entspricht einer Steigerung von 0,85 Sekunden, der p-Wert liegt bei  $3,39 \cdot 10^{-100}$  und somit weit unter dem Signifikanzniveau von 0,05.

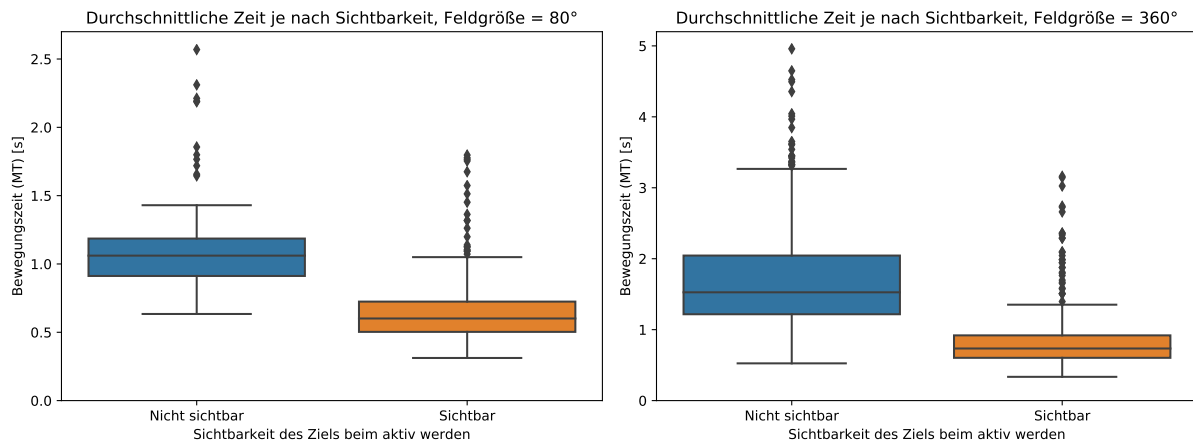


Abbildung 17: Die Sichtbarkeit des Ziels beim aktiv werden auf der X-Achse, die Bewegungszeiten auf der Y-Achse ( $n = 10$ ,  $N = 2357$ ). Die Y-Achse der beiden Diagramme ist unterschiedlich skaliert.

### 4.3 Korrelation zwischen ID und MT

Um die Korrelation zwischen dem Index of Difficulty (ID) und der Bewegungszeit (MT) zu vergleichen, wurde der Datensatz, der sich aus der Benutzerstudie ergab, gefiltert. Der erste Versuch, bei dem die Ziele in einem eingegrenzten Bereich von 80° platziert wurden, wurde von dem zweiten Versuch getrennt behandelt. Zusätzlich wurden alle Daten jener Bewegungen verworfen, bei denen das Ziel nicht getroffen wurde, da sich daraus nicht verwertbare Werte für die Bewegungszeit und den Index of Difficulty ergeben würden.

Um die Korrelation zwischen dem ID und der MT zu vergleichen, wurde Pearson's Korrelationskoeffizient verwendet. Zusätzlich dazu wurde auch Spearman's Korrelationskoeffizient eingesetzt (Spearman 1904, 1). Spearman's Korrelation benutzt anstatt der exakten Messwerte, nur deren Rangfolge. Das führt dazu, dass starke Ausreißer und Ungenauigkeiten der Messung, die auf Spearman's Korrelationskoeffizienten eine starke Wirkung haben, weniger Einfluss auf die Korrelation haben (Weisburd und Britt 2007, 413).

#### 4.3.1 Eindimensionaler Index of Difficulty

Um zu ermitteln, ob das eindimensionale Fitts' Gesetz für den Einsatz im dreidimensionalen Raum geeignet ist, wurde die Korrelation zwischen der Bewegungszeit und dem Index of Difficulty berechnet. Für den Index of Difficulty wurde dafür die „Shannon Formulierung“

$$MT = a + b \log_2(A/W + 1) ID = \log_2(A/W + 1) \quad (12)$$

angewendet (Shannon 1948, 1). Als Werte für A wurde als erster Ansatz die direkte Distanz, zwischen dem letzten und dem aktuellen Ziel, in Metern verwendet. In den Abbildungen 18 und 19 sind die Ergebnisse für den Index of Difficulty auf der X-Achse angeordnet. Die Y-Achse der beiden Diagramme enthält die Bewegungszeit in Sekunden. Die blauen Punkte kennzeichnen



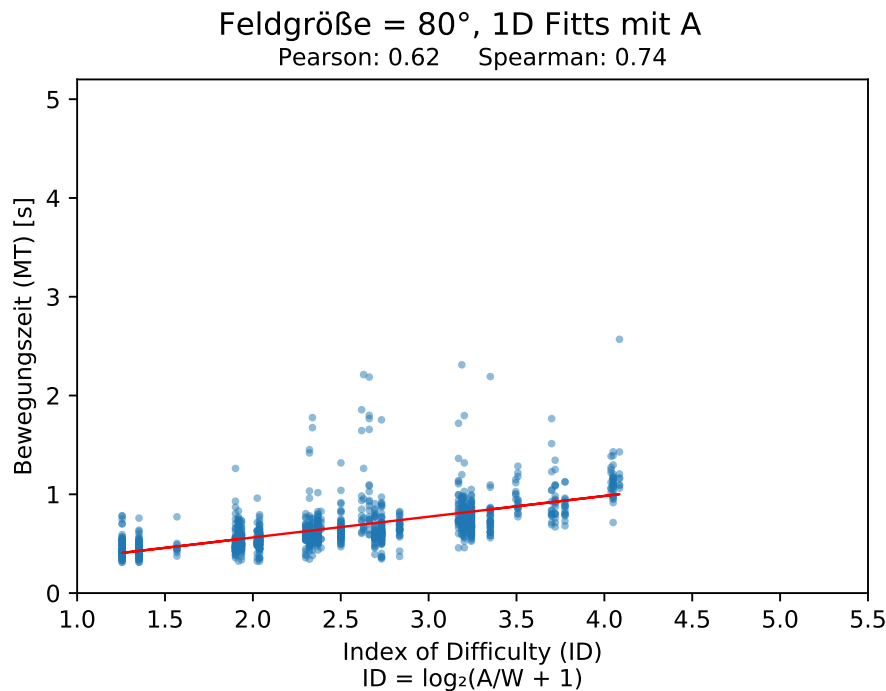


Abbildung 18: Die Korrelation zwischen MT und ID (mit direkter Distanz A); Feldgröße = 80°; Regressionsgerade:  $y = 0,21x + 0,14$ ;  $n = 10$ ,  $N = 1168$ .

die einzelnen Bewegungen, die rote Linie stellt die Trendlinie dar. Vergleicht man die beiden Diagramme der Abbildungen 18 und 19, ist es auffallend, dass die Punkte der Abbildung 19 weiter von der Trendlinie entfernt sind, als die Punkte der Abbildung 18. Das spiegelt sich auch in den Ergebnissen der berechneten Korrelationen wider. Die Korrelation ist im ersten Versuch (mit einer Feldgröße von 80°), sowohl mit Pearson's Korrelationskoeffizienten, als auch mit Spearman's Korrelationskoeffizienten, deutlich höher als im zweiten Versuch (mit einer Feldgröße von 360°). Bei einer Feldgröße von 80° beträgt Pearson's Korrelationskoeffizient 0,62, bei einer Feldgröße von 360° nur 0,50. Spearman's Korrelationskoeffizient, der anstelle konkreter Werte nur deren Rang verwendet, beträgt bei einem Feld von 80° 0,74 und bei einem Feld von 360° 0,57. Bei einem Vergleich der Abbildungen 18 und 19 kann man zusätzlich erkennen, dass die Bewegungszeiten der einzelnen Bewegungen im zweiten Versuch deutlich höher sind als im ersten Versuch.

Nach der Ermittlung der Korrelationskoeffizienten, mithilfe der eindimensionalen Formel für den Index of Difficulty und der direkten Distanz, wurde die selbe Berechnung, mit der Distanz über den Umfang des Kreises ( $A'$ ) anstelle der direkten Distanz ( $A$ ), durchgeführt, um die Auswirkung der zwei Interpretationen von  $A$  auf die Korrelation zu vergleichen. In den Abbildungen 20 und 21 sind erneut die Ergebnisse für den Index of Difficulty in beiden Diagrammen auf der X-Achse angeordnet. An den Y-Achsen befindet sich abermals die Bewegungszeit (MT). Die Abbildung 20 zeigt die Ergebnisse mit einem Feld von 80° und die Abbildung 21 die Ergebnisse die sich mit einer Feldgröße von 360° ergaben. Erneut ist sowohl Pearson's Korrelationskoeffizient, als auch Spearman's Korrelationskoeffizient bei einem Feld von 80° deutlich

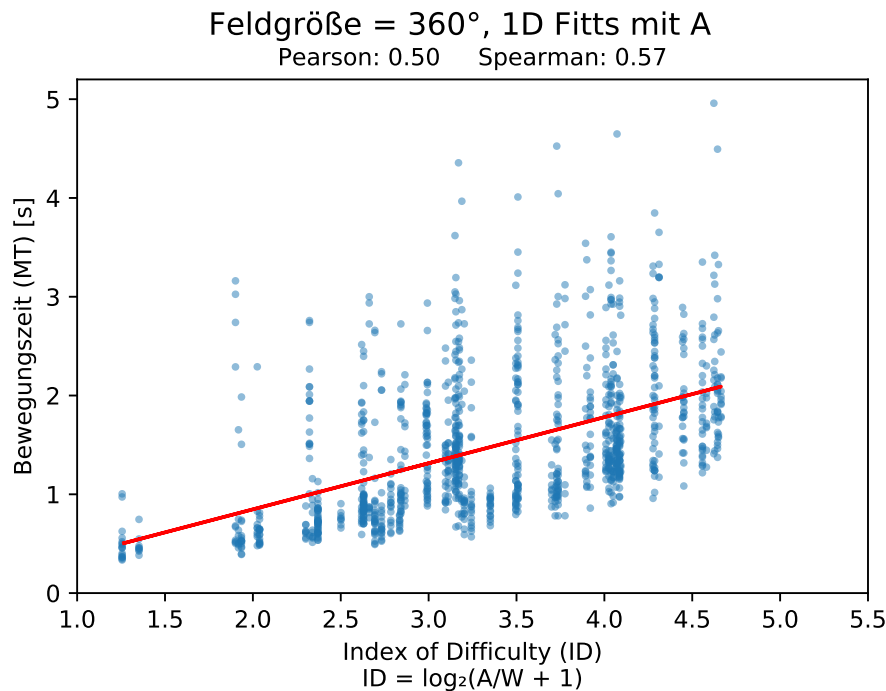


Abbildung 19: Die Korrelation zwischen MT und ID (mit direkter Distanz A); Feldgröße = 360°; Regressionsgerade:  $y = 0,47x + 0,09$ ;  $n = 10$ ,  $N = 1189$ .

höher als bei einem Feld von 360°, auch wenn die Differenz zwischen den Werten marginal gesunken ist. Bei dem 80° großen Feld beträgt Pearson's Korrelationskoeffizient 0,63 und bei einer Feldgröße von 360° beträgt dieser 0,51. Spearman's Korrelationskoeffizient beträgt beim 80° Feld 0,74, bei einer Feldgröße von 360° liegt er bei 0,58.

Vergleicht man nun die Unterschiede der Korrelation unter Verwendung von A für den Index of Difficulty und der Verwendung von A', so sind die Ergebnisse der Korrelationskoeffizienten, die mit A' für ID ermittelt wurden, in allen Fällen etwas höher, als die Ergebnisse die mit der direkten Distanz A ermittelt wurden. Das heißt, dass unter Verwendung von A' für ID die Punkte, die sich aus den Merkmalen Bewegungszeit und Index of Difficulty ergeben, näher an der Regressionsgerade befinden. Die höhere Korrelation mit A' ist ein Indiz dafür, dass der Index of Difficulty mithilfe von A' besser repräsentiert werden kann, als mit der direkten Distanz A.

#### 4.3.2 Dreidimensionaler Index of Difficulty

Um zu ermitteln, ob die dreidimensionale Gleichung (siehe Gleichung 11) von Murata und Iwase (2001, 10) für den Einsatz im dreidimensionalen Raum geeignet, oder eine bessere Repräsentation als die „Shannon Formulierung“ für den Index of Difficulty ist, wurde abermals die Korrelation zwischen der Bewegungszeit und des Index of Difficulty ermittelt. Um den am besten passenden Index of Difficulty mit der Gleichung 11 zu erhalten, wurde zuerst der Wert für die Variable c ermittelt. Dazu wurde die Korrelation, mit Werten für c die zwischen -1 und 1 liegen, 201 mal berechnet. Die Größe der Schritte in denen vorgegangen wurde, maß 0,01.

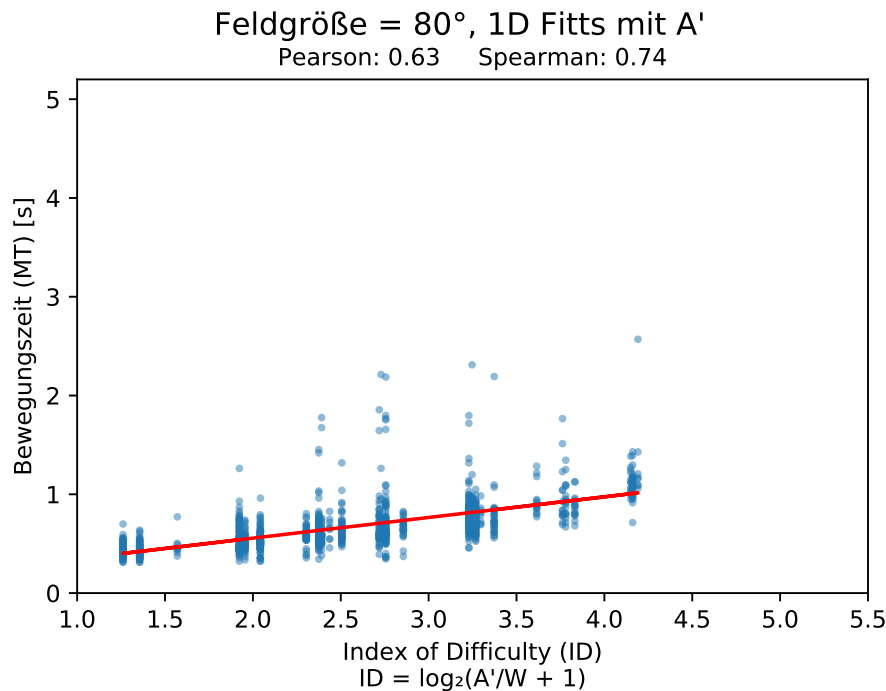


Abbildung 20: Die Korrelation zwischen MT und ID (mit A'); Feldgröße = 80°; Regressionsgerade:  $y = 0,21x + 0,14$ ;  $n = 10$ ,  $N = 1168$ .

In der Abbildung 22 sind die sich daraus ergebenden Korrelationskoeffizienten an der Y-Achse abgebildet. Auf der X-Achse befinden sich die Werte für  $c$ , die im Intervall  $[-1,1]$  liegen. Der rote Punkt jeder Kurve markiert den Maximalwert, den der Korrelationskoeffizient an diesem  $c$ -Wert erreicht hat. Die blaue Kurve der beiden Diagramme beschreibt die Korrelation, berechnet mit Spearman's Korrelationskoeffizienten. Die rote Kurve wurde mit den Korrelationen von Pearson's Korrelationskoeffizienten ermittelt. Die Korrelationen beider Korrelationskoeffizienten wurden zwischen dem Index of Difficulty, mit der direkten Distanz als  $A$ , und der Bewegungszeit berechnet.

Wie man dem ersten Diagramm der Abbildung 22 entnehmen kann, liegt der Maximalwert der Korrelation im ersten Versuch mit Pearson's Korrelationskoeffizienten bei 0,67. Dieser wurde mit einem Wert für die Variable  $c$  von -0,82 erreicht. Der Maximalwert mit Spearman's Korrelationskoeffizienten wurde bei einem  $c$ -Wert von -0,37 erreicht und liegt bei 0,75.

Das zweite Diagramm der Abbildung 22 zeigt die Korrelationen bei einer Feldgröße von 360°, die etwas niedriger ausfielen als die des ersten Versuches. Die höchste ermittelte Korrelation mit Pearson's Korrelationskoeffizienten ergab sich bei einem  $c$ -Wert von -0,30 und liegt bei 0,52. Mit einem Wert von -0,18 für die Variable  $c$ , ergab sich mit Spearman's Korrelationskoeffizienten eine Korrelation von 0,59.

In Abbildung 23 sind die Streudiagramme des Versuches mit einem Feld von 80° und des Versuches mit einem Feld von 360° mit den beiden unterschiedlichen Korrelationskoeffizienten und deren berechnete Werte für  $c$  abgebildet. Auf der Y-Achse befindet sich die Bewegungszeit, auf der X-Achse der Index of Difficulty, der mit der Gleichung 11 von Murata und Iwase (2001,

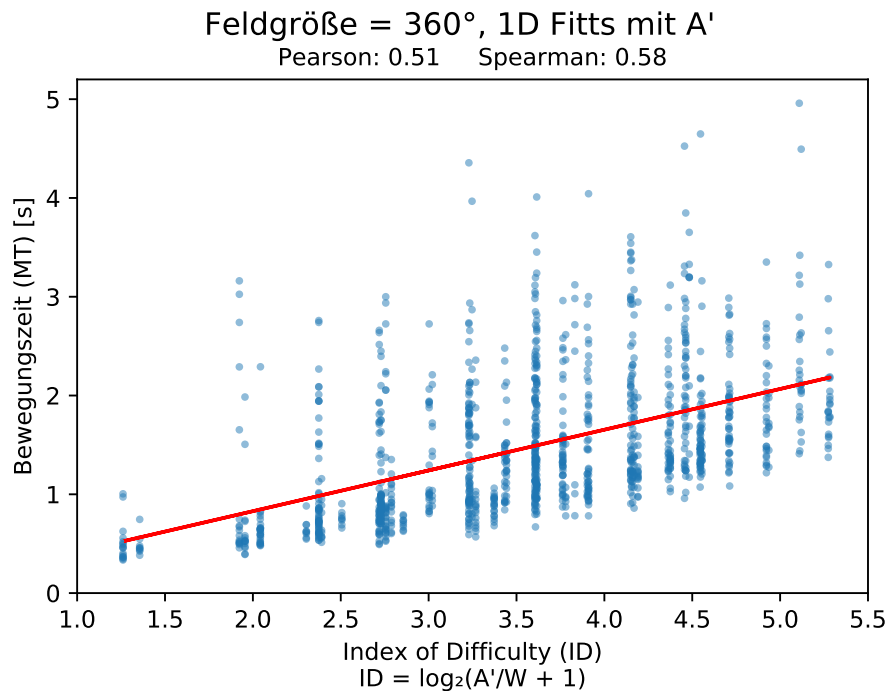


Abbildung 21: Die Korrelation zwischen MT und ID (mit A'); Feldgröße = 360°; Regressionsgerade:  $y = 0,41x + 0,00$ ;  $n = 10$ ,  $N = 1189$ .

10) und dem zuvor ermittelten Wert für  $c$ , berechnet wurde. In einem Vergleich zwischen den Streudiagrammen des 80° Versuches und denen des 360° Versuches lässt sich deutlich erkennen, dass sich die Punkte (bestehend aus ID und Mt) des 80° Versuches deutlich näher an der roten Regressionsgerade befinden, als die Punkte des 360° Versuches. Auch ist erkennbar, dass beim Versuch mit einem Feld von 360°, auch bei niedrigen Werten für den Index of Difficulty, die Bewegungszeit schon häufig deutlich über 2 Sekunden liegt, während beim ersten Versuch nur selten eine Bewegungszeit von über 2 Sekunden auftritt.

Unter Verwendung von A' für Gleichung 11 ergeben sich, wie auch bei der eindimensionalen Fitt's Gleichung, leicht höhere Korrelationskoeffizienten bei der Berechnung des linearen Zusammenhanges zwischen MT und ID, als bei der Verwendung von A für die Gleichung des Index of Difficulty. Die Abbildung 24 zeigt die Ergebnisse für die Korrelation unter Verwendung der verschiedenen Werte für die Variable  $c$ . Es wurden abermals 201 Werte im Intervall  $[-1, 1]$  für  $c$  gewählt. Die roten Kurven zeigen die Ergebnisse der Korrelation, die mit Pearson's Korrelationskoeffizienten berechnet wurden. Die blauen Kurven zeigen die, mithilfe von Spearman's Korrelationskoeffizienten ermittelten, Korrelationen. Das erste Diagramm der Abbildung 24, das mit den Ergebnissen des Versuches mit einem Feld von 80° erstellt wurde, hat einen maximalen Korrelationskoeffizienten von 0,67 (Pearson) bei einem  $c$ -Wert von -0,75. Spearman's Korrelationskoeffizient ist etwas höher und liegt bei einem Wert von 0,76, der  $c$ -Wert hierfür liegt bei -0,32.

Das zweite Diagramm, das die Werte des Versuches mit einer Feldgröße von 360° enthält, hat eine maximale Korrelation von 0,53 (Pearson,  $c = -0,35$ ) und 0,60 (Spearman,  $c = -0,29$ ).

Auffallend ist, dass sowohl in den beiden Diagrammen der Abbildung 22, als auch in den Diagrammen der Abbildung 24, die Ergebnisse für die Variable  $c$  unter Verwendung von Pearson's Korrelationskoeffizienten immer höhere negative Werte sind, als die Ergebnisse für die Variable  $c$  unter Verwendung von Spearman's Korrelationskoeffizienten.

Die Abbildung 25 zeigt die Streudiagramme der beiden Versuche. Die ersten beiden Diagramme zeigen den Versuch mit einer Feldgröße von  $80^\circ$ , die letzten beiden Diagramme den Versuch mit einer Feldgröße von  $360^\circ$ . An der Y-Achse befindet sich die Bewegungszeit MT in Sekunden, an der X-Achse die Werte für den Index of Difficulty. Der Index of Difficulty dieser Diagramme wurde mithilfe der dreidimensionalen Formel für ID (Gleichung 11) ermittelt. Als Wert für  $c$  dient in jedem Streudiagramm der  $c$ -Wert, mit dem in Abbildung 24 die höchste Korrelation erzielt werden konnte. Der Vergleich zwischen den Ergebnissen des Versuches mit einem Feld von  $80^\circ$  und den Ergebnissen des Versuches mit einem Feld von  $360^\circ$  verhält sich für ID mit  $A'$  ähnlich wie für ID mit  $A$ . Trotzdem ist hervorzuheben, dass mithilfe der Verwendung von  $A'$  anstelle der direkten Distanz  $A$ , marginal höhere Korrelationen zwischen ID und MT erzielt werden konnten. Der Versuch mit einer Feldgröße von  $80^\circ$  erreicht sowohl mit Pearson's, als auch mit Spearman's Korrelationskoeffizient eine höhere Korrelation, als der Versuch mit einer Feldgröße von  $360^\circ$ . Die Punkte des  $80^\circ$  Versuches liegen bei beiden Korrelationskoeffizienten näher an deren Regressionsgerade, als die Punkte des  $360^\circ$  Versuches. Zudem lässt sich in Abbildung 25 deutlich erkennen, dass die Bewegungszeit im Versuch mit einem Feld von  $360^\circ$  deutlich höher nach oben streut, als die Bewegungszeit des Versuches mit einem Feld von  $80^\circ$ . Vergleicht man die Korrelationen von MT und ID, die mit der direkten Distanz ( $A$ ) berechnet wurden, mit den Korrelationen bei denen  $A'$  für die Berechnung von ID verwendet wurde, fallen die Korrelationen die mit  $A'$  berechnet wurden marginal höher aus, als die Korrelationskoeffizienten, die mit  $A$  berechnet wurden. Das gilt sowohl für Pearson's als auch für Spearman's Korrelationskoeffizienten.

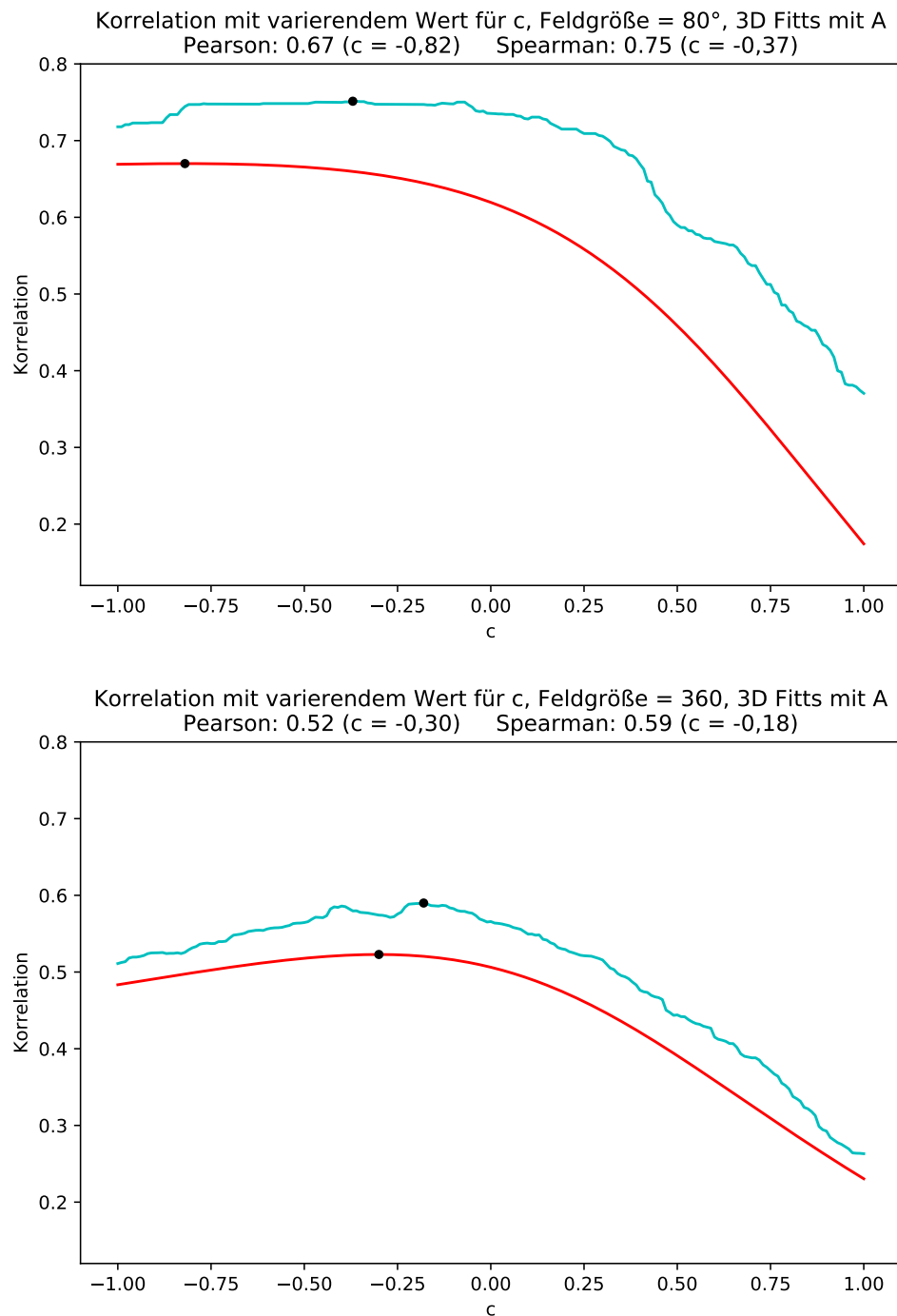


Abbildung 22: Die Korrelation zwischen MT und ID (Gleichung 11, mit der direkten Distanz für A) unter variierenden Werten für  $c$ . Die blauen Linien stellen Pearson's, die roten Linien Spearman's Korrelationskoeffizienten dar. Die schwarzen Punkte markieren den Maximalwert.

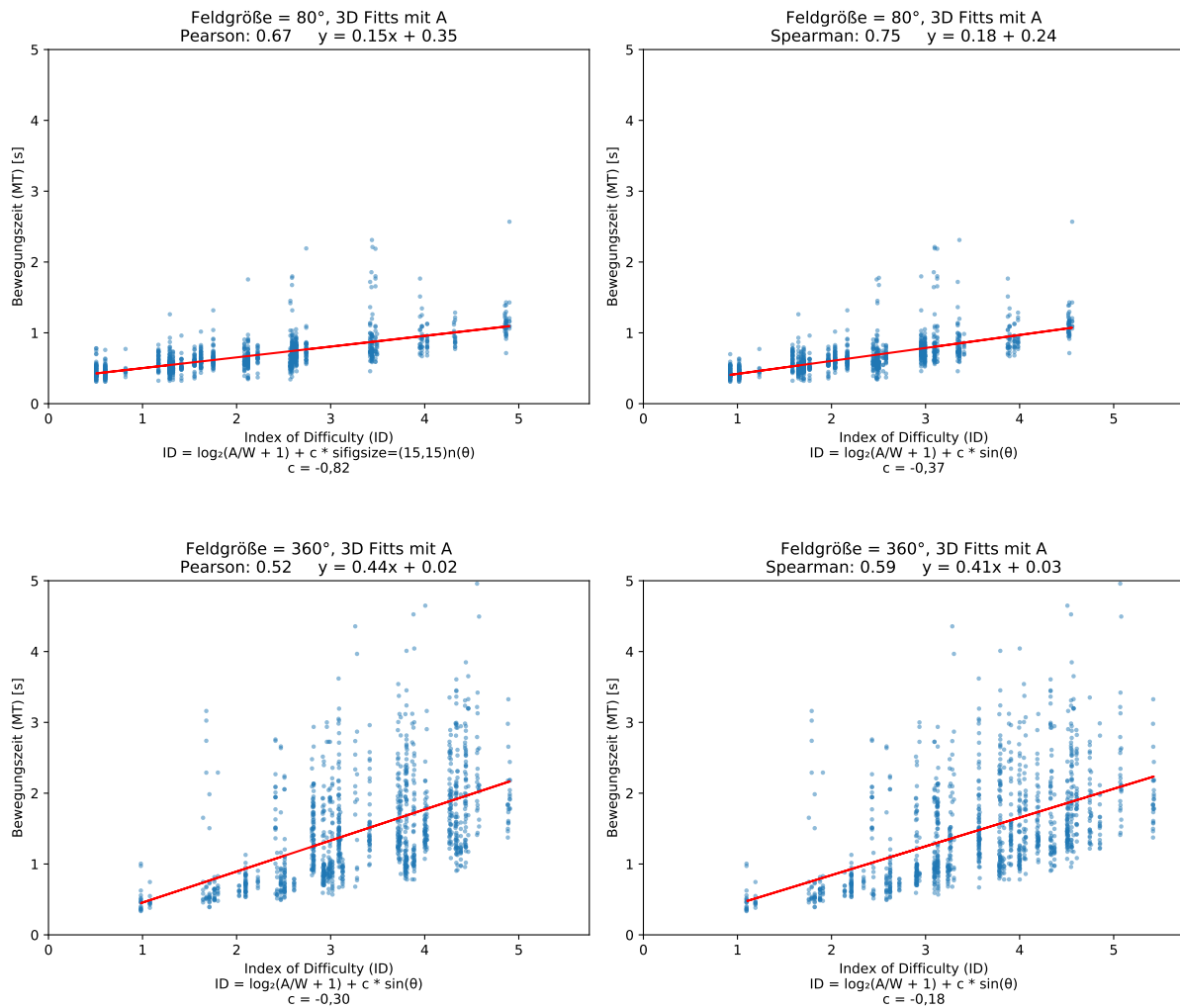


Abbildung 23: Index of Difficulty (X-Achse) vs Bewegungszeit (Y-Achse), berechnet mit der Gleichung 11 mit A und den ermittelten Werten für c; 80° Feld: n = 10, N = 1168; 360° Feld: n = 10, N = 1189.

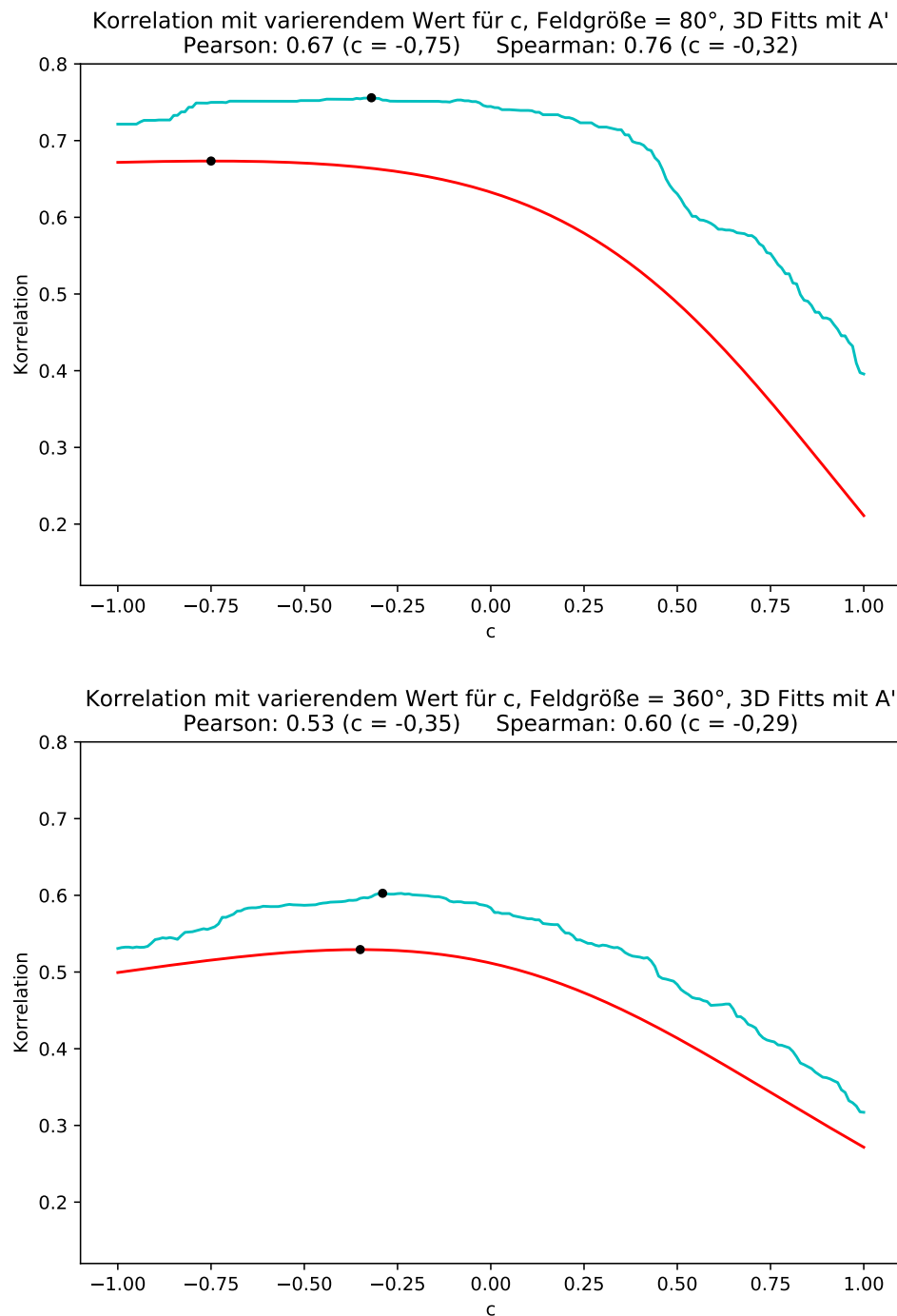


Abbildung 24: Die Korrelation zwischen MT und ID (Gleichung 11, mit A' für A) unter variierenden Werten für  $c$ . Die blauen Linien stellen Pearson's, die roten Linien Spearman's Korrelationskoeffizienten dar. Die schwarzen Punkte markieren den Maximalwert.



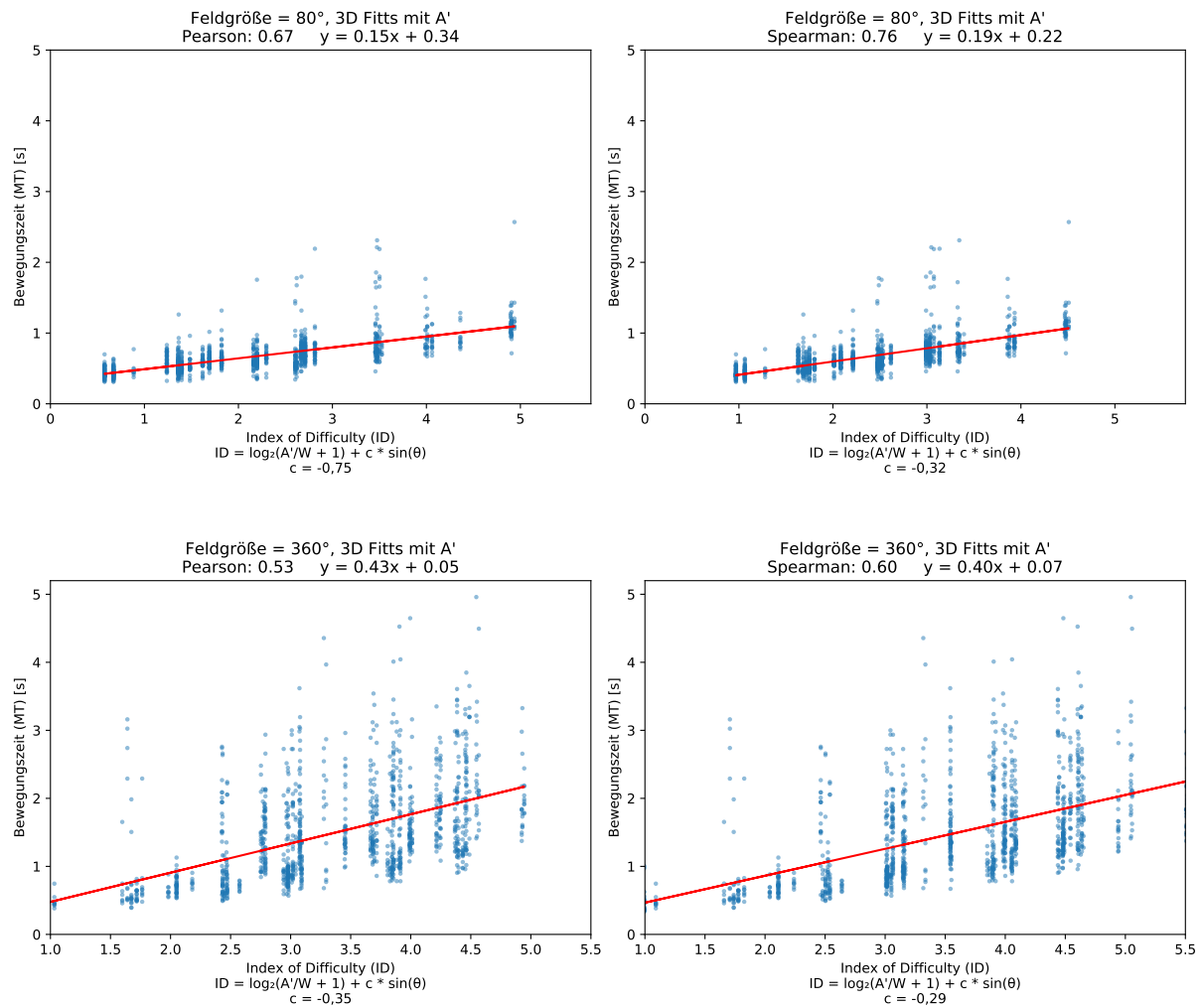


Abbildung 25: Index of Difficulty (X-Achse) vs Bewegungszeit (Y-Achse), berechnet mit der Gleichung 11 mit A' und den ermittelten Werten für c; 80° Feld: n = 10, N = 1168; 360° Feld: n = 10, N = 1189.

## 5 Diskussion

Dieses Kapitel behandelt die kritische Auseinandersetzung zu der vorhandenen Literatur zu Fitt's Gesetz, der Implementierung des Prototypen und dessen Schwachpunkte, dem Design der Studie und die Interpretation der durch die Auswertung der Benutzerstudie erhaltenen Ergebnisse. Zusätzlich wird ein Ausblick auf die zukünftige Relevanz und Anwendung von Fitt's Gesetz für VR Applikationen gegeben.

### 5.1 Literatur

Die Relevanz, Fitt's Gesetz für die Interaktion im dreidimensionalen Raum zu erweitern, ist noch immer gegeben und nimmt mit der Relevanz von Virtual Reality Anwendungen zu. Während es viele Quellen für Fitts' Gesetz mit eindimensionalen und zweidimensionalen Aufgaben gibt, gibt es nur einige wenige Quellen, die sich mit Fitt's Gesetz im dreidimensionalen Raum beschäftigen und noch keine Arbeiten dazu, Fitt's Gesetz für den Einsatz in Virtual Reality Anwendungen zu erweitern. In diesen Arbeiten zu Fitt's Gesetz für eindimensionale und zweidimensionale Anwendungsfälle wurden verschiedenste Modelle vorgestellt, mit denen der Index of Difficulty für eine spezielle Aufgabe besser repräsentiert werden soll. Auffallend ist hier, dass in diesen Arbeiten keine einheitliche Schreibweise für die Parameter der Formel für den Index of Difficulty verwendet wurde. Auch wurde Fitt's Gesetz in manchen Fällen auf spezielle Anwendungsfälle optimiert, die in der Realität kaum Relevanz haben und vom Versuchslabor schlecht auf die Realität übertragbar sind.

Die Literaturrecherche zu Arbeiten, die sich mit Fitt's Gesetz im dreidimensionalen Raum beschäftigen, war nur wenig ertragreich. Die vorhandenen Arbeiten haben sich meist damit beschäftigt, Fitt's Gesetz für selbst entwickelte experimentelle Systeme und Konfigurationen zu optimieren. Diese Systeme sind nur eingeschränkt übertragbar auf reelle Anwendungsszenarien im Bereich Virtual Reality.

In einigen Arbeiten wurden Behauptungen präsentiert, die nur schwer nachvollziehbar oder gar falsch sind. Beispielsweise formulieren Murata und Iwase (2001, 2), dass für die Beschreibung von dreidimensionalen Zeigebewegungen drei Achsen (x, y und z) benötigt werden, gehen in diesem Zusammenhang aber nicht auf Polarkoordinaten ein, mit denen die Beschreibung von dreidimensionalen Zeigebewegungen problemlos möglich wäre.

In den meisten Arbeiten ist zudem nicht vermerkt, mit welchen Signifikanztests die statistische Überprüfung von Hypothesen berechnet wurde. Zusätzlich wurde nur selten festgehalten, mit welchem Korrelationskoeffizienten die Korrelation berechnet wurde. Dadurch lassen sich die Ergebnisse dieser Arbeiten mit den Ergebnissen dieser Benutzerstudie nicht eindeutig miteinander vergleichen.

### 5.2 Implementierung des Prototypen

Eine Ungenauigkeit, die in dem für die Benutzerstudie verwendeten Prototypen existiert, sind die ungleichen Abstände der Ziele in verschiedenen Höhen zu den Testpersonen. Wie in Ab-

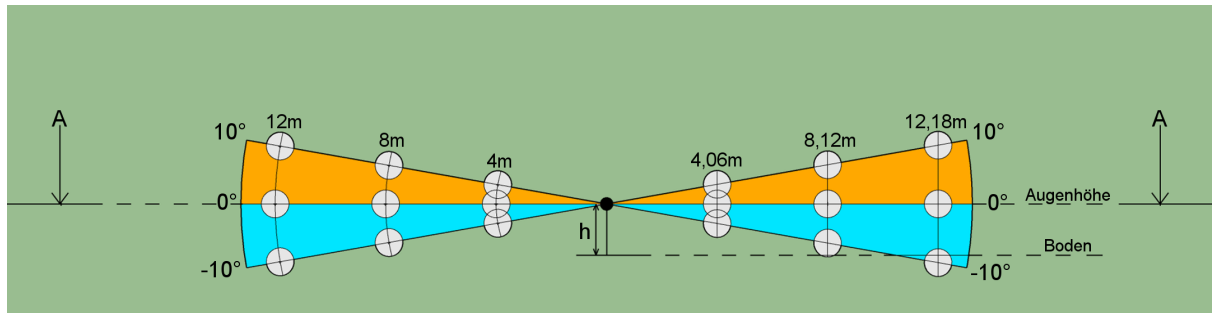


Abbildung 26: Die Seitenansicht der in Unity entwickelten Testumgebung. Die rechte Hälfte zeigt die implementierte Lösung, die linke Hälfte einen genaueren Ansatz.

Abbildung 26 in der rechten Hälfte gezeigt wird, wurden die Höhenverschiebungen der Ziele nur anhand der Y-Achse ausgeführt. Das führt zu minimalen Ungenauigkeiten bei dem Abstand zwischen den Versuchspersonen und den Zielen. Während Ziele, die auf einer Höhe von  $0^\circ$  lagen, genau vier, acht oder zwölf Meter von den Teilnehmern und Teilnehmerinnen entfernt waren, lagen die Ziele, die sich auf den Höhen  $-10^\circ$  und  $10^\circ$  befanden, 4,06, 8,12 oder 12,18 Meter von den Probanden und Probandinnen entfernt. Das entspricht einer Ungenauigkeit von sechs Zentimetern pro vier Meter (1,5%). Die durch diese Ungenauigkeit entstandenen Unterschiede im Abstand zwischen den Testpersonen und den Zielen sind nur von geringer Natur und kaum Einfluss auf die Resultate nehmen.

Die Berechnung des Index of Difficulty, bei einer Feldgröße von  $360^\circ$ , erwies sich als fehleranfällig: Wenn sich das neue Zielobjekt hinter der Versuchsperson befindet, ist es nicht klar, ob sich die Versuchsperson im Uhrzeigersinn oder gegen den Uhrzeigersinn in Richtung des neuen Zielobjektes dreht. Es gibt deshalb zwei verschiedene Werte für den Parameter  $A'$  in der Gleichung für den Index of Difficulty. Der Prototyp war auch mit einigen Modifikationen nicht in der Lage die Richtung, in der sich die Teilnehmer und Teilnehmerinnen zum Zielobjekt drehen, zu erkennen. Dadurch, dass die Probanden und Probandinnen bei der Suche nach dem Zielobjekt, das hinter ihnen positioniert war, oft schnell nach links und rechts blickten und sich hin und her gedreht haben, war die Erkennung der Richtung, in der sich die Versuchspersonen tatsächlich zum Zielobjekt gedreht haben, sehr unzuverlässig und fehleranfällig. Daher wurde für den Parameter  $A'$  in der Gleichung für den Index of Difficulty immer die kürzere der beiden Strecken verwendet. Ob sich die Versuchspersonen dann auch tatsächlich in dieser Richtung zum Zielobjekt gedreht haben, wurde bei der Berechnung des Index of Difficulty außer Acht gelassen. Dies könnte einer der Gründe sein, warum die Korrelation zwischen MT und ID im Versuch mit dem  $360^\circ$  großen Feld deutlich niedriger war, als die Korrelation im Versuch mit dem  $80^\circ$  Feld.

### 5.3 Studie

Da bis zum jetzigen Zeitpunkt keine Literatur, zur Anwendung von Fitt's Gesetz in dreidimensionalen Umgebungen, unter der Verwendung einer VR-Brille, vorhanden war, war die Entwicklung des Prototyps und der Benutzerstudie angelehnt an bereits existierende Prototypen

und Studien, die Fitt's Gesetz im dreidimensionalen Raum angewandt haben.

Schwachpunkte der hier durchgeführten Benutzerstudie sind die Anzahl und die Auswahl der Probanden und Probandinnen. Die Benutzerstudie wurde nur mit insgesamt zehn Teilnehmern und Teilnehmerinnen durchgeführt. Um trotzdem ausreichend verwertbare Bewegungsdaten zu erhalten, mussten von jeder Versuchsperson insgesamt 264 Zeigebewegungen auf die Zielobjekte durchgeführt werden. Das Alter der Versuchspersonen lag zwischen 20 und 25 Jahren und die Teilnehmer und Teilnehmerinnen waren allesamt mit Virtual Reality Anwendungen vertraut. Die Übertragbarkeit der Ergebnisse der Studie auf andere Anwendungsfälle könnte durch die Technikaffinität der Probanden und Probandinnen eingeschränkt sein.

## 5.4 Ergebnisse

Anhand der Ergebnisse der durchgeführten Benutzerstudie wurde deutlich, dass die von Murata und Iwase (2001, 10) präsentierte dreidimensionale Gleichung für den Index of Difficulty für die Verwendung in Virtual Reality Anwendungen besser geeignet ist, als die eindimensionale, von Shannon (1948, 1) veröffentlichte, Gleichung für den Index of Difficulty. Die Korrelation zwischen dem dreidimensionalen Index of Difficulty und der Bewegungszeit war sowohl in dem Test, der eine Feldgröße von  $80^\circ$  verwendete, als auch im Test mit einer Feldgröße von  $360^\circ$  höher, als die Korrelation zwischen dem eindimensionalen Index of Difficulty und der Bewegungszeit (sowohl für Pearson's, als auch für Spearman's Korrelationskoeffizienten). Das ist ein Hinweis darauf, dass der Index of Difficulty, mit einem zusätzlichen Parameter für den Annäherungswinkel, in VR Anwendungen besser repräsentiert werden kann. Auch die Verwendung von  $A'$  (siehe Abbildung 8) an der Stelle von  $A$  für die Berechnung des Index of Difficulty, konnte einen marginal höheren Korrelationskoeffizienten erzielen. Da der Unterschied zwischen den mit  $A'$  anstelle von  $A$  berechneten Korrelationen aber derart gering ausfällt, gilt es Abzuwägen ob diese Optimierung die zusätzliche Komplexität und den zusätzlichen Rechenaufwand wert ist. Die höchsten Korrelationskoeffizienten wurden sowohl für den Test mit dem  $80^\circ$  Feld, als auch für den Test mit dem  $360^\circ$  Feld, mithilfe des dreidimensionalen Index of Difficulty unter der Verwendung von  $A'$  erzielt und lagen für den  $80^\circ$  Test bei einem Wert von 0,67 und für den  $360^\circ$  Test bei 0,53 (siehe Kapitel 4.3.2). Die von verschiedenen Arbeiten (unter anderem von Fitts (1954, 9), MacKenzie (1992, 19) und Wobbrock und Cutrell (2008, 1)) berichteten Korrelationskoeffizienten, lagen für eindimensionale Aufgabenstellungen mit dem eindimensionalen Index of Difficulty aber deutlich höher, mit Werten von über 0,9. Das lässt darauf schließen, dass für VR Anwendungen das dreidimensionale Modell für den Index of Difficulty zwar eine klare Verbesserung gegenüber dem eindimensionalen Modell darstellt, aber noch viel Potential für Optimierungen vorhanden ist. Das zeigt auch der deutliche Unterschied der Korrelationskoeffizienten zwischen dem  $80^\circ$  und dem  $360^\circ$  Versuch. Der niedrige Wert für die Korrelation im  $360^\circ$  Versuch liegt zum Großteil an den, sich außerhalb des Blickfeldes befindenden, Zielen. Diese müssen, bevor sie anvisiert und bestätigt werden können, erst lokalisiert werden. Ein Modell, dass diese Beobachtung für Ziele außerhalb des Blickfeldes in Form eines Parameters in den Index of Difficulty mit einfließen lässt, oder eine Gleichung zur Beschreibung des Suchvorgangs mit Fitt's Gesetz kombiniert, könnte somit eine höhere Korrelation mit der Bewegungszeit erzielen. Für Designer und Designerinnen von interaktiven

Elementen in VR Anwendungen gilt es, für eine optimale Interaktionsgeschwindigkeit wichtige Elemente innerhalb des Blickfeldes der Benutzer und Benutzerinnen zu platzieren. Für diese Elemente kann, unter der Verwendung des dreidimensionalen Index of Difficulty, auch eine annehmbar präzise Schätzung zur Bewegungszeit abgegeben werden.

Die Bewegungszeiten stiegen mit dem Erhöhen des Abstandes zwischen den Versuchspersonen und den Zielen an (siehe Kapitel 4.2). Signifikanztests ergaben sowohl im 80° Test, als auch im 360° Test, für die Unterschiede der Bewegungszeiten, p-Werte die weit unter 0,001 liegen. Somit ist die steigende Bewegungszeit unter steigendem Radius eine statistisch hoch signifikante Beobachtung. Dass die Bewegungszeiten, bei großem Abstand zwischen den Teilnehmern und Teilnehmerinnen und dem Ziel, höher sind könnte ein Indiz dafür sein, dass die Versuchspersonen ihre Geschwindigkeit auf die schwierigere Aufgabenstellung angepasst haben. Bei einem Vergleich der Bewegungszeiten für Ziele, die sich beim Aktivwerden im Blickfeld der Versuchspersonen befanden und den Bewegungszeiten der Ziele, die sich beim Aktivwerden außerhalb des Blickfeldes der Versuchspersonen befanden, wurde deutlich, dass die Bewegungszeiten für Ziele außerhalb des Blickfeldes im 80° Test und im 360° Test deutlich höher lagen, als die Bewegungszeiten für Ziele innerhalb des Blickfeldes. Diese Beobachtung war statistisch hoch signifikant, mit p-Werten weit unter 0,001. Dass die Zeiten für Ziele außerhalb des Blickfeldes so hoch sind, liegt aber auch daran, dass Ziele außerhalb des 80° Blickfeldes der VR-Brille meist weiter entfernt vom letzten Ziel sind, als Ziele, die sich im 80° Blickfeld befinden. Das führt auch zu deutlich höheren Werten für den Index of Difficulty, der einen großen Einfluss auf die Bewegungszeiten hat.

Die Fehlerraten der Teilnehmer und Teilnehmerinnen stiegen mit dem Erhöhen des Abstandes zwischen den Versuchspersonen und den Zielen an. Diese Beobachtung war allerdings nur bei dem Test mit einer Feldgröße von 360° bei den Unterschieden der Fehlerraten zwischen vier und acht Metern und bei den Unterschieden der Fehlerraten zwischen vier und zwölf Metern statistisch signifikant. Die Höhe, an denen die Ziele positioniert waren, hatte auf die Fehlerraten keinen ersichtlichen oder statistisch signifikanten Einfluss. Auch der Index of Difficulty hatte nur wenig Auswirkung auf die Fehlerrate. Pearson's und Spearman's Korrelationskoeffizienten betrugen zwischen dem ID und der Fehlerrate 0,21. Daraus lässt sich ableiten, dass die Fehlerraten nur wenig von dem Abstand zwischen dem letzten Ziel und dem aktuellen Ziel abhängig sind. Der Abstand zwischen dem aktuellen Ziel und der Versuchsperson hat demnach einen stärkeren Einfluss auf die Fehlerraten.

## 5.5 Ausblick

Mit der Verbreitung von Virtual Reality Anwendungen nimmt auch die Relevanz von Fitt's Gesetz für Virtual Reality Anwendungen zu. In VR Anwendungen können relevante interaktive Objekte rund um Nutzer und Nutzerinnen positioniert sein. Fitt's Gesetz beschreibt allerdings nur die Zeit, die für die Zeigebewegung zu einem interaktiven Zielobjekt benötigt wird. Um für VR Anwendungen ein adäquates Modell zur Bestimmung von Interaktionszeiten zu entwickeln, wird zusätzlich zu Fitt's Gesetz ein Modell benötigt, das den Suchvorgang beschreibt. Die Entwicklung eines Modells, das diese zwei Funktionen vereint, könnte Designern und De-

signerinnen von VR Anwendungen dabei helfen, die Dauer der Suche und Zeige-Interaktion von Benutzern und Benutzerinnen zuverlässiger und genauer vorherzusagen und das Design interaktiver Elemente in der dreidimensionalen virtuellen Realität für die Interaktion mit einem Ray-Cast zu optimieren.

## Abkürzungsverzeichnis

VR	Virtual Reality
ID	Index of Difficulty
MT	Movement Time
W	Größe des Ziels
A	Distanz zum Ziel
A'	Alternative Distanz zum Ziel

## Abbildungsverzeichnis

1	Ray-Cast Interaktion: In Darstellung (a) wird entlang des Strahls nach getroffenen Objekten gesucht. Bei Abbildung (b) wird ein Objekt getroffen und selektiert. . . . .	1
2	Die Aufgabe war es die mittleren Scheiben abwechselnd zu treffen, ohne die beiden seitlichen Scheiben zu berühren. (Fitts 1954, 4) . . . . .	3
3	Fitts' Gesetz ist von Natur aus eindimensional, da die Amplitude (A) und die Breite des Ziels (W) auf der selben Achse liegen, MacKenzie und Buxton (1992, 2). . . . .	5
4	In der Gleichung für den ID wechselt die Rolle von W und H als Breite, wenn sich der Annäherungswinkel von 0° auf 90° ändert, MacKenzie und Buxton (1992, 2). . . . .	5
5	Die Definition von 1D, 2D und 3D Zeige-Aufgaben. (a) 1D Aufgabe: Die Bewegung entlang einer Achse. (b) 2D Aufgabe: Die Bewegung auf einer zweidimensionalen Ebene. (c) 3D Aufgabe: Die Bewegung im dreidimensionalen Raum (Murata und Iwase 2001, 2). . . . .	7
6	Die verschiedenen Positionen der Ziele im Experiment von Murata und Iwase (2001, 2). $\theta$ entspricht den angegebenen Winkeln. . . . .	7
7	Das Sichtfeld der VR-Brille. Horizontal 80° (-40° bis 40°) und vertikal 80° (-40° bis 40°). . . . .	8
8	Die Distanz zwischen zwei Zielen in unterschiedlichen Varianten. Direkte Distanz A (grün). Distanz entlang des Umfangs A' (blau). . . . .	8
9	Die in Unity entwickelte Testumgebung. . . . .	9
10	Die in Unity entwickelte Testumgebung von oben. . . . .	10
11	Die Seitenansicht der in Unity entwickelten Testumgebung. . . . .	11
12	Der Ablauf der Benutzerstudie. . . . .	12
13	Die Fehlerraten bei variierendem Radius (n = 10, N = 2620). . . . .	15

14	Die Fehlerraten bei variabler Höhe ( $n = 10$ , $N = 2620$ ). . . . .	16
15	Die Korrelation zwischen den Fehlerraten (Y-Achse) und dem Index of Difficulty (X-Achse); Regressionsgerade: $y = 1,53x + 4,58$ ; $n = 10$ , $N = 2620$ . . . .	17
16	Die drei verschiedenen Radien auf der X-Achse und deren Bewegungszeiten auf der Y-Achse ( $n = 10$ , $N = 2357$ ). Die Y-Achse der beiden Diagramme ist unterschiedlich skaliert. . . . .	18
17	Die Sichtbarkeit des Ziels beim aktiv werden auf der X-Achse, die Bewegungszeiten auf der Y-Achse ( $n = 10$ , $N = 2357$ ). Die Y-Achse der beiden Diagramme ist unterschiedlich skaliert. . . . .	19
18	Die Korrelation zwischen MT und ID (mit direkter Distanz A); Feldgröße = $80^\circ$ ; Regressionsgerade: $y = 0,21x + 0,14$ ; $n = 10$ , $N = 1168$ . . . . .	20
19	Die Korrelation zwischen MT und ID (mit direkter Distanz A); Feldgröße = $360^\circ$ ; Regressionsgerade: $y = 0,47x + 0,09$ ; $n = 10$ , $N = 1189$ . . . . .	21
20	Die Korrelation zwischen MT und ID (mit A'); Feldgröße = $80^\circ$ ; Regressionsgerade: $y = 0,21x + 0,14$ ; $n = 10$ , $N = 1168$ . . . . .	22
21	Die Korrelation zwischen MT und ID (mit A'); Feldgröße = $360^\circ$ ; Regressionsgerade: $y = 0,41x + 0,00$ ; $n = 10$ , $N = 1189$ . . . . .	23
22	Die Korrelation zwischen MT und ID (Gleichung 11, mit der direkten Distanz für A) unter variierenden Werten für c. Die blauen Linien stellen Pearson's, die roten Linien Spearman's Korrelationskoeffizienten dar. Die schwarzen Punkte markieren den Maximalwert. . . . .	25
23	Index of Difficulty (X-Achse) vs Bewegungszeit (Y-Achse), berechnet mit der Gleichung 11 mit A und den ermittelten Werten für c; $80^\circ$ Feld: $n = 10$ , $N = 1168$ ; $360^\circ$ Feld: $n = 10$ , $N = 1189$ . . . . .	26
24	Die Korrelation zwischen MT und ID (Gleichung 11, mit A' für A) unter variierenden Werten für c. Die blauen Linien stellen Pearson's, die roten Linien Spearman's Korrelationskoeffizienten dar. Die schwarzen Punkte markieren den Maximalwert. . . . .	27
25	Index of Difficulty (X-Achse) vs Bewegungszeit (Y-Achse), berechnet mit der Gleichung 11 mit A' und den ermittelten Werten für c; $80^\circ$ Feld: $n = 10$ , $N = 1168$ ; $360^\circ$ Feld: $n = 10$ , $N = 1189$ . . . . .	28
26	Die Seitenansicht der in Unity entwickelten Testumgebung. Die rechte Hälfte zeigt die implementierte Lösung, die linke Hälfte einen genaueren Ansatz. . . .	30

## Tabellenverzeichnis

1	Die aufgezeichneten Daten für jedes der 132 Ziele. Jede Zeile repräsentiert ein Ziel. . . . .	14
---	---	----



## Literaturverzeichnis

- Bryson, Steve. 1996. »Virtual reality in scientific visualization«. *Communications of the ACM* 39 (5): 62–71. ISSN: 00010782. doi:10.1145/229459.229467.
- Bützler, Jennifer, Sebastian Vetter, Nicole Jochems und Christopher M. Schlick. 2012. »Bivariate pointing movements on large touch screens: Investigating the validity of a refined Fitts' Law«. In *Work*, 41:3526–3532. SUPPL.1. doi:10.3233/WOR-2012-0631-3526.
- Cha, Yeonjoo, und Rohae Myung. 2013. »Extended Fitts' law for 3D pointing tasks using 3D target arrangements«. *International Journal of Industrial Ergonomics* 43 (4): 350–355. doi:10.1016/j.ergon.2013.05.005.
- English, William K., Douglas C. Engelbart und Melvyn L. Berman. 1967. »Display-Selection Techniques for Text Manipulation«. *IEEE Transactions on Human Factors in Electronics* HFE-8 (1): 5–15. ISSN: 21682852. doi:10.1109/THFE.1967.232994.
- Fitts, Paul M. 1954. »The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement«. *Journal of Experimental Psychology* 47 (6): 381–391. ISSN: 00221015. doi:10.1037/h0055392.
- Galen, Gerard P. van, und Willem P. de Jong. 1995. »Fitts' law as the outcome of a dynamic noise filtering model of motor control«. *Human Movement Science* 14 (4-5): 539–571. doi:10.1016/0167-9457(95)00027-3.
- Grossman, Tovi, und Ravin Balakrishnan. 2004. »Pointing at Trivariate Targets in 3D Environments«. *Proceedings of the 2004 conference on Human factors in computing systems - CHI '04* 6 (1): 447–454. doi:10.1145/985692.985749.
- . 2005. »A probabilistic approach to modeling two-dimensional pointing«. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction* 12 (3): 435–459. doi:10.1145/1096737.1096741.
- . 2006. »The design and evaluation of selection techniques for 3D volumetric displays«. In *Proceedings of the 19th annual ACM symposium on User interface software and technology - UIST '06*, 3. ISBN: 1595933131. doi:10.1145/1166253.1166257.
- Hand, Chris. 1997. *A survey of 3D interaction techniques*. doi:10.1111/1467-8659.00194.
- Jagacinski, R J, D W Repperger, S L Ward und M S Moran. 1980. »A test of Fitts' law with moving targets.« *Human factors* 22 (2): 225–233. doi:10.1177/001872088002200211.
- Jagacinski, Richard J., und Donald L. Monk. 1985. »Fitts' law in two dimensions with hand and head movements«. *Journal of Motor Behavior* 17 (1): 77–95. doi:10.1080/00222895.1985.10735338.

- Kvålseth, Tarald O. 1981. »An Experimental Paradigm for Analyzing Human Information Processing During Motor Control Tasks«. *Proceedings of the Human Factors Society Annual Meeting* 25 (1): 581–585. doi:10.1177/1071181381025001152.
- Looser, Julian, Andy Cockburn und Joshua Savage. 2005. »On the Validity of Using First-Person Shooters for Fitts' Law Studies«. *People and Computers XIX* (2): 33–36.
- Mac Kenzie, I. Scott. 1989. »A note on the information-theoretic basis for fitts' law«. *Journal of Motor Behavior* 21 (3): 323–330. doi:10.1080/00222895.1989.10735486.
- MacKenzie, I. Scott. 1992. »Fitts' Law as a Research and Design Tool in Human-Computer Interaction«. *Human-Computer Interaction* 7 (1): 91–139. ISSN: 15327051. doi:10.1207/s15327051hci0701\_3. arXiv: 9780201398298.
- MacKenzie, I. Scott, und William Buxton. 1992. »EXTENDING FITTS' LAW TO TWO-DIMENSIONAL TASKS INTRODUCTION Since the advent of direct manipulation«. *ACM CHI'92 Conference*: 219–226. ISSN: 0897915135. doi:10.1145/142750.142794.
- MacKenzie, I. Scott, Tatu Kauppinen und Miika Silfverberg. 2001. »Accuracy measures for evaluating computer pointing devices«. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems - CHI '01*, 9–16. ISBN: 1581133278. doi:10.1145/365024.365028. arXiv: arXiv:1204.3596v1.
- Murata, Atsuo. 1996. »Empirical evaluation of performance models of pointing accuracy and speed with a PC mouse«. *International Journal of Human-Computer Interaction* 8 (4): 457–469. doi:10.1080/10447319609526164.
- Murata, Atsuo, und Hirokazu Iwase. 2001. »Extending fitts' law to a three-dimensional pointing task«. *Human Movement Science* 20 (6): 791–805. ISSN: 01679457. doi:10.1016/S0167-9457(01)00058-6.
- Seow, Steven C. 2005. *Information theoretic models of HCI: A comparison of the Hick-Hyman Law and Fitt's Law*. doi:10.1207/s15327051hci2003\_3.
- Shannon, Claude Edmund. 1948. »A Mathematical Theory of Communication«. *Bell System Technical Journal* 5 (3): 3. doi:10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x.
- Spearman, Charles. 1904. »Spearman's rank correlation coefficient«. *Amer. J. Psychol.* 15:72–101. doi:10.1136/bmj.g7327.
- Weisburd, D., und C. Britt. 2007. *Statistics in Criminal Justice*. Springer US. ISBN: 9780387341125. <https://books.google.at/books?id=-mY7xu2AjpgC>.
- Wobbrock, Jo, und Edward Cutrell. 2008. »An error model for pointing based on Fitts' law«. *Chi'08*: 1613. ISSN: 978-1-60558-011-1. doi:10.1145/1357054.1357306.
- Woodworth, R. S. 1899. »The accuracy of voluntary movement«. *Journal of Nervous and Mental Disease* 26 (12): 743–752. doi:10.1097/00005053-189912000-00005.

- Yoshimura, Tetsuya, Yasuhiro Nakamura und Masataka Sugiura. 1994. »3D direct manipulation interface: Development of the Zashiki-Warashi system«. *Computers and Graphics* 18 (2): 201–207. doi:10.1016/0097-8493(94)90094-9.

## Appendix

### A git-Repository

Das git-Repository auf dem MMT-git-Server `gitlab.mediacube.at` enthält folgende Daten:

- LaTeX-Code der finalen Version der Arbeit
- Alle Publikationen, die als pdf verfügbar sind
- Unity Projekt und Quellcode für den praktischen Teil
- Vorlage der Einverständniserklärung
- Eingescannte und ausgefüllte Einverständniserklärung
- Rohdaten und aufbereitete Daten der Evaluierungen (Log-Daten, Tabellen, Graphen, Scripts, ...)

Link zum Repository auf dem MMT-git-Server `gitlab.mediacube.at`: <https://gitlab.mediacube.at/fhs36535/Abschlussarbeiten-Lukas-Machegger>

### B Vorlagen für Studienmaterial

Die Vorlage der Einverständniserklärung für die Durchführung der Benutzerstudie:

# Einverständniserklärung zur Teilnahme an der Studie

## I. Zweck der Teilnahme

Ziel der Studie ist es, Interaktion in einer 3 dimensionalen Umgebung zu vergleichen. Dazu wird in einem Test die Dauer der Interaktion gemessen und aufgezeichnet.

## II. Regelungen und Durchführung

Meine Teilnahme an dieser Studie ist freiwillig. Mir ist bekannt, dass ich keine Bezahlung für meine Teilnahme erhalte. Ich kann meine Teilnahme an der Studie jederzeit widerrufen oder beenden, ohne dass mir hierdurch ein Nachteil entsteht.

Während der Durchführung der Studie werden die Interaktionsdaten gesichert, dem stimme ich hiermit ausdrücklich zu. Wenn ich mit der Erhebung dieser Daten nicht einverstanden bin, ist eine Teilnahme nicht möglich. Diese Einwilligung kann jederzeit widerrufen werden durch Kontakt mit Herrn Lukas Machegger (Fachhochschule Salzburg GmbH, Urstein Süd 1, 5412 Puch/Salzburg, Austria, [lmachegger.mmt-b2013@fh-salzburg.ac.at](mailto:lmachegger.mmt-b2013@fh-salzburg.ac.at)), was jedoch die Rechtmäßigkeit der bis dahin erfolgten Datenverwendung nicht berührt. Sie werden sodann von der Auswertung ausgesondert. Zudem besteht das Recht auf Auskunft, Richtigstellung und Löschung, das durch Kontaktaufnahme mit Herrn Lukas Machegger (Lukas Machegger ([lmachegger.mmt-b2013@fh-salzburg.ac.at](mailto:lmachegger.mmt-b2013@fh-salzburg.ac.at))) geltend gemacht werden kann.

Die Studie wird von **Lukas Machegger** MMT-Bachelor Student der Fachhochschule Salzburg GmbH, durchgeführt und ausgewertet.

Ich räume hiermit der Fachhochschule Salzburg GmbH unentgeltlich und ausschließlich alle Verwertungsrechte (Urheber- und Leistungsschutz- und Werknutzungsrechte), die aus der Mitwirkung entstehen können, für alle Nutzungsarten inhaltlich, zeitlich und örtlich unbeschränkt, ein. Ich verzichte auf das Recht auf Namensnennung.

Zudem räume ich der Fachhochschule Salzburg sämtlich Patent-, Marken-, Muster-, Gebrauchsmusterrechte ein, dies sich aus der Fokusgruppe ergeben können, einschließlich dem Recht diese auch für andere Zwecke als den Zweck dieser Vereinbarung zu nutzen, insbesondere für weiter Forschungen oder die Teilnahme an Forschungs Kooperationen sowie für gewinnbringende oder kommerzielle Zwecke.

## III. Datenschutz

Die Aufzeichnungen der Studie werden ausschließlich von Lukas Machegger vorgenommen. Die Messwerte werden während der Bachelorarbeit ausschließlich auf der eigenen Infrastruktur gespeichert. Die Aufzeichnungen werden vertraulich behandelt und nicht weitergegeben. Sämtliche Aufzeichnungen werden mit Abschluss der Bachelorarbeit gelöscht.

Die Daten werden nach ihrer Auswertung ausschließlich anonymisiert weiterverwendet, sodass keine Rückschlüsse auf einzelne TeilnehmerInnen möglich sind. Die ausgewerteten Daten werden für wissenschaftliche Zwecke (z. B. Publikationen) genutzt, wobei weiterhin eine vollständige Anonymität gewährleistet ist.

#### **IV. Zustimmung**

Ich habe sämtliche Seiten (2) dieser Einverständniserklärung gelesen und verstanden. Alle meine Fragen wurden zu meiner Zufriedenheit beantwortet und ich stimme hiermit der freiwilligen Teilnahme an der Studie, sowie der Verwendung der anonymisierten Daten zu Forschungszwecken zu. Zudem habe ich eine Kopie dieser Einverständniserklärung erhalten.

---

Name der TeilnehmerIn in Blockbuchstaben

---

Datum, Unterschrift

#### **Weitere Informationen**

FACHHOCHSCHULE SALZBURG GmbH  
Salzburg University of Applied Sciences  
Urstein Süd 1 | 5412 Puch/Salzburg | Austria

Lukas Machegger  
+43 650 44 515 66  
lmachegger.mmt-b2013@fh-salzburg.ac.at

Michael Domhardt  
[www.fh-salzburg.ac.at](http://www.fh-salzburg.ac.at)  
Gerichtsstand Salzburg | FN166054y

**C Archivierte Webseiten**

<https://web.archive.org/web/20180731022958/https://unity3d.com>, letzter Zugriff 31.07.2018

<https://web.archive.org/web/20180801141838/https://www.vive.com/us/product/vive-virtual-reality-system/>, letzter Zugriff 01.08.2018

<https://web.archive.org/web/20180731001019/https://matplotlib.org/>, letzter Zugriff 31.07.2018

<https://web.archive.org/web/20180729022852/http://www.numpy.org/>, letzter Zugriff 29.07.2018

<https://web.archive.org/web/20180731001019/https://seaborn.pydata.org/>, letzter Zugriff 31.07.2018